



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:	Kateřina Wiecková
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Petra Ohnišř'ová
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 desing 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 Píškovi, CSc. za podporu a motivaci. Také děkuji panu Jiřimu 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 vřetene	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	Opotřebením 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	NÁVRH CNC PROGRAMU PRO FRÉZOVÁNÍ KAPES V LETECKÝCH SLITINÁCH	40
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	VERIFIKACE CNC PROGRAMU	66
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].

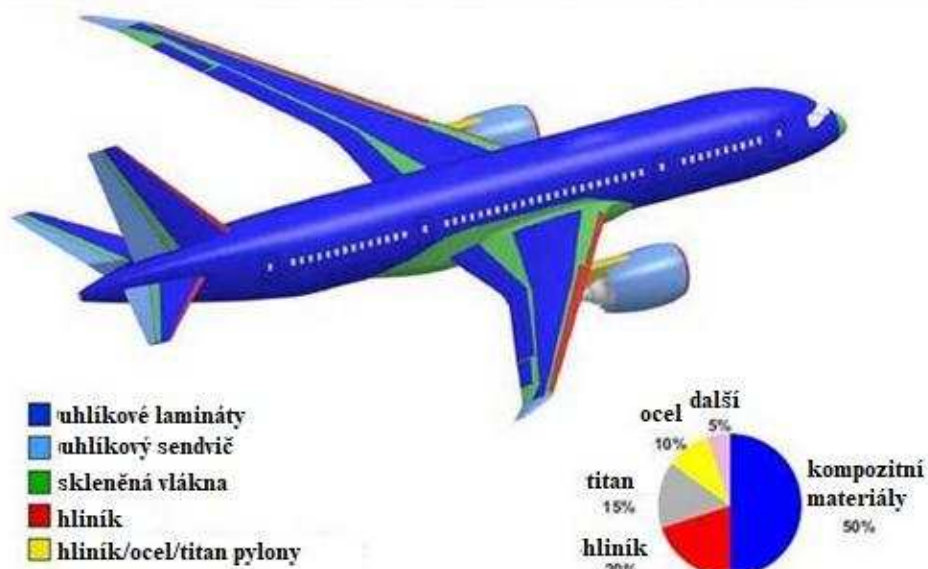
S ohledem na váhové limity letadel v provozních podmínkách je mnoho součástek odlehčováno tak, aby byly zachovány jejich funkční vlastnosti, avšak objem materiálu byl co nejmenší. V případě součástek vyráběných konvenčními technologiemi frézování nebo soustružení je odebráno mnohdy až 90 % materiálu [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 FeTiO_3 , rutil TiO_2 , perovskit CaTiO_3 a titanit CaTiSiO_5 . Průmyslové procesy získávání titanu jsou složité a energeticky náročné. Nejčastěji se titan získává z chloridu 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 ³
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

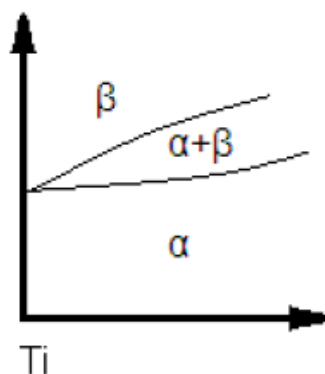
Při zvýšených teplotách je titan reaktivní s nekovy (např.: dusík, uhlík, křemík, halogeny), ale je velmi odolný vůči korozi (i elektrochemické). Pasivací titanu, vytvořením ochranné vrstvy na jeho povrchu, nejčastěji kyselinou dusičnou, dosahuje ještě lepších protikorozních vlastností, díky kterým odolává 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].



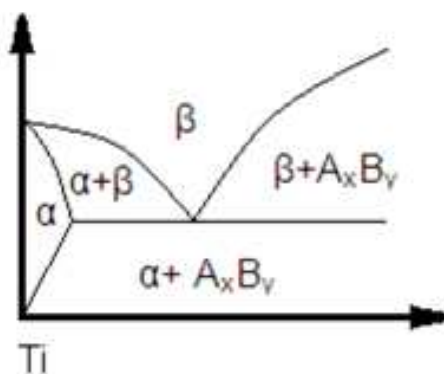
α stabilizační

(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].



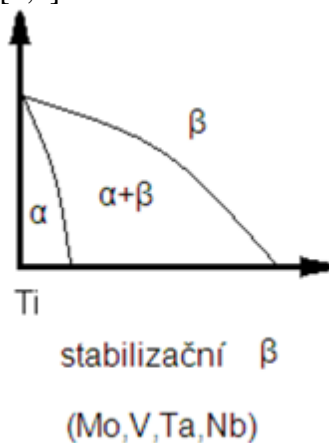
stabilizační $\alpha + \beta$

(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 β , 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 mohou 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 žhánání, 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 zkrhčuje povrchová vrstva. Při obrábění titanu dochází k velice rychlému zpevňování povrchu, a to má za následek rychlejší tupení nástrojů. Dalším nežádoucím faktorem je

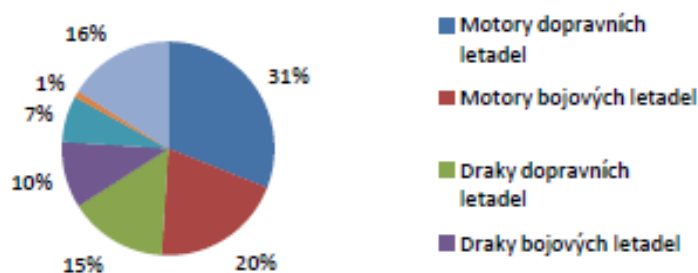
snadná vznětlivost titanového prachu. Při obrábění je potřeba intenzivněji ochlazovat, častěji ostřit nástroje a v ideálním případě používat stroje, které umožňují nižší rychlosti obrábění, aby nedocházelo k navařování třísek k nástroji (tvorbě tzv. nárůstku), způsobené adhezí materiálů a silným přehříváním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

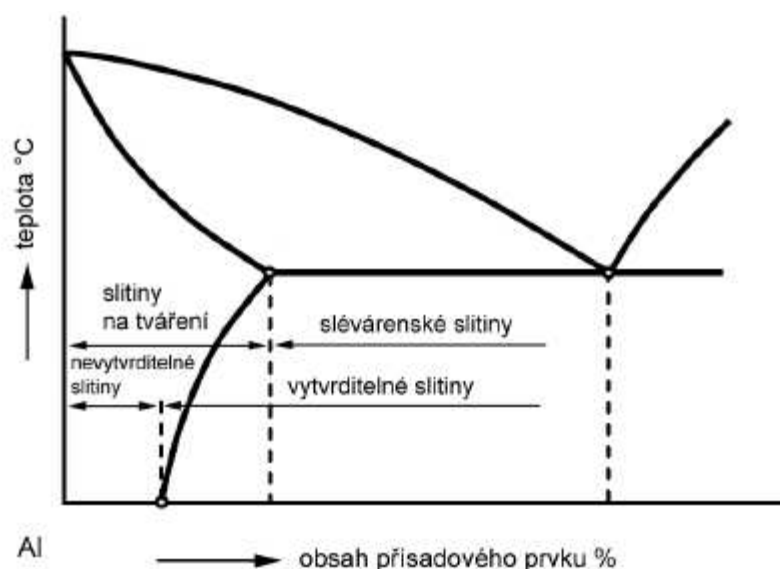
Vlastnost	Hodnota
Hustota	2700 kg/m ³
Skupenství	Pevné
Tvrdość (Mohsova stupnice tvrdosti)	2,75
Magnetické chování	Paramagnetický
Teplota tání	660,32 °C (933,47 K)
Teplota varu	2 519 °C (2 792,15 K)
Barva	Bělavě šedá

1.2.2 Chemické vlastnosti a struktura

Hliník je vysoce reaktivní prvek. Při kontaktu s kyslíkem se na jeho povrchu vytváří vrstva oxidu hlinitého (Al₂O₃) 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].

Tvrdoost

Hliník je měkký a dobře kujný kov. Tyto jeho vlastnosti způsobují obtíže při třískovém obrábění. Tvrdoost 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 tříska, která musí být při obrábění odstraňována. K získání krátké a lámavé třísky se do slitin přidává měď. Problémem je časté vytváření nárůstku na nástroji v důsledku adheze mezi nástrojem a obráběným materiálem. Nárůstek vzniká nalepováním/nařování třísky 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 křídel, vzpěry křídel, 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 drobnou 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].

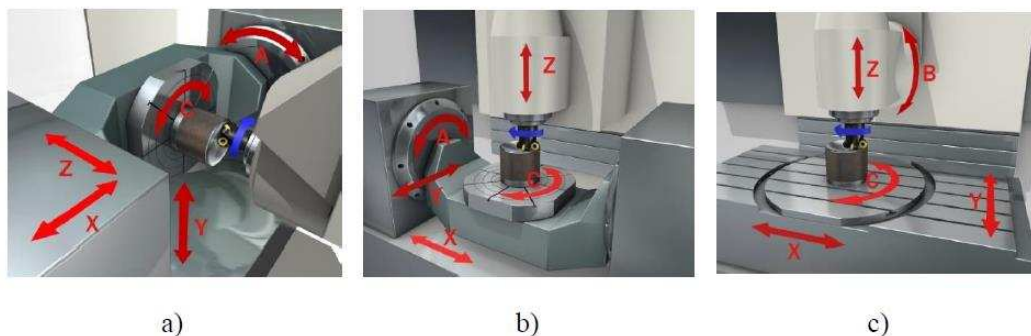


Obr. 2. 3 CNC obráběcí centrum [55].

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	



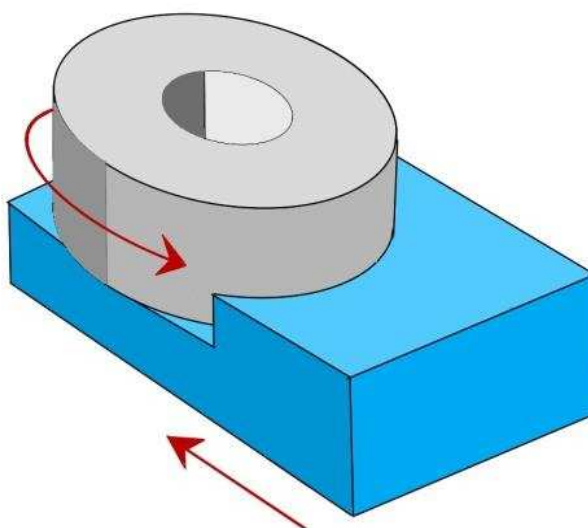
Obr. 2.4 Rozložení pohybů CNC obráběcího centra [22]: a) horizontální obráběcí centrum pětiosé, b) vertikální obráběcí centrum s pátou osou A, c) vertikální obráběcí centrum s pátou osou B.

