

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

APLIKACE CAD/CAM SOFTWARE FEATURECAM PŘI OBRÁBĚNÍ

APPLICATION OF CAD/CAM SOFTWARE FEATURECAM FOR MACHINING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Petr FOLTÁN

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Aleš POLZER, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Petr Foltán

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

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 diplomové práce:

Aplikace CAD/CAM softwaru FeatureCAM při obrábění

v anglickém jazyce:

Application of CAD/CAM software FeatureCAM for machining

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Závěrečná práce je zaměřena na návrh součásti a rozbor technologie její výroby v prostředí softwaru FeatureCAM. Teoretická část práce se zaměřuje na stručnou charakteristiku aplikovaných strategií třískového obrábění a na návrh nástrojového vybavení pro obrobení zvolené součásti. Grafický model obrobku bude doplněn výrobní dokumentací.

Cíle diplomové práce:

- navržení a vytvoření grafického 3D modelu obrobku pro technologii frézování
- navržení nástrojového vybavení pro obrobení zvolené součásti
- naprogramování procesu třískového obrábění a jeho ověření grafickou simulací

Seznam odborné literatury:

- KRAR, Stephen F. Technology of machine tools. 7th ed. McGraw-Hill: , 2011, x, 925 s. ISBN 978-007-3510-835.
- SINGAL, R. Fundamentals of machining and machine tools. I.K. International Publishing House Pvt.: , c2008, xii, 369 s. ISBN 978-81-89866-66-2.
- BUDAK, Erhan. Machining dynamics: fundamentals, applications and practices. London: Springer, c2009, xviii, 328 s. Springer series in advanced manufacturing. ISBN 978-1-84628-367-3.
- Surface integrity in machining. Editor J Davim. London: Springer, 2010, 215 s. ISBN 978-1-84882-873-5.
- SHAW, Milton Clayton. Metal cutting principles. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2005, xix, 651 s. ISBN 01-951-4206-3.
- QUESADA, Robert. Computer numerical control: machining and turning centers. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2005, 548 s. ISBN 01-304-8867-4.
- AB SANDVIK COROMANT. Technická příručka obrábění: soustružení - frézování - vrtání - vyvrtávání - upínání nástrojů. 2005.10. Švédsko: Elanders, 2005.
- MCMAHON, Chris. CAD/CAM principles, practice and manufacturing management. 2nd ed. Harlow: Prentice Hall, 1998, 665 s. ISBN 02-011-7819-2.
- HUMÁR, Anton. Materiály pro řezné nástroje. Praha: MM publishing, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 19.11.2012

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce obsahuje vypracovaný postup výroby části kokily pro gravitační lití pístů s využitím softwaru FeatureCAM. Zabývá se výběrem vhodného strojního a nástrojového vybavení, určením řezných podmínek a řešením výběru optimálních strategií obrábění v softwaru FeatureCAM. Celý proces obrábění je ověřen grafickou simulací a je doplněn výkresovou dokumentací součásti.

Klíčová slova

FeatureCAM, CAD/CAM, frézování, obrábění, partprogram

ABSTRACT

The diploma thesis contains the manufacturing process of ingot mold part for pistons manufactured by gravity casting using FeatureCAM software. It deals with the selection of appropriate machinery and tooling, determining the cutting conditions and the solution selection of optimal machining strategies in FeatureCAM software. The whole machining process is verified by graphic simulation and is completed with drawing documentation of component.

Key words

FeatureCAM, CAD/CAM, milling, machining, partprogram

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

FOLTÁN, Petr. *Aplikace CAD/CAM softwaru FeatureCAM při obrábění*. Brno 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 78 s. příloh 3. Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Aplikace CAD/CAM softwaru FeatureCAM při obrábění** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Petr Foltán

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Ing. Aleši Polzerovi Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

Dále děkuji firmě KOVO Děčín spol. s r.o., jmenovitě panu Janu Matouškovi a Pavlu Burešovi za poskytnutí informací pro diplomovou práci a také děkuji své rodině a přítelkyni za podporu a především za trpělivost, kterou se mnou při psaní mé diplomové práce měli.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH	7
ÚVOD	9
1 CHARAKTERISTIKA OBRÁBĚNÉ SOUČÁSTI A JEJÍ VÝROBY	10
1.1 Představení firmy KOVO Děčín spol. s r.o.	11
1.2 Strojní vybavení.....	12
1.3 Řídicí systém stroje.....	14
1.4 Vlastnosti materiálu součásti	14
1.4.1 Obrábění tvrdých materiálů	15
1.4.2 HSC obrábění.....	16
1.5 Nástrojové vybavení	17
1.5.1 Upínání nástrojů.....	17
1.5.2 Dotykové sondy	17
1.6 Řezné prostředí	18
1.6.1 Suché obrábění.....	19
1.6.2 Chlazení a mazání olejovou mlhou.....	19
1.7 Upnutí polotovaru	20
2 APLIKACE CAM SYSTÉMU FEATURECAM.....	22
2.1 Systém FeatureCAM.....	22
2.1.1 Možnosti HSC ve FeatureCAMu.....	23
2.1.2 Strategie frézování	24
2.1.2.1 Hrubovací strategie.....	24
2.1.2.2 Dokončovací strategie	25
2.1.2.3 Speciální strategie.....	27
2.1.3 Uživatelské prostředí	27
2.2 Postprocesor.....	29
2.3 Import modelu.....	30
2.4 Definice polotovaru a volba ustavení	31
2.5 Pomocné úpravy	33
3 VOLBA STRATEGIÍ OBRÁBĚNÍ A TVORBA PARTPROGRAMU	35
3.1 Obrábění v rovině ustavení 1	35
3.1.1 Frézování čelní plochy.....	35

3.1.1.1	Sousledné a nesousledné frézování	36
3.1.1.2	Frézování pomocí kruhových VBD	37
3.1.1.3	Volba nástroje a řezných podmínek	37
3.1.2	Frézování obvodu, sražení hran, volba nástrojů a řezných podmínek.....	38
3.1.3	Vrtání děr o průměrech 5 mm a 2 mm.....	41
3.1.3.1	Vrtání hlubokých děr	42
3.1.3.2	Volba nástrojů a řezných podmínek	43
3.1.4	Vrtání stupňovité díry se zahloubením, volba nástrojů a řezných podmínek	44
3.1.5	Vrtání díry skloněné pod úhlem 20°	47
3.1.5.1	Skloněný povrch na vstupu do díry při vrtání	47
3.1.5.2	Volba nástrojů a řezných podmínek	48
3.1.6	Frézování drážek.....	49
3.1.6.1	Trochoidální frézování	51
3.1.6.2	Volba nástrojů a řezných podmínek	52
3.1.7	Frézování hluboké drážky, volba nástrojů a řezných podmínek	53
3.2	Obrábění v rovině ustavení 2	57
3.2.1	Frézování obvodu součásti, volba nástroje a řezných podmínek	57
3.2.2	Frézování tvarové 3D plochy.....	60
3.2.2.1	Frézování naklopeným nástrojem	66
3.2.2.2	Volba nástrojů a řezných podmínek	66
4	SIMULACE A VERIFIKACE OBRÁBĚCÍHO PROCESU	69
	ZÁVĚR	73
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	744
	Seznam použitých symbolů a zkratk.....	77
	SEZNAM PŘÍLOH.....	78

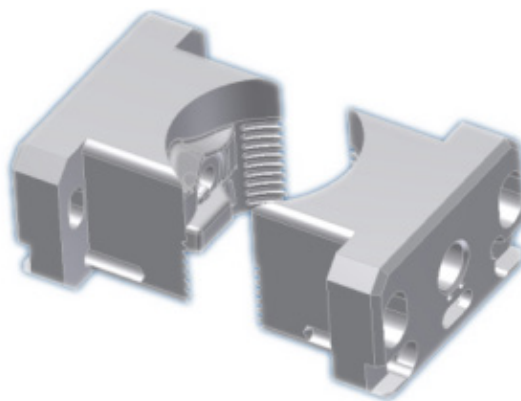
ÚVOD

CAD/CAM systémy jsou již v dnešních moderních výrobních podnicích nezbytnou součástí, bez kterých by podniky ztrácely na konkurenceschopnosti. Jsou významné především pro výrobu tvarově velmi složitých součástí, které by bez nich v mnoha případech obrábět ani nešly. Velice podstatný je ale i výběr vhodného CAD/CAM systému z jejich dnešní široké nabídky tak, aby co nejvíce vyhovoval dané firmě, jejím možnostem a vyráběnému sortimentu. Stejně tak je i důležité mít ve firmě kvalifikované pracovníky, kteří budou s programem zacházet a budou schopni plně využít jeho potenciálu.

V oblasti obrábění forem z tvrdých materiálů se využívá HSC obrábění. Aby bylo možné jej aplikovat, je nutné důkladně řešit výběr obráběcích nástrojů, které by měly být z dostatečně tvrdých materiálů, musí být k dispozici obráběcí stroj s vysokým výkonem a důležité je i dostatečně tuhé upnutí polotovaru a nástrojů. Kromě toho se musí řešit i výběr obráběcích strategií, kdy důraz je kladen především na udržení vysokých a konstantních řezných rychlostí nástroje.

V diplomové práci bude řešena výroba části kokily (viz. obr. 1) z nástrojové oceli ČSN 19 552 pro severočeskou strojírenskou společnost KOVO Děčín spol. s r.o. Nejdříve bude součást představena, bude popsán materiál polotovaru a následně bude řešen výběr strojního a nástrojového vybavení, upnutí polotovaru, určení způsobu chlazení a popis obrábění tvrdých materiálů metodou HSC.

Hlavní míra pozornosti bude věnována představení CAM systému FeatureCAM od firmy Delcam, kdy budou popsány jeho možnosti, dostupné strategie obrábění a jeho vhodnost pro HSC obrábění. Následně bude tento software aplikován na součást kokily, přičemž budou řešeny všechny náležitosti tvorby partprogramu od zadání polotovaru, volby ustavení, možnosti postprocesingu dat, až po volby nejvhodnějších strategií pro obrábění jednotlivých technologických prvků i výběr obráběcích nástrojů a jejich řezných podmínek s ohledem na HSC obrábění. Vzhledem k použití pětiosého frézovacího centra budou tvarové plochy obráběny pomocí vykloněného nástroje. Po dokončení partprogramu bude celý obráběcí proces ověřen grafickou simulací.

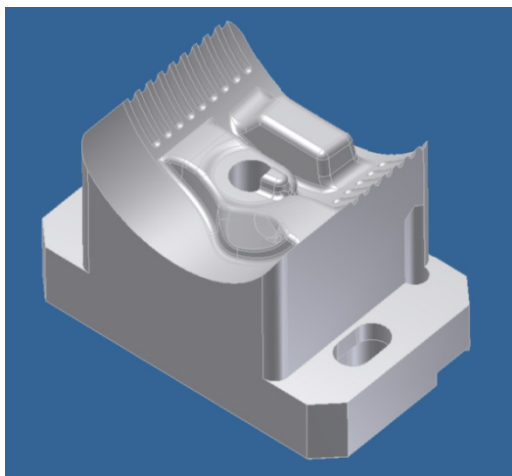


Obr. 1 Ukázka vyráběné části kokily.

1 CHARAKTERISTIKA OBRÁBĚNÉ SOUČÁSTI A JEJÍ VÝROBY

Jako součást, která bude v práci zpracovávána, byla zvolena část kokily, která je určená pro gravitační lití hliníkových pístů. Tato kovová forma je z nástrojové oceli ČSN 19 552, je vyráběna v kusové výrobě a podklady pro ni byly poskytnuty od české strojírenské firmy KOVO Děčín spol. s r.o., která bude přiblížena v kapitole 1.2.

Model obráběné části kokily (viz. obr. 2 a 3) byl vytvořen v softwaru Rhinoceros verze 4.0 a uložen byl ve formátu dat STEP. Výkresová dokumentace součásti byla zhotovena pomocí CAD softwaru Autodesk Inventor Professional 2009, viz. příloha 1.

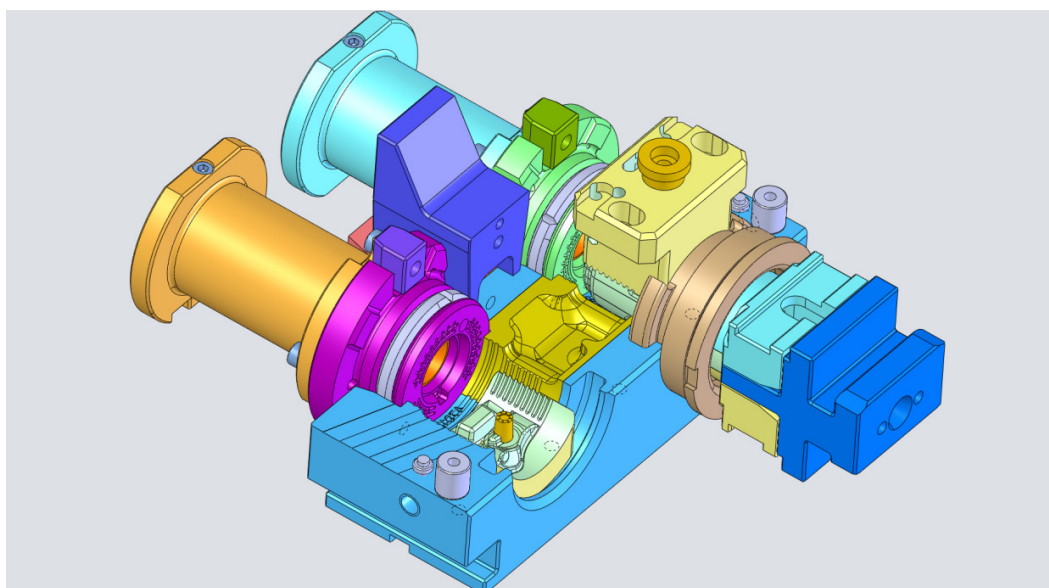


Obr. 2 Model kokily – horní část.

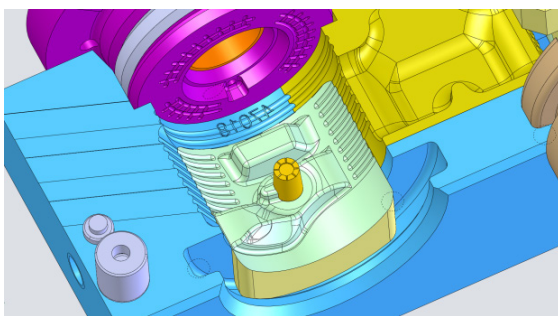


Obr. 3 Model kokily – spodní část.

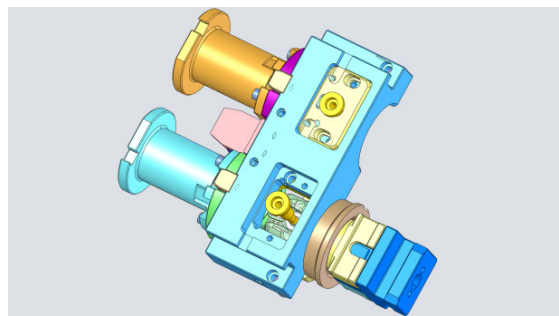
Celá sestava kokily je vidět na obrázcích 4 až 8. Drsnost povrchu veškerých ploch je $Ra\ 3,2$ a tolerance rozměrů viz. výkresová dokumentace (příloha 1). Maximální rozměry součásti jsou: výška $h = 46,825\text{ mm}$, šířka $b = 42\text{ mm}$ a délka $l = 70\text{ mm}$.



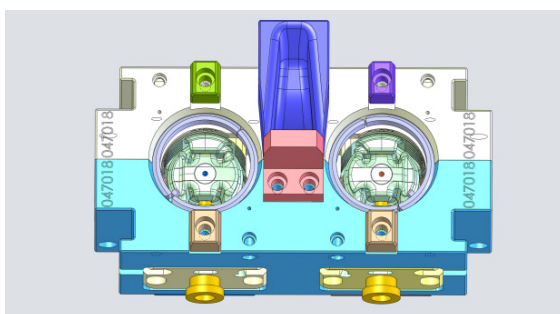
Obr. 4 Pohled do sestavy kokily pro výrobu pístu.



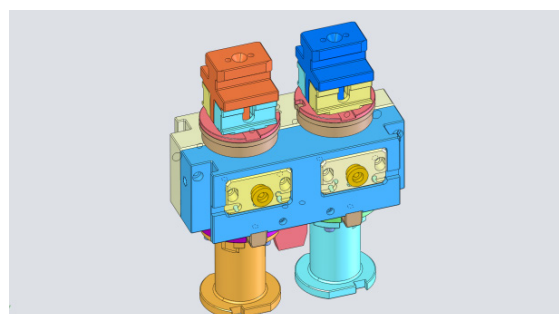
Obr. 5 Detail zpracovávané části kokily.



Obr. 6 Sestava kokily pro výrobu pístu.



Obr. 7 Sestava kokily pro výrobu pístu.



Obr. 8 Sestava kokily pro výrobu pístu.

1.1 Představení firmy KOVO Děčín spol. s r.o.

Jedná se o českou strojírenskou společnost, která sídlí v severočeském Děčíně (viz. obr. 12 a 13). Jejím zaměřením jsou nástrojařské práce a přesné CNC obrábění železných i neželezných kovů a plastů. Funguje již od roku 1999 a nyní má 48 stálých zaměstnanců. Ve strojovém parku firmy se nachází konvenční i CNC obráběcí stroje od značek jako jsou MAS, MAZAK, AXA a HERMLE. [12]



Obr. 9 KOVO Děčín spol. s r.o. [12].



Obr. 10 KOVO Děčín spol. s r.o. [12].

1.2 Strojní vybavení

Součást bude vzhledem ke své tvarové složitosti a k možnostem společnosti KOVO Děčín spol. s r.o. vyráběna na 5osém CNC vertikálním frézovacím centru C 40U (viz. obr. 11) od německého výrobce HERMLE, který má firma KOVO Děčín k dispozici ve svém strojovém parku. Jedná se o přesné obráběcí centrum schopné obrábět i větší součásti až do hmotnosti 600 kg s využitím vysokorychlostního obrábění. Nástroj je řízen souvisle ve 3 osách X, Y a Z, kdy pracovní stůl dále zajišťuje souvislou rotaci obrobku okolo osy C a souvislé naklánění okolo osy A, viz obr. 13. Zásobník obsahuje 38 pozic pro nástroje. Další technické údaje frézovacího centra viz. tab. 1.1.

Přednosti frézovacího centra C 40U [3]:

- vysoká přesnost, stabilita a výkon,
- velký pracovní prostor,
- vysoké otáčky,
- vhodné pro suché obrábění,
- snadný odvod třísek,
- výkonný řídicí systém,
- výborná ergonomie stroje,
- možnost chlazení olejovou mlhou.

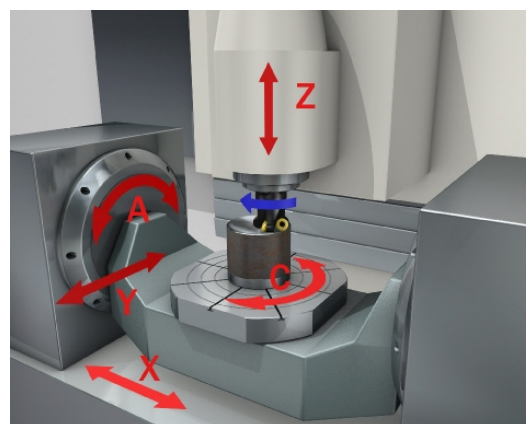


Obr. 11 5osé frézovací centrum HERMLE C 40U [3].

Pracovní stůl stroje (viz. obr. 12) je otočný okolo osy C a je sklopný okolo osy A pod úhly $+91^\circ$ až -139° . Unese hmotnost až 600kg a má rozměry upínací plochy 1070x700 mm, což je dostatečně velký prostor pro upnutí obráběného polotovaru, který má rozměry 42x70 mm. Vzhledem k této velikosti polotovaru by postačoval i stroj menší, ale tento je použit s ohledem na výrobní možnosti firmy. Stroj je připraven pro vnitřní i vnější chlazení nástroje což je využito pro hluboké díry s hloubkou $L > 5D$, tedy u všech vrtacích operací.



Obr. 12 Pracovní stůl stroje [3].



Obr. 13 Pohyby nástroje a pracovního stolu [25].

Tab. 1.1 Technické údaje frézovacího centra C 40U [3].

Parametr	Hodnota	Jednotky
Pracovní pojezd X	850	mm
Pracovní pojezd Y	700	mm
Pracovní pojezd Z	500	mm
Upínací plocha stolu	1070x700	mm
Rozsah otáček vřetena	40000	ot/min
Výkon vřetene	32	kW
Maximální krouticí moment	200	Nm
Počet pozic v zásobníku nástrojů	38	-
Čas výměny nástroje	5,5	S
Maximální hmotnost nástrojů v zásobníku	152	kg
Maximální délka nástroje	300	mm
Maximální průměr nástroje	Ø90	mm
Max. příkon	43	kVA
Stlačený vzduch	6	bar
Hmotnost stroje	9500	kg
Rozměry stroje (šířka x délka x výška)	2350x3150x2900	mm
Řídicí systém	HEIDENHAIN iTNC 530	-

1.3 Řídicí systém stroje

Použitý řídicí systém zvoleného stroje je HEIDENHAIN iTNC 530, viz obr. 14. Je to systém od německé firmy HEIDENHAIN, který je všestranný, dílensky a konturově orientovaný. Je určený pro frézovací, vrtací a vyvrtávací stroje stejně tak jako pro obráběcí centra. [8]

Systém umožňuje, jak přímé programování pomocí dialogu v přívětivém uživatelském prostředí systému, tak je i možné importovat program, vytvořený v CAM systému, do paměti stroje.

Vlastnosti systému HEIDENHAIN iTNC 530 [8]:

- optimalizované řízení pohybu,
- krátká doba zpracování bloku,
- speciální strategie řízení,
- jednotná digitální koncepce,
- integrované digitální pohony a měniče,
- DCM dynamická kontrola kolizí,
- automatická regulace posuvu pomocí AFC adaptivního řízení posuvů.

Výhodou softwaru FeatureCAM je, že obsahuje mnoho již předpřipravených postprocesorů, mezi kterými je právě i postprocesor pro řídicí systému HEIDENHAIN iTNC 530. Není tedy třeba postprocesor vytvářet, stačí jen upravit stávající.



Obr. 14 Heidenhain iTNC 530 [8].

1.4 Vlastnosti materiálu součásti

Jako materiál pro výrobu této kokily je použita chrom molybden křemík vanadová nástrojová ocel s označením ČSN 19552, či dle německé normy DIN 1.2343. Jedná se o nejpoužívanější kalitelnou ocel pro tvarové díly forem. Materiálové označení této nástrojové oceli je X37CrMoV5-1, chemické složení viz. tab. 1.2.

Její tvrdost je 50 HRC a mezi její vlastnosti patří velmi dobrá prokalitelnost, houževnatost, vysoká pevnost za tepla, plastické vlastnosti při normálních i zvýšených teplotách a malá citlivost na prudké změny teploty. Díky vysokému obsahu chromu je i částečně odolná vůči korozi a má také vysokou otěruvzdornost. Jedná se o materiál, který je vhodný pro formy určené k odlévání slitin hliníku, zinku či hořčíku. Má dobrou leštitelnost a je vhodný k nitridaci a povlakování.

Tab. 1.2 Chemické složení nástrojové oceli ČSN 19552 [9].

Chemické složení [%]											
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	W	C	Co	Cu
0,32-0,42	0,2-0,5	0,8 - 1,2	max 0,03	max 0,03	4,5-5,5	max 0,35	1,2-1,5	max 0,3	0,3-0,5	max 0,3	max 0,3

1.4.1 Obrábění tvrdých materiálů

Jako tvrdé materiály se obvykle označují ty, které mají tvrdost 50 až 60 HRC a pevnost až přes 1800 MPa. Vzhledem k použitému materiálu formy, což je nástrojová ocel s tvrdostí 50 HRC, je tedy třeba brát na vědomí některé zákonitosti obrábění tvrdých materiálů.

Problémy při obrábění tvrdých materiálů [1]:

- vysoké teploty v oblasti řezání,
- vysoké, proměnné velikosti řezných sil,
- v blízkosti ostří je vysoký tlak na malý průřez třísky,
- špatná homogenita materiálu obrobku,
- rychlé opotřebení nástroje,
- vznikající pnutí v obrobku,
- nedostatečná stabilita.

Pro obrábění kalené oceli jsou na břity nástroje kladeny značné nároky. Nástroj by měl být odolný proti působení abrazivního opotřebení vlivem tvrdých mikročástic v obráběném materiálu a proti difúznímu opotřebení, měl by být chemicky stabilní, tvrdý za tepla, pevný v tlaku i v ohybu a měl by být spolehlivý [1].

Vzhledem k těmto vyskytujícím se problémům a nárokům je třeba dbát zvýšené pozornosti při volbě obráběcích nástrojů. Pro splnění nároků kladených na nástroje se nejčastěji používají nástroje s VBD ze slinutých karbidů, z řezné keramiky, z kubického nitridu boru, nebo z povlakovaných tvrdokovových materiálů na bázi karbidu wolframu a kobaltu.

1.4.2 HSC obrábění

Vysokorychlostní obrábění se vyznačuje 5 až 10 x vyššími řeznými rychlostmi, než jaké se dosahují u konvenčního obrábění, což umožňuje zkrácení výrobních časů a zároveň dosažení vysoké kvality povrchu součástí.

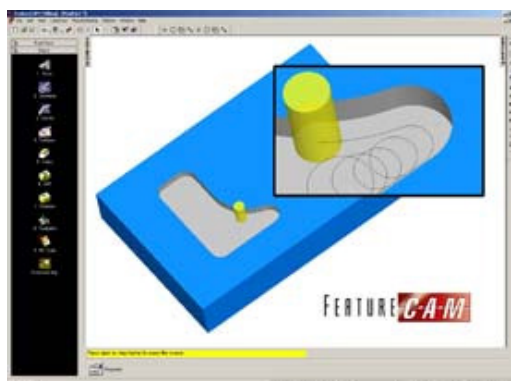
Pro možnost aplikace HSC obrábění tvrdých materiálů je nutné mít k dispozici dostatečně výkonný obráběcí stroj. Stroje pro vysokorychlostní obrábění mají tedy vysoký výkon, který se pohybuje obvykle od 15 do 60 kW, a mají vysoké otáčky vřetene, které se běžně pohybují od 10 000 až do 80 000 min⁻¹ [28].

Výhody HSC obrábění [33]:

- umožňuje vyšší posuvové rychlosti se zvyšujícími se otáčkami vřetena při stejné tloušťce třísky jako u konvenčního obrábění, díky čemuž je docíleno vyššího úběru materiálu,
- nižší tepelný účinek díky rychlejšímu odvodu třísky (teplo není vedeno do nástroje a obrobku), což snižuje tepelné deformace a zvyšuje přesnost obrobku,
- díky nižšímu přechování třísky se snižují řezné síly,
- vytváří se krátká, kompletně segmentovaná tříska,
- možnost využití suchého obrábění,
- dosahuje se kratších strojních časů.

Naproti tomu mezi nevýhody HSC obrábění patří zvýšené náklady na pořízení obráběcího stroje a nástrojů, na jejich provoz a na zajištění bezpečnosti obsluhy.

Pro HSC obrábění je důležité, aby nedocházelo k rychlým změnám drah nástroje, a aby řezná rychlost byla vysoká a konstantní. Rychlé změny dráhy nástroje by totiž vedly k zatěžování stroje. Pro obrábění dutin je tedy výhodné využít trochoidní pohyb nástroje (viz. obr. 15), který minimalizuje počet změn směru obrábění, což umožňuje použití vysokých konstantních řezných rychlostí, které podstatně přispívají ke zkrácení obráběcího času [31].



Obr. 15 Trochoidní pohyb nástroje [16].

1.5 Nástrojové vybavení

Nástroje byly zvoleny od firem Sandvik Coromant a Fraisa, typově se jedná o tyto nástroje: čelní válcové frézy monolitní i s VBD, monolitní fréza na sražení hran, monolitní kulové frézy a vrtáky. Jednotlivé nástroje budou blíže specifikovány v kapitole 3 u jednotlivých obráběcích operací. U každého nástroje jsou uvedeny doporučené hodnoty řezné rychlosti a posuvu na zub, či posuvu na otáčku od výrobce. Z těchto doporučených hodnot jsou dále vypočítány otáčky a posuvová rychlost.

Nástroje používané pro vysokorychlostní obrábění jsou namáhané vysokými odstředivými silami při vysokých otáčkách, což u větších fréz způsobuje namáhání tělesa nástroje, upnutí břitové destičky i materiálu břitu. Navíc vzhledem k tomu, že bude obráběna nástrojová ocel s tvrdostí 50 HRC, je nutné použít také adekvátně tvrdé materiály pro monolitní nástroje a pro břitové destičky, které budou schopny tento materiál efektivně obrábět s co nejvyšší trvanlivostí. Nástroje by měly mít také vysokou povrchovou tvrdost, houževnatost a vysokou odolnost proti chemickému opotřebení. Všechny tyto požadavky pro obrábění nástrojových ocelí nejlépe splňují povlakované slinuté karbidy, cermety a řezná keramika.

1.5.1 Upínání nástrojů

Pro obrábění forem z tvrdých materiálů je podstatné použití držáků, které tlumí vibrace a harmonické kmity generované při obrábění spolu s použitím vyspělých fréz. Je to důležité obzvláště u nástrojů s velkou délkou vyložení, u frézování vysokým posuvem a také při hrubování. [14] Mezi nejčastěji používané upínače nástrojů patří upínací pouzdro WELDON, upínací pouzdra pro kleštiny, hydraulická upínací pouzdra a tepelné upínače.

1.5.2 Dotykové sondy

Účelem 3D dotykových obrobkových sond je ustavení a proměření obrobků a přesné nastavení vztažného bodu. Jejich použití snižuje náklady na upínače a na ruční ustavení obrobku číselníkovými úchylkoměry.

