Vliv volby strategie hrubovacích operací při frézování kapsy

Bc. Dominik Roman

Diplomová práce
2022

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	**Bc. Dominik Roman**
Osobní číslo:	**T20111**
Studijní program:	**N0788A270002 Výrobní inženýrství**
Specializace:	**Stroje a nástroje pro zpracování polymerů a kompozitů**
Forma studia:	**Prezenční**
Téma práce:	**Vliv volby strategie hrubovacích operací při frézování kapsy**

Zásady pro vypracování

1. Vypracujte literární studii na dané téma
2. Proveďte zhodnocení současného stavu
3. Simulujte možnosti obrábění
4. Získaná data analyzujte

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- KOCMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění.* Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, s. ISBN 978-80-7204-722-2.
- BÍLEK, Ondřej a Imrich LUKOVICS. *Výrobní inženýrství a technologie.* Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, 2014, 173s. ISBN 978-80-7454-471-2.
- RIBEIRO, João, Hernâni LOPES, Luis QUEIJO a Daniel FIGUEIREDO. Optimization of Cutting Parameters to Minimize the Surface Roughness in the End Milling Process Using the Taguchi Method. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. 2017, 61(1), 30-35

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Řezníček, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **3. ledna 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2022**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 18. února 2022

PROHLÁŠENÍ AUTORA
DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

……..
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce se skládá z teoretické a praktické části. Teoretická část práce se zaobírá základními druhy frézování, jejich aplikací a kinematikou řezného procesu. Dále jsou v práci popsány rozdíly frézovacích nástrojů, materiály, z nichž jsou vyrobeny a druhy upínacích systémů. Poté jsou zhodnoceny osové systémy strojů společně s jejich limity. Práce se dále zaměřuje na téma strategií a metod CNC obrábění, jež se následně prolínají do praktické části práce.

V praktické části jsou vytvořeny čtyři součásti, z nichž dvě byly obrobeny a dvě simulovány na stroji. Nástroje společně s obráběcím strojem byly využity v rámci univerzity. Praktická část se zaobírá porovnáním a grafickým zhodnocením použitých strategií a metod za pomocí softwaru Siemens NX a jejich srovnání se skutečností, kdy se v některých případech výsledky značně liší.

Klíčová slova: frézování kapsy, CNC (Číslicové řízení), nástroje s VBD, povrch, hloubka řezu, obrobek, strategie

ABSTRACT

The diploma thesis consists of a theoretical and a practical part. The theoretical part deals with the basic types of milling, their applications, and the kinematics of the cutting process. Furthermore, the work describes the differences between milling tools, the materials from which they are made and the types of clamping systems. Then the axis systems of the machines are evaluated together with their limits. The work also deals with the topic of strategies and methods of CNC machining, which then blend into the practical part of the work.

In the practical part, four components are created, two of which were machined and two simulated on the machine. The tools with machining center were used within the university. The practical part deals with the comparison and graphical evaluation of the strategies and methods using Siemens NX software and their comparison with the reality that in some cases the results differ significantly.

Keywords: pocket milling, CNC (Computerized Numerical Control), indexable tools, surface, depth of cut, workpiece, strategies

Tímto bych chtěl poděkovat celé své rodině za veškerou podporu. Největší díky však patří rodičům, jež mě po celou dobu studia nejen živili, ale zajímali se o celkový průběh mého dosavadního snažení. Vřelé díky náleží i přítelkyni, a to především za kontrolu pravopisu a za pravidelný přísun večeří během psaní práce. Poděkování si zaslouží také moje babičky, jež se těšily z každého mého úspěchu a při střetnutí se vždy otázaly, jak to jde ve škole. Dosavadní úspěšné studium tedy není výsledkem pouze mé práce, ale celé mojí rodiny.

Speciální poděkování patří Ing. Martinu Řezníčkovi, Ph.D. za všechny rady, nespočet konzultací, a především za velkou trpělivost. V průběhu celé práce mi byl velmi nápomocen a vždy vyšel vstříc. Jsem rád, že jsem svou finální práci mohl sdílet právě s ním.

OBSAH

ÚVOD **10**
I TEORETICKÁ ČÁST **11**
1 FRÉZOVÁNÍ **12**
1.1 DRUHY FRÉZOVÁNÍ 12
1.1.1 Čelní frézování 13
1.1.2 Válcové frézování 13
1.1.3 Sousledné frézování (Climb milling) 14
1.1.4 Nesousledné frézování (Conventional milling) 14
1.2 KINEMATIKA ŘEZNÉHO PROCESU 15
1.3 GEOMETRIE FRÉZY 16
2 FRÉZOVACÍ NÁSTROJE **18**
2.1 NÁSTROJE MONOLITNÍ 18
2.2 NÁSTROJE S VBD 18
2.3 DRUHY NÁSTROJŮ 19
2.3.1 Rohová fréza (End mill) 20
2.3.2 Rohová hrubovací fréza (Roughing end mill) 20
2.3.3 Čelní fréza (Face mill) 20
2.3.4 Kulová fréza 21
2.4 UPÍNÁNÍ NÁSTROJŮ 22
2.4.1 Hydraulické upínače 22
2.4.2 Tepelné upínače 23
2.4.3 Upínače Weldon 24
2.4.4 Kleštinové upínače 25
2.5 NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY 26
2.5.1 Rychlořezné oceli 27
2.5.2 Slinuté karbidy 28
2.5.3 Řezná keramika 29
2.5.4 Kubický nitrid boru (KBN) 30
2.5.5 Polykrystalický diamant (PKD) 30
2.6 POVLAKOVÁNÍ NÁSTROJŮ 31
2.6.1 Technologie PVD 31
2.6.2 Technologie CVD 32
2.6.4 Povlak TiAlN 33
2.6.5 Povlak KTRN 34
3 CNC OBRÁBĚNÍ **35**
3.1 SOUŘADNICOVÝ SYSTÉM 35
3.1.1 3osý systém 36
3.1.2 4osý systém 36
3.1.3 5osý systém 36

3.2 TVORBA CNC PROGRAMU 37
3.2.1 CAD systém 38
3.2.2 CAM systém 38
3.2.3 Postprocesor 38
3.3 METODY CNC OBRÁBĚNÍ 39
3.3.1 Metoda obrábění konturováním 39
3.3.2 Vzor řezu řádkováním 40
3.3.3 Metoda obrábění ponorným frézováním 41
II PRAKTICKÁ ČÁST 42
4 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE 43
5 POUŽITÉ STROJE A NÁSTROJE 44
5.1 NÁSTROJ R217.21-0816.RE-LP06.2A 44
5.1.1 Břitová destička LPHT060310TR-M06 MP2050 45
5.2 NÁSTROJ R217.69-0816.RE-10-2A 46
5.2.1 Břitová destička XOMX10T308TR-ME07 MS2050 47
5.3 UPÍNAČ E347658200860 49
5.4 NÁSTROJ SD523-16-48-25R7 50
5.4.1 Břitové destičky SPGX0502-C1 T400D a SCGX050204-P2 DP3000 50
5.5 UPÍNAČ E346958425100 52
5.6 STROJ DMG MORI DMU 50 3. GENERACE 53
5.7 SVĚRÁK LANG 54
5.8 OCEL 1.1730 56
6 SIMULOVANÁ DATA SOUČÁSTI Č.1 57
6.1 VLIV VOLBY ŘEZNÉ DESTIČKY METODOU CAVITY MILL 57
6.2 VÝCHOZÍ HODNOTA PROCENTUÁLNÍHO ZASTOUPENÍ NÁSTROJE PŘI OBRÁBĚNÍ ZAOBLENÍ 64
6.3 VLIV VOLBY TYPU NÁJEZDU NA OBRÁBĚCÍ ČAS 65
6.4 VLIV VOLBY VZORU ŘEZU PŘI OBRÁBĚNÍ KAPSY 68
6.5 POROVNÁNÍ METOD V PŘÍPADĚ PRVNÍ SOUČÁSTI 74
7 SIMULOVANÁ DATA SOUČÁSTI Č.2 81
7.1 ANALÝZA ZBYTKOVÉHO MATERIÁLU V ZÁVISLOSTI NA PROCENTUÁLNÍM ZASTOUPENÍ NÁSTROJE 82
7.2 ANALÝZA OBRÁBĚCÍCH ČASŮ V ZÁVISLOSTI NA PROCENTUÁLNÍM ZASTOUPENÍ NÁSTROJE 85
7.3 POROVNÁNÍ ROZDÍLŮ DRÁHY NÁSTROJE 86
7.4 POROVNÁNÍ ROZDÍLŮ PROCENTUÁLNÍHO ZASTOUPENÍ PRŮMĚRU NÁSTROJE NA TVORBU ZAOBLENÍ 87
8 POROVNÁNÍ SKUTEČNÝCH ÚDAJŮ S VYGENEROVANÝMI 89

8.1 OBRÁBĚNÍ SOUČÁSTI Č.1 90
8.2 OBRÁBĚNÍ SOUČÁSTI Č.2 91
8.3 OBRÁBĚNÍ SOUČÁSTI Č.3 95
8.4 OBRÁBĚNÍ SOUČÁSTI Č.4 98
9 DISKUSE VÝSLEDKŮ 100
ZÁVĚR 102
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY 103
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK 107
SEZNAM OBRÁZKŮ 109
SEZNAM TABULEK 113

ÚVOD

Při technologickém pokroku dochází k růstu požadavků na výrobky především v oblastech jejich tvarové složitosti, kvalitě povrchu či užití speciálních materiálů pro specifické vlastnosti. Zároveň je snaha zamezit jakékoliv chyby, zrychlit proces výroby a tím tedy zvýšit celkovou efektivitu.

Víceosé obrábění patří k jednomu z nejuniverzálnějších způsobů opracování materiálu. Při vhodně použitých nástrojích a vyhovujících pracovních podmínkách, jako je kupříkladu hloubka řezu, je možné opracovat celou řadu obrobků na jediném stroji při splnění často nekompromisních tolerancí.

Současné technologie umožňují obrábět složité tvarové součásti, jenž by jinými metodami bylo méně efektivní zhotovit z důvodu nutnosti dodatečných operací. Kontrola a následná eliminace chyb, jako je kolize nástroje či nevhodně zvolená strategie, probíhá v softwarech zaměřujících se na simulace obráběcích procesů. Jedním z těchto programů je Siemens NX, který nabízí komplexní simulace, kde je k nalezení celá řada informací napomáhajících k optimalizaci obráběcího procesu. Zde patří verifikace dráhy nástroje společně s pracovními časy a výslednou analýzou obrobené součásti poukazující na jakost povrchů. Přestože jsou CAM softwary ekonomicky náročné a vyžadují pozornost zkušeného pracovníka, při obrábění složitějších dílců tvoří častokrát nedílnou součást procesu. Návratnost je na velmi vysoké úrovni, neboť lze předcházet poškození stroje či nástroje. Díky mnoha možnostem nastavení řezných podmínek a strategií je dosaženo optimální efektivity bez kompromisů.

V některých případech se však vygenerované údaje ze softwaru neshodují s těmi reálnými, z toho důvodu je vždy nutno dbát na prvotní odzkoušení operace pouze simulací na stroji, tedy bez vnikání nástroje do materiálu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 FRÉZOVÁNÍ

Frézky mají ve světě výroby značný vliv už desítky let. Řada inovací by bez nich nebyla možná a nikdy by tak nespatřily světlo světa.

Jedná se o jednu z nejpoužívanějších technologií obrábění, kdy nástroj, v tomto případě fréza za pomoci rotačního pohybu vniká do obráběného materiálu. Fréza, jež se skládá z několika zubů umístěných po obvodu, odřezává materiál přerušovaně. Obráběná součást může být například z kovu, dřeva či polymeru. Každý z těchto materiálů klade nástroji jiný odpor, z čehož se odvíjí posuv, rychlost či záběr ostří. Vřeteno, v němž je upnutý nástroj zpravidla koná rotační a vertikální pohyb, zatímco pracovní stůl koná pohyb horizontální. Příklad nástrojařské frézky s digitálním odměřovačem je možno nalézt na Obr. 1. [1], [2]

Obr. 1 – Nástrojařská frézka s digitálním odměřovačem [3]

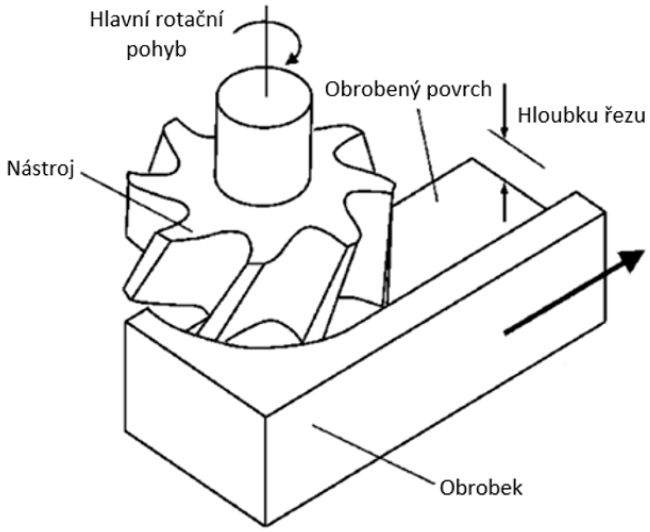
1.1 Druhy frézování

Frézováním se vyrábí jak rovinné, tak i tvarové plochy. Jednotlivé druhy frézování jsou rozeznávány dle způsobu záběru frézy. Dělí se na čelní a válcové.

Druhé rozdělení frézování je dle smyslu rotace vůči obrobku. V tomto případě se dělí na sousledné a nesousledné. [4]

1.1.1 Čelní frézování

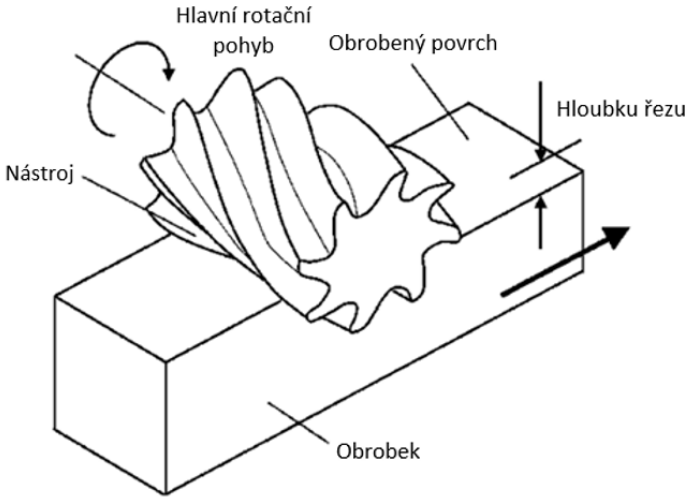
Z Obr. 2 je patrné, že v případě čelního frézování jsou zuby k nalezení po obvodu a současně i na čele nástroje. Osa frézy je kolmá na obráběnou plochu a dochází ke stále stejnému množství odebírané třísky, což způsobuje i konstantní zatížení stroje. [2], [4]



Obr. 2 – Čelní frézování [5]

1.1.2 Válcové frézování

Obdobně jako u čelního frézování, i zde dochází k úběru materiálu břity vytvořenými po obvodu. Již však nedochází k úběru materiálu čelem nástroje. V tomto případě je fréza kolmá na směr posuvu obrobku. K obrobení plochy dohází rotačním pohybem nástroje a zároveň přímočarým pohybem obrobku, což je patrné na Obr. 3. Dráha břitu je tedy prodloužená cykloida. Nejčastěji se tato metoda uplatňuje při použití tvarových fréz. [2], [4]



Obr. 3 – Válcové frézování [5]

Frézování je dále možno rozlišit na sousledné a nesousledné jež se odvíjí od kinematiky procesu obrábění. [2], [4]

1.1.3 Sousledné frézování (Climb milling)

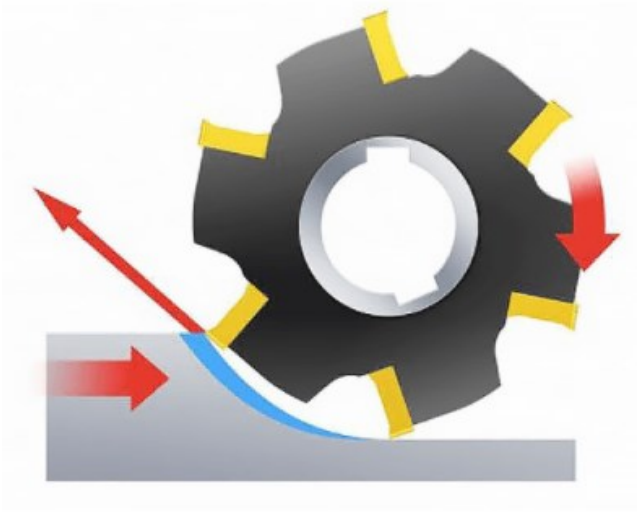
Z Obr. 4 je patrné, že při sousledném frézování je rotující nástroj ve směru s posuvem obrobku. To má za následek působení sil směrem dolů, což při nesprávném předpětí mezi posuvným šroubem a maticí stolu způsobuje nestejnoměrný posuv. Tím pádem může docházet k poškození nástroje, v horším případě k poškození stroje samotného.

Zároveň je však sousledné frézování vyhledávanějším způsobem pro kvalitněji opracovaný povrch, neboť zpočátku zub odebírá největší objem materiálu, jehož množství se postupně snižuje až na minimální hodnotu. [2], [6]

Obr. 4 – Sousledné frézování [6]

1.1.4 Nesousledné frézování (Conventional milling)

Smysl rotace nástroje je při nesousledném frézování v protisměru s posuvem obráběné plochy. V tomto případě dle Obr. 5 dochází k pozvolnému vnikání nástroje do obrobku. Řezná destička je nucena vniknout do materiálu, jelikož počáteční úběr je minimální a častokrát dochází ke skluzu břitu. To má za následek vyšší teplotu nástroje, větší namáhání a tím pádem i kratší životnost. Řezná síla nástroje se snaží posouvat obrobek dále od něj, zatímco radiální síla způsobuje tendenci obrobku zvedat se směrem vzhůru od stolu stroje. Nesousledné frézování je žádoucí kupříkladu při obrábění vysokoteplotních slitin s použitím keramických řezných destiček. [2], [6]



Obr. 5 – Nesousledné frézování [6]

Rozdíly mezi sousledným a nesousledným frézováním porovnává Tab. 1.

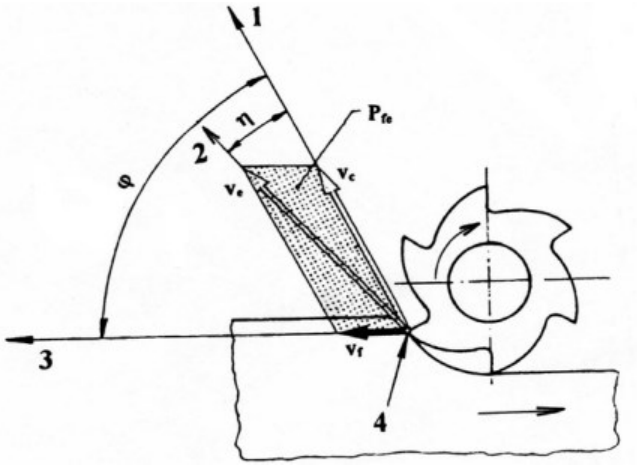
Tab. 1 – Rozdíly mezi sousledným a nesousledným frézováním [6]

Vlastnosti	Sousledné frézování	Nesousledné frézování
Úběr třísky	Od velkého úběru po malý	Od malého úběru po velký
Prokluzování	Neprokluzuje	Prokluzuje
Opotřebení nástroje	Pomalé	Rychlé
Vibrace	Velké	Malé
Kvalita povrchu	Dobrá	Špatná
Ztráta energie	Malá	Velká (5-15 %)

1.2 Kinematika řezného procesu

Hlavní pohyb v případě frézování realizuje obráběcí stroj z Obr. 6. Jedná se o rotační pohyb nástroje. Směr hlavního pohybu je určen bodem na špičce ostří vzhledem k obrobku. Řezná rychlost v_c je definována jako okamžitá rychlost tohoto hlavního pohybu. Posuvový pohyb společně s hlavním určuje, zda se tříska z obráběného povrchu odřezává plynule či přerušovaně. V případě frézování se jedná pouze o plynulý pohyb, přičemž přerušovaný se děje při hoblování či například obrážení. Posuvová rychlost v_f je definována jako rychlost posuvového pohybu vzhledem k bodu ostří vůči obroku. Úhel posuvového pohybu φ je měřený v pracovní rovině P_{fe}. Jedná se o úhel mezi směrem řezného a posuvového pohybu.

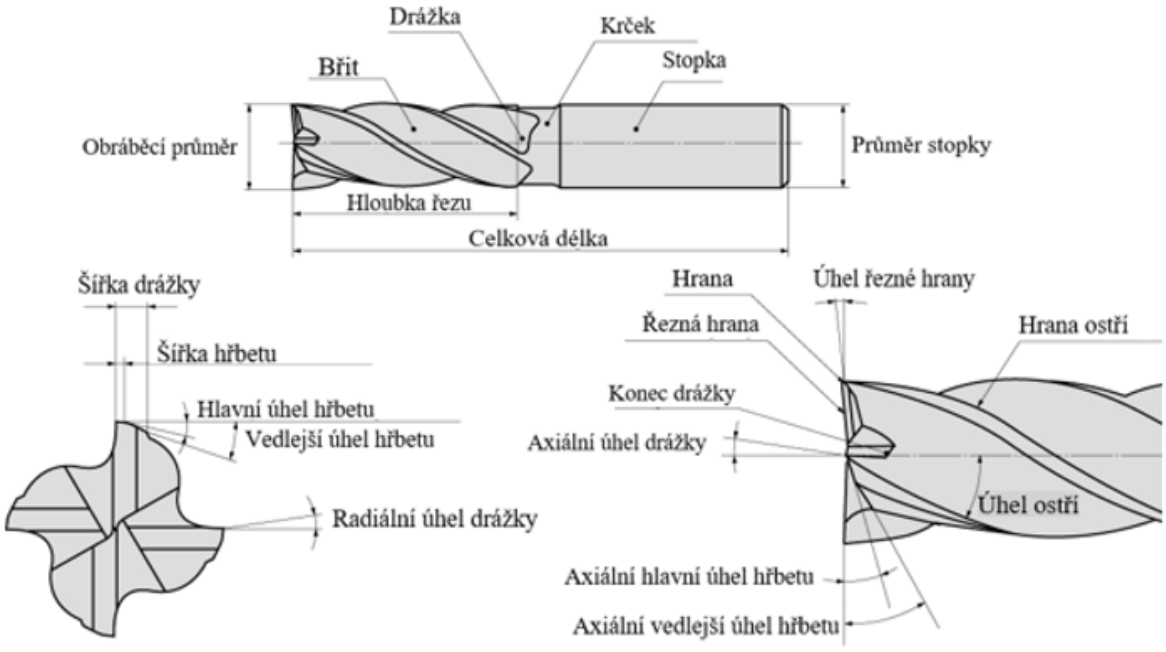
η je specifikován jako úhel mezi směrem hlavního a řezného pohybu a značí se jako úhel řezného pohybu. Měří se taktéž v pracovní rovině $P_{fe,}$ jako v případě úhlu posuvového pohybu. [2]



Obr. 6 – Kinematika řezného procesu při nesousledném frézování [2]
1 – směr pohybu hlavního; 2 – směr pohybu řezného; 3 – směr pohybu posuvového; 4 – uvažovaný bod ostří

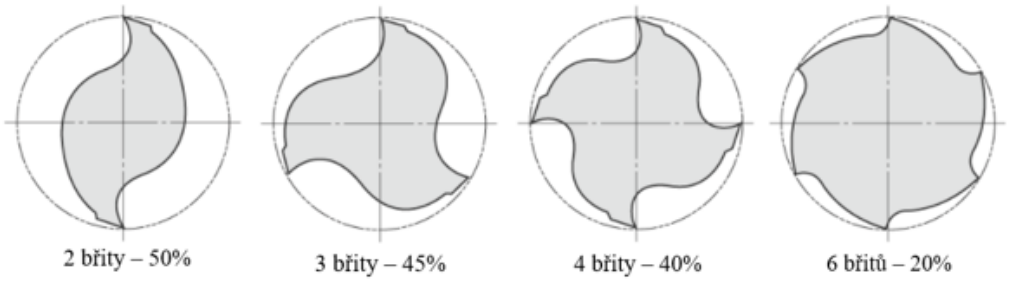
1.3 Geometrie frézy

Na Obr. 7 je možno vidět geometrii stopkové monolitní frézy, která patří k nejpoužívanějším. Maximální hloubka řezu neboli využitelná délka frézy určuje, jak velkou hloubku dutiny lze nástrojem obrábět bez použití speciálních držáků, aniž by došlo ke kolizi. Stopka slouží k upínání nástroje a dle jejího průměru a tvaru se volí požadovaný držák. Prostor mezi jednotlivými břity poskytuje dostatek místa pro odvod třísky. Dalším důležitým parametrem je úhel ostří, v tomto případě šroubovice. Úhel se pohybuje v rozmezí 12° až 60° v závislosti na požadavcích. Nejmenší úhel šroubovice zajišťuje největší tuhost. Používá se tedy při obrábění velmi tvrdých materiálů při nižších posuvových rychlostech. Úhel šroubovice 38° je vhodný pro vysokorychlostní obrábění železných materiálů. Nevyšší úhel šroubovice, tedy 60°, slouží především pro obrábění lehce obrobitelných materiálů. Je tak zajištěno jinak problematického zařezání do měkčích součástí. Při vyšších hodnotách úhlu však dochází k tvorbě výrazných axiálních sil, jež se snaží nástroj vytáhnout z upínače. Proto je vhodné nástroj kombinovat např. s držáky typu Weldon se stavěcími šrouby. [7], [8]



Obr. 7 – Geometrie frézy [8]

Velkou roli při obrábění hraje také počet břitů nástroje, který je k nahlédnutí na Obr. 8. V dnešní době se většinou neželezné kovy obrábí nástrojem se třemi břity, což výrazně zvyšuje produktivitu a zároveň umožňuje řádný odvod třísek. Ve všeobecnosti lze však říci, že čím více břitů se na nástroji nachází, tím je obrábění kvalitnější. Nástroj s vyšším počtem břitů tedy slouží k dokončovacím operacím, jež nevyžadují výrazný odvod třísek jako v případě hrubování. Díky pokroku v metalurgii je dnes možné v extrémních případech nalézt i nástroje s dvanácti břity po obvodu. Došlo k výraznému prodloužení životnosti, vyšší tuhosti a tím k menšímu průhybu nástroje při obrábění. [9]



Obr. 8 – Porovnání počtu břitů s množstvím odebrané třísky [8]

2 FRÉZOVACÍ NÁSTROJE

Nástroj, v tomto případě fréza, se pomocí upínače umístí do vřetena stroje. Zásadní roli hraje také výběr materiálu nástroje, který je specifický svými vlastnostmi a tím pádem způsobem použití.

2.1 Nástroje monolitní

Jak název napovídá, jedná se o nástroj o jednom celku. Monolitní nástroje nachází využití i v dnešní době, přestože se jejich uplatnění na trhu snižuje od vzniku břitových destiček v 50. letech minulého století. [10]

Společnost McKinsey & Co. uvádí, že ve Spojených Státech roku 2017 měly nejvyšší podíl na trhu s frézovacími nástroji právě ty s VBD, a to konkrétně 63 %. [11]

Přestože jsou frézy s vyměnitelnými destičkami značně populárnější v případě hrubovacích operací, při dokončování jsou stále používanější ty monolitní. Hlavním důvodem je požadavek vyšší přesnosti či nutnost obrábět menšími nástroji. [11]

Například švédská společnost Seco Tools, s.r.o. nabízí vrtáky s vyměnitelnými korunkami od průměru 9,52 mm a destičkami od 14,275 mm. Tedy všechny otvory s menšími rozměry je zapotřebí vytvořit pomocí monolitních vrtáků, jež společnost nabízí od průměru 0,1 až 20 mm. Pokud je naopak nutností zhotovit otvor větších rozměrů, není jiná možnost než přihlédnout k vrtákům s vyměnitelnými destičkami, jež v případě společnosti Seco dosahují průměru až 160 mm. [12]

Tento fakt také zapříčiňuje daleko vyšší zastoupení monolitních nástrojů v případě vrtacích operací, kde vrtáky s VBD mají podíl na americkém trhu pouze 30 %. [11]

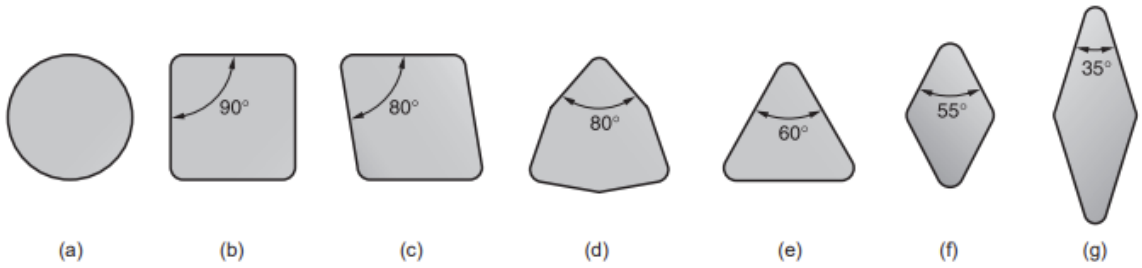
2.2 Nástroje s VBD

Nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami mají obvykle ocelové tělo, ve kterém jsou vytvořeny přesné drážky pro umístění těchto destiček. Těla zároveň poskytují způsob upnutí do vřetene stroje. Největší výhodu mají břitové destičky právě v možnosti jednoduché výměny. Ostření monolitních nástrojů představuje značné množství práce, v případě velkých podniků častokráte docházelo k tvorbě brusných oddělení se zaměřením na tuto problematiku. Výměna břitu u VBD se provádí uvolněním destičky, jež se obvykle pouze pootočí či překlopí (indexování) o 180° na protilehlou řeznou hranu. To nabízí dvojnásobné množství odvedené práce. V případě úplného poničení destičky se opět snadno vyndá,

většinou za pomoci povolení šroubu, jež destičku drží na místě, a nahradí se novou. Celý proces je rychlý a efektivní, tedy bez výrazné ztráty pracovního objemu. Zároveň při poškození pouze jedné destičky není třeba výměny celého nástroje, jako je tomu u těch monolitních. [10]

VBD se většinou vyrábí lisováním karbidového prášku s pojivem do matrice pod vysokým tlakem a teplotou. Výsledkem procesu je řezná hrana, jež je velmi tvrdá, avšak nepříliš ostrá. To může omezovat schopnost nástroje účinně frézovat při nižších hloubkách řezu, a to především při dokončování. Na druhou stranu méně ostrá hrana je prevencí proti jejímu zlomení. Různé variace destiček společně se specifickým tvarem drážek mohou způsobovat jiný úhel dolehnutí na tělo nástroje a tím přispívat k natočení řezné roviny. Výsledkem může být nekvalitně či nesprávně obrobený povrch. [10], [13]

Několik variant vyměnitelných břitových destiček je možno nalézt na Obr. 9.