2.2 Základní operace frézování

2.2.1 Frézování rovinných ploch

Frézování rovinných ploch čelními frézami

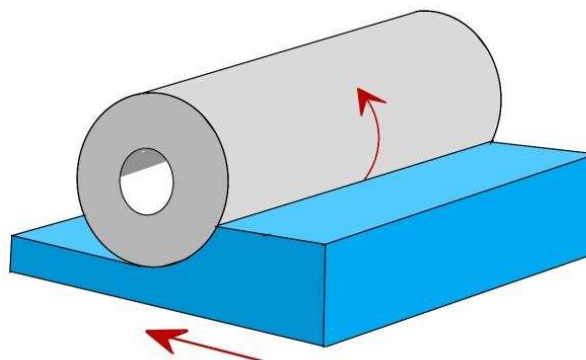
Osa frézy je při čelním frézování kolmá k obráběné ploše (Obr. 2.5). Čelní frézování se nejčastěji využívá k rovinnému obrábění. Čelní frézování se dělí na symetrické a nesymetrické. Nástroje používané pro čelní frézování jsou válcové čelní frézy, u kterých dochází k dělení třísky břity na obvodu i částečně 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

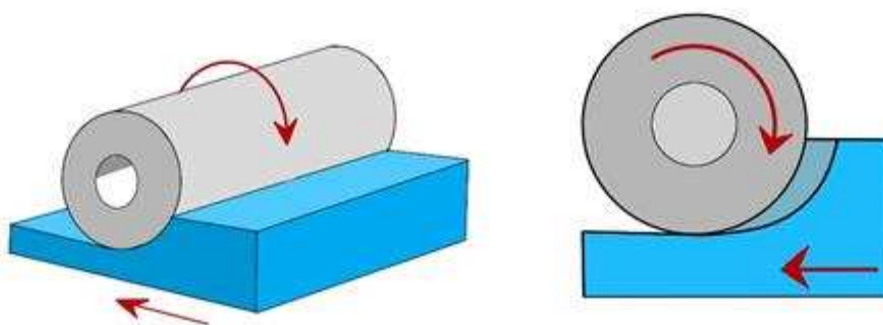
Osa nástroje je při frézování rovinných ploch válcovými frézami rovnoběžná s obráběnou plochou (Obr. 2.6). Materiál je obráběn pouze břity na obvodu nástroje. Zatížení je nerovnoměrné a vznikají vibrace, v důsledku čehož je ovlivněna kvalita povrchu. Průběh vytváření třísky závisí na směru otáčení frézy 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.

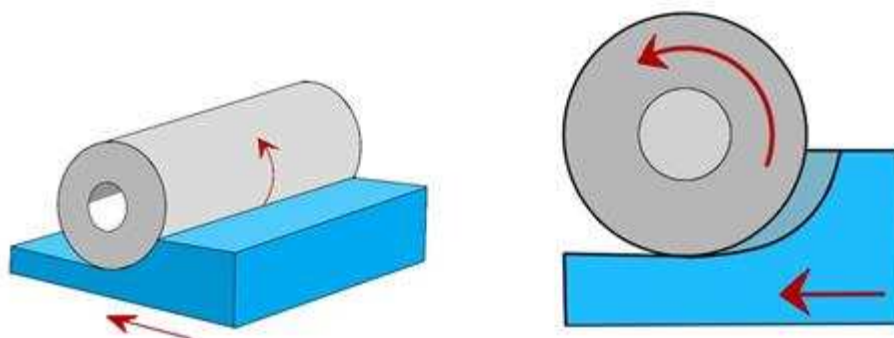
Tab 2. 2 Výhody a nevýhody sousledného frézování [35].

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].



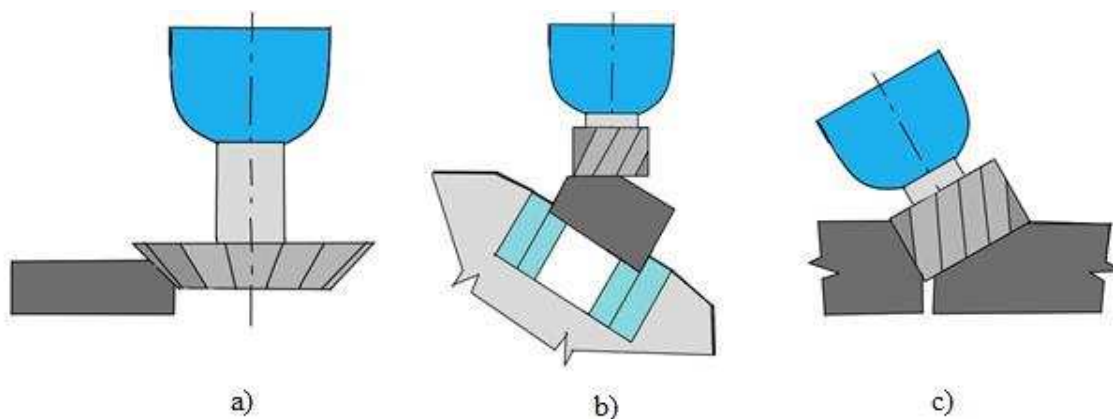
Obr. 2.8 Nesousledné frézování.

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)).

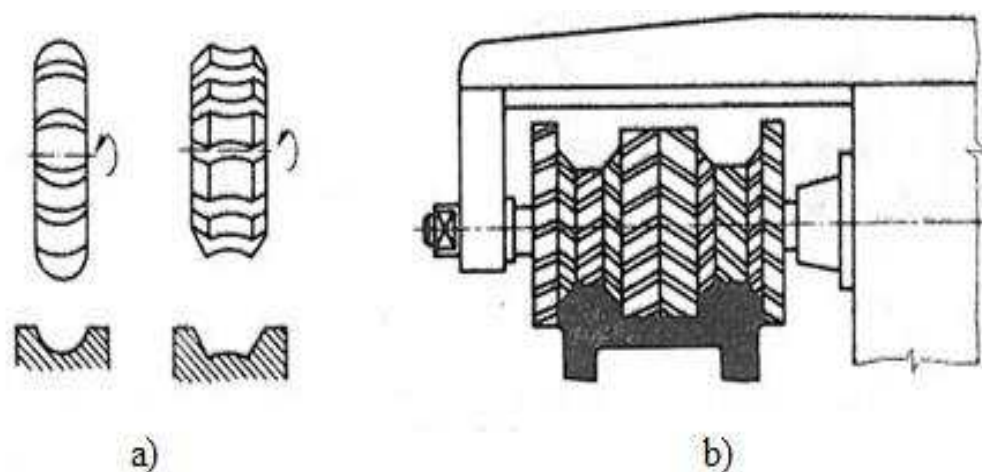


Obr. 2.9 Frézování šikmých ploch pomocí: a) frézy se šikmou řeznou plochou hlavy, b) natočením obrobku, c) natočením frézovací hlavy.

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

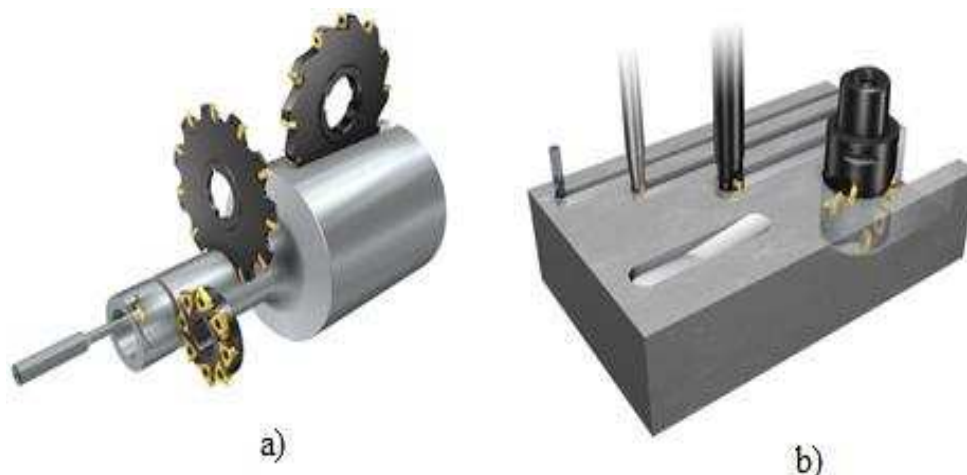
NC a CNC strojích, kde mohou být obráběny ve více osách (závisí na možnostech řídicího systému) [36, 71].



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

2.2.4 Frézování drážek

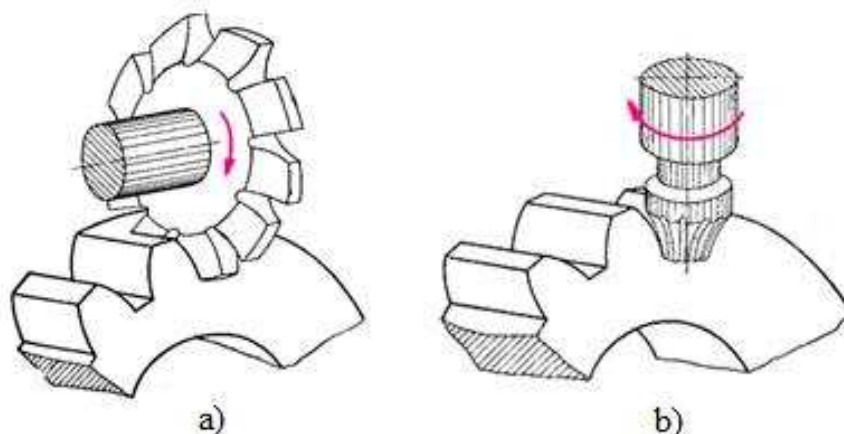
Frézování drážek se může provádět pomocí kotoučových fréz (Obr. 2. 11 a)) nebo pomocí stopkových fréz (Obr. 2. 11 b)) [32].



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

2.2.5 Frézování ozubených kol

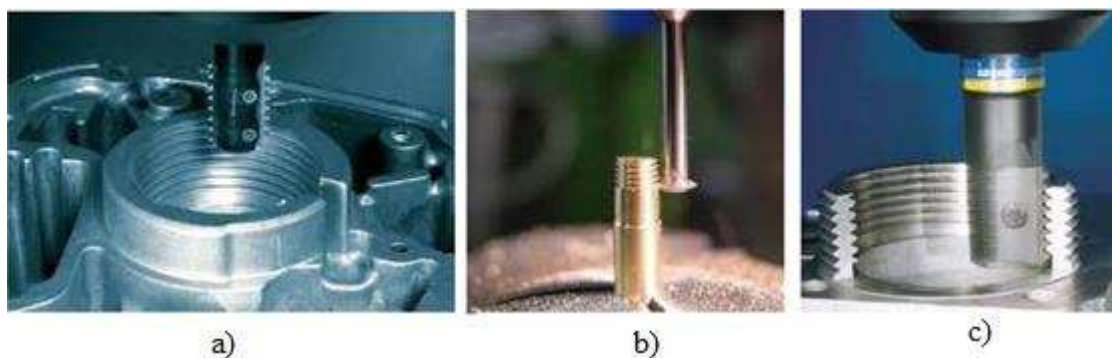
Frézování ozubených kol se dělí na frézování tvarovými nástroji dělicí metodou (profilovými frézami) a to kotoučovými frézami (modulové) viz Obr. 2. 12 a) a stopkovými profilovými frézami (palcové) jak je znázorněno na obrázku 2. 12 b), odvalováním, obrážením nebo hoblováním [56].