Výhody jejich použití:

- automatické ustavení obrobku, natočení souřadného systému či polohování rotační osy,
- snížení doby prostojů stroje,
- zvýšení flexibility a produktivity výroby,
- odstranění chyb ručního nastavení,
- snížení počtu zmetků.

HEIDENHAIN TS 640 (viz. obr. 16) je 3D dotyková obrobková sonda, která pro přenos signálu využívá infračervený světelný paprsek. Slouží pro ustavení a proměření obrobku a pro nastavení vztažného bodu [6].



Obr. 16 3D dotyková sonda HEIDENHAIN TS 640 [6].

1.6 Řezné prostředí

Vzhledem k materiálu formy s tvrdostí 50 HRC a tedy k použití HSC obrábění tvrdých materiálů bude součást obráběna na sucho. Výjimkou bude pouze vrtání hlubokých děr a frézování hluboké drážky, pro které bude použito chlazení a mazání olejovou mlhou, která bude přiváděna vnitřkem nástroje při tlaku 6 barů. Dnešní řezné nástroje pro HSC obrábění tvrdých materiálů totiž nevyžadují pro obrábění přívod řezné kapaliny. Naopak mají bez přívodu řezné kapaliny delší životnost a vyšší spolehlivost, než kdyby se řezná kapalina přiváděla.

Při HSC obrábění dochází k velmi horké zóně řezu, kdy řez probíhá ve vrstvě tavícího se materiálu obrobku mezi obrobkem a nástrojem a to při teplotách nad 1000 °C. Chladicí kapalina přiváděná k břit v záběru se okamžitě vypařuje a nemá prakticky žádný chladicí účinek. Naopak kapalina pouze zdůrazní účinek rozdílu teploty v řezu a mimo něj. Přívod chladicí kapaliny totiž ochlazuje břit v době, kdy není v řezu, a tím zvýrazní teplotní rozdíly, které způsobují cyklické namáhání a vznik tepelných prasklin, což vede ke snížení životnosti nástroje. Moderní slinuté karbidy, cermety, keramika a kubický nitrid boru jsou navrženy tak, aby snášely stále, vysoké řezné rychlosti a teploty v řezu [1,4].

V některých případech, jako je především frézování hlubokých drážek či vrtání hlubokých děr s poměrem $L/D > 5$, je ale použití procesní kapaliny nezbytné. Kapalina zde zabraňuje geometrické deformaci obrobku, kdy se malé částice zadírají do obrobeného povrchu.

1.6.1 Suché obrábění

Suché obrábění je technologie, při které obráběcí proces probíhá v přirozeném prostředí, které je tvořeno vzduchem, to znamená bez přívodu chladicí kapaliny. Nejčastěji se aplikuje společně HSC obráběním.

Pro suché obrábění je důležité, aby proces obrábění byl navržen tak, aby se minimalizovalo množství vzniklého tepla, které je odváděno obrobkem. Je nutné snížit množství měrné energie, která je vynaložená na řezný proces, čehož je možné dosáhnout například zmenšením deformačních a třecích sil. Příznivý účinek má použití nástroje s pozitivní geometrií břitu a to především úhlu čela, i přestože se tím do jisté míry zhorší schopnost břitu teplo odvádět. Toto opatření také zmenšuje objem a intenzitu plastických deformací, které doprovázejí vznik třísky a navíc se snižuje intenzita tření mezi třískou a čelem břitu, což také snižuje množství tepla vzniklého z tření [18,19].

Při frézování je vhodné využívat především sousledné frézování, které omezuje tření hřbetu břitu o plochu řezu. Dále se použijí vyšší hodnoty posuvu na zub a vyšší řezné rychlosti, čímž se snižuje množství tepla přecházejícího do obrobku a zároveň se zvyšuje objem tepla odváděného třískami.

Výhody suchého obrábění [4]:

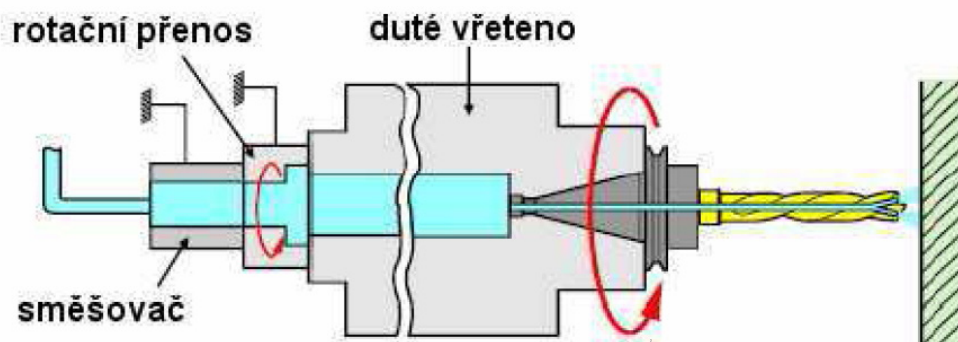
- zvýšení produktivity,
- delší životnost (až o 40%, v některých případech i více),
- snížení výrobních nákladů (náklady na chladicí kapalinu a její likvidaci tvoří 15 - 20 % celkových nákladů, zatímco samotné obráběcí nástroje tvoří jen 4 - 5 %),
- ekologičnost (čistší a zdravější pracovní prostředí bez množení bakterií a zápachu),
- není nutná údržba nádrží a rozvodu chladicí kapaliny,
- obvykle dochází k lepšímu utváření třísky.

1.6.2 Chlazení a mazání olejovou mlhou

Chlazení a mazání olejovou mlhou je velmi rozšířená metoda při HSC obrábění, kdy se přivádí minimální množství kapaliny (MQL). Tato metoda byla zavedena především z důvodu snahy minimalizace používání řezných kapalin, snižování nákladů, ekologie, zdraví a pracovního prostředí. Umožňuje dodávku přesného množství média na břit nástroje do místa řezu, kdy procesní kapalina je smíchávána se stlačeným vzduchem a tím vytváří požadovanou aerosolovou směs, tedy olejovou mlhu. Při tomto způsobu chlazení a mazání zůstávají obrobek, nástroj i tříska prakticky suché [22].

Aerosolová směs je přiváděna buď vnitřkem nástroje (viz. obr. 17), nebo pomocí trysek, které jsou nasměrované do místa řezu. U vnitřního přívodu je aerosolová směs přiváděna přes vřeteno a nástroj. Olejová mlha se používá především tam, kde chladicí kapalina má malý mazací účinek, či tam kde dochází k odpařování kapaliny vlivem vysoké

teploty v místě řezu, například při HSC obrábění tvrdých materiálů. Velice často se používá také pro vrtání hlubokých děr [22].



Obr. 17 Vnitřní přívod kapaliny u MQL [11].

Výhody chlazení a mazání olejovou mlhou [22]:

- snadné a rychlé nasazení,
- vyšší životnost nástrojů (o 20 až 40 %),
- zdravotně a ekologicky výhodné,
- malá spotřeba oleje,
- vysoká kvalita obrobeneho povrchu.

1.7 Upnutí polotovaru

Vzhledem ke kusové výrobě kokily by bylo zbytečné navrhovat speciální upínací přípravek, tedy pokud již firma nemá nějaký vhodný z dřívější doby, a tak pro upnutí polotovaru bude použit klasický upínací svěrák, kdy se součást bude vyrábět na 2 upnutí. Při prvním upnutí bude součást upnuta standardně na dvě párové podložky. Při druhém upnutí bude součást upnuta za již dokončenou plochu a proto, aby nedošlo k otlačení této plochy čelistmi, budou mezi čelisti svěráku a obrobek vloženy měkké vložky.

Dostatečně tuhé upnutí obrobku je velmi důležité, jelikož při frézování a zvláště při HSC vznikají velké řezné síly. Zároveň se ale obrobek upnutím nesmí deformovat, což se při upnutí za již obrobene plochy řeší například právě použitím měkkých vložek.

Pro upnutí polotovaru byl zvolen upínací svěrák Makro-Grip® (viz. obr. 18) od firmy Lang Technik. Jedná se o patentovaný svěrák určený pro 5osé obrábění, který zaručuje dostatečnou tuhost a výbornou ergonomii i díky otočným čelistem. Základní parametry svěráku viz. tab. 1.3.

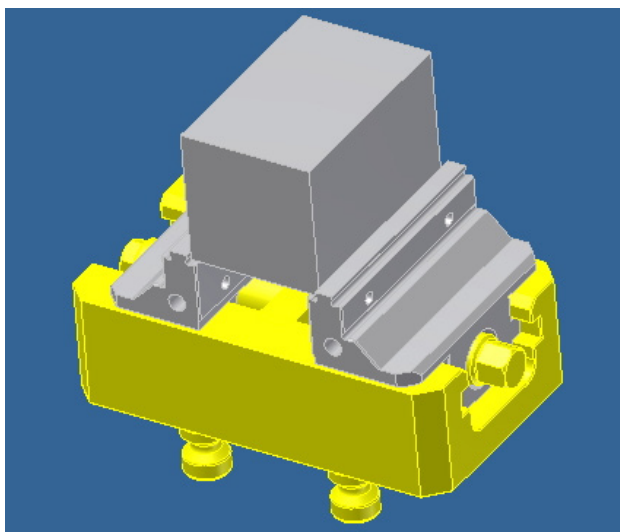
Tab. 1.3 Parametry svěráku Makro-Grip® [13].

Základní délka	Upínací rozsah	Hmotnost
130 mm	0 – 120 mm	3,1 kg



Obr. 18 Svěrák od firmy Lang Technik [13].

Na obr. 19 je znázorněna hotová sestava upnutí polotovaru v upínacím svěráku Makro-Grip®. Sestava byla vytvořena pomocí programu Autodesk Inventor Professional verze 2009, viz. příloha 3.



Obr. 19 Sestava upnutí polotovaru.

2 APLIKACE CAM SYSTÉMU FEATURECAM

FeatureCAM je CAD/CAM systém určený pro frézování, soustružení a pro drátové řezání. Je vydáván britskou firmou Delcam, která je jedním z předních světových dodavatelů CAM systémů. V České republice je software distribuovaný společností DELCAM BRNO, s.r.o. Mezi další produkty firmy Delcam patří mimo jiné PowerMill, PowerShape, PowerInspect, PartMaker či ArtCAM.

2.1 Systém FeatureCAM

FeatureCAM je určený pro 2D, 2.5D a 3D frézování, pro pětiosé polohování, i pro řízení 5 os souvisle. K hlavním přednostem systému FeatureCAM patří především jeho jednoduchost a rychlost vytvoření kompletního NC programu. Software pracuje na základě zadávání jednotlivých technologických prvků (např. díry, drážky či kapsy), které program umí i sám automaticky rozpoznávat a následně dokáže navrhnout vhodné řešení, podmínky obrábění a výběr nástrojů i jejich řezných podmínek na základě přednastavených či uživatelských atributů obrábění. Uživatel může následně všechny parametry libovolně upravovat, či je může zadávat již od začátku sám.

Zajímavou a také velmi užitečnou funkcí programu je tedy právě automatické rozpoznávání prvků (Automatic Feature Recognition), které celý proces zadávání výrazně zjednodušuje. Tato funkce na modelu automaticky rozpozná dostupné technologické prvky, jako jsou například díry, kapsy či profily a následně pro ně navrhnou i všechny operace, vhodné strategie, nástroje i řezné podmínky. Tyto technologické prvky pak může uživatel libovolně upravovat stejně jako jakékoli jiné manuálně vytvořené prvky dle vlastních potřeb.

FeatureCAM obsahuje i jednoduchý modul Solid CAD, který je postaven na jádře Parasolid. Obsahuje všechny základní CAD funkce. Jeho cílem není přímo nahradit jiný komplexní CAD systém, ale spíše vypomoci při tvorbě geometrie a modelů. Uživatelé ho tedy nejvíce ocení při tvorbě řídicích křivek, ploch pro zaslepení děr, při tvorbě různých dělicích rovin či jednoduchých modelů upínek apod. V případě potřeby z něj lze exportovat 2D formáty dwg, dxf a iges a 3D formáty parasolid, iges a stl [2].

Mezi další vlastnosti softwaru FeatureCAM patří [2]:

- obsahuje sdílenou databázi řezných podmínek a nástrojů,
- nabízí programátorské rozhraní API pro tvorbu maker,
- má knihovnu s více než 350 postprocesory,
- obsahuje optimalizaci posuvu,
- podporuje HSC obrábění,
- má integrovaný balík 3D simulace.

V programu je možné si definovat globální výchozí atributy obrábění (viz. obr. 20), které budou použity pro každý nový projekt, nebo je možné si i vytvořit libovolné množství vlastních profilů obrábění, které budou uplatněny pouze pro vybrané projekty. V této nabídce atributů obrábění nacházející se pod ikonou „Vlastnosti obrábění“, která je umístěna v hlavním menu pod záložkou „Výroba“, se definují veškeré atributy pro obráběcí operace, které budou voleny jako výchozí při zadávání nových obráběcích operací. Na základě těchto údajů, které jsou v attributech obrábění nastavené, program automaticky vypočítává parametry obrábění, jako jsou například hloubka řezu, krok do strany, přídavek a další.

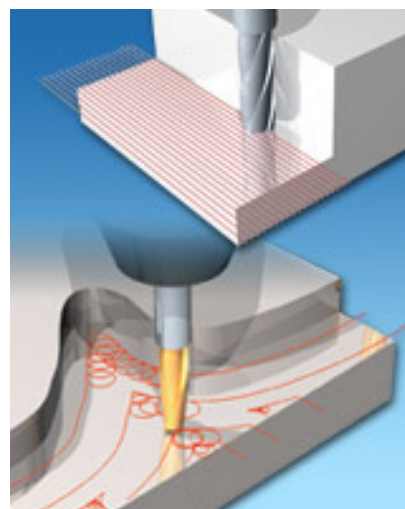
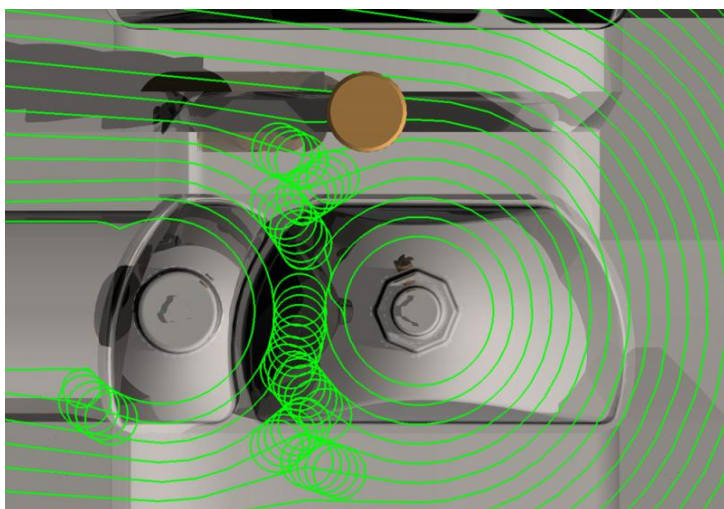
Obr. 20 Nastavení atributů obrábění.

2.1.1 Možnosti HSC ve FeatureCAMu

Systém FeatureCAM umožňuje HSC obrábění, kdy pro dosažení plynulých a vyhlazených drah nástroje využívá různé možnosti jejich vytváření. Při HSC obrábění jsou využívány v softwaru především možnosti nastavení vyhlazení dráhy nástroje, vkládání rádiusů do dráhy a zadávání trochoidy.

Řízení procesu HSC obrábění ve FeatureCAMu [2]:

- pro plynulejší pohyb se v místech velkého opásání nástroje (především v rozích modelu) vytváří trochoidní dráhy (viz. obr. 21),
- při hrubování se eliminují ostré rohy dráhy (zaoblují se),
- při spirálovém dokončování fréza po nájezdu na konturu obrábí bez jakéhokoli přejezdu až do okamžiku, než dosáhne požadované Z hladiny,
- nastavením příslušných parametrů nebude na dráze jediný ostrý roh,
- je přítomná sada možností k řízenému přemísťování nástroje pro HSC,
- v 3D simulaci je možnost zobrazení zatížení nástroje.



Obr. 21 Trochoidní dráhy nástroje [2].

2.1.2 Strategie frézování

Frézovací strategie jsou metody, pomocí kterých bude systém vypočítávat dráhy jednotlivých nástrojů. Systém FeatureCAM používá jednoduchou techniku průchodů nástroje pro prokládání drah dokončení, aby docílil vynikajících výsledků. Přejezdy jsou drženy na minimu, nástroj zůstává maximálně v záběru a přechody jsou plynulé, rychlé a produktivní [29].

Jednotlivé, v systému dostupné hrubovací, dokončovací a speciální strategie frézování, jsou popsány v následujících podkapitolách.

2.1.2.1 Hrubovací strategie

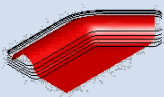
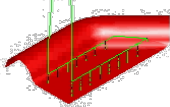
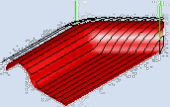
V systému FeatureCAM jsou dostupné tři základní hrubovací strategie frézování: hladina Z, řádkování a odvrtávání (viz. tab. 2.1).

U hrubovací strategie „Hladina Z“ dráhy nástroje offsetují (kopírují) konturu modelu po jednotlivých vrstvách s konstantní hloubkou záběru. Po vyhrubování dané vrstvy se nástroj posune v ose Z o krok dolů a pokračuje v hrubování. Tato strategie navíc v rozích vytváří zaoblené dráhy. Je možné nadefinovat i zatížení nástroje, kdy systém bude automaticky odlehčovat dráhu tak, aby nedošlo k jeho poškození. Tato strategie se často využívá pro HSC obrábění [29].

Řádkování se využívá pro rychlé odebrání materiálu a to především u strojů s vysokou tuhostí. Nástroj se pohybuje po jednotlivých řádcích, obvykle podle osy X nebo Y, nebo i pod určitým úhlem dokud nedojede na konec obráběné plochy, kde se přesune o krok a pokračuje dále v řádkování. Velikost kroku je obvykle 0,8 krát průměr nástroje. Tato strategie se také někdy nazývá jako frézování rastrem, nebo Cik-Cak.

Při strategii odvrtání se využívá speciálních odvrtávacích nástrojů, pomocí kterých se odvrtává velké množství materiálu.

Tab. 2.1 Dostupné strategie pro hrubování 3D ploch.

Nákres strategie	Název strategie
	Hladina Z
	Odvrtávání
	Řádkování

2.1.2.2 Dokončovací strategie

V programu je dostupná hned celá řada dokončovacích strategií, jejichž celý výpis je uveden v tab. 2.2. Blíže budou popsány tedy jen vybrané, často používané strategie.

Pomocí strategie spirála se obrábí jediným spirálovým pohybem nástroje, kdy směr spirály může být buď po, anebo proti směru hodinových ručiček. Spirála může zároveň směřovat z vnějšku dovnitř či naopak z vnitřku ven. Spirálové dokončování je ideální strategie pro HSC frézování, jelikož dráhy nástroje jsou plynulé a s minimálními změnami směru. Při 3D spirálovém obrábění je krok nástroje určený vzhledem k 3D povrchu modelu, což umožňuje důslednost jak u plochých oblastí, tak u strmých bočních stěn [29].

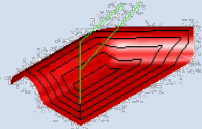
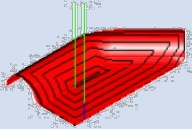
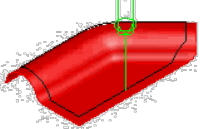
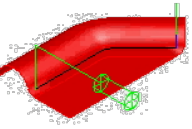
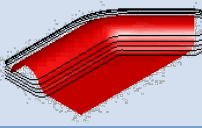
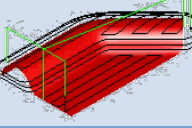
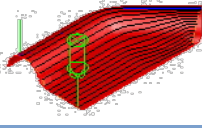
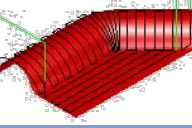
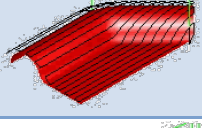
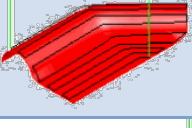
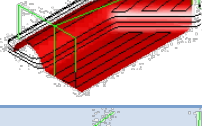
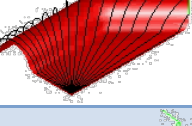
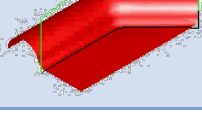
Radiála je strategie dokončovacího obrábění, která je vhodná především pro obrábění oblých částí. Nástroj se pohybuje po modelu radiálou dovnitř a ven, kdy přechody mezi jednotlivými pohyby jsou pod určitým úhlem [29].

Při použití dokončovací strategie izočára jsou dráhy nástroje vytvářeny takovým způsobem, že každá plocha je obráběna zvlášť. U této strategie je možné snadno ovládat směr řezu nástroje a celý dokončovací proces [29].

Dokončovací strategie řádkování má stejný princip jako hrubovací strategie řádkování. Je určena pro dokončování horizontálních ploch, kdy odstraní materiál z modelu s využitím paralelních řad, které kopírují osy X nebo Y, v ose Z tato strategie kopíruje tvar modelu [29].

Strategie hladina Z, je klasická strategie, kdy se dráhy nástroje pohybují horizontálně po modelu v konstantní výšce Z s definovaným krokem dolů, kvůli čemuž je tato strategie také někdy nazývána jako konstant Z. Pohyby dráhy této strategie je také možné spojovat do spirály, díky čemuž se dosahuje plynulého pohybu nástroje [29].

Tab. 2.2 Dostupné strategie pro dokončování 3D ploch.

Nákres strategie	Název strategie	Nákres strategie	Název strategie
	2D spirála		3D spirála
	5osá hrana		Bokem
	Hladina Z		Horizontální + vertikální
	Mezi 2 křivky		Izočára
	Řádkování		Projekce
	Strmé a rovinné		Radiála
	Tužkou		Zbytkový roh

2.1.2.3 Speciální strategie

Seznam všech speciálních strategií frézování 3D tvarových ploch včetně jejich náhledů je uveden v tab. 2.3.

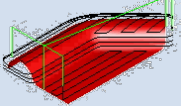
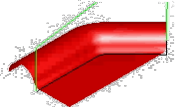
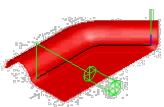
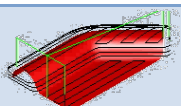
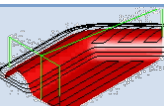
Horizontální + vertikální je speciální dokončovací strategie, která umožňuje dokončení jak horizontálních, tak vertikálních ploch při jednom nastavení. Jedná se o komplexní strategii, která pro horizontální plochy využívá strategii 3D offset, zatímco pro vertikální plochy využívá strategii hladina Z. Je nutné vybrat 2 nástroje, kdy jeden bude určený pro dokončování horizontálních ploch a druhý pro dokončování vertikálních ploch. Plochy jsou rozdělené pomocí nastavení limitního úhlu [29].

Strategie strmé a rovinné je podobná strategii horizontální + vertikální. Plochy jsou pomocí limitního úhlu rozděleny na horizontální a vertikální, kdy pro vertikální plochy je také použita strategie hladina Z, ale pro horizontální plochy je možnost výběru mezi strategiemi 3D offset a rastr. Pro tuto strategii je možné vybrat pouze jeden nástroj, proto je vhodná spíše pro menší povrchy, kde je nutné zabezpečit lepší napojení drah nástroje.

Zbytkový roh je strategie určená pro dokončování zbytkových rohů, ve kterých zůstal neobrobený materiál po předchozích operacích, které byly vykonány většími nástroji. Zahrnuje 5 typů strategií: tužkové, multi-pero, podélné, příčné a kombinace příčného a podélného. Strategie obrábění zbytkového rohu umožňuje nastavit úhel sklonu operace [29].

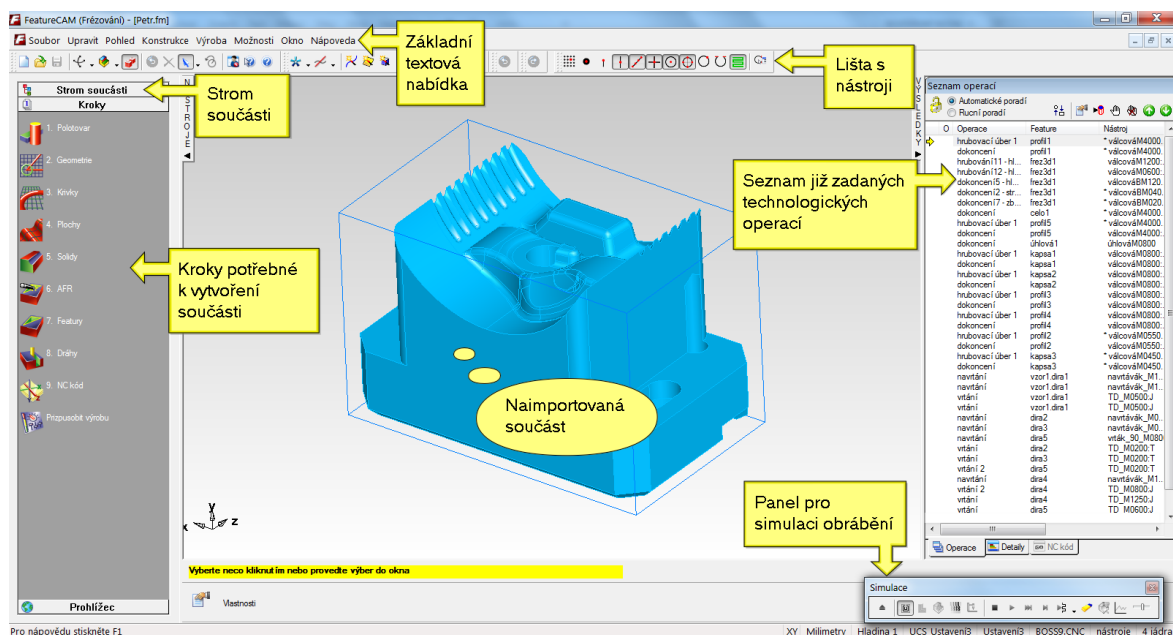
Strategie tužkou je obdoba strategie zbytkového rohu. Je tedy určená pro dokončení vnitřních ostrých rohů pomocí podélného jednopružchového pohybu nástroje.

Tab. 2.3 Dostupné speciální strategie pro frézování 3D ploch.

Nákres strategie	Název strategie	Nákres strategie	Název strategie
	Horizontální + vertikální		Zbytkový roh
	Tužkou		Bokem
	Strmé a rovinné		5osá hrana

2.1.3 Uživatelské prostředí

Uživatelské prostředí v programu FeatureCAM (viz. obr. 22) je velice přehledné a logicky rozčleněné dle postupu tvorby partprogramu. Využívá klasických nabídek a panelů známých z operačního systému Microsoft Windows, díky čemuž si na práci s tímto programem každý uživatel velmi rychle zvykne.



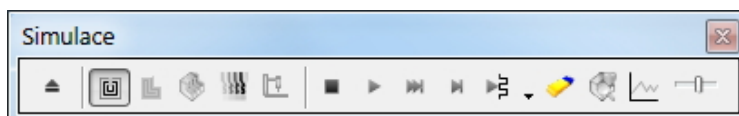
Obr. 22 Uživatelské prostředí systému FeatureCAM.

V panelu nazvaném jako „Strom součástí“ se nalézají veškeré již vykonané činnosti provedené v programu a to od zadání polotovaru, jednotlivých ustavení, ploch, křivek a solidů až po zadání jednotlivých featur. Featury jsou technologické prvky, což jsou běžné dílenské termíny jako například kapsa, díra nebo závit. Vytváří se z křivek a rozměrů, či jsou detekovány automaticky pomocí funkce AFR. Tyto objekty popisují součástku ve 3D a používají se při generování Drah.

V panelu „Kroky“ se v podobě grafických ikon nacházejí všechny dostupné kroky, pomocí kterých se postupně vytváří NC program pro výrobu součásti. Kroky jsou seřazeny v logickém sledu od zadání polotovaru až po přizpůsobení výroby.

Na pravé straně obrazovky je okno „Seznam operací“, ve kterém se nacházejí všechny dosud vytvořené operace, které jsou seřazené dle posloupnosti výrobního procesu. Tyto operace mohou být řazeny buď ručně, nebo inteligentně automaticky, na základě velikosti použitých nástrojů a jejich drah tak, aby výsledný čas obrábění byl co nejkratší.

Dalším důležitým prvkem je lišta „Simulace“ (viz. obr. 23), která uživateli umožní spustit samotnou simulaci obráběcího procesu. Při spuštění simulace se generují dráhy nástroje ze zadaných podmínek. Na výběr je z několika režimů simulace, mezi které patří simulace se zobrazením středové čáry, 2D a 3D simulace a simulace se zobrazením stroje. Dále je možné upravovat rychlost simulace, krokovat pohyby, či zobrazit zatížení stroje.



Obr. 23 Panel simulace obrábění.

2.2 Postprocesor

V CAM systému je vytvářen partprogram, který se skládá z geometrických a technologických dat. Je v něm definovaný polotovár, jeho materiál, použité nástroje, jejich řezné podmínky a dráhy nástroje. Tento partprogram je pomocí procesoru ukládán jako CL data, která obsahují veškeré dráhy nástroje. Procesor se volí dle technologie, kdy ve FeatureCAMu jsou dostupné procesory pro frézování, soustružení a pro drátové řezání. Vytvořená CL data jsou nakonec překládána pomocí postprocesoru do NC programu.

Postprocesor je tedy překladač obsahující sadu instrukcí, pomocí kterých se převádí CL data vygenerovaná CAM systémem do NC programu, což je řeč, která je srozumitelná pro řídicí systém zvoleného CNC obráběcího stroje [23].

Systém FeatureCAM obsahuje více než 350 připravených postprocesorů, které můžeme rovnou použít, upravit je k vlastní potřebě, či můžeme vytvořit a použít zcela nové. Pro vytváření a úpravy postprocesorů je k systému FeatureCAM přiložená aplikace XBUILD. Tu je možné spustit přímo z hlavní nabídky systému po kliknutí na ikonu „Postprocesor“ a dále na ikonu „Úpravy“ (viz. obr. 24).