Obr. 9 – Varianty VBD [13]

(a) kruh, (b) čtverec, (c) kosočtverec s úhly 80°, (d) šestiúhelník, (e) trojúhelník, (f) kosočtverec s úhly 55°, (g) kosočtverec s úhly 35°

Vzhledem ke stále se zvyšujícím požadavkům na modularitu nástrojů, méně objemnější skladování, vyšší produktivitu společně s delší životnost nástroje bude technologie s VBD dosahovat stále většího pokroku a nahrazovat tak zastaralé monolitní nástroje. [10]

2.3 Druhy nástrojů

Na trhu je mnoho druhů fréz a každá z nich má rozdílná specifika – rozdílný tvar, s tím spojené použití a řezné vlastnosti. Nejsou to však jen frézy, jež se při obrábění používají. Častokrát se nelze obejít bez vrtání, vyhrubování, vystružování, závitování či zahlubování. Všeobecně lze nástroje rozdělit do dvou základních skupin – monolitní nástroje a s vyměnitelnými břitovými destičkami (VBD). Při výběru je také potřeba dbát na kompatibilitu nástroje s upínačem, jež se umisťuje do vřetena stroje.

Druhy nástrojů používaných při CNC obrábění: [14], [15]

- Rohové frézy
- Čelní frézy
- Kulové frézy
- Kotoučové frézy
- Zahlubovací frézy
- Srážecí frézy
- Závitovací frézy, a další

2.3.1 Rohová fréza (End mill)

Společně s čelní frézou se jedná o nejpoužívanější druh. Nástroj obrábí jak bokem nástroje, tak i čelem. Obvykle má ploché dno, není to však podmínkou. Na trhu se nachází i zaoblené či mírně zkosená čela stopkových fréz. [15], [16]

2.3.2 Rohová hrubovací fréza (Roughing end mill)

Jak název napovídá, tento typ rohové frézy slouží specificky pro hrubovací operace. Vyšší účinnost obrábění zajišťují zuby, které se nachází po obvodu ostří nástroje, jak je možné vidět na Obr. 10. S obrobkem v tomto případě přichází do styku více zubů současně, což zajišťuje i menší rozměry odřezávané třísky a tím snadnější čištění. Další výhoda spočívá ve snížení chvění a vibrací, které vznikají při hrubovacích operacích, a to z důvodu odebírání většího množství materiálu. Na druhou stranu zuby vytváří drsný povrch, jež je nutné společně s požadovaným přídavkem obrobit. [15]

Obr. 10 – Rohová hrubovací fréza [16]

2.3.3 Čelní fréza (Face mill)

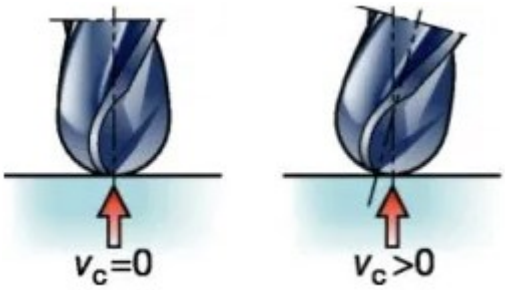
Oproti rohovým frézám dochází k úběru materiálu především čelem nástroje. Vyrábějí se výhradně s vyměnitelnými břitovými destičkami. Jedná se o velmi produktivní nástroje

většinou s velkým průměrem. Například společnost Seco Tools, s.r.o. se sídlem ve Švédsku nabízí čelní frézy od průměru 19 mm až do neuvěřitelných 500 mm. Geometrie těchto nástrojů je při dokončování většinou odlišná. V tomto případě jsou břitové řezné destičky umístěny v ose horizontálně k ploše obrobku, jak je k vidění na Obr. 11. Naopak hrubovací čelní frézy mají břitové destičky umístěny v ose nástroje, což zapříčiňuje větší úběr materiálu. [15], [16]

Obr. 11 – Čelní frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami [17], [18]
R230.19-0050-SN1203-5A (vlevo) a R220.53-0050-09-5A (vpravo)

2.3.4 Kulová fréza

Kulové frézy se používají především pro obrábění tvarových ploch jako je například tvorba rádiusů či víceosé obrábění. Při opracování rovinných ploch je velmi neproduktivní. Jediným řešením je vyosení nástroje. V opačném případě nedochází k téměř žádnému úběru třísky. To je zapříčiněno nulovou řeznou rychlostí v ose nástroje. Nakloněním vřetena o 10 až 15° dojde k daleko produktivnějšímu obrábění, jelikož je docíleno posunutí oblasti řezu směrem od osy nástroje. O tomto faktu pojednává Obr. 12.



Obr. 12 – Řezná rychlost u kulových fréz [19]

Natočení není třeba u tvorby zaoblení, neboť zde nástroj obrábí bokem. V tomto případě je potřeba zvolit poloměr kulové frézy identický či menší s poloměrem zaoblení. [19]

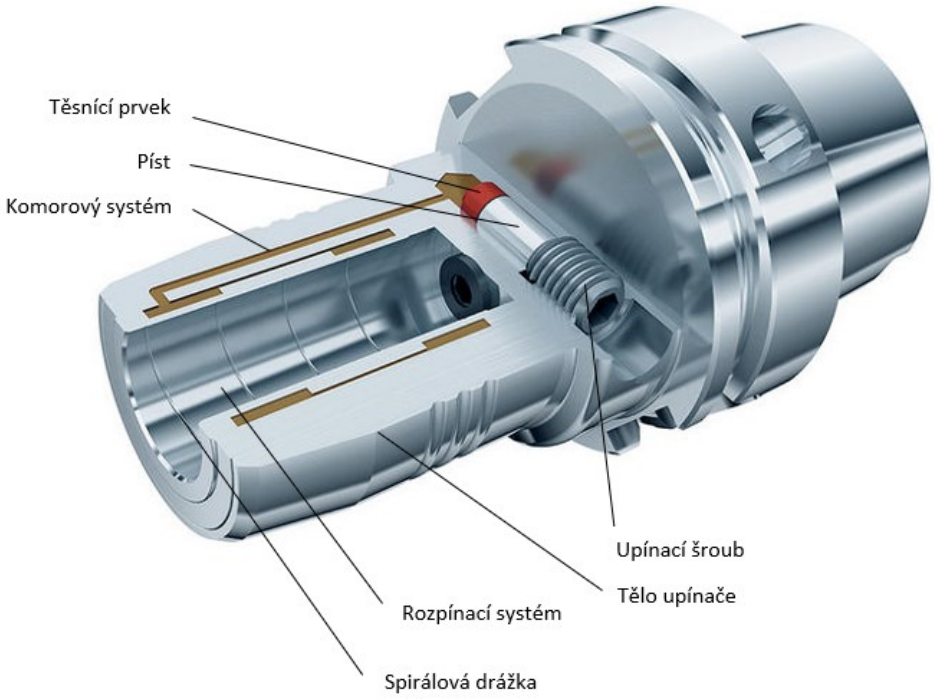
2.4 Upínání nástrojů

Fréza vzhledem ke svému pohybu a otáčkám musí být pevně upnuta, aby nedošlo k poškození nástroje či obroku, v horším případě ke zranění obsluhy stroje. Kvalitním upnutím je zároveň dosaženo i přenosu požadovaného kroutícího momentu na nástroj. Dále má značný vliv nejen na kvalitu opracovaného povrchu, ale i na celkovou životnost nástroje díky snížené házivosti.

2.4.1 Hydraulické upínače

V dnešní moderní době je možno použít kvalitnějšího upnutí s využitím hydraulického upínače. Popis technologie lze vidět na Obr. 13. Těsnící prvek se společně s pístem pohybuje za pomoci utahování upínacího šroubu. To způsobuje zvyšování tlaku kapaliny v komorovém systému a tím dochází ke stahování rozpínacího pouzdra, jež je v přímém kontaktu s nástrojem. [20], [21]

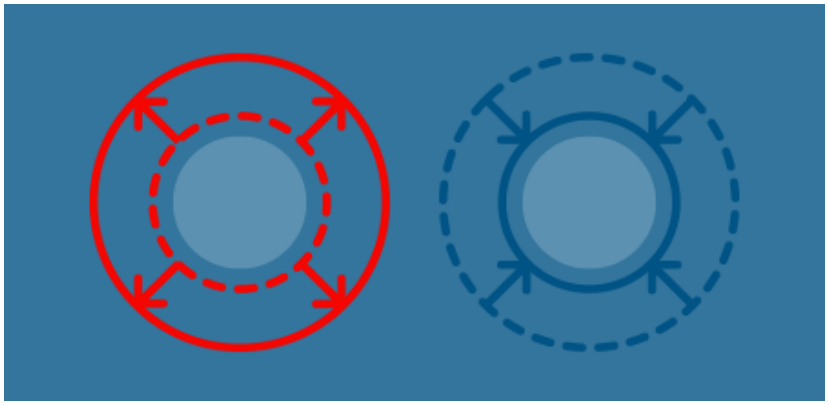
Do spirálových drážek umístěných v upínači se při působení měrného tlaku vytlačí nečistoty. To má za následek kvalitněji upnutou frézu a sníženou házivost (≤ 3 μm). Za pomoci přesných vložek je možná rychlá a snadná výměna nástroje o jiném průměru. [20], [21]



Obr. 13 – Hydraulický upínač [21]

2.4.2 Tepelné upínače

Tento typ upínačů je vyroben s vnitřním průměrem menším, než je průměr stopky řezného nástroje, a to o hodnotu přibližně 0,01 mm. K nasazení stopky nástroje na držák je zapotřebí použití přístroje pro tepelné upínání z Obr. 15, který upínač zahřeje pomocí tepelné indukce na požadovanou teplotu, tím dojde ke zvětšení vnitřního průměru a zasunutí nástroje do držáku. Následně dochází k ochlazení upínače, což má za následek smrštění vyvíjející velký stejnosměrný tlak podél celého obvodu stopky nástroje. Grafický princip technologie je možno vidět na Obr. 14. [22]



Obr. 14 – Princip technologie tepelného upínače [22]
Zvětšení vnitřního průměru zahřátím (červeně) a zmenšení ochlazením (modře)

Celková síla působící na stopku upínače je necelých 5 000 kg, asi pětkrát vyšší, než je tomu u kleštin. Tím je zajištěno vynikající tuhosti upnutí, jež dovoluje házivost do 3 μm, což má za následek jak kvalitněji a přesněji obrobenou součást, tak i menší opotřebení nástroje. Vzhledem k uzavírací síle je metoda nejčastěji používána pro vysokorychlostní obrábění, za kterých dochází k nejvyšším odstředivým silám. [22], [23]

Technologie disponuje vynikající životností, jež zajišťuje průměrně 35 000 cyklů. Nevýhodou je nutnost pořízení přístroje pro tepelné upínání, jež stojí v řádech statisíců korun. [22], [23]

Obr. 15 – Přístroj pro tepelné upínání s upínačem [24]

2.4.3 Upínače Weldon

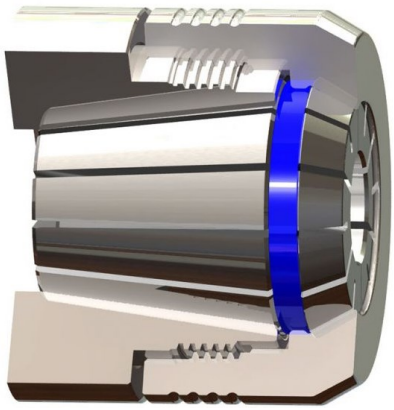
Tento typ upínání z Obr. 16 patří k jednomu z nejjednodušších. Spočívá v upínání stopky nástroje na vyfrézovanou plochu za pomoci dosedajících šroubů kolmo k této ploše. Výhodou technologie je nižší pořizovací cena a jednoduchá výměna, zvláště pak v porovnání s technologií tepelného upínání. [20], [25]

Působení šroubů dosedajících kolmo k nástroji však zapříčiňuje jeho vyosení a tím dochází k vysoké házivosti až 20 μm. Upínání nástroje je zároveň příliš daleko od čela, tedy v místě styku šroubu se stopkou nástroje, což má za následek nižší odolnost proti vibracím a tím nižší jakost obráběného povrchu. Při obrábění nástroje s vyšším úhlem šroubovice dochází při záběru do materiálu k tvorbě axiálních sil, jež se snaží nástroj vytáhnout z držáku, čemuž zabraňuje vyfrézovaná plocha v nástroji. [20], [25]

Obr. 16 – Upínač Weldon [26]

2.4.4 Kleštinové upínače

Alternativou stavicího šroubu je upínání do kleštin, které jsou následně vsazeny do držáku. Na trhu je několik typů těchto kleštin, jež je možno rozdělit na ruční a automatické dle způsobu výměny nástroje. Princip spočívá ve vsazení kleštin do upínače, do kterého se následně vloží stopka nástroje. Matice našroubovaná na konci držáku zajistí zatlačení kleštin do stopky nástroje a tím dojde k jejímu zabezpečení. Dochází tak díky zářezům v kleštinách, jež umožní pružnou deformaci. Grafické znázornění upínače je ke zhlédnutí na Obr. 17. [20], [27]



Obr. 17 – Kleštinový upínač firmy Fahrion [27]

Výhodou je opět pořizovací cena společně s jednoduchou výměnou nástroje. Značnou nevýhodou je potřeba zakoupení kleštin jednotlivých průměrů vzhledem k upnutému nástroji. U standartních kleštin může docházet k mírnému vychýlení osy nástroje, což má za následek vyšší házivost. Na trhu se však nachází i modernější varianta, jejíž principem je kleština vtahována do kužele upínače vtahovacím mechanismem a tím dochází ke snížení házivosti na 3-6 μm. [20], [27]

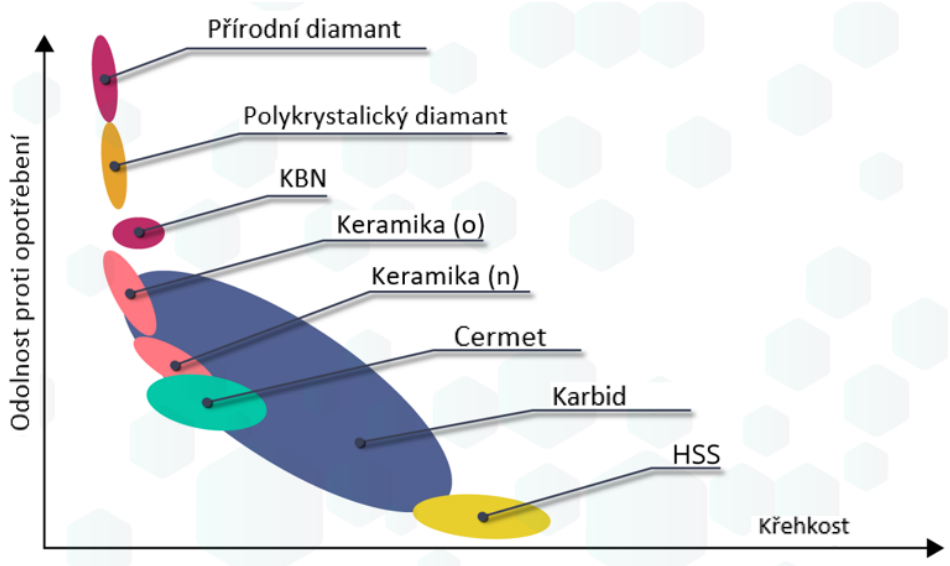
Tab. 2 shrnuje vlastnosti jednotlivých druhů upínačů a dochází tak k jejich porovnání.

Tab. 2 – Porovnání jednotlivých upínačů [21], [28]

Atribut	Kleštinový upínač	Upínač Weldon	Tepelný upínač	Hydraulický upínač
Pořizovací cena	Nízká	Nízká	Velmi vysoká	Vysoká
Hlavní výhody	Vysoká flexibilita	Jednoduchá manipulace	Přesnost, vysoká uzavírací síla	Jednoduchá manipulace
Házivost [µm]	10-20	10-20	≤ 3	≤ 3
Zabránění nečistotám	Velmi vysoké	Nízké	Nízké	Vysoké
Uzavírací síla	Střední	Vysoká	Velmi vysoká	Velmi vysoká
Tuhost	Nízká	Velmi vysoká	Vysoká	Velmi vysoká
Tlumení rázů	Vysoké	Nízké	Nízké	Velmi vysoké

2.5 Nástrojové materiály

Existuje celá řada nástrojových materiálů, jež se liší svými vlastnostmi a tím pádem i použitím. Mezi nejzákladnější materiály patří rychlořezná ocel společně se slinutými karbidy. SK je specifický svými různorodými vlastnostmi, které mu propůjčují povlakovací technologie. Na Obr. 18 je možno nalézt řeznou keramiku na bázi oxidů (o) či na bázi nitridů (n). Mezi dražší materiály patří kubický nitrid bóru či polykrystalický diamant ve formě tenké vrstvy. Nejvíce nákladným materiálem, který zároveň disponuje nejvyšší odolností proti opotřebení, je přírodní diamant. [29]



Obr. 18 – Porovnání nástrojových materiálů dle odolnosti proti opotřebení a křehkosti [29]

2.5.1 Rychlořezné oceli

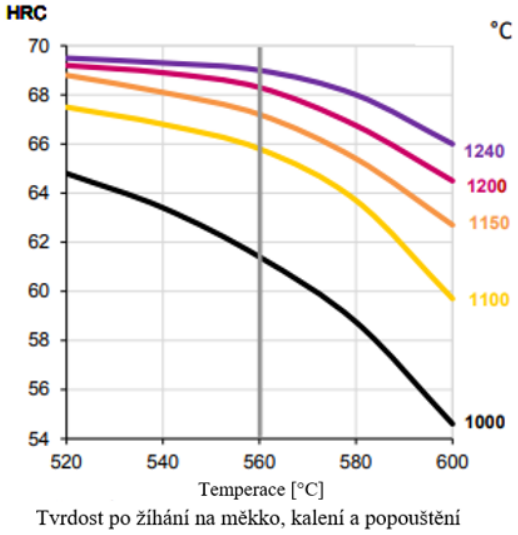
Jak napovídá jejich název, slouží především k obrábění při vysokých řezných rychlostech. Tvrdost tohoto materiálu, k nahlédnutí na Obr. 19, závisí na zakalení na martenzit a na přítomnosti legujících prvků slučujících se s uhlíkem obsaženým v oceli. Těmi jsou wolfram, molybden, chrom či vanad. Nelze obrábět při stejně vysokých rychlostech jako je tomu u slinutých karbidů, neboť nejvyšší teplota obrábění pro vysokolegované rychlořezné oceli dosahuje přibližně 600 °C. Vyrábí se tavením konvenční oceli a následným odléváním do ingotů. Kalení má stupňovitý charakter – provádí se v několika prostředích o různých teplotách. Zlepšení vlastností při obrábění je také možno dosáhnout za pomoci povlakování – konkrétně metodou PVD. [2], [30]

Rychlořezné oceli je možno vyrobit pomocí práškové metalurgie jako tomu je i u slinutých karbidů. Spékání má za následek jednotnou strukturu s velmi malou segregací karbidů. Přidáním wolframu dochází k lepší odolnosti proti opotřebení, molybden zlepšuje houževnatost, vanad zvyšuje odolnost proti opotřebení a kobalt umožňuje vyšší teplotu kalení a tím zvyšuje tepelnou odolnost. [31]

Zastoupení jednotlivých legujících prvků v rychlořezné oceli ASP 2052 od společnosti ERASTEEL je popsáno v Tab. 3 níže.

Tab. 3 – Obsah legujících prvků v HSS oceli ASP 2052 společnosti ERASTEEL [32]

C	Cr	Mo	W	Co	V
1,67	4,8	2,0	10,5	8,0	4,85



Obr. 19 – Graf znázorňující změnu tvrdosti při různých kalících teplotách [32]

Postup tepelné úpravy rychlořezné oceli ASP 2052: [32]

- Žíhání na měkko v ochranné atmosféře při 850-900 °C. Následuje pomalé ochlazování 10 °C/hodinu na požadovaných 700 °C, poté se chladí vzduchem.
- Ke snížení napjatosti dochází při 600-700 °C po dobu dvou hodin, poté pomalé chlazení na teplotu 500 °C.
- Kalení probíhá v ochranné atmosféře ve dvou krocích – předehřevem na teplotu kolem 450 °C a 850 °C, následným zahřátím až na teplotu znázorněnou v Obr. 19 dle požadované tvrdosti. Chlazení probíhá na teplotu 40-50 °C.
- Následuje popouštění při 560 °C třikrát po dobu jedné hodiny. Mezi jednotlivým popuštěním se rychlořezná ocel chladí na pokojovou teplotu.

2.5.2 Slinuté karbidy

Jedná se o vysoce tvrdou slitinu s přídavkem kobaltu a wolframu, která se vyrábí za pomoci práškové metalurgie spékáním při teplotách 1 300 °C až 1 500 °C. Kobalt zapříčiní spékavost, zatímco wolfram zlepší vlastnosti materiálu, jako je například vysoká odolnost proti opotřebení či možnost vyšších pracovních teplot až 1 100 °C. Na druhou stranu je však křehčí než rychlořezná ocel, těžce obrobitelná a náchylná k vydrolování břitů. Přidáním karbidu titanu dochází ke snížení samotného vydrolování. Vzhledem k nevýhodám se nejčastěji ze slinutého karbidu vyrábí vyměnitelné břitové destičky, jež jsou znázorněny na Obr. 20. Slouží především k vysokorychlostnímu obrábění díky vysokým pracovním teplotám. Využívá se také k opracování těžko obrobitelných materiálů, jako jsou například slitiny titanu, jež se hojně využívají nejen v medicíně, ale i v letectví. [2], [29]

Mezinárodní rozdělení slinutých karbidů se dle ISO dělí do tří základních skupin. [2]

- P – plynulá tříska
- M – plynulá i krátká tříska
- K – krátká tříska

Obr. 20 – Nástroje ze slinutých karbidů společnosti CERAZIT [33]

2.5.3 Řezná keramika

Řezná keramika má široké možnosti aplikace, v globále se však dá říci, že největší využití lze nalézt ve vysokorychlostním obrábění, konktrétně při soustružení, frézování a zapichování. Vzhledem k jejich největší nevýhodě – křehkosti, je potřeba dbát v jakém případě nástroje z řezné keramiky použít. Další nevýhodou je neschopnost odolávat teplotním šokům, z toho důvodu se používají spíše pro kontinuální, dlouhodobé obrábění. Na druhou stranu mají vynikající odolnost vůči otěru, vykazují vysokou tvrdost a houževnatost. Lze je uplatnit při frézování těžko obrobitelných materiálu a při vysokých řezných rychlostech, neboť skvěle odolávají působení tepla. Pro srovnání je schopna řezná keramika frézovat při 20krát až 30krát vyšších řezných rychlostech, než je tomu u slinutých karbidů. To je z důvodu schopnosti odolávat extrémně vysokým teplotám až do 2 200 °C. U nástrojů ze slinutých karbidů toto není možné, neboť při teplotě kolem 1 200 °C dochází k překročení bodu tání kobaltového pojiva v nich obsaženého. [34], [35]

U břitových destiček často dochází k opotřebení ve tvaru vrubu. Proto se pro zajištění malých hodnot úhlu nastavení používají kruhové břitové destičky. Při obrábění řeznou keramikou se také nepoužívá chladící kapalina z důvodu předcházení tepelného šoku. Spíše, než kapaliny se častěji využívá vzduchu, jež konstantně v menší míře chladí nástroj a zároveň napomáhá odstranit třísky z řezné oblasti. Není vhodné s těmito destičkami provádět dokončovací operace, dochází totiž k negativním vlivům spojenými s integritou a reliéfem povrchu. [34], [35]

Nástroje z řezné keramiky jsou tvořeny převážně z oxidu hlinitého a nitridu křemíku. Pro zvýšení výkonu nástroje lze použít karbid křemíku či jiné prvky. Vzhledem k jejich schopnosti obrábět při takto vysokých teplotách jsou břitové destičky vyráběny pomocí práškové metalurgie, což zajišťuje kvalitu povrchu téměř finálního výrobku a tím se snižují náklady pro další opracování. [35]

2.5.4 Kubický nitrid boru (KBN)

Kubický nitrid boru je chemická sloučenina, nevyskytuje se tedy v přírodě. Jedná se o alotropní materiál, může se vyskytovat hned v několika strukturních formách s rozdílnými vlastnostmi. Popularitu tento materiál získal především z důvodu tvrdosti, která dosahuje hodnoty 4 800 HK, chemické a teplotní odolnosti vyšší než diamant s možností obrábět do teploty 1 900 °C. Díky tomu lze obrábět při velmi vysokých řezných rychlostech. Zároveň se hned po diamantu jedná o nejtvrdší materiál. Nevýhodou KBN je nemožnost užití chlazení v podobě vodní páry, neboť dochází k rozpuštění ochranné vrstvy oxidu boru a tím k možné oxidaci materiálu. Tato vrstva se vytváří mezi 1 000 °C až 1 500 °C. Jako nejlepší a nejúčinnější chlazení se jeví přímo sířený minerální olej nebo sulfonylchlorovaný olej s vodou v minimální koncentraci 10 %. Nejčastěji se používají pro obrábění vysokolegovaných ocelí s tvrdostí kolem 70 HRC, super-slitin, pro broušení rychlořezných ocelí či těžkoobrobitelných materiálů na bázi kobaltu a niklu. [36], [37]

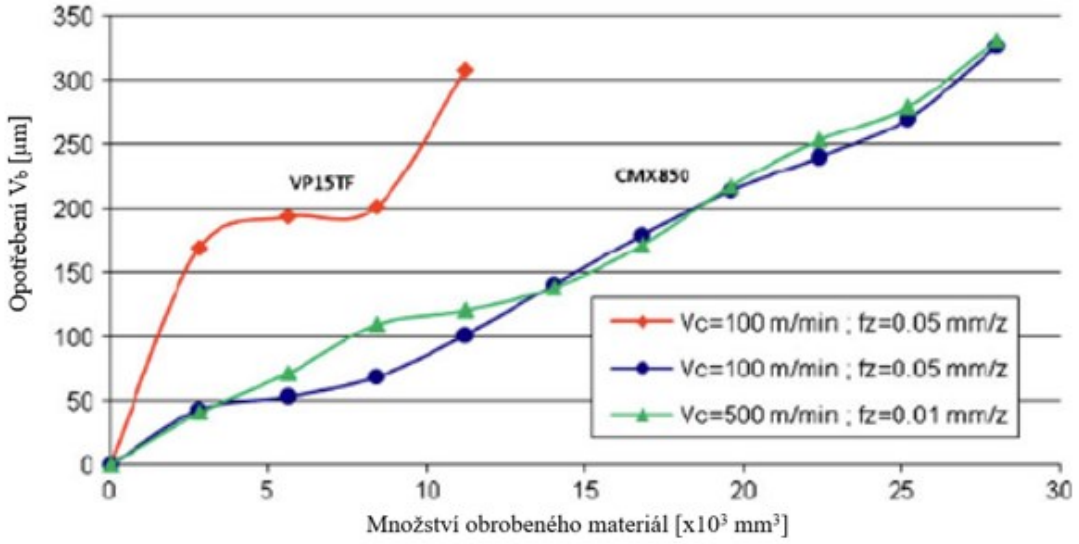
Jak název napovídá, má krystaly uspořádané ve tvaru krychle. Uhlík je v tomto případě nahrazen borem a dusíkem. Vyrábějí se za použití keramických nebo kovových pojiv za vysoké teploty a tlaku. Zrna KBN jsou většinou monokrystalická. Existují však i polykrystalická, díky nimž jsou řezné hrany ostřejší. [37]

2.5.5 Polykrystalický diamant (PKD)

Nejtvrdším známým materiálem světa je diamant. Přes svou excelentní tvrdost je z důvodu vzácnosti v kombinaci s extrémně vysokou cenou méně ideální volbou než kupříkladu polykrystalický diamant. Vzniknutí PKD je dosaženo pomocí slinování diamantového prášku s pojivem na bázi kobaltu na nástroj ze slinutého karbidu. Tloušťka vrstvy je v rozmezí od 0,5 do 1,5 mm. Vzniká za působení tlaku až 10 000 MPa a teploty až 1 800 °C. Nejčastěji se používá pro obrábění neželezných materiálů – kompozitu, keramiky, syntetického skla, ale i lehkých a těžkých kovů. [38]

Velikou výhodou syntetického diamantu je jeho odolnost proti opotřebení, pouze přírodní diamant je v tomto ohledu mírně lepší. PKD nástroje jsou přesnější, vzhledem ke svému nízkému opotřebení totiž udrží požadovaný tvar břitu po delší dobu, což umožňuje obrábění s vyšší produktivitou práce. [38]

V čem vyniká PKD vůči nástroji ze slinutého karbidu pojednává Obr. 21 znázorňující životnost nástroje. Z grafu je patrné, že nástroj ze syntetického diamantu obrobí přibližně 2,5krát více materiálu ze slitiny titanu nežli ten ze slinutého karbidu při stejném opotřebení nástroje. Dalším důležitým poznatkem je to, že při snížení posuvu na zub a zvýšení řezné rychlosti došlo k téměř stejnému opotřebení nástroje. Tato změna však měla za následek značně nižší drsnost povrchu. [39]



Obr. 21 – Porovnání životnosti PKD (CMX850) a slinutého karbidu (VP15TF) [39]

2.6 Povlakování nástrojů

Nástroje ze slinutých karbidů v dnešní době nestačí na jiné, produktivnější materiály. Z toho důvodu vzniklo povlakování nástrojů především metodou PVD a CVD. Tomu nasvědčuje i fakt, že přibližně 95 % všech nástrojů z tohoto materiálu je povlakovaných. Tím dochází ke zlepšení vlastností, jako je zvýšení povrchové tvrdosti, odolnosti proti opotřebení a teplotní odolnosti. [40]

2.6.1 Technologie PVD

Před samotným procesem povlakování metodou PVD (Physical Vapor Deposition) je nutnost výborně vyčistit povrch povlakovaného nástroje. Proces se skládá z odmašťování za

pomocí ultrazvuku v lázních, následuje vodní oplach a na závěr se suší pro zapříčinění vytvoření skvrn na povrchu. [41]

Velkou výhodou této metody je poměrně nízká povlakovací teplota, jež umožňuje povlakovat nejen řezné nástroje, ale například i mosaz či hliník. Na rozdíl od CVD se jedná čistě o fyzikální metodu. Za pomoci iontového leptání dochází k odprašování velmi tenké oxidační vrstvy. To vše probíhá ve vakuové komoře, z níž je vzduch odčerpáván na hodnotu přibližně $1x10^{-5}$ baru. Poté je díl umístěný v komoře zahříván na povlakovací teplotu. Doba povlakování závisí na faktorech jako jsou hloubka požadovaného povlaku či velikost nástroje. Celý proces může trvat v rozmezí od 6 do 12 hodin. [41]

Dalšími výhodami této metody je: [40]

- Z důvodu čištění nástroje a pracovního prostředí před povlakováním se jedná o povlak s velmi vysokou čistotou.
- Je zachována houževnatost materiálu z důvodu nižších povlakovacích teplot.
- Vysoká přesnost tloušťky povlakované vrstvy.
- Velmi dobrá přilnavost a versatilita povlakovaného materiálu.