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 o 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

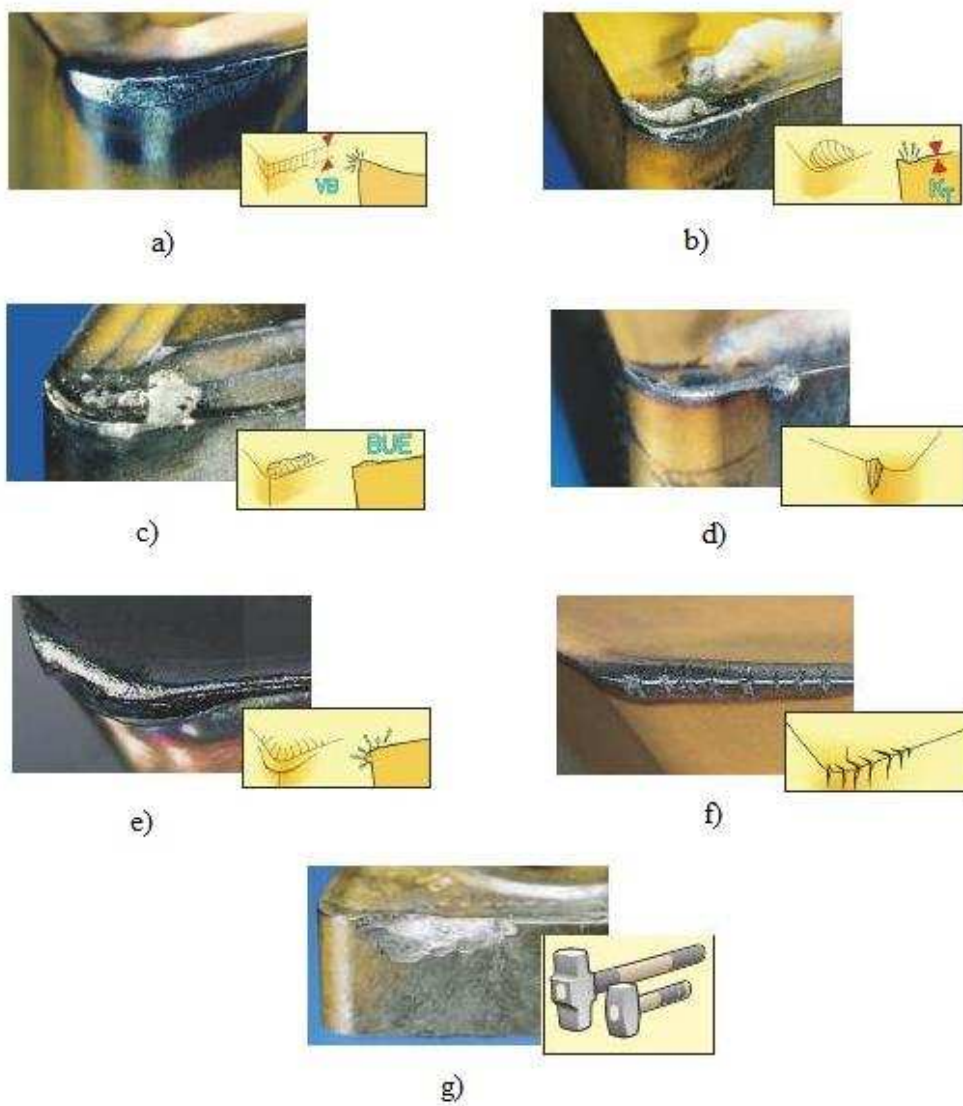
Jedná se o chemický vliv na proces obrábění. Při vysokých rezných teplotách se vytvoří ve styku čela nástroje a třísky tenká tekutá fáze, která je unášena třískou a tím může docházet k vymílání čela nástroje (Obr. 2. 15 b)) [32, 61].

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].

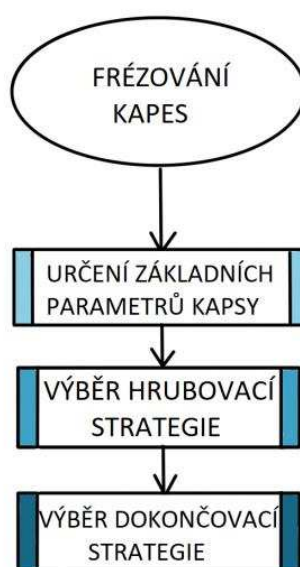


Obr. 2. 15 Opořebení nástroje: a) abrazi, b) difúzí, c) oxidací d) lom e) adhezí [32].

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].

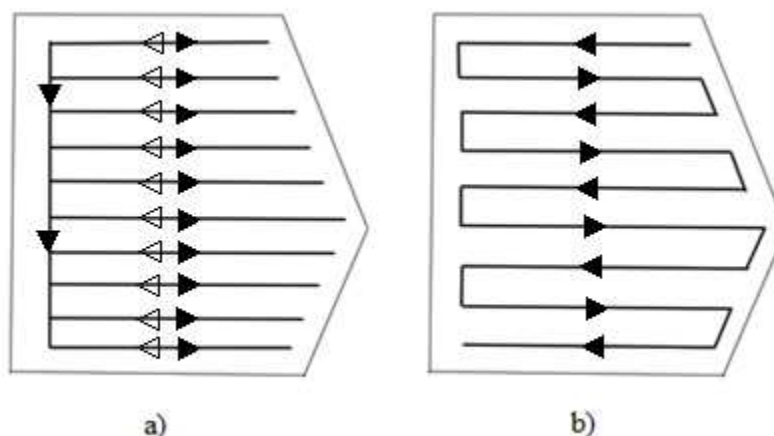
2.4.1 Strategie řádkováním

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 nejúčinnějších strategií frézování kapes [28].



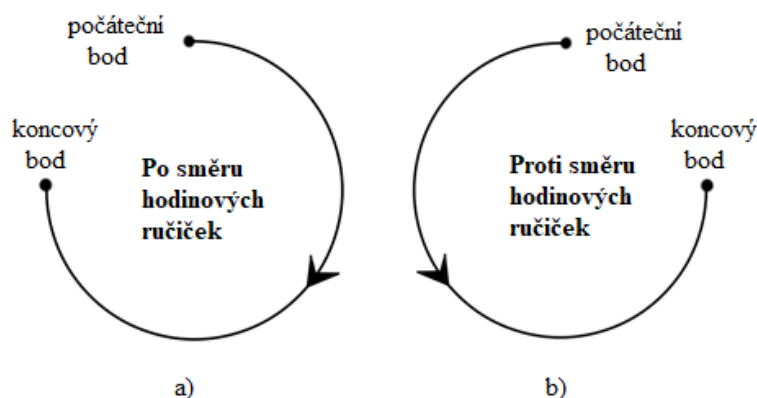
Obr. 2. 17 Strategie řádkování: a) jednosměrné, b) oboustranně.

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

Výhody	Nevýhody
Produktivita	Potřeba dokončování
Dobrá kvalita obroběného 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 vyjždět 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].

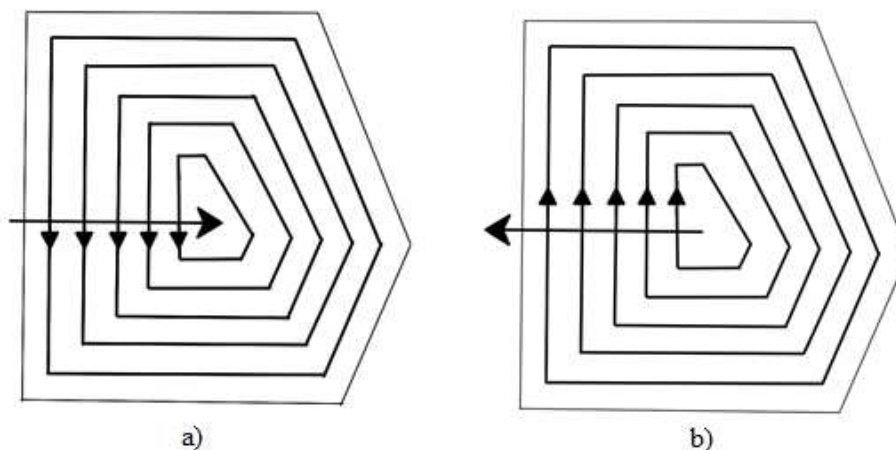
Výhody	Nevýhody
Produktivita	Nevhodné pro komplexnější tvary kapes
Vhodné pro kruhové kapsy	

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

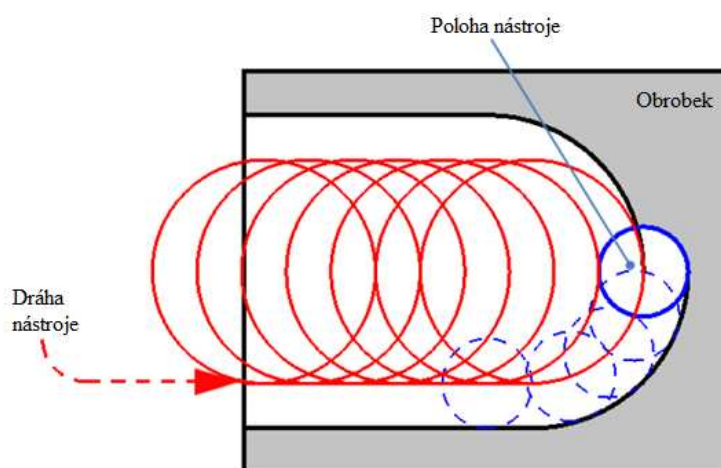
2.4.4 Trochoidní frézování

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	

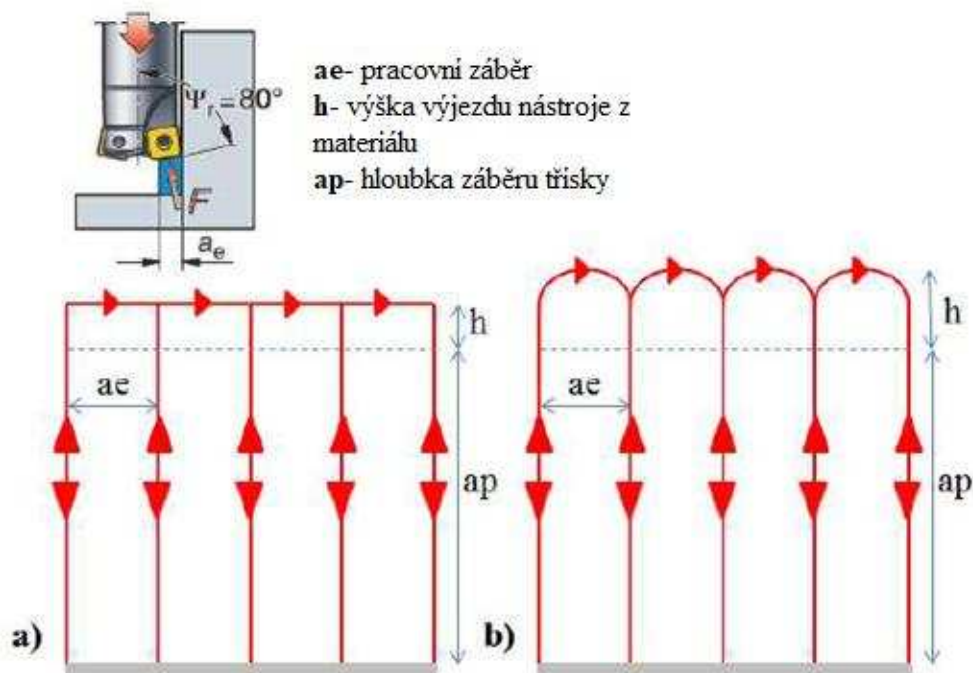
2.4.5 Ponorné frézování

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, reznou 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].

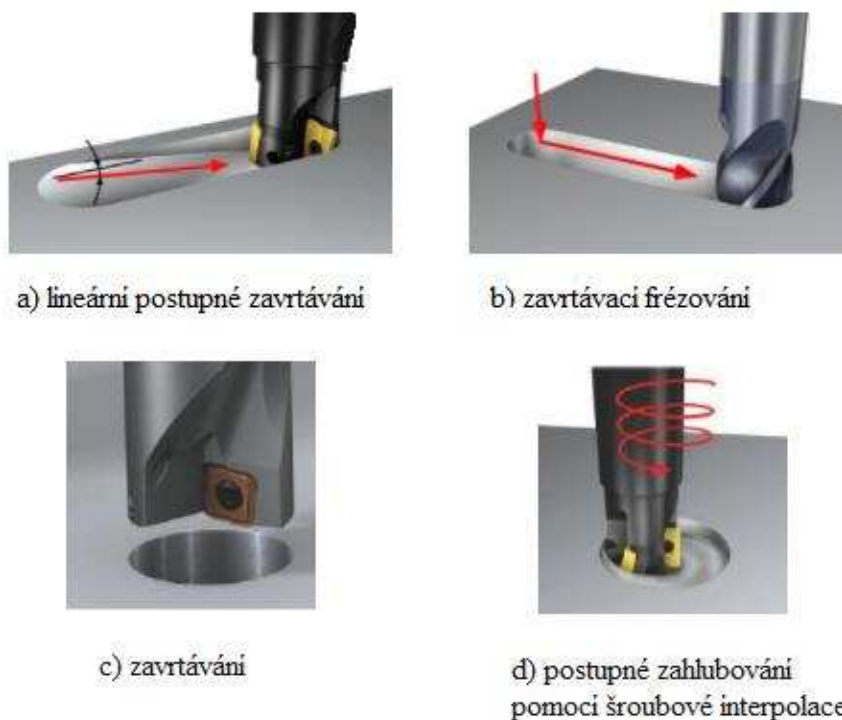
Výhody	Nevýhody
Přesná konfigurace frézování	Nízká rychlost úběru materiálu
Bez vibrací	Neproduktivní pohyby nástroje
Bez ohýbání nástroje	Nutnost dokončování
Lepší drsnost povrchu	

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].

