



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

UPLATNĚNÍ CAM SOFTWARU POWERMILL 2020 PŘI OBRÁBĚNÍ

APPLICATION POWERMILL 2020 CAM SOFTWARE FOR MACHINING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Šrom

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student: **Jakub Šrom**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce: **Ing. Aleš Polzer, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24

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:

Uplatnění CAM softwaru PowerMILL 2020 při obrábění

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V dnešních strojírenských podnicích se velmi úspěšně prosazuje příprava programů pro CNC stroje prostřednictvím CAM softwarů. Tato závěrečná práce je proto zaměřena na návrh vlastní součástky, zpracování nezbytné výrobní dokumentace a naprogramování její výroby v CAM softwaru PowerMILL 2020, s postprocesingem pro řídicí systém Heidenhain a s uvažováním výroby na 5ti osé frézce firmy Hermle.

Cíle bakalářské práce:

Stručný rozbor možností programování významných funkcí zvoleného CAM softwaru a řídicího systému CNC stroje.
Systémový rozbor řešené problematiky.
Návrh vlastní součástky a zpracování základní technické dokumentace.
Test funkčnosti realizovaného postprocesingu.
Zdůvodnění zvoleného způsobu řešení a posouzení dosažených výsledků.
Vlastní závěry a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

PETR, Karel. Geometrické tolerance dle ISO GPS. Praha: Verlag Dashöfer, 2019. ISBN 978-80-7635-019-9.

MAREK, Tomáš a Jiří MAREK. RENISHAW, S. R. O. Mít sondu nestačí. Brno: Renishaw, 2017, 121 s. ISBN 978-80-87017-20-3.

GUPTA, Kapil, ed. Advanced manufacturing technologies: Modern Machining, Advanced Joining, Sustainable Manufacturing. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 978-3-319-56098-4.

GRZESIK, Wit. Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications. Second edition. Boston: Elsevier, [2017]. ISBN 978-0-444-63711-6.

DAVIM, J. Paulo, ed. Surface integrity in machining. London: Springer, 2010, 215 s. ISBN 978-1-84882-873-5.

TSCHÄTTSCH, Heinz. Applied machining technology. Dordrecht: Springer, c2009, xvii, 398 s. ISBN 978-3-642-01006-4.

DAVIM, J. Paulo, ed. Machining: fundamentals and recent advances. London: Springer, c2008, xiii, 361 s. ISBN 978-1-84800-212-8.

SREE HARSHA, K. Principles of physical vapor deposition of thin films. Amsterdam: Elsevier, 2006, 1160 s. ISBN 00-804-4699-X.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Náplní této bakalářské práce je aplikace CAM softwaru PowerMILL při obrábění s uvažováním výroby na pětiosém frézovacím centru Hermle, který je osazen řídicím systémem Heidenhain. Práce obsahuje stručný rozbor významných programovacích funkcí CAM softwaru a řídicího systému stroje. Praktická část se zabývá modelem s aspekty problémových součástí vyráběných pro letecký a kosmický průmysl. Dále je práce zaměřena na volbu vhodného materiálu používaného v leteckém a kosmickém průmyslu, aplikaci obráběcích drah v CAM softwaru s porovnáním možných strategií a použitých nástrojů a následnou kontrolou obráběcího programu simulací a analýzou možných deformací součásti vlivem působících řezných sil během obrábění softwarem ANSYS. Závěr práce je věnován testu realizovaného postprocesingu obráběcích drah simulací v řídicím systému stroje.

ABSTRACT

The content of this bachelor's thesis is the application of CAM software PowerMILL in machining with consideration of production on a five-axis milling center Hermle, equipped with a Heidenhain control system. The thesis includes a brief analysis of significant programming functions of the CAM software and the machine control system. The practical part deals with a model considering problematic components manufactured for the aerospace industry. Furthermore, the thesis focuses on the selection of suitable materials used in the aerospace industry, the application of machining paths in the CAM software with a comparison of possible strategies and tools used, and the subsequent verification of the machining program by simulation and analysis of potential component deformations caused by cutting forces during machining using ANSYS software. The conclusion of the thesis is dedicated to testing the implemented post-processing of machining paths through simulation in the machine's control system.

KLÍČOVÁ SLOVA

CAM software, PowerMILL, HSC/HPC, frézování, obrábění

KEYWORDS

CAM software, PowerMILL, HSC/HPC, milling, machining

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠROM, Jakub. *Uplatnění CAM softwaru PowerMILL 2020 při obrábění* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/160795>.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Aleš Polzer.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Uplatnění CAM softwaru PowerMILL 2020 při obrábění vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením Ing. Aleše Polzera Ph.D.

V Brně dne 23. května 2024

.....

Jakub Šrom

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto svému vedoucímu práce Ing. Aleš Polzer, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracovávání bakalářské práce.

OBSAH

1	ÚVOD	9
2	SYSTÉMOVÝ ROZBOR ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	11
2.1	CAM SOFTWARE POWERMILL	11
2.1.1	POLOTOVAR	11
2.1.2	OBRÁBĚCÍ STRATEGIE	12
2.1.3	NÁSTROJOVÉ SESTAVY	12
2.1.4	RUČNÍ ÚPRAVY DRAH	13
2.1.5	DYNAMICKÉ NASTAVENÍ STROJE	14
2.1.6	NC PROGRAMY	14
2.2	ŘÍDICÍ SYSTÉM STROJE	15
2.3	HEIDENHAIN TNC640	15
2.3.1	MOŽNOSTI PROGRAMOVÁNÍ	15
2.3.2	OPCE A PŘÍSLUŠENSTVÍ	16
3	NÁVRH VLASTNÍ SOUČÁSTI	17
3.1	KONSTRUKČNÍ MATERIÁLY	17
3.1.1	HLINÍKOVÉ SLITNY	17
3.1.2	TITANOVÉ SLITINY	18
3.2	CAD MODEL A VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE	18
4	ZPŮSOB FRÉZOVÁNÍ	20
4.1	SOUSLEDNÉ FRÉZOVÁNÍ	20
4.2	NEOUSLEDNÉ FRÉZOVÁNÍ	20
4.3	FRÉZOVÁNÍ HSC A HPC NÁSTROJI	21
4.4	PROCESNÍ KAPALINA	22
5	ZPRACOVÁNÍ PRVNÍ STRANY UPNUTÍ	24
5.1	HRUBOVÁNÍ KONTUROVÁNÍM MODELU	25
5.2	HRUBOVÁNÍ PRAVOÚHLÝCH KAPES	27
5.2.1	HRUBOVÁNÍ S PŘEDVRTÁNÍM	27
5.2.2	HRUBOVÁNÍ ZANOŘENÍM PO SPIRÁLE	29
5.2.3	ZBYTKOVÉ HRUBOVÁNÍ ROHŮ	29
5.2.4	POROVNÁNÍ STROJNÍCH ČASŮ	30
5.3	DOKONČENÍ OBRYSU KAPSY PRO PODKOS	30
5.4	OBROBENÍ PODKOSU	31
5.5	DOKONČOVACÍ OPERACE	32
5.6	VRTÁNÍ A ZÁVITY	34
5.7	DOKONČENÍ PŘESNÝCH OTVORŮ A ČEPŮ	35
5.8	ODJEHLENÍ OSTRÝCH HRAN	35
5.9	PŘÍPRAVA PRO DRUHOU STRANU UPNUTÍ	36
6	ZPRACOVÁNÍ DRUHÉ STRANY UPNUTÍ	38
6.1	NÁVRH PŘÍPRAVKU PRO UPNUTÍ	38
6.2	HRUBOVÁNÍ PLOCHY	39
6.3	HRUBOVÁNÍ PO SPIRÁLE	40
6.4	DOKONČENÍ OBRYSŮ	40
6.5	SIMULTÁNNÍ HRUBOVÁNÍ DRÁŽEK	40
6.6	SIMULTÁNNÍ DOKONČENÍ DRÁŽEK	41
6.7	ODJEHLENÍ OSTRÝCH HRAN	42

7	NÁSTROJE A NÁSTROJOVÉ UPÍNAČE	43
7.1	NÁSTROJE	43
7.2	NÁSTROJOVÉ UPÍNAČE	51
8	OVĚŘENÍ KOLIZE A BOURÁNÍ	53
8.1	OVĚŘENÍ KOLIZE A BOURÁNÍ	53
8.2	SIMULACE V CAM SOFTWARE	53
9	ANALÝZA DEFORMACE	55
9.1	TEORETICKÉ VÝPOČTY ŘEZNÝCH SIL	55
9.1.1	DEFORMACE PŘI UPNUTÍ POLOTOVARU	55
9.1.2	DEFORMACE PŘI HRUBOVÁNÍ HSC NÁSTROJI	56
9.1.3	DEFORMACE PŘI HRUBOVÁNÍ HPC NÁSTROJI	57
9.1.4	DEFORMACE PŘI VRTÁNÍ	58
9.1.5	DEFORMACE PŘI TROCHOIDNÍM HRUBOVÁNÍ KAPSY	59
9.1.6	DEFORMACE PŘI HPC HRUBOVÁNÍ KAPSY	60
9.1.7	DEFORMACE PŘI HPC HRUBOVÁNÍ KAPSY POD ÚHLEM	61
9.1.8	DEFORMACE PŘI ODŘEZÁNÍ SOUČÁSTI	62
9.2	MĚŘENÍ ŘEZNÝCH SIL POMOCÍ DYNAMOMETRU	64
10	TEST POSTPROCESSINGU	65
11	ZÁVĚR	66
12	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	67
13	SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ	69
14	SEZNAM PŘÍLOH	71

1 ÚVOD

V současnosti se ve veškerých firmách, které jsou zaměřeny na strojírenství, implementuje příprava výroby prostřednictvím CAM softwarů. Volbou vhodného CAM softwaru lze dosáhnout úspěšné výroby i těch tvarově nejsložitějších dílců pro automobilový, letecký a kosmický průmysl. Využití CAM softwarů se prosazuje jak pro velkosériovou, tak i pro kusovou výrobu, kde dochází ke spoustě ušetřeného času při její přípravě, čímž se stává firma konkurenceschopnější.

V této práci budou představeny nejvýznamnější funkce CAM softwaru PowerMILL a jeho aplikace pro tvorbu obráběcích drah na pětiosé frézovací centrum firmy Hermle, který je osazen řídicím systémem Heidenhain. Pro řídicí systém Heidenhain budou představeny nejvýznamnější cykly a opce, které jsou zaměřeny na optimalizaci výroby.

Práce je zaměřena na výrobu součástí s aspekty, které jsou v dnešní době vyráběny pro letecký a kosmický průmysl a volbu vhodného materiálu, jenž je v současnosti v těchto odvětvích používán. Konkrétně se jedná o tenkostěnnou součást malých rozměrů s nutností využití malých nástrojů s delším axiálním vyložení v kombinaci s relativně přísnými rozměrovými, geometrickými tolerancemi a textury povrchu.

Při aplikaci obráběcích drah je brán důraz na různé způsoby řešení obráběcích strategií vlivem použitého nástroje a jejich vzájemné porovnání. Jsou zde vzájemně porovnány nástroje ze dvou odvětví použití, konkrétně nástroje určené pro HSC (High speed cutting) a HPC (High performance cutting) obrábění. Proběhlo samotné představení těchto dvou strategií a jejich důležitých náležitostí jako je použití procesní kapaliny během obrábění.

Před samotným postprocesingem a ověřením jeho funkčnosti je vhodné provést kontrolu obráběcích drah na kolize, bourání a možné sjezdy do polotovaru pomocí funkcí CAM softwaru PowerMILL. Jelikož se jedná o tenkostěnnou součást, u kterých se více projevují možné deformace během obrábění, je přínosné provést analýzu těchto deformací softwarem ANSYS doprovázenou teoretickými výpočty působících rezných sil, provedených pomocí doporučené literatury.

2 SYSTÉMOVÝ ROZBOR ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Tento systémový rozbor je zaměřen na významné funkce CAM softwaru a řídicího systému stroje, kterými lze dosáhnout zefektivnění přípravy a zkrácení strojních časů.

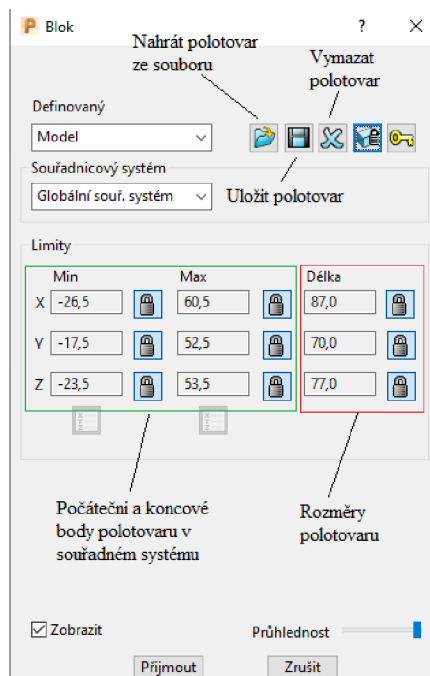
2.1 CAM SOFTWARE POWERMILL

Pro dosažení zadaných cílů byl zvolen CAM software PowerMILL, vyvinutý společností Autodesk. Konkrétně se jedná o verzi PowerMILL Ultimate 2020, který disponuje funkcí pětiosého simultánního frézování, čímž je řazen mezi vysoké CAM softwary. Pomocí této funkce a nejrůznějších frézovacích strategií se docílí výroby tvarově velmi složitých obrobků. Především výroby vstřikovacích forem, či součástí pro letecký, automobilový nebo kosmický průmysl [1].

V následujících kapitolách budou stručně popsány nejdůležitější funkce zvoleného CAM softwaru.

2.1.1 POLOTOVAR

Definováním polotovaru je zajištěn prostor, kde je možno dráhy tvořit, nelze tvořit dráhy bez zásahu nástroje do tohoto prostoru. Existuje více způsobů, jak definovat polotovar. Jeden z nejpokročilejších je importovat polotovar jako model (viz obr. 1). Tato funkce má hlavní využití v případě obrábění nejrůznějších tvarově náročných odlitků nebo svařenců. Pro vypracování této práce byla tato funkce využita, a to z důvodu deformační analýzy při upnutí polotovaru, která bude podrobněji popsána v kapitole 9.1.1.

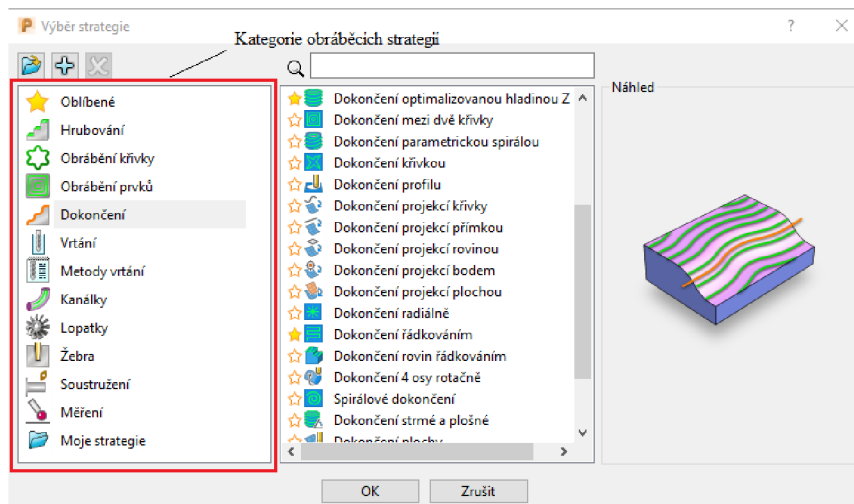


Obr. 1: Importování modelu polotovaru součásti

2.1.2 OBRÁBĚCÍ STRATEGIE

Ačkoli je PowerMIL zaměřen zejména na frézovací operace, obsahuje i základní soustružnické strategie. Jedná se například o strategie pro frézovací centra, která disponují doplňkem pro soustružení.

Celkem je k dispozici 83 různých strategií obrábění, spadajících do rozličných kategorií (viz obr. 2). Podle jednotlivých kategorií je zde 11 vrtacích, 9 soustružnických a 63 frézovacích strategií. Frézovací strategie jsou nadále rozděleny na 15 hrubovacích, 40 dokončovacích a celkem 8 strategií pro výrobu lopatkových kol, kanálků a žeber.



Obr. 2: Seznam obráběcích strategií dle kategorie použití

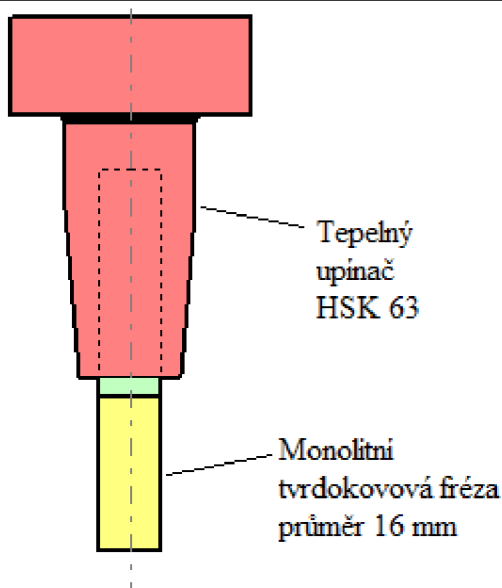
Za pomoci všech těchto strategií lze dosáhnout výroby téměř jakkoliv náročného obrobku.

2.1.3 NÁSTROJOVÉ SESTAVY

Velmi užitečná funkce pro složité operace je definování nástrojových sestav, a to zejména v kombinaci s funkcí pro kontrolu kolize. Využitím těchto dvou funkcí zajistíme hladký průběh obrábění. Definováním nástroje a jeho vyložení z držáku lze zjistit, jestli dojde ke kolizi mezi držákem a obrobkem, nebo mezi držákem a upínací sestavou.

Nástrojovou sestavu definujeme za pomoci rozměrů získaných z katalogu výrobce, kde pro frézu zjistíme délku břitu, délku upínací stopky a počet břitů. Obdobně je tomu u upínacího držáku nástroje (viz obr. 3).

U jednotlivých nástrojových sestav lze zadat rezné podmínky dle využití strategie a obráběného materiálu. Následně je také možné jejich uložení do databáze, čímž lze docílit rovnoměrného opotřebení nástroje pro veškerou výrobu.



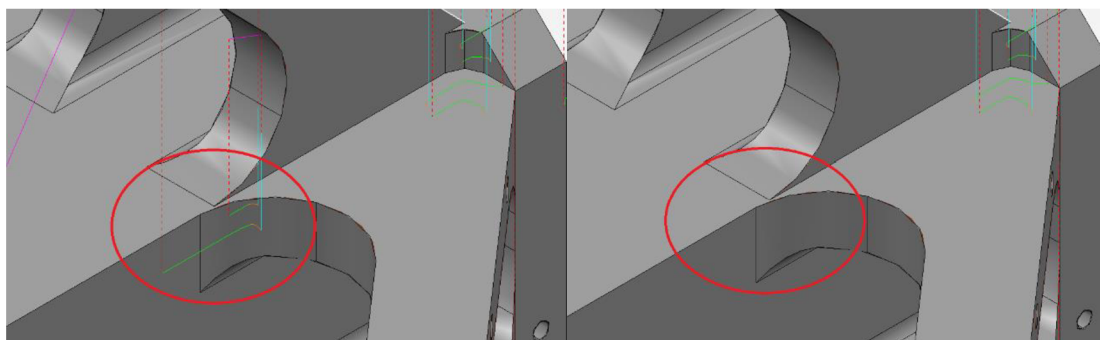
Obr. 3: Nástrojová sestava frézy o průměru 16 mm a tepelného upínače HSK A 63

2.1.4 RUČNÍ ÚPRAVY DRAHY

Ruční úpravou dráhy lze provést rychlé změny některých parametrů dráhy, a to bez potřeby opakovaného výpočtu. Hlavní využití nalézá u složitých strategií s nízkou tolerancí dráhy a velkých obrobků, při kterých jsou delší výpočetní časy.

Parametry, které lze upravovat:

- posuvy a rychlosti
- nájezdy, výjezdy a propojení
- osa nástroje
- transformace (zrcadlení, posun celé dráhy)
- přeskládání jednotlivých segmentů dráhy či jejich vymazání (viz obr. 4, 5)
- posunutí počátečního bodu dráhy (jen v případě uzavřených segmentů)
- dynamické nastavení stroje (viz kapitola 2.1.5)



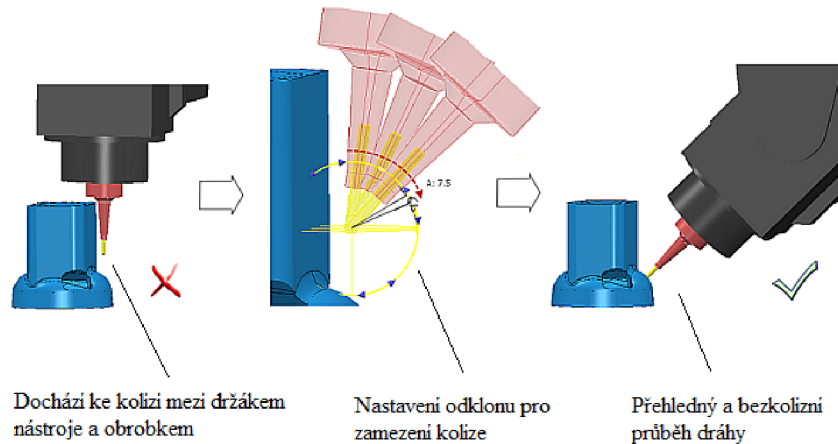
Obr. 4: Segment dráhy před úpravou

Obr. 5: Segment dráhy po úpravě

2.1.5 DYNAMICKÉ NASTAVENÍ STROJE

PowerMILL umožňuje importovat celou kinematiku obráběcího stroje, díky čemuž můžeme kontrolovat a upravovat dynamiku polohy nástroje v problémových oblastech při obrábění tvarových ploch kulovými frézami (viz obr. 6).