2.6.2 Technologie CVD

Metoda CVD neboli chemická depozice z plynné fáze (Chemical Vapour Deposition) se zaměřuje na tvorbu přírodního povlaku za pomoci chemických reakcí. Prvky obsažené v budoucí vrstvě se nejprve odpaří a následně se přivedou do oblasti povlakovaného dílce v podobě páry. Ta se poté buď rozloží nebo reaguje s dalšími látkami a tím dochází k vytvoření tenké vrstvy. Tento proces se stejně jako v případě metody PVD může provádět buď ve vakuu nebo za působení atmosférického tlaku. Tloušťka vrstvy je v rozmezí od 5 do 12 μm, ve výjimečných případech až 20 μm. Povlak může mít jednovrstvý či vícevrstvý charakter. [40]

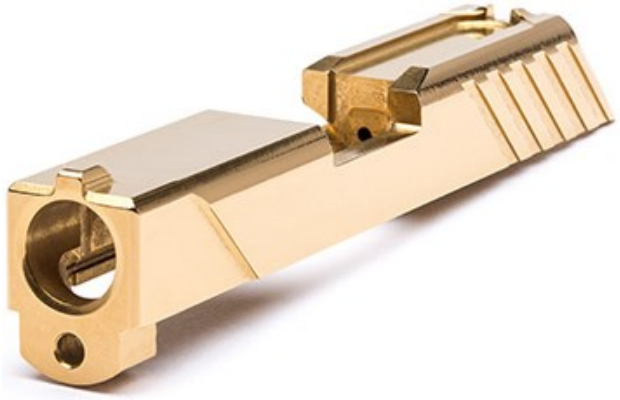
Výhody užití metody CVD: [40]

- Nízké namáhání dílce při povlakování.
- Možnost vytvoření silnějších vrstev.
- Tvorba rovnoměrného povlaku i na složité geometrii dílce.
- Tvorba silnější vrstvy má za následek daleko větší odolnost proti vysokým teplotám, což dovoluje užití větších rychlostí rovnající se nástrojům z řezné keramiky.

Na druhou stranu při takto silných vrstvách dochází k zaoblování a tím ke snížení ostrosti řezné hrany. Také se snižuje její houževnatost. Specialitou CVD metody je tvorba diamantového povlaku. Princip spočívá ve štěpení vodíkového plynu na vodíkové radikály za pomocí velmi vysokých teplot kolem 2 000 °C. Radikály následně reagují nejčastěji s methanem (CH4), díky čemuž dochází ke kumulaci uhlíku na povrch povlakovaného dílce. Při správně použitých podmínkách se však uhlík ukládá ve krystalické formě diamantu. Tento typ povlaku se skvěle hodí pro obrábění extrémně abrazivních materiálů. [40]

2.6.3 Povlak TiN

Jedná se o nejběžnější povlak. Snižuje koeficient tření na hodnotu 0,2, zároveň snižuje i možnost přilnutí třísky materiálu při obrábění, a to především u měkkých ocelí. Zvyšuje tepelnou a chemickou odolnost, může se použít na povlakování nástrojů v medicíně, neboť je biokompatibilní. Teplotní odolnost je do 450 °C. Tloušťka tohoto povlaku se pohybuje mezi 1-4 μm. Charakteristickým znakem je jeho zlatavá barva, která najde uplatnění i jako dekorativní nátěr, kupříkladu na hlavni zbraně z Obr. 22. [42]



Obr. 22 – Hlaveň zbraně s povlakem TiN [43]

2.6.4 Povlak TiAlN

Povlak s vynikající tvrdostí, tepelnou a oxidační odolností. Oproti standartnímu povlaku TiN je jeho teplotní odolnost přibližně o 100 °C vyšší, a to díky zabudování uhlíku do povlaku. Slouží pro obrábění spíše houževnatějších ocelí či při náročných řezných podmínkách. V mnoha případech není potřeba obrábět s chladící kapalinou, neboť může být použitý v suchém či téměř suchém prostředí. Oproti povlaku TiN nabízí vyšší koeficient tření dosahující hodnoty 0,5. Je dosažena také vyšší tvrdost 35 GPa. Tloušťka povlaku opět probíhá v rozmezí 1-4 μm. [42]

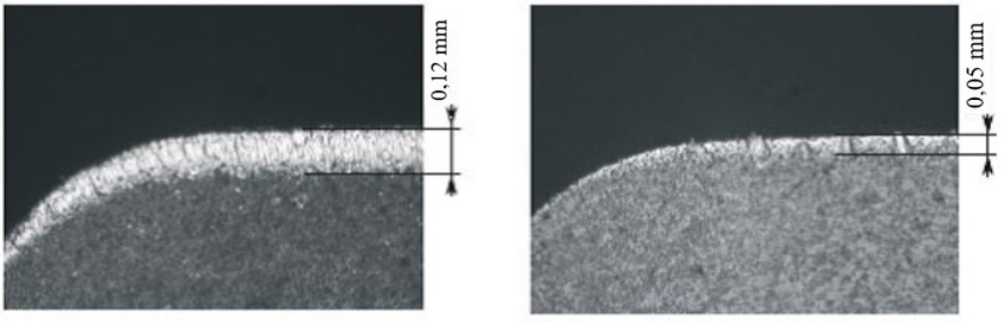
2.6.5 Povlak KTRN

Firma STATON, s.r.o. zabývající se povlakováním nástrojů vytvořila speciální povlak s názvem KTRN (Composite Temperature Resistant Nitride), povlak na bázi kompozitního, teplotně odolného nitridu. Využívá se především pro obrábění tvrdých ocelí s přerušovaným řezem. Nanášení tohoto speciálního povlaku vzniká za pomoci nové, obloukové technologie. Teplotní a oxidační odolnost je udržována do 1 000 °C, což je výrazně více, než je tomu v případě povlaku TiN. Tvrdost dosahuje hodnoty 3 500 HV a adheze přesahuje hodnotu 100 N. Tloušťka povlaku je opět 1-4 μm. [42]

Následující Obr. 23 popisuje, jakým způsobem dochází k opotřebení břitu v závislosti na délce řezu v případě povlaku TiAlN a KTRN. Povlak TiAlN byl podroben řezu dlouhému tři metry, zatímco KTRN osm metrů. Z výsledku je patrné, že opotřebená hloubka řezné části činí 0,12 mm, zatímco u kompozitního povlaku pouze 0,05 mm, přestože délka řezu je téměř třikrát delší. [42]

Podmínky porovnání povlakovaných vrstev: [42]

- Obráběný materiál – ocel X210Cr12 s tvrdostí 30 HRC
- Řezná rychlost v_c = 100 m/min
- Hloubka řezu a_p = 2 mm
- Rychlost posuvu v_f = 0,2 mm/ot



Obr. 23 – Porovnání povlaku TiAlN (vlevo) a KTRN (vpravo) [42]

3 CNC OBRÁBĚNÍ

CNC (Computer Numerical Control) je počítačově řízené strojní obrábění. Nejčastěji slouží k výrobě kusových, malosériových až středně sériových pohledávek. Číslicové řízení vyjadřuje informace o smyslu, směru, dráze pohybu obráběcího nástroje a jeho řezných podmínkách. [2]

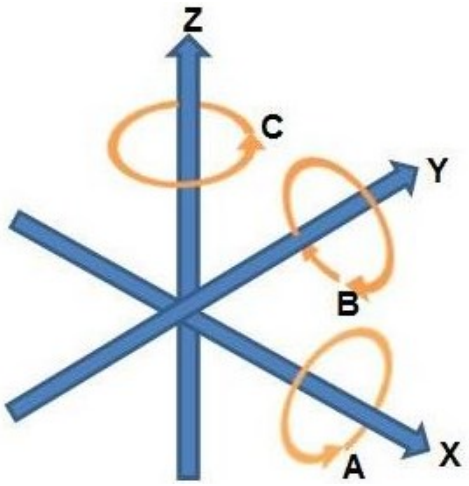
V dnešní době CNC obrábění nahrazuje NC obrábění (Numerical Control), kde je využíváno ovládacího centra, ze kterého se program spouští. Dříve číslicové řízení zajišťoval děrný štítek či jiné alternativní paměťové médium. Nejenže je počítačově řízené obrábění přesnější metodou, nabízí také vyšší flexibilitu v podobě rychlé změny programu či případné opravy vzniklých chyb. Zároveň je zapotřebí méně kvalifikovaného personálu, neboť obsluha stroje vyžaduje méně pozornosti. CNC stroje navíc mohou automaticky analyzovat obrábění a přizpůsobovat se měnícím se okolnostem. NC jednotka naopak pracuje v rámci neměnných, přímých parametrů a jednoduchých úkolů. Rozdíly mezi NC a CNC obráběním jsou shrnuty v Tab. 4 [44]

Tab. 4 – Porovnání NC a CNC obrábění [44]

Parametry	**NC obrábění**	**CNC obrábění**
Kód v podobě	Symbolů, čísel a písmen	G-kód, M-kód
Přenos dat	Děrné štítky či magnetická páska	Počítačový program
Paměť	Bez paměti	Vysokokapacitní uložiště
Změna programu	Složitá	Jednoduchá
Cena	Nízká	Vysoká
Přesnost	Nízká	Vysoká

3.1 Souřadnicový systém

Moderní, víceosé CNC stroje mají širokou škálu použití a tím i vyšší funkčnost. Této výhody lze však plně využít pouze v případě plynulého pohybu podél svých os. Osy jsou zodpovědné za udržení požadované přesnosti při obrábění. Jsou tedy naprostým základem každého stroje. Souřadnicový systém společně s osami rotace, které jsou dále popsány v následujících podkapitolách, jsou k nalezení na Obr. 24 [45]



Obr. 24 – Souřadnicový systém [45]

3.1.1 3osý systém

Obrobek zůstává ve stejné poloze, zatímco nástroj se pohybuje v rovinách X, Y, Z za účelem obrábění. Osa X se nejčastěji nachází na kratší straně obrobku, osa Y na delší straně a osa Z určuje vertikální pozici nástroje a tím hloubku třísky. Tento způsob je vhodnější pro součásti nevyžadující velkou hloubku či výraznou složitost obrobení. Nejčastěji se využívá pro frézování drážek, vrtání, závitování a další. [45], [46]

3.1.2 4osý systém

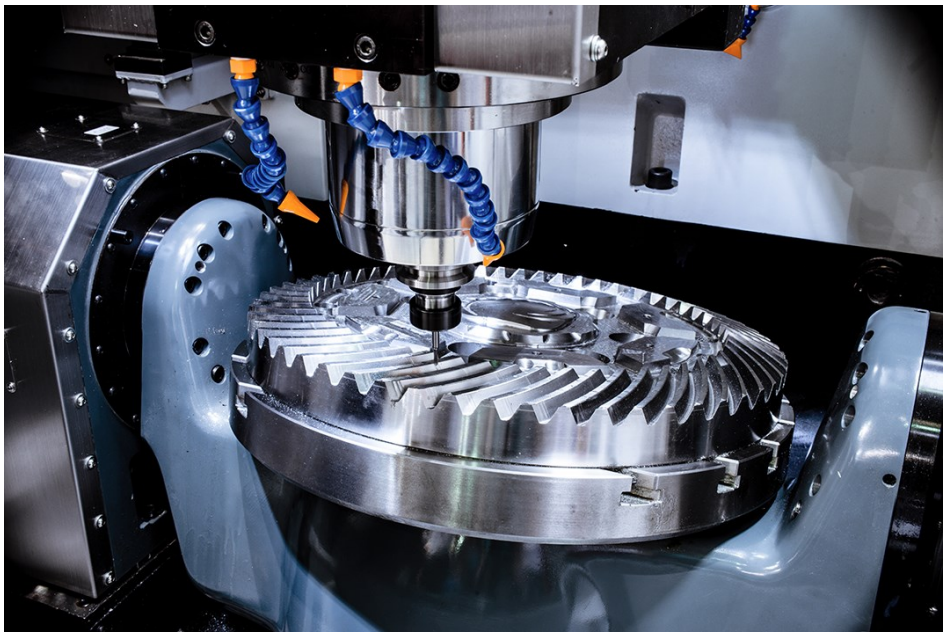
Funguje téměř stejně jako jeho předchůdce, avšak s jedním velkým rozdílem. Tento pohyb navíc je přítomen podél osy X, kolem které koná stůl s obrobkem rotační pohyb. Ten tvoří čtvrtou osu A. Metoda je tedy užitečná v případě nutnosti vytvořit otvory či kapsy pouze na stranách součásti. Zásadní nevýhodou tohoto systému je nemožnost kontinuálního obrábění z důvodu přidání pouze čtvrté osy. Další nevýhodou se jeví rychlé opotřebení převodového mechanismu, a to především za vysoké intenzity obrábění. Poté mohou vznikat vůle a tím dochází k negativnímu ovlivnění přesnost či životnosti stroje a nástroje. [45], [46]

3.1.3 5osý systém

5osé CNC obrábění je schopnější než jeho předchůdci. Jedná se o přesný, rychle pracující obráběcí systém. To zahrnuje otáčení kloubu stolu a zároveň možnost rotace kolem osy Z – osa rotace C, jež definuje 5osý systém. V tomto případě je dosaženo obrábění na pěti stranách obrobku v jedné operaci. V důsledku toho je nástroj schopný vytvářet složité tvary se značnou přesností. Na složitost je v případě 5osého obrábění kladen velký důraz, neboť bez této technologie by tvarově komplexnější díly bylo nutné odlévat, což by značně snížilo

produktivitu a přesnost. Díky tomu najde technologie uplatnění v několika odvětvích, kupříkladu v lékařství, automobilovém či lodním průmyslu a letectví. Přestože se jedná o systém schopný vytvářet komplexní tvary na obrobku, má i svá negativa. Při tvorbě složitých úkonů vzniká velmi rozsáhlá trajektorie pohybů. Je tedy velmi těžké obejít se bez softwaru na bázi CAM obrábění. K tomu je zapotřebí výborně kvalifikovaný personál. Samotné pořízení obráběcího centra je velmi drahou záležitostí. [45], [46]

Příklad 5osého obrábění je k vidění na Obr. 25.

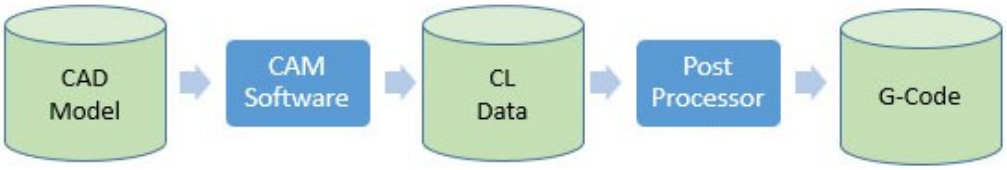


Obr. 25 – Příklad 5osého obrábění [45]

3.2 Tvorba CNC programu

Výstup počítačového CAM systému řídí celý CNC stroj, který obrábí polotvar na výslednou součást. Špatné programování může vést k nevhodné povrchové úpravě, zhoršeným tolerancím či v kritičtějším případě k poškození stroje či nástroje. [47]

Schéma posloupnosti tvorby CNC programu je možno nalézt na Obr. 24.



Obr. 26 – Schéma tvorby CNC programu [48]

3.2.1 CAD systém

Nejprve je zapotřebí vytvořit vstupní, nejčastěji třírozměrný model pomocí CAD (Computer-aided Design) softwaru, jež je identický co do rozměrů a tvarů s reálným výrobkem. CAD softwary umožňují vytvářet nejen součásti, ale i celé sestavy např. letadel, automobilů či linek nutných k jejich výrobě. [2]

3.2.2 CAM systém

Před samotným obráběním je třeba vytvořit program diktující pohyb stroje a nástroje využívající dříve vymodelovanou výrobní součást, nejčastěji pomocí počítačového výrobního softwaru CAM (Computer-aided Manufacturing). Výstupem softwaru je postprocesor nejčastěji v podobě G-kódů a M-kódů. Tento proces je opakovatelný, rychlý, a především spolehlivý díky možnosti ověřovat grafickou simulaci obrábění, jež se zpravidla v těchto CAM softwarech nachází. [47]

Ona grafická simulace znázorňuje nejen produktivní či neproduktivní pohyby nástroje vůči obrobku, nabízí však i číselné a barevné znázornění přesnosti obrobených ploch. Díky tomu je možné vyvarovat se značnému množství chyb, jež by se negativně projevily na výsledném výrobku. Dále CAM programy nabízí optimalizaci řezných procesů díky vypočteným strojním časům závislých na podmínkách, geometrii či použité metodě obrábění. Grafickou simulaci lze také využít ke kontrole kolizí nástroje se svěrákem či stolem a tím zabránit velkým škodám vzniklých při samotném procesu obrábění. [47]

3.2.3 Postprocesor

Jak již bylo zmíněno, postprocesor je výstupem CAM softwaru. Jedná se o program, jež upravuje výstup procesoru na strojní program sloužící k obrobení polotovaru na finální výrobek za pomocí kódů. Převážně se jedná o M-kód a G-kód. Je třeba mít na paměti, že tyto kódy se liší mezi různými stroji, neboť v některých případech dochází k vynechání nuly mezi číslem a písmenem. [2], [49]

Prvním z nich je tzv. M-kód, který řídí všechny funkce CNC stroje, jež nejsou geometrického charakteru. Kupříkladu spuštění a zastavení otáček vřetena, výměny nástroje, zapnutí chladící kapaliny či jejího vypnutí při teplotním poklesu obrábění. M-kód by měl mít pouze jeden příkaz v daném bloku. V opačném případě by mohlo dojít k problémům s daným programem. [49]

Dalším kódem je tzv. G-kód. Jedná se o nejrozšířenější programátorský jazyk. Většina G-kódů je alfanumerického formátu s počátečním písmenem G značícím geometrii. Řídí pohyb CNC stroje, určuje tedy kde má začít, jakou geometrií se pohybovat či kde zastavit. Ne vždy je však prvotním písmenem G-kódu písmeno G. Kupříkladu písmeno R udává poloměr oblouku, kterým se nástroj pohybuje. Hodnoty I a J určují inkrementální střed oblouku, který je vytvořen. [49]

Příklady uvedených kódů jsou zaznamenány v Tab. 5.

Tab. 5 – Příklady funkcí pro programování CNC stroje [2]

Kód	Funkce
G00	Rychloposuv
G01	Lineární interpolace
G02	Kruhová interpolace ve směru hodinových ručiček
G94	Posuv za minutu. Nastaví význam f [mm/min]
M03	Start otáček ve směru hodinových ručiček
M05	Stop otáček
M06	Výměna nástroje
M30	Konec programu

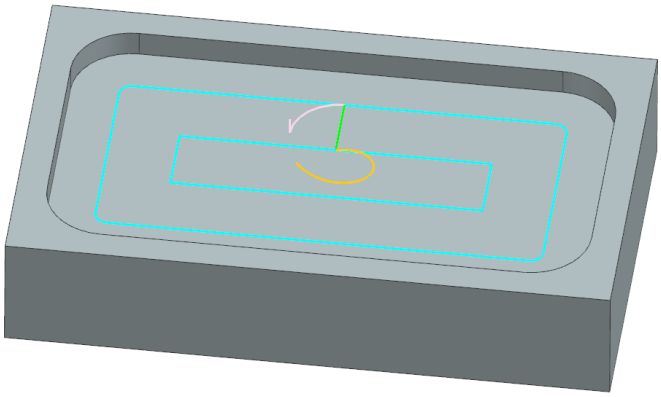
3.3 Metody CNC obrábění

Zvolení vhodné metody je jednou z klíčových parametrů pro úspěšné obrobení součásti. Výběr má zásadní vliv na kvalitu obrobeného povrchu, opotřebení nástroje či dobu obrábění a tím zvýšení či snížení efektivity dané operace. Existuje několik metod obrábění kapsy. V kapitole níže jsou rozebrány některé z nich, neboť o nich pojednává praktická část práce.

3.3.1 Metoda obrábění konturováním

Konturové frézování neboli CAVITY MILL využívá offsetové segmenty hranic součásti jako dráhu nástroje. Jak je vidět na Obr. 27, dráhu v tomto případě tvoří křivky kopírující poměry jednotlivých stran obrobku. Jejich vzdálenost je konstantní v celé geometrii. Výhoda této metody spočívá v obrábění kapes se složitější geometrií, nedochází totiž k výrazné

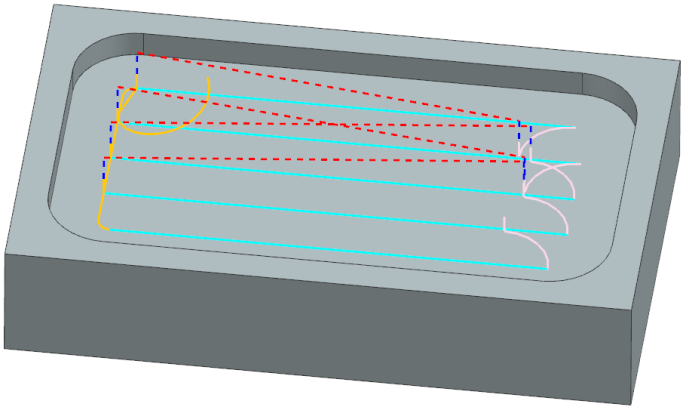
tvorbě neobrobených částí. Další značnou výhodou je menší množství neproduktivních pohybů nástroje, což vede ke snížení času obrábění. [50], [51]



Obr. 27 – Dráha metody CAVITY MILL

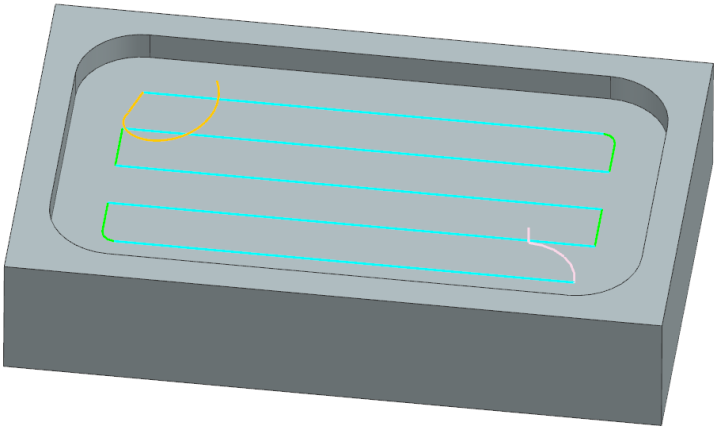
3.3.2 Vzor řezu řádkováním

Nejčastěji se využívají dva typy metod obrábění řádkováním. První z nich je vzor řezu ZIG. Jak je vidět z Obr. 28, dochází k úběru třísky pouze jednosměrně, vedlejší pohyb v podobě přejíždění nástroje prodlužuje celkovou dobu obrábění. Účelem této strategie může být nutnost delší doby chlazení nástroje při neproduktivním pohybu. [50]



Obr. 28 – Vzor řezu ZIG

Nejedná se tedy o produktivní způsob obrábění, zvláště pak v porovnání s metodou ZIG ZAG, při které dochází k oboustrannému obrábění. Nástroj tedy nevykonává neproduktivní, vedlejší pohyb, jak je možno vidět na Obr. 29. Obě strategie fungují na principu úběru třísky vytvořením rovnoběžných, lineárních drah. Problém může nastat při obrábění kapsy se složitější geometrií. V tomto případě často dochází k tvorbě neobrobených částí či nadměrných zpětných pohybů, což prodlužuje čas obrábění. Z toho důvodu se nejvíce používají při hrubovacích operací či při dokončování pouze rovinných ploch. [50]

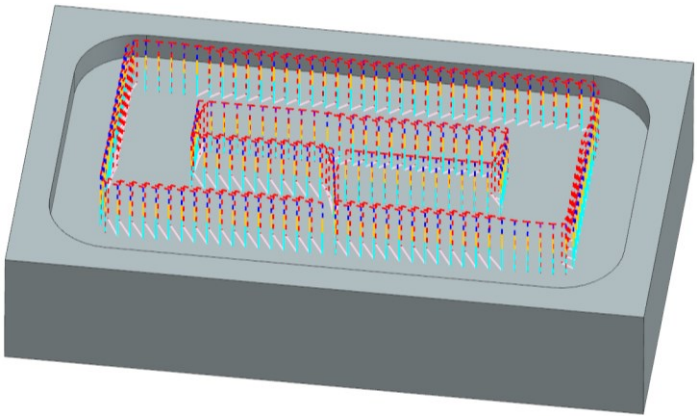


Obr. 29 – Vzor řezu ZIG ZAG

3.3.3 Metoda obrábění ponorným frézováním

Ponorné frézování neboli PLUNGE MILLING, znázorněno na Obr. 30, se využívá především tam, kde je potřeba obrobit hlubší kapsy a řezná dráha je tedy delší. Rotující nástroj koná produktivní pohyb do obrobku nejčastěji v ose Z, kdy se po obrobení požadované hloubky vrací stejnou dráhou. Po vyjetí dochází k posunutí nástroje o vzdálenost kroku vpřed a vzhůru. Je však nutné částečně překrýt předešlý řez, aby došlo k úplnému obrobení součásti. Poté nástroj opět koná produktivní pohyb a operace se opakuje. [52]

Na rozdíl od metody CAVITY MILL není ponorné frézování limitováno tvorbou bočních sil a nedochází tak ke snížení posuvové rychlosti z důvodu výrazného chvění. Řezné síly jsou v tomto případě směřovány do vřetena a stolu stroje, což není limitujícím faktorem. Metoda napomáhá snižovat přenos tepla z důvodu rychlosti zanořování. Při určování další polohy krokem vpřed a vzhůru má nástroj dostatek času ke zchlazení. Z toho důvodu lze opracovat obtížně obrobitelné materiály jako je nerezová ocel, vysokoteplotní slitiny či titan. [52]



Obr. 30 – Dráha metody PLUNGE MILLING

II. PRAKTICKÁ ČÁST

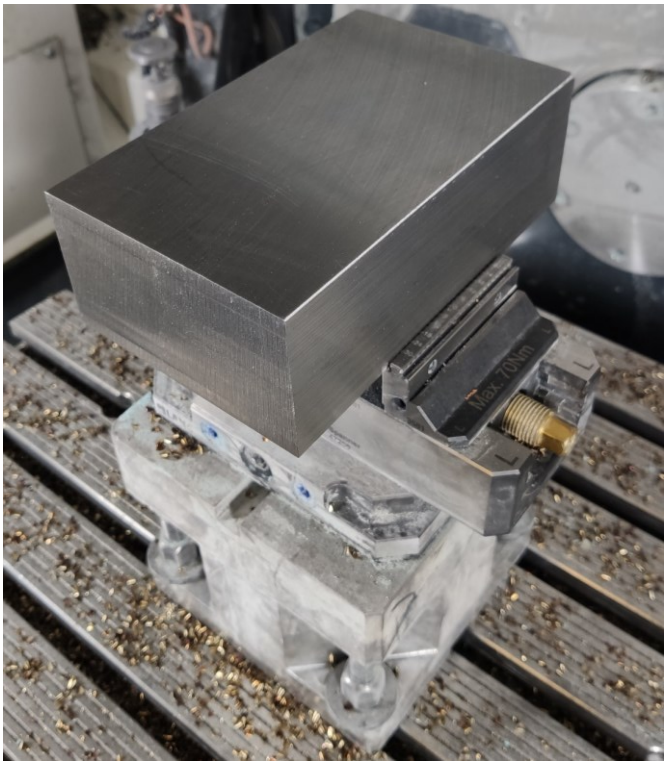
4 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem práce je zjistit odlišnosti v jednotlivých metodách a strategiích obrábění, a jakým způsobem tyto rozdíly ovlivňují nejen kvalitu obrobení daných součástí, ale s tím i spjatý výsledný čas a finální cenu výroby. Nejprve je zapotřebí stanovit obráběný materiál. Stejně jako výběr materiálu je důležité zvolit rozměry obrobku s nástroji vhodnými k jejímu obrobení. Zároveň je žádoucí zvolit součást s menšími rozměry, aby obrábění netrvalo příliš dlouho a tím se nezvýšila ekonomická stránka věci.