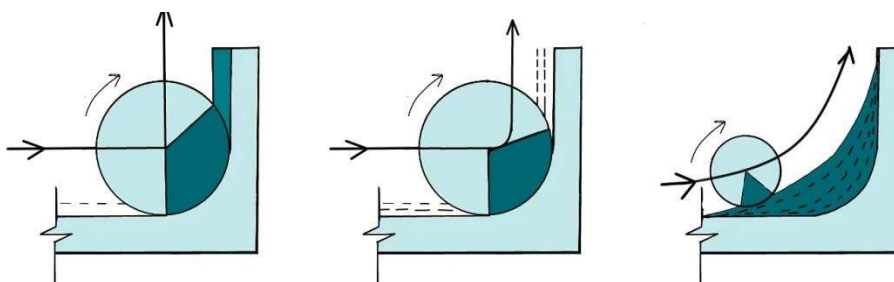


Obr. 2.22 Způsoby vstupování nástroje do materiálu [45].

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° - úběr velkého množství materiálu najednou, b) úhel opásání větší než 90° - opakovaný úběr menšího množství materiálu, c) úhel opásání menší než 90° - více průjezdů nástrojem [45].

Úhel opásání větší než 90°

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°

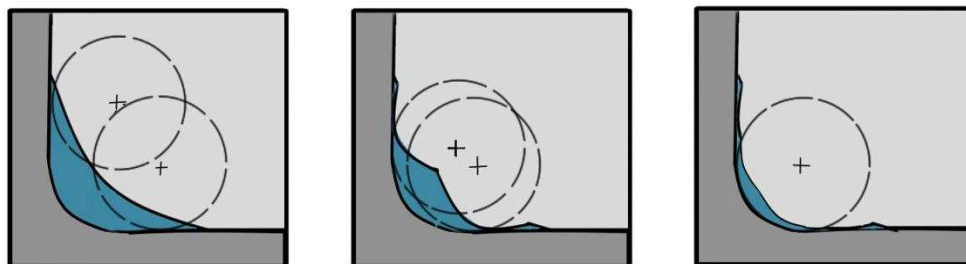
Další možností je využití nástroje, který má menší rádius než obráběný roh (viz Obr. 2.22 c)). Menší průměr nástroje umožňuje řízení úhlu opásání, vyšší rychlost posuvu a lepší kvalitu povrchu. Výhodou je snížení rizik, která nastávají ve „zlomovém bodě“ - místě, kde nástroj mění trajektorii a kde dochází 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.

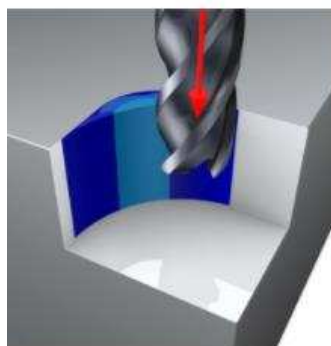
2.4.8 Frézování rohů odvrtáváním

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].

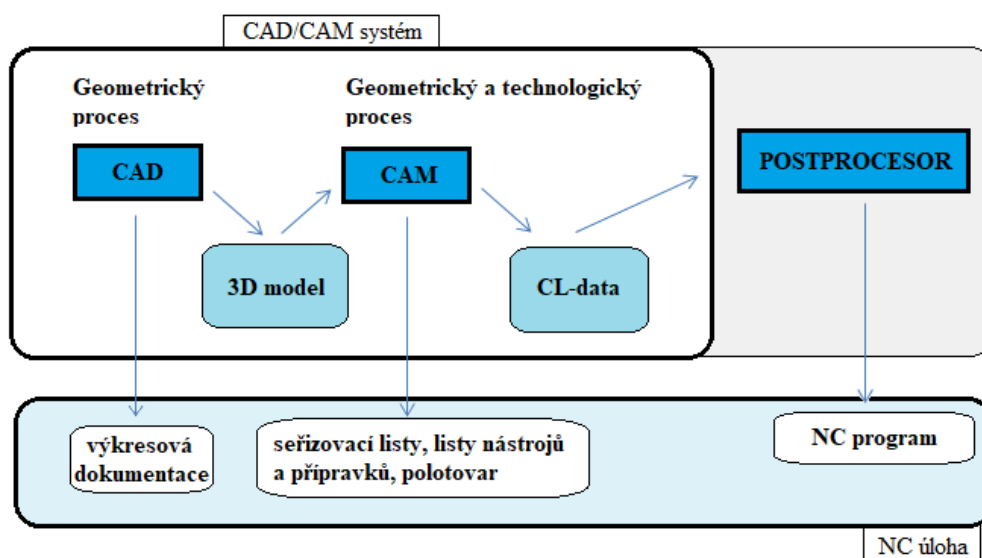


Obr. 2.25 Metoda odvrtávání rohů pro ponorné obrábění ve 3D pohledu [32].

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).

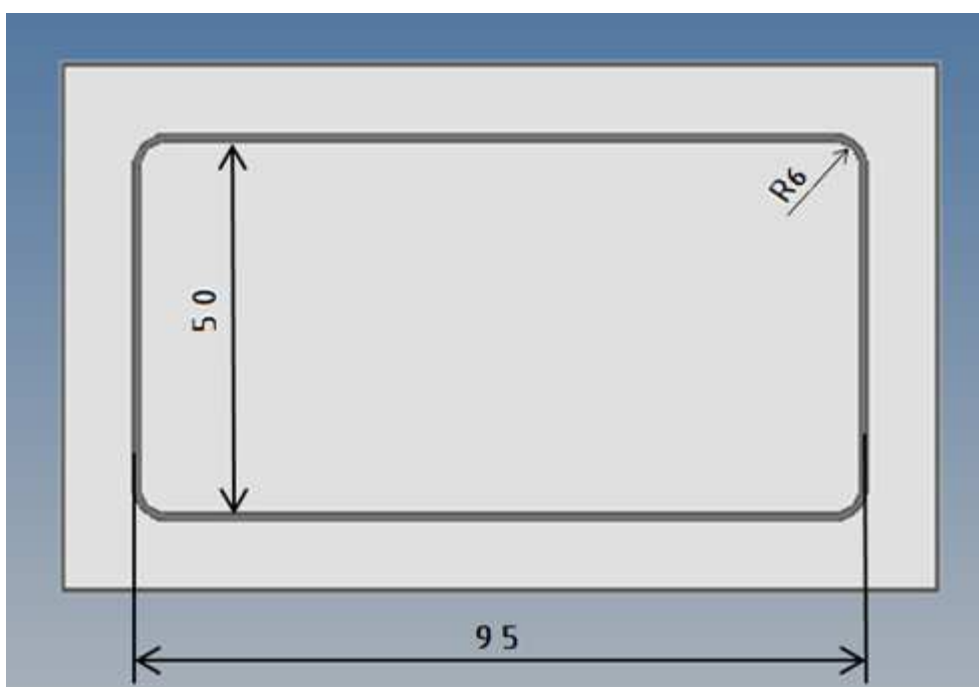
Pomocí těchto kódů je zpracovaný celý příkaz, který je možný upravovat přímo v počítači i stroje.

3.2 CNC programy pro jednoduché kapsy

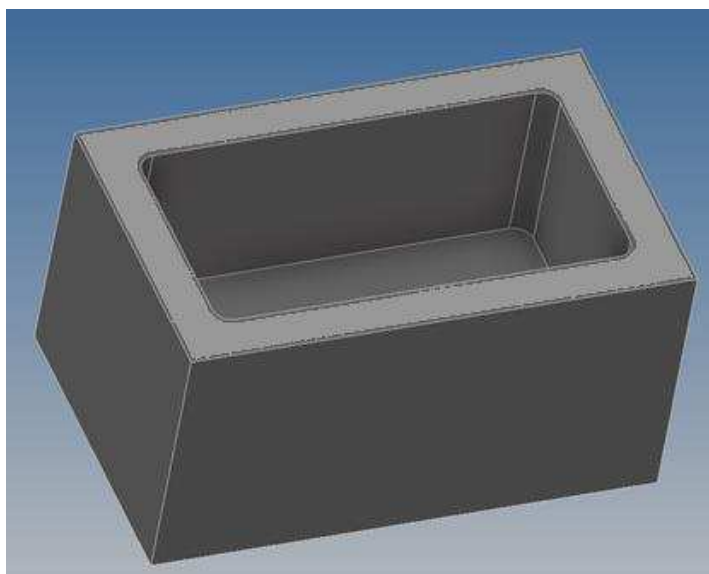
Odlehčení pomocí frézování kapes se využívá například na panelech křídel letadel. V devadesáti procentech případů se jedná o velké množství jednoduchých kapes. Je nutné využít takových strategií, aby všechny kapsy byly obrobny v co nejkratším čase, rozdíly v řádech sekund mohou vypadat nepatrné při obrábění 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	$\alpha = 10^\circ$

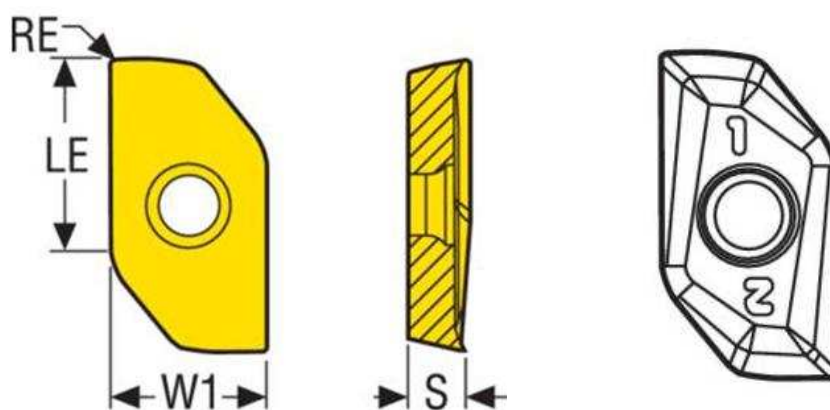
Dopočítané potřebné hodnoty

Tab. 3.4 Dopočítané potřebné hodnoty.

Název	Hodnota
Velikost posuvu	$v_f= 3820$ mm/min
Otáčky vřetene	$n=5093$ min ⁻¹

Tab. 3.5 Parametry PVD destičky [73].