Kontrola a případné úpravy polohy nástroje jsou zajištěny simulací pohybů nástroje a stroje, kterou lze zpomalit, zrychlit či pozorovat v reálném čase.



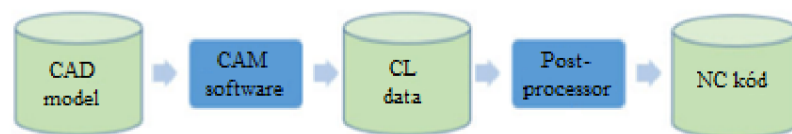
Obr. 6: Dynamické nastavení stroje [2]

2.1.6 NC PROGRAMY

Závěrem každé naprogramované součásti je vygenerování NC programu pro zvolený obráběcí stroj. Při generování NC programu je nejdůležitější součástí postprocesor a rovina, ve které je daná součást ustavena ve stroji. Obrovskou výhodou je možnost generování NC programu i pro jinou rovinu, než pro kterou byl vytvořen. Toho lze využít při změně výrobního postupu (např. dokončení některých ploch při druhé operaci výroby).

Postprocesor je nástroj pro překlad CL dat vygenerovaných CAM softwarem na NC kód řídicího systému stroje (Heidenhain, Fanuc, Mazatrol), využívaného při obrábění (viz obr. 7). Postprocesor má obrovský vliv na efektivitu, přesnost a plynulost obrábění simultánních pětiosých pohybů nástroje [3]. Překlad je zajištěn doplňkovým nástrojem Autodesk Postprocessor Utility, jenž je součástí instalačního balíčku. Pomocí tohoto nástroje lze upravovat či tvořit postprocesor požadovaných funkcí.

Role postprocessoru v pracovním postupu CAM programování



1. CAM překládá CAD model na CL data
2. Postprocessor překládá CL data na NC kód

Obr. 7: Schéma překlada CAM softwaru a postprocesoru ([3], upraveno)

2.2 ŘÍDICÍ SYSTÉM STROJE

Zpracování součásti v CAM softwaru proběhlo, s uvažováním výroby na pětiosém frézovacím centru Hermle C32 (viz obr. 8), který je osazen řídicím systémem Heidenhain TNC640. Veškeré technické parametry stroje jsou uvedeny v příloze č. 3.



Obr. 8: Pětiosé frézovací centrum Hermle C32 [4]

2.3 HEIDENHAIN TNC640

Tento řídicí systém je vyvíjen německou společností Heidenhain. Ve své oblasti použití je označován za High-End řídicí systém, určený pro velmi složité frézovací operace, s možností soustružení a broušení, které jsou dostupné jako opce. Využíván je hlavně pro pětiosé simultánní frézování jak pro kusovou, tak pro plně automatizovanou sériovou výrobu. Vyznamenává se svou spolehlivostí, kvalitou opracovaného povrchu, vysokou přesností a krátkými strojními časy. [5]

2.3.1 MOŽNOSTI PROGRAMOVÁNÍ

Samotný systém obsahuje mnoho programovacích cyklů, které lze využívat pro nenáročné aplikace programování přímo na stroji. Při tvarově složitých prvcích by docházelo k časově náročné aplikaci. Proto je v tomto ohledu využíván zejména CAM software. Při správném nastavení postprocesoru je však možno tyto cykly využívat i při aplikaci CAM softwaru, postprocesor je pak schopen generovat cykly (např. pro vrtání nebo frézování otvorů).

Seznam kategorií cyklů řídicího systému:

- vrtání/závity – cykly pro navrtání, vrtání, závitování, vystružování
- kapsy/ostřívky/drážky – cykly pro kapsy, ostřívky a drážky různých tvarů (kruhové, čtvercové, mnohoúhelníky)
- transformace souřadnic – cykly, kterými lze dosáhnout posunutí nulového bodu, natočení pracovní roviny, změnu měřítka, zrcadlení některé části programu
- SL Cykly – programování složitějších tvarů drážek, kapes, ostřívků
- rastr bodů – využíván hlavně pro vrtání, závitování nebo frézování děr na roztečné kružnici nebo v řadách
- speciální cykly – cykly pro gravírování, časovou prodlevu v programu, nastavení tolerance dráhy

Dále jsou k dispozici cykly pro obrobkovou a nástrojovou sondu. V případě nástrojové sondy lze měřit délku/průměr nástroje nebo opotřebení/zlomení nástroje. Obrobkovou sondu je možno v programu využívat pro změnu nulového bodu nebo měření libovolného rozměru s možností exportování protokolu.

Pro optimalizaci hrubovacích operací bude využit cyklus 32 – Tolerance. Využitím tohoto cyklu dojde k optimalizaci průběhu hrubovacích operací.

2.3.2 OPCE A PŘÍSLUŠENSTVÍ

Nejvýznamnější opce pro optimalizaci:

1. 3D Obrábění (číslo opce #09)

- Zajištění obzvláště plynulého víceosého simultánního pohybu při obrábění
- 3D korekce nástroje
- Změna naklonění pomocí elektronického ručního kolečka při chodu programu beze změny polohy středu nástroje (TCPM – Správa středového bodu nástroje)
- Udržování nástroje kolmo k obrysu

2. AFC – adaptivní řízení posuvů (číslo opce #45)

- Optimalizace řezných posuvů v závislosti na zatížení vřetena

Tato funkce umožňuje, za pomoci definovaných parametrů v tabulce nástrojů, zvyšovat posuvy, a to při nízkém zatížení vřetena, nebo mimořezném pohybu. Naopak při vysokém zatížení dokáže posuvy snížit, aby nedocházelo k nadměrnému opotřebenosti nástroje.

3. ACC – aktivní řízení drnčení (číslo opce #145)

- Automatická funkce k potlačení drnčení při obrábění

Tato automatická funkce detekuje a eliminuje drnčení nástroje pomocí pohonu posuvů stroje, čímž je dosaženo snížení sil působících na nástroj. Dokáže efektivně eliminovat drnčení do 100 Hz. Nad tuto hodnotu nemusí být drnčení dostatečně utlumeno. [6]

3 NÁVRH VLASTNÍ SOUČÁSTI

Součást, která byla v této práci vypracovaná, je zaměřena na problematické součástky vyráběné v současnosti pro letecký a kosmický průmysl. Tím je na mysli vysoká přesnost, pevnost a co nejnižší váha.

Výroba takovýchto součástí s sebou nese hned několik výzev:

- složité tvary v kombinaci tenkých stěn
- malé rozměry součástí
- hluboké kapsy s malými poloměry rohů
- přísné rozměrové, geometrické tolerance a textura povrchu

3.1 KONSTRUKČNÍ MATERIÁLY

Ještě donedávna zabíraly v leteckém průmyslu největší část použitého materiálu hliníkové slitiny. V poslední době je tomu však jinak, a to kvůli vývoji nejrůznějších kompozitních materiálů (viz tabulka 1). [7]

Tabulka 1 - Konstrukční materiály letadel společnosti Boeing (zastoupení celkové hmotnosti v %) [7]

Série	Al slitiny	Ti slitiny	Oceli	Kompozitní materiály	Ostatní
Boeing 747	81	4	13	1	1
Boeing 757	78	6	12	3	1
Boeing 767	80	2	14	3	1
Boeing 777	70	7	11	11	1
Boeing 787	20	15	10	50	5

Nejčastěji obráběným lehkým slitinám a jejich mechanickým vlastnostem, používaných v leteckém a kosmickém průmyslu, bude věnován důraz v následujících dvou kapitolách.

3.1.1 HLINÍKOVÉ SLITINY

I přes vývoj kompozitních materiálů zůstanou hliníkové slitiny nedílnou součástí konstrukčních materiálů. Důvodem je především jejich vysoká pevnost, nízká váha a výborná obrobiteľnosť. Mezi nejpoužívanější slitiny hliníku pro konstrukci letadel jsou slitiny série 2000 a 7000.

EN AW-2024-T651 je slitina používaná pro konstrukce nejvíce namáhané únavově, a to důsledkem její rezistence pro růst únavových trhlin.

EN AW-7075-T651 je hliníková slitina, která se díky obohacení zinkem řadí mezi nejpevnější Al-slitiny s mezí kluzu až 503 MPa. [7]

Tabulka 2 – Procentuální zastoupení prvků chemického složení slitin EN AW-2024 T651 a EN AW-7075 T651 [8]

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
EN AW-2024 T651	0,5	0,5	3,8-4,9	0,3-0,9	1,2-1,8	0,1	0,25	0,15	90,7-94,7
EN AW-7075 T651	0,4	0,5	1,2-2,0	0,3	2,1-2,9	0,18-0,28	5,1-6,1	0,2	87,1-91,4

Tabulka 3 - Mechanické vlastnosti hliníkových slitin EN AW-2024 T651 a EN AW-7075 T651 [8]

Hliníková slitina	EN AW-2024 T651	EN AW-7075 T651
Mez kluzu [<i>MPa</i>]	315	503
Mez pevnosti [<i>MPa</i>]	415	572
Modul pružnosti [<i>GPa</i>]	72,4	71,7
Tvrdość [<i>HB</i>]	95	150
Hustota [<i>kg · m⁻³</i>]	2780	2810

3.1.2 TITANOVÉ SLITINY

Nejrozšířenější titanovou slitinou v leteckém a kosmickém průmyslu je Ti6Al4V, která je známá svou vysokou pevností, teplotní a korozní odolností. V dnešní době je možno tuto slitinu nalézt také v jiných odvětvích, a to například pro výrobu protéz. [9]

Oproti hliníkovým slitinám se vykazují horší obrobiteľnosť a veľmi vysokou cenou.

Tabulka 4 - Procentuální zastoupení prvků chemického složení titanové slitiny Ti6Al4V STA [8]

Al	C	H	Fe	N	O	Ti	V	Ostatní
5,5-6,75	0,08	0,015	0,04	0,03	0,2	87,725-91	3,5-4,5	0,05

Tabulka 5 - Mechanické vlastnosti titanové slitiny Ti6Al4V STA [8]

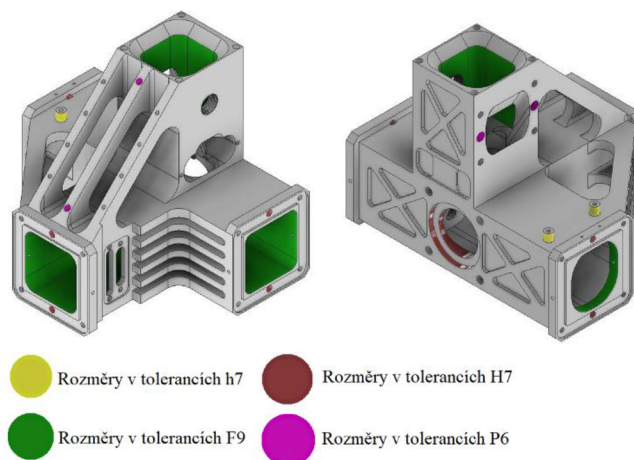
Titanová slitina	Ti6Al4V
Mez kluzu [<i>MPa</i>]	1100
Mez pevnosti [<i>MPa</i>]	1170
Modul pružnosti [<i>GPa</i>]	114
Tvrdość [<i>HB</i>]	379
Hustota [<i>kg · m⁻³</i>]	4430

3.2 CAD MODEL A VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE

Návrh součásti a zpracování nezbytné výkresové dokumentace byly provedeny v CAD softwaru Inventor 2020, který je vyvíjen americkou společností Autodesk. Součást je navržena dle problémových aspektů výroby leteckých a kosmických součástí probíraných na začátku kapitoly 3.

Jedná se tvarově o velmi složitý díl, pro jehož výrobu je nezbytné použití nástrojů malých průměrů a víceosého simultánního frézování. Pro jednodušší orientaci byla pro nejdůležitější tolerované rozměry vložena barevná informace (viz obr. 9).

Největší rozměry součásti: délka 82 mm, šířka 65 mm, výška 66 mm



Obr. 9: Model součásti s vloženou barevnou informací

Jako materiál součásti byla po porovnání mechanických vlastností z kapitol 3.1.1 a 3.1.2 zvolena hliníková slitina EN AW-7075 T651. Roli ve výběru materiálu hrála hlavně cena, obrobitelnost a poměr pevnost/váha.

Výkresová dokumentace součásti (viz obr. 9) je doložena v příloze č. 1. Výkresová dokumentace byla vypracovaná dle používaných platných norem s důraznou implementací značek textury povrchu dle normy ČSN EN ISO 21920, která byla vydána v červnu roku 2023.

4 ZPŮSOB FRÉZOVÁNÍ

Pro veškeré obráběcí strategie v CAM softwaru PowerMILL je nutno nastavit směr frézování, čímž je na mysli sousledné nebo nesousledné frézování. V následujících dvou kapitolách budou stručně uvedeny výhody a nevýhody jednotlivých směrů frézování.

4.1 SOUSLEDNÉ FRÉZOVÁNÍ

Při sousledném frézování má obráběcí nástroj shodný směr pohybu vůči obrobku a jeho otáčení. Velikost odebírané třísky je na počátku záběru nástroje největší a postupně se zmenšuje, až dosáhne nuly (viz obr. 10) [10]. Výhodou je menší opotřebení nástroje, nižší řezné síly a lepší textura povrchu.

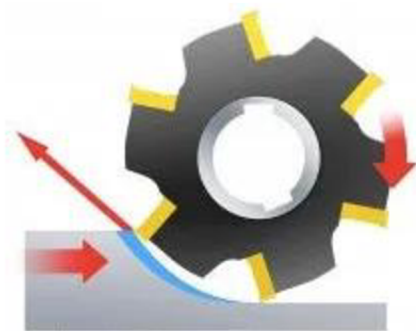


Obr. 10: Schéma sousledného frézování [11]

Při aplikaci jakékoliv obráběcí strategie bylo využito primárně sousledné frézování. V některých výjimečných případech bylo pro optimalizaci strojního času využito obousměrného řezu.

4.2 NESOUSLEDNÉ FRÉZOVÁNÍ

Při nesousledném frézování je směr pohybu rotace obráběcího nástroje vůči obrobku opačný. V tomto případě dochází k odebrání největší části třísky až na konci řezu (viz obr. 11), což má za následek možné obrušování a odírání vlivem tření [11]. Dochází k většímu opotřebení nástroje, vyšším řezným silám a horší textuře povrchu.



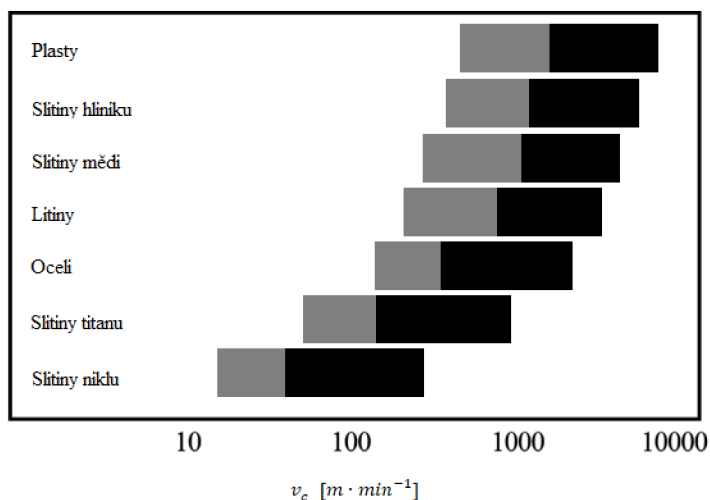
Obr. 11: Schéma nesousledného frézování [11]

4.3 FRÉZOVÁNÍ HSC A HPC NÁSTROJI

Vysokorychlostní frézování (HSC) dosahuje velmi velkých hodnot řezných rychlostí v kombinaci s nižšími axiálními a radiálními záběry. To vede ke zlepšení několika důležitých parametrů:

- snížení řezných sil
- lepší kvalita povrchu
- vyšší přesnost
- snížené teplotní zatížení obrobku a nástroje
- vysoká produktivita

Hodnoty řezných rychlostí závisí na materiálu nástroje, obráběném materiálu a jeho upnutí. U hliníkových slitin je přechodová oblast mezi konvenčním frézováním a HSC frézováním kolem hodnoty $500 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a dosahuje maximálních hodnot kolem $7\,000 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ (viz obr. 12). [10]



Obr. 12: Hodnoty řezných rychlostí HSC frézování různých materiálů ([10], upraveno)

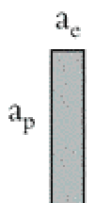
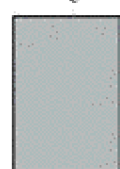
Vysoce výkonné řezání (HPC) je strategie, která je zaměřena na co největší úběr materiálu za co nejkratší jednotku času, při čemž dochází k ještě větší úspoře času ve srovnání s jinými strategiemi [12]. Na rozdíl od HSC strategie je HPC určena zejména pro hrubovací operace, a to především kvůli možným deformacím vzhledem k velkým řezným silám.

Hlavní aspekty HPC frézování:

- velký úběr materiálu
- vysoké řezné síly
- vysoké posuvy
- vysoké teploty (nutno použití procesní kapaliny)

Porovnání HSC a HPC strategie viz tabulka č. 6.

Tabulka 6 - Porovnání parametrů HSC a HPC frézování ([12], upraveno)

Charakteristika strategie	Vysokorychlostní frézování (HSC)	Vysoce výkonné frézování (HPC)
$a_e \times a_p$	$a_e < \varnothing D$ $a_p \sim \varnothing D$ 	$a_e \sim \varnothing D$ $a_p \sim \varnothing D$ 
Posuv	4	3
Řezná rychlost	5	3
Objem odebíraného materiálu	3	5
Řezná síla	1	4
Potřebný výkon	1	4
Nízké 1 – 5 Vysoké		

Při zpracování součásti bylo provedeno porovnání strategií použitím HSC nebo HPC frézovacích nástrojů za účelem případného ušetření strojního času.

4.4 PROCESNÍ KAPALINA

Přívod procesní kapaliny do místa řezu během obrábění je nezbytný, a to z více důvodů:

- snížení tření mezi obrobkem a nástrojem
- chlazení obrobku a nástroje
- zamezení tvorby nárůstku na řezné hraně nástroje
- odvádění třísek z řezné oblasti

Vzhledem k ohledu na ochranu prostředí a zdraví začalo být využíváno tzv. „minimální množství mazání“, při kterém je použito jen velmi málo množství procesní kapaliny, která dokáže velmi značně snížit tření mezi nástrojem a obrobkem, čímž i snižuje opotřebení nástroje. [10]

Porovnání množství použité procesní kapaliny při „mokřém“ obrábění a MQL je znázorněno v tabulce č. 7.

Tabulka 7 - Množství použité procesní kapaliny různých technologií ([10], upraveno)

Typ mazání	Způsob	Množství
Chladicí kapalina	Zaplavení, proud	10 až 100 l · min ⁻¹
Snížené mazání	Minimální množství mazání (MQL)	50 ml · h ⁻¹ až 2 l · h ⁻¹
	Minimální množství chladicího mazání (MMKS)	<50 ml · h ⁻¹

V případě zaplavení nebo proudem se jako chladící kapalina nejčastěji používají minerální oleje, které jsou mísitelné ve vodě. U technologie MQL je využita směs oleje a vzduchu. [10]

V případě zvolené součásti bylo využito chlazení silným proudem emulze, případně vnitřní chlazení včetně za pomoci minerálního oleje mísitelného ve vodě od firmy Blaser swisslube. Toto chlazení bylo zvoleno z důvodu nutného výplachu kapsy s podkosem a využití HPC frézovacích nástrojů.

5 ZPRACOVÁNÍ PRVNÍ STRANY UPNUTÍ

Součást byla v pracovním prostoru cíleně ustavena tak, aby byl souřadný kříž umístěn ve středu kapsy na geometrické základně A. Tímto bylo dosaženo přehlednosti pro programování zejména pro jednostranné rozměrové tolerance, které se od této základny odvíjí.

Upnutí součásti bylo zajištěno svěrákem určeným pro pětiosé frézování od firmy Lang Technik. Tento svěrák dokáže pomocí svých „zoubků“ na upínací čelisti udržet polotovar pouze za 3 mm. Zajistí hladké obrobení všech bočních stran součásti. Ovšem toto upnutí lze provozovat jen při hrubovacích operacích, neboť při utažení čelistí svěráku dojde k plastické deformaci upínaného materiálu (viz obr. 13). Technické parametry tohoto svěráku jsou uvedeny v tabulce 8.