Prvním z cílů práce je porovnání vybraných nástrojů s VBD a jakým způsobem se od sebe liší při výchozích i upravených hodnotách v případě nejpoužívanější metody při obrábění dutin CAVITY MILL. Dále je cílem zjistit rozdíly v typech nájezdu do materiálu a jejich vliv na výsledný čas. Stejně tak je cílem určit vhodný vzor řezu při různých tvarech dutiny a jakým způsobem dochází k ovlivnění jakosti povrchu dle dostupných analýz. Dále je požadavkem provést volbu metody dle softwaru Siemens NX a najít nejvhodnější z nich. V neposlední řadě je potřeba porovnat změnu procentuálního zastoupení nástroje při tvorbě zaoblení na analýzu zbytkového materiálu. Finálně je třeba určit, jakým způsobem vygenerovaná data ze softwaru korespondují s realitou. Z toho důvodu je nutností obrobit několik součástí a nezávisle je porovnat.

5 POUŽITÉ STROJE A NÁSTROJE

Nejprve jsou zvoleny nástroje pro frézování kapsy. Volbu nástrojů nalezených níže však udával polotovar o rozměrech 174x105,6x60,4 mm (dxšxv) z nízkolegované konstrukční oceli 1.1730 z Obr. 31. Všechny použité nástroje se nachází ve vlastnictví Fakulty technologické na Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně. Je tak učiněno z důvodu možnosti porovnat časy jednotlivých operací v programu Siemens NX se skutečnými údaji.



Obr. 31 – Polotovar upnutý ve svěráku před obráběním

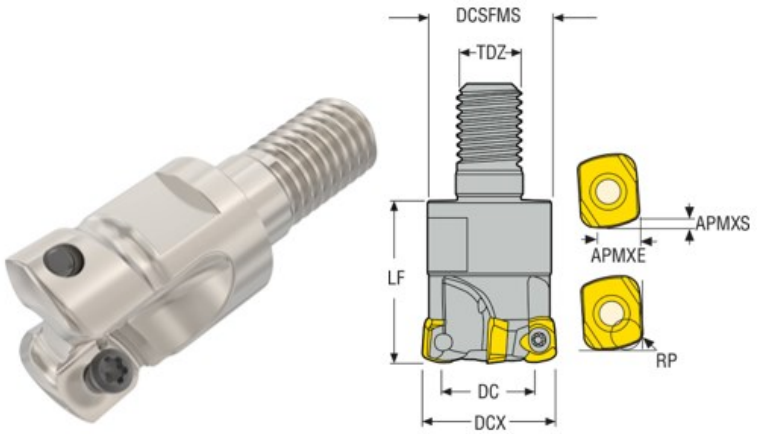
5.1 NÁSTROJ R217.21-0816.RE-LP06.2A

Prvním z použitých nástrojů je fréza řadící se do strategie HFM (High Feed Machining), tedy obrábění za vysoké posuvové rychlosti, avšak nižší hloubky řezu. Fréza, znázorněna na Obr. 32, je od společnosti Seco Tools, s.r.o. a všechny parametry je možno vidět v Tab. 6.

Tab. 6 – Specifikace frézy R217.21-0816.RE-LP06.2A

Atribut	Popis	Hodnota
APMXE	Maximální hloubka řezu v čelním směru posuvu	4,5 mm
APMXS	Maximální hloubka řezu v bočním směru posuvu	0,8 mm
DCX	Maximální obráběcí průměr	16 mm

DC	Obráběcí průměr	7,5 mm
DCSFMS	Průměr stykové plochy ze strany stroje	13,5 mm
LF	Funkční délka	20 mm
RMPX	Maximální úhel zafrézování	5°
RPMX	Maximální otáčky	39 000 ot/min
TDZ	Velikost závitu	M8
Weight	Hmotnost	58 g
ZEFP	Počet efektivních obvodových břitů	2 břity



Obr. 32 – Fréza R217.21-0816.RE-LP06.2A

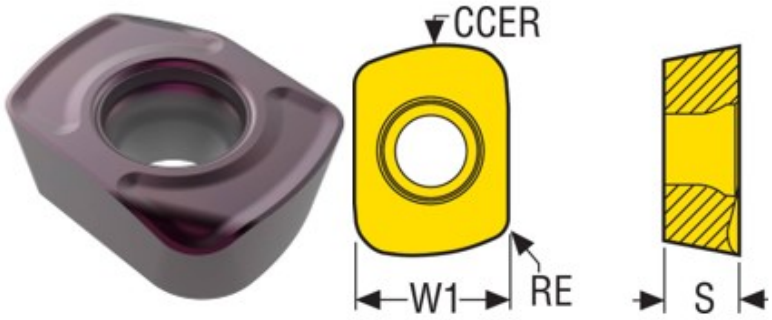
5.1.1 Břitová destička LPHT060310TR-M06 MP2050

Výběr břitové destičky udává jak těleso nástroje R217.21-0816.RE-LP06.2A, tak dostupnost na FT UTB. Jedná se o tzv. highfeedovou destičku, jejíž tvar je k nalezení na Obr. 33. Všechny její důležité parametry jsou k vidění v Tab. 7. Celý vymodelovaný nástroj v programu Siemens NX se nachází včetně upínače z kapitoly 5.3 na Obr. 34.

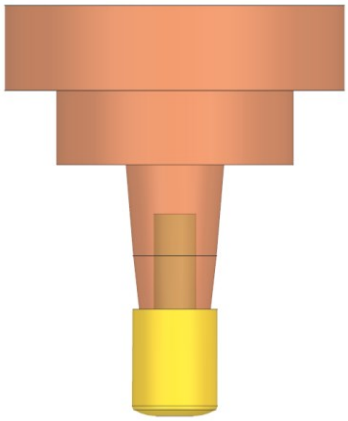
Tab. 7 – Specifikace břitové destičky LPHT060310TR-M06 MP2050

Atribut	**Popis**	**Hodnota**
CCER	Rádius zakřivení ostří	8 mm
CEDC	Počet břitů	2 břity

GAN	Úhel čela destičky	11°
-	Gradetype	Carbide PVD
RE	Rohový rádius	1 mm
S	Tloušťka destičky	3,18 mm
W1	Šířka destičky	6,4 mm
Weight	Hmotnost	2 g



Obr. 33 – Břitová destička LPHT060310TR-M06 MP2050



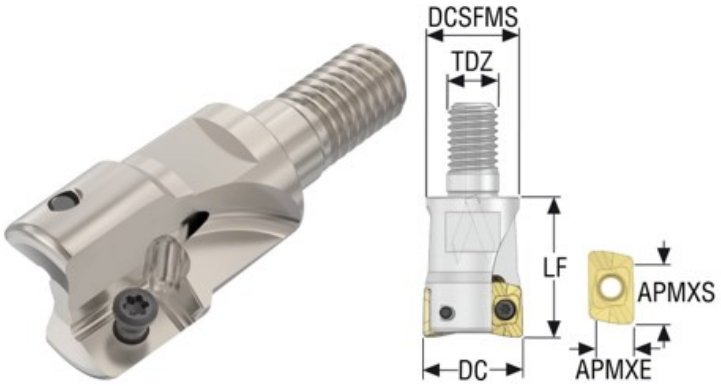
Obr. 34 – Vymodelovaný nástroj R217.21-0816.RE-LP06.2A s upínačem v programu Siemens NX

5.2 NÁSTROJ R217.69-0816.RE-10-2A

Tento druh nástroje je v diplomové práci používanější v menší míře. Fréza, viditelná na Obr. 35, slouží k obráběcím strategiím HSM (High Speed Machining). Je tedy přesným opakem technologie HFM, neboť dochází k úběru třísky za pomoci daleko větší hloubky řezu, avšak při nižších posuvových rychlostech. Všechny parametry frézy je možno vidět v Tab. 8.

Tab. 8 – Specifikace frézy R217.69-0816.RE-10-2A

Atribut	Popis	Hodnota
APMXE	Maximální hloubka řezu v čelním směru posuvu	6 mm
APMXS	Maximální hloubka řezu v bočním směru posuvu	9 mm
DC	Obráběcí průměr	16 mm
DCSFMS	Průměr stykové plochy ze strany stroje	14 mm
LF	Funkční délka	23 mm
RMPX	Maximální úhel zafrézování	7,5°
RPMX	Maximální otáčky	29 400 ot/min
TDZ	Velikost závitu	M8
Weight	Hmotnost	58 g
ZEFP	Počet efektivních obvodových břitů	2 břity



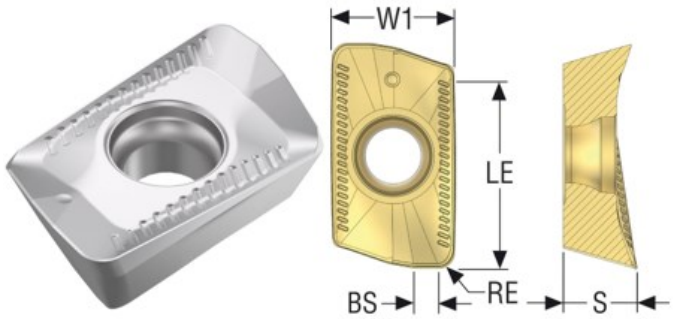
Obr. 35 – Fréza R217.69-0816.RE-10-2A

5.2.1 Břitová destička XOMX10T308TR-ME07 MS2050

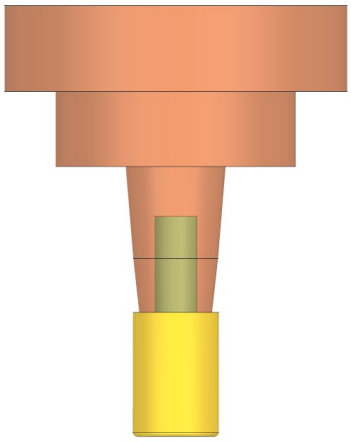
Druhá břitová destička XOMX10T308TR-ME07 MS2050, jejíž parametry jsou k nalezení v Tab. 9, je uzpůsobena pro obrábění s vyšší hloubkou řezu. Na Obr. 36 udávající rozměry destičky je k povšimnutí značné množství lamačů třísky v těsné blízkosti za jejími břity. Dále lze vidět, že VBD má konvexní tvar, na rozdíl od destičky vhodné pro vysoký posuv, jejíž čelo je spíše rovné s malým zkosením u kraje. Vymodelované těleso nástroje společně s použitou VBD a upínačem je možno vidět na Obr. 37.

Tab. 9 – Specifikace břitové destičky XOMX10T308TR-ME07 MS2050

Atribut	**Popis**	**Hodnota**
LE	Efektivní délka břitu	9,3 mm
BS	Velikost hladící plošky	1,3 mm
CEDC	Počet břitů	2 břity
GAN	Úhel čela destičky	20,4°
-	Gradetype	Carbide PVD
RE	Rohový rádius	0,8 mm
S	Tloušťka destičky	3,83 mm
W1	Šířka destičky	6,9 mm
Weight	Hmotnost	2 g



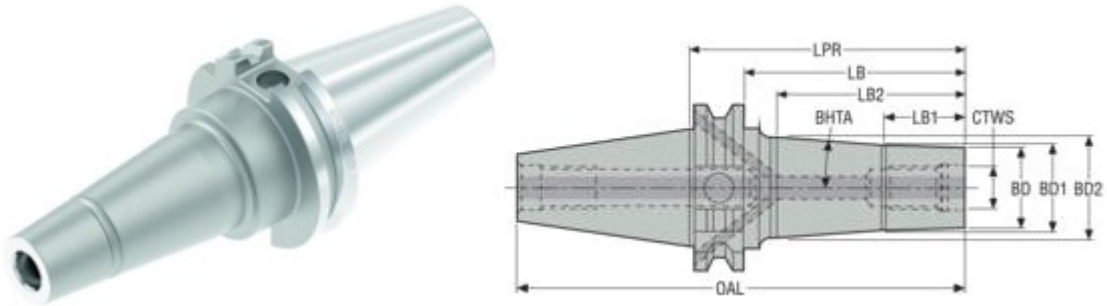
Obr. 36 – Břitová destička XOMX10T308TR-ME07 MS2050



Obr. 37 – Vymodelovaný nástroj R217.69-0816.RE-10-2A s upínačem v programu Siemens NX

5.3 Upínač E347658200860

Jedná se o konvenční držák řady Combimaster vhodný k upnutí do vřetene SK40. Možností je využití nástavců a adaptérů pro případ tepelného upínání. Díky své konstrukci, jež je k nahlédnutí na Obr. 38, prodlužuje funkční délku nástroje o 10 mm, čehož je v praktické části práce využito z důvodu hloubky kapes až 29 mm. Slouží k upnutí obou fréz, které byly v práci využity. Hlavní rozměry držáku je možno nalézt v Tab. 10. Adaptér je vybrán na základě reálné předlohy nacházející se na FT UTB.



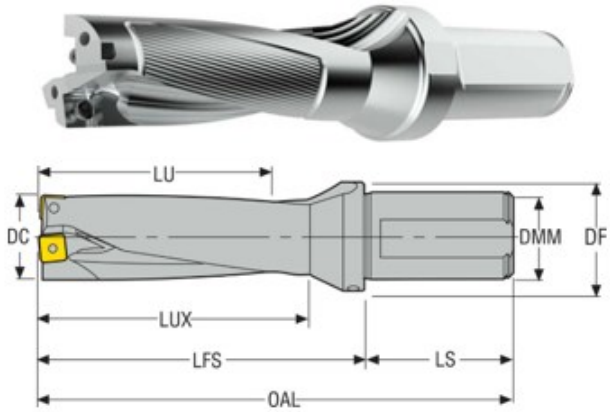
Obr. 38 – Držák E347658200860

Tab. 10 – Specifikace držáku E347658200860

Atribut	Popis	Hodnota
BD	Průměr tělesa	13,5 mm
BD1	Průměr tělesa 1	15,7 mm
BHTA	Úhel kužele	5,3°
CTMS	Připojení – strana stroje	DIN40 ADB/ CAT40
CTWS	Připojení – strana obrobku	M8
LB	Délka tělesa	41 mm
LB1	Délka tělesa 1	10 mm
LF	Funkční délka	60 mm
OAL	Celková délka	128,4 mm
Weight	Hmotnost	0,982 kg

5.4 NÁSTROJ SD523-16-48-25R7

Jedná se o vrták se dvěma vyměnitelnými břitovými destičkami z řady PERFOMAX od již zmíněného výrobce Seco Tools, s.r.o. Všechny potřebné parametry nástroje je možno vidět v Tab. 11. Z Obr. 39 je patrné, že těleso slouží k uložení dvou odlišných břitových destiček a tvar stopky je uzpůsoben pro upnutí do stranového upínače Weldon, který je společně s tělesem k nalezení na Obr. 41.



Obr. 39 – Vrták SD523-16-48-25R7

Tab. 11 – Parametry vrtáku SD523-16-48-25R7

Atribut	Popis	Hodnota
DC	Obráběcí průměr	16 mm
DF	Průměr příruby	35 mm
DMM	Průměr stopky	25 mm
KAPR	Úhel nastavení ostří nástroje	87,5°
LUX	Maximální využitelná délka	48 mm
OAL	Celková délka	134 mm
-	Shanktype	ISO 9766
Weight	Hmotnost	0,358 kg

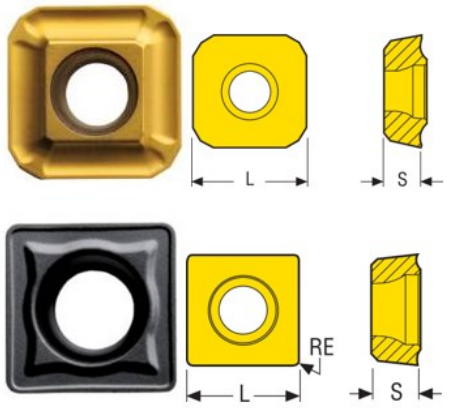
5.4.1 Břitové destičky SPGX0502-C1 T400D a SCGX050204-P2 DP3000

Jak již bylo zmíněno, vrták obsahuje dva různé typy břitových destiček. Destička SPGX0502-C1 T400D je umístěna na vnitřní straně nástroje, zatímco destička

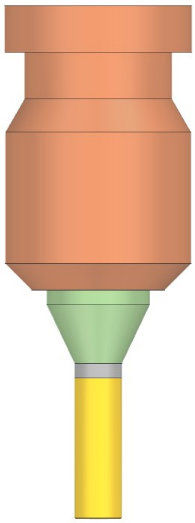
SCGX050204-P2 DP3000 se nachází na té vnější. Tím je zajištěno pokrytí celé plochy při vrtání. Specifikace obou destiček je možno nalézt v Tab. 12, zatímco tvarové odlišnosti jsou k vidění na Obr. 40, kdy vnitřní břitová destička má zkosené rohy, na rozdíl od SCGX050204-P2 DP3000 se zaoblenými. Přesto jsou základní rozměry destiček identické.

Tab. 12 – Specifikace břitových destiček SPGX0502-C1 T400D a SCGX050204-P2 DP3000

Atribut	**Popis**	**SPGX0502-C1 T400D**	**SCGX050204-P2 DP3000**
AN	Hlavní úhel hřbetu	11°	7°
EPSR	Vrcholový úhel destičky	90°	90°
-	Třída řezného materiálu	T400D	DP3000
IC	Průměr vepsané kružnice	5,56 mm	5,56 mm
-	Gradetype	Carbide PVD	Carbide CVD
S	Tloušťka destičky	2,38 mm	2,38 mm
L	Teoretická délka břitu	5,56 mm	5,56 mm
SSC	Kód velikosti lůžka destičky	05	05
RE	Rohový rádius	-	0,4 mm
Weight	Hmotnost	1 g	1 g
Price	Cena	332 Kč	340 Kč



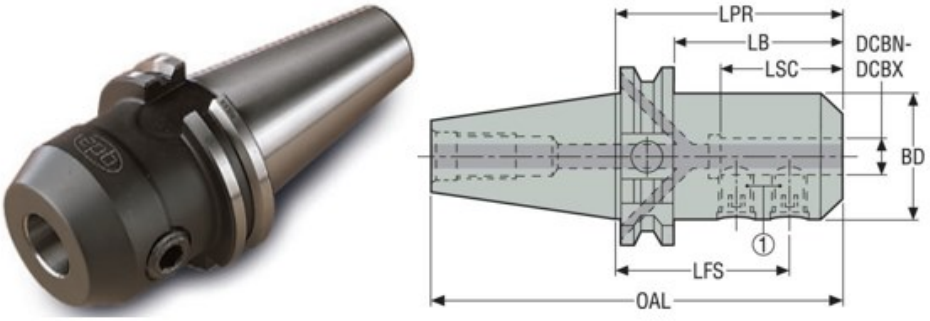
Obr. 40 – Břitové destičky SPGX0502-C1 T400D (nahoře) a SCGX050204-P2 DP3000 (dole)



Obr. 41 – Vymodelovaný nástroj SD523-16-48-25R7 s upínačem v programu Siemens NX

5.5 Upínač E346958425100

Stranový upínač Weldon se stavěcími šrouby je k nalezení na Obr. 42. Konstrukce zajišťuje pevné upnutí společně s ochranou proti vytažení s hlavními rozměry k nalezení v Tab. 13. Házivost válcové části vzhledem ke kuželu činí dle výrobce maximálně 3 μm.



Obr. 42 – Upínač E346958425100

Tab. 13 – Specifikace upínače E346958425100

Atribut	Popis	Hodnota
BD	Průměr tělesa	63 mm
BLQ	Kód kvality vyvážení	PB
CTMS	Připojení – strana stroje	DIN40 ADB
DCBN	Průměr otvoru	25 mm
LB	Délka tělesa	80,9 mm

LPR	Vyčnívající délka	100 mm
LSC	Upínací délka	54 mm
OAL	Celková délka	168,4 mm
Weight	Čistá hmotnost	2,156 kg

5.6 STROJ DMG MORI DMU 50 3. generace

Společnost DMG MORI se sídlem v Japonsku představuje řadu strojů DMU 50 již více než 20 let. 3. generace těchto strojů zajišťuje 5osý pohyb a je k vidění na Obr. 43. Oproti předchozím generacím došlo ke zvětšení pracovní plochy stroje a tím k rozsáhlejšímu natočení stolu od -35° do +110°. Rychlejší přejezdy zajišťují zkrácení obráběcího cyklu až o 30 %. Díky kvalitnějšímu chlazení a zlepšené statické a dynamické stabilitě je docíleno vyšší přesnosti při obrábění. Rozsáhlejší technologické parametry je možno nalézt v Tab. 14. [53]

Tab. 14 – Parametry stroje DMG MORI DMU 50 3. generace [53]

Jednotlivé parametry	**Hodnoty**
Max. pojezd v ose X [mm]	650
Max. pojezd v ose Y [mm]	520
Max. pojezd v ose Z [mm]	475
Max. průměr obrobku [mm]	630
Max. výška obrobku [mm]	600
Max. hmotnost obrobku [kg]	300
Max kapacita zásobníku [ks]	120
Druh vřetene	SK40
Utahovací síla nástroje [kN]	11,2

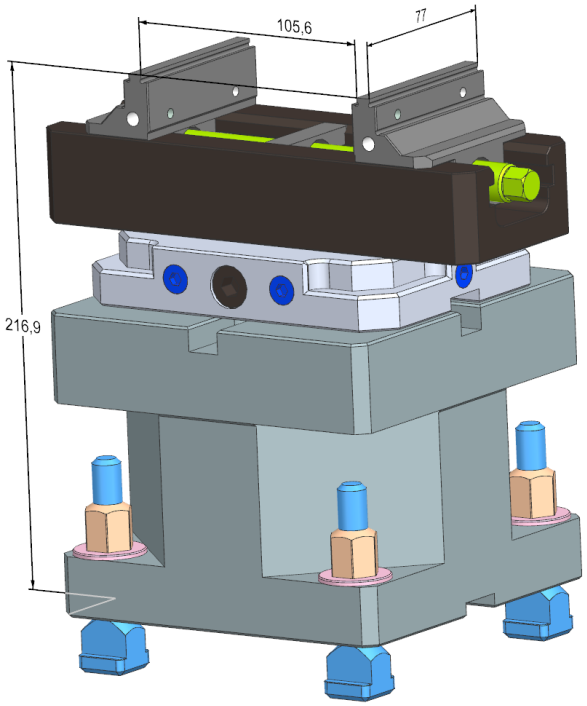
Obr. 43 – Stroj DMG MORI DMU 50 3. generace [53]

5.7 Svěrák LANG

Svěrák, sloužící k upnutí všech součástí, které jsou v práci použity, je od německého výrobce LANG Technik GmbH. Čelisti svěráku používané a vlastněné FT UTB jsou starší řady s výrobním číslem 47 200. Vzhledem k tomu, že se tyto čelisti již nevyrábí, v práci jsou uvedeny novější, avšak rozměrově identické s výrobním číslem 48 200-77. Jedná se o svěrák s čelistmi řady Makro Grip sloužící až k 5osým operacím. Je také využíváno desky s upínacími hranami z řady Quick Point s výrobním číslem 45 150 od stejného výrobce. Obě části svěráku je možno zhlédnout na Obr. 44. [54]

Obr. 44 – Čelisti a upínací deska výrobce LANG Technik GmbH [54]

Největší částí svěráku je však podstavec sloužící k vyvýšení obrobku. Ten je možno použít spíše na menší díly, jež se v práci nachází. Při obrábění rozměrnějších součástí mohou vznikat větší vibrace, proto se svěrák upíná do základové desky stroje přímo do upínek. Vymodelovaný svěrák se základními rozměry je k nahlédnutí na Obr. 45. [54]



Obr. 45 – Sestava svěráku LANG v případě součásti č.1 a č.2

Jsou-li čelisti sestavené jako na Obr. 45, maximální rozsah upnutí činí 150 mm. Lze je však otočit, čímž se rozsah zvýší na 200 mm, což je při upínání rozměrnějších dílců výhodou, neboť není nutností užití upínek stroje. Této funkce je využito při obrábění součásti č.3, jejíž tvar je čtvercový o délce strany 153,7 mm. Hlavní parametry svěráku LANG jsou k nalezení v Tab. 15. [54]

Tab. 15 – Parametry svěráku LANG [54]

Jednotlivé parametry	**Hodnoty**
Rozsah upnutí [mm]	0-200
Základní rozměry (dxšxv) [mm]	210x155x216,9
Točivý moment [Nm]	60
Uzavírací síla [N]	14 000
Přesnost souososti [mm]	±0,02
Délka vřetena [mm]	215

5.8 Ocel 1.1730

Ocel 1.1730 dle normy EN 10027 s ČSN ekvivalentem 19 083 je nelegovaná, nástrojová ocel s obsahem uhlíku nad 0,4 %. Vzhledem k obsahu uhlíku je ocel možno kalit za teploty 800 °C do vody a následně popouštět při 100 až 320 °C k dosažení tvrdosti asi 58 HRC. Kalení však není běžně doporučováno kvůli vysokému riziku praskání způsobené vnitřním pnutím. Materiál se vyznačuje vynikající zpracovatelností, jednotnou metalografickou uniformitou a nižší cenou. [55], [56]

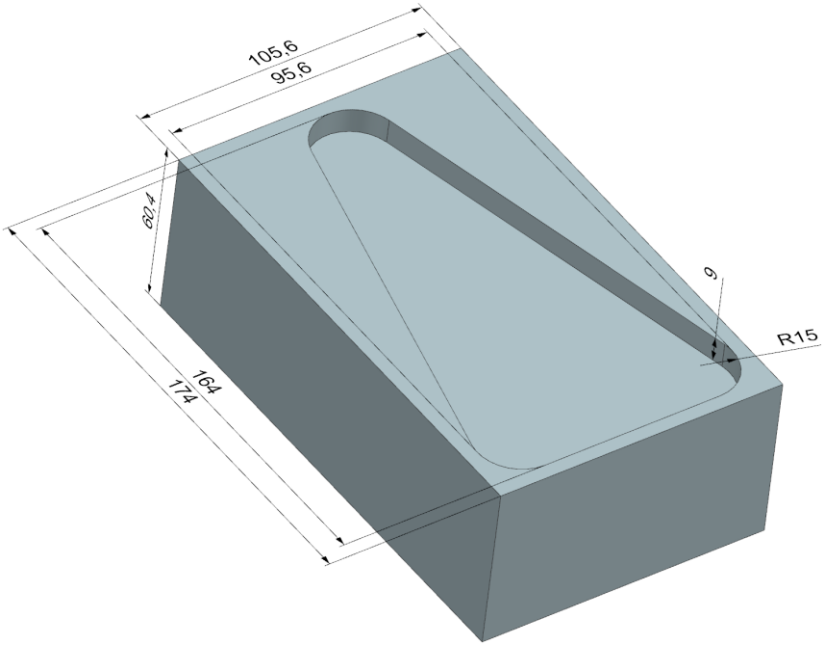
Nejčastěji se ocel 1.1730 vyskytuje v ručních nástrojích a nářadích, konkrétně v kladivech, kleštích, klíčích či šroubovácích. Je obsažena i v obráběcích nástrojích do dřeva. Využívá se také při tvorbě vstřikovacích forem, zejména jako dorazy, vodící pouzdra či sloupky. Chemické složení lze nalézt v následující Tab. 16. [55], [56]

Tab. 16 – Chemické složení oceli 1.1730 [56]

Značka oceli	**C [%]**	**Mn [%]**	**Si [%]**	**P [%]**	**S [%]**
1.1730	0,4–0,5	0,6–0,8	0,15–0,4	≤ 0,035	≤ 0,035

6 SIMULOVANÁ DATA SOUČÁSTI Č.1

První součást k obrobení z Obr. 46 je tvořena kapsou o hloubce 9, 19 a 29 mm se základními rozměry 174x105,6x60,4 mm (dxšxv). Vnitřní rádiusy mají poloměr 15 mm, jsou tedy uzpůsobeny dostatečným způsobem pro průměry použitých nástrojů. Dochází k obrobení součásti s přídavkem 0,5 mm na dokončení. Základní rozměry součásti se shodují s polotovarem nacházejícím se v dílnách. Je tak učiněno z důvodu možnosti porovnat vygenerovaná data ze softwaru Siemens NX s těmi skutečnými.