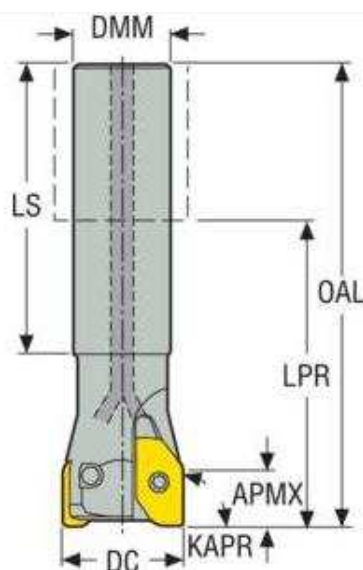
Označení	Popis	Hodnota
Označení destiček	XPkX12T308PDER-E08 H25	
AN	Hlavní úhel hřbetu	11,0 °
CEDC	Počet břitů	2
Třída řezného materiálu	Třída řezného materiálu	H25
Typ třídy	Typ třídy	Karbid bez povlakování
INSL	Délka destičky	18,8 mm
LE	Efektivní délka řezné hrany	12,1 mm
RE	Rohový rádius	0,8 mm
Hmotnost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



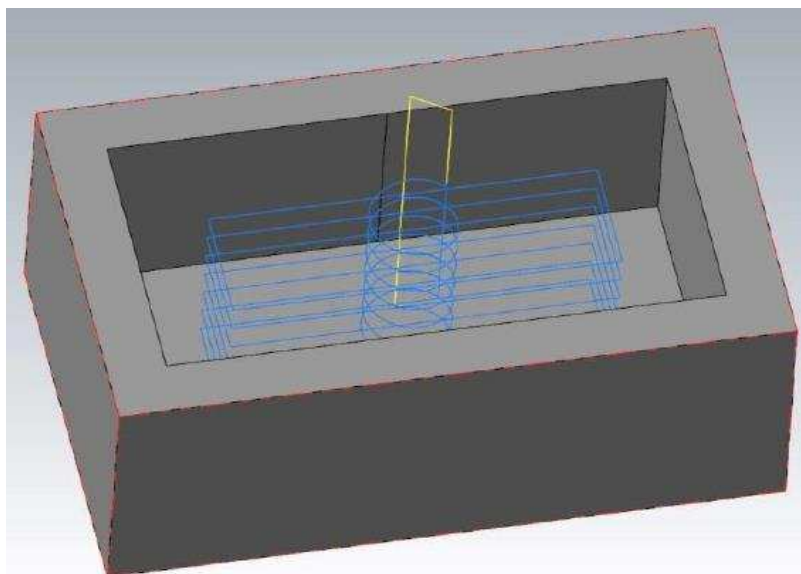
Obr. 3.6 Geometrie nástroje [73].

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.

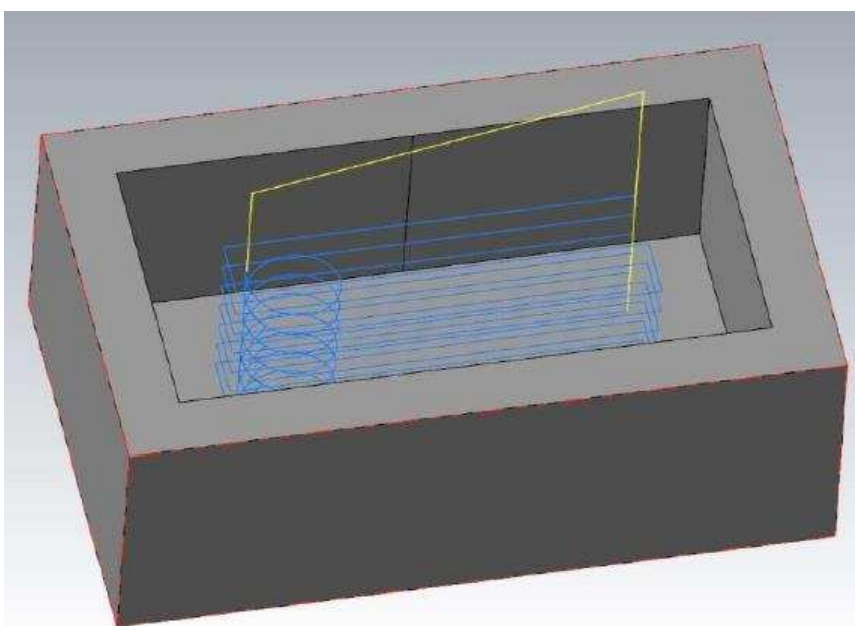
Název	Hodnota
Čas cyklu	38 s

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

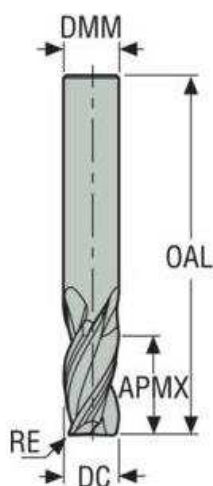
Dopočítané potřebné hodnoty

Tab. 3.12 Dopočítané potřebné hodnoty

Název	Hodnota
Velikost posuvu	$V_f=3580$ mm/min
Otáčky vřetene	$n=9950$ min ⁻¹

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



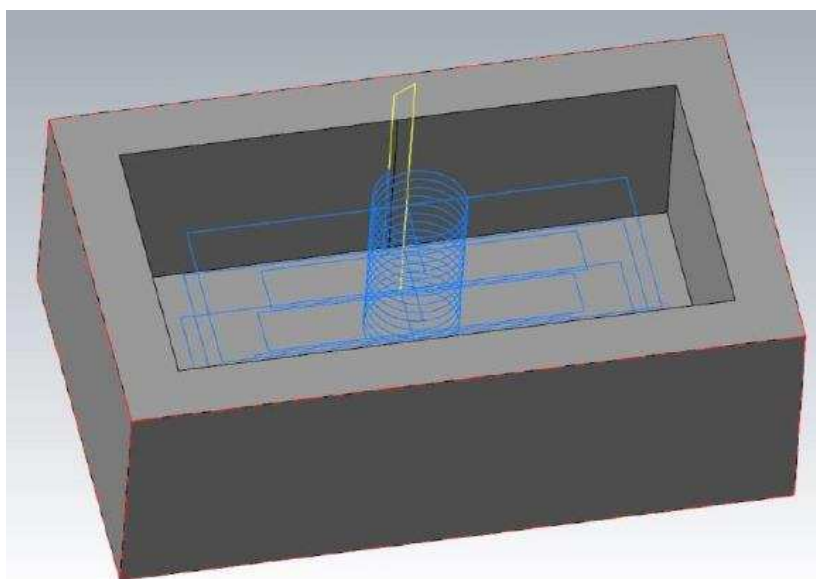
Obr. 3.10 Geometrie nástroje [73].

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

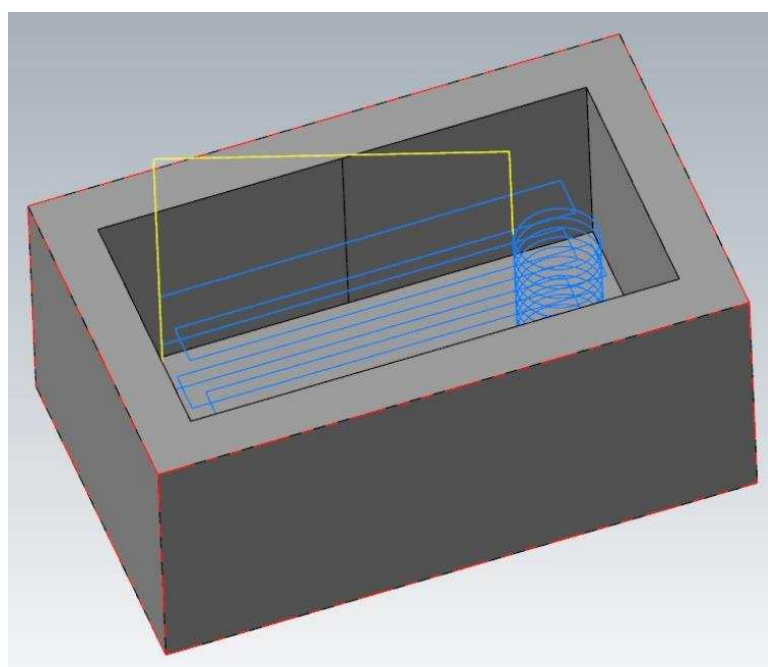
Strategie řádkování

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

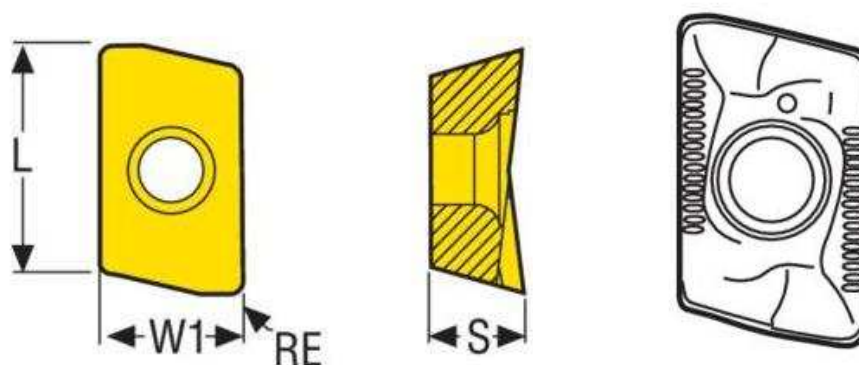
Dopočítané potřebné hodnoty

Tab. 3.19 Dopočítané potřebné hodnoty

Název	Hodnota
Velikost posuvu	$v_f=2521$ mm/min
Otáčky vřetene	$n=7639$ min ⁻¹

Tab. 3.20 Parametry PVD destiček [73].

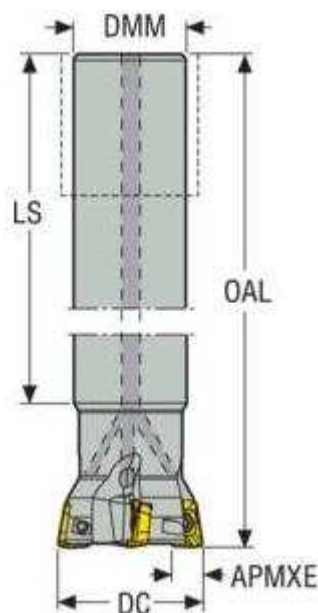
Označení	Popis	Hodnota
Označení destiček	XOEX10T308FR-E05 H15	
AN	Hlavní úhel hřbetu	15,0 °
CEDC	Počet břitů	2
Třída řezného materiálu	Třída řezného materiálu	H15
Typ třídy	Typ třídy	Karbid bez povlakování
L	Délka destičky	10 mm
LE	Efektivní délka řezné hrany	9,7 mm
RE	Rohový rádius	0,8 mm
Hmotnost (zaokrouhlena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



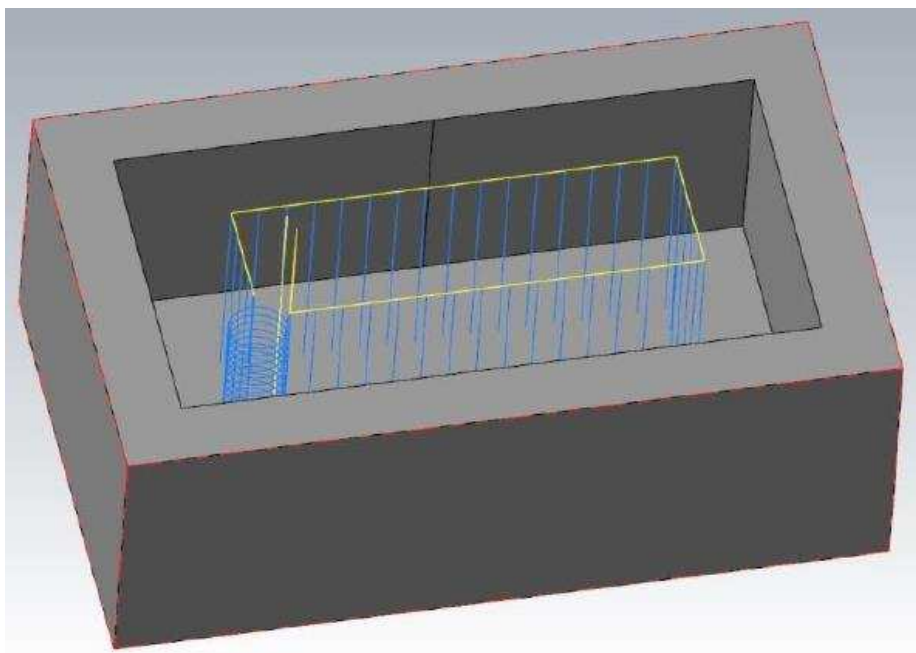
Obr. 3.15 Geometrie nástroje [73].