Obr. 13: Pětiosý svěrák firmy LANG technick [13]

Tabulka 8 - Parametry pětiosého svěráku Makro-Grip [13]

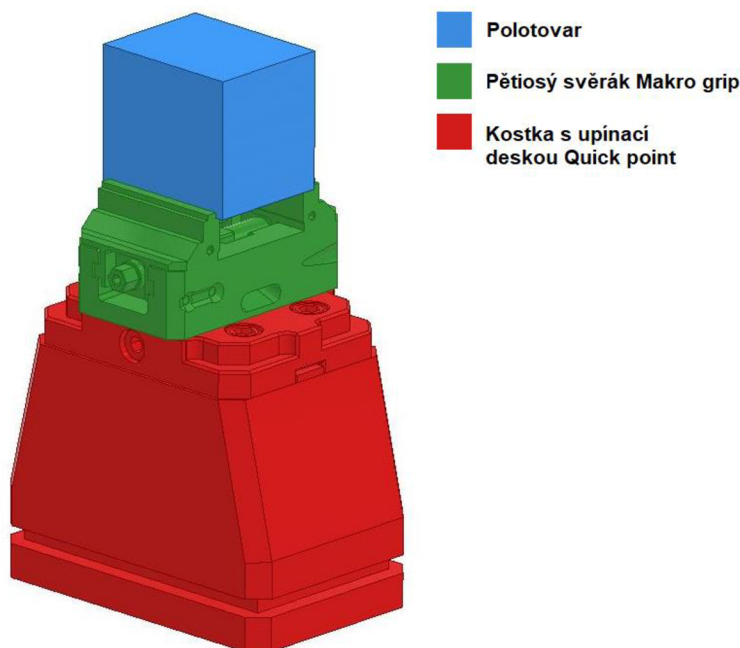
Označení	Makro-Grip 77
Rozsah čelistí [mm]	0-120
Upínací šířka [mm]	77
Hloubka upnutí [mm]	3
Rozměry [mm]	130x77x65
Způsob upínání	Tvarovým stykem /třením
Váha [kg]	2,9
Upínací síla [N]	14000
Maximální utahovací moment [Nm]	60

Samotný svěrák je upnut na tzv. Quick point upínací desce, což je tzv. „deska nulového bodu“ (viz obr. 14). Jeho přichycení je provedeno přes upínací čepy, které zajistí velmi přesné upnutí ($<0,005\text{ mm}$) i při vysoké opakovatelnosti.



Obr. 14: Upínací deska Quick-Point ("deska nulového bodu") [13]

Je nutno, aby se polotovar nacházel minimálně 136 mm nad pracovním stolem stroje, a to z důvodu možné kolize při vyklopení kolíčky stolu o 90° v kombinaci krátké nástrojové sestavy. Pro zabránění této situace je využita kostka s upínací deskou (viz obr. 15). V této kombinaci je možné dosáhnout vyklopení kolíčky stolu nepatrně přes 90° .



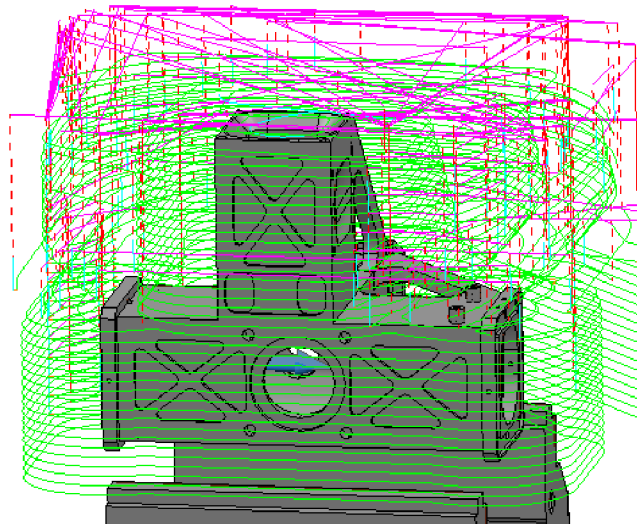
Obr. 15: Upínací sestava včetně polotovaru součástí

5.1 HRUBOVÁNÍ KONTUROVÁNÍM MODELU

Pro co nejeftivnější hrubování byly vyzkoušeny obě technologie frézování, které byly popsány již v kapitole 4.3.

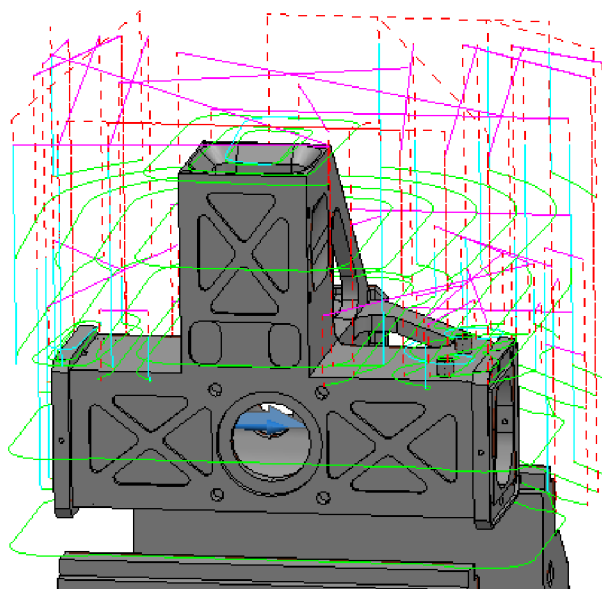
Veškerým hrubovacím operacím byl nastaven přídavek $0,3 \text{ mm}$ a tolerance $0,2 \text{ mm}$. Tolerance $0,2 \text{ mm}$ bude vygenerována postprocesorem jako cyklus 32 v řídicím systému stroje. Nastavená tolerance musí být vždy menší, než je samotný přídavek obrábění.

V případě technologie HSC byla využita fréza o průměru 32 mm s vyměnitelnými břitovými destičkami od firmy WNT, se kterou lze dosáhnout vcelku vysokých hodnot posuvů, avšak za cenu nižší axiální hloubky řezu. Nicméně nižšími s axiálními řezy také narůstá počet přejezdů (viz obr. 16), čímž se značně navyšuje strojní čas.



Obr. 16: Hrubování konturováním modelu HSC frézou

Pro technologii HPC byla využita monolitní fréza o průměru 16 mm firmy Maykestag, která je na tuto technologii konstruována. Jedná se o čtyřbřitou frézu z nové řady nástrojů SpeedCut Alpha, která dosahuje velkých axiálních hloubek, čímž byl snížen počet přejezdů (viz obr. 17)



Obr. 17: Hrubování modelu konturováním modelu HPC frézou

V případě HPC frézování bude docházet k mnohem vyšším hodnotám řezných sil, a tím pádem vyššího potřebného výkonu vřetena stroje. Teoretický výpočet řezných sil a využitý výkon vřetena je proveden v kapitole 8.

Následné vnější zbytkové hrubování zvolené součásti je efektivnější po využití HPC technologie, jelikož je provedena nástrojem polovičního průměru, než tomu bylo u HSC technologie, tím pádem je dosaženo menších poloměrů v rozích.

Porovnání výsledných strojních časů CAM softwaru jasně vede k závěru, že pro hrubování je mnohem efektivnější technologie HSC (viz tabulka č. 9).

Tabulka 9 - Porovnání strojních časů HSC a HPC hrubování

Strategie	HSC hrubování	HPC hrubování
Počet zdvihů nástroje [-]	135	44
Celkový čas v CAM softwaru [s]	106	175

Pozn.: Veškeré řezné parametry včetně posuvů byli převzaty z kapitoly 7.1.

Z tabulky lze vypožorovat, že i přes velký počet přejezdů je efektivnější hrubování nástrojem HSC. Dalšího snížení strojních časů je možno docílit využitím opce adaptivního řízení posuvů viz kapitola 2.3.2.

5.2 HRUBOVÁNÍ PRAVOÚHLÝCH KAPES

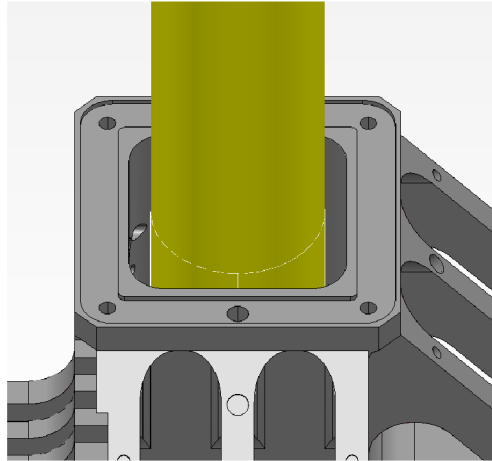
Hrubování pravoúhlých kapes je možno zpracovat několika způsoby, přičemž mezi ty nejefektivnější je řazeno:

- hrubování předvrtané kapsy
- hrubování zanořením po spirále

Tyto způsoby byly demonstrovány na pravoúhlé čtvercové kapse o rozměru 20 mm s vnitřním zaoblením rohů R 2,3 mm a hloubce 24 mm. Veškeré hrubovací operace byly provedeny frézou o průměru 10 mm s následným zbytkovým hrubováním rohů frézou o průměru 4 mm pro sjednocení přídavek v rozích kapsy.

5.2.1 HRUBOVÁNÍ S PŘEDVRTÁNÍM

Předvrtání kapsy bylo provedeno vrtákem o průměru 16 mm vyměnitelnou špičkou od firmy WNT, určeným pro obrábění hliníkových slitin. Vrták zabere poměrně velkou část kapsy (viz obr. 18). Takto předvrtaná kapsa usnadní přístup pro následující hrubovací operace.



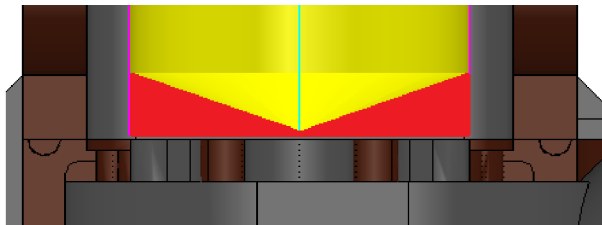
Obr. 18: Předvrtání pravoúhlé kapsy

Pro vzájemné porovnání strojních časů byly po předvrtání využity dvě možné strategie s rozdílnými nástroji:

- trochoidní hrubování
- HPC hrubování

Veškeré parametry nástrojů včetně řezných podmínek jsou uvedeny v kapitole 6.

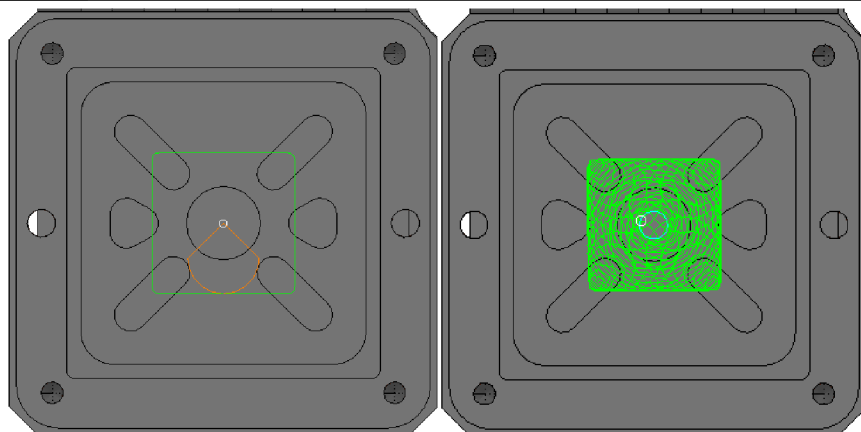
Trochoidní hrubování probíhá frézou, která je navržena speciálně pro tuto strategii. Využitím vrtáku s vrcholovým úhlem 140° zůstane na dně kapsy zbytkový materiál (viz obr. 19 – červená barva), je nutno využít zanoření frézy po spirále, jelikož tento nástroj nedisponuje schopností vertikálního zanoření.



Obr. 19: Zbytkový materiál dna po předvrtání kapsy

Trochoidní dráhy byly zajištěny strategií zbytkového hrubování modelu stylu vortex (viz obr. 21). Tato strategie umožňuje zvýšení posuvů neřezného pohybu, které bylo implementováno pro ještě nižší strojní časy.

Druhou možností po předvrtání kapsy je zbytkové hrubování frézou. Ta umožňuje vertikální zanoření, tudíž není potřeba nástroj po předvrtání zanořovat po spirále. Nájezd je nastaven na střed kapsy (viz obr. 20) se sníženým posuvem pro vertikální zanoření.



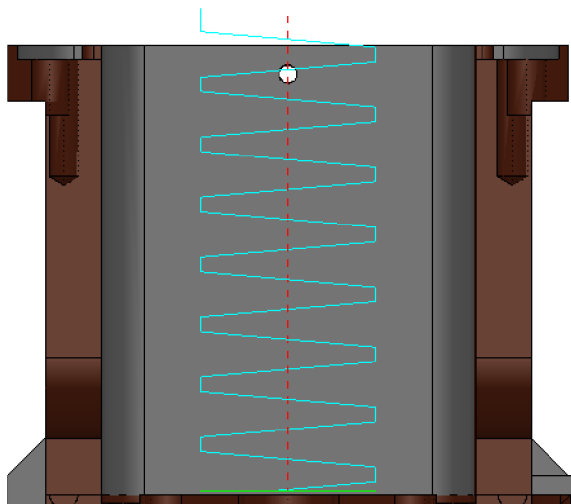
Obr. 20: Zbytkové hrubování nástrojem HPC

Obr. 21: Hrubování stylem vortex (trochoidní dráhy)

5.2.2 HRUBOVÁNÍ ZANOŘENÍM PO SPIRÁLE

V případě zanoření nástroje po spirále bez nutného předvrtání je použito o jednu výměnu nástroje méně. Časté výměny nástrojů dokážou u tvarově složitých součástí výrazně ovlivnit strojní čas, proto je nutno dosáhnout co nejefektivnější posloupnosti.

Pro tuto strategii byl využit stejný nástroj jako v předchozí kapitole, ale tentokrát bez nájezdu do předvrtaného otvoru zanořením po spirále do plného materiálu (viz obr. 22).



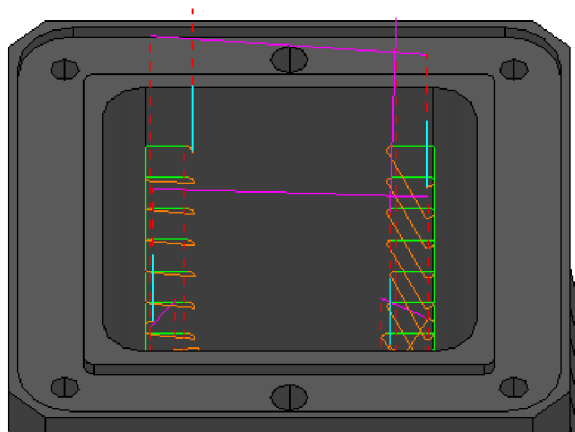
Obr. 22: Hrubování zanořením pod úhlem nástrojem HPC

5.2.3 ZBYTKOVÉ HRUBOVÁNÍ ROHŮ

Pro optimalizaci drah zbytkového hrubování byla využita funkce zbytkového materiálu. Tato funkce zajišťuje, že žádná z následujících operací zbytkového hrubování nepojede „naprázdno“. Využití strategie zbytkové hrubování je hlavně cíleno na sjednocení přídavek, je provozováno s menšími nástroji, než byl předchozí hrubovací nástroj. Důvodem je, že se nástroje s větším průměrem nedostanou do zaoblených rohů menších, než je jejich poloměr (+ přídavek na stěnu), nebo pokud má předchozí nástroj zaoblenou geometrii špičky bříty.

Pro konečné sjednocení přídavek rohů kapsy byla kvůli zaoblení rohů $R=2,3 \text{ mm}$ použita fréza o průměru 4 mm .

Lepší navázání jednotlivých drah bylo zajištěno přímým propojením a pořadím „kapsy“, která zajistí, že zbytkové hrubování proběhne postupně v každém rohu zvlášť (viz obr. 23)



Obr. 23: Zbytkové hrubování rohů nástrojem o průměru 4 mm

5.2.4 POROVNÁNÍ STROJNÍCH ČASŮ

Porovnání strojních časů jednotlivých strategií, včetně času potřebného pro výměnu nástrojů, lze vidět v tabulce č. 10. Čas výměny nástroje viz příloha č. 3 – technické parametry obráběcího stroje.

Tabulka 10 - Porovnání strojních časů hrubování pravoúhlé kapsy

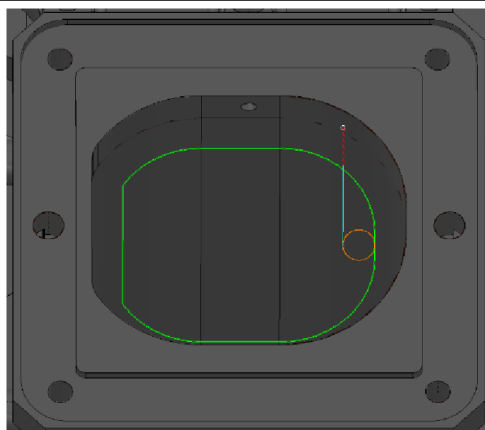
Strategie	Předvrtání + trochoid	Předvrtání + HPC	Hrubování po spirále
Čas předvrtání	≈ 1 s	≈ 1 s	-
Čas frézování	≈ 3 s	≈ 1 s	≈ 4 s
Čas zbytkového hrubování rohů	≈ 2 s	≈ 2 s	≈ 2 s
Počet použitých nástrojů	3	3	2
Celkový čas	≈ 14 s	≈ 12 s	≈ 10 s

Z tabulky lze vyčíst, že nejmenší strojní časy jsou v případě hrubování HPC frézou zanořováním pod úhlem, a to z důvodu použití dvou nástrojů, čímž se snížil strojní čas o jednu výměnu nástroje.

I přes tento fakt byla zvolena strategie předvrtáním s následným trochoidním hrubováním, a to z důvodu hladšího průběhu obrábění v rozích kapes. V případě použití nástroje HPC by mohlo v těchto rozích dojít k přetížení a samotnému lomu nástroje.

5.3 DOKONČENÍ OBRYSU KAPSY PRO PODKOS

Následující operací po sjednocení většiny přídavků je přichystání vstupu pro frézování podkosu (viz obr. 24). Pro tento obrys byl nastaven záporný přídavek křivky kvůli jednostranné toleranci F9.



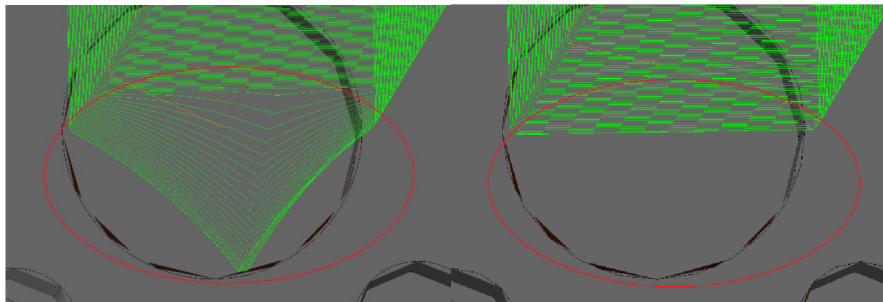
Obr. 24: Dokončení obrysu pro vstup frézy tvaru T

Záměrně nejsou vyhrubovány otvory, které zasahují do míst podkosu, aby nedocházelo k přerušovanému řezu kotoučové frézy. V tuto chvíli je součást téměř kompletně vyhrubovaná a dochází k první dokončovací operaci.

5.4 OBROBENÍ PODKOSU

Jedna z náročnějších operací pro vyhotovení zvolené součásti je dokončení podkosu, který má celkovou délku 54 mm. Pro tuto operaci byl zvolen kotoučový nástroj firmy HORN. Jedná se o stopkovou frézu s vyměnitelným břitem tvaru T, jehož řezné a rozměrové parametry jsou uvedeny v kapitole 7.1.

Použitou strategií, která disponuje funkcí obrábění podkosu, je dokončení v hladině Z. Pro správnou funkci této strategie je nutno zaslepit veškeré otvory, které do podkosu zasahují, a to z důvodu, že je má tendenci konturovat (viz obr. 25). Pro zamezení tohoto jevu byl využit pomocný model, který byl importován pouze pro výpočet dráhy podkosu.



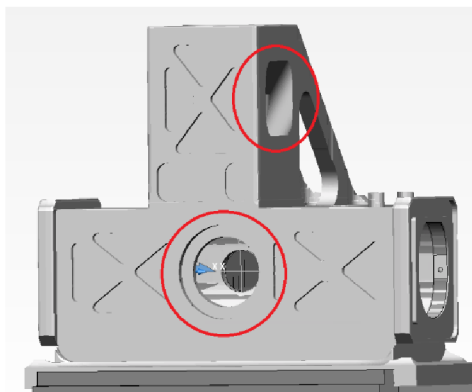
Obr. 25: Dráha podkosu bez zaslepení otvoru

Obr. 26: Dráha podkosu s pomocným modelem

Pro odvod jemných třísek při frézování podkosu byl na dně kapsy vyhrubován otvor 5,6H6 s přídavkem 0,1 mm na stěnu. Třísky při frézování podkosu budou velmi jemné kvůli zanořování po spirále s kombinací malého konstantního kroku.

Veškeré dráhy, které se zanořují po spirále, byly ode dna a počátku podkosu odsazeny. Pro dokočení dna a počátku podkosu jsou dráhy vytvořeny zvlášť, aby bylo možné korigovat celkovou délku podkosu délkovou korekcí nástroje. Celkově bylo tedy pro jeho dokončení vytvořeno 5 programů. Nejnáročnější částí bylo vytvoření nájezdů, jelikož vstupní kapsa je jenom o několik desetin větší než samotný průměr nástroje, proto bylo nutné mít nájezdy přesně ve středu kapsy. Pro správné vytvoření nájezdů byla z použita funkce „spojení drah“.