Obr. 46 – Obráběná součást č.1

6.1 Vliv volby řezné destičky metodou CAVITY MILL

CAVITY MILL neboli frézování dutin je pravděpodobně nejpoužívanější hrubovací metoda. V této části se porovnává vliv vybraných břitových destiček na obráběcí čas společně s kalkulací výsledných cen.

Za pomocí Seco Tools, s.r.o. bylo možno zjistit ceny břitových destiček společně s jejich životností při daných operacích a řezných podmínkách znázorněných v Tab. 17.

Tab. 17 – Porovnání cen a životnosti destiček

Atribut	LPHT060310TR-M06 MP2050	XOMX10T308TR-ME07 MS2050
Cena destičky [Kč]	329	407
Životnost destičky [min]	29,7	31

Po přiřazení obráběného materiálu byly zvoleny řezné podmínky u obou břitových destiček, neboť přepočet podmínek přímo závisí na výběru materiálu. Nesprávně zvolený materiál by pak zapříčinil odlišné řezné podmínky vůči obrobku, a to by mohlo vést nejen k poškození nástroje, ale i stroje samotného. Následně se doporučené podmínky upravily pro zjištění změn obráběcích časů. Obě úpravy jsou k nahlédnutí v Tab. 18. Voleny byly podmínky s 5 % bezpečností vůči krajním podmínkám posuvových rychlostí, jež byly poté zaokrouhleny na dvě desetinná místa. Princip přepočtu je znázorněn pro břitovou destičku XOMX10T308TR-ME07 MS2050 v rovnici níže a na Obr. 47.

$$Požadovaný\ posuv\ na\ zub = Maximální\ posuv\ na\ zub * Bezpečnost = 0{,}123 * 0{,}95 = 0{,}117 \doteq 0{,}12\ mm/zub \quad (1)$$

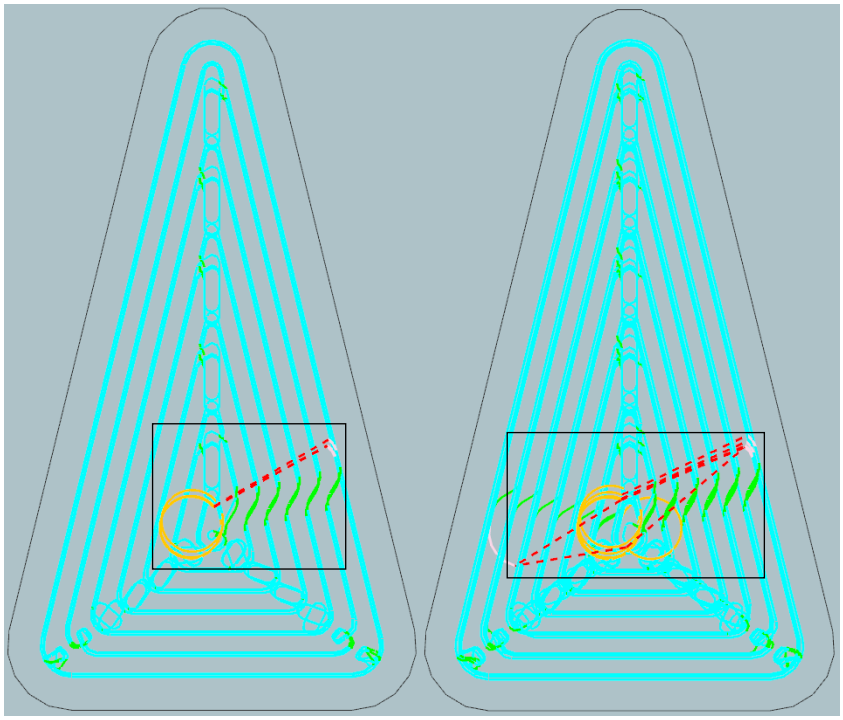
Obr. 47 – Upravené řezné podmínky destičky XOMX10T308TR-ME07 MS2050

Tab. 18 – Řezné podmínky destiček metodou CAVITY_MILL

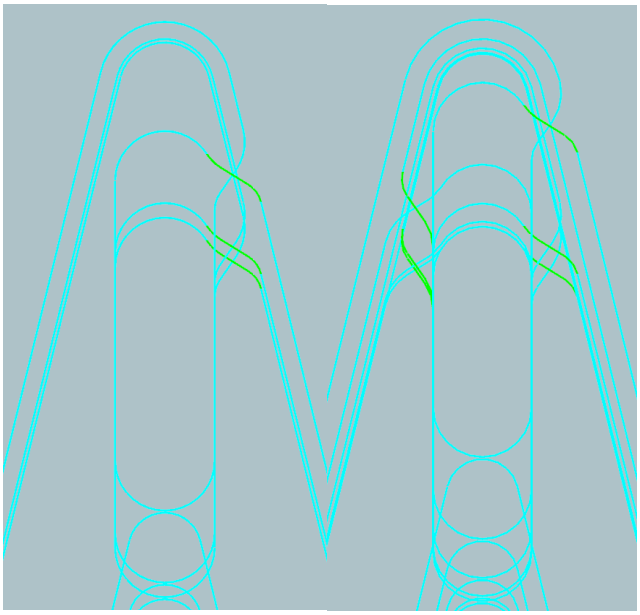
Atribut	**LPHT060310TR-M06 MP2050**		**XOMX10T308TR-ME07 MS2050**	
	Původní	Změněné	Původní	Změněné
Hloubka řezu [mm]	0,7	0,4	4,5	2
Řezná rychlost [m/min]	343	371	240	235

Posuv na zub [mm/zub]	0,65	0,91	0,095	0,12
Otáčky [ot/min]	6 824	7 400	4 775	4 675
Posuvová rychlost [mm/min]	8 880	13 500	907	1 120
Výsledný čas obrábění [s]	173	197	165	329

Dalo by se očekávat, že destička s menší hloubkou řezu bude v případě plytkých kapes rychlejší, nicméně s ohledem na hloubku dutiny 9 mm, destičce s hloubkou řezu 4,5 mm stačí zhotovit pouze dva axiální záběry. Je tedy vždy nutné brát v potaz k jak velkému úběru materiálu při posledním záběru dojde a tomu přizpůsobit i všeobecnou hloubku řezu. Jak je patrné z Tab. 18, snížení hloubky řezu způsobí zvýšení posuvové rychlosti společně s posuvem na zub. Porovnání dráhy nástroje při obrábění s různými řeznými podmínkami je k vidění od Obr. 48 do Obr. 50. Je patrné, že metoda CAVITY MILL s hloubkou řezu 0,7 mm se od té s hloubkou 0,4 mm liší především v množství neproduktivních pohybů nástroje. Rozdíly jsou k vypozorování i v případě produktivních pohybů, kdy CAVITY MILL s vyšším posuvem na zub koná těchto pohybů více. V největším rozsahu je diference patrná při tvorbě zaoblení v detailním pohledu z Obr. 49.

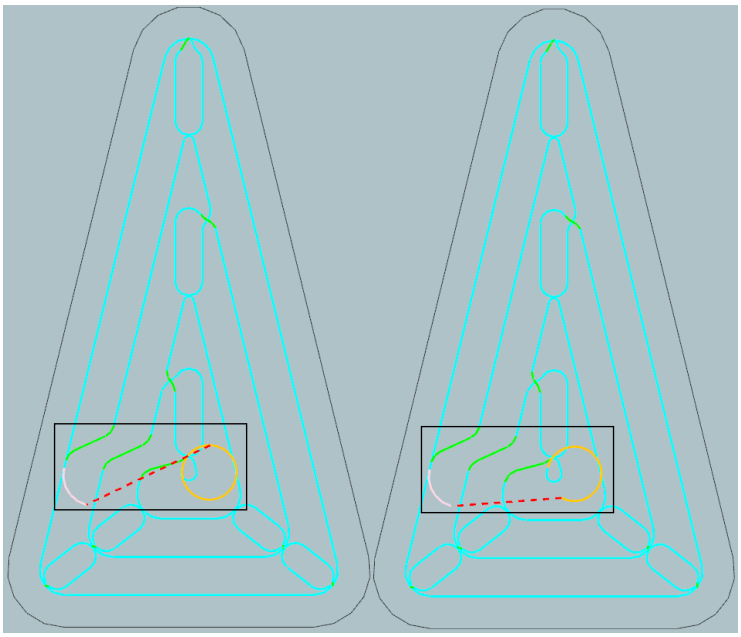


Obr. 48 – CAVITY MILL s hloubkou řezu 0,7 mm (vlevo) a 0,4 mm (vpravo) při hloubce kapsy 9 mm



Obr. 49 – Detailní pohled CAVITY MILL s hloubkou řezu 0,7 mm (vlevo) a 0,4 mm (vpravo)

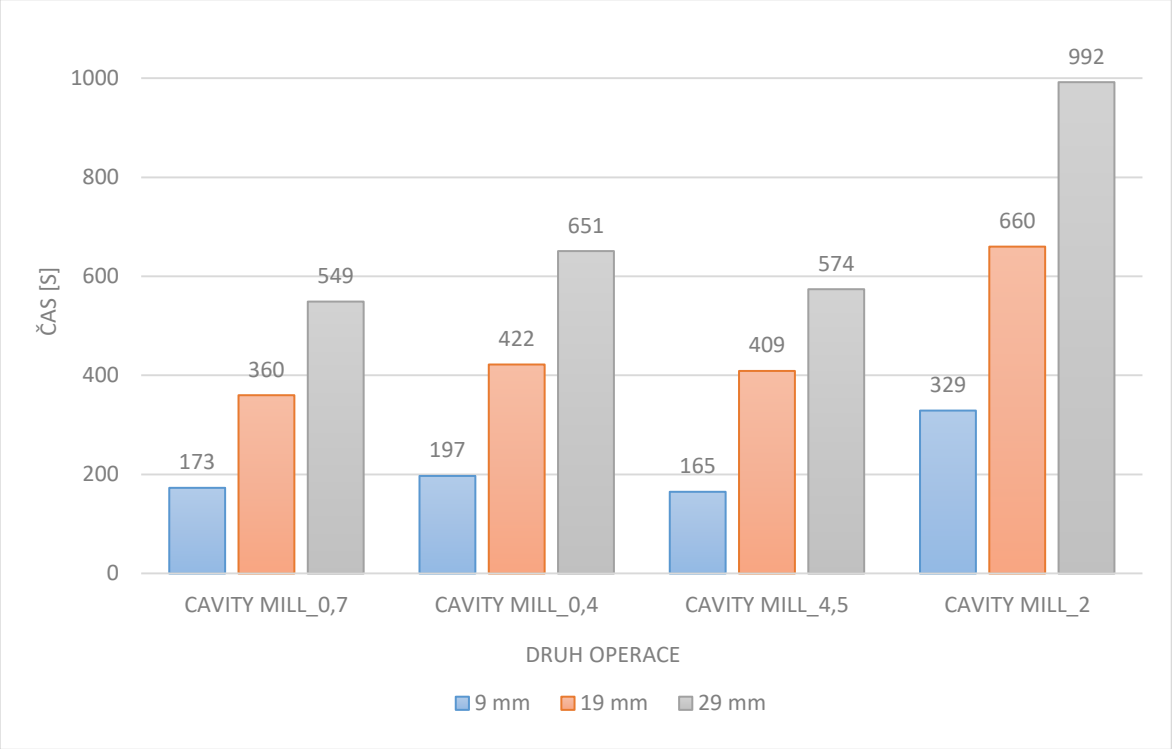
Zatímco porovnání metod s nižší hloubkou řezu vykazovalo značné rozdíly, v případě operací s hloubkou řezu 4,5 mm a 2 mm je diference prakticky neexistující. Viditelný rozdíl kromě dané pracovní hloubky je v mírné změně neproduktivního nájezdu značený červenou, čárkovanou čarou.



Obr. 50 – CAVITY MILL s hloubkou řezu 4,5 mm (vlevo) a 2 mm (vpravo) při hloubce kapsy 9 mm

Co se hloubky kapsy 19 mm a 29 mm týče, řezné podmínky byly nastaveny identicky jako v případě plytčí kapsy. To má za následek stejné dráhy nástroje při obrábění. Odlišnost lze však nalézt v již zmíněné hloubce, jež udává komplexnější obraz při porovnání metod HSM

a HFM. Toto porovnání lze vidět na Obr. 51, který znázorňuje obráběcí časy při použití řezných podmínek značených v Tab. 18 s odlišnými hloubkami frézované kapsy.



Obr. 51 – Graf obráběcích časů v závislosti na hloubce kapsy a použitých řezných podmínkách

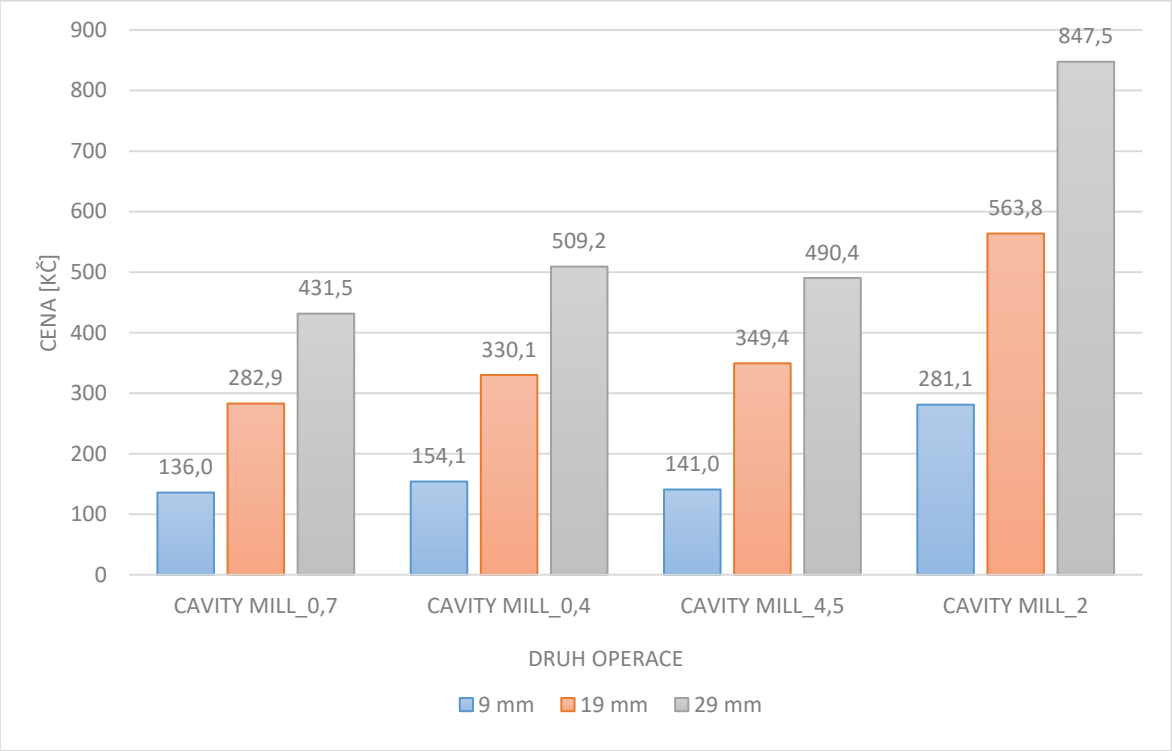
Lze si povšimnout, že v případě výroby jednoho kusu při hloubce 9 mm dosahuje kratšího obráběcího času technologie s vyšší hloubkou řezu 4,5 mm. Pokud se však kapsa prohloubí na již zmíněných 19 mm či 29 mm, k rychlejšímu obrobení dojde za pomocí technologie HFM, a to při hloubce řezu 0,7 mm.

Dalším faktem také je, že při přepočítání řezných podmínek výrobce, v tomto případě se změnou hloubky řezu z 0,7 mm na 0,4 mm a z 4,5 mm na 2 mm, dochází k velmi výraznému prodloužení času obrábění, a to v případě hloubky kapsy 9 mm až k téměř dvojnásobnému rozdílu, co se technologie HSM týče. Z výsledků je patrné, že vzhledem k vybraným břitovým destičkám jsou řezné podmínky nastavené výrobcem ideální a při změně dochází ke zhoršení efektivity.

Nelze se však spoléhat jen na data obráběcích časů. Je potřeba také započítat cenu řezných destiček společně s jejich životností. Z toho důvodu byl vytvořen graf pojednávající o ceně výrobních nákladů při obrábění jednoho kusu. K tomu byly využity údaje z Tab. 17, jež jsou dostupné po přihlášení na stránkách výrobce. Cena provozu stroje DMG MORI DMU 50 3.

generace včetně obsluhy stroje činí 1 500 Kč/hod. V přepočtu na jednotky obráběcích časů se jedná o 0,417 Kč/s.

Jak již bylo zmíněno, v případě hloubky kapsy 9 mm je efektivnější metoda s hloubkou řezu 4,5 mm nežli 0,7 mm. Avšak z Obr. 52 lze vyčíst, že i v případě rychlejšího obrobení není zajištěna cenová výhodnost, což je tím hlavním a také rozhodujícím kritériem. Přestože je metoda s použitím hloubky řezu 0,7 mm pomalejší, značný rozdíl v ceně destičky 78 Kč a velmi podobné životnosti činí z technologie CAVITY MILL_0,7 nejvhodnější volbu pro obrábění dané kapsy. Cenový rozdíl je poté výraznější v případě hlubších kapes.

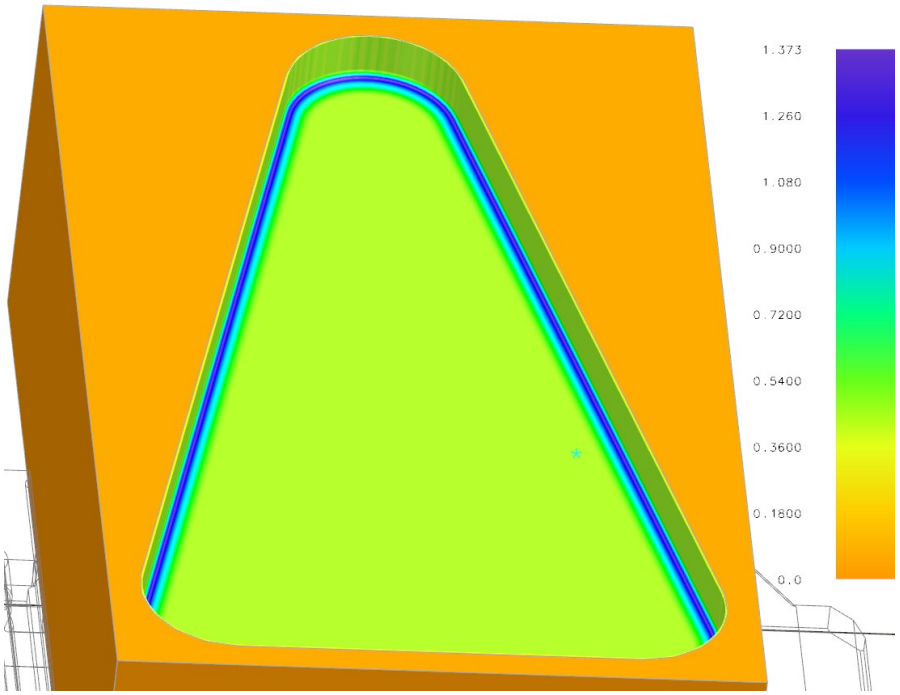


Obr. 52 – Graf znázorňující výrobní cenu jednoho kusu v závislosti na hloubce kapsy a použitých řezných podmínkách

Vzhledem ke tvaru destičky LPHT060310TR-M06 MP2050 znázorněné na Obr. 33 dochází k tvorbě zbytkového materiálu, jež negativně ovlivní dobu obrábění potřebnou při dokončovacích operacích. Neobrobená množství materiálu jednotlivých operací jsou znázorněny na Obr. 53 a Obr. 54, a to pomocí nejpřesnější, jemné analýzy IPW v programu Siemens NX. Je možno si povšimnout výrazného rozdílu v neobrobených částech – rozích, jež v případě CAVITY MILL_0,7 činí 1,373 mm oproti CAVITY MILL_4,5 s hodnotou zbytků 0,7359 mm. Za připomenutí stojí definovaný požadavek na dokončení 0,5 mm k nalezení v Tab. 19. Přestože tedy břitová destička XOMX10T308TR-ME07 MS2050, jejíž

tvar je k nalezení na Obr. 36, má hodnotu zaoblení 0,8 mm, zbytkový materiál činí pouze 0,2359 mm od přídavku na dokončení.

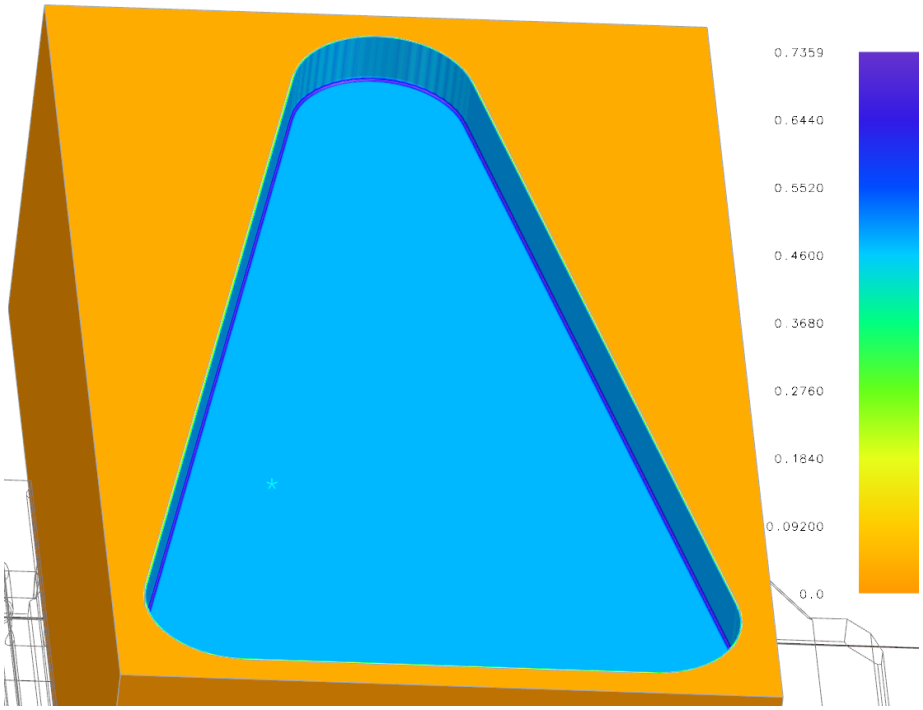
S ohledem na to, že destička LPHT060310TR-M06 MP2050 je použita při operacích CAVITY MILL_0,7 a CAVITY MILL_0,4, není nutností druhou operaci se stejnou hodnotou zbytku znázorňovat, neboť výsledek analýzy je identický. Stejná analogie platí v případě destičky XOMX10T308TR-ME07 MS2050.



Obr. 53 – Analýza metody CAVITY MILL_0,7 při hloubce kapsy 9 mm

Tab. 19 – Všeobecné podmínky zvolené při obrábění součásti č. 1

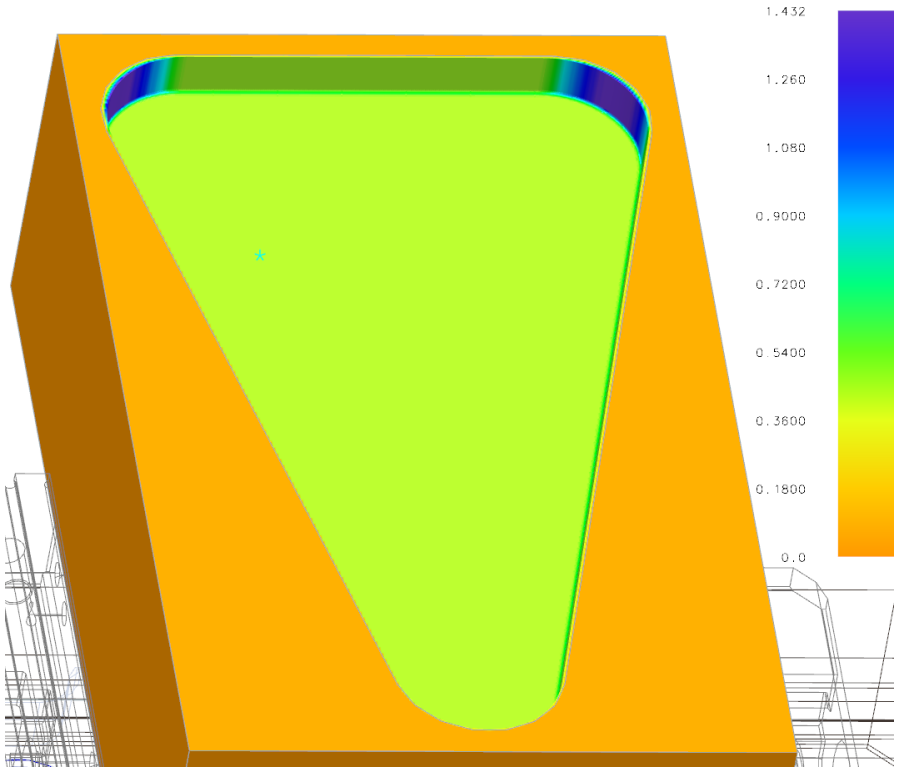
Atribut	**XOMX10T308TR-ME07 MS2050**
Vzor řezu	FOLLOW PART
Množství obráběného nástroje [%]	70
Přídavek součásti [mm]	0,5
Typ nájezdu	HELICAL
Zastoupení nástroje při obrábění zaoblení	40 %



Obr. 54 – Analýza metody CAVITY MILL_4,5 při hloubce kapsy 9 mm

6.2 Výchozí hodnota procentuálního zastoupení nástroje při obrábění zaoblení

V průběhu celé analýzy spjaté s první součástí dochází k úpravě procentuálního zastoupení nástroje při obrábění zaoblení. Procentuální zastoupení vypovídá o tom, jak velkou částí nástroje vyjádřenou v procentech dojde ke tvorbě zaoblení. Čím menší je tedy toto procento, tím menší část nástroje obrábí zaoblenou část. Výchozím nastavením strategie je 50 %. Avšak v případě použití předdefinované hodnoty dochází k neúplnému obrobení zmíněných zaoblených rohů kapsy, jak je možno vidět na Obr. 55. Neobrobený materiál s celkovým zbytkem součásti lze porovnat s Obr. 54, kde je hodnota změněná na 40 % zastoupení nástroje při obrábění zaoblení. Materiál neobrobený v rozích tedy dosahuje hodnot až 1,432 mm, což je o 0,6961 mm více nežli v případě 40 % zastoupení, čímž by značným způsobem došlo ke zkreslení hodnot výsledků analýzy.