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:



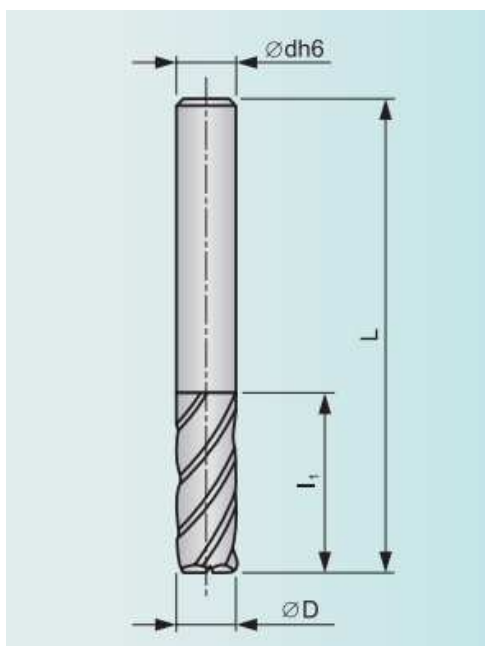
Obr. 3.17 Dokončovací fréza PRAMET 12E4S100-50A12 SUMA [74].

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 ₁	Délka břitu	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

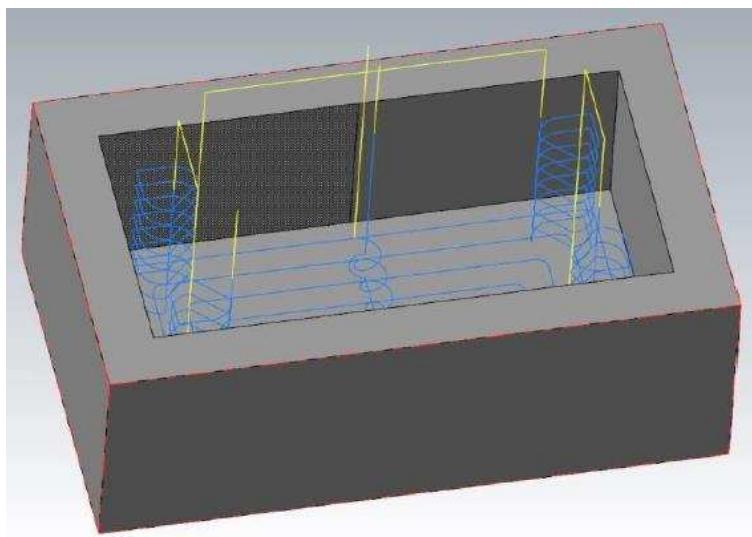
Dopočítané potřebné hodnoty

Tab. 3.25 Dopočítané potřebné hodnoty

Název	Hodnota
Velikost posuvu	$v_f=1485$ mm/min
Otáčky vřetene	$n=5305$ min ⁻¹

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).

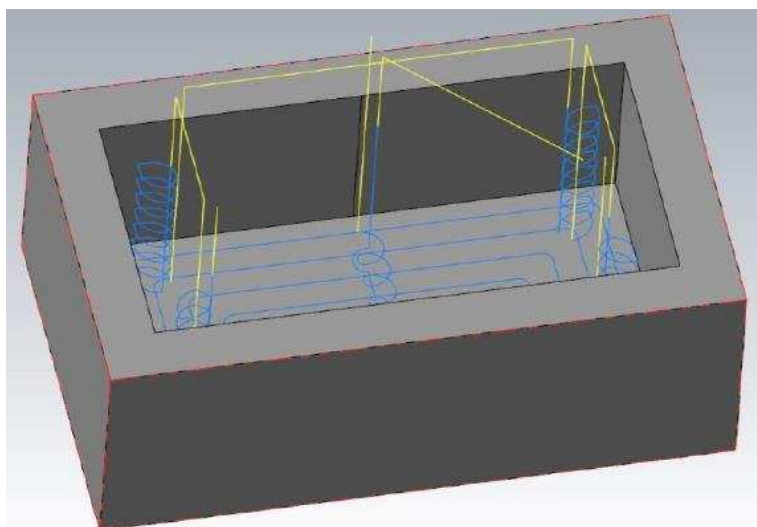


Obr. 3.19 3D model jednoduché kapsy s dokončovací strategií po nástroji pr. 25mm.

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 rádech 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.

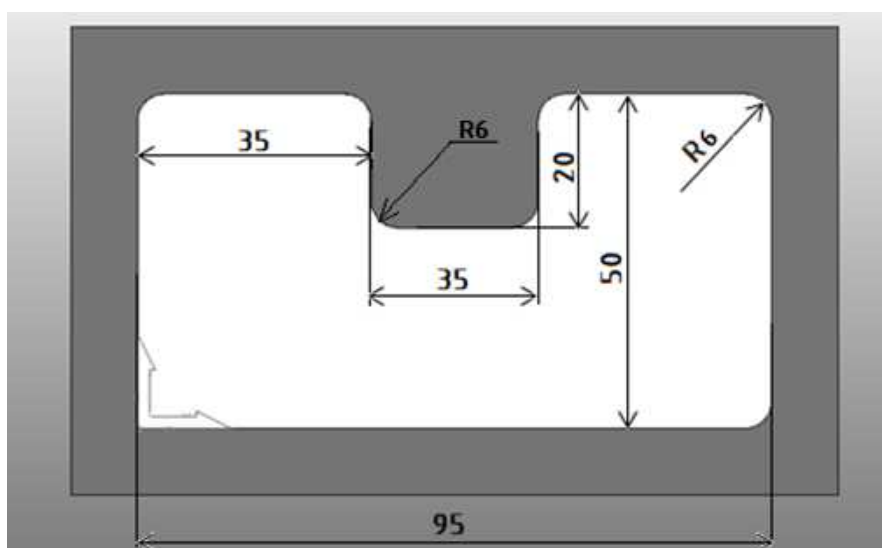
V druhé části práce byly simulovány strategie frézování komplexních kapes (takových se na panelech křídel objevuje okolo deseti procent). Jelikož je geometrie kapsy komplexnější, měly by vyniknout rozdíly mezi jednotlivými strategiemi. Strategie porovnávané u komplexních kapes jsou konturování a řádkování.

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

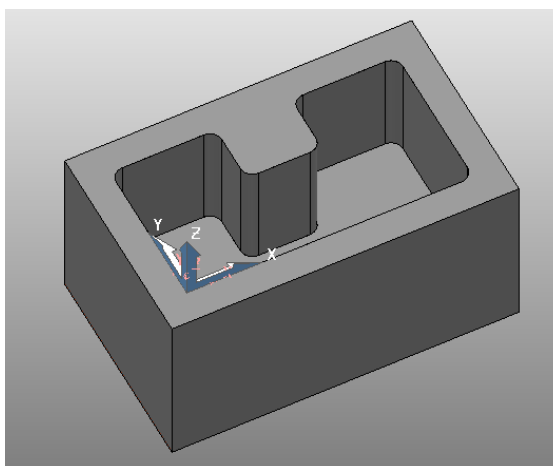
Geometrie kapsy je obdélník o rozměrech 95x50 mm, hloubka 40 mm, rohový rádius R6. Komplexní tvar, který bude v kapse obráběn je „výběžek“ na jedné straně kapsy, o rozměrech 35 x 20 mm, hloubka 40 mm, rádius R6.

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

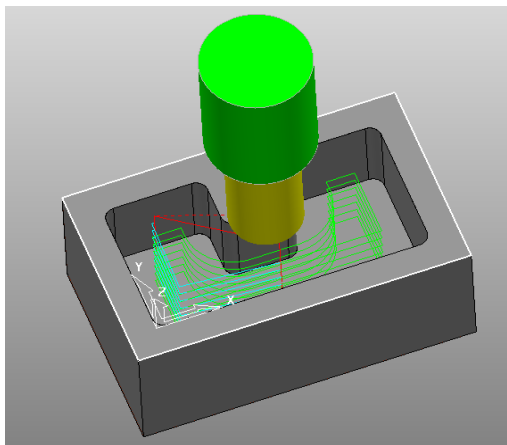
Nástroj se zanořuje v jednom z rohů uvažované kapsy. Zanoření je pomocí rampování pod úhlem 10° . Trajektorie nástroje opisuje konturu tvaru komplexní kapsy. Vzhledem k průměru nástroje stačí v dané hladině vytvořit jednu konturu pro její obrobení. Následuje zanoření nástroje do nižší hladiny o krok 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).

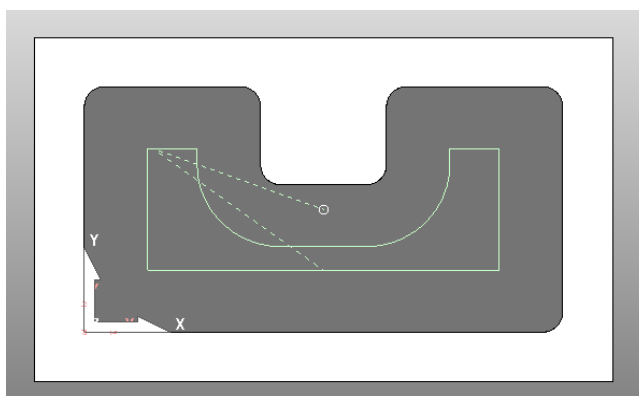
Nájezdy a výjezdy z a do materiálu jsou rychloposuvem o velikosti 10 000 m/min. Rychlost sjezdů je 150 m/min.

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° , 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).

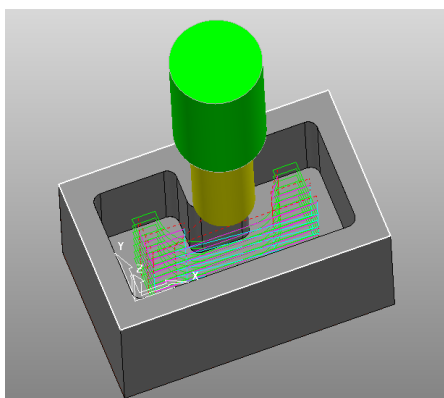
Po obrobení první hladiny se nástroj vrátí do počátečního bodu v rohu kapsy a pomocí rampování se zanoří do materiálu s krokem velikosti 6mm. Pro obrobení celé kapsy je potřebný počet kroků sedm.

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

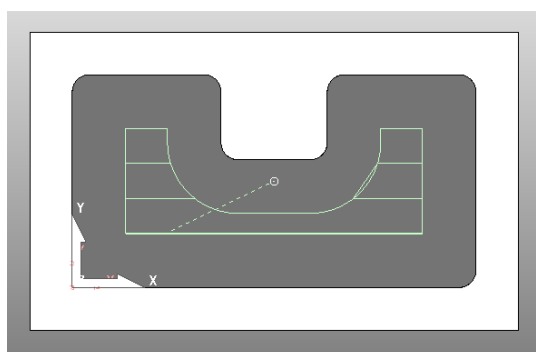
Nájezdy a výjezdy z a do materiálu jsou rychloposuvem o velikosti 10 000 m/min. Rychlost sjezdů je 150 m/min.

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

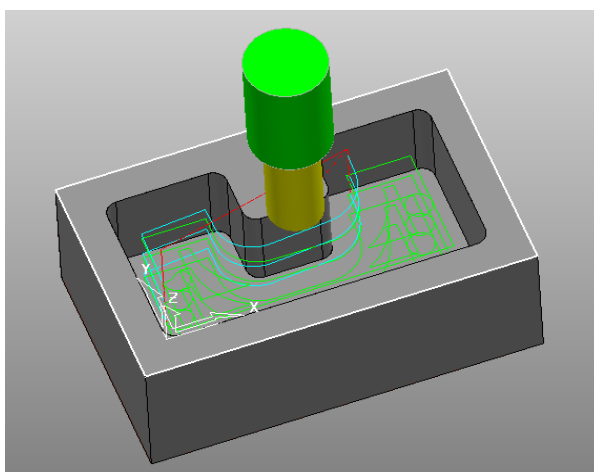
Zanoření nástroje do materiálu je pomocí rampování pod úhlem 10° . Nástroj se pohybuje po trajektorii, která konturuje tvar kapsy. V tomto případě je průměr nástroje nižší a proto jsou v jedné hladině vytvořeny kontury dvě, krok mezi nimi má velikost 16 mm (v osách X a Y). Po obrobení první hladiny se 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).