Po dokončení nutných operací podkosu byly obrobeny všechny otvory, které do něj zasahovaly (viz obr. 27).



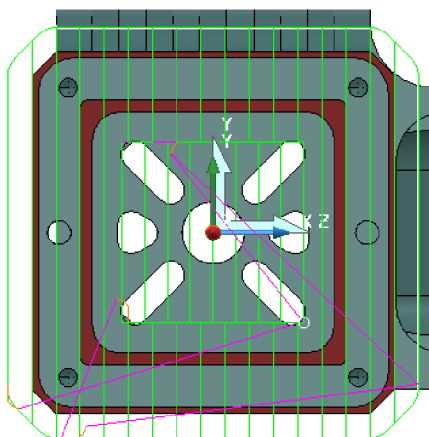
Obr. 27: Kompletně vyhrubovaná součást

5.5 DOKONČOVACÍ OPERACE

Veškeré dokončovací operace byly tvořeny s přídavkem 0,05 mm a následným dokončením, a to z důvodu různorodých přídavek, potřeby většího axiálního vyložení, přísných tolerancí textury povrchu a tenkých stěn součástí.

Dokončení jednoduchých ploch bylo zajištěno strategií konturování rovin řádkováním obousměrným řezem.

V případě obrábění dvou hladin, které vůči sobě mají jednostrannou délkovou toleranci, bylo záměrně využito stejného nástroje a přídavek plochy, aby tato tolerance byla vždy dodržena. Axiální přídavek plochy je zvýrazněn červenou barvou (viz obr. 28). Tato funkce byla využita u všech přírub součásti, jelikož jsou svázány jednostrannou délkovou tolerancí k plochám na dně kapes, na kterých se nachází geometrické základny.

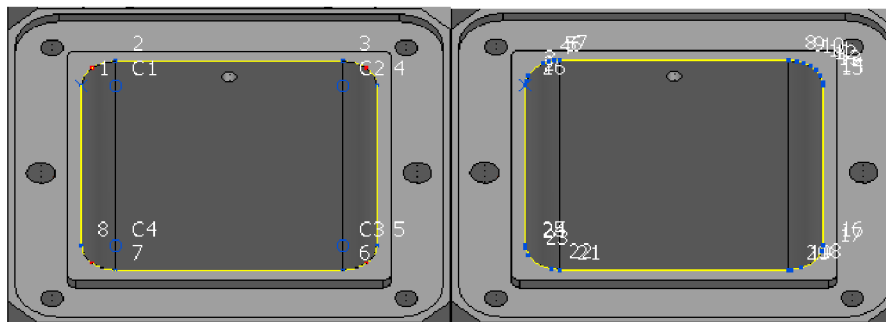


Obr. 28: Dokončení řádkování s využitím přídavek plochy

Jednoduché obrysy byly dokončeny strategií 2D profilování. Pro tuto strategii bylo nutné vytvořit obráběcí křivku. Na rozdíl od strategie dokončení bokem je možné vytvářet dráhy s radiálním přídavkem a dokončením najednou. Dalším důvodem využití této strategie je, že strategie bokem neumí pracovat s obrysy, kde se objevují díry.

Pro tvary s rádiusy byly křivky převedeny na oblouky, a to z důvodu přesnosti tvaru. Při převodu křivek na oblouky budou veškeré rádiusy definovány středem, počátečním

a koncovým bodem (viz obr. 29). Pokud se tak neučiní, budou veškeré oblouky tvořeny mnoha body (viz obr. 30).

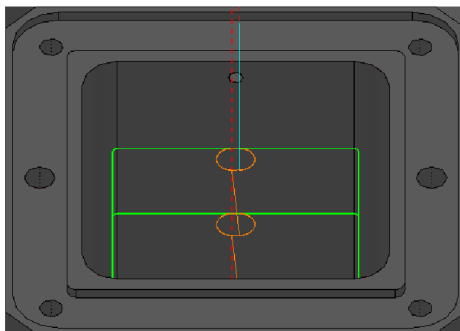


Obr. 29: Křivky převedeny na oblouky

Obr. 30: Křivka vytvořena mnoha body

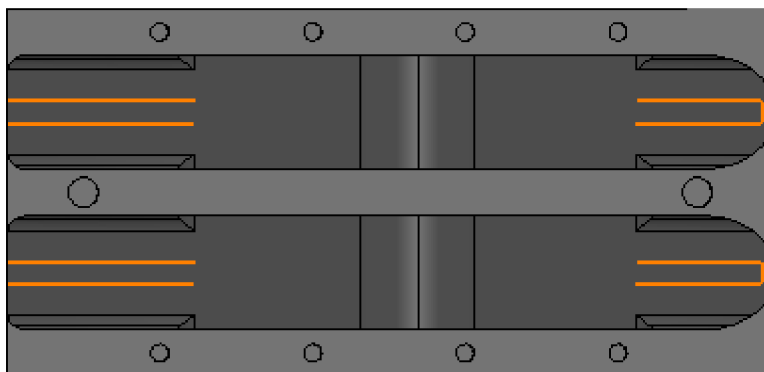
Pro kapsy s jednostrannou tolerancí F9 bylo využito záporného přídavku křivky. Veškeré kapsy a obrysy jsou obráběny s přídavkem $0,05 \text{ mm}$ a následným dokončením, jak bylo již zmíněno výše.

Nájezdy a propojení byly nastaveny tak, aby nedocházelo ke zbytečnému navyšování strojního času. V případě dokončení veškerých kapes byl využit horizontální oblouk a přímé propojení po jednotlivých hladinách (viz obr. 31).



Obr. 31: Dokončení pravoúhlých kapes 2D profilováním

Dokončení výztužných žebér, které nemají žádné přísné rozměrové tolerance, bylo provedeno prostřednictvím strategie dokončení víceosou křivkou, která umožňuje simultánní pětiosé frézování. Pro tuto strategii byla vytvořena křivka, která je od stěn součásti odsazena o 3 mm (viz obr. 32). Odsazení bylo provedeno nástrojem offset, který je v editoru křivek, po odsazení byly křivky na součást naneseny víceosé, aby byly zpřístupněny pro tuto strategii.

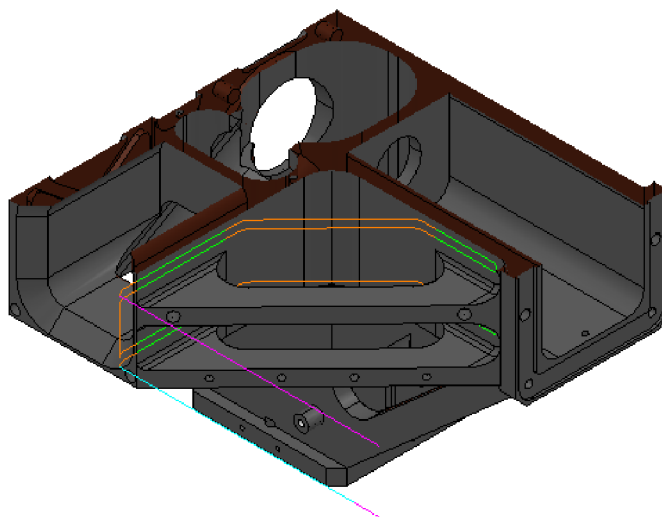


Obr. 32: Víceosá křivka pro dokončení výztužného žebra

Při používání funkce offset je potřeba mít křivky promítnuté do roviny XY.

Po offsetu křivky bylo nutno křivku nanést víceose, čímž byla zpřístupněna možnost použít tuto křivku pro vybranou strategii.

Kvůli zaoblení mezi dnem a obrysem součásti byla využita fréza o průměru 6 mm s rohovým rádiusem 1 mm, kterým bylo docíleno potřebného zaoblení. Pro nájezdy a výjezdy byla zvolena možnost vertikálního oblouku s protažením a přímým simultánním propojením. Tím docílíme obrobení kompletně celé vnitřní části výztužných žeber (viz obr. 33).



Obr. 33: Řez součásti pro zobrazení dokončovací dráhy výztužných žeber

5.6 VRTÁNÍ A ZÁVITY

Pro veškeré vrtání byla použita strategie s přerušováním třísky, aby nedocházelo k možnému zalepování vrtáků. Jedná se totiž o velice malé průměry vrtaných otvorů. Potřebné průměry vrtáku pod závit můžeme vidět v tabulce č. 11.

Tabulka 11 - Vypočtené průměry vrtáků pod zvolené závit

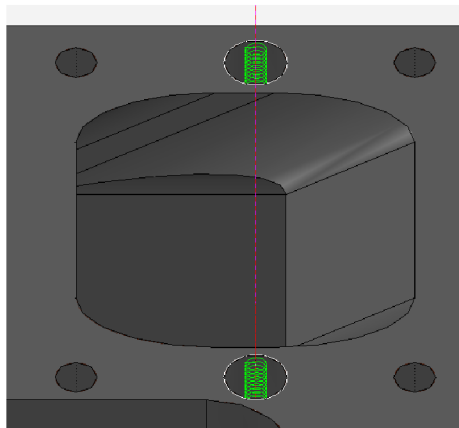
Označení závitu	Stoupání závitu [mm]	Průměr vrtáku [mm]
M1,6	0,35	1,25
M2	0,4	1,6
M25	0,45	2,1
¼-100 UNS	0,254	6,1

Frézování závitu bylo vygenerováno postprocesorem jako cyklus pro vnitřní frézování, kterým disponuje řídicí systém stroje. Při použití závitníku bude vygenerován cyklus 207 „pevné závitování“.

Programy byly vytvořeny pro každou skupinu děr zvlášť za účelem přehlednosti pro případné úpravy obsluhy stroje.

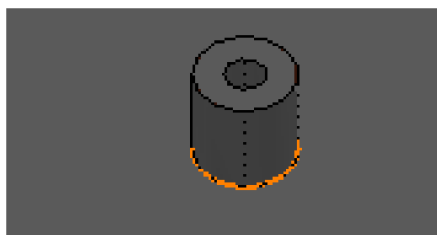
5.7 DOKONČENÍ PŘESNÝCH OTVORŮ A ČEPŮ

Během vrtání děr pod závity byly tyto vrtáky použity pro předvrtání přesných otvorů za účelem co nejmenšího opotřebení nástrojů během jejich dokončování. Veškeré přesné díry byly frézovány pomocí strategie helix (viz obr. 34), kde byl při výstupu vygenerován cyklus 208 „frézování díry“.



Obr. 34: Dokončení přesných otvorů po spirále

Pro čepy byly vytvořeny 2D křivky, převedené do oblouků, a dráhy vytvořeny jako tzv. „nulová dráha“. To znamená, že pozice pro frézování byla nastavena středem nástroje (viz obr.35). Toto nastavení bylo použito záměrně a čepy byly upraveny jako frézování obrysu cyklem číslo 25 přímo v řídicím systému stroje.



Obr. 35: Křivka čepu 3h7 pro „nulovou dráhu“

Záměrně bylo veškeré dokončování přesných otvorů a čepů vyhotoveno frézováním, a to z důvodu, že se při výrobě dílů pro letecký či kosmický průmysl často jedná o prototypy, či jednotky kusů. V případě velkosériové výroby by byly využity tvrdokovové výstružníky.

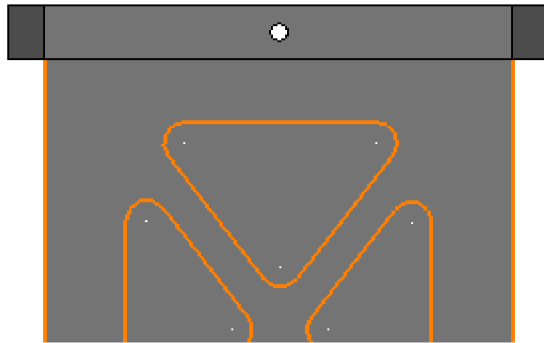
5.8 ODJEHLENÍ OSTRÝCH HRAN

Každá strojírenská firma na trhu má oddělení pro ruční zpracování dílů po obrábění. Většinou se jedná o odjehlení ostrých hran. Pro co největší optimalizaci celkové výroby kusu je snaha veškeré odjehlení provést na obráběcím stroji, aby nutnost ručního zpracování dosahovala co nejmenší časové náročnosti.

Z tohoto důvodu byly vytvořeny dráhy pro kompletní odjehlení součásti s výjimkou složitých tvarů a nepřístupných míst.

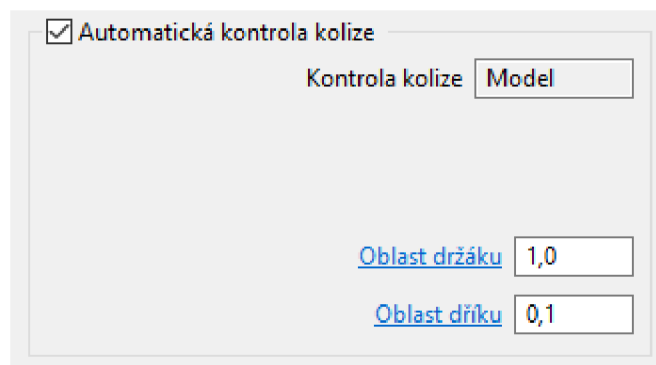
Odjehlení bylo vytvořeno pomocí strategie frézování sražení pomocí křivky. Použitým nástrojem je 90° srážecí firmy WNT.

Křivku lze pro tuto strategii definovat hned několika způsoby. V případě sražení na CAD modelu lze křivku definovat horní nebo dolní úrovní tohoto sražení. V opačném případě je křivka nanesena na hraně, která má být sražena (viz obr. 36).



Obr. 36: Křivka odjehlení

Aby nebylo nutné definované křivky odsazovat od stěn, byla využita funkce automatické kontroly kolize (viz obr. 37). Tato funkce zajistí, aby nedocházelo ke kolizi mezi dřikem srážče a obráběným modelem. Velikost odsazení byla definována zadanou hodnotou v oblasti dříku.

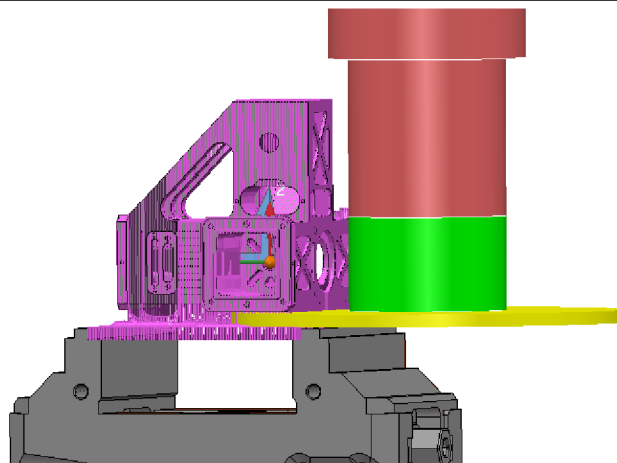


Obr. 37: Funkce automatické kontroly kolize pro odsazení dráhy odjehlení

Za účelem zamezení možného zajetí srážče do dna plytkých kapes, drážek nebo vybrání byla axiální pozice u veškerého sražení nastavena 0,3 mm pod řídicí křivku.

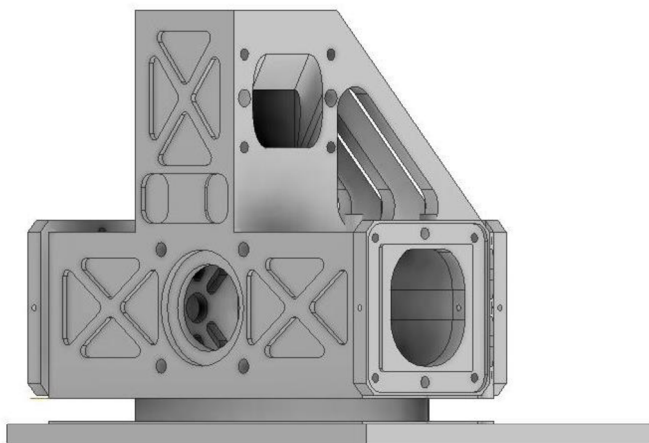
5.9 PŘÍPRAVA PRO DRUHOU STRANU UPNUTÍ

Závěrečnou operací z první strany upnutí bylo využito tzv. „podříznutí“ kusu kotoučovou frézou o průměru 125 mm (viz obr. 38). Touto operací bylo docíleno minimálního přídavku obrábění pro dokončení součásti druhé strany upnutí.



Obr. 38: Odříznutí součásti kotoučovou frézou o průměru 125 mm

Výsledkem je tenký plech (viz obr. 39), ze kterého lze součást jednoduše „odlomit“. Křivka je účelně nanesena do oblouku, aby nedošlo k možnému naklonění součásti a zajetí do materiálu.



Obr. 39: Lehce odlomitelná „podříznutá“ součást

V kapitole 9.1.8 byla pro tuto operaci provedena deformační analýza softwarem ANSYS, ve které byla zahrnuta řezná síla a upínací síla polotovaru.

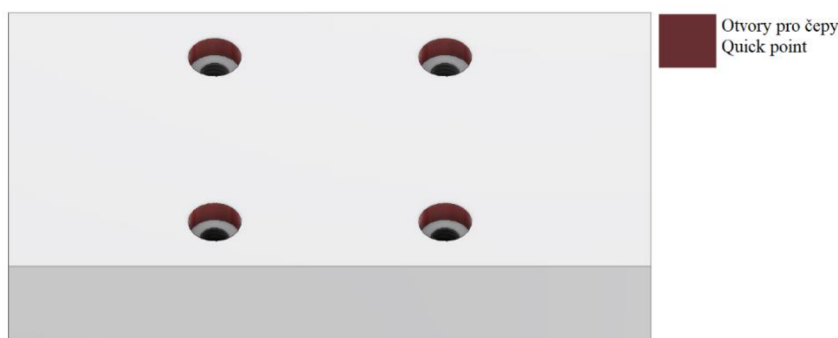
6 ZPRACOVÁNÍ DRUHÉ STRANY UPNUTÍ

Pro dokončení druhé strany upnutí byla zapotřebí výroba přípravku. Přípravek byl vyroben z hliníkové slitiny EN AW-5083, jelikož zde z důvodu velmi malé upínací síly není potřeba vysoká pevnost materiálu.

6.1 NÁVRH PŘÍPRAVKU PRO UPNUTÍ

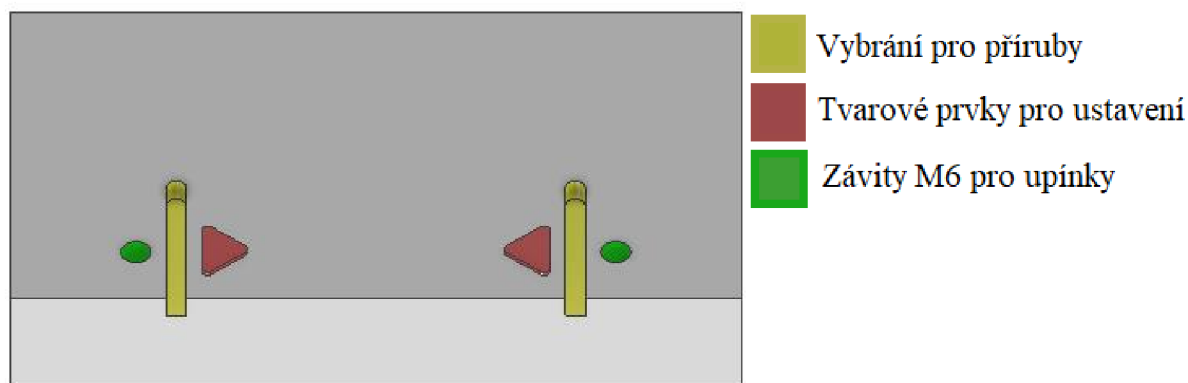
Přípravek byl navržen pro upínací systém Quick point, kde bylo využito čepů stejným způsobem, jako při upínání pětiosého svěráku. Pomocí tohoto systému upínání bylo možné využítí upínacího přípravku pro případné opakování výroby.

Pro výrobu přípravku byl vytvořen samostatný projekt v softwaru PowerMILL s kompletním naprogramováním. Na přípravku bylo nutné vyrobit otvory pro čepy Quick point. Ustavovací rozměr pro čepy je 12H7 a potřebný závit k jejich zašroubování je M8, proto byly na přípravku tyto otvory vytvořeny (viz obr. 40).