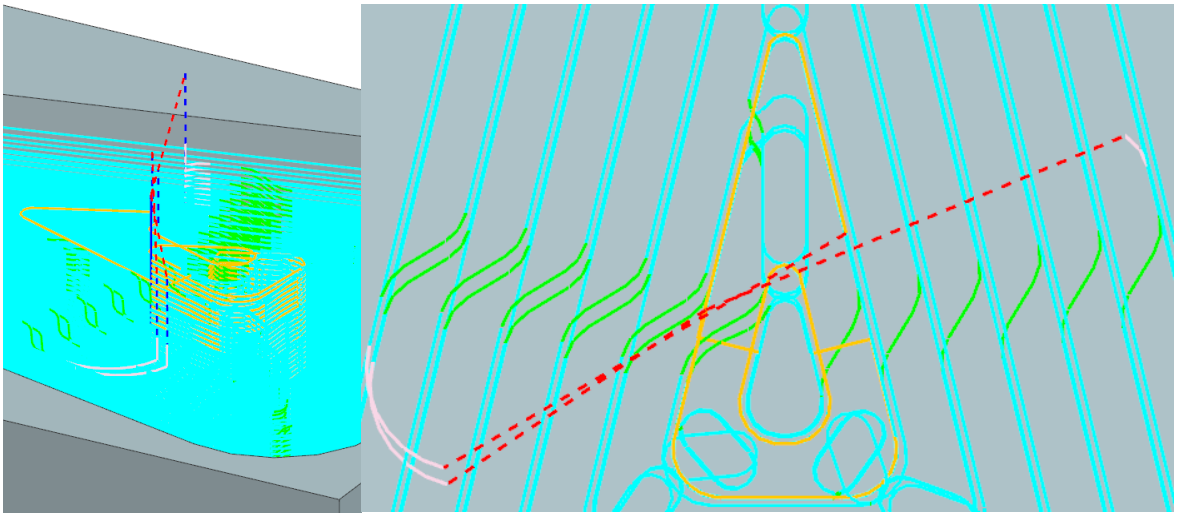
Obr. 55 – Analýza metody CAVITY MILL_4,5 s 50 % zastoupením nástroje při obrábění zaoblení při hloubce kapsy 9 mm

6.3 Vliv volby typu nájezdu na obráběcí čas

Dalším důležitým vlivem zajišťující delší životnost nástroje je vhodně zvolený typ nájezdu nástroje do materiálu. V tomto případě byl použit nástroj a destička z kapitoly 5.1 s předdefinovanými řeznými podmínkami výrobce, které jsou ke zhlédnutí v Tab. 18. Software Siemens NX nabízí pět typů nájezdů, jež jsou níže znázorněny v anglickém jazyce s českým překladem v závorkách:

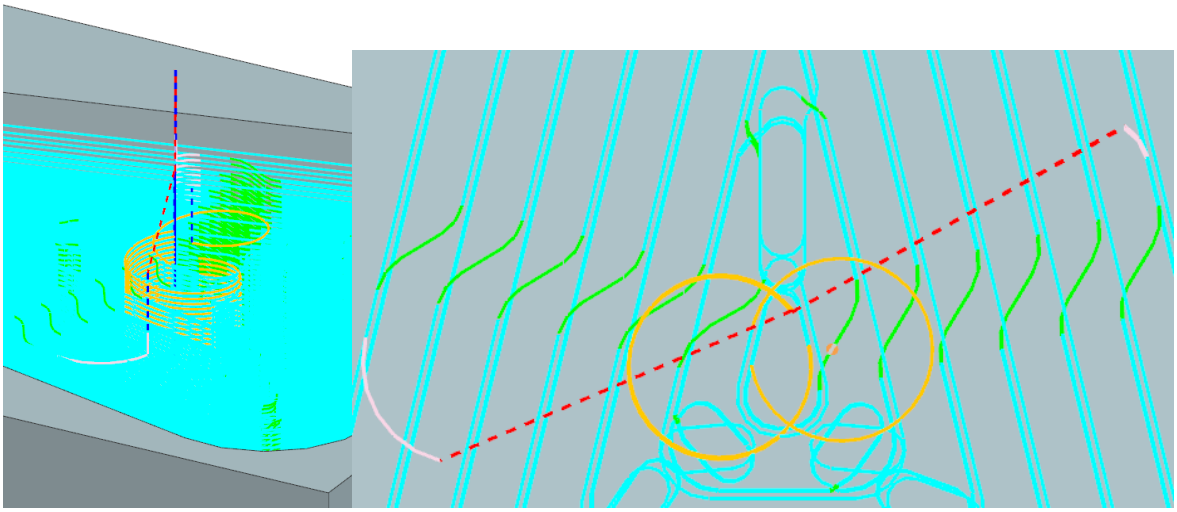
- SAME AS OPEN AREA (STEJNÝ JAKO OTEVŘENÁ OBLAST)
- HELICAL (ŠROUBOVICE)
- RAMP (SESTUP PO TVARU)
- PLUNGE (ZANOŘENÍ)
- NONE (NIC)

Typ SAME AS OPEN AREA se v práci nenachází, neboť zde žádná otevřená oblast není. V případě použitého nástroje s břitovou destičkou připadají v úvahu pouze nájezdy typu RAMP a HELICAL na Obr. 56 a Obr. 57. U těchto jediných dvou strategií lze také využít parametrů výrobce, jenž doporučuje maximální úhel zafrézování 5° v případě břitové destičky LPHT060310TR-M06 MP2050.



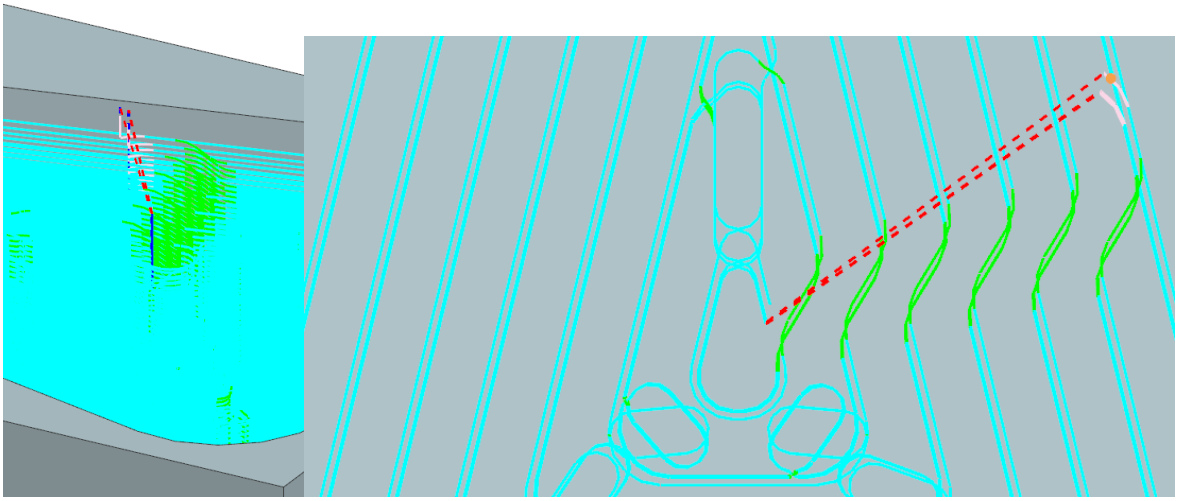
Obr. 56 – Vizualizace dráhy nájezdu RAMP při hloubce kapsy 29 mm

Nájezd HELICAL je volen dle výchozího nastavení programu Siemens NX až na změnu úhlu sestupu, přestože výrobce nástrojů uvádí minimální a maximální průměr pro šroubovou interpolaci. Tento fakt je prozatím ignorován pro zajištění nejpřesnějších výstupních dat, neboť by došlo ke znevýhodnění této operace z důvodu nedostatku informací pro zbylé možnosti.



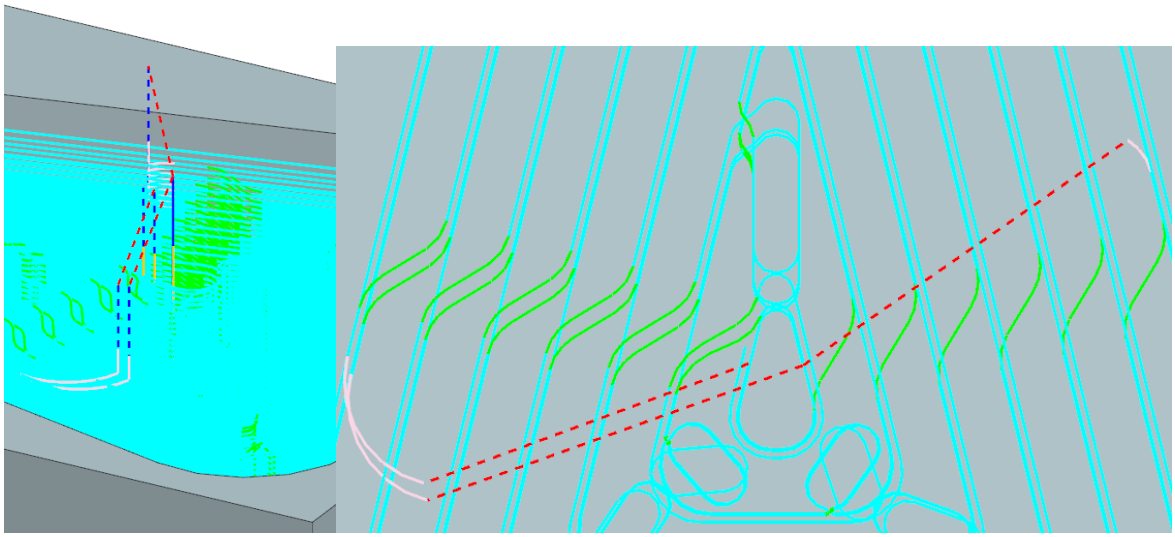
Obr. 57 – Vizualizace dráhy nájezdu HELICAL při hloubce kapsy 29 mm

Typ NONE nepočítá s žádným nájezdem, dochází tedy k přímému obrábění, což potvrzuje vizualizace dráhy nástroje na Obr. 58. Z praktického hlediska je tento typ nepoužitelný.

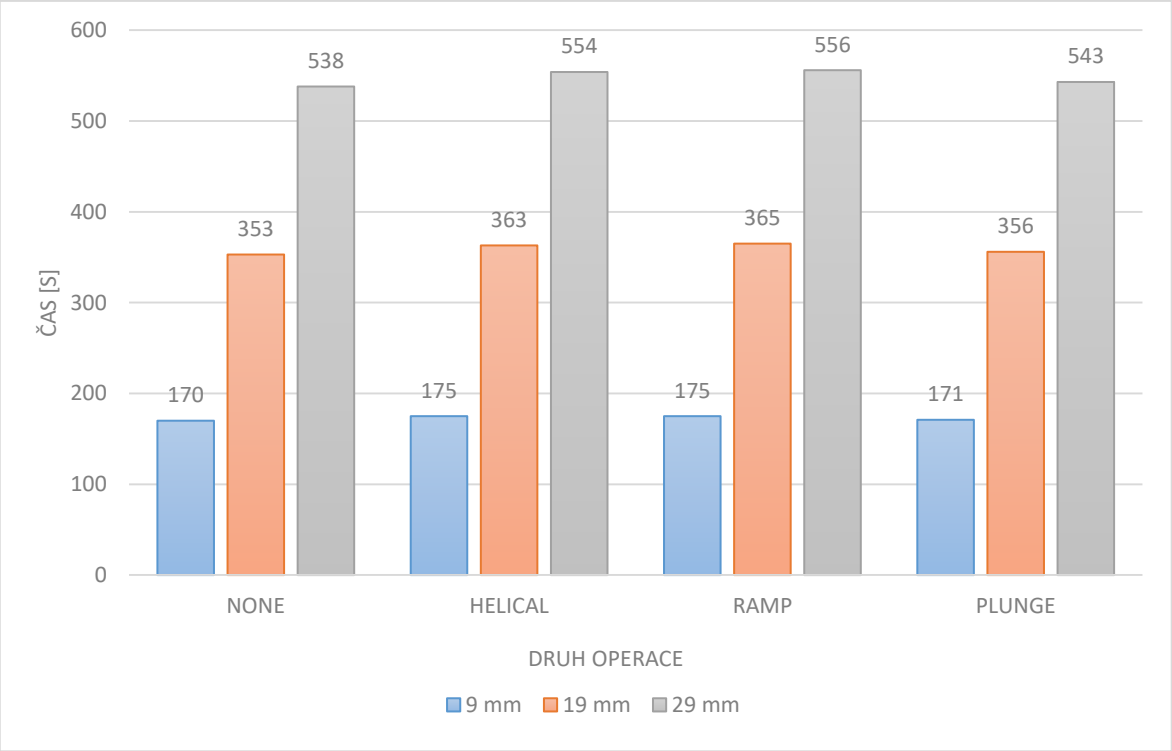


Obr. 58 – Vizualizace dráhy nájezdu NONE při hloubce kapsy 29 mm

Typ nájezdu PLUNGE, viditelný na Obr. 59, lze využít pouze za předpokladu, že nástrojem je fréza uzpůsobená této metodě. V tomto případě strategii použít nelze, neboť nástroj s břitovou destičkou není technologii uzpůsoben, a to především z důvodu průměru nástroje 16 mm a šířky břitové destičky 6,4 mm z Tab. 6 a Tab. 7. Použitím by došlo k nárazu tělesa nástroje do obráběného materiálu. Přesto se pro kompletnost v práci oba typy nájezdů nachází, a to především pro zjištění časových rozdílů, jež jsou k nahlédnutí na Obr. 60.



Obr. 59 – Vizualizace dráhy nájezdu PLUNGE při hloubce kapsy 29 mm



Obr. 60 – Porovnání vlivu volby nájezdu na obráběcí čas v případě metody CAVITY MILL_0,7

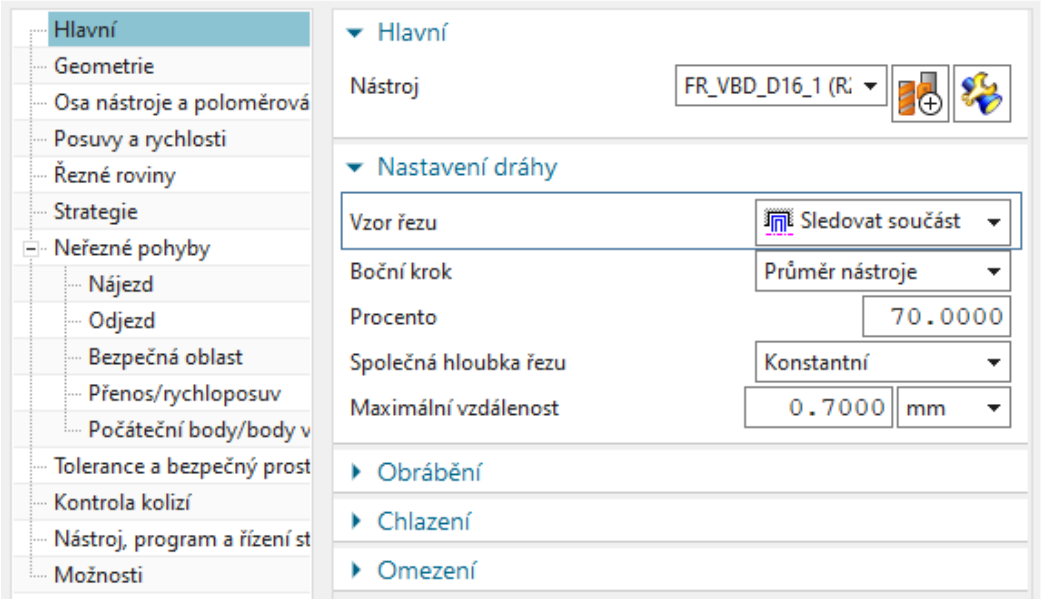
Z výše uvedených dat je patrné, že typ nájezdu HELICAL se od RAMP příliš neliší. Při hloubce kapsy 9 mm je výsledek identický, u hloubek 19 mm a 29 mm dochází ke dvousekundovému rozdílu ve prospěch typu nájezdu ve šroubovici. Z reálného hlediska však lze říci, že oba typy jsou ve vztahu k časové náročnosti velmi podobné. Zajímavostí je fakt, že metoda bez nájezdu, tedy NONE, je u hloubky kapsy 9 mm pouze o 5 s rychlejší nežli další dvě zmiňované. S touto analogií lze určit, jak dlouho nájezdy do materiálu trvají, což je v případě hloubky dutiny 19 mm pouze 10 s nájezdem HELICAL a 12 s v případě RAMP. Při hloubce kapsy 29 mm trvá nájezd HELICAL 16 s a RAMP 18 s. Výpočtem lze zjistit, že nájezdy trvají přibližně 3 % z celkového času obrábění.

6.4 Vliv volby vzoru řezu při obrábění kapsy

Vzor řezu je dalším velmi důležitým parametrem. Nevhodná volba vzoru může vést k významnému prodloužení času, případně k velkému množství neobrobených částí materiálu. K porovnání je využito původních řezných podmínek břitové LPHT060310TR-M06 MP2050 z Tab. 18. Nájezd probíhá po šroubovici s úhlem sestupu 5° a procentuální zastoupení nástroje při tvorbě zaoblení činí 40 %.

Siemens NX v modulu obrábění z Obr. 61 nabízí hned několik vzorů řezu, jež jsou níže znázorněny v anglickém jazyce s českým překladem v závorkách:

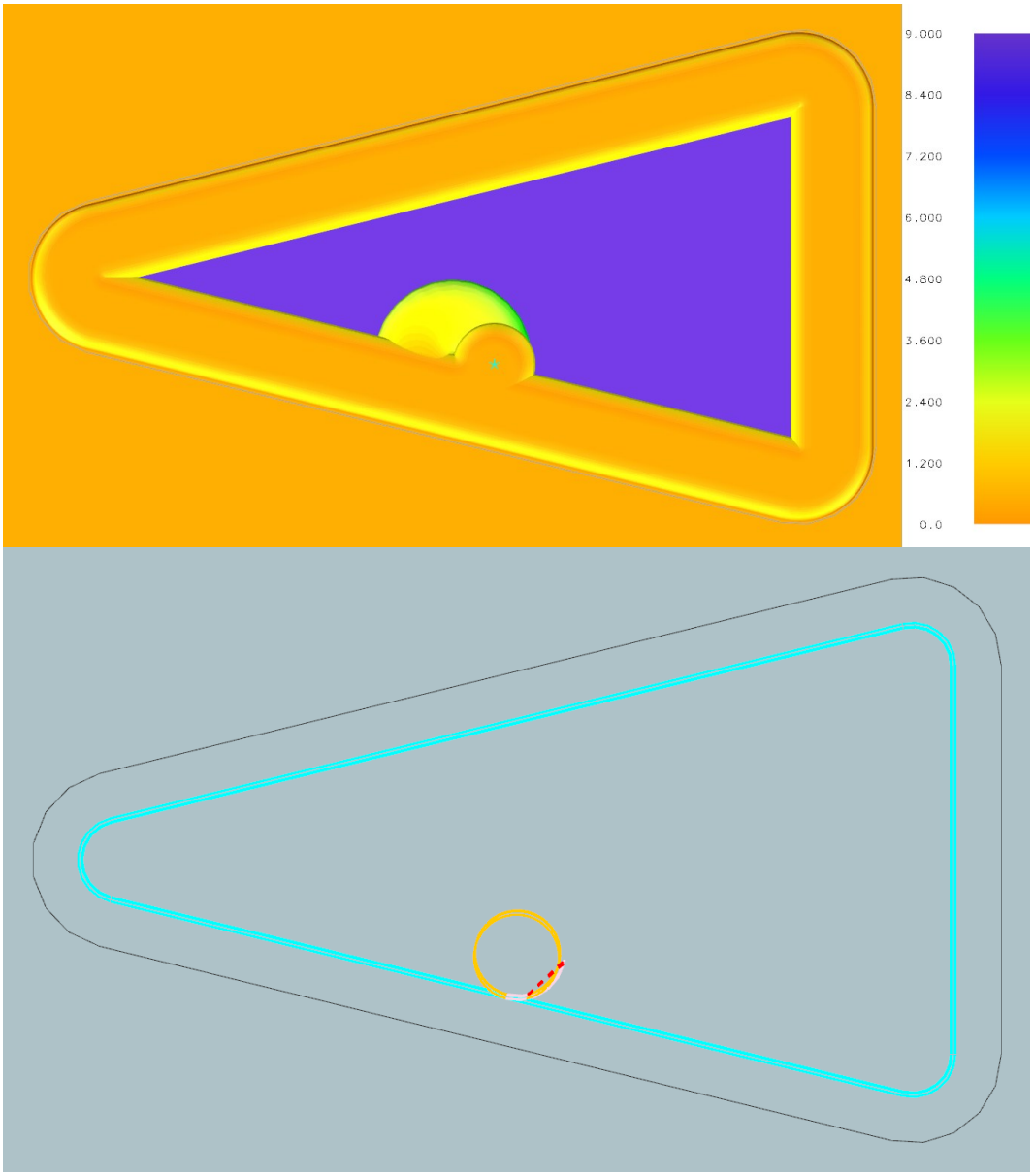
- FOLLOW PART (SLEDOVAT SOUČÁST)
- FOLLOW PERIPHERY (SLEDOVAT OBVOD)
- PROFILE (PROFIL)
- ZIG (CIK)
- ZIG ZAG (CIK CAK)
- ZIG WITH CONTOUR (CIK S KONTUROU)



Obr. 61 – Nastavení vzoru řezu v Siemens NX

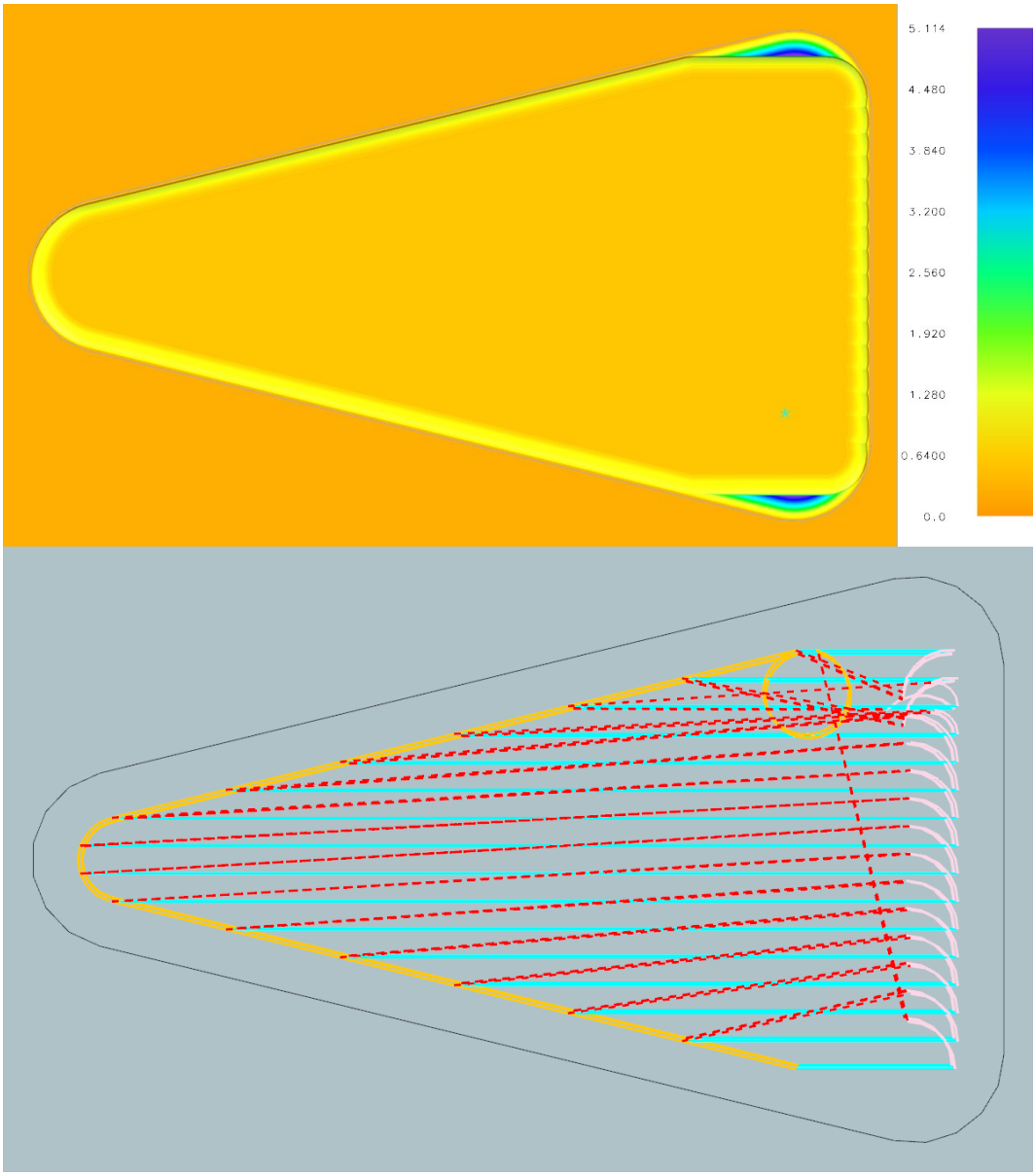
FOLLOW PART a FOLLOW PERIPHERY jsou v případě vytvořené geometrie kapsy první součásti identické. Vizualizace dráhy nástroje vzoru FOLLOW PART je k vidění na Obr. 48, analýza zbytkového materiálu se nachází na Obr. 53.

Vzor řezu PROFILE slouží pro dokončovací operace, jelikož se vygenerovaná dráha řezného pohybu nachází pouze u stěn dutiny, jako je znázorněno na Obr. 62. Tím je neobrobeno obrovské množství materiálu součásti. V tomto případě je tedy vzor řezu PROFILE nepoužitelný.



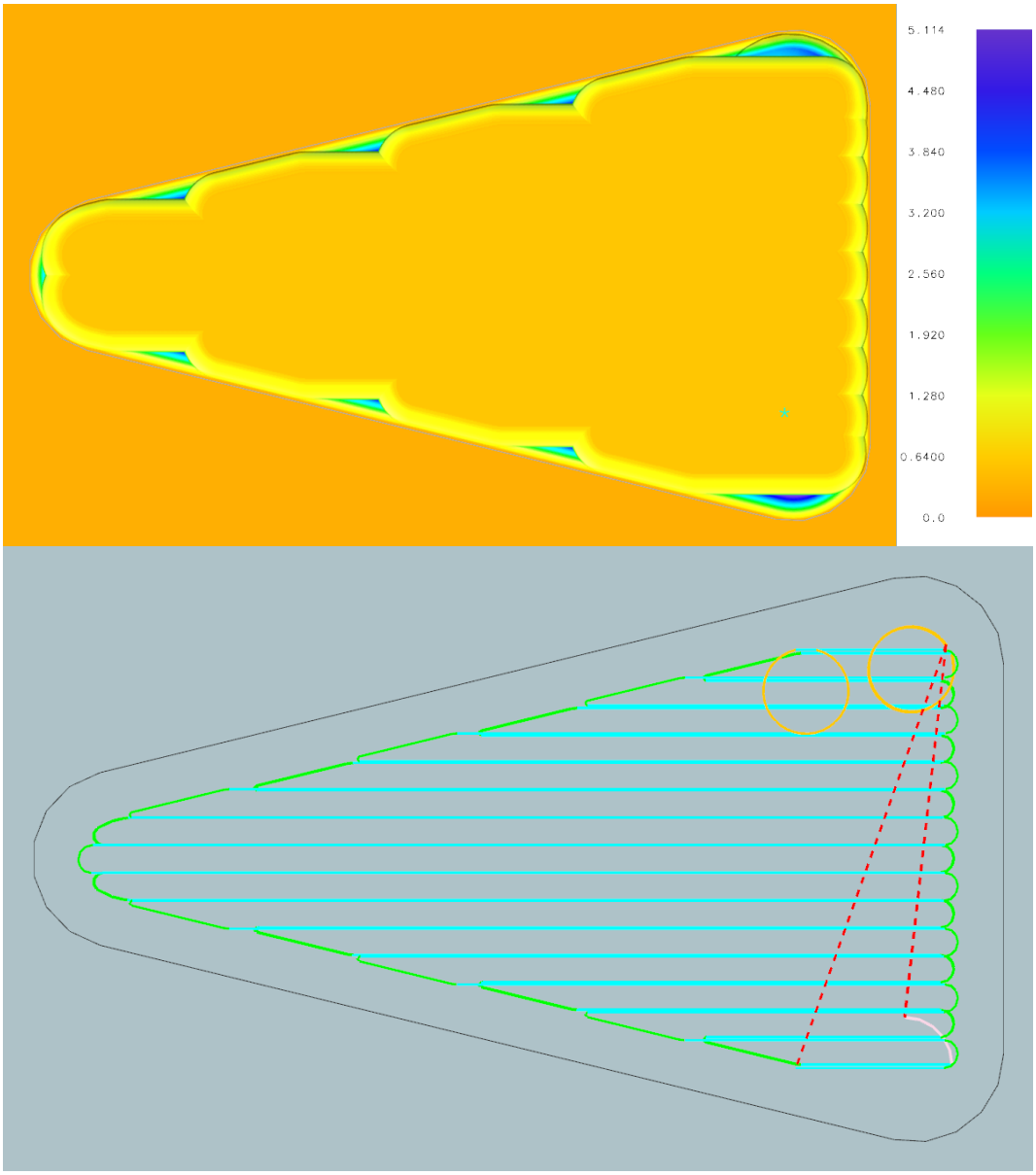
Obr. 62 – Vizualizace dráhy nástroje vzorem řezu PROFILE společně s analýzou zbytkového materiálu při hloubce kapsy 9 mm

Vzor řezu ZIG, ZIG ZAG a ZIG WITH CONTOUR jsou založeny na podobném principu, přesto se značně odlišují. Vzor řezu ZIG využívá jednosměrného úběru materiálu. Po dokončení řezné dráhy je nástroj nucen vrátit se vedlejším, neproduktivním pohybem do linie počátku předešlé řezné dráhy, avšak s posunutím, jak je k vidění na Obr. 63. Díky tomuto neproduktivnímu pohybu dochází k výraznému navýšení obráběcího času. Používá se především tam, kde je nutností výrazně chladit nástroj před dalším řezem.