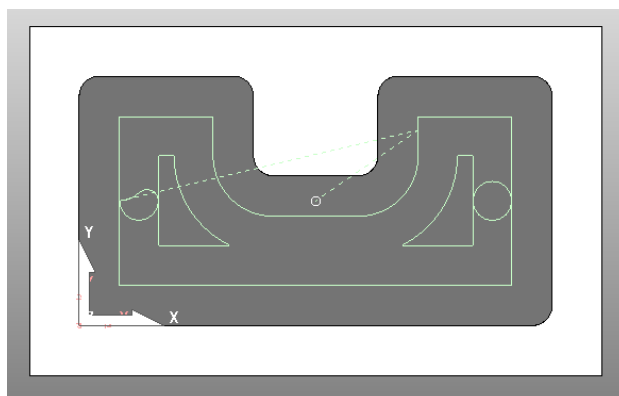
Nájezdy a výjezdy z a do materiálu jsou rychloposuvem o velikosti 10 000 m/min. Rychlost sjezdů je 150 m/min.

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° . 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).

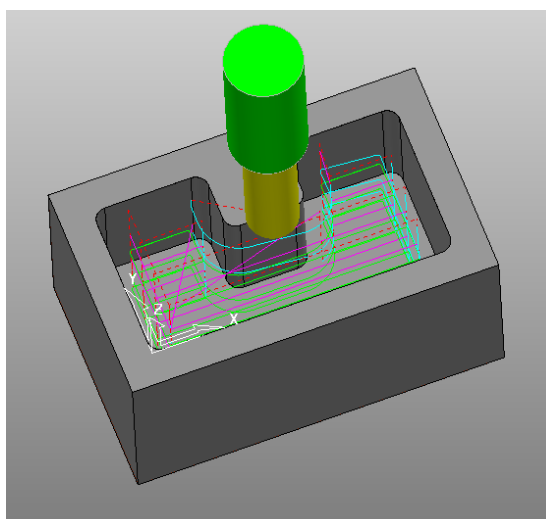
Po obrobení první hladiny kapsy se nástroj přesune do počátečního rohu kapsy, zanoří se do materiálu o krok velikosti 16 mm (v ose Z) a pokračuje v obrábění. Celkový počet obráběných hladin je tři.

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

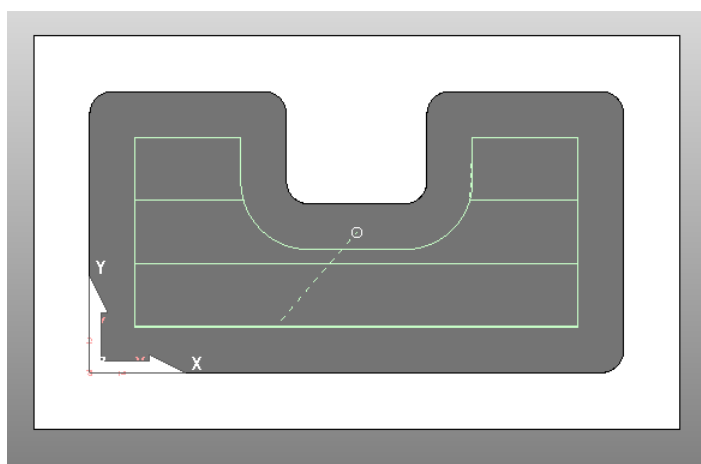
Nájezdy a výjezdy z a do materiálu jsou rychloposuvem o velikosti 10 000 m/min. Rychlost sjezdů je 150 m/min.

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.

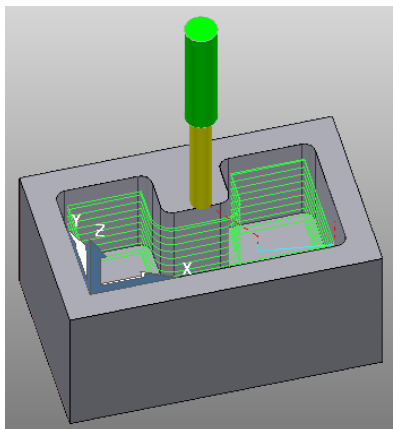
Nájezdy a výjezdy z a do materiálu jsou, stejně jako pro ostatní nástroje, rychloposuvem o velikosti 10 000 m/min.

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

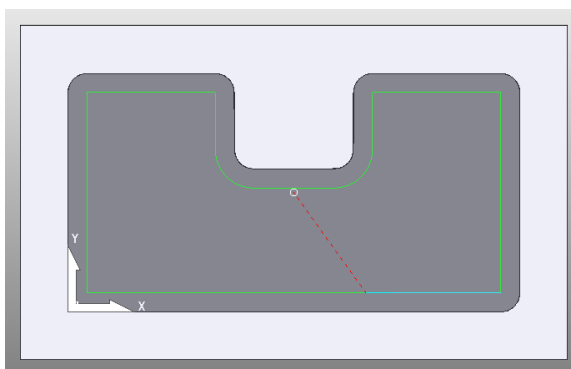
Pro dokončení po nástroji Aeromaster pr. 25 mm i pro nástroj Monolit JS453160E2R100.0Z3-HEMI pr. 16 mm je využita stejná strategie.

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.

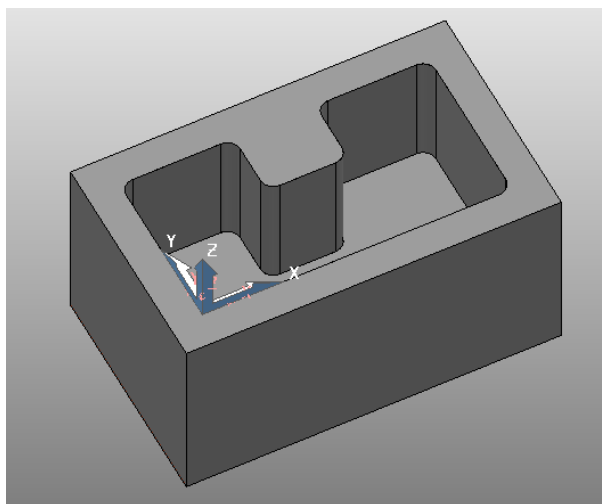
Aeromaster	Monolit JS453160E2R100.0Z3- HEMI	Plunge
		
Obr 3.36 Aeromaster [73].	Obr 3.37 Monolit JS453160E2R100.0Z3-HEMI [73].	Obr 3.38 Plunge [73].
Nejrychlejší strategie (pro jednotlivé nástroje)		
Řádkování	Konturování	-
Nejnižší strojní čas (pro jednotlivé nástroje)		
162s	149s	-

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 - R_e [MPa]	460
Mez pevnosti v tahu- R_m [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].

Pracovní pojezdy	
Osa X (křížový suport)	1 000 mm
Osa Y (příčnick)	800 mm
Osa Z (smykadlo)	600 mm
Pracovní stůl	
Rozměr pracovního stolu	1 200 x 1 000 mm
Maximální zatížení	3 000 kg
Vřeteno	
Typ	elektrovřeteno Weiss 176 024_800
Rozsah otáček	0 – 18 000 1/min
Upínací kužel	HSK-A 63
Maximální krouticí moment	197 Nm
Přesnost	
Přesnost polohování v ose X, Y, Z	0,008 mm
Opakovací přesnost v ose X, Y Z	0,006 mm
Nástrojový držák	DIN 69 893 – HSK-A 63
Automatický zásobník nástrojů	
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)
Požadavky na elektrickou energii	
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.



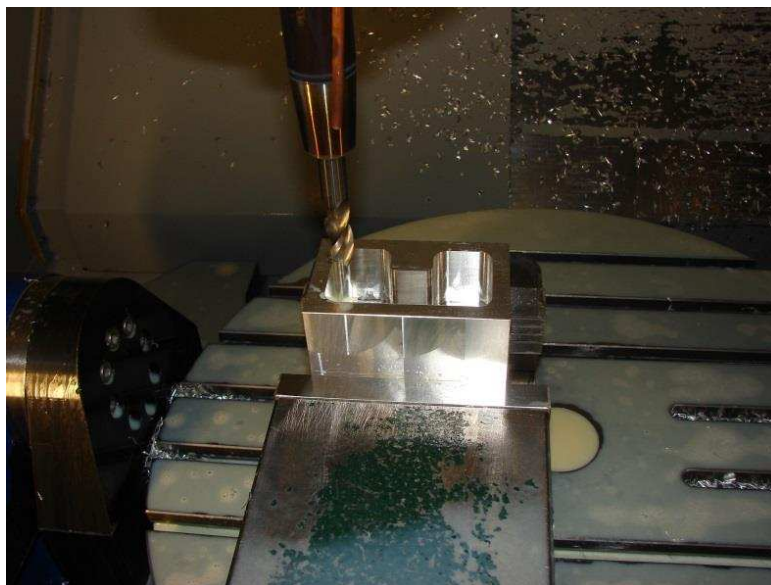
Obr. 4.7 Dokončená, obrobená kapsa v umělém dřevě.



Obr. 4.8 Obrobená kapsa v umělém dřevě po dokončení.

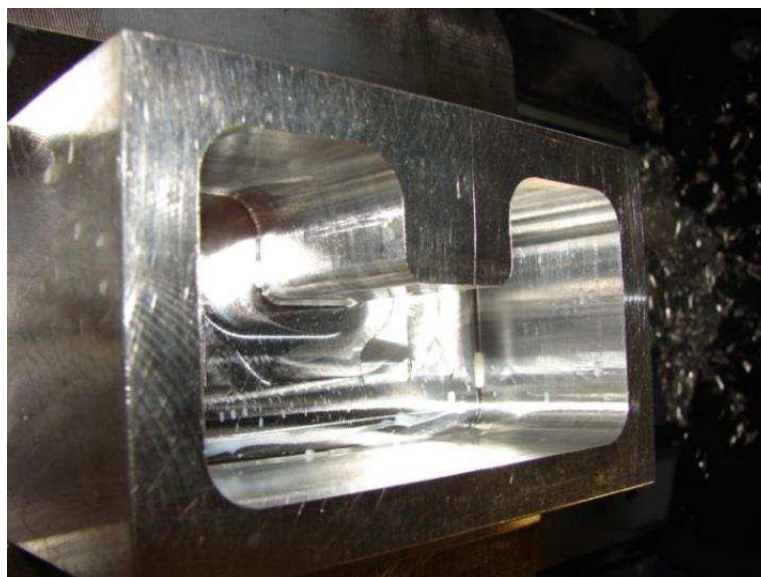
4.5.2 Verifikace frézovací strategie – polotovar ze 7475-T7351

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 vibračním 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.

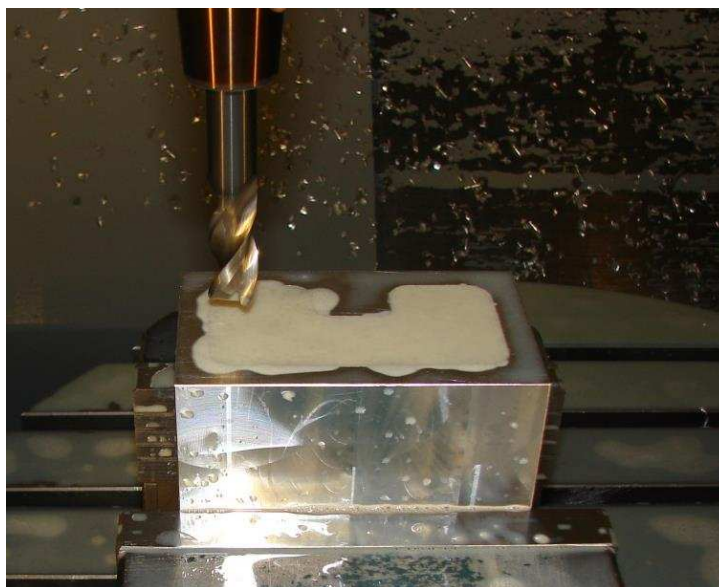
Dokončená kapsa má kvalitně obrobene stěny, ale v rozích je kvalita nižší z důvodu vibrace nástroje.