Pro kokilu bude využit předpřipravený postprocesor „Heid_530i_5x_index.cnc“, který je určený pro 5osá CNC frézovací centra s řídicím systémem Heidenhein 530i. Tento postprocesor by se ještě měl přizpůsobit pro danou konfiguraci obráběcího centra nastavením parametrů, jako je například velikost rychloposuvu, čas výměny nástroje či maximální otáčky stroje.

Možnosti postprocesu

Frézování Soustružení/Frézování

CNC soubor
C:\Program Files (x86)\Delcam\FeatureCAM\Posts\Mill\5-Axis\Heiden

Min./max oblouk 0.025 25000. mm Procházet...

Začátek bloku 10 Úpravy...

Přírůstek bloku 5 Výchozí

Jednotky: Tento post podporuje pouze milimetry

☐ Zakázat makra
☐ Volat makro pro jednu díru
☒ Povolit korekci ☐ Povolit 3D korekci
☐ Pro každou operaci vynutit segment start
☐ Redukovat netypické zpomalení

Kód G99

Pozice výměny nástroje
X 0. mm Y 0. mm Z 25. mm

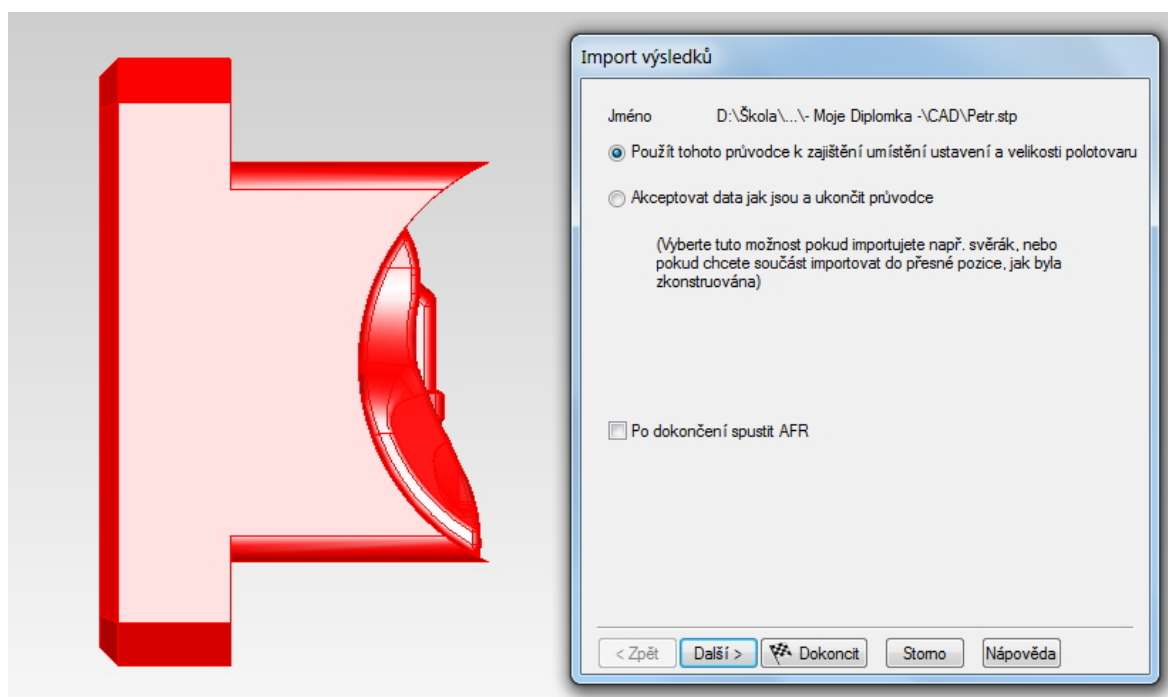
OK Storno Nápověda

Obr. 24 Možnosti postprocesu.

2.3 Import modelu

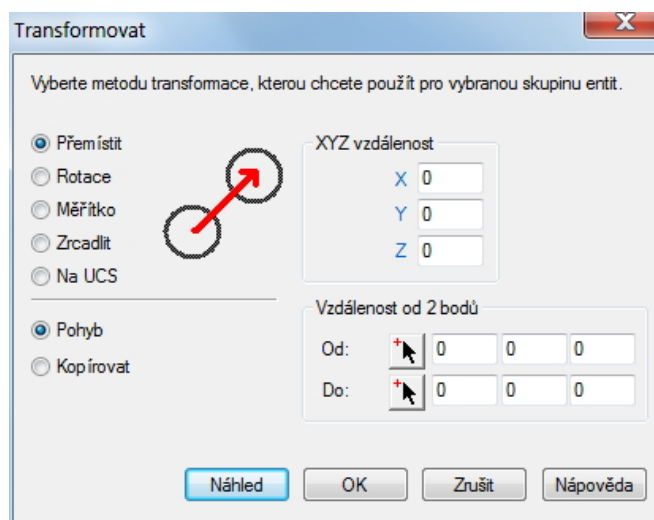
Software FeatureCAM umožňuje přímý import z nejpoužívanějších CAD systémů, jako jsou například CATIA, Inventor, SolidWorks, Rhinoceros či Creo. Při importu dosahuje výborných výsledků díky velice dobré kompatibilitě softwaru s podporovanými importovanými formáty a pouze výjimečně dochází po importu k nějakým problémům, jako je například rozpad ploch či deformace modelu. Pro případ, že by se přesto nějaké problémy s importem vyskytovaly, tak ještě firma Delcam nabízí další program a to Delcam Exchange, který slouží pro překlad libovolných CAD formátů. Je dostupný i ve verzi zdarma, která ale nepodporuje ukládání importovaných dat do jiného formátu. Delcam Exchange ve verzi zdarma tedy slouží jen jako prohlížeč CAD modelů.

Po vybrání funkce import, která se nachází v nabídce „Soubor“ byl zvolen model formy, který je uložen ve formátu dat STEP. Po úspěšném importu software automaticky nabízí průvodce pro zajištění umístění ustavení a velikosti polotovaru (viz. obr. 25), ve kterém je možné součást zarovnat k osám, vytvořit polotovaz a zadat nulový bod. Průvodce je velice praktický, a proto je velmi často využíván.



Obr. 25 Úspěšně importovaná součást a průvodce k zajištění ustavení a velikosti polotovaru.

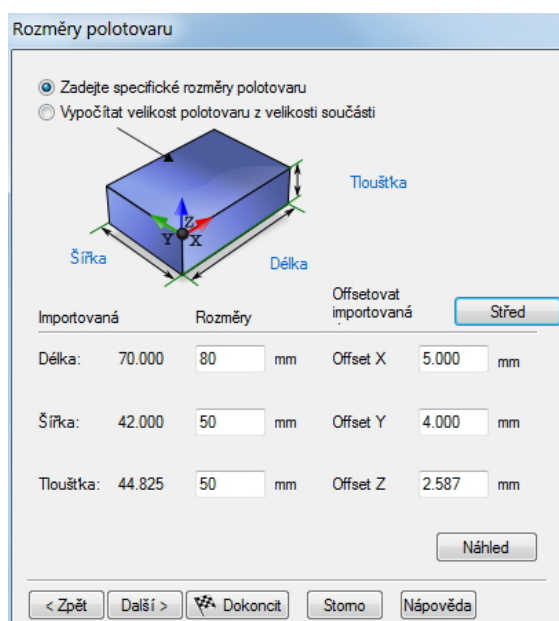
Po úspěšném importu modelu je třeba ho zkontrolovat, zda je úplný, načtený v pořádku a tedy bez jakýchkoli deformací. Pro kontrolu je využito zapnutí stínování modelu s následnou optickou kontrolou ze všech stran. Dále může být občas potřeba importovaný model nějak transformovat, například otočit, či posunout. Pro tyto účely slouží v softwaru nabídka transformovat (viz obr. 26). Mezi možností transformací patří přemístění, rotace, změna měřítka, zrcadlení a přesun na jiné ustavení.



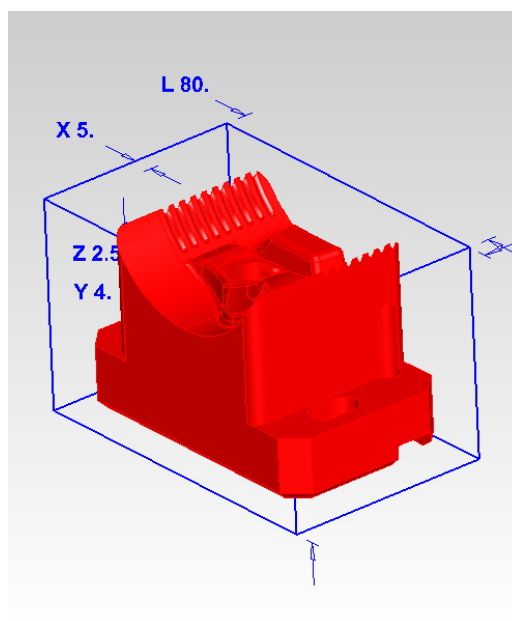
Obr. 26 Možnosti transformace.

2.4 Definice polotovaru a volba ustavení

Jako polotovar pro výrobu součásti je možné v programu zvolit obdélník, válec, n-úhelník, nebo je i možné použít jako polotovar buď ve FeatureCAMu vytvořený, nebo importovaný solid modelu. Pro součást kokily byl jako typ polotovaru zvolen obdélník. Rozměry polotovaru je možné zadat buď zadáním konkrétních specifických rozměrů, či je software může vypočítat automaticky na základě velikosti importované součásti (viz. obr. 27). Byla tedy zvolena možnost ručního zadání a jako hodnoty byly vyplněny rozměry polotovaru, které byly stanovené jako 80 x 50 x 50 dle ČSN 42 5522. Polotovar byl následně zarovnán do středu importované součásti (viz. obr. 28).



Obr. 27 Zadání rozměrů polotovaru.

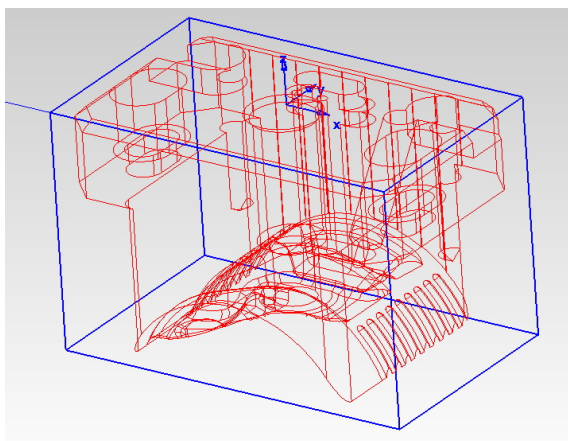


Obr. 28 Zadaný a vystředěný polotovar.

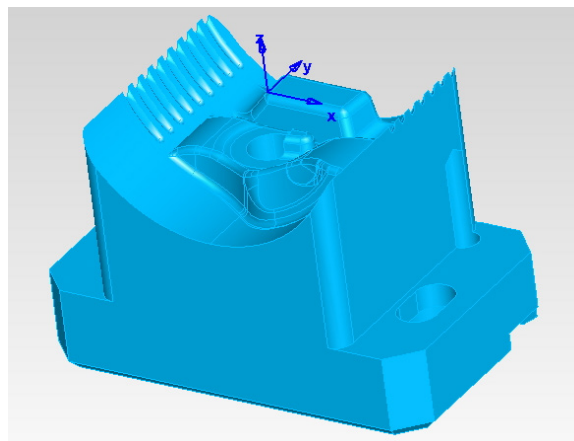
Ustavením se rozumí výběr pozice souřadného systému na polotovaru, od které budou vypočítávány dráhy nástroje. V průvodci byly tedy nejdříve vybrány osy souřadného systému, kdy jako první bylo nutné vybrat směr osy Z. K dispozici je hned několik možností definice směru osy Z, z nichž byl zvolen směr ustavení definovaný dvěma body a následně byla vybrána vhodná orientace jednotlivých os X a Y.

V dalším kroku se vybírá poloha prvního ustavení, která byla umístěna doprostřed spodní plochy polotovaru, na které se budou provádět vrtací a frézovací operace (viz. obr. 29). Nulový bod je tedy umístěn uprostřed obráběné plochy polotovaru. V dalším kroku bylo již jen zvoleno polohování 5. osy, kdy střed rotace byl nastaven na střed ohraničení polotovaru.

Jelikož součást se bude obrábět na dvě upnutí, tak bylo dále zadáno i druhé ustavení, které je definované pro horní tvarovou plochu součásti. Nové ustavení se provádí na panelu „Strom součásti“, kde se vybere již vytvořené ustavení, zvolí se jeho vlastnosti a v nich se již nachází možnost pro vytvoření nového ustavení. Souřadný systém byl zvolen doprostřed horní plochy polotovaru (viz. obr. 30).



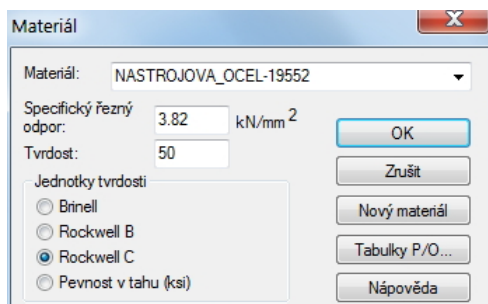
Obr. 29 Ustavení na spodní ploše součásti.



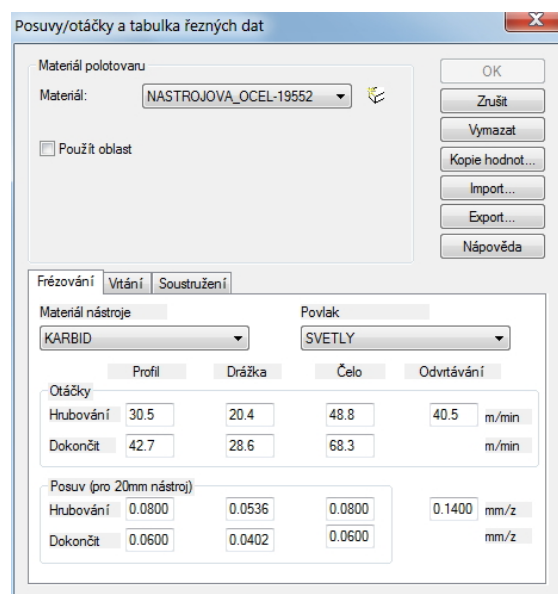
Obr. 30 Ustavení na horní ploše součásti.

Dále bylo potřeba vybrat použitý materiál polotovaru. To se provádí ve vlastnostech polotovaru, ve kterých se nachází možnost „Materiál“ (viz. obr. 31). Z dostupné rozsáhlé databáze materiálů byla vybrána nástrojová ocel ČSN 19552. V případě, že by materiál nebyl dostupný, pak se dá snadno nastavit nový materiál a přiřadit mu vhodné parametry posuvů, otáček a řezných dat (viz. obr. 32). Dle zadaného materiálu polotovaru se budou v programu následně automaticky počítat řezné podmínky pro jednotlivé operace.

Na CNC obráběcím stroji bude definován nulový bod pomocí dotyku dotykovou sondou. Pro dotyk bude použita 3D dotyková sonda HEIDENHAIN TS 640, která již byla představena v kapitole 1.5.2.



Obr. 31 Výběr materiálu polotovaru.

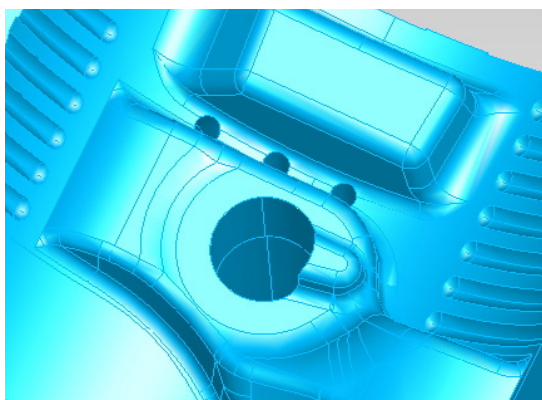


Obr. 32 Nastavení posuvů, otáček a řezných dat.

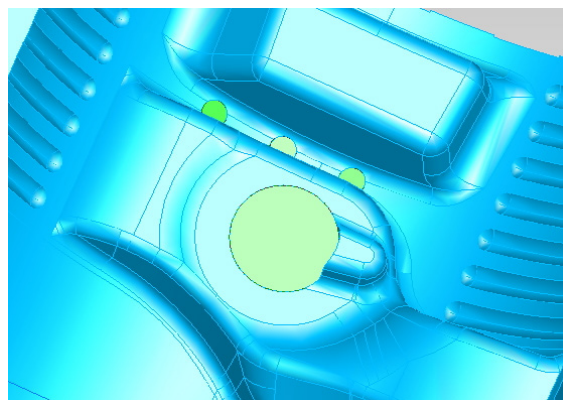
2.5 Pomocné úpravy

Posledními věcmi, kterým je třeba se věnovat před vytvářením samotných obráběcích operací, jsou přípravné práce, mezi které můžeme v případě této práce zařadit zalepení děr, které nechceme obrábět (viz. obr. 33,34) a tvorbu řídicích křivek pro definování hranic obráběných ploch.

Na horní tvarové ploše se nacházejí 4 díry, které bude potřeba zalepit. V případě, že bychom díry nechaly tak jak jsou, pak by nám nástroj při dokončovacím obrábění zbytečně do těchto děr zajížděl a snažil by se obrábět i jejich hrany. V menu geometrie byla tedy zvolena funkce „Vytvořit kružnici třemi body“ a následně byla zhotovena kružnice pro každou díru tak, aby vždy kopírovala hrany díry. V dalším kroku již byly vytvořeny zalepovací plochy pomocí funkce „Uzavřít plochu z křivek“. Byly vybrány a zvoleny jednotlivé křivky (kružnice) a z těch byly vytvořeny výsledné zalepovací plochy.

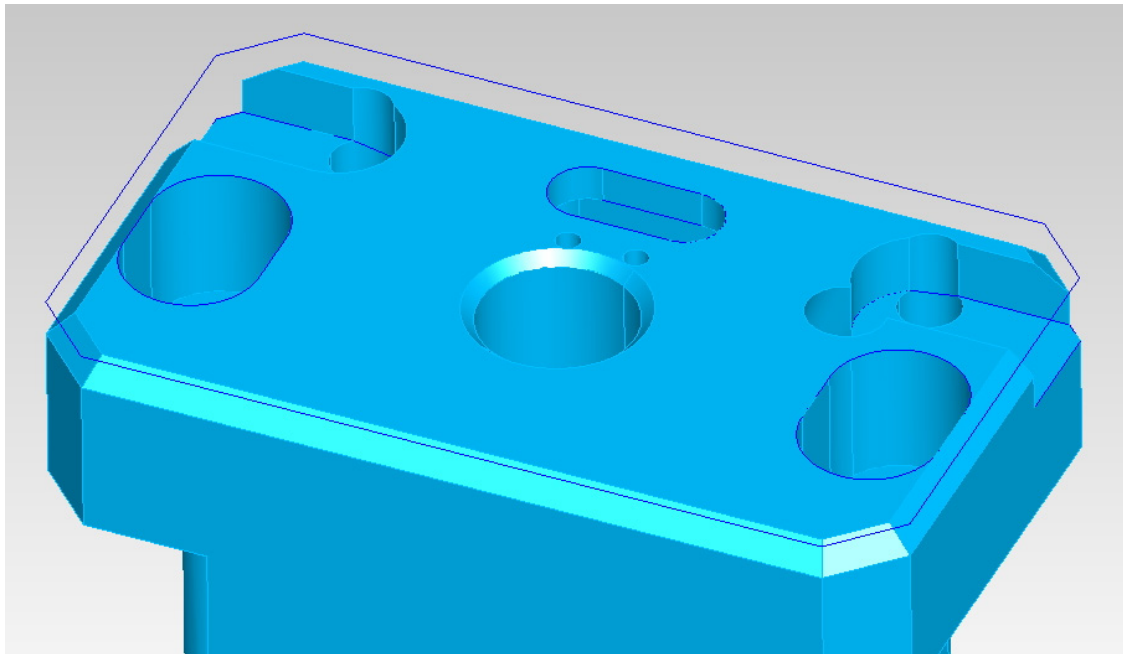


Obr. 33 Díry před zalepením plochami.



Obr. 34 Díry po zalepení plochami.

Dále byly ještě vytvořeny křivky, které budou později usnadňovat definování jednotlivých technologických prvků. Konkrétně se jedná o křivky pro operace sražení hran a pro drážky na spodní straně součásti (viz. obr 35).



Obr. 35 Křivky pro definování technologických prvků.

3 VOLBA STRATEGIÍ OBRÁBĚNÍ A TVORBA PARTPROGRAMU

V CAM systému je vytvářen partprogram, což je výsledek veškerých v něm prováděných činností. Je tvořen geometrickými a technologickými daty, která jsou v CAM systému postupně zadávána. Partprogram je pomocí procesoru ukládán ve formě CL dat, která se dále zpracovávají pomocí postprocesoru na výsledný NC kód [23].

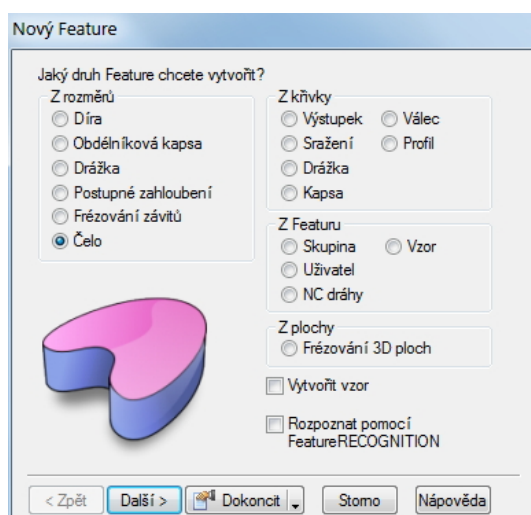
Tato kapitola bude věnována zadávání technologických dat, mezi které patří především určení strategií obrábění, jejich parametrů a volba obráběcích nástrojů a jejich řezných podmínek. Součást bude vyráběna na 2 upnutí.

3.1 Obrábění v rovině ustavení 1

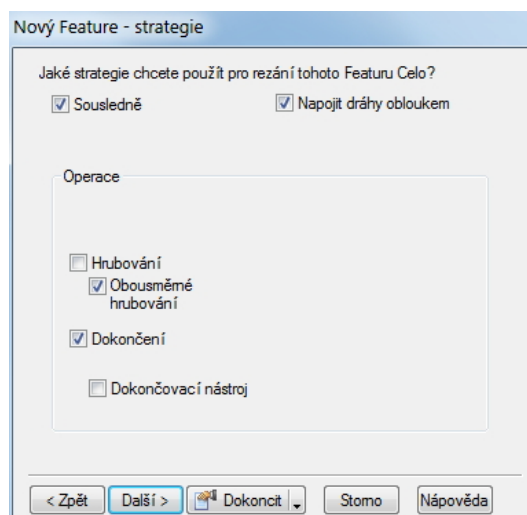
Na spodní straně součásti, tj. na rovině ustavení 1, se nachází díry pro vtoky, pro sestavení, pro vyhazovače a díra pro vložení jádra. Mezi zde prováděné operace bude patřit frézování čela, srážení obvodové hrany, frézování drážek a vrtání hlubokých děr, kdy jedna z nich je skloněná pod úhlem 20 stupňů.

3.1.1 Frézování čelní plochy

V první operaci se bude frézovat čelní plocha polotovaru. Jako featurea bylo tedy vybráno čelo (viz. obr. 36) a v dalším kroku bylo zadáno umístění a tloušťka plochy čela, která je 2,587 mm. V parametrech bylo dále nastaveno napojení drah obloukem pro plynulejší pohyb nástroje a bylo zvoleno sousledné frézování (viz. obr. 37).



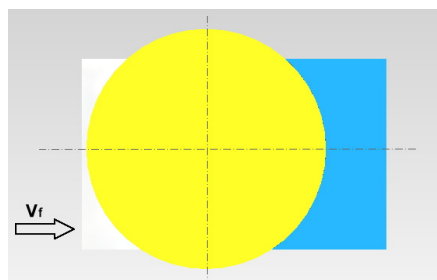
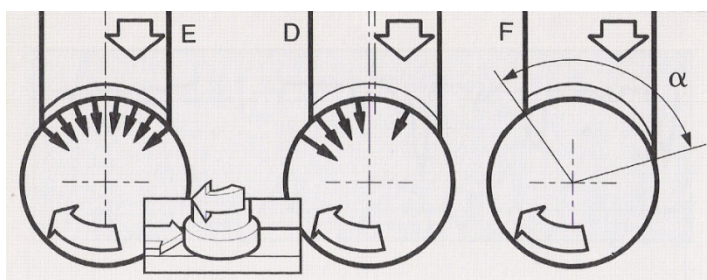
Obr. 36 Výběr technologie obrábění čela.



Obr. 37 Nastavení strategie frézování čela.

Volba průměru nástroje závisí především na velikosti obráběné plochy. Při rovinném frézování čelní frézou by průměr frézy měl být o 20% až 50% větší, než jaká je frézovaná šířka obrobku [1]. Vzhledem k šířce obráběné plochy, která je 50 mm, byla zvolena čelní fréza o průměru 63 mm.

Dále bylo potřeba řešit dráhu, po které se bude nástroj pohybovat při frézování čela. V případě, že by nástroj procházel středem polotovaru, vznikaly by kolísavé radiální složky řezné síly, které by způsobovaly vibrace, a mohlo by tedy docházet ke chvění nástroje, což může vést až k předčasnému zničení VBD. Abychom vzniklému chvění nástroje předcházeli, tak je nutné nastavit jeho dráhu tak, aby byl nástroj v excentrické poloze (viz. obr. 38 a 39). To znamená, že nástroj bude posunutý o určitou vzdálenost od středu polotovaru a bude tedy zabírat bokem. Excentrická poloha frézy má za následek konstantnější směr působení řezné síly [1].



Obr. 38 Rovinné frézování výstřednou polohou frézy [1].

Obr. 39 Frézování čela polotovaru.

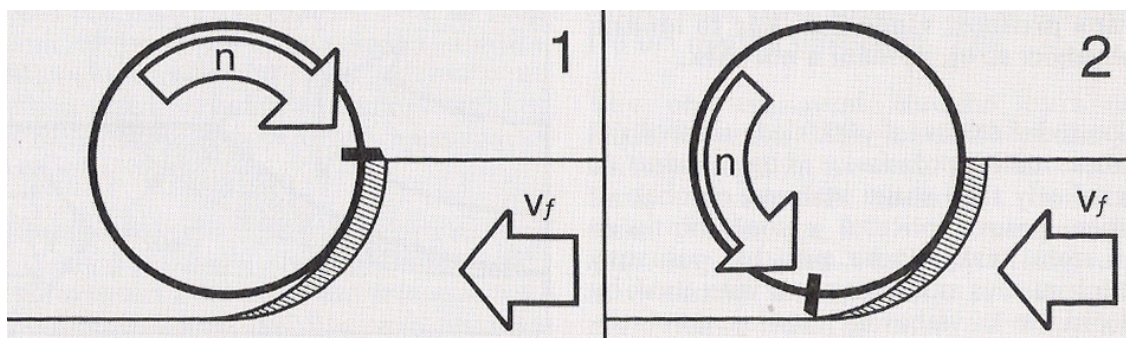
3.1.1.1 Sousledné a nesousledné frézování

Při sousledném frézování je směr pohybu obrobku stejný jako směr otáčení frézy. Největší tloušťka třísky je na začátku záběru a směrem ke konci postupně klesá až na nulovou hodnotu, břit tedy přichází do záběru náhle. Obrobek je řeznou silou přitlačován k ploše upínače. Sousledné frézování (viz. obr. 40) se uplatňuje při HSC obrábění, proto bude v případě výroby kokily také využito [1].

Výhody sousledného frézování:

- vyšší trvanlivost nástrojů,
- nižší potřebný řezný výkon,
- využití vyšších řezných rychlostí a posuvů,
- jednodušší upínání (síla řezání přitlačuje obrobek ke stolu),
- menší sklon ke vzniku kmitů,
- vyšší jakost obrobené plochy.

Při nesousledném frézování (viz. obr. 40) je směr pohybu obrobku opačný, než jaký je směr otáčení frézy, obrobená plocha tedy vzniká při vnikání nástroje do obrobku. Tloušťka třísky je na začátku řezu nulová a postupně se zvětšuje až na své maximum, které je na konci záběru. Frézování je tedy klidnější a plynulejší. Vzniká zde ale nepříznivý účinek tangenciální složky řezné síly, která působí směrem nad pracovní stůl frézky a má tedy snahu vytrhnout obrobek z upínače, což vyžaduje velice stabilní upnutí [1].



Obr. 40 Sousedné frézování (1) a nesousedné frézování (2) [1].

3.1.1.2 Frézování pomocí kruhových VBD

Kruhové břitové destičky jsou vhodné pro HSC obrábění tvrdých materiálů, mají vysokou pevnost břitů, velký počet řezných hran, zaručují maximální stabilitu břitu a dosahují plynulého záběru břitu. Úhel nastavení hlavního ostří je u kruhových břitových destiček proměnlivý, přičemž se mění s poměrem hloubky řezu k průměru VBD a dosahuje hodnoty až 45° při hloubce řezu odpovídající polovině průměru destičky. Třísky u rovinného čelního frézování mají kapkovitý tvar s nekonstantní tloušťkou. Pro obrábění se doporučuje využívat sousledné obrábění a frézy s malou roztečí zubů [1].