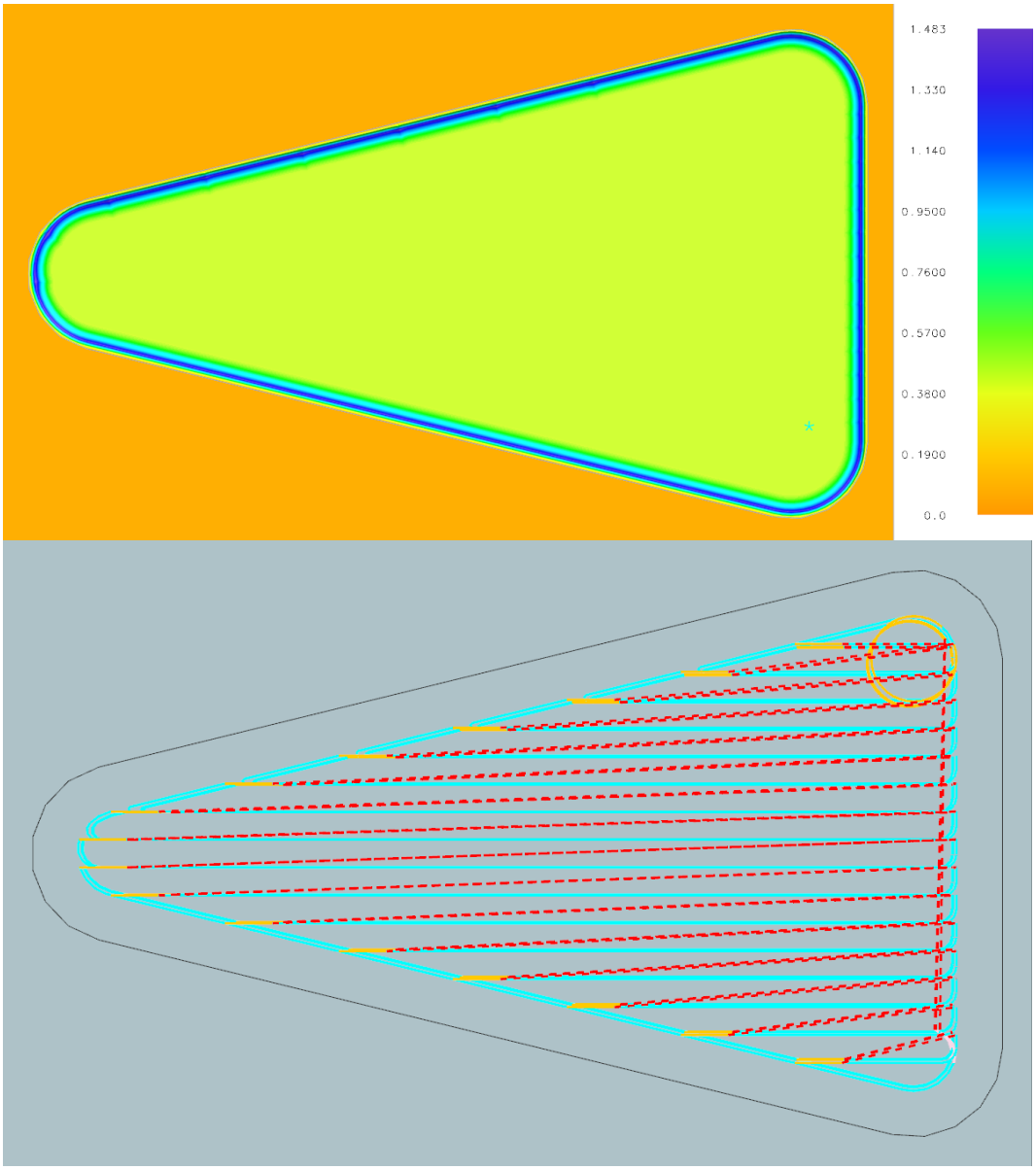
Obr. 63 – Vizualizace dráhy nástroje vzorem řezu ZIG společně s analýzou zbytkového materiálu při hloubce kapsy 9 mm

Vzor ZIG ZAG je na velmi podobné bázi, avšak neproduktivní pohyb je nahrazen produktivním, dochází tedy k úběru třísky v obou směrech součásti. Tím je zajištěno značně vyšší produktivity, což znázorňuje Obr. 66. Na druhou stranu zanechává větší množství zbytkového materiálu s přihlédnutím na identickou maximální hodnotu s dráhou ZIG. Celkovou vizualizaci dráhy nástroje společně s analýzou zbytkového materiálu je možno nalézt na Obr. 64.



Obr. 64 – Vizualizace dráhy nástroje vzorem řezu ZIG ZAG společně s analýzou zbytkového materiálu při hloubce kapsy 9 mm

Poslední vzor řezu, jež je podobného principu jako dva dříve zmíněné, je ZIG WITH CONTOUR z Obr. 65. Prvotně dochází k úběru materiálu stěny a následně k jednosměrnému obrábění včetně neproduktivního vratného pohybu, jako v případě metody ZIG. Tím je zapříčiněna menší hodnota zbytkového materiálu, jež se blíží variantě vzoru FOLLOW PART, která je k vidění na Obr. 48. Vzhledem však k vedlejšímu pohybu je obrábění časově ze všech variant nejnáročnější.

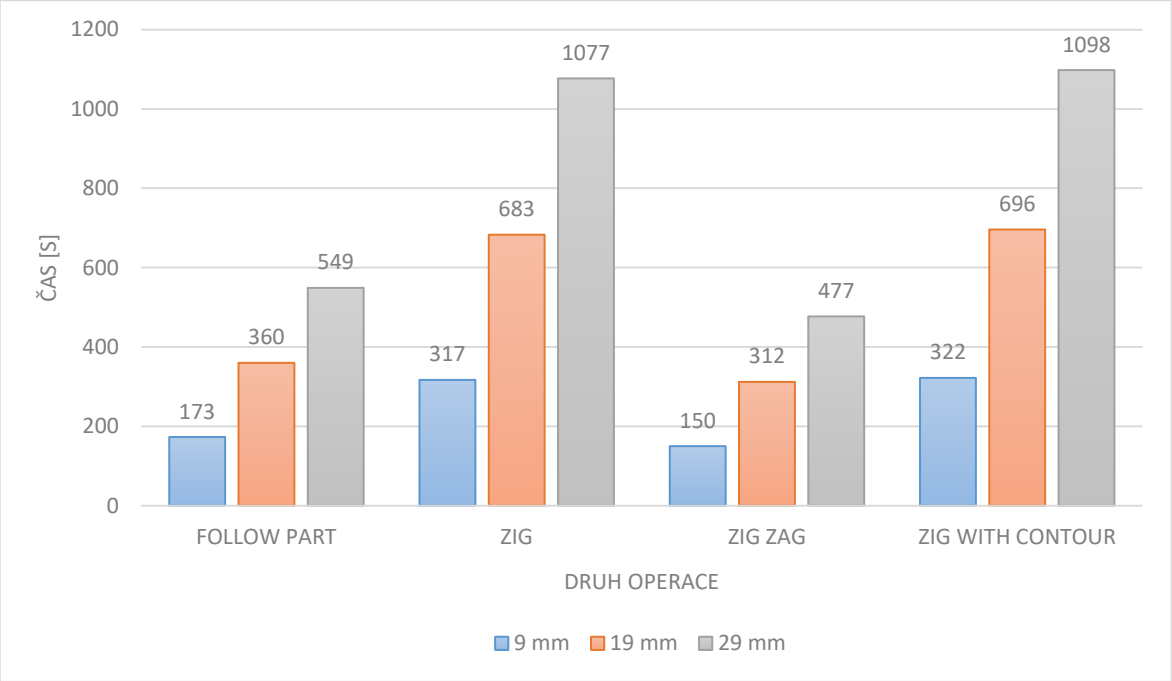


Obr. 65 – Vizualizace dráhy nástroje vzorem řezu ZIG WITH CONTOUR společně s analýzou zbytkového materiálu při hloubce kapsy 9 mm

Z Obr. 66 je možno si všimnout, že metoda FOLLOW PART není nejrychlejší operací. V případě hloubky kapsy 29 mm je o 72 s pomalejší nežli varianta ZIG ZAG. Přesto se však při tvaru kapsy jedná o nejvhodnější možnost, neboť je po obrábění povrch nejkvalitnější.

Navíc metoda ZIG ZAG zanechává také nejvíce zbytkového materiálu ze všech dostupných variant, kromě vzoru řezu PROFILE, jež je pro hrubovací operace nevyhovující. ZIG a ZIG WITH CONTOUR jsou časově velmi podobně náročné. Vzhledem k neobrobeným zbytkům vychází lépe varianta s konturou, neboť čas pro úplné obrobení součásti beze zbytku bude značně kratší. Přesto se dá říci, že operace ZIG WITH CONTOUR je dvakrát pomalejší nežli varianta FOLLOW PART, a to s méně kvalitněji obrobeným povrchem.

V případě tvaru součásti přicházejí v úvahu pouze varianty FOLLOW PART a FOLLOW PERIPHERY. Vzor řezu ZIG, ZIG ZAG a ZIG WITH CONTOUR jsou jednoznačně horší volbou. Kvalitněji obrobený povrch by byl v tomto případě zajištěn při obdélníkovém či čtvercovém tvaru kapsy.



Obr. 66 – Vliv volby vzoru řezu na obráběcí čas v případě CAVITY MILL_0,7

6.5 Porovnání metod v případě první součásti

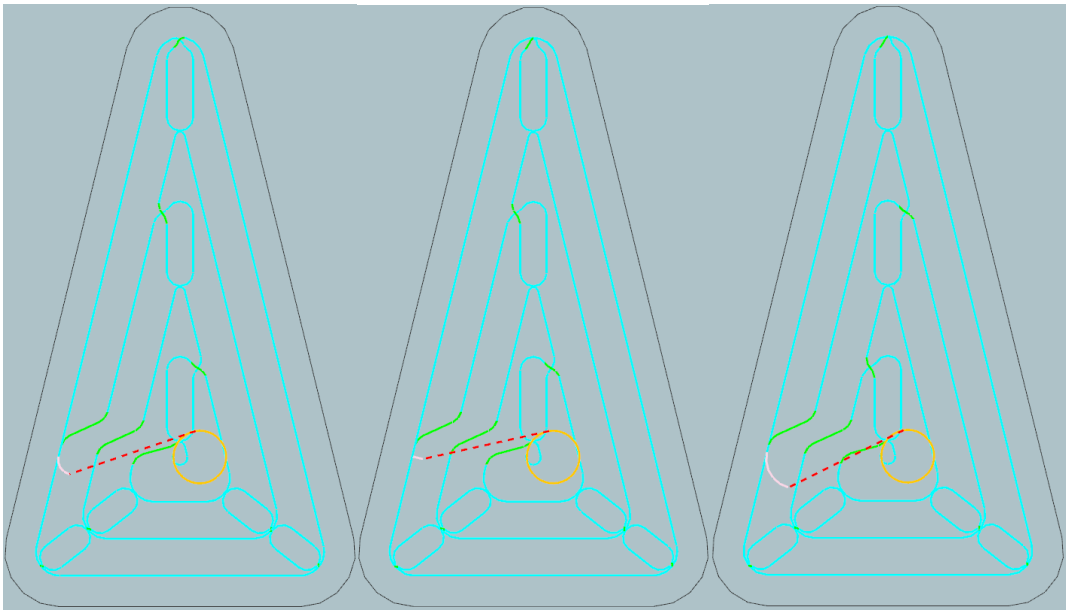
Software Siemens NX nabízí hned několik obráběcích metod. Mezi ty hlavní a zároveň nejpoužívanější patří již zmiňované CAVITY MILL neboli frézování dutin, dále metoda FLOOR WALL, v překladu dno a stěna a v neposlední řadě POCKETING, dle české verze frézování kapes. Další použitelnou metodou je PLUNGE MILLING, tedy frézování zanořením.

K zajištění co možná nejpřesnějšího porovnání došlo k obrábění všech metod stejným nástrojem a břitovou destičkou, jež jsou k nahlédnutí v kapitole 5.2. Řezné podmínky jsou znázorněny v Tab. 20.

Tab. 20 – Řezné podmínky při obrábění součásti č.2

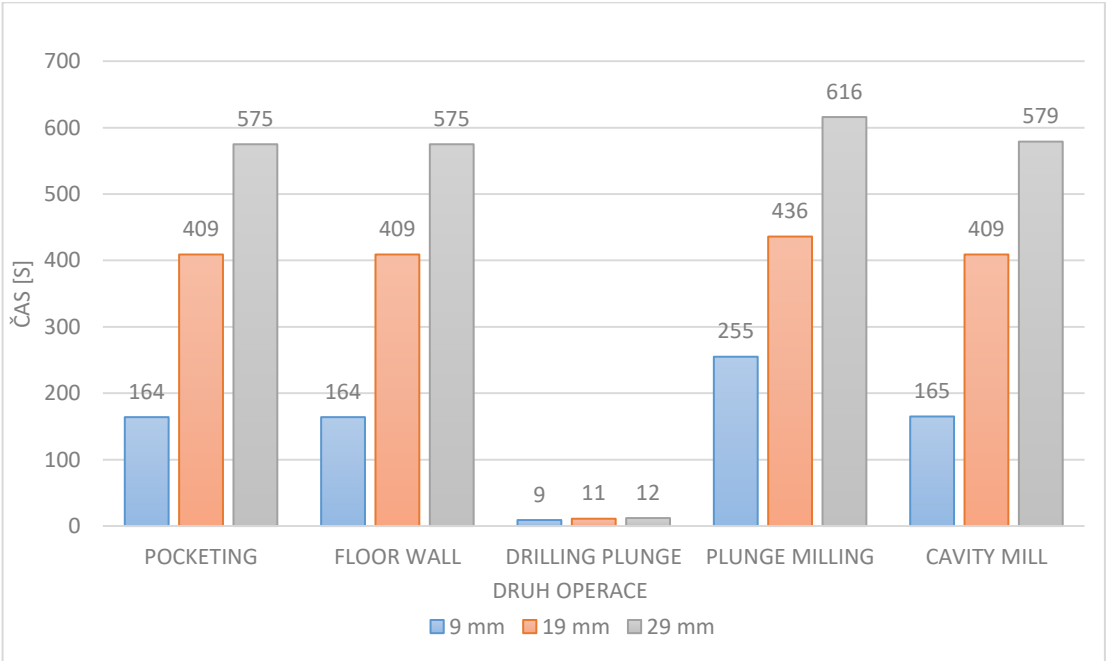
Atribut	**XOMX10T308TR-ME07 MS2050**
Vzor řezu	FOLLOW PART
Množství obráběného nástroje [%]	70
Přídavek součásti [mm]	0,5
Hloubka řezu [mm]	4,5
Řezná rychlost [m/min]	240
Posuv na zub [mm/zub]	0,095
Otáčky [ot/min]	4 775
Posuvová rychlost [mm/min]	907
Typ nájezdu	HELICAL
Úhel sestupu šroubovice [°]	7,5

Přestože jsou metody CAVITY MILL, FLOOR WALL a POCKETING rozdílného charakteru, je z Obr. 67 patrné, že při jednodušším tvaru kapsy nedochází k téměř žádným změnám drah nástroje napříč metodami. Jediný rozdíl je v obráceném postupu řezu metody CAVITY MILL vůči dvěma zmíněným.



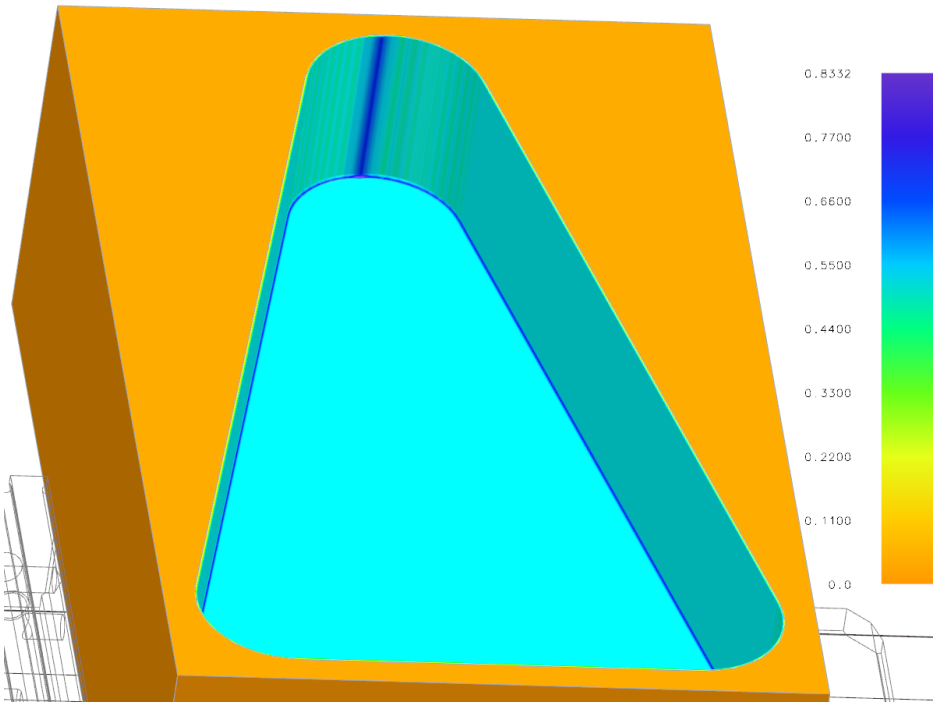
Obr. 67 – Porovnání dráhy nástroje metod POCKETING, FLOOR WALL a CAVITY MILL (zleva) pro kapsu hloubky 29 mm

O shodě metod pojednává i Obr. 68, jež znázorňuje výrobní časy při hloubkách kapes 9, 19 a 29 mm. Pokud však dojde k porovnání totožné operace CAVITY MILL se stejnými řeznými podmínkami z Obr. 51, obráběcí čas je v případě hloubky kapsy 9 a 19 mm identický. Avšak v případě hloubky dutiny 29 mm dochází k časovému rozdílu 5 s. Ne vždy se tedy program Siemens NX chová identicky v případě stejných operací. Přesto je třeba podotknout, že se jedná o minimální rozdíl, co se výsledného času obrábění týče. Je však tuto skutečnost nutno brát v potaz při volbě ideální metody pro danou součást.

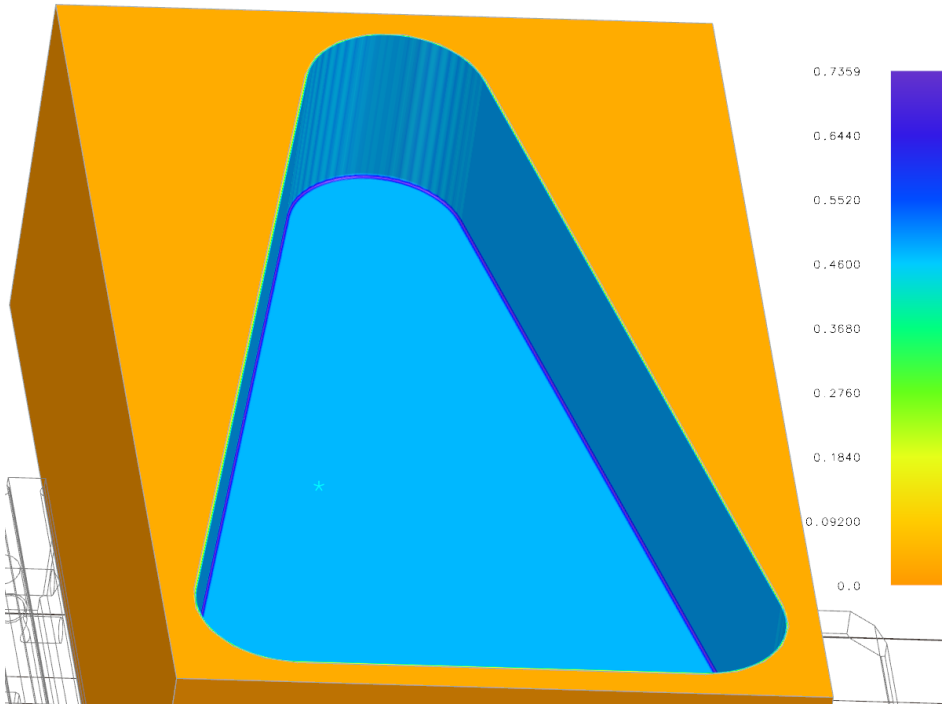


Obr. 68 – Vliv volby metody na obráběcí čas

Přestože jsou dráhy nástroje i časy obrábění jednotlivých operací identické, při prozkoumání analýzy z Obr. 69 a Obr. 70 je patrný rozdíl ve zbytku materiálu. Operace POCKETING zanechává vetší množství neobrobeného materiálu v jedné části zaoblení, a to přibližně o 0,1 mm. Z praktického hlediska se však jedná o zanedbatelný rozdíl.



Obr. 69 – Analýza zbytkového materiálu metody POCKETING při hloubce kapsy 29 mm



Obr. 70 – Analýza zbytkového materiálu metody FLOOR WALL a CAVITY MILL při hloubce kapsy 29 mm

Zvláštností je metoda PLUNGE MILLING neboli zanořování. Vzhledem k použitému nástroji bylo zapotřebí nejprve vyvrtat otvor, jež je na Obr. 68 k nalezení jako operace DRILLING PLUNGE. V laboratořích bylo změřeno, že výměna nástroje při 70 % rychloposuvu trvá 8 s. Procentuální hodnota rychloposuvu byla stanovena s rezervou z důvodu předejití namáhání stroje. Čas potřebný pro výměnu je již v čase vrtání započítán. Těleso vrtáku společně s břitovými destičkami je k nalezení v kapitole 5.4. Řezné podmínky se nachází v Tab. 21.

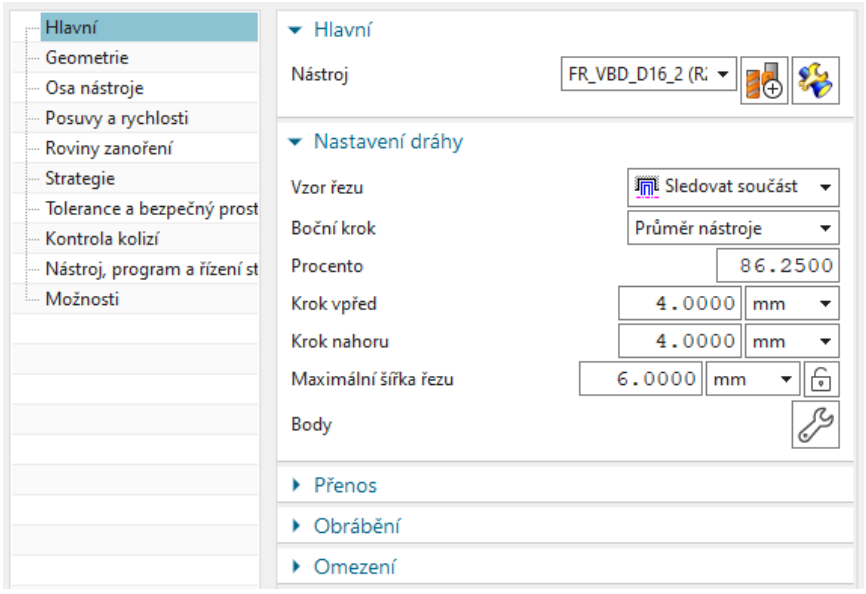
Tab. 21 – Řezné podmínky vrtáku SD523-16-48-25R7 a frézy R217.69-0816.RE-10-2A

Atribut	**SD523-16-48-25R7**	**R217.69-0816.RE-10-2A**
Hloubka otvoru [mm]	8,3/18,3/28,3	9/19/29
Řezná rychlost [m/min]	210	225
Posuv na zub [mm/zub]	0,06	0,095
Otáčky [ot/min]	4 178	4 476
Posuvová rychlost [mm/min]	501	850

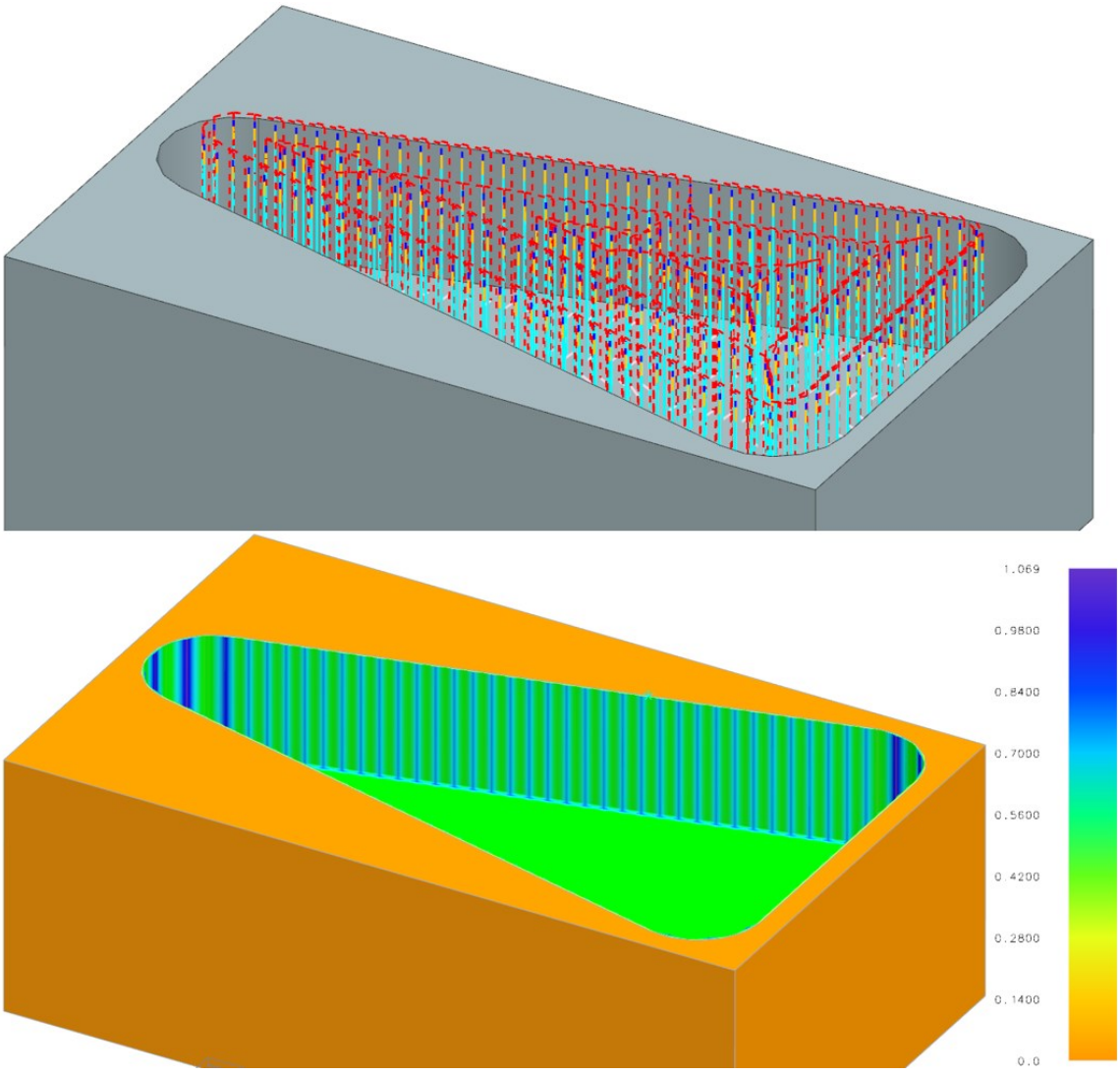
Díky vyvrtání nedochází ke kolizi, přestože břitové destičky v případě tělesa R217.69-0816.RE-10-2A nepokrývají celou řeznou plochu. Tomu je uzpůsobeno i použitelné procento plochy nástroje, jehož výpočet je k vidění v rovnici níže.

$$Procento\ plochy\ nástroje = \frac{Šířka\ destičky * Počet\ destiček}{Průměr\ tělesa} * 100 = \frac{6{,}9 * 2}{16} * 100 = 86{,}25\ \% \quad (2)$$

Hodnota kroku vpřed a nahoru z Obr. 71 je převzatá z výchozích dat výrobce tělesa a břitové destičky Seco Tools, s.r.o. po přiřazení obráběného materiálu a zvolené metody. Řezné podmínky jsou opět k nalezení v Tab. 21. Vizualizace dráhy nástroje metody PLUNGE MILLING je k nalezení na Obr. 72 společně s analýzou zbytkového materiálu.



Obr. 71 – Nastavení dráhy řezu operace PLUNGE MILLING



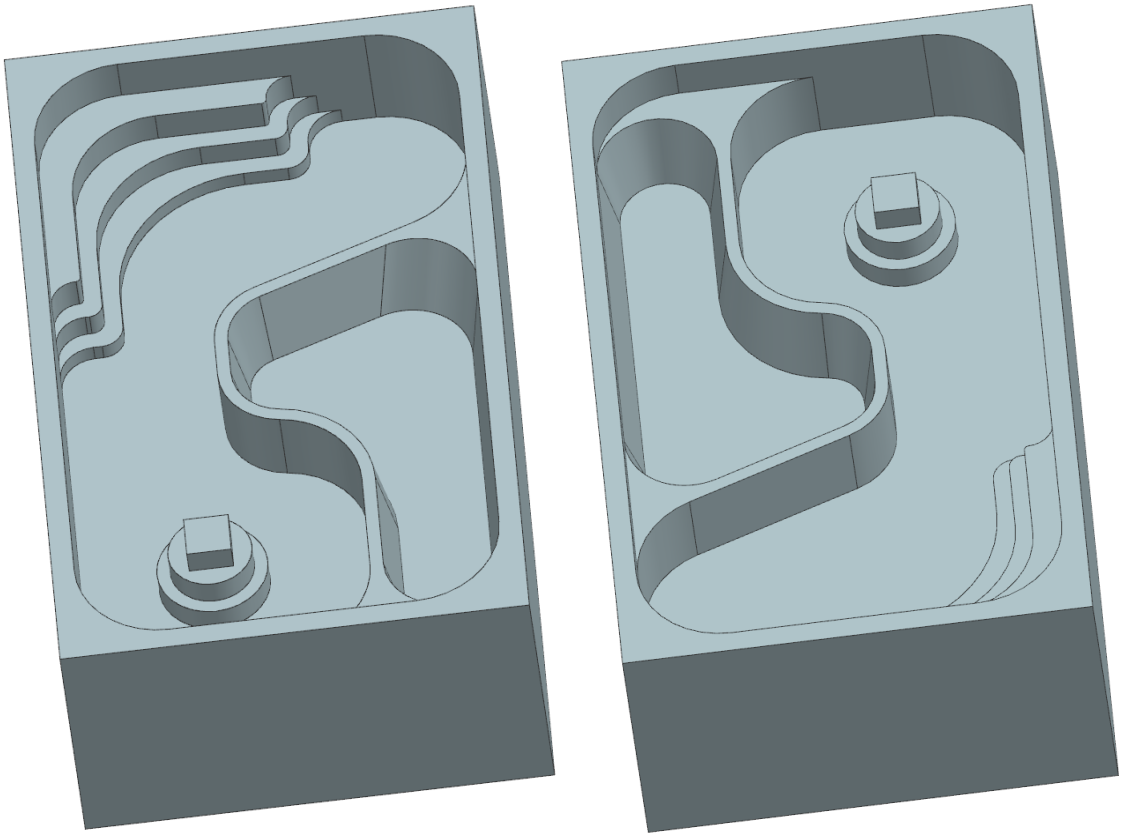
Obr. 72 – Vizualizace dráhy nástroje metody PLUNGE MILLING společně s analýzou zbytkového materiálu při hloubce kapsy 29 mm

Díky malým hodnotám výchozích kroků vpřed a nahoru dochází k relativně kvalitně obrobenému povrchu s hodnotou zbytku přibližně 0,5 mm navíc vůči přídavku na dokončení, a to především v zaoblených místech součásti. Na druhou stranu operace trvá značně delší dobu především při hloubce kapsy 9 mm, jak je vidět z Obr. 68. V potaz je také potřeba brát nutnost použití vrtáku, tedy nástroje navíc. Přestože však nástroj není této metodě uzpůsoben a z toho důvodu bylo nutností změnit, a tím zhoršit řezné podmínky, poměr zbytku materiálu a obráběného času není zklamáním. S použitím vhodného nástroje by metoda vykazovala značně vyšší produktivitu bez nutnosti využít vrtací operace, avšak na úkor vyšší hodnoty zbytkového materiálu z důvodu větších hodnot kroku vpřed a nahoru.