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.

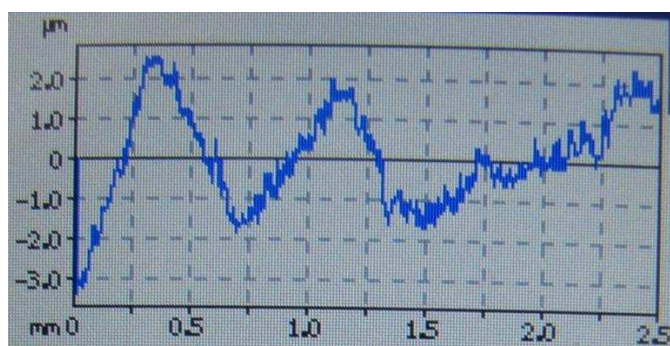
U obrobeného povrchu se posuzuje více parametrů, které udávají hodnotu kvality obrábění. Nejpoužívanější je mezinárodní parametr R_a - aritmetický průměr absolutních úchylek profilu drsnosti od střední čáry. Dalšími parametry, které byly měřeny v experimentální části jsou R_t (celková výška profilu v 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

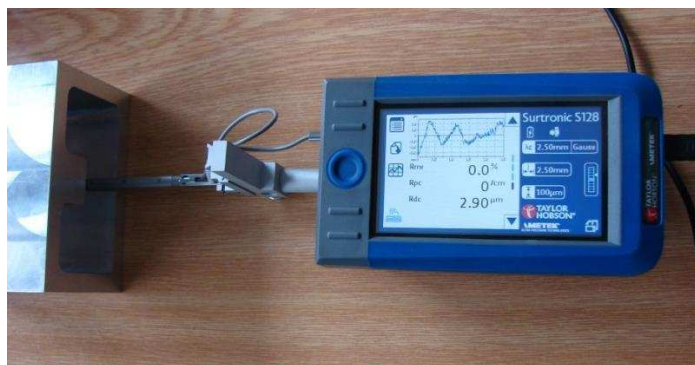
Pro první ze stěn obrobene komplexní kapsy vyšly hodnoty velmi příznivě. Čím nižší číslo parametrů, tím lepší kvalita obrobene plochy. Jak již bylo řečeno, nejčastěji se kvalita drsnosti povrchu srovnává pomocí hodnoty Ra. V případě této stěny je hodnota Ra=0,9 [μm]. Takových hodnot se dosahuje při velmi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

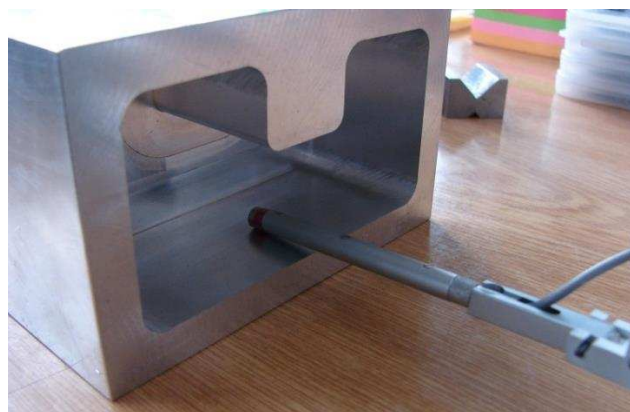
Parametry	Hodnota
Ra	0,9 [μm]
Rt	5,8 [μm]
Rv	3,3 [μm]
Rp	2,5 [μm]



Obr. 4. 15 Křivka profilu povrchu.



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



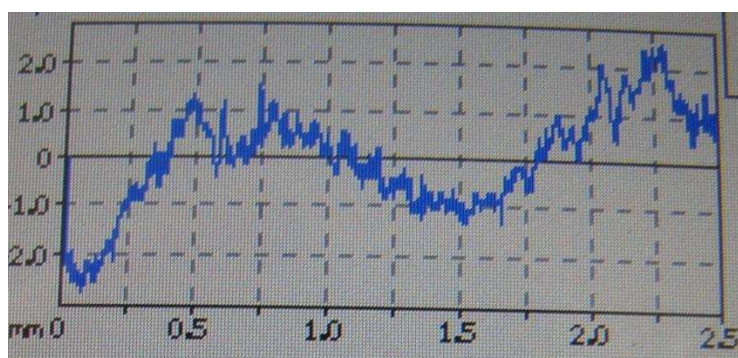
Obr. 4.17 Detail měření drsnosti povrchu na první ploše.

Druhá měřená stěna

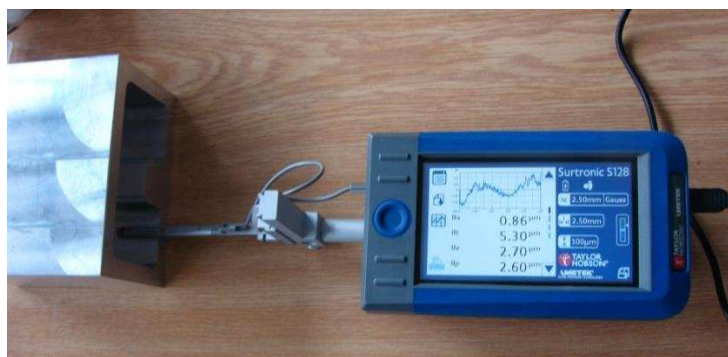
Další stěnou, na které byla zkoumána kvalita povrchu je plocha vedle zakřivení komplexního tvaru kapsy (Obr.): Ra, které nám nejlépe umožňuje sledovat rozdíly mezi různými obroběnými částmi, má hodnotu 0,86 [μm]. Jako i u první měřené stěny je kvalita obrobění povrchu kapsy velice vysoká a to díky snížené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

Tab. 4.4 Výsledky měření.

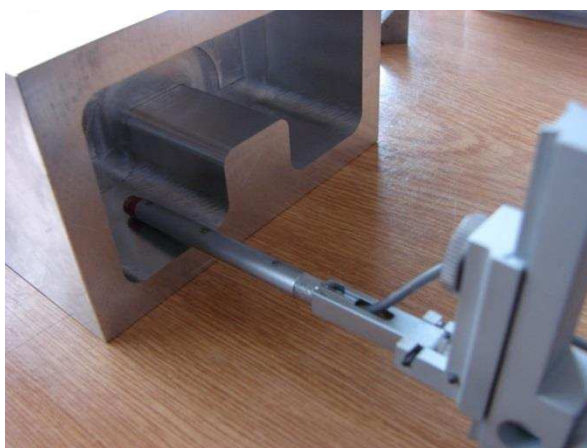
Parametry	Hodnota
Ra	0,86 [μm]
Rt	5,3 [μm]
Rv	2,7 [μm]
Rp	2,6 [μm]



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.

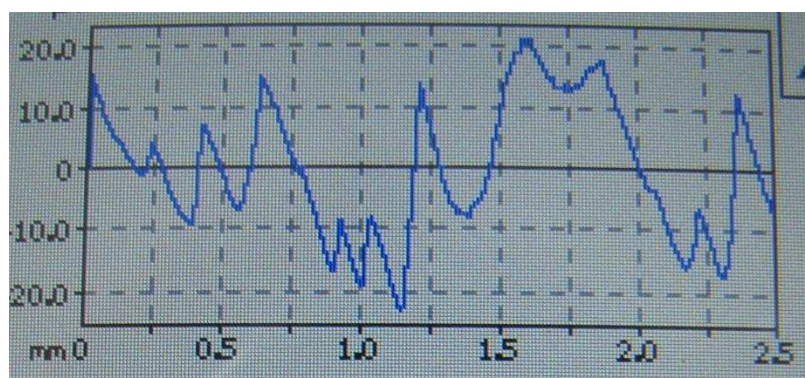
Třetí měření: roh

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

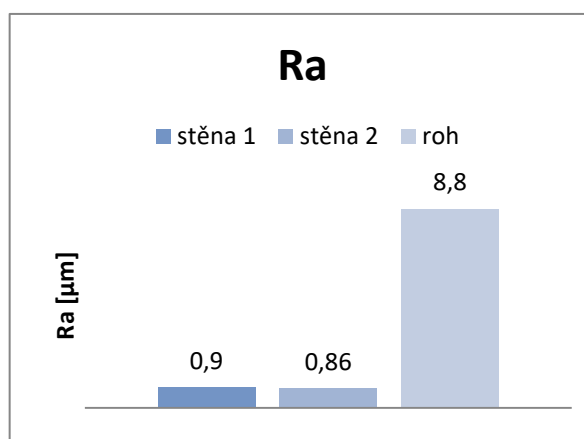
dokončování je viditelně nižší než okolní stěny. Z důvodu vibrační nástroje je povrch poškozený a Ra má hodnotu, která odpovídá spíše hrubování než dokončování, Ra= 8,80 [μm].

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

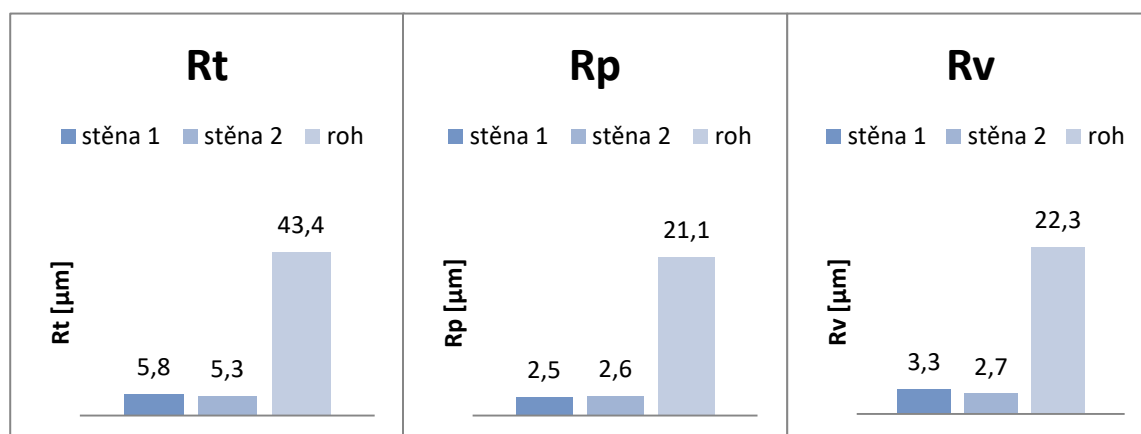
Možným řešením zlepšení kvality rohů by byla změna strategie frézování, výměna nástroje nebo změna řezných podmínek.

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
- [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 GHIDOSSO, 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
- [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. *Metalurgie 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
- [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.spsoa-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
- [29] GUÉRIN, S. *Nouvelles stratégies d'usinage en ébauch: 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
- [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
- [35] TaeguTec. *Druhy opotřebení břitů nástroje* [online], [cit 2017-5-15], dostupné na: 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
- [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
- [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%20%20EN%20%20C3%20%208D%20A%20TRVANLIVOST%20N%20%20C3%20%2081STROJE.pdf

- [62] *Opotřebení břitů nástrojů ze slinutých 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
- [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
- [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
- [73] Seco, [online]. Dostupné z: <https://www.secotools.com>
- [74] Pramet, [online]. Dostupné na: 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 rezné 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 _a	[μm]	střední aritmetická hodnota drsnosti
R _e	[MPa]	Mez kluzu v tahu
R _p	[μm]	Maximální výška profilu nad střední čarou
R _m	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
R _v	[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 _p	[mm]	Hloubka záběru třísky
f _z	[mm]	Posuv na zub
n	[min ⁻¹]	Otáčky vřetene
v _c	[m.min ⁻¹]	Řezná rychlost
v _f	[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 TRAF00F
;N419 T="Freza prumer 12 mm
;N420 M6
N421 M30

PŘÍLOHA 3

Technické specifikace drsnoměru Surtronic S128

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