3.1.1.3 Volba nástroje a řezných podmínek

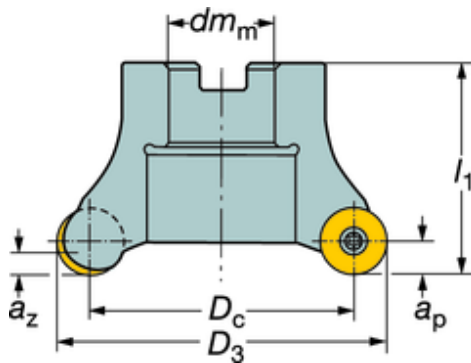
Jako nástroj pro obrábění čelní plochy byla zvolena fréza od firmy Sandvik Coromant s označením CoroMill 200 a s průměrem 63 mm (viz. obr. 41 a 42). Jedná se o robustní a vysoce spolehlivou frézu s kruhovými VBD. Kruhové břitové destičky mají nejvyšší pevnost břitů, velký počet řezných hran a plynulý záběr břitu. Fréza má velkou rozteč zubů, která je navíc nerovnoměrná, což přispívá ke snížení vibrací. Parametry frézy a břitových destiček jsou uvedeny viz. tab. 3.1 a 3.2. Proces frézování bude probíhat bez chlazení. Doporučená hodnota řezné rychlosti od výrobce je 140 až $190 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a doporučená hodnota posuvu na zub je $0,2$ až $0,49 \text{ mm}$. Zadání nástroje a jeho řezných podmínek v programu FeatureCAM je znázorněno na obr. 43 a 44.

Tab. 3.1 Čelní fréza CoroMill 200.

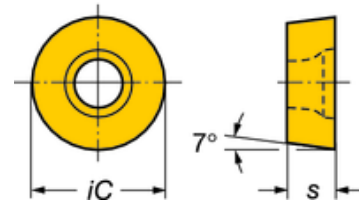
Objednací kód	$\varnothing D_3$ [mm]	$\varnothing D_c$ [mm]	l_1 [mm]	Počet zubů
R200-051Q22-12L	63	51	50	3

Tab. 3.2 Břitová destička pro CoroMill 200.

Objednací kód	Materiál	iC [mm]	s [mm]
RCKT 12 04 M0-PH	Slinutý karbid	12	4,76



Obr. 41 Čelní fréza CoroMill 200 [17].

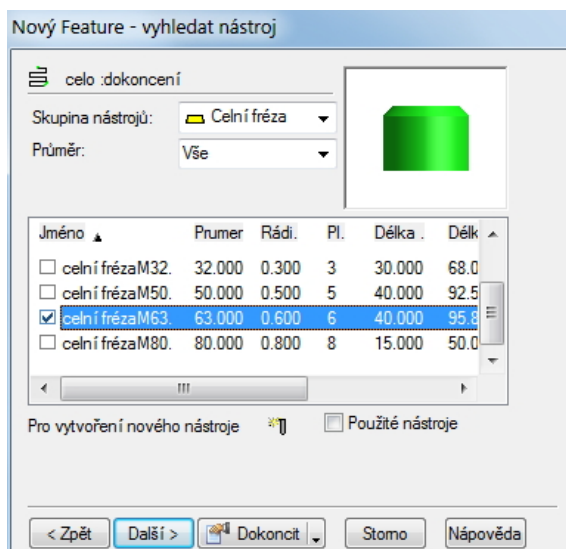


Obr. 42 Břítová destička pro CoroMill 200 [17].

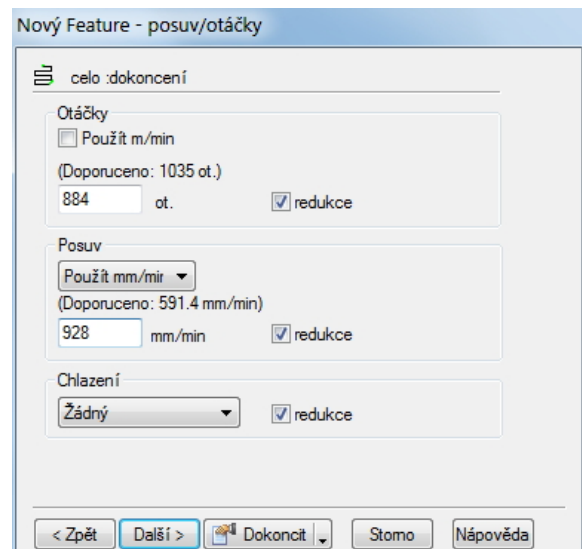
Výpočet řezných podmínek pro válcovou čelní frézu Ø63 mm:

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{175 \cdot 1000}{\pi \cdot 63} = 884 \text{ min}^{-1} \quad (1)$$

$$v_f = n \cdot z \cdot f_z = 884 \cdot 3 \cdot 0,35 = 928 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} \quad (2)$$



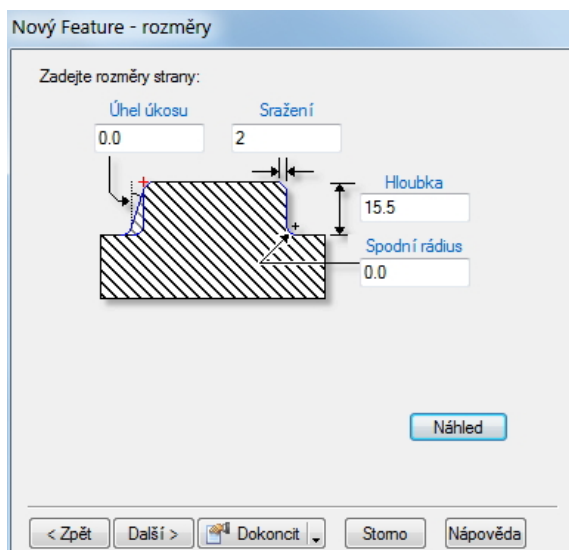
Obr. 43 Výběr obráběcího nástroje.



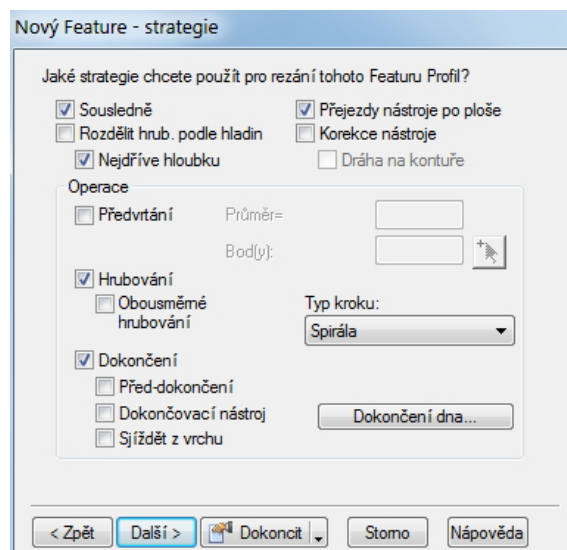
Obr. 44 Zadání řezných podmínek.

3.1.2 Frézování obvodu, sražení hran, volba nástrojů a řezných podmínek

V této operaci bude obráběn obvodový profil součásti a bude prováděno sražení obvodové hrany s rozměrem 2x45°. Jako featurea byl zvolen profil a následně pro definování tohoto prvku byla vybrána již dříve vytvořená křivka, která kopíruje obráběný obvod součásti po horní hraně. Dále bylo třeba zadat hloubku prvku a sražení hran, které je 2x45° (viz. obr. 45). Boční plocha bude nejdříve hrubována s přídavkem 1,25 mm a poté bude dokončována, nastavení strategie viz. obr. 46.

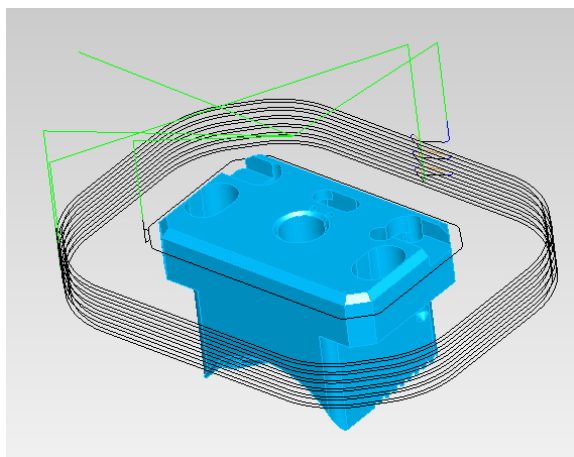


Obr. 45 Zadání rozměrů profilu.

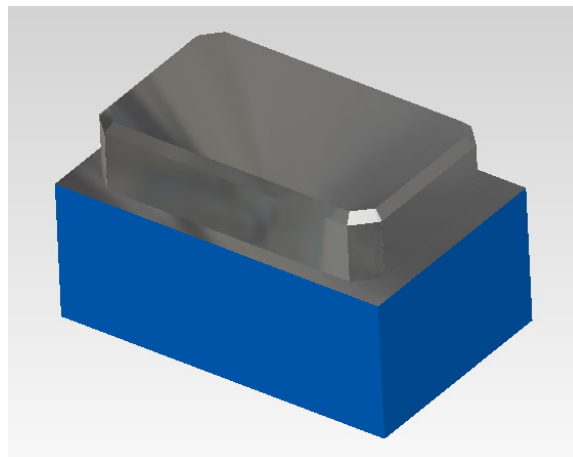


Obr. 46 Nastavení strategie.

Nástroj bude do materiálu najíždět z boku polotovaru obloukem (viz. obr. 47). Vzhledem k velikosti břitové destičky a k tvrdosti obráběného materiálu se budou boky polotovaru frézovat na šest průchodů nástroje s nastaveným krokem nástroje dolů 3 mm. Hrana bude srážena pomocí dvou průchodů speciální frézy pro srážení hran. Výsledek operace je vidět na obr. 48.



Obr. 47 Dráhy nástroje u obrábění profilu a hrany.

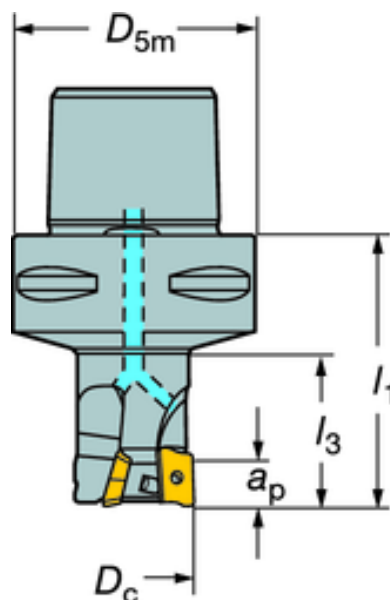


Obr. 48 Výsledek 3D simulace.

Pro frézování obvodu je použita válcová rohová fréza s VBD CoroMill 390 od firmy Sandvik Coromant a s průměrem 50 mm (viz. obr. 49). Jedná se o frézu do rohu vhodnou pro frézování tvrdých materiálů. Maximální velikost hloubky řezu a_p je 10 mm, další parametry viz. tab. 3.3. Obrábění bude probíhat na sucho. Doporučená hodnota řezné rychlosti od výrobce je 235 až 250 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ a doporučená hodnota posuvu na zub je 0,08 až 0,2 mm. Označení břitové destičky je R390-11 T3 02E-PM.

Tab. 3.3 Čelní fréza CoroMill 390.

Objednací kód	Ø D _c [mm]	l ₁ [mm]	l ₃ [mm]	Počet zubů
R390-050C5-11M060	50	60	60	5



Obr. 49 Čelní fréza CoroMill 390 [17].

Výpočet řezných podmínek pro válcovou frézu Ø50 mm:

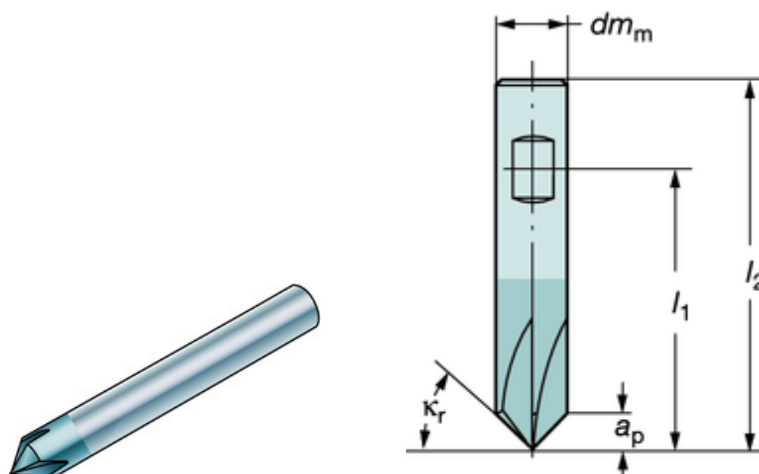
$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{245 \cdot 1000}{\pi \cdot 50} = 1559 \text{ min}^{-1} \quad (3)$$

$$v_f = n \cdot z \cdot f_z = 1559 \cdot 5 \cdot 0,12 = 935 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} \quad (4)$$

Pro sražení hrany byla vybrána monolitní tvrdokovová fréza CoroMill® Plura (viz. obr. 50), která je určená pro srážení hran a je vhodná pro tvrdé materiály. Úhel nastavení hlavního ostří je 45° a maximální velikost sražené hrany je 4,25 mm, další parametry viz. tab. 3.4. Proces frézování bude probíhat bez chlazení. Doporučená hodnota řezné rychlosti od výrobce je 115 až 125 m.min⁻¹ a doporučená hodnota posuvu na zub je 0,05 až 0,2 mm.

Tab. 3.4 Fréza pro srážení hran CoroMill® Plura.

Objednací kód	Ø dm _m [mm]	l ₂ [mm]	l ₃ [mm]
R215.84-01500-AC43G	10	60	100



Obr. 50 Fréza pro srážení hran CoroMill® Plura [17].

Výpočet řezných podmínek pro frézu CoroMill® Plura:

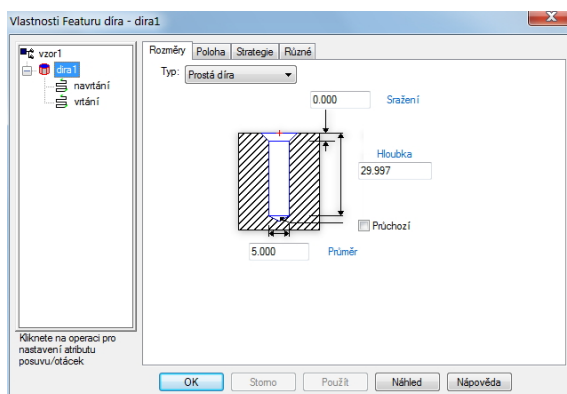
$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{120 \cdot 1000}{\pi \cdot 10} = 3819 \text{ min}^{-1} \quad (5)$$

$$v_f = n \cdot z \cdot f_z = 3819 \cdot 4 \cdot 0,125 = 1909 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} \quad (6)$$

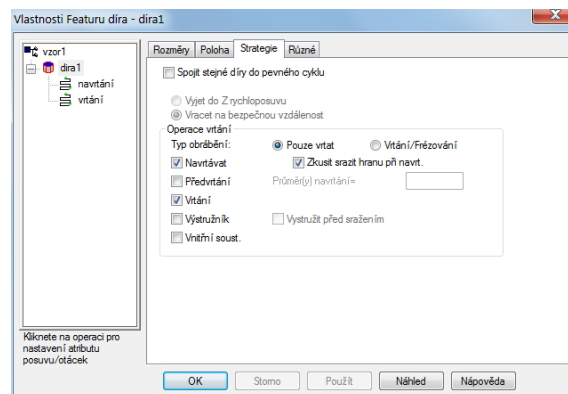
3.1.3 Vrtání děr o průměrech 5 mm a 2 mm

Nejdříve budou vrtány dvě díry s průměrem 5 mm a s délkou 30 mm a následně dvě díry s průměrem 2 mm a s délkou 32 mm. Jelikož délka vrtání u obou děr je větší než 5D, tak se bude jednat o hluboké vrtání. Díry budou vrtány s přerušením, což znamená, že vrták mezi jednotlivými záběry vyjíždí z materiálu o stanovenou hodnotu. Vyjíždění je důležité pro odvod třísek ze záběru, tedy z prostoru mezi vrtákem a obrobkem. Vrtání bude do plného materiálu a vzhledem k vysokému výkonu obráběcího stroje bude probíhat v jedné operaci. Na tyto díry o průměru 5 a 2 mm nejsou z hlediska přesnosti kladeny žádné nároky.

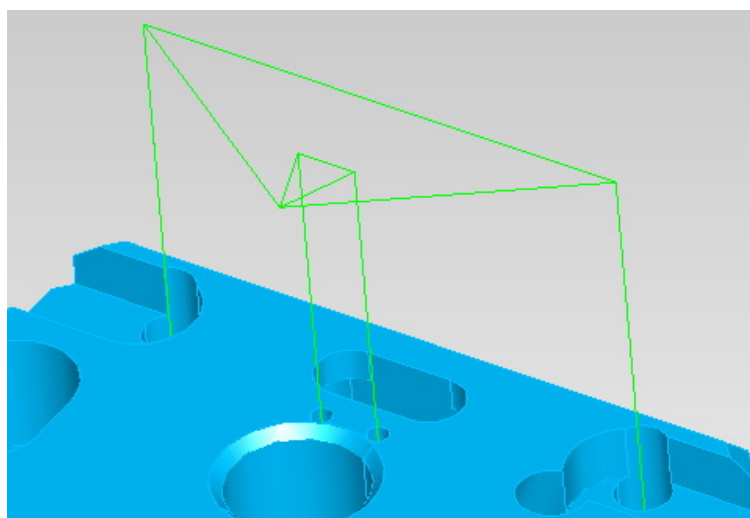
Ve FeatureCAMu se díry tvoří snadno. Ve výběru nové operace se jako featura zvolí „Díra“ a zaškrtně se položka rozpoznat pomocí FeatureRECOGNITION, díky čemuž systém v následujícím kroku díry na solidu automaticky rozpozná a následně jen stačí vybrat ty díry, které se v tomto kroku budou obrábět. Poté se již klikne na tlačítko „Dokončit“ a program následně automaticky vypočítá základní parametry, jako je hloubka děr a nabídne dialog pro další důkladné nastavení parametrů vrtání (viz. obr. 51). Jako typ díry ve vlastnostech operace se nastaví „Prostá díra“, dále se jako vrtací cyklus vybere „Hluboká díra (G83)“ a poté se v nastavení parametrů strategie vrtání (viz. obr. 52) aktivuje operace navrtávání. Výsledné dráhy nástroje po dokončení simulace se zobrazením středové čáry jsou vidět na obr. 53.



Obr. 51 Zadání rozměrů díry.



Obr. 52 Parametry strategie vrtání.



Obr. 53 Dráhy nástroje pro vrtáky Ø5 mm a Ø2 mm

3.1.3.1 Vrtání hlubokých děr

U vrtání hlubokých děr je relativně velký poměr vrtané délky a průměru nástroje. Jedná se o díry, které mají délku vrtání v rozsahu od 5D a více. Charakteristickým znakem vrtání hlubokých děr je velký objem odřezávaného materiálu a relativně vysoké požadavky na přesnost, rozměrovou stálost a jakost obrobené plochy. Jsou tedy kladeny velké nároky na nástroje a na obráběcí stroj. Velmi důležité je i dostatečné chlazení, mazání a odvádění třísek z vrtané díry, k čemuž se používá procesní kapalina, která je přiváděna buď vnitřkem nástroje, nebo kolem vrtáku. Při použití vnitřního přívodu kapaliny se používá vrták, u kterého jsou třísky odváděny drážkou ve tvaru V, která se nachází na vnější straně vrtáku [1].

Vzhledem k asymetrii nástroje, velkému poměru délky vrtání k průměru vrtáku a s ohledem na požadovanou přesnost musí být vrták při obrábění dobře veden, k čemuž se často používají vodící díry, nebo vodící a opěrné lišty. Ty především zachytávají řezné síly a opírají vrták proti obráběné stěně díry [1].

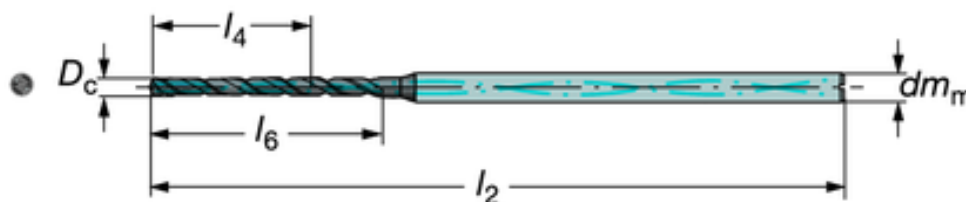
3.1.3.2 Volba nástrojů a řezných podmínek

Jako nástroje pro vrtání byly zvoleny monolitní karbidové vrtáky CoroDrill® 862 s průměrem 2 mm a CoroDrill® Delta-C R840 s průměrem 5 mm od firmy Sandvik Coromant (viz. obr. 54 a 55). Oba vrtáky mají vnitřní přívod řezné kapaliny, díky čemuž je kapalina přiváděna přímo do místa řezu, což umožňuje použití vyšších řezných rychlostí a zároveň je zabezpečeno průběžné odstraňování vytvářených třísek. Řezná kapalina je do nástroje přiváděna ve velkém množství při tlaku 6 barů.

CoroDrill® 862 je monolitní karbidový vrták určený pro hluboké vrtání malých průměrů do 3 mm. Má speciálně vyvinutou geometrii špičky, která pomáhá snížit velikost tlakových sil a disponuje vysoce stabilními břity. Parametry vrtáku jsou uvedeny viz. tab. 3.5. Proces vrtání bude probíhat s chlazením olejovou mlhou přiváděnou vnitřkem nástroje. Doporučená hodnota řezné rychlosti od výrobce je 32 až 60 m.min⁻¹ a doporučená hodnota posuvu na otáčku je 0,06 až 0,08 mm.

Tab. 3.5 Vrták CoroDrill® 862.

Objednací kód	Ø D _c [mm]	Ø d _m [mm]	l ₂ [mm]	l ₄ [mm]	l ₆ [mm]
862.1-0200-024A1-GM	2	3	72	24	32



Obr. 54 Vrták CoroDrill® 862 [17].

Výpočet řezných podmínek pro vrták Ø2 mm:

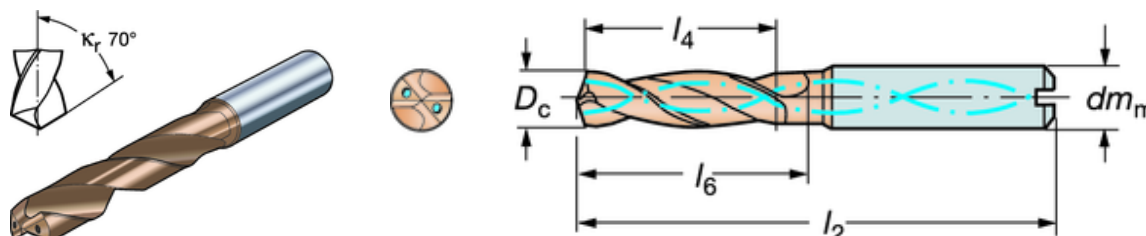
$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{45 \cdot 1000}{\pi \cdot 2} = 6366 \text{ min}^{-1} \quad (7)$$

$$v_f = n \cdot z \cdot f_z = 6366 \cdot 2 \cdot 0,06 = 764 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} \quad (8)$$

CoroDrill® Delta-C R840 je vysoce produktivní monolitní karbidový vrták, který je určený i pro vrtání hlubokých děr s průměry od 5 do 16,3 mm. Je přeostritelný, je vhodný pro vrtání tvrdých materiálů, má úhel nastavení hlavního ostří 70° a maximální hloubka jím vrtané díry je až 7 x D_c. Proces vrtání bude probíhat s chlazením olejovou mlhou přiváděnou vnitřkem nástroje. Další parametry vrtáku jsou uvedeny viz. tab. 3.6. Doporučená hodnota řezné rychlosti od výrobce je 30 až 50 m.min⁻¹ a doporučená hodnota posuvu na otáčku je 0,06 až 0,1 mm.

Tab. 3.6 Vrták CoroDrill® Delta-C R840.

Objednací kód	Ø Dc [mm]	Ø dm _m [mm]	l ₂ [mm]	l ₄ [mm]	l ₆ [mm]
R840-0500-70-A1A	5	6	93	42	50



Obr. 55 Vrták CoroDrill® Delta-C R840 [17].

Výpočet řezných podmínek pro vrták Ø5 mm:

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{40 \cdot 1000}{\pi \cdot 5} = 2546 \text{ min}^{-1} \quad (9)$$

$$v_f = n \cdot z \cdot f_z = 2546 \cdot 2 \cdot 0,08 = 407 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} \quad (10)$$

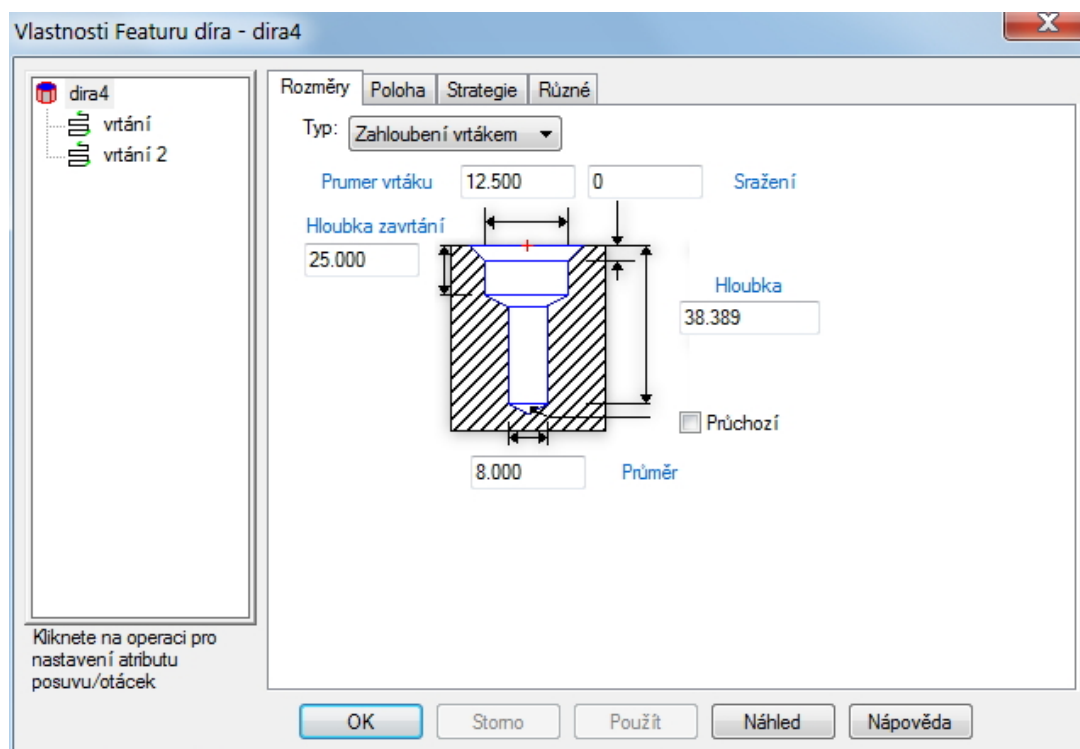
3.1.4 Vrtání stupňovité díry se zahluobením, volba nástrojů a řezných podmínek

V této operaci se bude vrtat střední stupňovitá díra se zahluobením pomocí vrtáku. Vzhledem ke zvolenému obráběcímu stroji, jeho výkonu a přesnosti bude nejdříve vrtána díra o průměru 12,5 mm do hloubky 25 mm a následně bude vrtána díra o průměru 8 mm do hloubky 13,389 mm. Jelikož díra průměru 8 mm má toleranci H8, tak bude použit vrták CoroDrill® Delta-C R840, který umožňuje vrtání děr i s velmi úzkou tolerancí průměru.

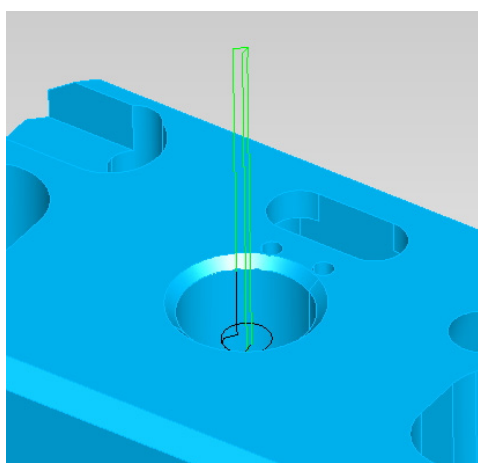
V případě, že by nebyl k dispozici dostatečně výkonný a přesný obráběcí stroj, pak by se při vrtání hlubokých děr obecně postupovalo takto: Nejdříve by se vyvrtala vodící díra krátkým vrtákem se stejným průměrem jako je průměr díry do hloubky cca 15% z celkové hloubky díry. Následně by se použil dlouhý vrták, který by se při nízkých otáčkách (cca 200 ot/min) navedl do předvrtané díry, kde by se roztočil na řezné otáčky a vyvrtal by konečnou díru do požadované hloubky. Pokud by se nejprve nevyvrtala vodící díra, pak by hrozilo ohnutí, nebo i zlomení vrtáku.

V softwaru FeatureCAM byla tedy vytvořena nová operace pro vrtání díry, kdy pro její rozpoznání byla využita funkce AFR. Jako typ díry ve vlastnostech operace bylo nastaveno „Zahluobením vrtákem“, byl vybrán vrtací cyklus „Hluboká díra (G83)“ a v nastavení strategie byla vybrána možnost „Nejdříve vrtat zahluobením vrtákem“. Nastavení rozměrů díry je vidět na obr. 56 a výsledné dráhy se zobrazením středové čáry nástroje na obr. 57.