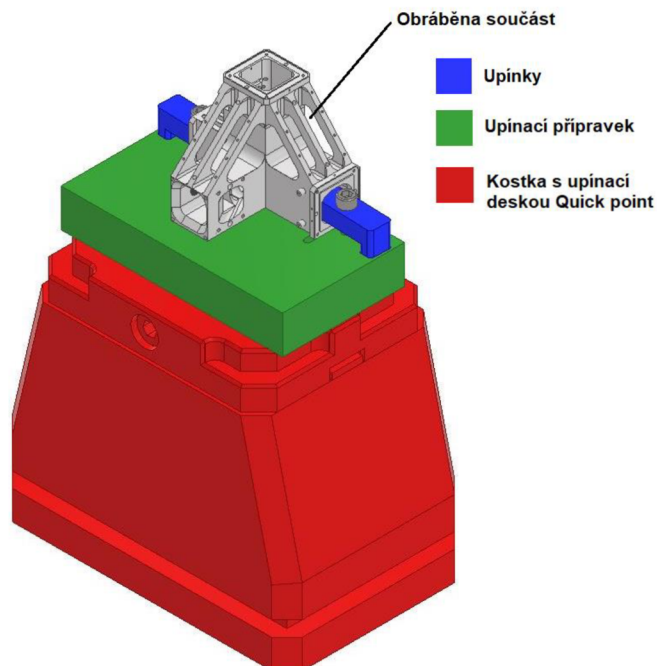
Obr. 40: Otvory pro upínací čepy přípravku

Po výrobě těchto otvorů a našroubování potřebných čepů byl samotný přípravek upnut na Quick point desku a bylo možno vyhotovit druhou stranu přípravku. Z druhé strany přípravku byly namodelovány dva tvarové prvky, podle kterých byla zvolena součást ustavena (viz obr. 41). Vzhledem k tomu, že při dokončení součástí z druhé strany byla v obráběcím programu využita obrobková sonda, není potřeba tyto tvarové prvky pro ustavení vyrábět v těsné toleranci.



Obr. 41: Kompletní přípravek pro druhou stranu upnutí

Pro připevnění obráběné součásti byly použity dvě upínky podložené plastovými podložkami, aby nedošlo k poškození dokončených kapes. Upínky byly dotaženy šrouby M6 (viz obr. 42).

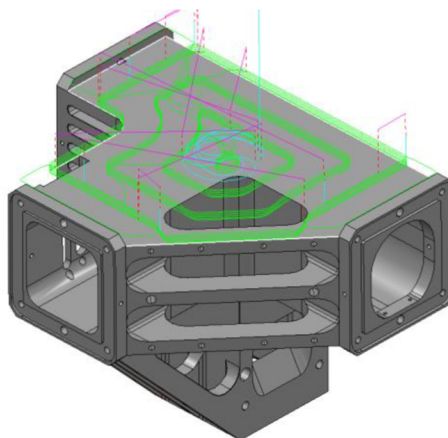


Obr. 42: Sestava upnutí pro dokončení součásti

V druhé operaci zvolené součásti zbývá obrobit jen několik málo částí, které nebylo v první operaci možno obrobit, nebo by bylo jejich obrobení zbytečně zdlouhavé, z důvodu nutného axiálního vyložení nástroje 68 mm .

6.2 HRUBOVÁNÍ PLOCHY

Odstranění zbytku materiálu bylo zajištěno strategií hrubování modelu monolitní tvrdokovovou frézou o průměru 16 mm (viz obr. 43). Vzhledem k poslední operaci první strany upnutí je zbývající materiál pouze $2,5\text{ mm}$. Axiální hloubka řezu byla nastavena pouze na $0,5\text{ mm}$ kvůli velmi malé upínací síly.

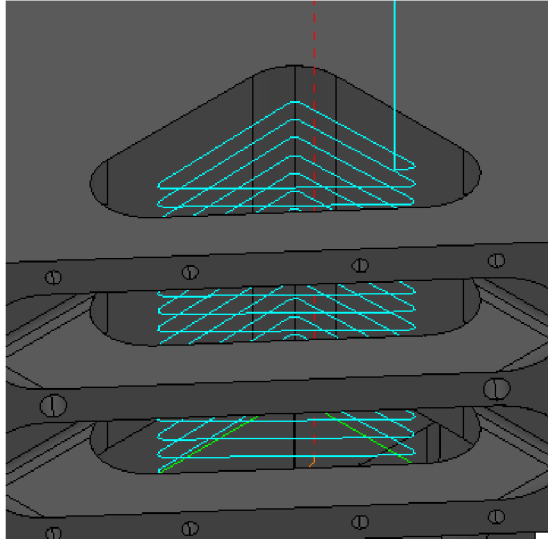


Obr. 43: Zbytkové hrubování plochy

Využitím hranice bylo zamezeno pohybům nástroje mimo potřebná místa.

6.3 HRUBOVÁNÍ PO SPIRÁLE

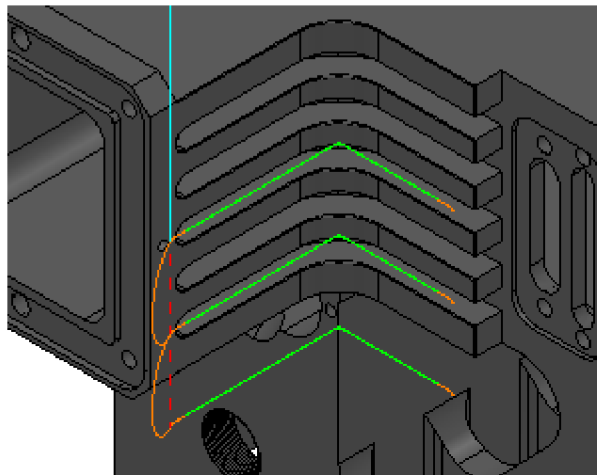
Stejně jako tomu bylo u první operace součásti, bylo využito hrubování po spirále pro předvrtané kapsy (viz obr. 44). Kapsa byla předvrtána při první operaci, ale kvůli nutnému axiálnímu vyložení nástroje 68 mm, byly veškeré hrubovací a dokončovací operace provedeny při druhé straně upnutí.



Obr. 44: Zbytkové hrubování předvrtaného otvoru

6.4 DOKONČENÍ OBRYŠŮ

Obdobně jak tomu bylo při vyhotovení součásti první strany upnutí, je dokončení veškerých obrysů zajištěno prostřednictvím strategie 2D profilování. Dráhy otevřených segmentů byly vytvořeny nesousledným řezem s přídavkem 0,05 mm a následným dokončením řezem sousledným. Tímto způsobem je zabráněno tvoření zbytečných přejezdů.



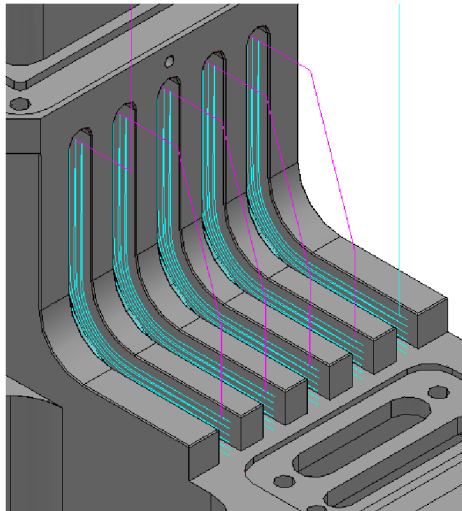
Obr. 45: Dokončení 2D profilováním

6.5 SIMULTÁNNÍ HRUBOVÁNÍ DRÁŽEK

Pro tuto operaci bylo využito strategie dokončení víceosou křivkou. I přesto, že se jedná o dokončovací strategii, lze ji za pomoci přídavku využít pro hrubování.

Šířka jedné drážky je $2,2\text{ mm}$, pro hrubování byla zvolena fréza o průměru 2 mm , která bude v záběru celým průměrem. Pohyb frézy byl uskutečněn po křivce s postupným zanořováním pod úhlem (viz obr. 46).

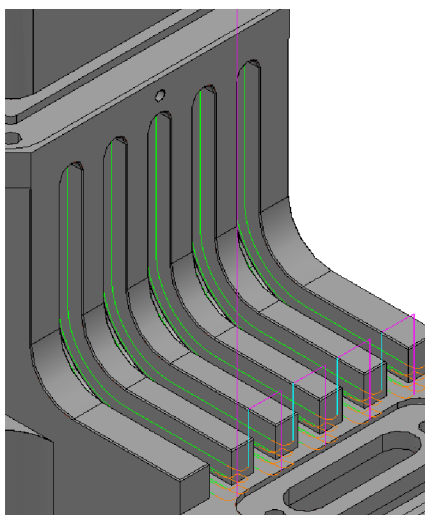
Řídící křivka byla nanesena na střed drážky. Při použití frézy o průměru 2 mm tedy dojde k tomu, že konečný přídavek pro dokončení bude $0,1\text{ mm}$ na stěnu.



Obr. 46: Víceosé simultánní hrubování drážek zanoření pod úhlem

6.6 SIMULTÁNNÍ DOKONČENÍ DRÁŽEK

Pro dokončení drážek byla využita stejná strategie jako pro jejich hrubování (viz obr. 47). Řídící křivka byla odsazena $0,5\text{ mm}$ od stěn drážek, a to z důvodu použití frézy o průměru 1 mm kvůli rádiusu $R = 1,1\text{ mm}$ pro dokončení.



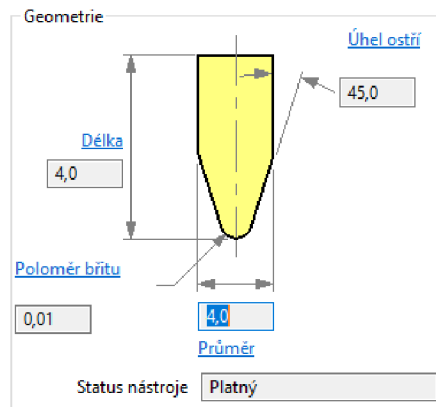
Obr. 47: Víceosé simultánní dokončení drážek

Vzhledem k nutnému použití frézy s ostrými rohy nebylo v místě přetočení dosaženo velmi kvalitní textury povrchu. Nicméně veškeré drážky a žebra nemají tak přísné tolerance jak rozměrové, tak textury povrchu.

6.7 ODJEHLENÍ OSTRÝCH HRAN

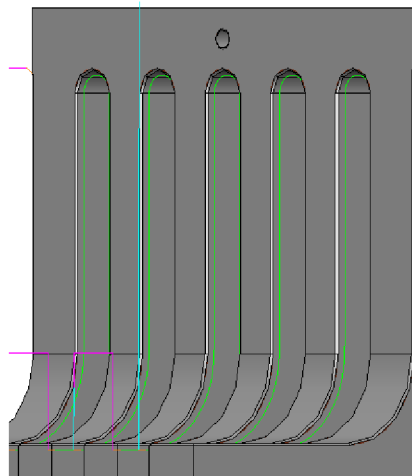
Obdobně jako u první operace bylo provedeno odjehlení ostrých hran strategií frézování sražení (viz 5.8). U druhé operace byla navíc využita možnost pětiosého simultánního odjehlení drážek, které bylo vyhotoveno prostřednictvím strategie dokončení bokem.

Pro možnost využití strategií bokem je pro tuto operaci nutné srážecí definovat jako úhlovou kulovou frézu a nastavit úhel ostří 45° . Dále průměr použitého srážecí, v našem případě 4 mm , a poloměr břitu co nejmenší, aby byla dodržena geometrie srážecí (viz obr. 48).



Obr. 48: Definování srážecí pro víceosé simultánní frézování

Takto definovaná úhlová kulová fréza se chová přesně jako srážecí a bude umožněno pětiosé frézování sražení (viz obr. 49).



Obr. 49: Pětiosé odjehlení drážek

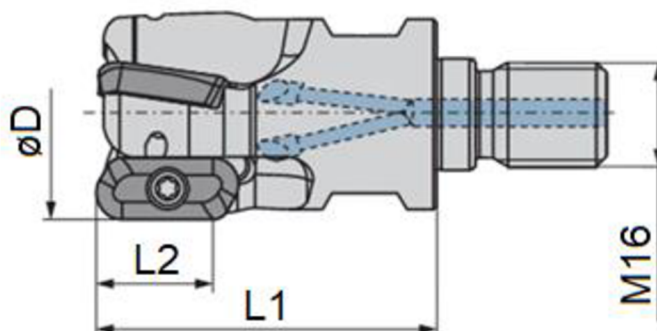
Základní pozice pro sledování byla nastavena jako dno sražení s offsetem $-0,3\text{ mm}$, aby byla špička srážecí pod úroveň sražení. Osa nástroje byla nastavena na náklon/odklon.

7 NÁSTROJE A NÁSTROJOVÉ UPÍNAČE

Výrobce nástrojů byl zvolen na základě reálných kladných zkušeností s jeho nástroji, avšak byl brán ohled na jejich inovace. Proto byly zvoleny nástroje poslední generace firmy Maykestag a porovnány možné strategie, konkrétně HPC a HSC.

7.1 NÁSTROJE

Vysokorychlostní hrubování s nízkými axiálními řezy bylo zajištěno rohovou frézou s vyměnitelnými břitovými destičkami firmy WNT. Jedná se o šroubovací těleso s označením GHSC.32.R.03-19, které je osazeno třemi destičkami s označením XDHT 190432FR-F10 CTPX715 určenými pro obrábění materiálu skupiny N a K.



Obr. 50: Schéma rozměrových parametrů HSC frézy firmy WNT ([14], upraveno)

Tabulka 12 - Rozměrové a řezné parametry HSC frézy s VBD firmy WNT [14]

Rozměrové parametry tělesa GHSC.32.R.03-19				
øD	L1	L2	z	
[mm]	[mm]	[mm]	[-]	
32,00	52,00	18,00	3	
Řezné parametry VBD XDHT 190432FR-F10 CTPX715				
Operace	v_c [$m \cdot min^{-1}$]	f_z [mm]	a_e [mm]	a_p [mm]
Hrubování	1000-1500	0,05-0,35	DC	18

Tabulka 13 - Vypočtené řezné podmínky HSC frézy s VBD firmy WNT

Kód výrobce	n	v_f	a_e	a_p
	[min^{-1}]	[$mm \cdot min^{-1}$]	[mm]	[mm]
XDHT 190432FR-F10 CTPX715	15 000	14 000	20	2

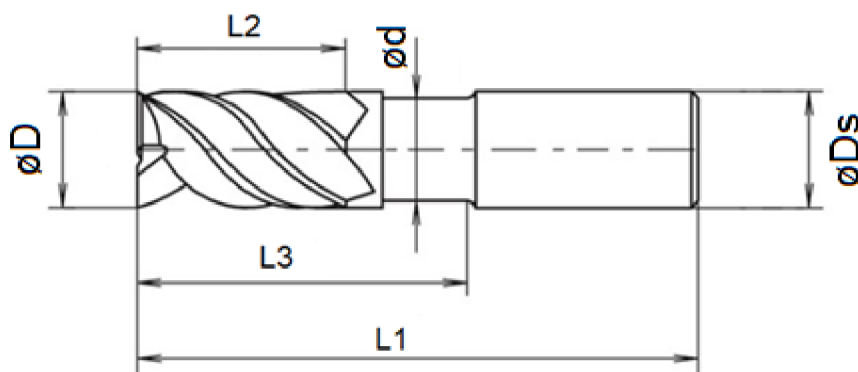
Pro veškeré operace zbytkového hrubování a dokončování byly využity HPC frézy od výrobce Maykestag s označením SpeedCut Alpha. Jedná se o frézy, které jsou určeny jak pro hrubovací, tak dokončovací operace materiálů skupiny N.

Maykestag frézy s označením SpeedCut Alpha jsou rozděleny do třech délkových kategorií, a to je kategorie L, XL a XXL. Z důvodu hlubokých kapes je nutno použít hlavně frézy z kategorie XXL.

Frézy z kategorie SpeedCut Alpha jsou nejnovějším výtvořem firmy Maykestag, které jsou zaměřeny na obrábění hliníkových slitin. Oproti předešlé generaci fréz určených pro obrábění hliníkových slitin mají navíc jeden řezný břit, tudíž veškeré frézy SpeedCut z řady Alpha mají 4 břity.

Nová generace fréz byla zaměřena na tyto optimalizace:

- Velmi pozitivní geometrie
- Úhel šroubovice pro snížení řezných sil
- Čtyři břity pro vyšší posuvy a delší životnost
- Větší prostor pro třísky
- Lapovaný povrch
- Povlakování určené pro materiály skupiny N [15]



Obr. 51: Schéma rozměrových parametrů nástrojů Maykestag ([16], upraveno)

Tabulka 14 - Rozměrové a řezné parametry nástrojů firmy Maykestag [16]

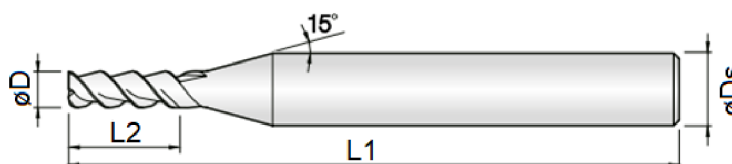
Označení výrobcem	$\varnothing D$ [mm]	$\varnothing D_s$ [mm]	$\varnothing d$ [mm]	L1 [mm]	L2 [mm]	L3 [mm]	Z [-]
8257016001	16,00	16h6	15,00	92,00	32,00	44,00	4
8287010001	10,00	10h6	9,50	100,00	22,00	58,00	4
8277008001	8,00	8h6	7,50	70,00	19,00	34,00	4
6198016001	8,00	8h6	7,50	80,00	40,00	45,00	5
8287006001	6,00	6h6	5,60	76,00	13,00	39,00	4
7090006101	6,00	6h6	5,60	62,00	13,00	26,00	3
8287004001	4,00	4h6	3,80	65,00	11,00	26,00	4
Řezné parametry výrobce							
Operace	v_c [m · min ⁻¹]	f_z [mm]	a_e [mm]	a_p [mm]			
Hrubování	417-637	0,059-0,205	0,5xD	1-1,5xD			
Dokončování	366-738	0,041-0,133	0,025xD	1-1,5xD			

Vypočtené řezné podmínky fréz od výrobce Maykestag jsou uvedeny v tabulce 15. Z důvodu optimalizace řezných podmínek proběhne u některých ze zvolených fréz dodatečné odlehčení dřívku.

Tabulka 15 - Vypočtené řezné podmínky nástrojů firmy Maykestag

Kód výrobce	Vyložení nástroje [mm]	Operace	n [min ⁻¹]	v _f [mm · min ⁻¹]	a _e [mm]	a _p [mm]
8257016001	50	Hrubování	9 748	4621	3,2	24
8287010001	57	Hrubování	10 584	4869	5	2
8277008001	42	Hrubování	15 782	4419	4	4
		Dokončení	19 809	3882	0,2	12
8277008001	52	Hrubování	12 747	3857	4	4
		Dokončení	16 000	3135	0,2	12
6198016001	52	Trochoid	22 500	14 947	0,56	40
8287006001	44	Hrubování	17 640	4181	3	3
	44	Dokončení	22 500	3690	0,15	9
7090006101	35	Dokončení	22 500	3420	0,15	9
8287004001	28	Hrubování	22 500	4680	2	2,4
	28	Dokončení	22 500	4320	0,1	6

Jelikož firma Maykestag nedisponuje menšími nástroji, než je průměr 3 mm, jsou tyto nástroje zvoleny od výrobce PM-TECH. Konkrétně se jedná o tříbřité nástroje průměru 2 mm a 1,5 mm, které splňují podmínky přísné textury povrchu, a to díky velmi jemnému tvrdokovu.



Obr. 52: Schéma rozměrových parametrů fréz od nástrojů PM-TECH ([17], upraveno)

Tabulka 16 - Rozměrové a řezné parametry nástrojů firmy PM-TECH [17],[18]

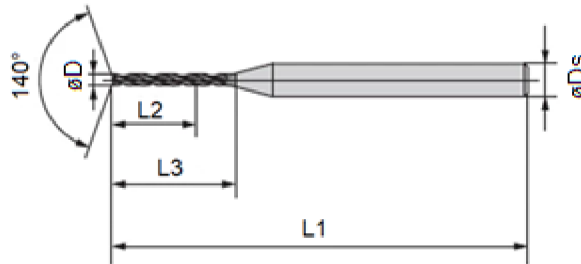
Označení výrobcem	D [mm]	Ds [mm]	L1 [mm]	L2 [mm]	z [-]
3ALE-020-050-S06	2,00	6h5	45,00	5,00	3
3ALE-015-040-S06	1,50	6h5	40,00	4,00	3
Řezné parametry výrobce					
Operace	v _c [m · min ⁻¹]	f _z [mm]	a _e [mm]	a _p [mm]	
Hrubování	184-471	0,01-0,015	0,3xD	1xD	
Dokončení	184-471	0,08-0,012	0,05xD	1xD	

Vypočtené řezné podmínky pro frézy firmy PM-TECH jsou uvedeny v tabulce 17.

Tabulka 17 - Vypočteny řezné podmínky nástrojů firmy PM-TECH

Kód výrobce	Operace	n [min^{-1}]	v_f [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]	a_e [mm]	a_p [mm]
3ALE-015-040-S06	Hrubování	22 500	1 012	0,45	1,5
	Dokončení	22 500	810	0,075	1,5
3ALE-020-050-S06	Hrubování	22 500	1 012	0,6	2,0
	Dokončení	22 500	810	0,1	2,0

Veškeré nástroje pro vrtací operace, jak už pro díry pro následné řezání závitu, tak pro předvrtání kapes, byly zvoleny od firmy WNT. Jedná se o vrtáky z řady WTX (Vysoce výkonné vrtáky), které díky povlakům TiAlN, případně TiB dosahují vcelku vysokých posuvů. Veškeré typy použitých vrtáků WTX disponují vrcholovým úhlem 140° .



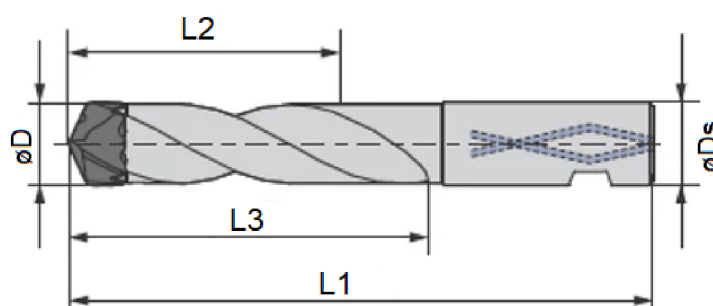
Obr. 53: Schéma rozměrů vrtáku WTX firmy WNT ([14, upraveno])

Tabulka 18 - Rozměrové a řezné parametry vrtáků WTX firmy WNT [14]

Označení výrobcem	D [mm]	Ds [mm]	L1 [mm]	L2 [mm]	L3 [mm]	z [-]
WTX-MINI.0,80.R.5D.~HA TiAlN	0,80	3h6	38,00	8,00	10,50	2
WTX-MINI.1,00.R.5D.~HA TiAlN	1,00	3h6	38,00	8,00	10,50	2
WTX-MINI.1,25.R.5D.~HA TiAlN	1,25	3h6	38,00	8,00	10,50	2
WTX-MINI.1,60.R.5D.~HA TiAlN	1,60	3h6	38,00	8,00	10,50	2
WTX-MINI.2,10.R.5D.~HA TiAlN	2,10	3h6	42,00	9,00	13,00	2
Řezné parametry výrobce						
v_c [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]			f_{ot} [mm]			
200			0,01-0,015			

Tabulka 19 - Vypočtené řezné podmínky WTX vrtáků firmy WNT

Kód výrobce	n [min^{-1}]	v_f [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]
WTX-MINI.0,80.R.5D.~HA TiAIN	22 500	225
WTX-MINI.1,00.R.5D.~HA TiAIN	22 500	225
WTX-MINI.1,25.R.5D.~HA TiAIN	22 500	225
WTX-MINI.1,60.R.5D.~HA TiAIN	22 500	225
WTX-MINI.2,10.R.5D.~HA TiAIN	22 500	337



Obr. 54: Schéma rozměrových parametrů vrtacího tělesa firmy WNT ([14], upraveno)

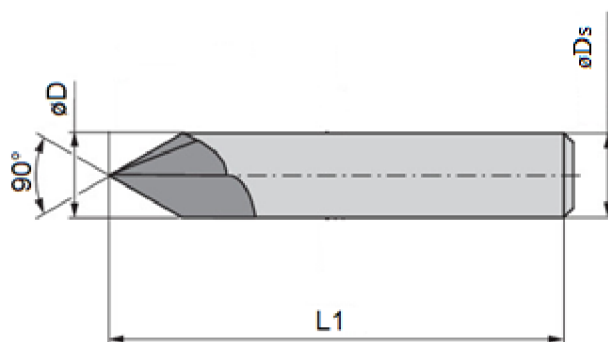
Tabulka 20 - Rozměrové a řezné parametry tělesa s vyměnitelnou špičkou firmy WNT [14]

Rozměrové parametry tělesa WTX-CHANGE.15,50-16,49.R.5D.HB.18				
D	Ds	L1	L2	L3
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
15,50-16,49	18h6	155,00	82,00	103,00
Řezné parametry výměnné špičky WTX-CHANGE-ALU.16,00.R.TIB				
v_c [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]		f_{ot} [mm]		
300		0,05-0,35		

Tabulka 21 - Vypočtené řezné podmínky tělesa s vyměnitelnou špičkou firmy WNT

Kód výrobce	n [min^{-1}]	v_f [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]
WTX-CHANGE-ALU.16,00.R.TIB	5 971	1 672

Odjehlení ostrých hran bylo provedeno čtyřbřitým srážecem s vrcholovým úhlem 90° o průměru 4 mm firmy WNT. Takto malým nástrojem bylo docíleno odjehlení co nejlíže jednotlivých stěn součásti.



Obr. 55: Schéma rozměrových parametrů NC srážeče firmy WNT ([14], upraveno)

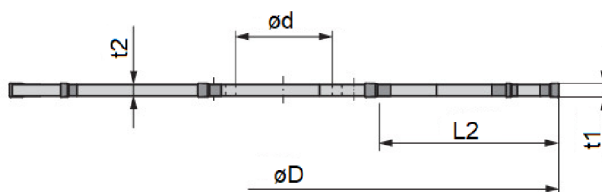
Tabulka 22 - Rozměrové a řezné parametry NC srážeče firmy WNT [14]

Označení výrobcem	D [mm]	Ds [mm]	L1 [mm]	z [-]
W.EF.4,0.90°.Z4.HA.50 DLC	4,00	4h6	50	4
Řezné parametry výrobce				
v_c [$m \cdot min^{-1}$]	f_z [mm]			
300	0,03			

Tabulka 23 - Vypočtené řezné podmínky NC srážeče firmy WNT

Kód výrobce	n [min^{-1}]	v_f [$mm \cdot min^{-1}$]
W.EF.4,0.90°.Z4.HA.50 DLC	22 500	1 350

Konečná operace při první straně upnutí byla vyhotovena kotoučovou frézou o průměru 125 mm a tloušťce 3 mm, kterou lze tzv. „podřezat“ až 42 mm.



Obr. 56: Schéma rozměrových parametrů kotoučové frézy s VBD firmy WNT ([14], upraveno)

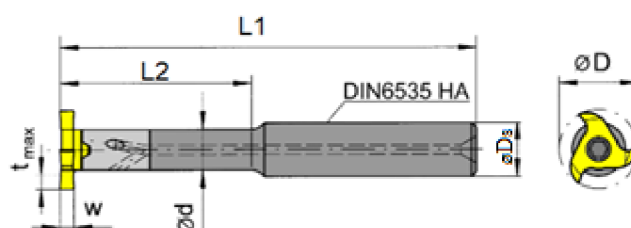
Tabulka 24 - Rozměrové a řezné parametry kotoučové frézy s VBD firmy WNT

Rozměrové parametry tělesa ASLOT.125.R.10.22.DC-SX3					
D [mm]	d [mm]	L2 [mm]	t1 [mm]	t2 [mm]	z [-]
125,00	22H6	42,00	3,00	2,75	10
Řezné parametry VBD SX E3.00N0.30-27P H216T					
v_c [$m \cdot min^{-1}$]	f_z [mm]				
330-400	0,18-0,30				

Tabulka 25 - Vypočtené řezné podmínky kotoučové frézy s VBD firmy WNT

Kód výrobce	n [min^{-1}]	v_f [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]	a_e [mm]	a_p [mm]
SX E3.00N0.30-27P H216T	917	2 200	42	3

Pro dokončení podkosu a velmi jemného závitu $\frac{1}{4}$ -100 UNS byla použita fréza tvaru T od německé firmy HORN. V případě podkosu se jedná o těleso s vyměnitelnou břitovou destičkou tvaru T o průměru $17,7 \text{ mm}$ (viz obr. 57).



Obr. 57: Rozměrové schéma frézy s vyměnitelným břitem tvaru T firmy HORN ([19], upraveno)

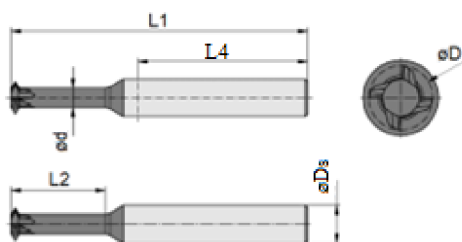
Tabulka 26 - Rozměrové a řezné parametry frézy s vyměnitelným břitem tvaru T firmy HORN [19]

Rozměrové parametry tělesa M311.0012.03A a VBD 311.0300.00 MG12							
D [mm]	Ds [mm]	d [mm]	L1 [mm]	L2 [mm]	tmax [mm]	w [mm]	z [-]
17,70	12h6	9,00	120,00	64,00	3,50	3,00	3
Řezné parametry VBD 311.0300.00 MG12							
v_c [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]				f_z [mm]			
180-220				0,05-0,25			

Tabulka 27 - Vypočtené řezné podmínky frézy s vyměnitelným břitem tvaru T firmy HORN

Kód výrobce	n [min^{-1}]	v_f [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]
311.0300.00 MG12	3 500	900

V případě závitu $\frac{1}{4}$ -100UNS, kde je velmi malé stoupání závitu (pouze $0,254 \text{ mm}$), byla využita závitová fréza tvaru T o průměru 2 mm určena pro frézování závitu s vrcholovým úhlem 60° . Tato závitová fréza dokáže vyhotovit závity se stoupáním v rozmezí $0,25$ - $0,35 \text{ mm}$.



Obr. 58: Rozměrové schéma závitové frézy firmy HORN ([19], upraveno)

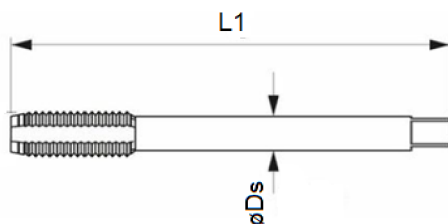
Tabulka 28 - Rozměrové a řezné parametry závitové frézy firmy HORN

Označení výrobcem	D [mm]	Ds [mm]	d [mm]	L1 [mm]	L2 [mm]	L4 [mm]	z [-]
DCG.3.M3.035.2.1.04 AN25	2,00	4h6	39,00	39,00	8,00	22,00	3
Řezné parametry výrobce							
v_c [m · min ⁻¹]				f_z [mm]			
200-600				0,02-0,04			

Tabulka 29 - Vypočtené řezné podmínky závitové frézy firmy HORN

Kód výrobce	n [min ⁻¹]	v_f [mm · min ⁻¹]
DCG.3.M3.035.2.1.04 AN25	22 500	1 350

Jelikož je u leteckých dílů nemožno tvářet závity, jsou využity strojní řezné závitníky firmy Garant s povlakem DLC, které jsou určeny primárně pro hliníkové slitiny. Tyto závitníky dosahují relativně vysokých řezných rychlostí, čímž zajistíme nejkratší možné časy.



Obr. 59: Rozměrové schéma strojního závitníku firmy Garant ([20], upraveno)

Tabulka 30 - Rozměrové a řezné parametry strojních závitníků firmy Garant [20]

Označení výrobcem	Označení závitu	Ds [mm]	L1 [mm]
134260 M1,6	M1,6	2,5h9	40
134260 M2	M2	2,8h9	45
134260 M2,5	M2,5	2,8h9	50
Řezné parametry výrobce		$v_c = 35 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	

Tabulka 31 - Vypočtené řezné podmínky strojních závitníků firmy Garant

Kód výrobce	n [min^{-1}]
134260 M1,6	6 966
134260 M2	5 573
134260 M2,5	4 458

7.2 NÁSTROJOVÉ UPÍNAČE

Nástrojové upínače jsou nezbytnou součástí pro výrobu, jelikož přenáší kroutící moment z vřetena stroje na obráběcí nástroj.

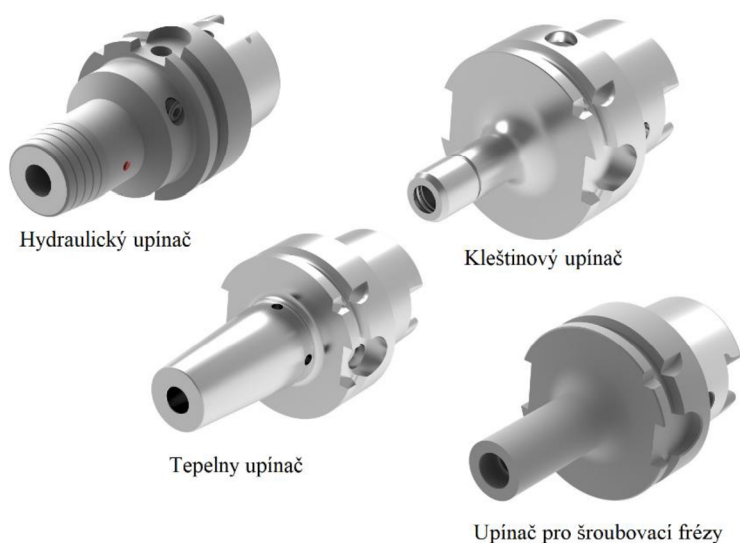
Požadavky nástrojových sestav [22]:

- tuhost upnutí
- soustřednost upnutí
- vyvážení pro vyšší otáčky
- upínací síla
- přívod procesní kapaliny

V současnosti se mezi nejrozšířenější nástrojové upínače řadí tepelné a hydraulické, které dosahují dobré tuhosti, souososti a vyvážení vysokých upínacích sil.

Pro vyhotovení zvolené součásti budou potřeba upínače s vyvážením minimálně do $22\,500\,min^{-1}$, jelikož u této hranice otáček se vyskytuje většina zvolených nástrojů.

Veškeré upínače byly zvoleny od firmy WNT, jelikož jejich základní vyvážení je provedeno na $25\,000\,min^{-1}$ i v případě kleštinových upínačů.



Obr. 60: - Typy nástrojových upínačů firmy WNT

Upnutí vrtáku pro předvrtání kapes a hrubovací frézy, určené pro trochoidní frézování, bylo provedeno hydraulickým upínačem, a to z důvodu velkých řezných sil. Zvyšující řezné síly vlivem otupení nástroje by tuto frézu mohly z jiného typu upínače vytáhnout, čímž by mohlo dojít k poškození svěráku a destrukci obráběné součásti.

Veškeré nástroje, které byly využity pro zbytkové hrubování a dokončování, byly upnuty za pomoci tepelných upínačů.

Vrtáky malých průměrů a strojní závitníky byly upnuty do velmi přesného kleštinového upínače Centro-P.

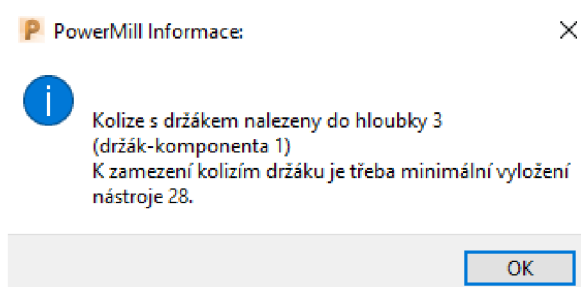
Kotoučová fréza o průměru 125 *mm* a HSC hrubovací fréza byla upnuta pomocí upínače pro šroubovací frézy.

8 OVĚŘENÍ KOLIZE A BOURÁNÍ

Než dojde k samotnému postprocesingu a výrobě součásti na obráběcím stroji, je nutností veškeré dráhy ověřit na kolizi a bourání, případně zkontrolovat simulací přímo v CAM softwaru, jestli jednotlivé dráhy neobsahují chybné nájezdy a propojení.

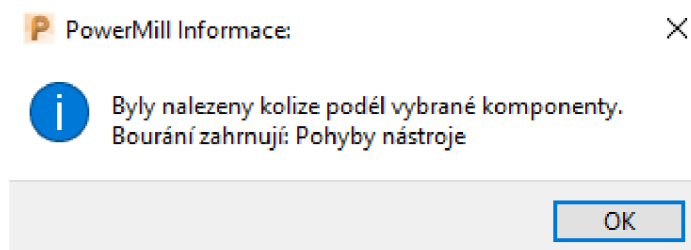
8.1 OVĚŘENÍ KOLIZE A BOURÁNÍ

Funkce ověření kolize zajišťuje ochrannou oblast pouze mezi dříkem a držákem nástroje vůči modelu. V případě kontaktu mezi dříkem nástroje a modelem, nebo držákem nástroje a modelem, zareaguje PowerMILL chybovou hláškou s potřebným řešením za účelem zabránění kolize (viz obr. 61).



Obr. 61: Informační okno kolize v CAM softwaru PowerMILL

Výpočet bourání zajišťuje ochrannou oblast mezi břitem nástroje a modelem. Při zásahu nástroje do modelu PowerMILL zareaguje chybovou hláškou (viz obr. 62). V tomto případě je potřeba dráhy upravit, aby k tomuto jevu nedocházelo.



Obr. 62: Informační okno bourání v CAM softwaru PowerMILL

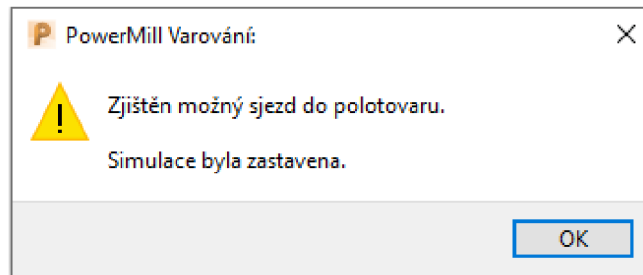
Veškeré dráhy jak pro první, tak pro druhou operaci byly ověřeny na kolizi a bourání. Ověření kolize bylo nastaveno na 1 mm v oblasti držáku a 0,1 mm v oblasti dříku nástroje. Pomocí této funkce bylo zajištěno, že axiální vyložení jednotlivých nástrojů bude co nejmenší, tedy při nastavení oblasti kolem držáku nástroje 1 mm vždy docílíme minimálního vyložení s rezervou jednoho milimetru mezi modelem a držákem nástroje.

Do vypočtení kolize a bourání byly zahrnuty i upínací sestavy jak pro první, tak pro druhou stranu upnutí součásti.

8.2 SIMULACE V CAM SOFTWARE

Samotnou simulací v CAM softwaru lze zjistit nežádoucí jevy, které by mohly při obrábění nastat, ale samotná kontrola kolize nebo bourání je neodhalí. Jedná se o sjezdy do polotovaru součásti u dokončovacích strategií. V případě možného sjezdu do polotovaru vlivem špatných

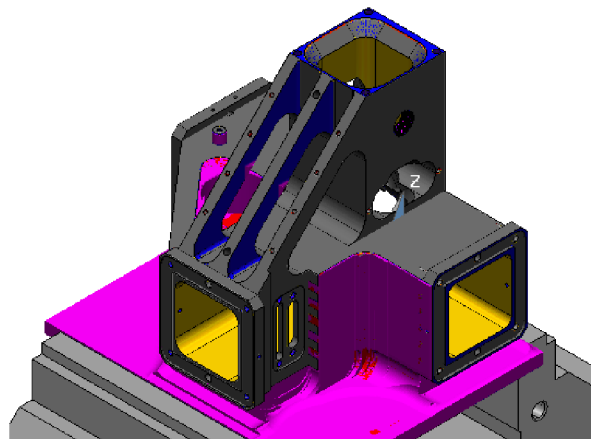
přídavků zareaguje PowerMILL příslušnou hláškou (viz obr. 63). Takto zjištěný sjezd je následně označen červenou barvou.



Obr. 63: Informační okno možného sjezdu do polotovaru součásti

Touto simulací byly zkontrolovány programy jak pro první, tak pro druhou stranu upnutí a případné sjezdy byly okamžitě vyřešeny.

Pomocí této simulace lze zobrazit i zbytkový materiál, který nám pomocí vykreslení barev pro různé tloušťky zbytkového materiálu zobrazí neobrobené části (viz obr. 64 – růžová přídavek $>0,1 \text{ mm}$, modrá $\leq 0,1 \text{ mm}$, žlutá – záporný přídavek křivky).



Obr. 64: Vykreslení zbytkového materiálu simulace

9 ANALÝZA DEFORMACE

Pro samotné upnutí a některé z náročnějších hrubovacích operací byla provedena deformační analýza na základě MKP v softwaru ANSYS, který je vyvíjen americkou společností Ansys, Inc.

ANSYS je vysoce pokročilý simulační software používaný k analýze a řešení komplexních problémů v různých oblastech vědy a techniky. Tento software umožňuje provádět simulace v oblasti mechaniky pevných látek, tekutin, teploty, elektromagnetismu a mnoha dalších fyzikálních jevů. [22]

Z důvodu vysoké náročnosti simulace dynamického procesu obrábění byla pro zjednodušení provedena pouze statická analýza deformace.

9.1 TEORETICKÉ VÝPOČTY ŘEZNÝCH SIL

Veškeré provedené analýzy jsou pouze teoretické výpočty z [10], které budou vůči reálným hodnotám relativně dost vzdálené. Pro určení reálných řezných sil působících na nástroj a obrobek je zapotřebí měření pomocí dynamometru (viz kapitola 9.2).

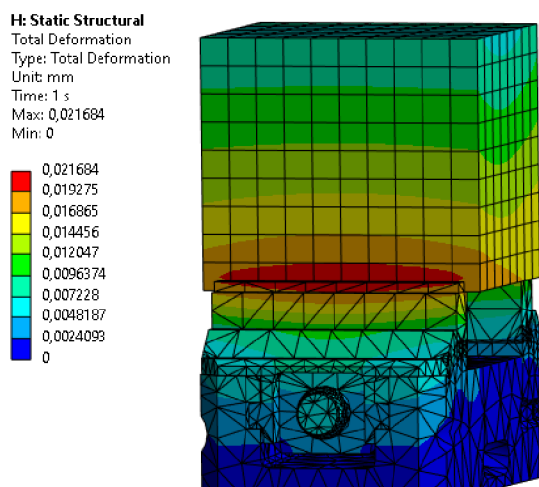
9.1.1 DEFORMACE PŘI UPNUTÍ POLOTOVARU

Vzhledem k velikosti upínacích sil, který dokáže vyvinout svěrák firmy Lang Technik (viz kapitola 5) je potřeba provést deformační analýzu za účelem zjištění případného vlivu této upínací síly na obráběný kus.

Okrajové podmínky:

- Na spodní straně svěráku byla nastavena okrajová podmínka „Fixed support“, která simuluje nepohyblivé upnutí svěráku.
- V místě doteku čelisti vůči polotovaru byla nastavena okrajová podmínka síly „Force“. Velikost této síly je rovna maximální upínací síle použitého svěráku.