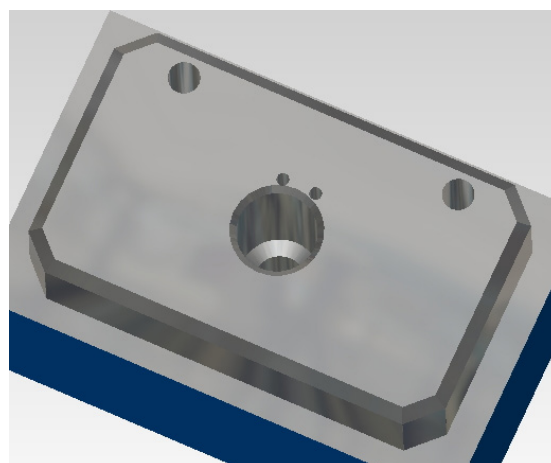
Nakonec bude sražena obvodová hrana díry pomocí monolitní tvrdokovové frézy CoroMill® Plura. Byla tedy vytvořena nová featura, konkrétně sražení, které bylo zadáno pomocí předem vytvořené křivky, která kopíruje imaginární hranu přechodu mezi dírou a plochou součásti. Šířka a hloubka sražení byly nastaveny na 1 mm a byl vybrán sousledný způsob frézování. Na obr. 58 je vidět výsledek operace po dokončení simulace obrábění.



Obr. 56 Nastavení rozměrů ve vlastnostech díry.



Obr. 57 Dráhy nástroje při vrtání.



Obr. 58 Výsledek po obrobení.

Pro sražení obvodové hrany byla použita monolitní tvrdokovová fréza CoroMill® Plura od firmy Sandvik Coromant, která již byla použita pro sražení obvodové hrany spodní plochy součásti a je popsána a uvedena v kapitole 3.1.2.1.

Pro vrtání děr s průměrem 8 a 12,5 mm byl zvolen vrták CoroDrill® Delta-C R840, který již byl představen v minulé kapitole. Jedná se o vrták určený pro přesné vrtání, který umožňuje pracovat v užších tolerancích průměru díry. Proces vrtání bude probíhat s chlazením olejovou mlhou přiváděnou vnitřkem nástroje při tlaku 6 barů.

Parametry vrtáku pro díru o průměru 8 mm jsou uvedeny viz. tab. 3.7. Doporučená hodnota řezné rychlosti od výrobce je 30 až 50 m.min⁻¹ a doporučená hodnota posuvu na otáčku je 0,1 až 0,12 mm.

Tab. 3.7 Vrták CoroDrill® Delta-C R840.

Objednací kód	Ø Dc [mm]	Ø dm [mm]	l ₂ [mm]	l ₄ [mm]	l ₆ [mm]
R840-0800-30-A0A	8	8	79	28	41

Výpočet řezných podmínek pro vrták Ø8 mm:

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{40 \cdot 1000}{\pi \cdot 8} = 1591 \text{ min}^{-1} \quad (11)$$

$$v_f = n \cdot z \cdot f_z = 1591 \cdot 2 \cdot 0,12 = 382 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} \quad (12)$$

Parametry vrtáku pro díru průměru 12,5 mm jsou uvedeny viz. tab. 3.8. Doporučená hodnota řezné rychlosti od výrobce je 30 až 50 m.min⁻¹ a doporučená hodnota posuvu na otáčku je 0,1 až 0,15 mm.

Tab. 3.8 Vrták CoroDrill® Delta-C R840.

Objednací kód	Ø Dc [mm]	Ø dm [mm]	l ₂ [mm]	l ₄ [mm]	l ₆ [mm]
R840-1250-30-A1A	12,5	14	107	38	60

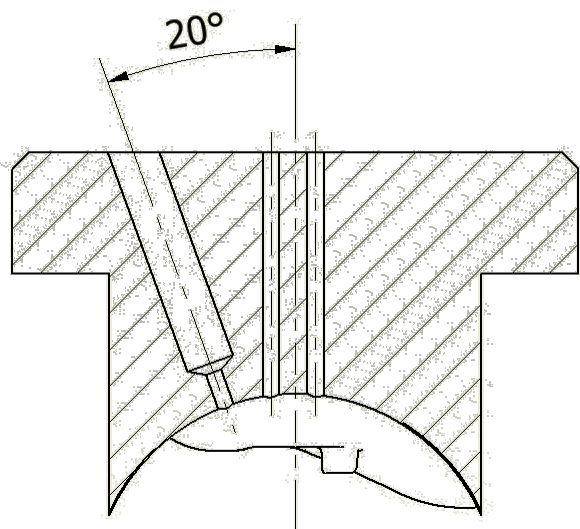
Výpočet řezných podmínek pro vrták Ø12,5 mm:

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{40 \cdot 1000}{\pi \cdot 12,5} = 1019 \text{ min}^{-1} \quad (13)$$

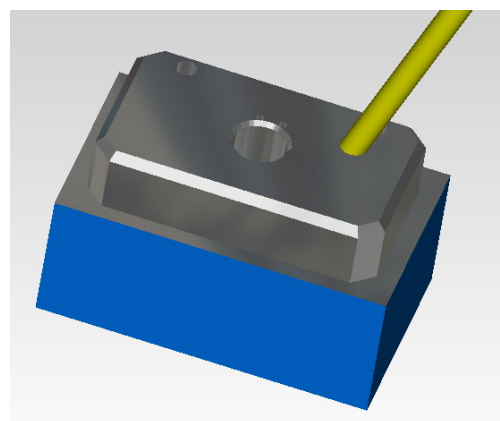
$$v_f = n \cdot z \cdot f_z = 1019 \cdot 2 \cdot 0,12 = 245 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} \quad (14)$$

3.1.5 Vrtání díry skloněné pod úhlem 20°

V této operaci se bude vrtat díra se zahloubením, která je skloněná pod úhlem 20° (viz. obr. 59 a 60). Vzhledem ke skloněnému povrchu na vstupu do díry se nejprve provede navrtání a následně se bude vrtat nejdříve díra o průměru 6 mm do hloubky 28,838 mm a poté díra o průměru 2 mm do konečné hloubky 34,729 mm. Před samotným vrtáním je ještě možné na vstupu do díry vyfrézovat plošku, které bude kolmá k ose díry.



Obr. 59 Pohled na díru v řezu.

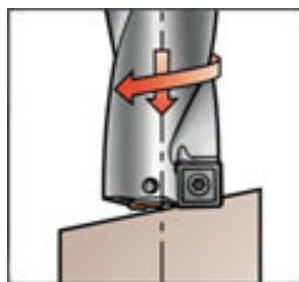


Obr. 60 Ukázka při 3D simulaci.

Ve FeatureCAMu byla tedy vytvořena nová operace vrtání díry, kdy pro její rozpoznání byla opět využita funkce AFR. Tentokrát ale nebyla díra rozpoznávána kolem osy Z ustavení, ale byla vybrána možnost rozpoznání kolem specifického vektoru, kdy směr osy Z byl vybrán zadáním dvou bodů, které leží v ose vykloněné díry. Jako typ díry ve vlastnostech operace bylo nastaveno „Zahloubení vrtákem“, byl vybrán vrtací cyklus „Hluboká díra (G83)“, dále v možnostech strategie bylo aktivováno „Navrtání díry“ a byla vybrána možnost „Nejdříve vrtat zahloubení vrtákem“. Pro vykloněnou díru nejsou kladeny žádné nároky na přesnost rozměrů.

3.1.5.1 Skloněný povrch na vstupu do díry při vrtání

V případě, že vrtaná plocha je šikmá (viz. obr. 61), pak jsou břity nástroje vystaveny nestejněměrnému tlaku, což způsobuje snahu vrtáku o jeho vychýlení z osy. To je příčinou jeho rychlejšího opotřebení a možnosti vzniku vibrací. Pro snížení pravděpodobnosti vzniku vibrací se doporučuje snížit rychlost posuvu a pokud možno použít co nejkratší vrták. Dále se nedoporučuje použití vrtáků s VBD a s asymetrickou geometrií břitu, kdy předvrtaná díra může způsobovat vychýlení nástroje. Vhodné řešení je nejdříve provést navrtání díry, vyvrtání vodící díry, či vyfrézování malé plošky, která bude kolmá k ose díry. [1]



Obr. 61 Skloněný povrch vstupu do díry [1].

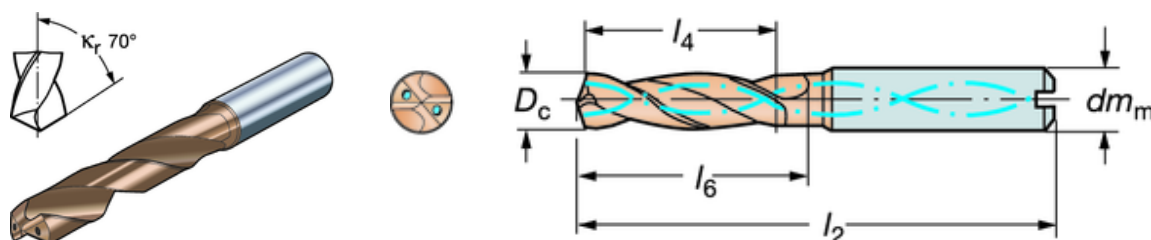
3.1.5.2 Volba nástrojů a řezných podmínek

Pro vrtání díry o průměru 2 mm byl zvolen monolitní karbidový vrták CoroDrill® 862 od firmy Sandvik Coromant. Ten již byl uveden, včetně určení řezných podmínek a byl použit pro vrtací operaci v kapitole 3.1.3.2.

Pro vrtání díry o průměru 6 mm byl zvolen vrták CoroDrill® Delta-C R840 (viz. obr. 62), který již byl také dříve představen. Základní parametry vrtáku jsou uvedeny viz. tab. 3.9. Proces vrtání bude probíhat s chlazením olejovou mlhou přiváděnou vnitřkem nástroje. Doporučená hodnota řezné rychlosti od výrobce je 30 až 50 m.min⁻¹ a doporučená hodnota posuvu na otáčku je 0,06 až 0,1 mm.

Tab. 3.9 Vrták CoroDrill® Delta-C R840.

Objednací kód	Ø Dc [mm]	Ø dm [mm]	l ₂ [mm]	l ₄ [mm]	l ₆ [mm]
R840-0600-50-A1A	6	6	82	35	44



Obr. 62 Vrták CoroDrill® Delta-C R840 [17].

Výpočet řezných podmínek pro vrták Ø6 mm:

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{40 \cdot 1000}{\pi \cdot 6} = 2122 \text{ min}^{-1} \quad (15)$$

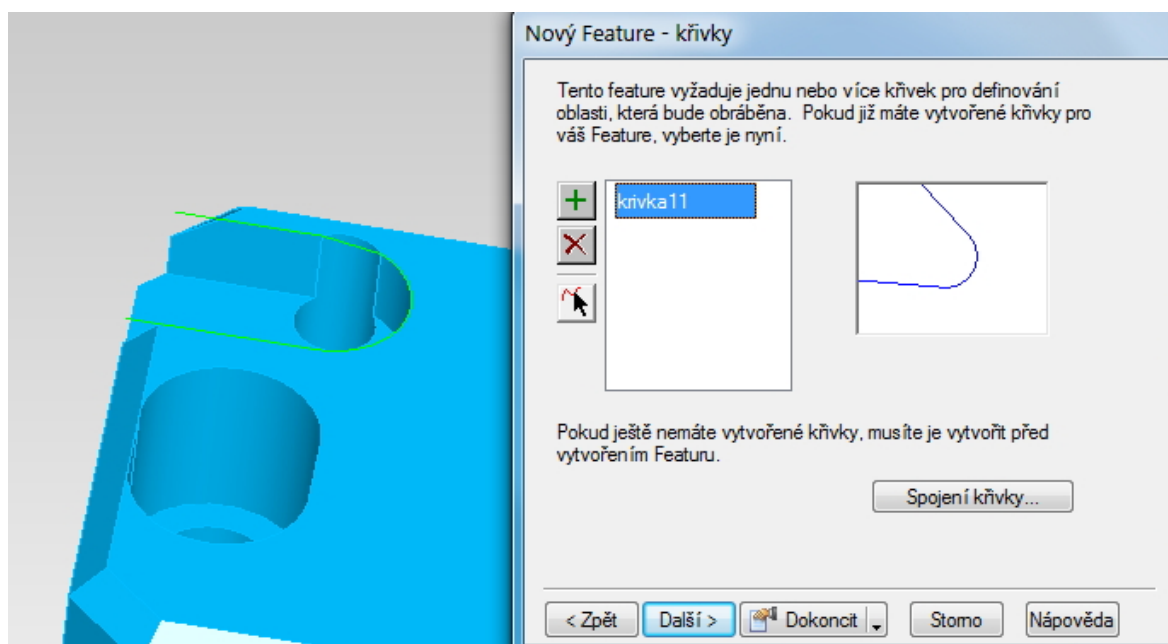
$$v_f = n \cdot z \cdot f_z = 2122 \cdot 2 \cdot 0,08 = 340 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} \quad (16)$$

3.1.6 Frézování drážek

Vzhledem k HSC obrábění a k dodržení přesností rozměrů drážek jsou použity frézy s průměry, které jsou menší, než jaké jsou šířky drážek, a to z důvodu co nejvyšší plynulosti drah. Drážky se budou obrábět ve dvou fázích. Nejdříve v první fázi bude provedeno hrubování drážek s použitím trochoidálních drah nástroje, jelikož při HSC frézování je důležité udržet vysoké a konstantní řezné rychlosti bez zpomalování či zastavování nástroje. A následně v druhé fázi bude provedeno dokončení obvodů drážek obvodovým frézováním s využitím sousledného způsobu frézování.

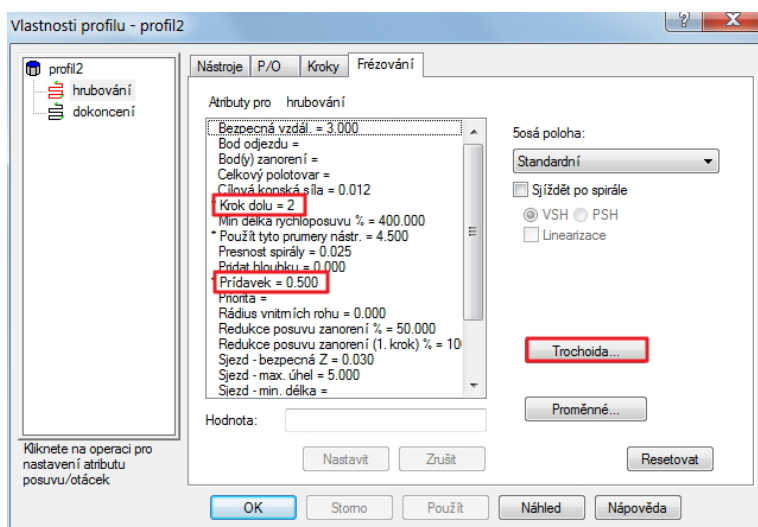
V případě obrábění dutiny nástrojem se stejným průměrem jako je šířka drážky, což je velmi často využívaná metoda, dochází ke krátkému zastavování nástroje při jeho lineárním pohybu, což je zcela nevhodné pro HSC obrábění. Proto je mnohem výhodnější využít nástroj s menším průměrem a pro jeho dráhy použít trochoidální pohyb, což zajistí plynulý pohyb nástroje.

Nejdříve byla zadána operace pro frézování otevřených drážek. Pro jejich zadání byla ve FeatureCAMu využita featura profil. Umístění drážek bylo provedeno výběrem předem vytvořených křivek kopírujících horní hrany drážek (viz. obr. 63).

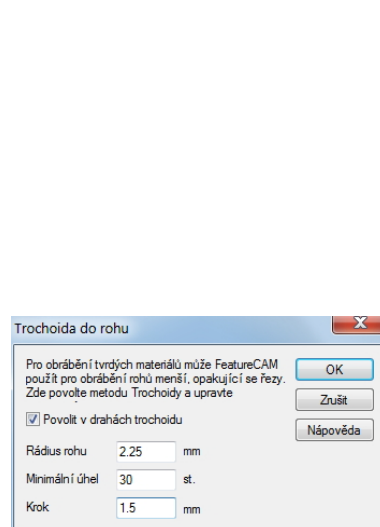


Obr. 63 Výběr křivky pro definování drážky.

V dalším kroku byl vybrán směr obrábění dovnitř křivky a dále hloubka prvku, která je 5 mm. Ve vlastnostech strategie byl dále nastaven sousledný způsob frézování a byly zadány operace pro hrubování a dokončování, které budou prováděny nástroji o průměru 5 mm. U hrubovací operace byl nastaven krok dolů na 2 mm, což znamená, že se drážka bude hrubovat ve třech hladinách a dále byl ještě nastaven přírůstek na dokončení stěny, který je 0,5 mm (viz. obr. 64).

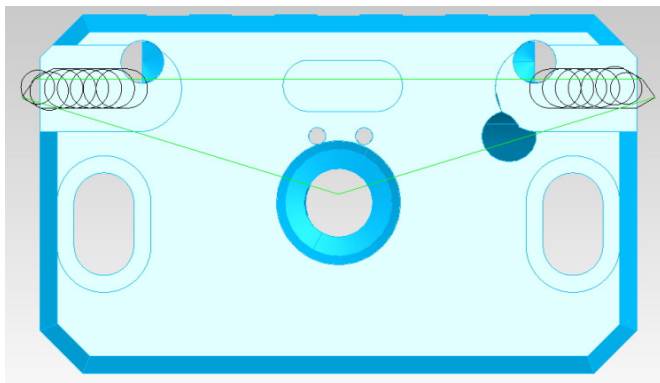


Obr. 64 Nastavení hrubování drážky.

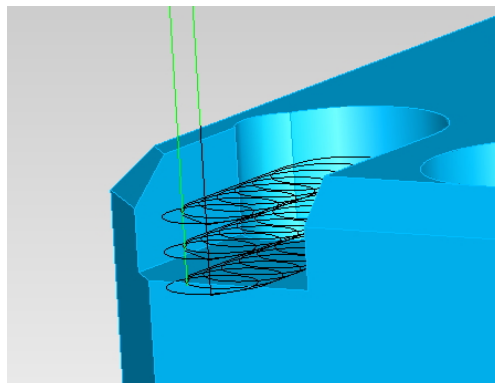


Obr. 65 Nastavení trochoidy.

Dále v nastavení hrubovací operace byla zadána trochoida (viz. obr. 64 a 65), kdy délka kroku trochoidy byla nastavena na 1,5 mm. Trochoidní frézování zajistí, že fréza nebude zabírat v plné šíři řezu, ale bude se postupně odvalovat, což je výhodné pro zvýšení plynulosti obrábění, z hlediska životnosti nástroje a také pro snížení případných rázů. Správnost nastavení operace byla ověřena pomocí simulace se zobrazením středové čáry nástroje (viz. obr. 66 a 67).



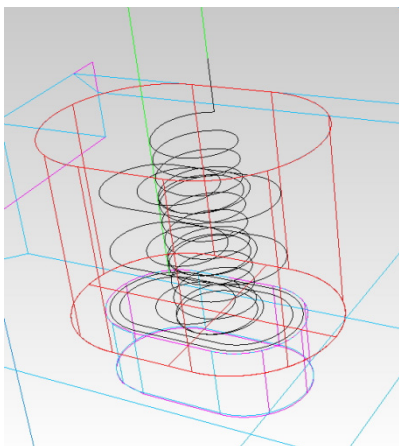
Obr. 66 Simulace frézování drážky trochoidou.



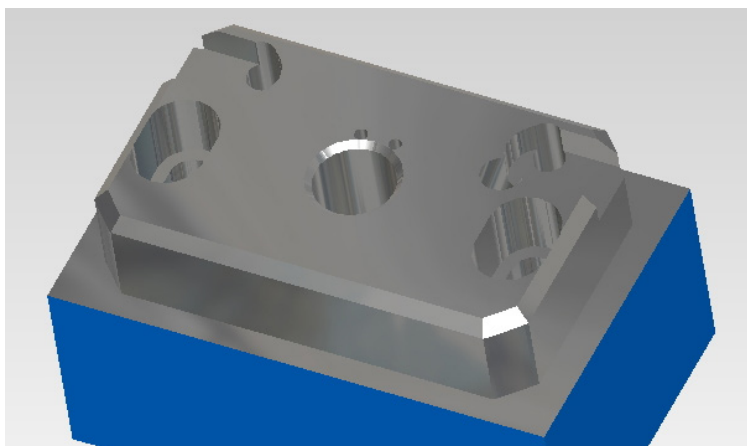
Obr. 67 Náhled simulace z boku.

Pro dokončovací fázi obvodového frézování byl využit sousledný způsob obrábění. Fréza bude svým pohybem při dokončování kopírovat obvod drážky.

Dále byla zadána operace pro vyfrézování zbylých plných drážek, pro které budou využity frézy s průměry 5 a 3 mm. Ty byly nastavené stejným způsobem, jen s tím rozdílem, že jako featura byla vybrána kapsa, a že nástroj do materiálu nebude najíždět bokem, ale bude se postupně zavrtávat pomocí šroubové interpolace s trochoidním pohybem nástroje po jednotlivých vrstvách (viz. obr. 68). Přídavek na dokončení stěn byl nastaven na 0,1 mm. Výsledek 3D simulace je vidět viz. obr. 69.



Obr. 68 Dráhy nástroje.



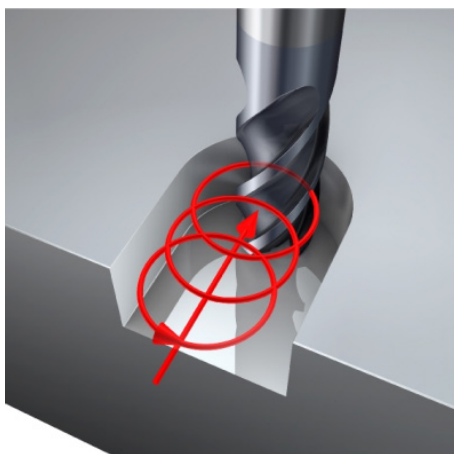
Obr. 69 Výsledek po 3D simulaci.

3.1.6.1 Trochoidální frézování

Jedná se o vynikající metodu pro frézování drážek, která probíhá pomocí kruhové interpolace se současným posouváním nástroje vpřed (viz. obr. 70). Fréza opakovaně odebírá tenké plátky materiálu, kdy v radiálním směru neustále postupuje po spirálové dráze [25].

Výhody trochoidálního frézování [25]:

- malé radiální řezné síly, díky nimž je menší citlivost na vibrace,
- při frézování hlubokých drážek dochází jen k minimálnímu průhybu,
- rovnoměrné rozdělení tepla a opotřebení na břitu, což zvyšuje životnost nástroje,
- vysoce produktivní pro obrábění tvrdých materiálů a aplikace citlivé na vibrace,
- dobré odvádění třísek.



Obr. 70 Trochoidální frézování drážky [25].

3.1.6.2 Volba nástrojů a řezných podmínek

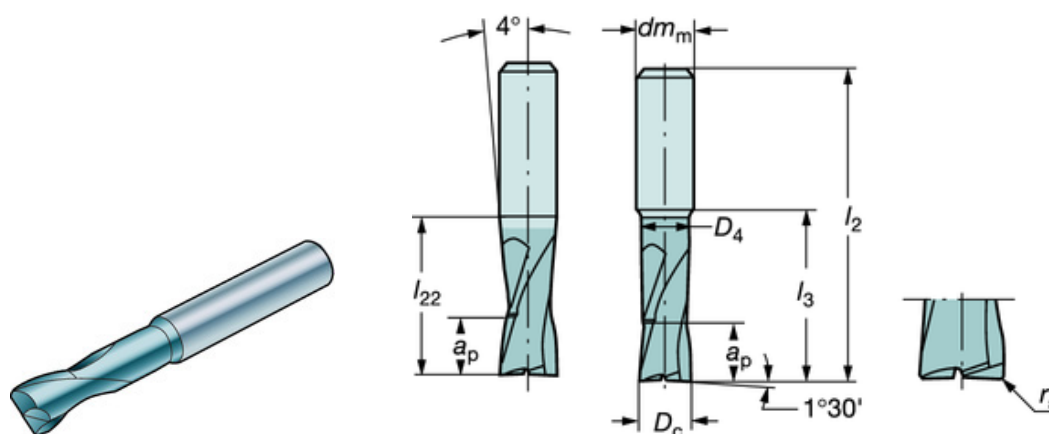
Pro frézování drážek a dutin jsou vhodné stopkové frézy a frézy s dlouhými břity. Tyto nástroje musí umožňovat postupné zahlubování, tedy práci v axiálním směru, které bývá zajištěno alespoň jedním břitem s takovou délkou, jež přesahuje osu frézy, díky čemuž může vrtat. Pro vyšší stabilitu je vhodné zkrátit vyložení nástroje tak, aby vzdálenost mezi nástrojovým sklíčidlem a břitem byla co nejkratší [25].

Pro frézování drážek byly zvoleny monolitní karbidové stopkové frézy CoroMill®Plura od výrobce Sandvik Coromant s velikostmi průměrů 5 a 3 mm, se zaoblenými rohy a se dvěma zuby (viz. obr. 71). Tyto frézy jsou nejčastěji používanými nástroji pro tvorbu drážek. Jedná se o vysoce produktivní frézy vhodné pro všechny typy materiálů, včetně materiálů tvrdých. Základní parametry fréz jsou uvedeny viz. tab. 3.10. Proces frézování drážek bude probíhat za sucha.

Doporučená hodnota řezných rychlostí od výrobce je $110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a doporučená hodnota posuvů na zub od výrobce je $0,035 \text{ mm}$.

Tab. 3.10 Fréza CoroMill®Plura.

Objednací kód	$\varnothing D_c$ [mm]	$\varnothing d_{m_m}$ [mm]	l_2 [mm]	l_3 [mm]	$\varnothing D_4$ [mm]	r_ε
R216.22-05030BAI05G	5	6	57	20	4,7	0,5
R216.22-03030BAI03G	3	6	57	19	2,9	0,3



Obr. 71 Fréza CoroMill®Plura [17].

Výpočet řezných podmínek pro frézu $\varnothing 5 \text{ mm}$:

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{110 \cdot 1000}{\pi \cdot 5} = 7002 \text{ min}^{-1} \quad (17)$$

$$v_f = n \cdot z \cdot f_z = 7002 \cdot 2 \cdot 0,035 = 490 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} \quad (18)$$

Výpočet řezných podmínek pro frézu Ø3 mm:

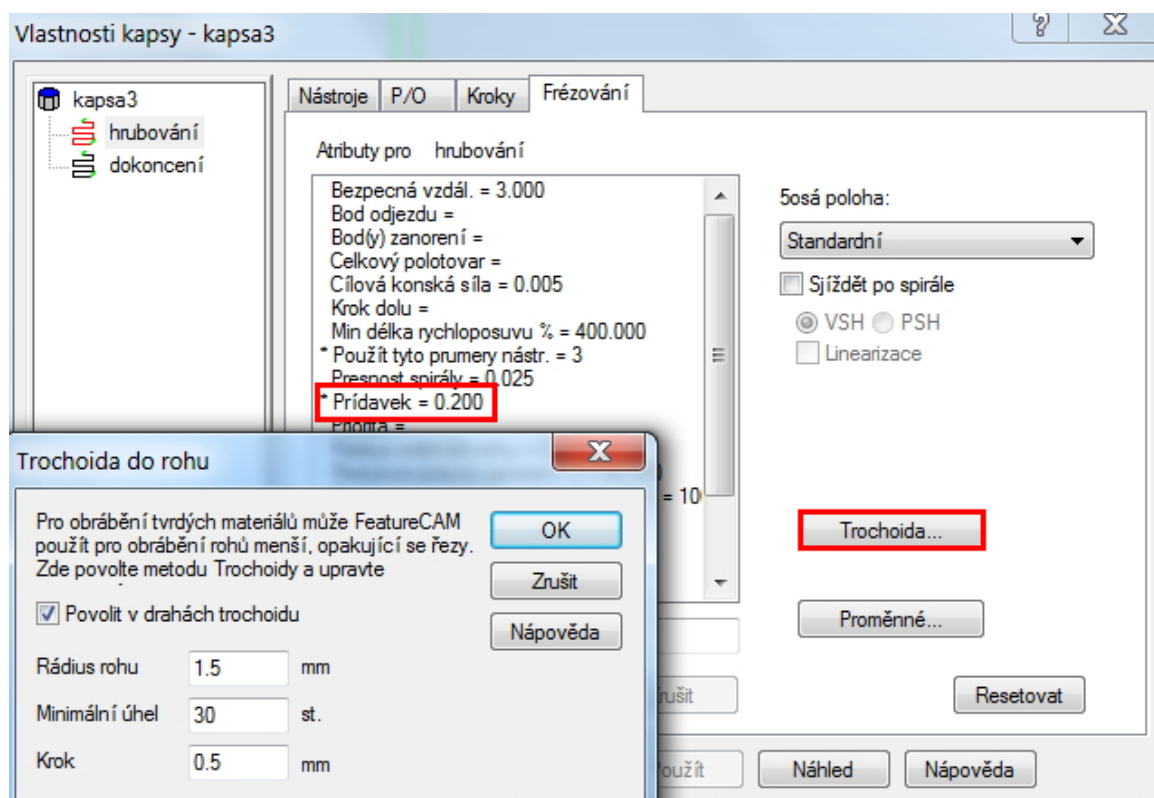
$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{110 \cdot 1000}{\pi \cdot 3} = 11671 \text{ min}^{-1} \quad (19)$$

$$v_f = n \cdot z \cdot f_z = 11671 \cdot 2 \cdot 0,035 = 816 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} \quad (20)$$

3.1.7 Frézování hluboké drážky, volba nástrojů a řezných podmínek

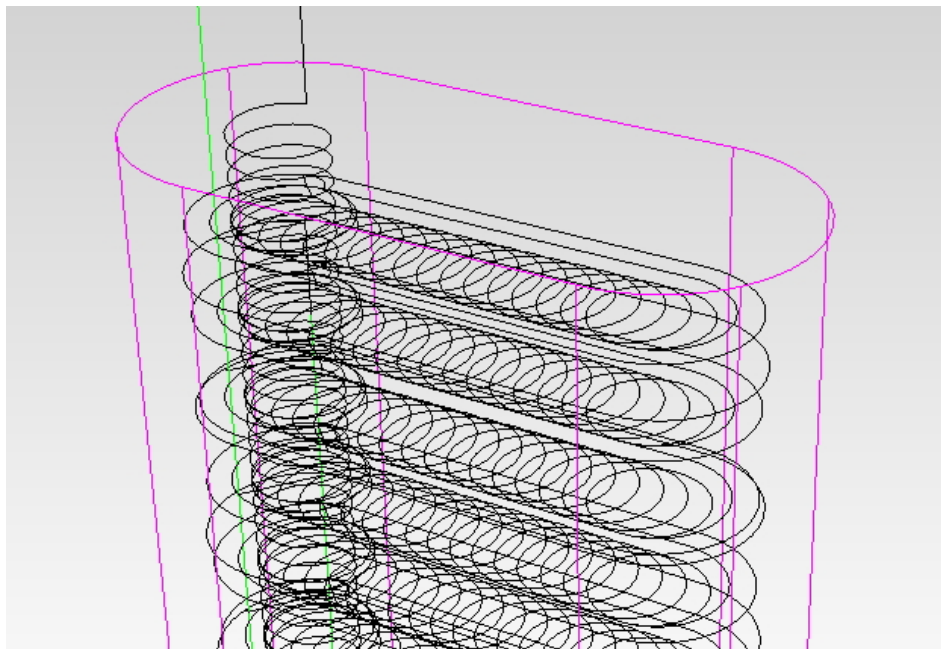
V této operaci bude obráběna hluboká drážka, která má šířku 6 mm a hloubku 33 mm. Bude použita fréza s průměrem 3 mm. Ten je menší, než jaká je šířka drážky, což nám dovolí použití šroubové interpolace a tím zvýšení plynulosti dráhy nástroje.

Drážka se bude obrábět ve dvou fázích. Nejdříve bude provedeno v první fázi hrubování drážek, kdy se nástroj bude zavrtávat pomocí šroubové interpolace a v jednotlivých vrstvách se bude pohybovat trochoidním pohybem (viz. obr. 73). Krok dolů je nastaven na 1 mm, přídavek na dokončení stěny je nastaven na 0,2 mm a dále ve vlastnostech operace je nastavena trochoida s velikostí kroku 0,5 mm a s rádiusem rohu 1,5 mm. Ta nám zajistí, že fréza nebude zabírat v plné šíři řezu, ale bude se postupně odvalovat (viz. obr. 72), což je důležité pro zvýšení plynulosti obrábění, z hlediska životnosti nástroje a také pro snížení případných rázů.



Obr. 72 Fréza CoroMill®Plura.

Poté v druhé fázi operace bude provedeno dokončení obvodů drážky obvodovým frézováním s využitím sousledného způsobu frézování. Pro dokončování bude nastaven krok dolů na 2 mm.



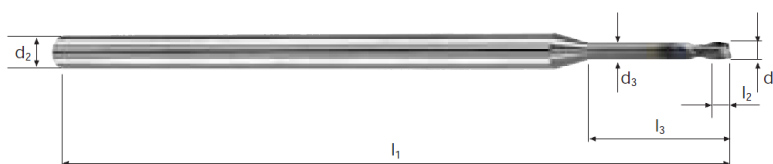
Obr. 73 Dráhy nástroje se šroubovou interpolací a trochoidním pohybem.

Vzhledem k malé šířce drážky a její velké hloubce je třeba vhodný nástroj. Bude tedy použita speciální stopková fréza od firmy Fraisa, která je určena pro mikrofrézování drážek s průměrem 3 mm (viz. obr. 74). Je vhodná pro obrábění materiálů s tvrdostí až 60 HRC.

Vzhledem k hloubce drážky bude také nutné z místa řezu odstraňovat vzniklé třísky, aby se zabránilo jejich hromadění uvnitř drážky. Bude tedy využita olejová mlha přiváděná při tlaku 6 barů, která bude zároveň sloužit i pro mazání a chlazení. Doporučená hodnota řezné rychlosti od výrobce je $70 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a doporučená hodnota posuvu na zub je 0,032 mm. Fréza má 2 zuby, další parametry frézy viz. tab. 3.11.

Tab. 3.11 Fréza Fraisa.

Objednací kód	$\varnothing d_1$ [mm]	$\varnothing d_2$ [mm]	$\varnothing d_3$ [mm]	l_1 [mm]	l_2 [mm]	l_3 [mm]
D 5726.180	3	3	2,95	60	3,6	24



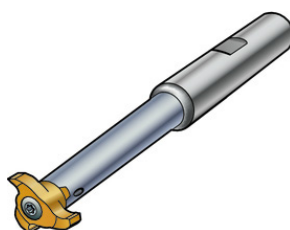
Obr. 74 Fréza Fraisa [17].

Výpočet řezných podmínek pro frézu Ø3 mm:

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{70 \cdot 1000}{\pi \cdot 3} = 7427 \text{ min}^{-1} \quad (21)$$

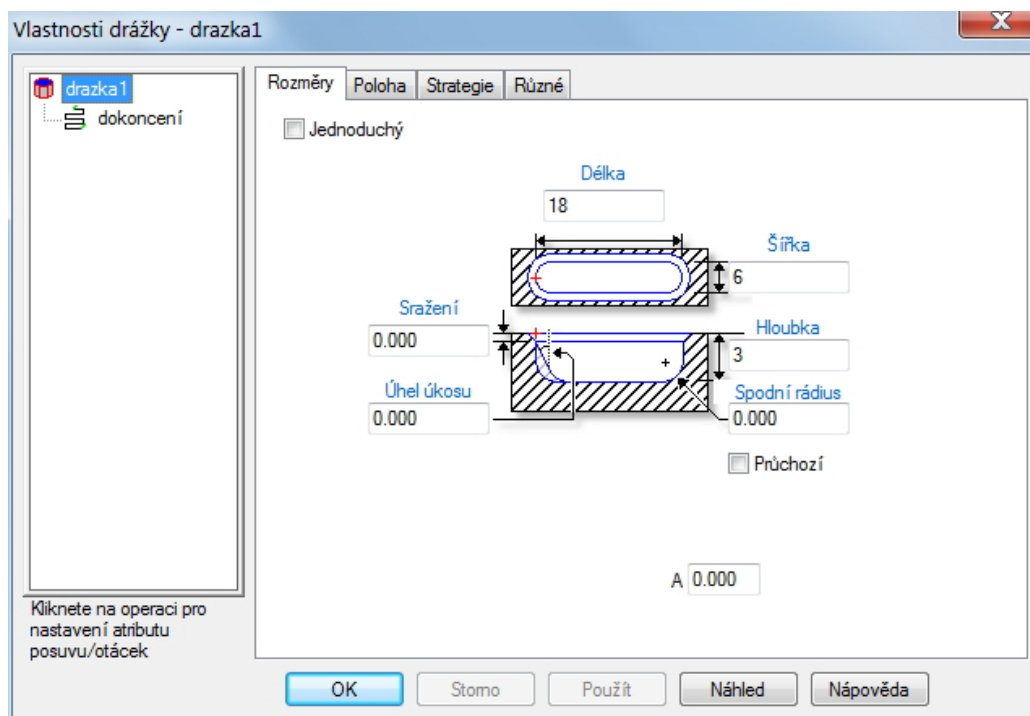
$$v_f = n \cdot z \cdot f_z = 7427 \cdot 2 \cdot 0,032 = 475 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} \quad (22)$$

Dále bude ještě vytvořena operace pro obrobení vnitřní T drážky. Pro frézování T drážek slouží například fréza CoroMill® 327 od firmy Sandvik Coromant (viz. obr. 75). Pro danou drážku na kokile bude ale potřeba drážkovací fréza s průměrem 5 mm a s výškou max. 3 mm. Vzhledem k těmto rozměrům bude tedy potřeba si nechat udělat nástroj potřebných rozměrů na zakázku. Využít můžeme například službu „Tailor Made“ od firmy Sandvik Coromant. Alternativně by bylo možné drážku vůbec neobrábět a místo toho ji po dokončení součásti dodělat elektroerozivně hloubením.



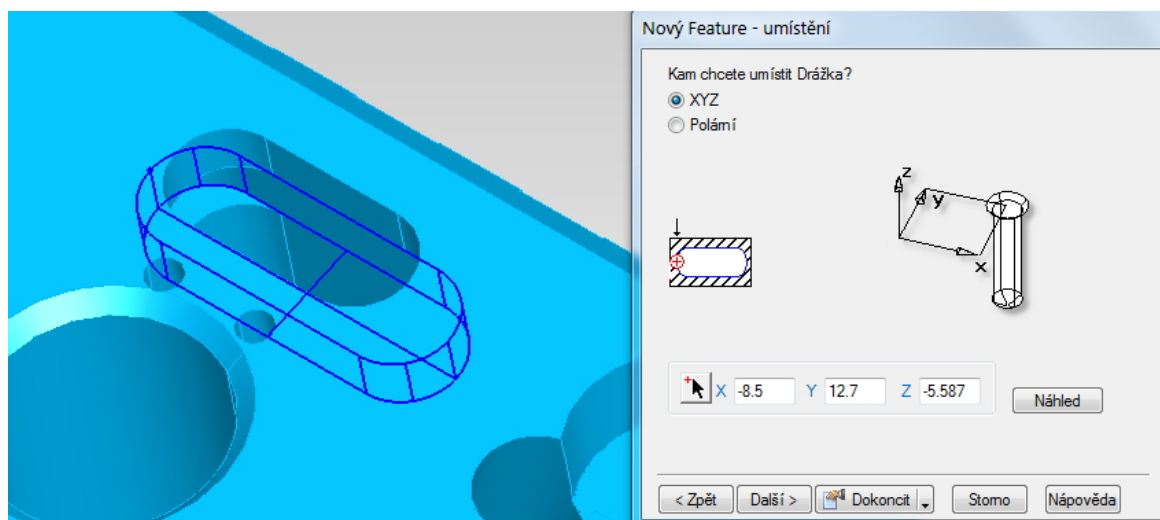
Obr. 75 Drážkovací fréza CoroMill® 327 [17].

Pro vytvoření T drážky v programu FeatureCAM byla vybrána featura drážka a následně byly zadány její rozměry (viz. obr. 76).



Obr. 76 Zadání velikosti drážky.

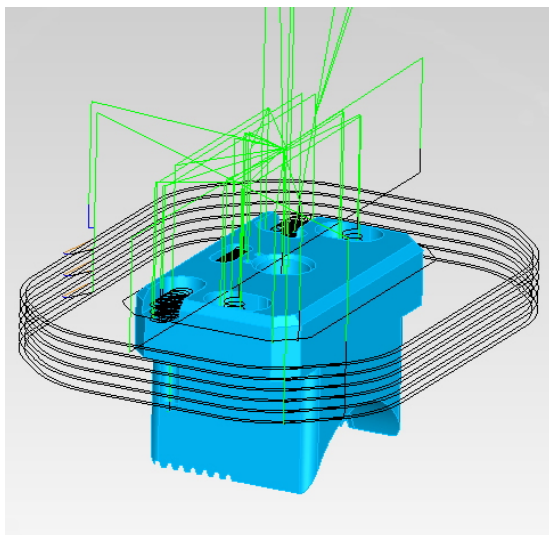
V dalším kroku bylo vybráno umístění drážky, které se provádí buď zadáním souřadnic, nebo vybráním polohy bodu na modelu pomocí myši (viz. obr. 77).



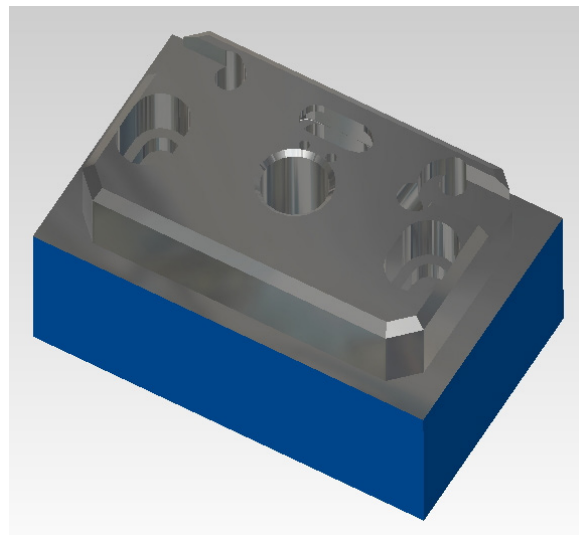
Obr. 77 Umístění vnitřní T drážky.

Nakonec byla provedena operace odjehlení hran s rozměrem $0,2 \times 45^\circ$ u všech zhotovených drážek a u děr s průměry 2 a 5 mm pomocí monolitní tvrdokovové frézy CoroMill® Plura, která již byla představena v kapitole 3.1.2.

Na obrázcích 78 a 79 jsou vidět výsledné dráhy nástroje v rovině ustavení 1 a výsledný obrobený povrch po provedení 3D simulace.



Obr. 78 Výsledná simulace drah nástrojů.



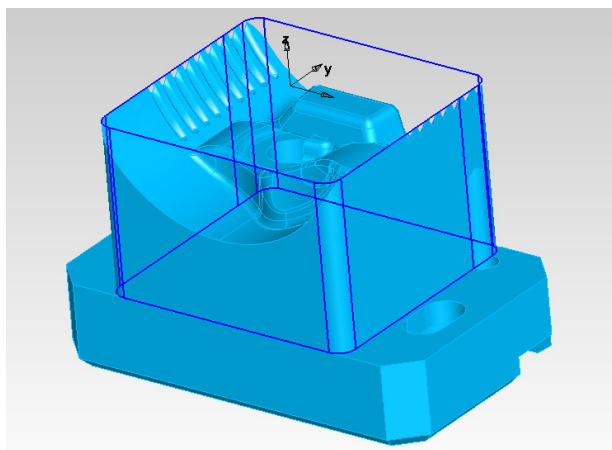
Obr. 79 Výsledek 3D simulace.

3.2 Obrábění v rovině ustavení 2

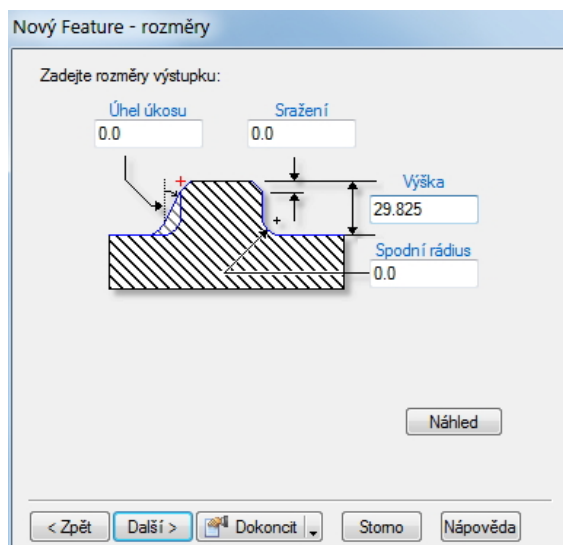
Nyní je již spodní část hotová, proto bude součást otočena a následně bude obráběna z druhé strany. Zde, na horní straně součásti bude frézován obvodový profil součásti a nakonec bude frézována tvarová část součásti pomocí kulových fréz, kde bude řešeno i vyklonění nástroje.

3.2.1 Frézování obvodu součásti, volba nástroje a řezných podmínek

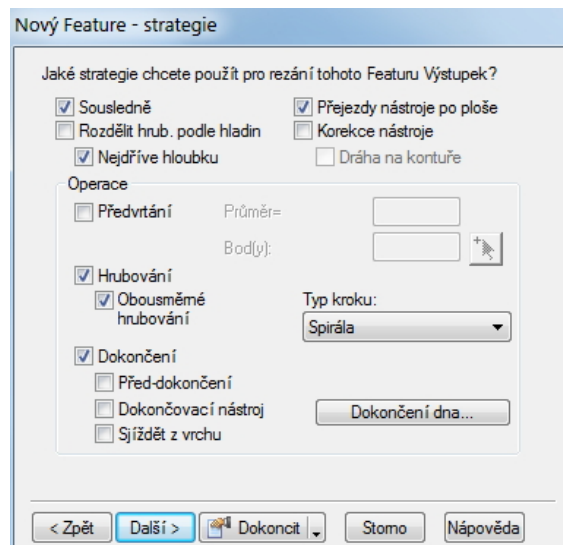
V první operaci na horní straně součásti bude obráběn obvodový profil. Jako featura byl zvolen výstupek a následně pro definování tohoto prvku byla vybrána již dříve vytvořená křivka, která kopíruje profil obráběné součásti (viz. obr. 80). V dalším kroku byla zadána výška výstupku, která je 29,825 mm a poté byl zadán sousledný způsob frézování (viz. obr. 81 a 82). Materiál bude nejdříve hrubován s přídavkem 1 mm pro dokončování na bocích výstupku a následně bude dokončován monolitní frézou.



Obr. 80 Zadání profilu výstupku.



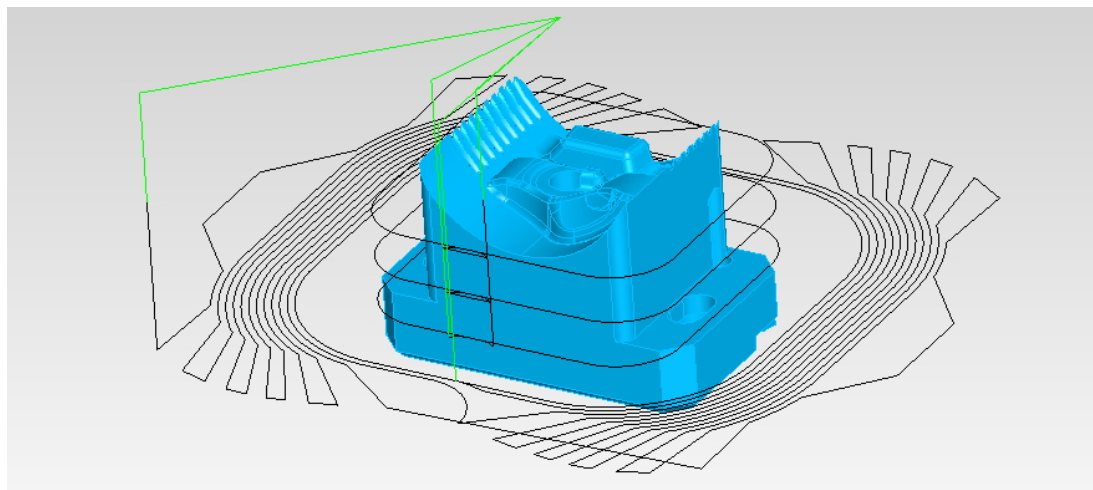
Obr. 81 Zadání rozměrů výstupku.



Obr. 82 Nastavení strategie.

Při hrubování je hlavním cílem odebrat z polotovaru co největší objem materiálu a přiblížit tak konturu pro následné dokončování. Pro dobré přiblížení se k cílové kontuře je výhodné využít pro hrubování nástroj s VBD kruhového tvaru, nevýhodou je ovšem to, že obrábění s kruhovými VBD je obtížnější na procesní řízení z důvodu zajištění odpovídající procesní spolehlivosti. Velkou výhodou především pro HSC obrábění je ale jejich plynulejší záběr. Pro HSC obrábění je dále vedle plynulého záběru velice důležitý i sousledný záběr břitu frézy a dále používání spirálových drah nástroje, při kterých lze velmi dobře dodržet rovnoměrné podmínky záběru [27].

Pro hrubování byla použita strategie frézování profilu, tzv. profilování, které je vhodné pro obrobení vnějšího obrysu součástí. Nástroj bude do materiálu najíždět z boku polotovaru. Vzhledem k použité fréze CoroMill® 390 s dlouhými břity, u které je maximální hloubka řezu až 36 mm, se bude polotovar hrubovat na jeden průchod nástroje s nastaveným krokem do boku mezi zuby na 1,5 mm. Poté bude ještě provedeno dokončení obvodu výstupku odfrézováním přídávku na jeho dokončení (viz. obr. 83). Pro dodržení tolerance rozměrů výstupku bude dokončování provedeno na tři průchody nástroje pomocí monolitní dokončovací frézy CoroMill®Plura.

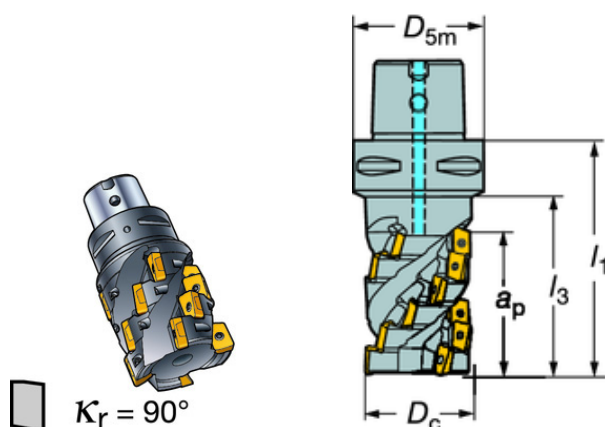


Obr. 83 Dráhy nástroje u obrábění profilu a hrany.

Pro hrubování obvodu výstupku je použita válcová rohová fréza s VBD CoroMill 390 s dlouhými břity a s průměrem 50 mm od firmy Sandvik Coromant (viz. obr. 84). Jedná se o frézu do rohu vhodnou pro frézování tvrdých materiálů. Maximální velikost hloubky řezu a_p u této frézy je 36 mm. Proces frézování bude probíhat bez chlazení. Další parametry frézy jsou uvedeny viz. tab. 3.12. Doporučená hodnota řezné rychlosti od výrobce je 230 až 250 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ a doporučený posuv na zub je 0,05 až 0,19 mm.

Tab. 3.12 Čelní fréza CoroMill 390 s dlouhými břity.

Objednací kód	$\varnothing D_c$ [mm]	l_1 [mm]	l_3 [mm]	z_n/z_n
R390-050C5-36M	50	72	50	16/4



Obr. 84 Čelní fréza CoroMill 390 s dlouhými břity [17].

Výpočet řezných podmínek pro válcovou frézu Ø50 mm:

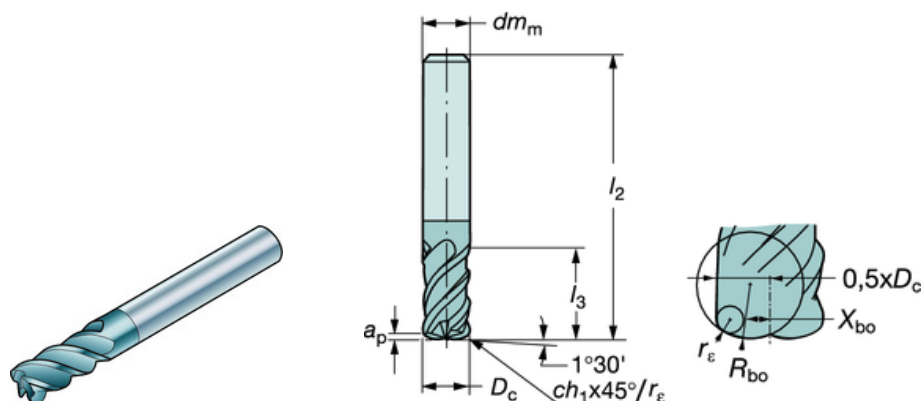
$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{245 \cdot 1000}{\pi \cdot 50} = 1559 \text{ min}^{-1} \quad (23)$$

$$v_f = n \cdot z \cdot f_z = 1559 \cdot 4 \cdot 0,12 = 935 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} \quad (24)$$

Pro operaci dokončování obvodu výstupku je použita monolitní dokončovací karbidová stopková fréza CoroMill®Plura s průměrem 20 mm a se čtyřmi zuby (viz. obr. 85). Fréza je určena pro dokončování, je vhodná pro obrábění vysokými posuvy a pro tvrdé materiály. Základní parametry frézy jsou uvedeny viz. tab. 3.13. Proces frézování bude probíhat za sucha. Doporučená hodnota řezné rychlosti od výrobce je $120 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a doporučená hodnota posuvu na zub od výrobce je $0,075 \text{ mm}$.

Tab. 3.13 Fréza CoroMill®Plura.

Objednací kód	Ø Dc [mm]	Ø dm _m [mm]	l ₂ [mm]	l ₃ [mm]	r _ε
R215.H4-20050EAC13P	20	20	104	45	2



Obr. 85 Fréza CoroMill®Plura [17].

Výpočet řezných podmínek pro frézu Ø20 mm:

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{120 \cdot 1000}{\pi \cdot 20} = 1910 \text{ min}^{-1} \quad (25)$$

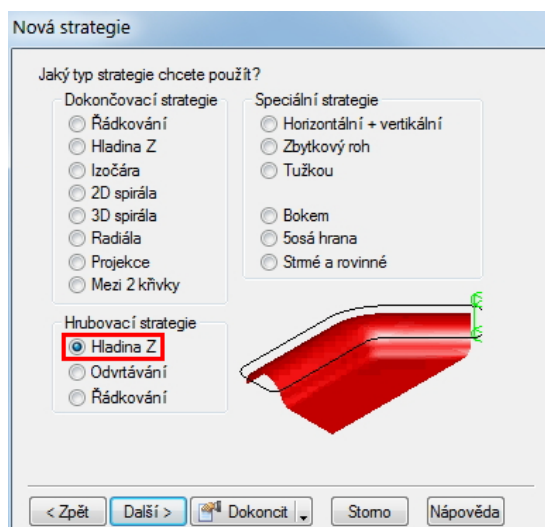
$$v_f = n \cdot z \cdot f_z = 1910 \cdot 4 \cdot 0,075 = 573 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} \quad (26)$$

3.2.2 Frézování tvarové 3D plochy

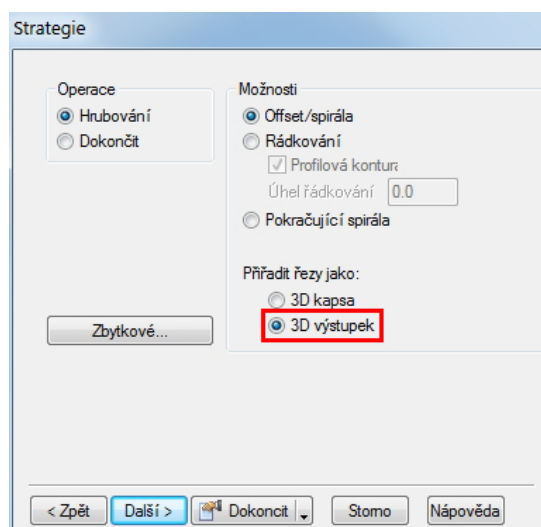
Horní tvarová 3D plocha bude nejdříve hrubována pro odstranění co nejvíce materiálu, což bude provedeno válcovou frézou, následně bude plocha předdokončována a dokončována pomocí monolitních kulových fréz a na závěr budou ještě dokončovány zbytkové rohy.

Nejdříve bude tedy plocha hrubována. Byla zadána nová frézovací operace a jako featura bylo vybráno „Frézování 3D ploch“. Pro 3D frézování je vždy nutné vybrat plochy, které budeme obrábět. Pro jednodušší výběr ploch je možné využít i klávesovou zkratku CTRL + A, nebo je možné součást jednoduše označit táhnutím myši. V následujícím kroku bylo nutné vybrat typ strategie, kde pro první operaci, tedy pro hrubování, byla vybrána hrubovací strategie „Hladina Z“ (viz. obr. 86). Z důvodu, aby nám nástroj najížděl do materiálu zvenku, byla zatržena možnost 3D výstupek (viz. obr. 87). Pokud by byla nechána možnost 3D kapsa, pak by nástroj najížděl přímo do materiálu ze shora. Jako nástroj pro hrubování bude použita monolitní stopková fréza o průměru 12 mm.

Hladina Z představuje vlastně strategii hrubování offsetem. Tato strategie se vyznačuje tím, že se nástroj pohybuje po dráze kopírující konturu součásti, která je zmenšená o radiální posunutí nástroje (tj. 0,8 průměru nástroje pokud se jedná o válcovou čelní frézu.). Jedná se o strategii vhodnou a často využívanou pro HSC obrábění.



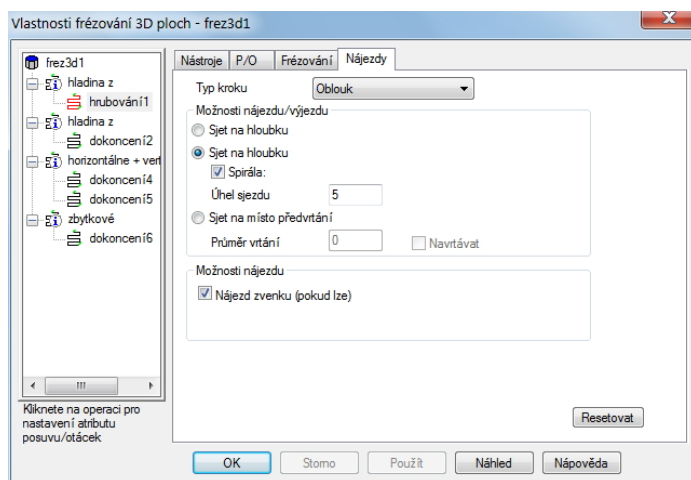
Obr. 86 Výběr hrubovací strategie.



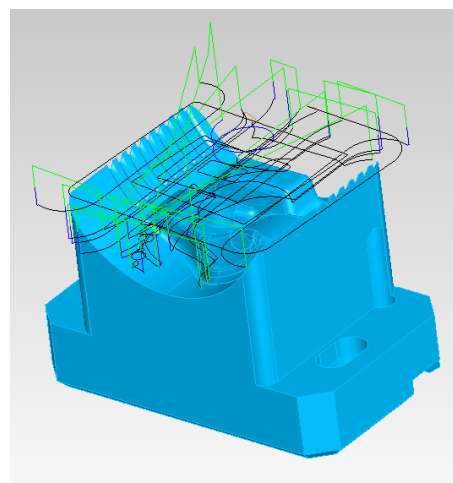
Obr. 87 Možnosti hrubovací strategie.