Při upínací síle 14 *kN* dochází k maximální deformaci 0,022 *mm*, a to v oblasti doteku čelisti a polotovaru (viz obr. 65)



Obr. 65: Deformace materiálu vlivem upínací síly 14 000 *N*

Upínací síla pro náš případ obrábění byla nastavena na menší hodnoty, jelikož řezné síly nástrojů dosahovaly pouze zlomku této upínací síly.

9.1.2 DEFORMACE PŘI HRUBOVÁNÍ HSC NÁSTROJI

Tabulka 32 - Parametry pro výpočet řezné síly při HSC hrubování

Parametry pro výpočet řezné síly při frézování										
ϕD [mm]	a_p [mm]	a_e [mm]	v_c [m · min ⁻¹]	f_z [mm]	Z	K_{st} [-]	K_{ver} [-]	γ [°]	k_{c1} [N · mm ⁻²]	m_c [-]
32	2	20	1 500	0,31	3	1,2	1,3	-	800	0,25

Pozn.: Řezné a rozměrové parametry převzaty z kapitoly 7.1, měrná řezná síla převzata z [23], korekční faktory a konstanty [10].

Výpočet řezné síly a potřebného výkonu vřetena [10]:

$$K_\gamma = (1 - 0,01 \cdot \gamma) = (1 - 0,01 \cdot 0) = 1 \quad (2 - 1)$$

$$\varphi_s = \sec\left(1 - \frac{2 \cdot a_e}{D}\right) = \sec\left(1 - \frac{2 \cdot 20}{32}\right) = 104,48^\circ \quad (2 - 2)$$

$$h_m = \frac{114,6^\circ}{\varphi_s} \cdot \frac{a_e}{D} \cdot f_z = \frac{114,6^\circ}{104,48^\circ} \cdot \frac{20}{32} \cdot 0,31 = 0,213 \text{ mm} \quad (2 - 3)$$

$$k_c = \frac{k_{c1}}{h_m^{m_c}} \cdot K_\gamma \cdot K_{ver} \cdot K_{st} = \frac{800}{0,213^{0,25}} \cdot 1 \cdot 1,2 \cdot 1,3 = 1\,837 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (2 - 4)$$

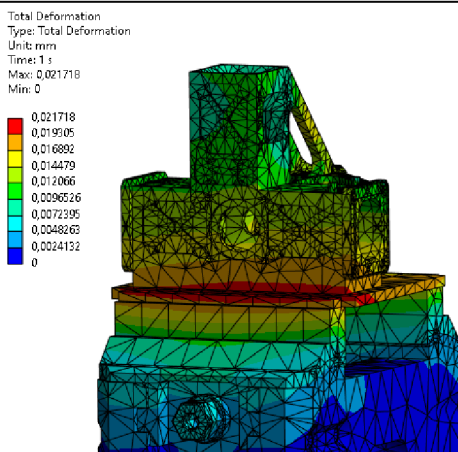
$$F_c = h_m \cdot a_p \cdot k_c = 0,213 \cdot 2 \cdot 1837 = 783 \text{ N} \quad (2 - 5)$$

$$z_E = \frac{z_w \cdot \varphi_s}{360^\circ} = \frac{3 \cdot 104,48^\circ}{360^\circ} = 0,87 \quad (2 - 6)$$

$$P = \frac{F_c \cdot v_c \cdot z_E}{6 \cdot 10^4} = \frac{783 \cdot 1\,500 \cdot 0,87}{6 \cdot 10^4} = 17,03 \text{ kW} \quad (2 - 7)$$

Kde: k_{c1} – měrná řezná síla pro odebrání třísky o velikosti 1 mm²; k_c – přepočítaná měrná řezná síla pro odebrání třísky o velikost 1 mm²; K_{st} – korekční faktor deformace třísky; K_{ver} – korekční faktor opotřebení nástroje; K_γ – korekční faktor úhlu čela nástroje; γ – úhel čela nástroje; m_c – materiálová konstanta; φ_s – úhel záběru nástroje; h_m – průměrná tloušťka třísky; F_c – celková řezná síla; z_E – počet břitů v řezu; P – příkon vřetena stroje

Okrajové podmínky byly aplikovány stejně jako v předešlé kapitole, ale v tomto případě byla nastavena navíc podmínka síly „Force“ o velikosti řezné síly (2-5). Tato síla byla nastavena kolmo ke stěně součásti. Výsledná deformace, k níž dochází v důsledku samotného hrubování a působením upínací síly, nabývá hodnoty 0,022 mm (viz obr. 66)



Obr. 66: Deformace součásti vlivem HSC hrubování

Veškeré hrubování je nastaveno s přídatkem 0,3 mm, takže tato možná deformace je zanedbatelná. Reálné řezné síly byly nižší vzhledem k výpočtu s úhlem čela $\gamma = 0^\circ$, který není výrobcem uveden v katalogu. Potřebný výkon vřetena stroje pro tuto operaci (2-7) dosahuje nepatrně přes 50 % výkonu stroje.

9.1.3 DEFORMACE PŘI HRUBOVÁNÍ HPC NÁSTROJI

Tabulka 33 - Parametry pro výpočet řezné síly při HPC hrubování

Parametry pro výpočet řezné síly při frézování										
ϕD [mm]	a_p [mm]	a_e [mm]	v_c [m · min ⁻¹]	f_z [mm]	z [-]	K_{st} [-]	K_{ver} [-]	γ [°]	$k_{c1.1}$ [N · mm ⁻²]	m_c [-]
16	24	3,2	490	0,096	2	1,2	1,3	9-15	800	0,25

Pozn.: Řezné a rozměrové parametry převzaty z kapitoly 7.1, měrná řezná síla převzata z [23], korekční faktory a konstanty [10].

Výpočet řezné síly a potřebného výkonu vřetena [10]:

$$K_\gamma = (1 - 0,01 \cdot \gamma) = (1 - 0,01 \cdot 12) = 0,88 \quad (3 - 1)$$

$$\varphi_s = \sec\left(1 - \frac{2 \cdot a_e}{D}\right) = \sec\left(1 - \frac{2 \cdot 3,2}{16}\right) = 53,13^\circ \quad (3 - 2)$$

$$h_m = \frac{114,6^\circ}{\varphi_s} \cdot \frac{a_e}{D} \cdot f_z = \frac{114,6^\circ}{53,13^\circ} \cdot \frac{3,2}{16} \cdot 0,096 = 0,041 \text{ mm} \quad (3 - 3)$$

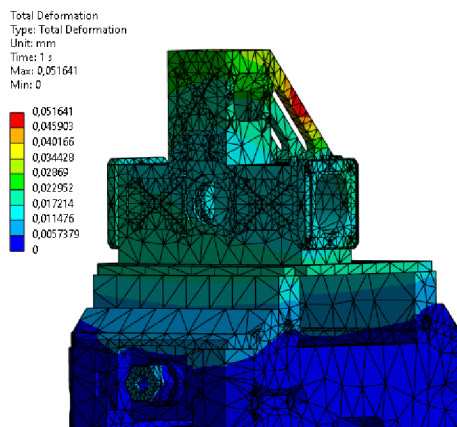
$$k_c = \frac{k_{c1}}{h_m^{m_c}} \cdot K_\gamma \cdot K_{ver} \cdot K_{st} = \frac{800}{0,041^{0,25}} \cdot 0,88 \cdot 1,2 \cdot 1,3 = 2\,440 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (3 - 4)$$

$$F_c = h_m \cdot a_p \cdot k_c = 0,041 \cdot 24 \cdot 2\,440 = 2\,401 \text{ N} \quad (3 - 5)$$

$$z_E = \frac{z_w \cdot \varphi_s}{360^\circ} = \frac{4 \cdot 53,13^\circ}{360^\circ} = 0,59 \quad (3 - 6)$$

$$P = \frac{F_c \cdot v_c \cdot z_E}{6 \cdot 10^4} = \frac{2\,401 \cdot 490 \cdot 0,59}{6 \cdot 10^4} = 11,57 \text{ kW} \quad (3 - 7)$$

Okrajové podmínky jsou identické jako v předchozí kapitole, jenom je upravena hodnota řezné síly (3-5). Výsledná deformace, k níž dochází v důsledku samotného hrubování a působením upínací síly, nabývá hodnoty 0,051 mm (viz obr. 67).



Obr. 67: Deformace součásti vlivem HPC hrubování

Již z vypočtených hodnot lze vyzorovat, že při hrubování nástroji HPC dochází k mnohem vyšším řezným silám, než tomu bylo u hrubování nástrojem HSC. Tato analýza byla provedena pouze pro porovnání řezných sil, součást je vzhledem k ušetřenému strojnímu času vyhrubována nástrojem určeným k HSC obrábění.

9.1.4 DEFORMACE PŘI VRTÁNÍ

Při předvrtávání kapes vrtákem o průměru 16 mm bude provedena analýza i pro tento proces. Vrták totiž dosahuje relativně vysokých hodnot posuvů a tím pádem i vyšších řezných sil, které mohou vést až k samotné deformaci součásti.

Tabulka 34 - Parametry pro výpočet řezné a posuvové síly při vrtání

Parametry pro výpočet řezné síly při vrtání								
øD [mm]	n [min ⁻¹]	f _{ot} [mm]	ε [°]	z [-]	K _{st} [-]	K _{ver} [-]	k _{c1} [N · mm ⁻²]	m _c [-]
16	5 971	0,35	140	2	1,2	1,3	800	0,25

Pozn.: Řezné a rozměrové parametry převzaty z kapitoly 7.1, měrná řezná síla převzata z [23], korekční faktory a konstanty [10].

Výpočet potřebného výkonu, řezné a posuvové síly u vrtání [10]:

$$b = \frac{D}{2 \cdot \sin \frac{\epsilon}{2}} = \frac{16}{2 \cdot \sin \frac{140^\circ}{2}} = 8,51 \text{ mm} \quad (4-1)$$

$$h_m = f_z \cdot \sin \frac{\epsilon}{2} = \frac{0,35}{2} \cdot \sin \frac{140^\circ}{2} = 0,164 \text{ mm} \quad (4-2)$$

$$k_c = \frac{k_{c1}}{h_m^{m_c}} \cdot K_{st} \cdot K_{ver} = \frac{800}{0,164^{0,25}} \cdot 1,2 \cdot 1,3 = 1\,961 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (4-3)$$

$$F_c = h_m \cdot b \cdot k_c = 0,164 \cdot 8,51 \cdot 1961 = 2\,737 \text{ N} \quad (4-4)$$

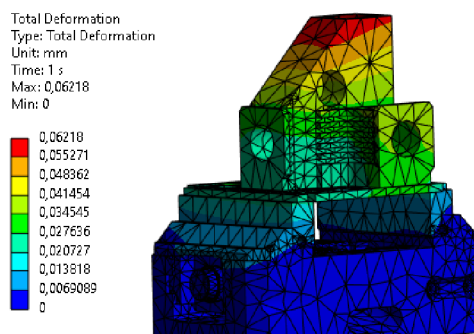
$$F_f = F_c \cdot z \cdot \sin \frac{\epsilon}{2} = 2\,737 \cdot 2 \cdot \sin \frac{140^\circ}{2} = 5\,143 \text{ N} \quad (4-5)$$

$$M = 2 \cdot F_c \cdot \frac{D}{4} = 2 \cdot 2737 \cdot \frac{0,016}{4} = 22 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (4-6)$$

$$P = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot M}{6 \cdot 10^4} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 5971 \cdot 22}{6 \cdot 10^4} = 13,76 \text{ kW} \quad (4-7)$$

Kde: b – šířka řezu, F_f – posuvová síla, M – krouticí moment

Okrajové podmínky byly aplikovány stejné jako v předešlé kapitole, ale v tomto případě byla nastavena podmínka síly „Force“ kolmo na dno vrtaného otvoru. Velikost síly vlivem posuvu (4-5). Výsledná deformace, k níž dochází v důsledku samotného vrtání a působením upínací síly, nabývá hodnoty 0,062 mm (viz obr. 68).



Obr. 68: Deformace součásti od posuvové síly při vrtání

9.1.5 DEFORMACE PŘI TROCHOIDNÍM HRUBOVÁNÍ KAPSY

Tabulka 35 - Parametry pro výpočet řezné síly při trochoidním hrubování kapsy

Parametry pro výpočet řezné síly při frézování										
ϕD [mm]	a_p [mm]	a_e [mm]	v_c [m · min ⁻¹]	f_z [mm]	z [-]	K_{st} [-]	K_{ver} [-]	γ [°]	k_{c1} [N · mm ⁻²]	m_c [-]
8	39	0,56	565	0,14	5	1,2	1,3	15	800	0,25

Pozn.: Řezné a rozměrové parametry převzaty z kapitoly 7.1, měrná řezná síla převzata z [23], korekční faktory a konstanty [10].

Výpočet řezné síly a potřebného výkonu vřetena [10]:

$$K_\gamma = (1 - 0,01 \cdot \gamma) = (1 - 0,01 \cdot 15) = 0,85 \quad (5-1)$$

$$\varphi_s = \sec\left(1 - \frac{2 \cdot a_e}{D}\right) = \sec\left(1 - \frac{2 \cdot 0,56}{8}\right) = 30,68^\circ \quad (5-2)$$

$$h_m = \frac{114,6^\circ}{\varphi_s} \cdot \frac{a_e}{D} \cdot f_z = \frac{114,6^\circ}{30,68^\circ} \cdot \frac{0,56}{8} \cdot 0,140 = 0,037 \text{ mm} \quad (5-3)$$

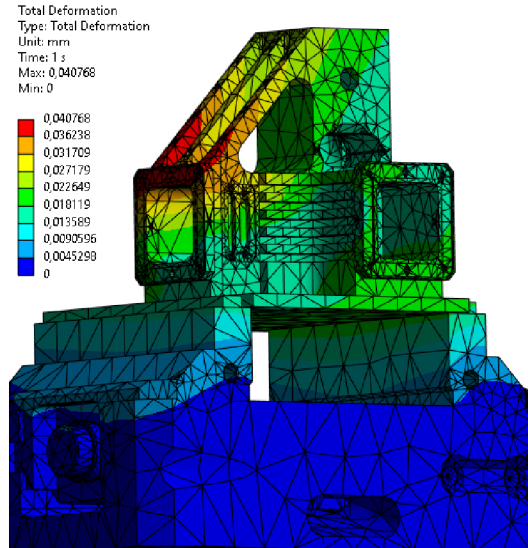
$$k_c = \frac{k_{c1}}{h_m^{m_c}} \cdot K_\gamma \cdot K_{ver} \cdot K_{st} = \frac{800}{0,037^{0,25}} \cdot 0,85 \cdot 1,2 \cdot 1,3 = 2419 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (5-4)$$

$$F_c = h_m \cdot a_p \cdot k_c = 0,037 \cdot 39 \cdot 2419 = 3490 \text{ N} \quad (5-5)$$

$$z_E = \frac{z_w \cdot \varphi_s}{360^\circ} = \frac{5 \cdot 30,68^\circ}{360^\circ} = 0,426 \quad (5-6)$$

$$P = \frac{F_c \cdot v_c \cdot z_E}{6 \cdot 10^4} = \frac{3\,490 \cdot 565 \cdot 0,426}{6 \cdot 10^4} = 14,00 \text{ kW} \quad (5 - 7)$$

Okrajové podmínky byly aplikovány stejné jako v kapitole 8.1.2, ale v tomto případě byla velikost řezné síly (5-5). Tato síla byla nastavena kolmo ke vnitřní stěně kapsy. Výsledná deformace, k níž dochází v důsledku samotného hrubování a působením upínací síly, nabývá hodnoty 0,041 mm (viz obr. 69).



Obr. 69: Deformace součásti při trochoidním hrubování pravoúhlé kapsy

Při této analýze byla záměrně použita nejhlubší pravoúhlá kapsa, kterou je možné tímto nástrojem vyhotovit, čímž je dosaženo nejvyšší možné hodnoty řezné síly a příkonu stroje pro tento nástroj.

9.1.6 DEFORMACI PŘI HPC HRUBOVÁNÍ KAPSY

Tabulka 36 - Parametry pro výpočet řezné síly při HPC hrubování kapsy

Parametry pro výpočet řezné síly při frézování											
ϕD [mm]	a_p [mm]	a_e [mm]	v_c [m · min ⁻¹]	f_z [mm]	z [-]	K_{st} [-]	K_{ver} [-]	γ [°]	k_{c1} [N · mm ⁻²]	m_c [-]	
10	15	2	332	0,115	4	1,2	1,3	9-15	800	0,25	

Pozn.: Řezné a rozměrové parametry převzaty z kapitoly 7.1, měrná řezná síla převzata z [23], korekční faktory a konstanty [10].

Výpočet řezné síly a potřebného výkonu vřetena stroje [10]:

$$K_\gamma = (1 - 0,01 \cdot \gamma) = (1 - 0,01 \cdot 12) = 0,88 \quad (6 - 1)$$

$$\varphi_s = \sec\left(1 - \frac{2 \cdot a_e}{D}\right) = \sec\left(1 - \frac{2 \cdot 2}{10}\right) = 53,13^\circ \quad (6 - 2)$$

$$h_m = \frac{114,6^\circ}{\varphi_s} \cdot \frac{a_e}{D} \cdot f_z = \frac{114,6^\circ}{53,13^\circ} \cdot \frac{2}{15} \cdot 0,115 = 0,033 \text{ mm} \quad (6 - 3)$$

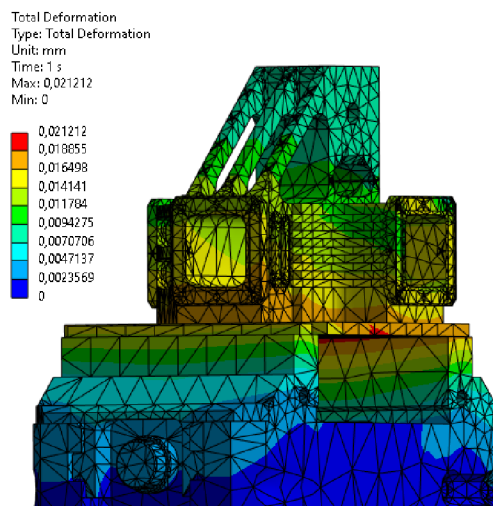
$$k_c = \frac{k_{c1}}{h_m^{m_c}} \cdot K_\gamma \cdot K_{ver} \cdot K_{st} = \frac{800}{0,033^{0,25}} \cdot 0,88 \cdot 1,2 \cdot 1,3 = 2\,576 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (6 - 4)$$

$$F_c = h_m \cdot a_p \cdot k_c = 0,033 \cdot 15 \cdot 2\,576 = 1\,275 \text{ N} \quad (6-5)$$

$$z_E = \frac{z_w \cdot \varphi_s}{360^\circ} = \frac{4 \cdot 53,13^\circ}{360^\circ} = 0,59 \quad (6-6)$$

$$P = \frac{F_c \cdot v_c \cdot z_E}{6 \cdot 10^4} = \frac{1\,275 \cdot 332 \cdot 0,59}{6 \cdot 10^4} = 4,16 \text{ kW} \quad (6-7)$$

Okrajové podmínky byly aplikovány stejné jako v předchozí kapitole s hodnotou řezné síly (6-5). Výsledná deformace, k níž dochází v důsledku samotného hrubování a působením upínací síly, nabývá hodnoty 0,041 mm (viz obr. 70).



Obr. 70: Deformace součásti při HPC hrubování pravouhlé kapsy

9.1.7 DEFORMACE PŘI HPC HRUBOVÁNÍ KAPSY POD ÚHLEM

Tabulka 37 – Parametry pro výpočet řezné síly při HPC hrubování kapsy pod úhlem

Parametry pro výpočet řezné síly při frézování										
$\varnothing D$ [mm]	a_p [mm]	a_e [mm]	v_c [m · min ⁻¹]	f_z [mm]	z [-]	K_{st} [-]	K_{ver} [-]	γ [°]	k_{c1} [N · mm ⁻²]	m_c [-]
10	5	10	287	0,06	4	1,2	1,3	9-15	800	0,25

Pozn.: Řezné a rozměrové parametry převzaty z kapitoly 7.1, měrná řezná síla převzata z [23], korekční faktory a konstanty [10].

Výpočet řezné síly a potřebného výkonu vřetena stroje [10]:

$$K_\gamma = (1 - 0,01 \cdot \gamma) = (1 - 0,01 \cdot 12) = 0,88 \quad (7-1)$$

$$\varphi_s = \sec\left(1 - \frac{2 \cdot a_e}{D}\right) = \sec\left(1 - \frac{2 \cdot 5}{10}\right) = 180^\circ \quad (7-2)$$

$$h_m = \frac{114,6^\circ}{\varphi_s} \cdot \frac{a_e}{D} \cdot f_z = \frac{114,6^\circ}{180^\circ} \cdot \frac{5}{10} \cdot 0,06 = 0,038 \text{ mm} \quad (7-3)$$

$$k_c = \frac{k_{c1}}{h_m^{m_c}} \cdot K_\gamma \cdot K_{ver} \cdot K_{st} = \frac{800}{0,038^{0,25}} \cdot 0,88 \cdot 1,2 \cdot 1,3 = 2\,487 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (7-4)$$

$$F_c = h_m \cdot a_p \cdot k_c = 0,038 \cdot 5 \cdot 2\,487 = 472 \text{ N} \quad (7-5)$$

$$z_E = \frac{z_w \cdot \varphi_s}{360^\circ} = \frac{4 \cdot 180^\circ}{360^\circ} = 2 \quad (7-6)$$

$$P = \frac{F_c \cdot v_c \cdot z_E}{6 \cdot 10^4} = \frac{472 \cdot 287 \cdot 2}{6 \cdot 10^4} = 4,15 \text{ kW} \quad (7-7)$$

Pro tento případ není nutno dělat analýzu v softwaru ANSYS, jelikož řezná síla (7-5) je pouze zlomek síly v předchozí analýze.