Pro hrubování válcovou frézou byl ve vlastnostech strategie nastaven krok do boku mezi řezy na hodnotu 80%, jelikož při hrubování se velikost kroku volí jako 0,8 násobek průměru nástroje.

Dále bylo důležité se věnovat nájezdům nástroje do materiálu, ty je možné nastavit v možnostech strategie pod záložkou „Nájezdy“ (viz. obr. 88). Pro HSC obrábění je velice důležitý plynulý chod nástroje, proto jako typ kroku byl zadán oblouk, dále bylo zadáno sjíždění na hloubku pomocí spirály s úhlem sjezdu 5 stupňů a ještě byla zatržena možnost „Nájezd zvenku (pokud lze)“, aby nástroj najížděl do materiálu zvenku. Výsledné dráhy nástroje po hrubování viz. obr. 89.



Obr. 88 Nastavení nájezdů nástroje.

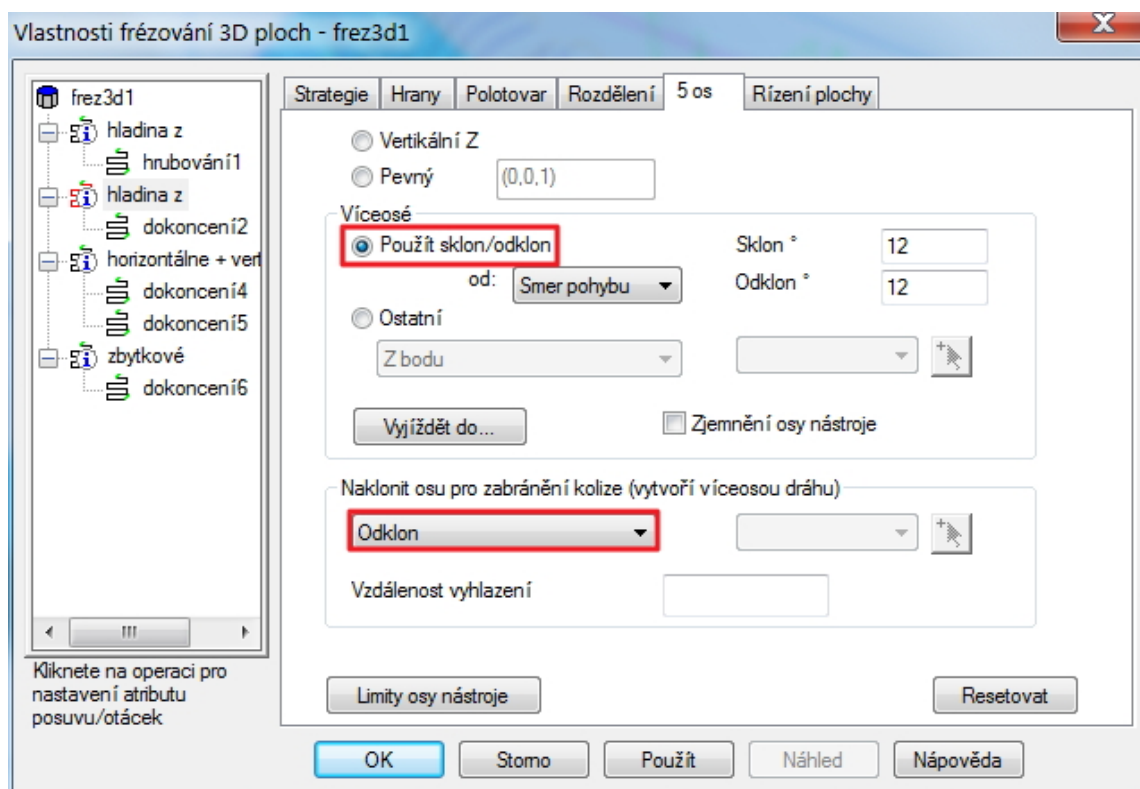


Obr. 89 Dráhy nástroje.

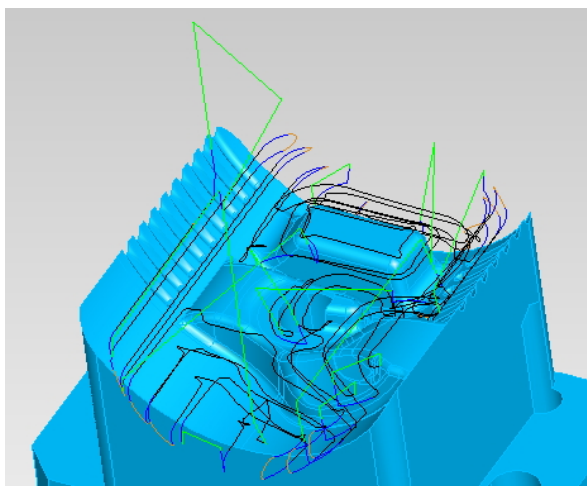
Dále byla zadána další operace a to předdokončování pomocí kulové frézy, kdy jako strategie byla opět zvolena „Hladina Z“. Ve vlastnostech frézování 3D plochy pod záložkou „Nájezdy“ byly nastaveny vyhlazené nájezdy a přejezdy nástroje po oblouku tím, že jako typ kroku byla vybrána „Smyčka“, která byla nastavena pro všechny kroky, zanoření a odjezdy, a byl nastaven průměr oblouku 12 mm a úhel nájezdu 45°.

V případě použití kulové frézy bude při obrábění na kulovém ostří nástroje v jeho ose nulová řezná rychlost. Na tomto místě by materiál nebyl obráběn, ale docházelo by k tváření, kdy nástroj by materiál stlačoval. Z tohoto důvodu využijeme možnost vyklonění nástroje (viz. obr. 92). Více o teorii obrábění s vykloněným nástrojem je uvedeno v kapitole 3.2.2.1.

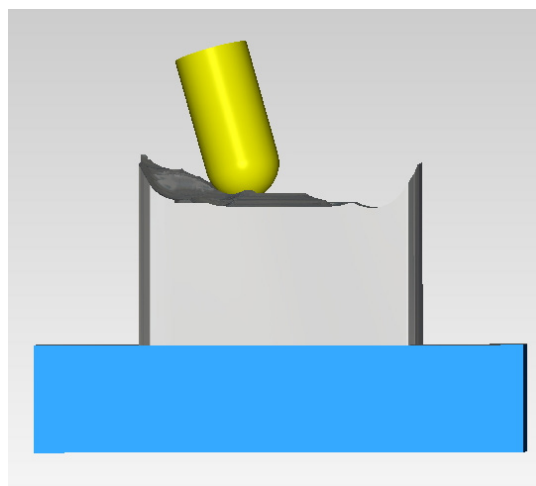
Vyklánění nástroje se nastavuje ve vlastnostech obrábění dané operace pod záložkou „5 os“, kde bylo zaškrtnuto „Použít sklon/odklon“ a byl nastaven úhel 12° (viz. obr. 90). Ideální úhel vyklonění byl na základě zkoumání pana Ing. Jana Dvořáčka a dalších odborníků na tuto problematiku stanoven s hodnotou 10 – 20°. Dále by se mohlo stát, že díky vyklánění bude nástroj v některých místech nabourávat do materiálu. Aby tomu bylo zabráněno, tak byla ještě aktivována možnost naklonění osy nástroje pro zabránění kolize. Dráhy nástroje při předdokončování plochy jsou vidět viz. obr. 91.



Obr. 90 Nastavení vyklánění nástroje.



Obr. 91 Dráhy nástroje při předdokončování.

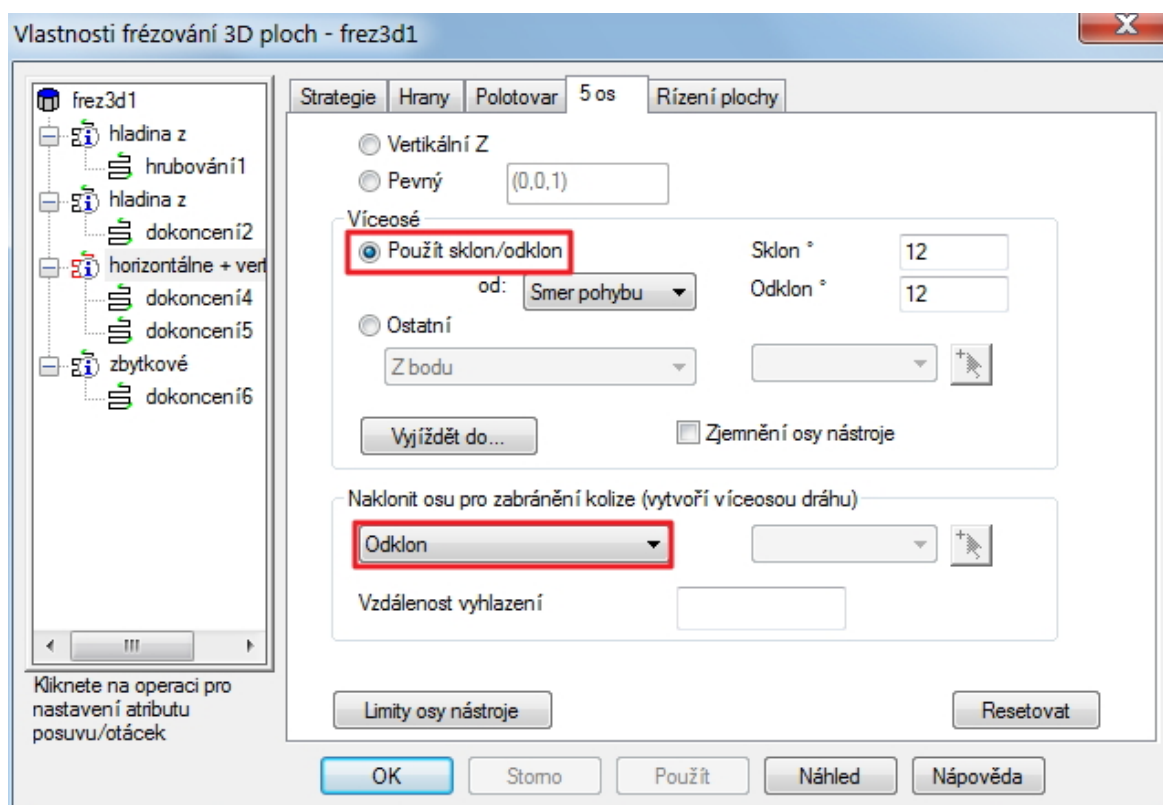


Obr. 92 Simulace s vykloněným nástrojem.

Dokončovací frézování je definované úběrem zbytkového materiálu, který zbyl jako přídavek po hrubování či po předdokončování. Jako dokončovací strategie pro frézování této plochy byla zvolena strategie „Horizontální a vertikální“. Jedná se o speciální dokončovací strategii, která umožňuje dokončení jak horizontálních, tak vertikálních ploch při jednom nastavení, kdy pro horizontální plochy využívá strategii 3D offset, zatímco pro vertikální plochy strategii hladina Z. Mohou se tedy použít 2 nástroje, kdy jeden bude určený pro dokončování horizontálních a druhý pro dokončování vertikálních ploch. V tomto případě byla pro oba typy ploch zvolena kulová fréza o průměru 4 mm.

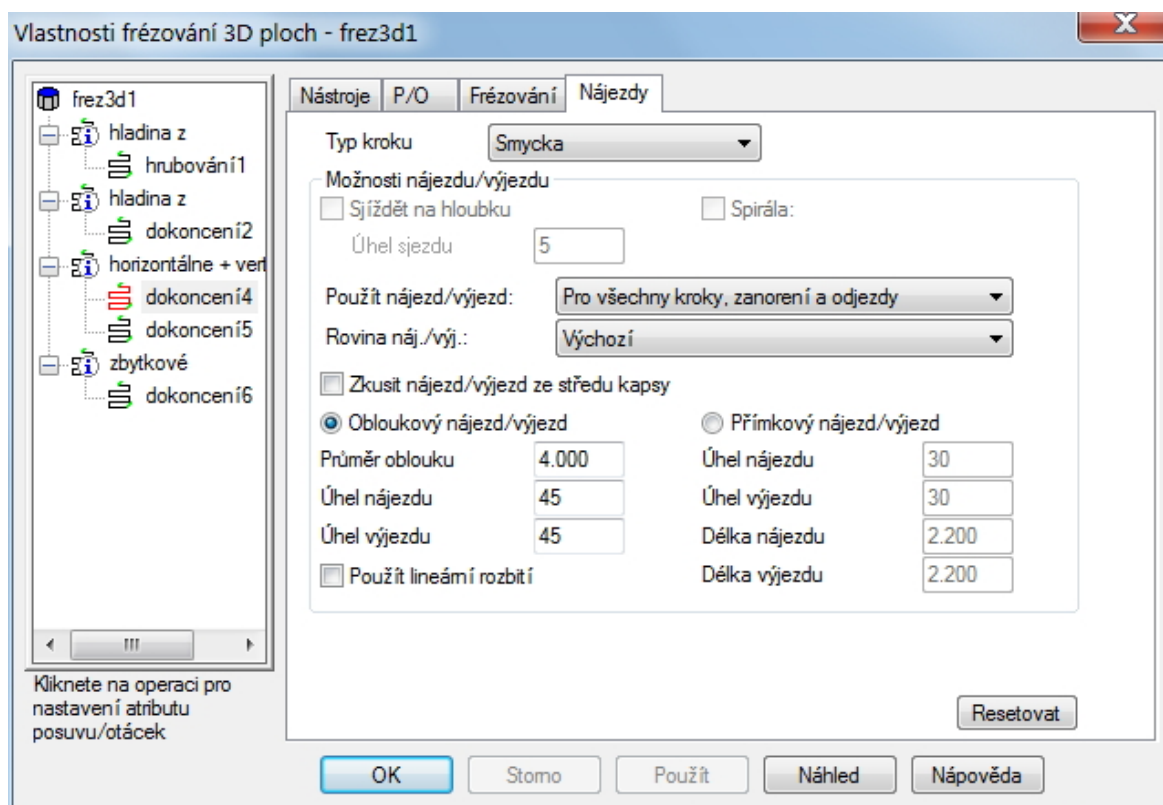
V možnostech této strategie byl nastaven limitní úhel 30° , ten nám určuje, které plochy budou vyhodnoceny jako horizontální a které jako vertikální. Dále byla pro rovinné plochy nastavena možnost „Spirála dovnitř“, která snižuje počet přejezdů nástroje, a také byly ostatní pohyby propojeny do spirály. Pro dosažení kvalitního a hladkého povrchu byl krok do boku nastaven na 0,1 mm. Následně ve vlastnostech strategie pod záložkou frézování byla nastavena tolerance na 0,025 mm, což znamená, že trajektorie těchto drah se bude pohybovat v toleranci 0,025 mm.

Ze stejného důvodu, který byl uveden u předdokončovacího obrábění, i zde bude využita možnost vyklánění nástroje. Vyklánění bude tedy opět nastaveno ve vlastnostech obrábění pod záložkou „5 os“, kde bude zaškrtnuto „Použít sklon/odklon“ a bude nastaven úhel 12° (viz. obr. 93). Pro zabránění možných kolizí nástroje bude ještě aktivována funkce „Naklonit osu pro zabránění kolize“.



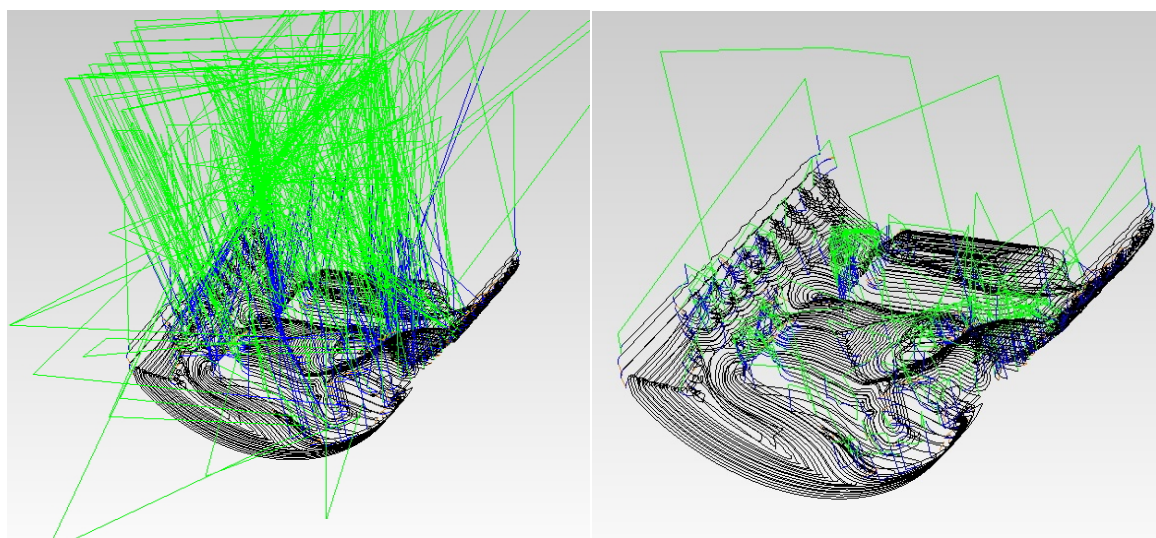
Obr. 93 Nastavení vyklánění nástroje.

Dále je také nutné nastavit vyhlazené nájezdy a přejezdy nástroje po oblouku, jelikož vždy, když břit frézy vstupuje do záběru, tak je vystavován náhlému šokovému zatížení. Nájezdy byly tedy nastaveny ve vlastnostech frézování 3D plochy pod záložkou „Nájezdy“, kde jako typ kroku byla vybrána „Smyčka“, která byla nastavena pro všechny kroky, zanoření a odjezdy a byl vybrán obloukový nájezd/výjezd s průměrem oblouku 4 mm a s úhlem nájezdu a výjezdu 45° (viz. obr. 94).

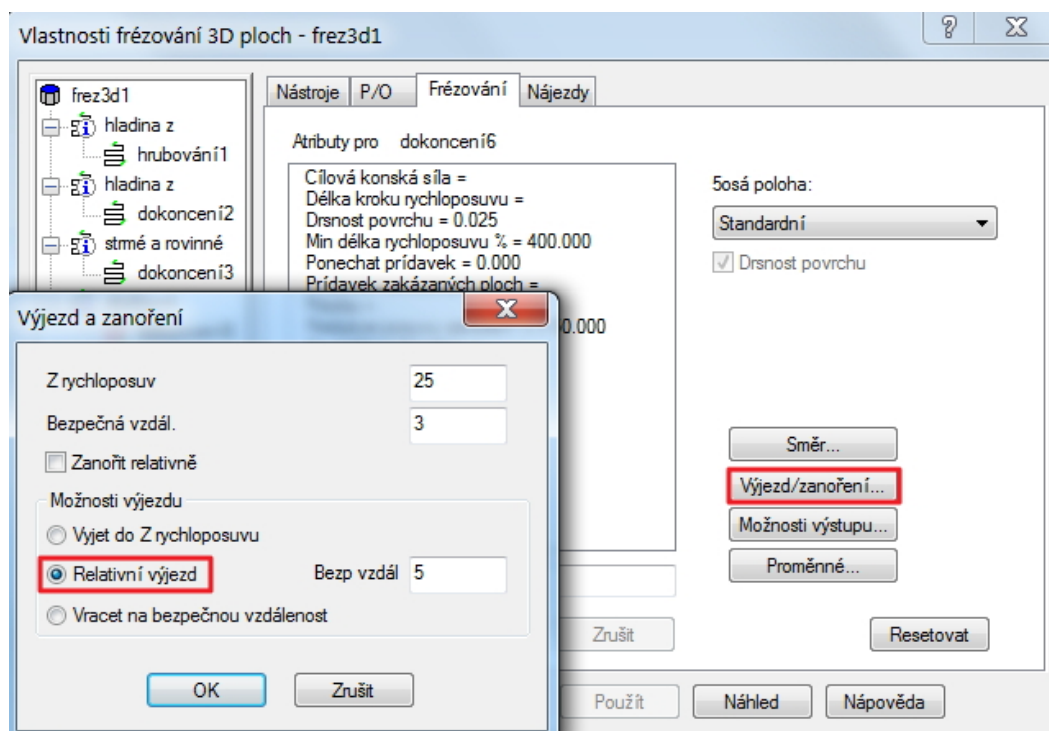


Obr. 94 Nastavení nájezdů nástroje po oblouku.

Dále byla provedena simulace drah nástroje, viz obr. 94 vlevo, kde je vidět, že nástroj neustále zbytečně vyjíždí do roviny rychloposuvu. Tyto zbytečné výjezdy je třeba redukovat. Proto ve vlastnostech frézování 3D plochy byly nastaveny relativní výjezdy nástroje (viz. obr. 96). To znamená, že nástroj odjede z dráhy na vzdálenost 5 mm a následně přejede na další dráhu s ohledem na nejbližší plochy. Níže na obr. 95 je vidět nezanedbatelná redukce přejezdů nástroje po jejich optimalizaci.



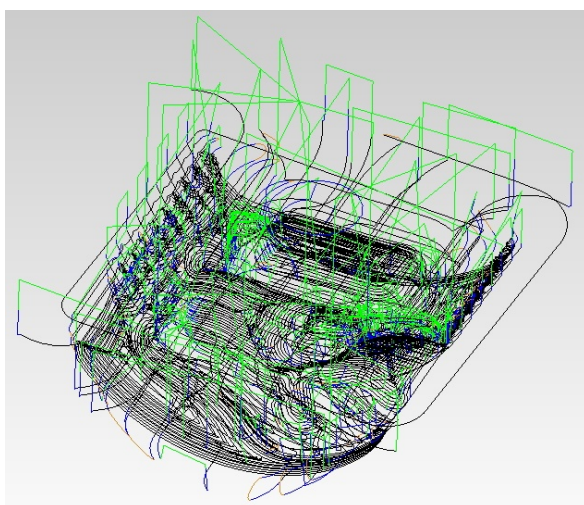
Obr. 95 Dráhy nástroje – nalevo před a napravo po optimalizaci přejezdů nástroje.



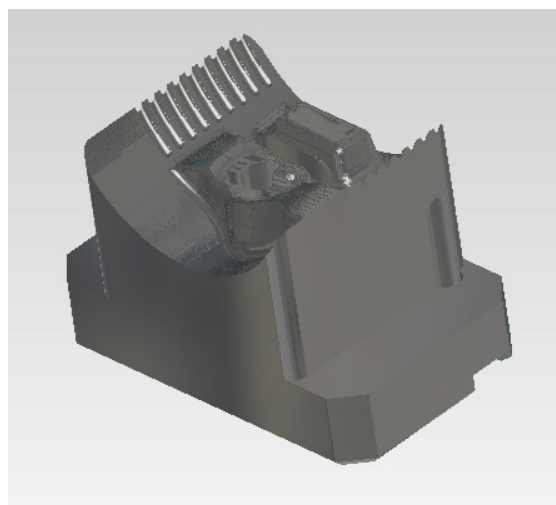
Obr. 96 Optimalizace přejezdů nástroje.

Poslední nezbytnou operací je ještě dokončování zbytkových rohů. Zbytkový roh je strategie určená pro dokončování rohů, ve kterých zůstal neobrobený materiál po předchozích operacích. Rohy budou dokončovány kulovou frézou s průměrem 1 mm.

Z dostupných typů strategií dokončování zbytkového rohu byla vybrána strategie „Multi pero“. Jelikož bude operace prováděna kulovou frézou, tak bylo také nastaveno vyklánění nástroje a byla aktivována funkce naklonění osy nástroje pro zabránění kolize. Na obr. 97 jsou vidět výsledné dráhy nástroje po obrobení tvarové plochy a na obr. 98 je uveden výsledek po dokončení 3D simulace obrábění součásti.



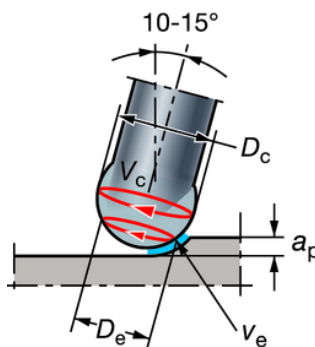
Obr. 97 Výsledná simulace drah nástrojů.



Obr. 98 Výsledek 3D simulace.

3.2.2.1 Frézování nakloněným nástrojem

Jak již bylo řečeno, tak v případě použití kulové frézy, kdy při obrábění nástroj a obrobek svírají pravý úhel, pak bude na ostří nástroje v jeho ose nulová řezná rychlost, což způsobí, že nástroj zde bude materiál pouze stlačovat. Tím bude docházet ke stlačování třísky, zvyšování teploty řezání a zvýší se i tvorba nárůstku, což bude mít za následek snížení trvanlivosti nástroje a zhoršení kvality povrchu. Abychom těmto vlivům zabránili, pak je nutné využít možnosti naklonění nástroje [24].



Obr. 99 Nakloněný nástroj [17].

Naklonění nástroje (viz. obr. 99) může být buď ve směru posuvu (tažený nástroj), nebo proti směru posuvu (tlačený nástroj). V případě taženého nástroje se dosahuje tiššího chodu a lepšího povrchu. Mezi hlavní výhody použití náklonu nástroje patří to, že dojde k podstatnému zlepšení drsnosti povrchu, což již bylo ověřeno mnoha experimenty, sníží se časy obrábění díky možnosti využití vyššího posuvu na zub a větší šířce řezu, zvýší se trvanlivost nástroje a také se zvýší přesnost obrábění. Nakloněním nástroje se také zvýší efektivní průměr frézy, což má za následek i zvýšení efektivní řezné rychlosti [5,24].

Efektivní průměr v případě taženého nástroje [5]:

$$D_{ef} = D_c \cdot \sin \left[\arccos \left(\frac{D_c - 2 \cdot a_p}{D_c} \right) + \beta_f \right] \quad (27)$$

Efektivní průměr v případě tlačeného nástroje [5]:

$$D_{ef} = D_c \cdot \sin \left[\arccos \left(\frac{D_c - 2 \cdot a_p}{D_c} \right) + \beta_f \right] \quad (28)$$

- kde:
- | | | |
|---------------|---|----------------------------|
| D_{ef} [mm] | - | efektivní průměr nástroje, |
| D_c [mm] | - | průměr nástroje, |
| a_p [mm] | - | hloubka řezu, |
| β_f [°] | - | úhel naklonění nástroje. |

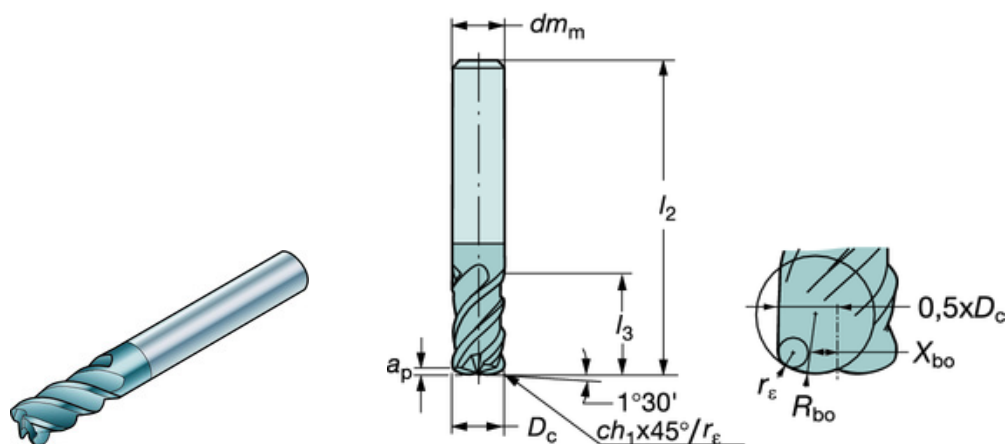
Jako nejvýhodnější úhel naklonění nástroje se dá dle závěrů různých odborníků na tuto problematiku považovat úhel v rozmezí 10 až 20° [5,24].

3.2.2.2 Volba nástrojů a řezných podmínek

Pro operaci hrubování byla zvolena monolitní karbidová stopková fréza CoroMill®Plura s průměrem 12 mm a se čtyřmi zuby od výrobce Sandvik Coromant (viz. obr. 100). Fréza je určená pro hrubování, je vhodná pro obrábění vysokými posuvy a pro obrábění tvrdých materiálů. Základní parametry frézy jsou uvedeny viz. tab. 3.14. Proces frézování bude probíhat za sucha. Doporučená hodnota řezné rychlosti od výrobce je $120 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a doporučená hodnota posuvu na zub od výrobce je $0,075 \text{ mm}$.

Tab. 3.14 Fréza CoroMill®Plura.

Objednací kód	Ø Dc [mm]	Ø dm _m [mm]	l ₂ [mm]	l ₃ [mm]	r _ε
R215.H4-12050DAC08P	12	12	83	30	1,5



Obr. 100 Fréza CoroMill®Plura [17].

Výpočet řezných podmínek pro frézu Ø12 mm:

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{120 \cdot 1000}{\pi \cdot 12} = 3183 \text{ min}^{-1} \quad (29)$$

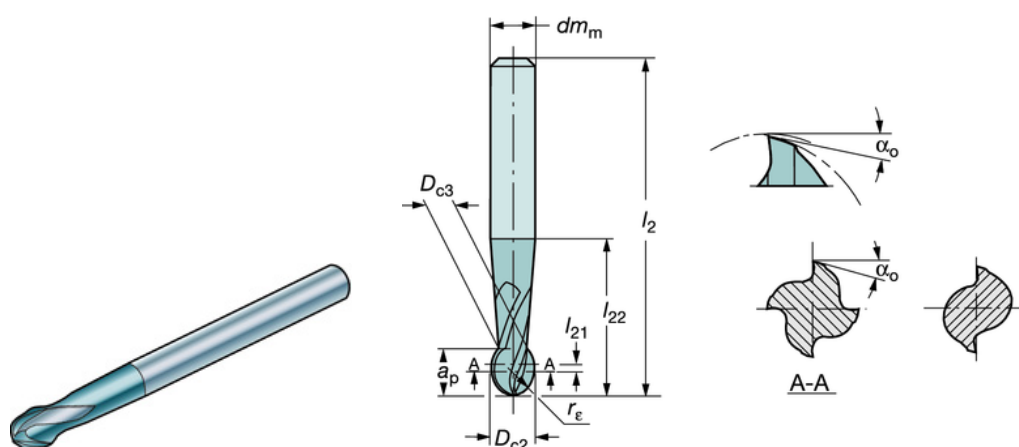
$$v_f = n \cdot z \cdot f_z = 3183 \cdot 4 \cdot 0,075 = 916 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} \quad (30)$$

Pro operace předdokončování, dokončování a dokončování rohů byly zvoleny monolitní karbidové stopkové frézy s kulovým čelem a dvěma břity CoroMill®Plura od firmy Sandvik Coromant s průměry 12, 4 a 1,5 mm (viz. obr. 101). Tento typ frézy je vhodný pro obrábění tvrdých materiálů. Proces frézování bude probíhat bez chlazení. Základní parametry frézy jsou uvedeny viz. tab. 3.15.

Doporučená hodnota řezné rychlosti od výrobce je $120 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a doporučená hodnota posuvu na zub pro frézu Ø12 mm je $0,14 \text{ mm}$, pro frézu Ø4 mm je $0,08 \text{ mm}$ a pro frézu Ø1,5 mm je $0,015 \text{ mm}$.

Tab. 3.15 Frézy CoroMill®Plura s kulovým čelem.

Objednací kód	Ø Dc [mm]	Ø dm _m [mm]	Ø Dc ₃ [mm]	l ₂ [mm]	l ₂₁ [mm]	l ₂₂ [mm]
R216.62-12030-AO13G	12	12	9,8	100	3	52
R216.62-04030-AO05G	4	6	4,1	80	1,5	30
R216.62-01030-AO20G	1,5	6	-	74	1,5	20



Obr. 101 Fréza CoroMill®Plura s kulovým čelem [17].

Výpočet řezných podmínek pro kulovou frézu Ø12 mm:

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{120 \cdot 1000}{\pi \cdot 12} = 3183 \text{ min}^{-1} \quad (31)$$

$$v_f = n \cdot z \cdot f_z = 3183 \cdot 2 \cdot 0,14 = 891 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} \quad (32)$$

Výpočet řezných podmínek pro kulovou frézu Ø4 mm:

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{120 \cdot 1000}{\pi \cdot 4} = 9549 \text{ min}^{-1} \quad (33)$$

$$v_f = n \cdot z \cdot f_z = 9549 \cdot 2 \cdot 0,08 = 1527 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} \quad (34)$$

Výpočet řezných podmínek pro kulovou frézu Ø1 mm:

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{120 \cdot 1000}{\pi \cdot 1} = 25464 \text{ min}^{-1} \quad (35)$$

$$v_f = n \cdot z \cdot f_z = 25464 \cdot 2 \cdot 0,015 = 763 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} \quad (36)$$

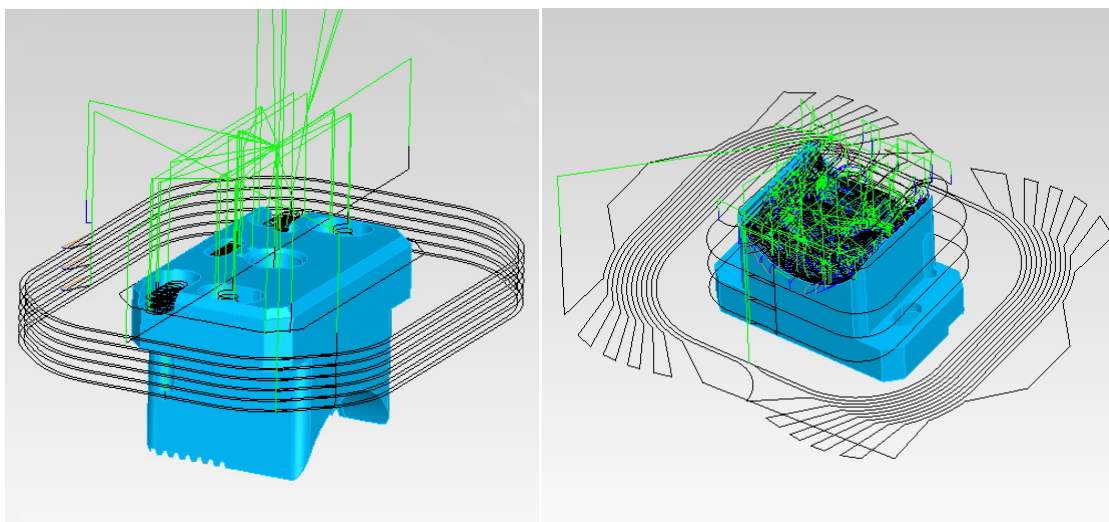
4 SIMULACE A VERIFIKACE OBRÁBĚCÍHO PROCESU

Verifikace je pojem, který znamená ověření procesu obrábění, zda neobsahuje chyby v zadání drah nástrojů. Mezi činnosti verifikace patří simulace včetně zobrazení nástroje, vřetene, držáku, upínače či celého stroje, která odhalí, zda nástroje nenabourávají do materiálu, upínek, nebo do stolu stroje. Další důležitou činností je porovnání výsledku simulace s modelem součásti, díky čemuž se zjistí, zda se na obrobené součásti nenacházejí neobrobená místa.

Mezi možnosti simulace a verifikace tedy patří [23]:

- optická analýza geometrie a pohybů stroje,
- kontrola kolize mezi nástrojem (vřetenem) a obrobkem (upínkami),
- zjištění případného výskytu zbytkového materiálu (přesnosti obrobeného povrchu),
- porovnání obrobené součásti s modelem – možnost barevného zobrazení rozdílů,
- možnosti zobrazení nástroje, držáku, obrobku a upínek,
- uspořádání a typové rozlišení kolizí.

Systém FeatureCAM má několik režimů simulace, mezi které patří simulace se zobrazením středové čáry (viz. obr. 102), 2D a 3D simulace a simulace se zobrazením stroje. Další funkcí je grafické zobrazení zatížení stroje.

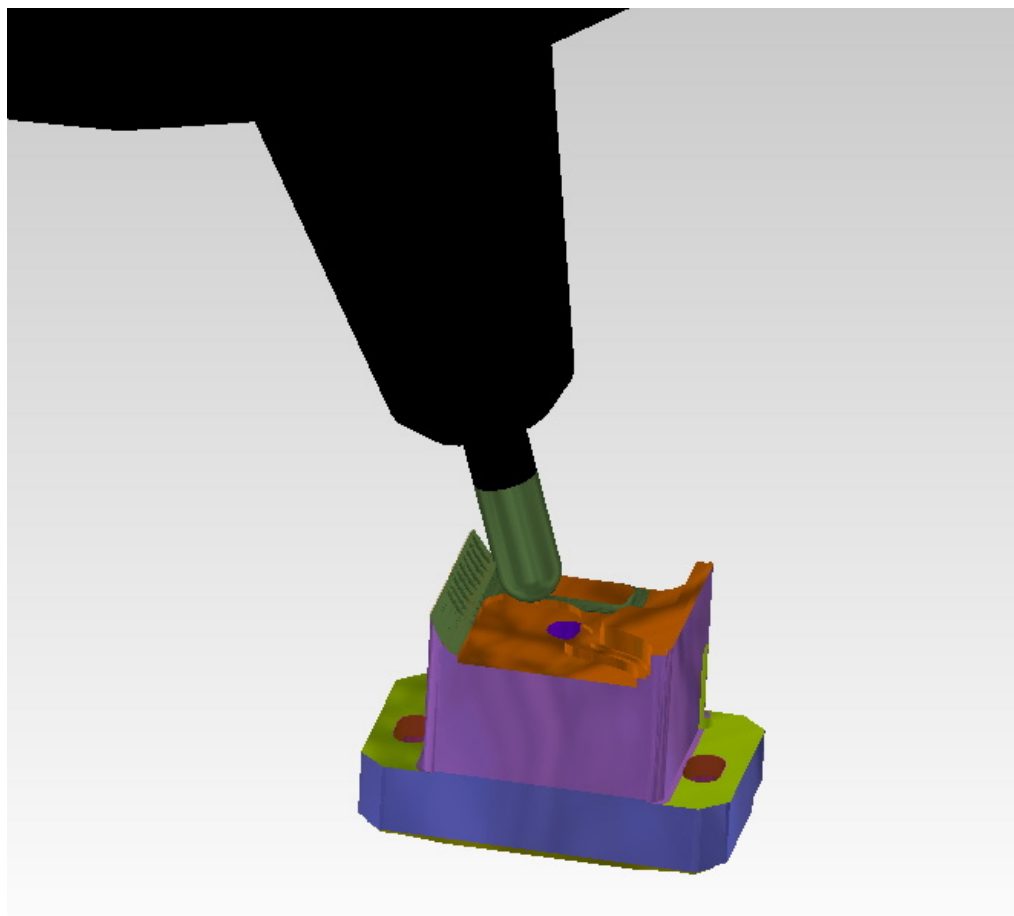


Obr. 102 Simulace se zobrazením středové čáry, vlevo spodní část a vpravo horní část součásti.

Po spuštění simulace se v softwaru FeatureCAM generují veškeré dráhy nástroje ze zadanych podmínek. Po jejich vygenerování je možné CL data uložit pomocí vhodného postprocesoru jako NC program. Výsledný NC program v našem případě bohužel nemohl být uložen z důvodu použití zkušební verze softwaru FeatureCAM, která neumožňuje ukládání NC kódu.

Systém FeatureCAM také při generování drah nástrojů počítá časy obrábění, tedy čas celkového obrobení a zároveň i časy jednotlivých operací. Celkový čas pro obrobení cílové součásti byl spočítán na 2 hodiny, 33 minut a 10 vteřin.

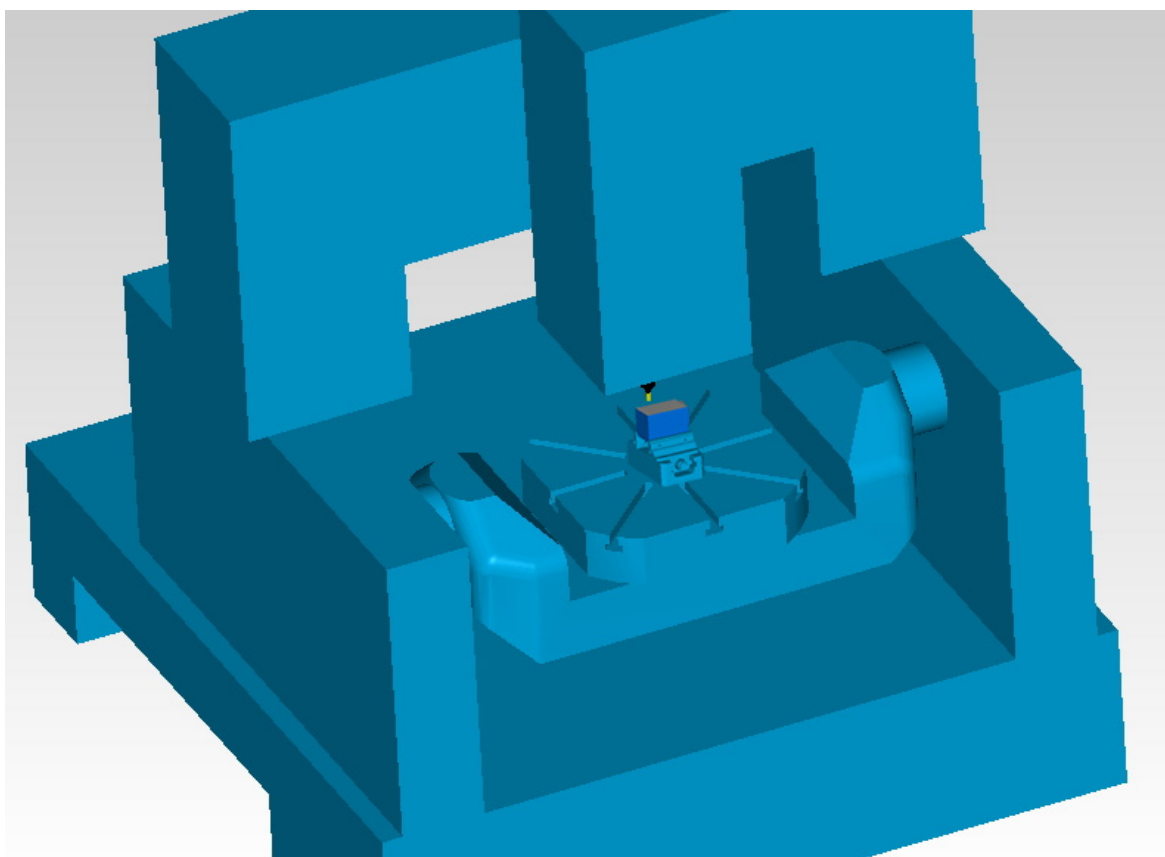
Pomocí 3D simulace je možné v programu detekovat kolize nástroje, držáku či vřetene (viz. obr. 103). Pokud při simulaci dojde ke kolizi, program nám automaticky simulaci zastaví, ukáže, kde ke kolizi došlo a nabídne možnosti jak pokračovat dále. Každý nástroj je při simulaci označen jinou barvou, případné kolize se označují barvou růžovou.



Obr. 103 Simulace se zobrazením nástroje, držáku a vřetene.

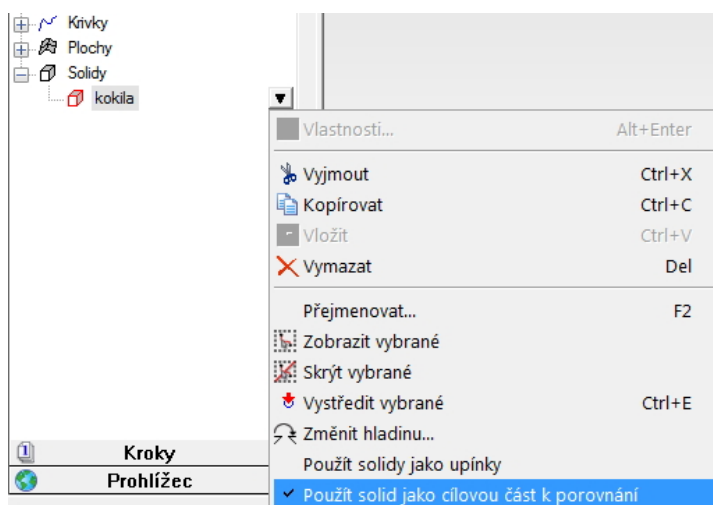
V databázi programu FeatureCAM je obsaženo mnoho dostupných tří až pětiosých konstrukcí strojů pro zobrazení v 3D simulaci. Pokud by žádná z připravených konstrukcí nevyhovovala, pak je možné do programu načíst vlastní konstrukci stroje. Tu je možné zvolit v posledním kroku nastavení ustavení polotovaru.

Do FeatureCAMu je možné také naimportovat další model a tento solid následně použít jako upínku. To se provede po označení celého solidu s následným kliknutím na ikonu „Použít solidy jako upínky“, která se nachází v hlavní nabídce – pohled – simulace. Poté je možné si celý proces 3D simulace spustit včetně zobrazení stroje a upínky (viz. obr. 104).



Obr. 104 Simulace se zobrazením stroje včetně upínacího svěráku.

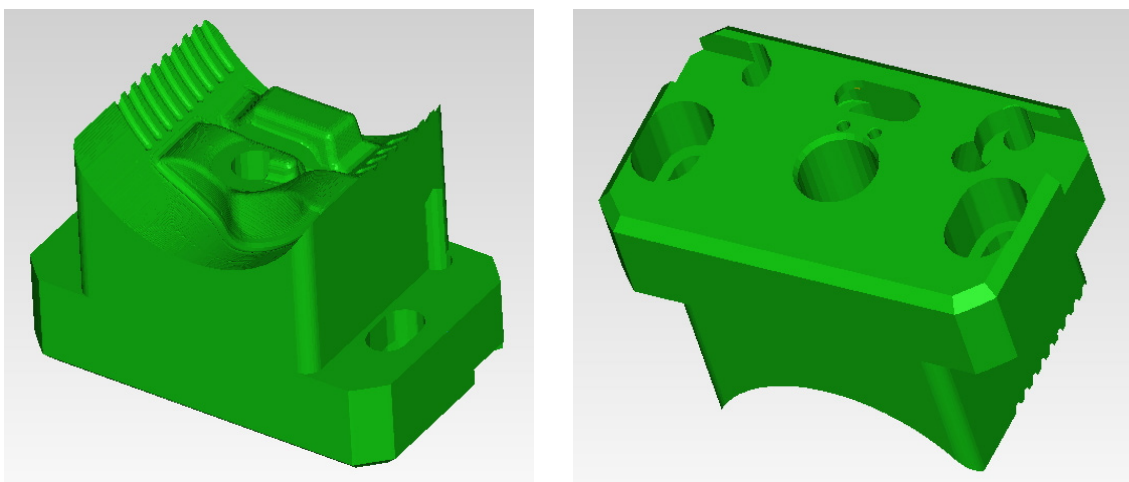
Dále je třeba zkontrolovat, zda se na součásti po jejím obrobení nenacházejí neobrobené zbytkové plochy a zároveň zda nástroj někde nenaboural do součásti. Proto je využita verifikace, kdy se obrobena součást porovnává s modelem. Toho lze ve FeatureCAMu snadno docílit tím, že je vybrán solid importované součásti a je u něj nastaveno „Použít solid jako cílovou část pro porovnání“ (viz. obr. 105).



Obr. 105 Nastavení solidu jako cílové části pro porovnání.

Následně je provedena kompletní simulace obrábění celé součásti, kdy po jejím dokončení je v hlavní nabídce pod záložkami pohled a simulace zapnuta funkce „Zobrazit porovnání součásti“, což výsledek simulace porovná se solidem importované součásti a barevně zobrazí výsledek obrábění. Zelená barva zobrazuje správně obrobené plochy, odstíny modré barvy zobrazují přebytečný materiál na plochách a odstíny červené barvy zobrazují místa, kde došlo k nabourání nástroje do modelu.

Na obr. 106 je vidět, že všechny plochy po porovnání obrobené součásti s modelem jsou zelené, což znamená, že během simulace žádný z nástrojů nenaboural do materiálu a že nezůstaly žádné neobrobené plochy. Můžeme tedy říci, že partprogram byl zadán úspěšně a bez chyb.



Obr. 106 Výsledek porovnání obrobené součásti se solidem modelu.

ZÁVĚR

V diplomové práci byla řešena kusová výroba formy z nástrojové oceli sloužící pro gravitační lití hliníkových pístů pro firmu KOVO Děčín spol. s.r.o. s využitím CAM systému FeatureCAM. Cílem práce bylo zjištění, jaké jsou možnosti softwaru FeatureCAM a jak by si poradil s výrobou této konkrétní součásti.

V práci byly dosaženy tyto cíle:

- vytvoření 3D modelu součásti a sestavy upnutí polotovaru,
- výběr vhodného CNC obráběcího centra,
- výběr potřebných obráběcích nástrojů a jejich řezných podmínek,
- charakteristika systému FeatureCAM a jeho vhodnosti pro HSC,
- řešení výběru vhodných strategií a technologií,
- vytvoření kompletního partprogramu pro obrobení součásti,
- provedení simulace a verifikace obráběcího procesu,
- zhotovení výkresové dokumentace součásti.

Hlavní část práce se věnovala vytvoření partprogramu pro obrobení součásti pomocí CAM softwaru FeatureCAM. Partprogram byl úspěšně vytvořen a to s ohledem na HSC obrábění tvrdých materiálů i na výběr nejvhodnějších strategií a technologií. Byly úspěšně provedeny optimalizace nájezdů a přejezdů nástrojů s cílem minimalizovat zbytečné přejezdy a zkrátit výrobní časy. Celkový čas pro obrobení součásti byl programem spočítán na 2 hodiny, 33 minut a 10 vteřin.

Správnost vytvořeného partprogramu byla nakonec úspěšně ověřena pomocí simulace a verifikace v prostředí systému FeatureCAM, přičemž nebyly objeveny žádné chyby, jako je nabourávání nástrojů či zbylý neobrobený materiál na součásti.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění - Kniha pro praktiky*. (Přel. z: Modern Metal Sutting - A Practical Handbook. Překlad M. Kudela.), 1. vyd., Praha : Scientia, s.r.o., 1997. 857 p. ed. J. Machač, J. Řasa, ISBN 91-97 22 99-4-6.
2. *Delcam FeatureCAM: cad cam software pro frézování, soustružení a drátové řezání* [online]. 2005 [cit. 2013-02-28]. Dostupné z WWW: <<http://www.delcam.cz/produkty/featurecam>>.
3. *Die Maschinenfabrik Berthold Hermle AG - C 42* [online]. 2010 [cit. 2013-03-03]. Dostupné z WWW: <<http://www.hermle.de/index.php?1590>>.
4. *Důležité aspekty vysokorychlostního obrábění*. MM Průmyslové spektrum [online]. 2002, č. 12 [cit. 2013-03-28]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/dulezite-aspekty-vysokorychlostniho-obrabeni.html>>. ISSN 1212-2572.
5. DVOŘÁČEK, Jan. *Analýza silového zatížení frézovacího nástroje při pětiosém frézování: Diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 92 s., příloh 12. Polzer Aleš.
6. HEIDENHAIN. *Dotykové sondy pro obráběcí stroje* [online]. 2011 [cit. 2013-04-07]. Dostupné z WWW: <http://www.heidenhain.cz/cs_CZ/php/dokumentace-informace/dokumentace/prospekty/popup/media/media/file/view/file-0475/file.pdf>.
7. HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje. 1. vyd.* Praha: MM publishing s. r. o., 2008. 240 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
8. *iTNC 530 konturové řízení pro frézovací, vrtací a vyvrtávací stroje a obráběcí centra* [online]. 2013 [cit. 2013-03-03]. Dostupné z WWW: <http://www.heidenhain.cz/cs_CZ/produkty-a-pouziti/rizeni-obrabecich-stroju/frezovani/itnc-530>.
9. JKZ Bučovice, a.s. *Ocel nástrojová pro práce za tepla W. Nr. 1.2343ESU* [online]. 2010, [cit. 2013-03-29]. Dostupný z WWW: <<http://www.jkz.cz/node/33>>.
10. KOČMAN, Karel. *Inovace studijních programů Strojírenské technologie : Ekologické a technologické aspekty HSC obrábění* [online]. 1999 [cit. 2013-03-28]. Dostupný z WWW: <http://esf.fme.vutbr.cz/modul/5/hsc_obrabeni_1.pps>.
11. KOČMAN, Karel. *Speciální technologie. Obrábění*. Vysoké učení technické v Brně, Akademické nakladatelství CERM Brno, 2004. 225 s. ISBN 80-214-2562-8.
12. KOVO Děčín spol. s r.o. - *CNC obrábění, nástrojárna* [online]. 2006 [cit. 2013-03-03]. Dostupné z WWW: <<http://www.kovodecin.cz>>.

13. *Makro-Grip® - The ideal vice for 5-face-machining - Lang Technik GmbH* [online]. 2011 [cit. 2013-03-07]. Dostupné z WWW: <<http://www.lang-technik.de/en/artikel/gruppen/51107.makro-grip-centre-vice.html>>.
14. MEYERS, Gary; GRAHAM, Don. *Jak na výběr optimálního nástroje pro obrábění forem*. PRŮMYSL.cz - Informační portál pro český průmysl [online]. 2012 [cit. 2013-03-28]. Dostupný z WWW: <<http://www.prumysl.cz/jak-na-vyber-optimalniho-nastroje-pro-obrabeni-forem/>>.
15. *Monolitní nástroje pro frézování Fraisa* [online]. 2012 [cit. 2013-04-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.semaco.cz/cz/rubriky/nastroje-pro-cnc-obrabeni-a-sluzby/nastroje-pro-obrabeni/frezovaci-nastroje-monolitni>>
16. *New HSM Toolpath Introduced in FeatureCAM®* [online]. 2004 [cit. 2013-04-02]. Dostupné z WWW: <http://www.delcam.com/languages/fr/news/press_article.asp?releaseId=171>.
17. *Obráběcí nástroje Sandvik Coromant : Rotační nástroje* [online]. 2012 [cit. 2013-04-09]. Dostupné z WWW: <http://www.sandvik.coromant.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/catalogues/cs-cz/ROT_D.pdf>
18. *Obrábění zasucha - ano, či ne?*. MM Průmyslové spektrum [online]. 2001, č. 11 [cit. 2013-03-30]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/obrabeni-zasucha-ano-ci-ne>>. ISSN 1212-2572.
19. *Obrábění zasucha - ano, či ne? (2. část)*. MM Průmyslové spektrum [online]. 2001, č. 12 [cit. 2013-03-30]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/obrabeni-zasucha-ano-ci-ne-2-cast>>. ISSN 1212-2572.
20. OETTLE, Matthias. *Tvrdé frézování v oblasti nástrojů a forem*. MM Průmyslové spektrum [online]. 2005, č. 4 [cit. 2013-04-03]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/tvrde-frezovani-v-oblasti-nastroju-a-forem.html>>. ISSN 1212-2572.
21. POLZER, A.; DVOŘÁK, J. *Internetový portál pro CNC a CAD/CAM technologie*. [online]. 2006. Dostupné z <<http://cadcam.fme.vutbr.cz>>.
22. PRÁŠIL, Tomáš. *Přimazávání olejovou mlhou*. MM Průmyslové spektrum [online]. 2008, č. 7 [cit. 2013-04-06]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/primazavani-olejovou-mlhou.html>>. ISSN 1212-2572.
23. SADÍLEK, Marek. *CAM systémy v obrábění I*. 1. vydání. Ostrava : VŠB - Technická Univerzita Ostrava, 2008. 153 s. ISBN 978-80-248-1821-4.

24. SADÍLEK, Marek. *Strategie frézování naklopeným nástrojem*. MM Průmyslové spektrum [online]. 2005, č. 11 [cit. 2013-03-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/strategie-frezovani-naklopenym-nastrojem.html>>. ISSN 1212-2572.
25. Sandvik Coromant. *Znalosti a zkušenosti* [online]. 2013 [cit. 2013-04-03]. Dostupné z WWW: <<http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/pages/default.aspx>>.
26. SINGAL, R. *Fundamentals of machining and machine tools*. I.K. International Publishing House Pvt., 2008. xii, 369 s. ISBN 978-81-89866-66-2.
27. SKOPEČEK, T.; HOFMANN, P. *Frézovací strategie při výrobě forem a zápuštěk*. MM Průmyslové spektrum [online]. 2005, č. 5 [cit. 2009-04-17]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/frezovaci-strategie-pri-vyrobe-form-a-zapustek.html>>. ISSN 1212-2572.
28. SKOPEČEK, Tomáš; HOFMANN, Petr; CIBULKA, Václav. *Shrnutí problematiky HSC tvrdého frézování tvarových ploch*. MM Průmyslové spektrum [online]. 2006, č. 12 [cit. 2013-03-24]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/shrnuti-problematiky-hsc-tvrdeho-frezovani-tvarovych-ploch.html>>. ISSN 1212-2572.
29. *Tréninková příručka FeatureMILL 3D*. DELCAM BRNO, s.r.o., 2006. 103 s. Dostupné z WWW: <<http://www.delcam.cz/produkty/featurecam/download-feaurecam>>.
30. TSCHÄTSCH, Heinz. *Applied machining technology*. Dordrecht: Springer, 2009. xvii, 398 s. ISBN 978-3-642-01006-4.
31. *Vyspělé strategie ve 3D frézování*. MM Průmyslové spektrum [online]. 2004, č. 12 [cit. 2013-03-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/vyspele-strategie-ve-3d-frezovani.html>>. ISSN 1212-2572.
32. *Začínáme pracovat se softwarem FeatureCAM*. DELCAM BRNO, s.r.o., 2006. 90 s. Dostupné z WWW: <<http://www.delcam.cz/produkty/featurecam/download-feaurecam>>.
33. ZEMAN, P.; ŠAFEK, J.; VANĚČEK, D. *Technologie HSC : Velké ekonomické i ekologické přínosy*. Technik : Technické a technologické novinky pro výzkum, výrobu a trh [online]. 2002 [cit. 2013-02-28]. Dostupný z WWW: <http://technik.ihned.cz/c4-10004030-11353150-800000_d-technologie-hsc>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
AFR	[-]	Automatické rozpoznávání technologických prvků (Automatic Feature Recognition)
CAD	[-]	Computer Aided Design
CAM	[-]	Computer Aided Manufacturing
CL data	[-]	Cutting Location Data
CNC	[-]	Počítačové číslicové řízení (Computer Numerical Control)
HRC	[HRC]	Tvrdost materiálu podle Rockvella
HSC	[-]	Vysokorychlostní obrábění (High Speed Cutting)
MQL	[-]	Minimální použití procesní kapaliny (Minimal Quantity Lubrication)
NC	[-]	Číslicové řízení (Numerical Control)
STEP	[-]	Standard for the exchange of product model data
VBD	[-]	Vyměnitelná břitová destička

Symbol	Jednotka	Popis
D	[mm]	Průměr nástroje
Ra	[μm]	Průměrná aritmetická odchylka posuzovaného profilu
a_p	[mm]	Šířka záběru ostří
f_z	[mm.min ⁻¹]	Posuv na zub
n	[ot.min ⁻¹]	Otáčky nástroje
r_ε	[mm]	Poloměr zaoblení břitu nástroje
v_c	[m.min ⁻¹]	Řezná rychlost
v_f	[mm.min ⁻¹]	Rychlost posuvu
z_n	[mm]	Počet břitů nástroje
β_r	[°]	Úhel naklonění nástroje
π	[-]	Ludolfovo číslo

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Výkresová dokumentace
Příloha 2	3D model součásti (CD ROM)
Příloha 3	Sestava upnutí polotovaru (CD ROM)