9.1.8 DEFORMACE PŘI ODŘEZÁNÍ SOUČÁSTI

Tabulka 38 - Parametry pro výpočet řezné síly při odřezu součásti

Parametry pro výpočet řezné síly při frézování										
$\varnothing D$ [mm]	a_p [mm]	a_e [mm]	v_c [m · min ⁻¹]	f_z [mm]	z [-]	K_{st} [-]	K_{ver} [-]	γ [°]	k_{c1} [N · mm ⁻²]	m_c [-]
125	3	40	365	0,24	10	1,2	1,3	-	800	0,25

Pozn.: Řezné a rozměrové parametry převzaty z kapitoly 7.1, měrná řezná síla převzata z [23], korekční faktory a konstanty [10].

Výpočet řezné síly a potřebného výkonu vřetena [10]:

$$K_\gamma = (1 - 0,01 \cdot \gamma) = (1 - 0,01 \cdot 0) = 1 \quad (8-1)$$

$$\varphi_s = \sec\left(1 - \frac{2 \cdot a_e}{D}\right) = \sec\left(1 - \frac{2 \cdot 40}{125}\right) = 68,9^\circ \quad (8-2)$$

$$h_m = \frac{114,6^\circ}{\varphi_s} \cdot \frac{a_e}{D} \cdot f_z = \frac{114,6^\circ}{68,9^\circ} \cdot \frac{40}{125} \cdot 0,24 = 0,128 \text{ mm} \quad (8-3)$$

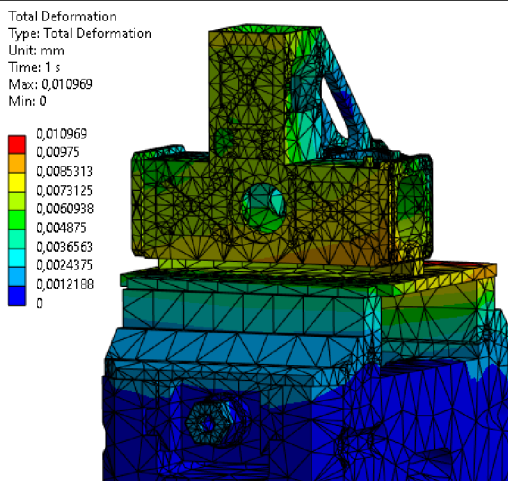
$$k_c = \frac{k_{c1}}{h_m^{m_c}} \cdot K_\gamma \cdot K_{ver} \cdot K_{st} = \frac{800}{0,128^{0,25}} \cdot 1 \cdot 1,2 \cdot 1,3 = 2\,088 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (8-4)$$

$$F_c = h_m \cdot a_p \cdot k_c = 0,128 \cdot 3 \cdot 2\,088 = 802 \text{ N} \quad (8-5)$$

$$z_E = \frac{z_w \cdot \varphi_s}{360^\circ} = \frac{10 \cdot 68,9^\circ}{360^\circ} = 1,91 \quad (8-6)$$

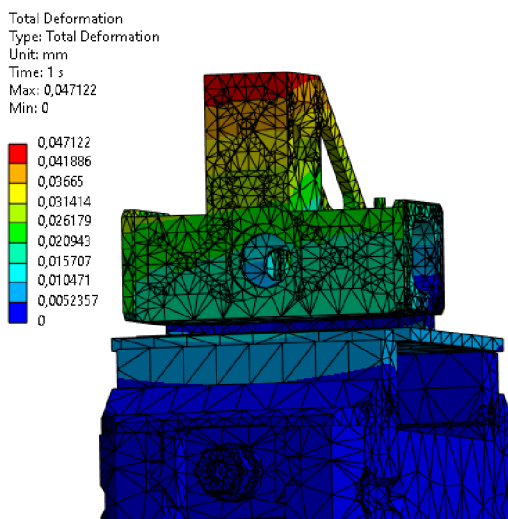
$$P = \frac{F_c \cdot v_c \cdot z_E}{6 \cdot 10^4} = \frac{802 \cdot 365 \cdot 1,91}{6 \cdot 10^4} = 9,32 \text{ kW} \quad (8-7)$$

Okrajové podmínky byly aplikovány stejné jako v kapitole 8.1.6, ale v tomto případě byla řezná síla (8-5) nastavena kolmo k vymodelované části odřezu. Výsledná deformace, k níž dochází v důsledku odřezu a působením upínací síly, nabývá hodnoty 0,01 mm (viz obr. 71).



Obr. 71: Deformace vlivem odříznutí první části

V případě odříznutí kusu z druhé strany dochází již k relativně velké deformaci 0,047 mm v místech horní kapsy (viz obr. 72), což by mohlo zapříčinit výrobu neshodných kusů. Pro eliminaci této chyby byly upraveny řezné podmínky pro daný program.



Obr. 72: Deformace vlivem odříznutí druhé části

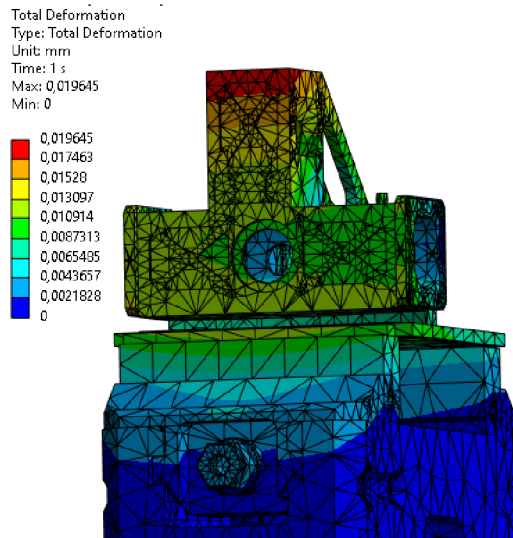
Pro snížení hodnoty řezné síly je potřeba výrazně snížit posuv na zub. V tomto případě byla hodnota snížena na 0,015 mm z původních 0,24 mm. Nicméně i přes výrazné snížení posuvu bude strojní čas tohoto odříznutí menší než při odebrání u druhé strany upnutí.

$$h_m = \frac{114,6^\circ}{\varphi_s} \cdot \frac{a_e}{D} \cdot f_z = \frac{114,6^\circ}{68,9^\circ} \cdot \frac{40}{125} \cdot 0,015 = 0,008 \text{ mm} \quad (8-8)$$

$$k_c = \frac{k_{c1}}{h_m^{m_c}} \cdot K_\gamma \cdot K_{ver} \cdot K_{st} = \frac{800}{0,008^{0,25}} \cdot 1 \cdot 1,2 \cdot 1,3 = 4 \, 173 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (8-9)$$

$$F_c = h_m \cdot a_p \cdot k_c = 0,008 \cdot 3 \cdot 4 \, 173 = 100 \text{ N} \quad (8-10)$$

Po úpravě posuvu na zub a výpočtu řezné síly (8-10) došlo k deformaci pouze 0,02 mm, což je vzhledem k tolerancím součásti přijatelná hodnota.



Obr. 73: Deformace odříznutím s úpravným posuvem na zub

Ovšem reálná hodnota deformace může být mnohem nižší, jelikož se jedná pouze o teoretické výpočty a pro tento případ s úhlem čela $\gamma = 0^\circ$, který má na řezné síly relativně velký vliv.

9.2 MĚŘENÍ ŘEZNÝCH SIL POMOCÍ DYNAMOMETRU

Pro korékní stanovení řezných sil pomocí dynamometru je nutné využití konkrétních nástrojů a obráběného materiálu. Z časových důvodu rozpracovaného pokusu není měření těchto sil součástí této práce.

Měření bude provedeno pomocí piezoelektrického vícekomponentního dynamometru značky KISTLER (viz obr. 73). Tento dynamometr dokáže měřit řezné síly ve třech ortogonálních směrech (F_x, F_y, F_z) a to až do velikosti $\pm 10 \text{ kN}$ v každém směru. [24]

Piezoelektrické senzory generují elektrický náboj úměrný aplikované síle, které jsou zesilovány a následně zpracovány softwarem DynoWare. Pro analýzu signálu nabízí DynoWare vizualizaci měřených křivek v reálném čase spolu s užitečnými výpočetními a grafickými funkcemi [24].

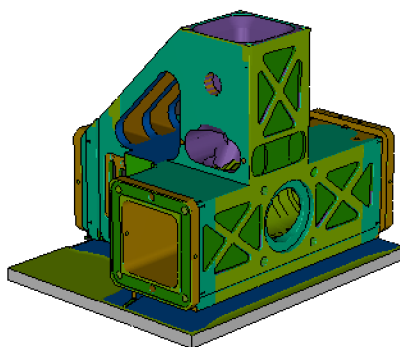


Obr. 74: Piezoelektrický vícekomponentní dynamometr firmy KISTLER [24]

10 TEST POSTPROCESSINGU

Postprocessing cílený na pětiosý obráběcí stroj Hermle proběhl úspěšně, ale vzhledem k časovým důvodům a potřebě inovativních nástrojů vyšších cen proběhlo jeho ověření pouze v řídicím systému stroje.

Během simulace v TNC 640 nebyly objeveny žádné chybové hlášky či nevhodné pohyby nástrojů. Celkový strojní čas simulace první strany upnutí zvolené součásti je 65 minut (viz obr. 75), přičemž 22 minut zabralo samotné vyhrubování z důvodů využití nástrojů malých průměrů. Dokončovací operace byly vyhotoveny za 23 minut, ve zbývajících 20 minutách bylo provedeno veškeré vrtání a řezání závitu s následným odjehlením součásti.



Obr. 75: Simulace postprocesingu v řídicím systému stroje

Kompletní dokončení kusu proběhlo až při druhé straně upnutí, kde se obráběcí čas pohybuje okolo 18 minut. Přestože se z druhé strany upnutí dokončuje jenom pár prvků, je čas vcelku vysoký, a to z důvodu nižších axiálních kroků a posuvů. Důvodem nižších axiálních kroků a posuvů je, že upínací síla je vyvinuta pouze dvěma šrouby M6. Případně by mohlo dojít i k samotné deformaci, jelikož jsou vyhotoveny téměř všechny důležité rozměry.

11 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo zpracování navrženého modelu v CAM softwaru PowerMILL podle vytvořené výkresové dokumentace, uvažování výroby na pětiosém frézovacím centru Hermle a popis významných programovacích funkcí CAM softwaru a řídicího systému stroje.

Model byl vytvořen s aspekty problémových součástí vyráběných pro letecký a kosmický průmysl a následně z materiálu, který se v tomto odvětví používá nejčastěji. Po porovnání mechanických vlastností, váhy a taky ceny byla zvolena slitina hliníku s označením EN AW-7075T651.

V práci byly uvedeny možné strategie obrábění (HSC a HPC) vlivem použitého nástroje, jejich předpoklady využití a nároky. Tyto strategie byly následně porovnány při tvorbě obráběcích drah v CAM softwaru a následně byly porovnány strojní časy.

Součást bylo nutno vyhotovit na dvě strany upnutí. Při druhé straně upnutí bylo potřebné navrhnutí upínacího přípravku.

Při hrubování vnější části obráběného modelu byla zvolena strategie vysokorychlostního hrubování modelu konturováním, jelikož se takle strategie vykazovala nejnižšími strojními časy. V případě hrubování kapes byly představeny tři možné způsoby řešení. Konečná zvolená strategie byla předvrtání pilotního otvoru kapsy pro následný vstup pětibřité frézy určené k trochoidnímu hrubování. Tato strategie byla zvolena z důvodu hladkého a řízeného průběhu v rozích kapes, jelikož v případě ostatních strategií může v rohu kapsy nastat silové přetížení nástroje a jeho samotná destrukce.

Veškeré obráběcí dráhy byly ověřeny proti kolizi, bourání a sjezdu funkcemi PowerMILLu. Následně proběhla analýza deformací nejnáročnějších hrubovacích operací a finálního „odřezu“ obrobku při první straně upnutí. Během těchto analýz bylo zjištěno, že žádná z hrubovacích operací nepůsobí tak velkými řeznými silami, aby bylo pro schování této deformace potřeba zvětšit přídavek na stěnu. Problém s velikostí deformace nastal při finálním odřezu obrobku, konkrétně při odřezu druhé strany. U této dráhy docházelo k deformacím až 0,05 *mm*, které by mohly zapříčinit výrobu neshodného kusu. Pro eliminaci tak velké hodnoty deformace byl značně snížen posuv na zub.

Posledním krokem v praktické části bylo ověření funkčnosti realizovaného postprocesingu. Při tomto kroku bylo zjištěno, že postprocessing je úspěšný, tudíž nevykazuje žádné chyby ani nevhodné pohyby nástroje. Výsledný strojní čas simulací řídicím systémem stroje je 1:23:00.

Výsledný strojní čas byl limitován maximálními otáčky vřetena zvoleného stroje. V případě využití stroje s vyššími otáčkami je možno uvažovat o výrobě s diametrálně rozdílnými nástroji (CVD-D, PCD), které dosahují obrovských hodnot řezných rychlostí. Tímto způsobem by bylo možno výrobní proces dále optimalizovat.

12 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] ARKANCE SYSTEMS S.R.O. *Expert pro vysokorychlostní a 5osé frézování - PowerMILL* [online]. [cit. 2024-03-22]. Dostupné z: <https://www.powermill.cz/>

[2] *Dynamic Machine Control* [online]. Autodesk. [cit. 2024-04-22]. Dostupné z: <https://help.autodesk.com/view/PWRM/2024/ENU/?guid=GUID-889103DB-393B-4305-A8A4-A7FDF9291F18>

[3] *The importance of CAM post-processors* [online] [cit. 2024-04-22]. Dostupné z: <https://www.cadcam-group.eu/en/knowledge/the-importance-of-cam-post-processors-and-their-role-in-the-development-production-process/>

[4] MASCHINENFABRIK BERTHOLD HERMLE AG. *Machining centre C 32* [online]. [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: <https://www.herml.de/en/machining-centres-automation/models/machining-centre-c-32/>

[5] [4] DR. JOHANNES HEIDENHAIN. *Heidenhain TNC 640* [online]. [cit. 2024-04-29]. Dostupné z: <https://www.heidenhain.cz/produkty/cnc-ridici-systemy/tnc-640>

[6] *Options and Accessories* [Online]. DR. JOHANNES HEIDENHAIN, 2023. Dostupné také z: https://www.heidenhain.cz/fileadmin/pdf/en/01_Products/Prospekte/PR_Options_and_Accessories_for_TNC_ID827222_en.pdf

[7] MONTANARI, Roberto. *Alloys for Aeronautic Applications: State of the Art and Perspectives* [online]. s. 2-3 [cit. 2024-05-01]. ISSN 2075-4701. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2075-4701/9/6/662>

[8] MATWEB. *MATERIAL PROPERTY DATA* [online]. [cit. 2024-05-01]. Dostupné z: <https://www.matweb.com/index.aspx>

[9] CHUNXIANG, Cui. *Materials and Design: Titanium alloy production technology, market prospects and industry development* [online]. s. 1-8 [cit. 2024-05-01]. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2010.09.011

[10] TSCHÄTSCH, Heinz. *Applied machining technology*. Dordrecht: Springer, c2009, xvii, 398 s. ISBN 978-3-642-01006-4.

[11] *Sousledné vs. nesousledné frézování* [online]. [cit. 2024-05-3]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/down-milling-vs-up-milling>

[12] GRZESIK, Wit. *Advanced Machining Processes of Metallic Materials - Theory, Modelling and Applications*. Oxford: Elsevier, 2008. ISBN 9780080445342. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-044534-2.X5001-2>.

[13] 5-Axis Vise: Makro Grip [online]. In: LANG TECHNIK GMBH. [cit. 2024-05-04]. Dostupné z: <https://en.industryarena.com/langtechnik/products/machine-vices--1026/5-achs-spanner--23082>

[14] CERATIZIT DEUTSCHLAND GMBH. Řezné nástroje ceratizit [online]. [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://cuttingtools.ceratizit.com/int/en.html>

[15] ALPEN-MAYKESTAG GMBH. Speedcut Alpha ALU [online]. 2024 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.maykestag.com/en/speedcut-alpha-alu/>

[16] ALPEN-MAYKESTAG GMBH. MaySpeedGuide [online]. [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.mayspeedguide.com/en/#/>

[17] PM-TECH S.R.O. Katalog nástrojů určených pro obrábění neželezných materiálů [online]. [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: https://www.pm-tech.cz/wp-content/uploads/2018/07/PM-TECH_PM-TECH_frezy-tvrdokovove-nezelezne-kovy-a-plasty_WEB_220321.pdf

[18] PM-TECH S.R.O. Katalog řezných podmínek [online]. [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: https://www.pm-tech.cz/wp-content/uploads/2019/10/PM-TECH_interaktivni_katalog_reznych_podminek_v2_locked.pdf

[19] HARTMETALL-WERKZEUGFABRIK PAUL HORN GMBH. MILLING SYSTEMS [online]. [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://horn-eshop.de/en-DE/milling-systems>

[20] HOFFMANN SE. Milling tools [online]. [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.hoffmann-group.com/GB/en/houk/>

[21] ZPŮSOBY UPÍNÁNÍ NÁSTROJŮ A OBROBKŮ. Brno, 2013. Bakalářská. Vysoké učení technické. Vedoucí práce Ing. Milan Kalivoda.

[22] ANSYS, INC. Ansys engineering simulation software [online]. [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.ansys.com/>

[23] MACHINING DOCTOR. SPECIFIC CUTTING FORCE (KC & KC1) [online]. [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.machiningdoctor.com/glossary/specific-cutting-force-kc-kc1/>

[24] KISTLER GROUP. Multicomponent dynamometer 9129AA [online]. [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/US/en/>

13 SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka	Popis
2D	Dvourozměrný
3D	Trojrozměrný
AW	Tvářená hliníková slitina (Aluminium Wrought product)
CAD	Počítačem podporované projektování (Computer Aided Design)
CAM	Počítačem podporovaná výroba (Computer Aided Manufacturing)
CLDATA	Data pozic řezného nástroje (Cutter Location data)
CNC	Počítačové číslicové řízení (Computer Numerical Control)
CVD-D	chemické metody nanášení diamantu (Chemical Vapour Deposition of Diamond)
DLC	Uhlík s vlastnostmi diamantu (Diamond-like carbon)
EN	Evropská norma
HPC	Vysoce výkonné řezání (High performance cutting)
HSC	Vysokorychlostní řezání (High speed cutting)
ISO	Mezinárodní norma
MKP	Metoda konečných prvků
MMKS	Minimální množství chladicího mazání (Minimum quantity cooling lubrication)
MQL	Minimální množství mazání (Minimum quantity lubrication)
např.	Například
NC	Číslicové řízení (Numerical Control)
Obr.	Obrázek
PCD	Polykrystalický diamant
STA	Tepelně ošetřená slitina
T651	Třída tepelného ošetření slitiny hliníku
VBD	Vyměnitelná břitová destička

Symbol	Jednotka	Popis
a_e	[mm]	Radiální hloubka řezu
a_p	[mm]	Axiální hloubka řezu
b	[mm]	Šířka řezu
D	[mm]	Řezný průměr
D _s	[mm]	Průměr upínací stopky
d	[mm]	Vnitřní upínací průměr
F_c	[N]	Celková řezná síla
F_f	[N]	Posuvová síla
F_x	[N]	Síla v ose X
F_y	[N]	Síla v ose Y
F_z	[N]	Síla v ose Z
h_m	[mm]	Průměrná tloušťka třísky
k_{c1}	[N · mm ⁻²]	Měrná řezná síla pro odebrání 1 mm ² materiálu
k_c	[N · mm ⁻²]	Přepočtená měrná řezná síla pro odebrání 1 mm ² materiálu
K_γ	[-]	Korekční faktor úhlu čela
K_v	[-]	Korekční faktor deformace třísky
K_{ver}	[-]	Korekční faktor opotřebení nástroje
L1	[mm]	Celková délka nástroje
L2	[mm]	Řezná délka nástroje
L3	[mm]	Maximální hloubka řezu (odlehčení dřívku)
m_{c1}	[-]	Materiálová konstanta
n	[min ⁻¹]	Otáčky vřetene
P	[W]	Příkon stroje
R	[mm]	Poloměr zaoblení
f_z	[mm]	Posuv na zub
f_{ot}	[mm]	Posuv na otáčku
t_{max}	[mm]	Maximální velikost podkosu
v_c	[m · min ⁻¹]	Řezná rychlost
v_f	[mm · min ⁻¹]	Posuvová rychlost
w	[mm]	Šířka břítu
z	[-]	Počet břitů nástroje
z_E	[-]	Počet břitů nástroje v řezu
γ	[°]	Úhel čela
ϵ	[°]	Vrcholový úhel nástroje
φ_s	[°]	Úhel záběru nástroje
\emptyset	[-]	Průměr

14 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Výkres součásti

Příloha 2 – CAD model součásti

Příloha 3 – Technické parametry obráběcího stroje

Příloha 4 – NC programy