7 SIMULOVANÁ DATA SOUČÁSTI Č.2

Vzhledem k totožným drahám nástroje a času obrobení metod CAVITY MILL, FLOOR WALL a POCKETING byla vytvořena další součást, jež je složitějšího tvaru. Dochází tak k větším rozdílům mezi těmito metodami.

Vytvořená součást, stejně jako ta první, vychází z polotovaru nacházejícího se v laboratořích a je k vidění na Obr. 73. Na rozdíl od první součásti je zde pouze jedna pevná hloubka kapsy, jež činí 29 mm. Nedochází totiž k porovnání metod v závislosti na hloubce, nýbrž na zmiňované složitosti a variabilitě rádiusů.



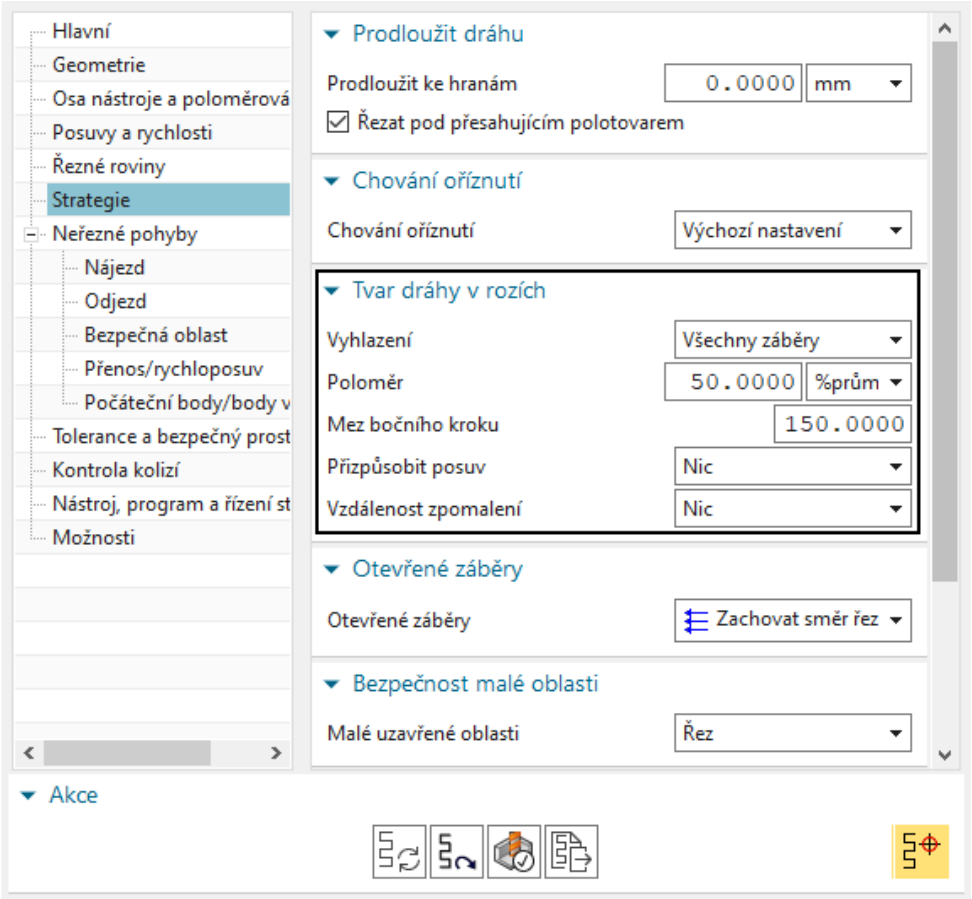
Obr. 73 – Obráběná součást č.2

Řezné podmínky jsou voleny totožné jako v případě první součásti, a jsou k nahlédnutí v Tab. 20. Tím je zajištěno nejpřesnější porovnání rozdílů metod mezi jednodušší a složitější součástí.

7.1 Analýza zbytkového materiálu v závislosti na procentuálním zastoupení nástroje

Jako v první součásti, i zde se nenachází ostré hrany, jež by frézováním nebylo možné obrobit. Z toho důvodu bylo zvoleno několik zaoblení s přihlédnutím k průměru použitého nástroje. Většina rádiusů má právě menší poloměr, než by frézou při výchozích podmínkách bylo možno obrobit na požadovaný zbytek součásti s přídavkem 0,5 mm. Díky tomu dochází k porovnání zbytkového materiálu za pomocí analýzy vzhledem k upravenému zastoupení průměru obráběného nástroje při tvorbě zaoblení. Rozlišení analýzy IPW je vždy voleno jemné, aby docházelo k nejpřesnějšímu vykreslování množství zbytkového materiálu.

Výchozím nastavením v softwaru Siemens NX pro Tvar dráhy v rozích je v případě Vyhlazení při variantě Všechny záběry 50 % průměru nástroje, o čemž pojednává Obr. 74.



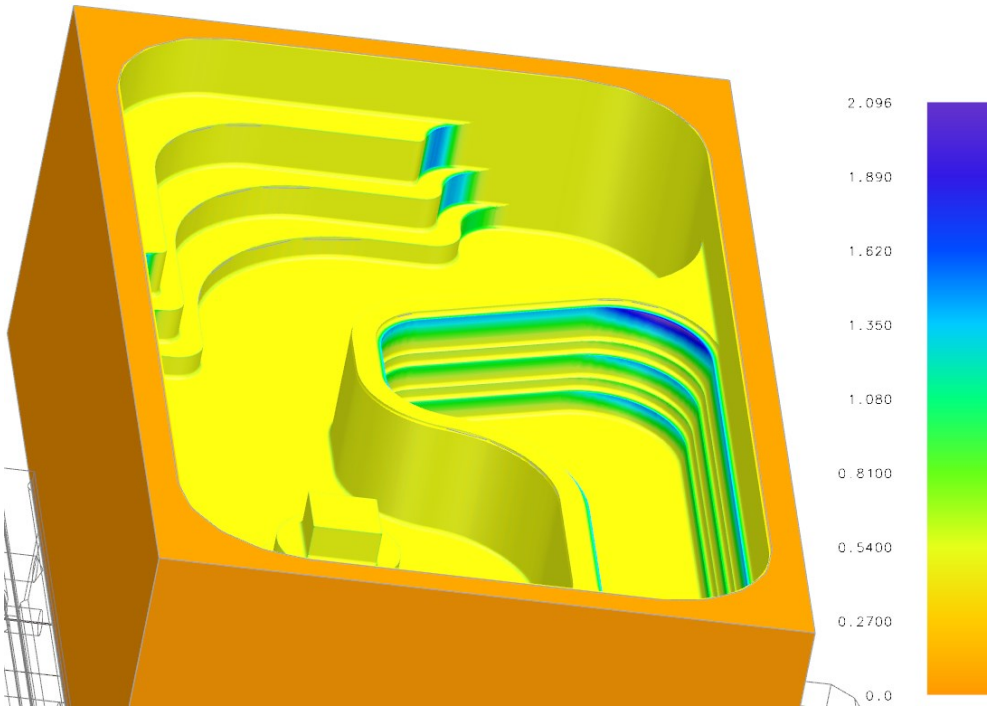
Obr. 74 – Parametry Tvaru dráhy v rozích

Z Tab. 22 znázorňující množství zbytkového materiálu jednotlivých operací v závislosti na procentuálním zastoupení nástroje při tvorbě zaoblení je patrné, že mezi operacemi je až na výjimky minimální rozdíl.

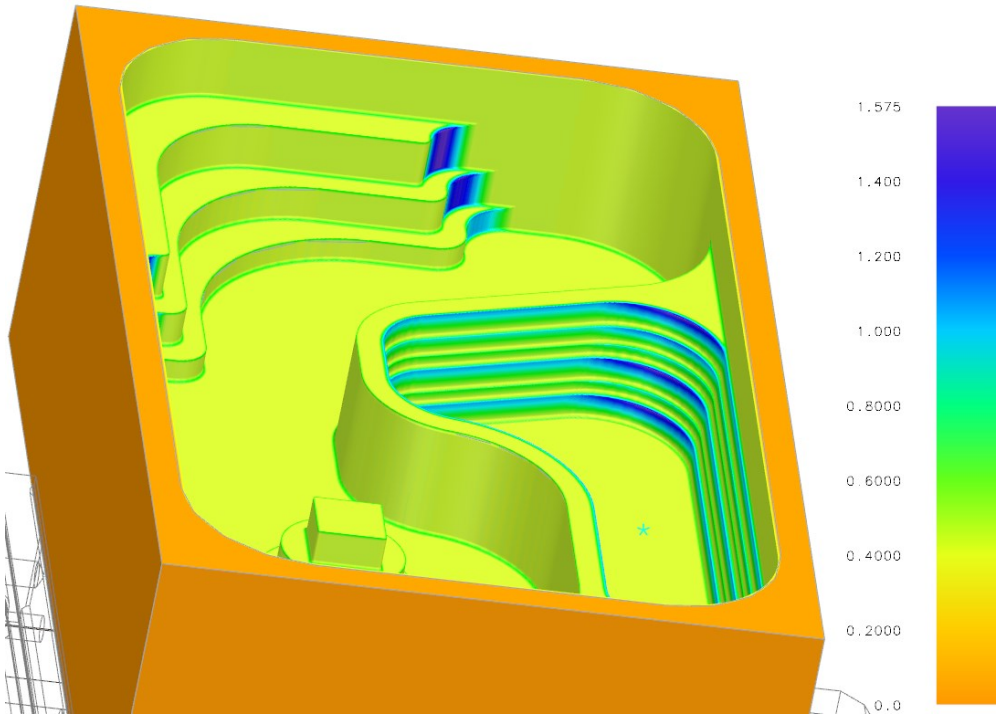
Tab. 22 – Zbytkový materiál jednotlivých operací v závislosti na procentuálním zastoupení nástroje při tvorbě zaoblení

Metody operací	**Procentuální zastoupení průměru nástroje na tvorbu zaoblení [%]**					
	50	40	30	20	10	5
CAVITY MILL	3,363	2,978	2,555	2,169	1,740	1,575
FLOOR WALL	3,392	2,979	2,555	2,169	2,096	2,096
POCKETING	3,392	2,979	2,555	2,169	2,096	2,096

Při 10 % a 5 % zastoupení průměru nástroje dochází k odlišení, kdy operace CAVITY MILL po obrobení zanechává podstatně menší zbytek. To je v případě metod FLOOR WALL a POCKETING způsobeno neobrobením části kapsy se zkosenými stěnami pod úhlem 10°. Celkové rozdíly zbytků obrobené součásti jsou k nalezení z vygenerovaných analýz na Obr. 75 a Obr. 76, kdy operace CAVITY MILL vykazuje o 0,5 mm kvalitněji obrobený povrch vůči dvěma zmiňovaným. Tím se sníží doba potřebná pro dokončovací operace.



Obr. 75 – Analýza metody FLOOR WALL a POCKETING při 5 % zastoupení průměru nástroje

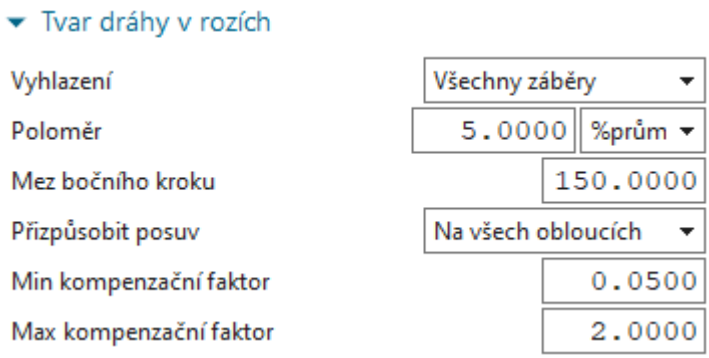


Obr. 76 – Analýza metody CAVITY MILL při 5 % zastoupení průměru nástroje

7.2 Analýza obráběcích časů v závislosti na procentuálním zastoupení nástroje

Stejně jako v kapitole 7.1., i nyní dochází k posouzení procentuálního zastoupení nástroje, avšak v tomto případě s porovnáním obráběcích časů.

Metody se symbolem „*“ referují k operacím, kde je aktivní Přizpůsobení posuvu na všech obloucích. Při této změně jsou zachovány výchozí hodnoty kompenzačních faktorů programu, jež je možno vidět na Obr. 77. To má za následek snížení posuvové rychlosti při tvorbě zaoblení. Tím dochází k prevenci poškození stroje či nástroje, snížení vibrací, a to přispívá ke zvýšení životnosti nástroje.



Obr. 77 – Výchozí hodnoty přizpůsobení posuvu

Jak je možno vidět v Tab. 23, čas potřebný k obrobení součásti se touto změnou výrazně prodlouží, ve většině případů o přibližně 25 %.

Zvláštností je, že v případě metody CAVITY MILL dochází při zmenšování procentuálního zastoupení průměru nástroje povětšinou k pozvolnému snižování obráběcího času, avšak v případě 30 % a 20 % zastoupení se naopak čas prodlužuje při konstantním klesání zbytkového materiálu. Jedná se však pouze o mírný rozdíl.

V případě FLOOR WALL a POCKETING dochází k výraznějším rozdílům především s přizpůsobením posuvu, a to při 40 %, 30 % a 20 % zastoupení průměru. Dalším rozdílem také je, že přestože jsou FLOOR WALL a POCKETING velmi podobné – obráběcí časy bez přizpůsobení posuvu jsou téměř stejné a zbytkový materiál po obrábění je identický, časy s přizpůsobením posuvu se výrazně liší, v případě 5 % zastoupení průměru nástroje je to o 44 s.

Je možné si také povšimnout, že v případě FLOOR WALL dochází ke snižování času mezi 10 % a 5 % zastoupením průměru nástroje, narozdíl od operace POCKETING, kdy je

obráběcí čas mezi těmito hodnotami stejný. Je třeba podotknout, že zbytkový materiál je v obou případech procentuálního zastoupení nástroje identický.

Tab. 23 – Obráběcí čas jednotlivých operací v závislosti na procentuálním zastoupení nástroje při tvorbě zaoblení

Metody operací	**Procentuální zastoupení průměru nástroje na tvorbu zaoblení [%]**					
	50	40	30	20	10	5
CAVITY MILL	16:02	15:56	15:59	15:57	15:46	15:32
CAVITY MILL*	20:34	20:29	20:32	20:32	20:09	19:40
FLOOR WALL	15:56	15:56	15:59	15:59	15:50	15:36
FLOOR WALL*	20:41	20:53	20:57	21:03	20:36	20:05
POCKETING	15:57	15:57	15:59	16:02	15:51	15:36
POCKETING*	20:55	21:03	21:10	21:26	20:49	20:49

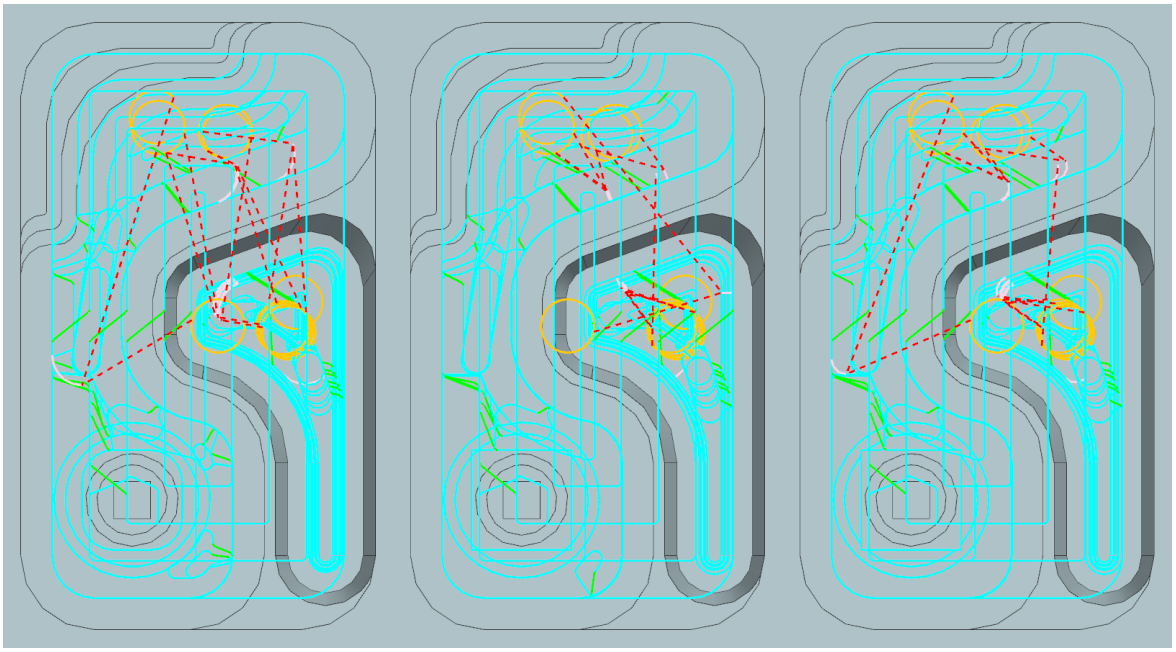
Vysvětlivka: „*“ - operace s aktivním přizpůsobením posuvu na všech obloucích

Tak, jako tomu bylo v kapitole 6.5, i zde při 40 % zastoupení průměru platí, že čas napříč metodami je v toleranci jedné sekundy identický. Při nejmenším procentuálním zastoupení dochází k mírným časovým rozdílům, a to konkrétně 4 s. Jedná se však s největší pravděpodobností o chybu programu a metody jsou od sebe časově z praktického hlediska k nerozeznání.

7.3 Porovnání rozdílů dráhy nástroje

Při bližším zkoumání jednotlivých metod je patrné, že v případě hlavního, produktivního pohybu jsou dráhy téměř identické. Větší rozdíl lze nalézt v neproduktivním pohybu, tedy v nájezdech a přejezdech nástroje. V tomto případě je možno vypozorovat, že metoda CAVITY MILL, ke zhlédnutí na Obr. 78, vykazuje přejezdy více chaotické než ve zbylých dvou operacích, což bude prodlužovat dobu obrobení součásti. Tato skutečnost se však ve vygenerovaných časech neprojevuje, neboť operace trvá kratší dobu, než je tomu u zbylých metod.

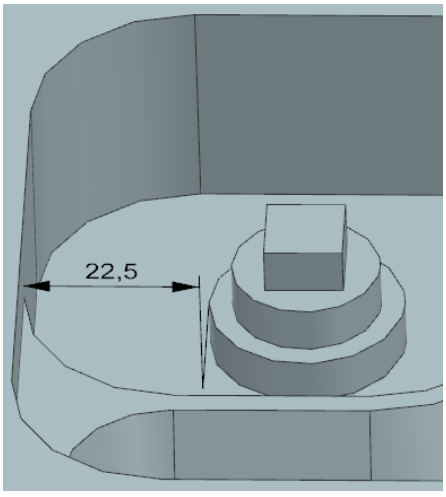
Tak jako tomu bylo v kapitolách 7.1 a 7.2, i nyní platí, že až na minimální rozdíly jsou v tomto případě tvaru dutiny metody FLOOR WALL a POCKETING shodné.



Obr. 78 – Dráha nástroje metody CAVITY MILL, FLOOR WALL a POCKETING s 5% zastoupením nástroje (zleva)

7.4 Porovnání rozdílů procentuálního zastoupení průměru nástroje na tvorbu zaoblení

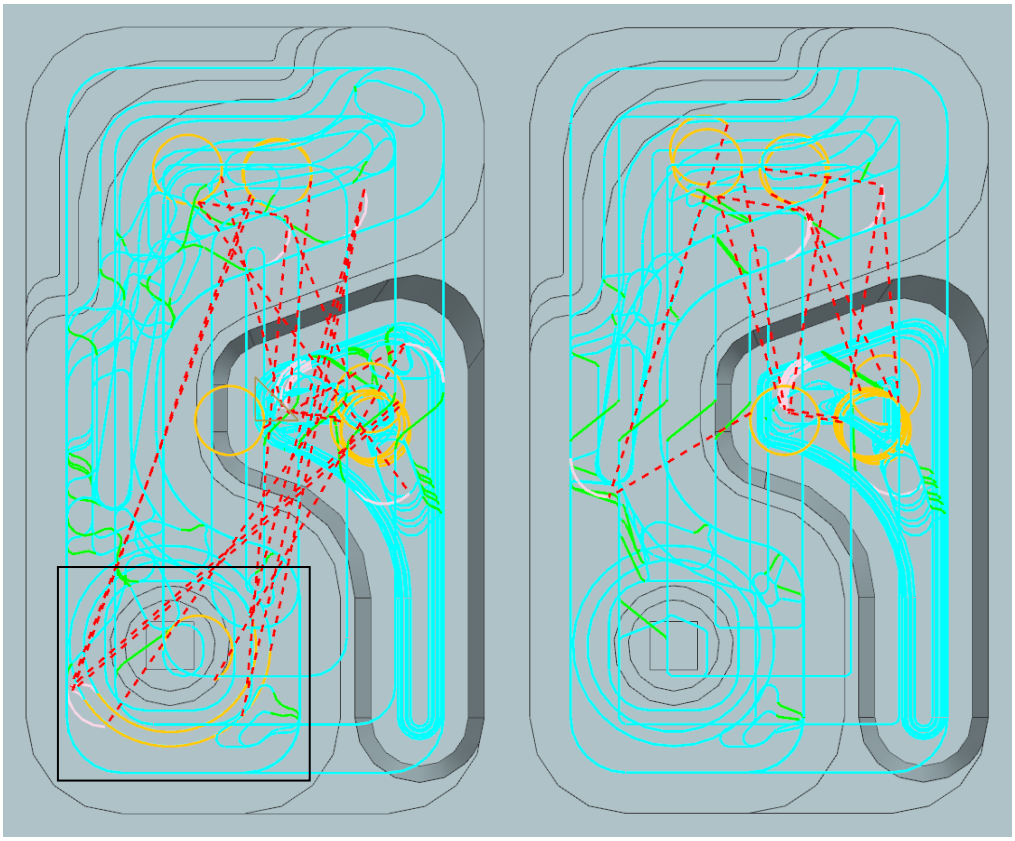
Z Obr. 80 je patrný rozdíl ve větším počtu přejezdů u 50 % zastoupení nástroje. Jejich větší počet je dán především malým prostorem 22,5 mm mezi koncem tvarové části a stěnou výrobku, jež je zakótován na Obr. 79 a znázorněn na Obr. 80.



Obr. 79 – Prostor mezi tvarovou součástí a stěnou dutiny

Při vyšším zastoupení nástroje dochází k návratu do těchto míst pro úplné obrobení. Fréza tedy musí nejprve vyjet z pracovní dráhy a rychloposuvem se dostat na druhou stranu dílce, což je hlavní faktor prodlužující výsledný čas o 30 s.

Dalším důležitým faktorem velkého časového rozdílu obrábění je míra zaoblení produktivní dráhy nástroje v rozích, jež je v případě 5 % zastoupení značně menší. Tím se snižuje dráha, jež musí nástroj v pracovním posuvu urazit.



Obr. 80 – Metoda CAVITY MILL s 50 % zastoupení nástroje (vlevo) a 5 % (vpravo)

8 POROVNÁNÍ SKUTEČNÝCH ÚDAJŮ S VYGENEROVANÝMI

Nejprve bylo potřeba mírně pozměnit vstupní údaje pro zajištění bezpečnosti při obrábění. V předchozích kapitolách se využívalo maximálního úhlu zafrézování obou nástrojů, jež jsou k vidění v Tab. 6 a Tab. 8. Došlo ke zmenšení tohoto úhlu o 1° v obou případech. Frézy nyní tvoří šroubovici pod úhlem 4°, respektive 6,5°. Následovala úprava hodnot průměru otvoru pro šroubovou interpolaci, který byl změněn s rezervou 0,5 mm vůči minimálnímu průměru dle výrobce. Kompletní řezné podmínky pro oba dílce je možno vidět v Tab. 24.

Tab. 24 – Řezné podmínky pro obrobení reálných dílců

Atribut	**Součást č.1**	**Součást č.2**
Nástroj	R217.21-0816.RE-LP06.2A	R217.69-0816.RE-10-2A
Břitová destička	LPHT060310TR-M06 MP2050	XOMX10T308TR-ME07 MS2050
Druh metody	CAVITY MILL	POCKETING
Množství obráběného nástroje [%]	70	70
Vzor řezu	FOLLOW PART	FOLLOW PART
Přídavek na dokončení [mm]	0,5	0,5
Hloubka řezu [mm]	0,7	4,5
Řezná rychlost [m/min]	343	240
Posuv na zub [mm/zub]	0,65	0,095
Otáčky [ot/min]	6 824	4 775
Posuvová rychlost [mm/min]	8 880	907
Zastoupení nástroje při tvorbě zaoblení [%]	40	50
Typ nájezdu	HELICAL	HELICAL
Úhel sestupu [°]	4	6,5
Průměr interpolace [mm]	24	21,5

8.1 Obrábění součásti č.1

Nejprve byla obrobena součást č.1. Výpočet obráběcího času program Siemens NX stanovil dobu obrábění na 6 min a 4 s. Reálně se však součást obráběla při 70 % rychloposuvu 14 min a 19 s z důvodu eliminace možného poškození nástroje. Poté proběhlo obrábění nanečisto s hodnotou rychloposuvu 100 %, aby došlo ke zjištění časového rozdílu při této změně. Čas operace v tomto případě trval 14 min a 16 s. Vzhledem k faktu, že nájezdů není mnoho, časový rozdíl je prakticky zanedbatelný.

Avšak při porovnání reálných dat s těmi vygenerovanými dochází ke značným rozdílům. Faktorem je proměnlivá hodnota posuvové rychlosti, která je dle softwaru stanovena na 8 880 mm/min. Této hodnoty bylo možno dosáhnout pouze zřídka, a to za předpokladu konání delší, produktivní dráhy. Dle výpočtu lze zjistit reálná, průměrná hodnota posuvové rychlosti.

Ze vztahu pro výpočet rychlosti z rovnice níže lze odvodit dráhu, jež nástroj musí při obrábění součásti urazit. Tato dráha je v obou případech stejná, neboť se jedná o identickou součást.

$$v = \frac{s}{t} \rightarrow s = v * t$$
$$s_1 = s_2 \tag{3}$$
$$v_1 * t_1 = v_2 * t_2$$

, kde v – rychlost

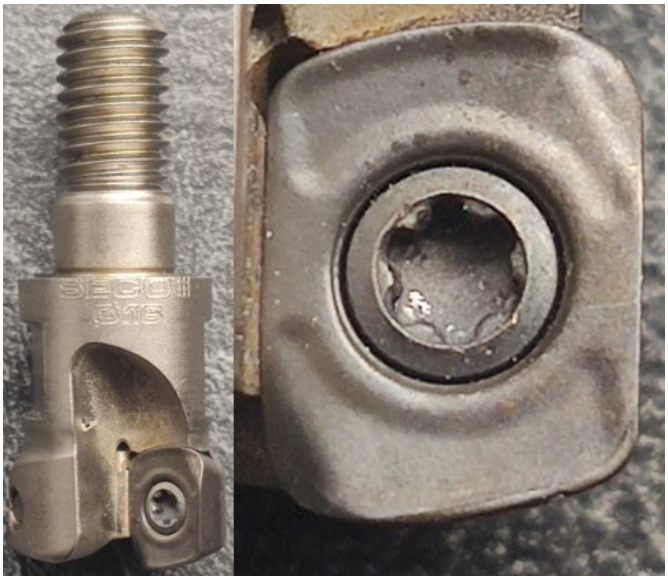
s – dráha

t – čas

Jednoduchým dosazením lze poté vypočítat průměrnou posuvovou rychlost nástroje.

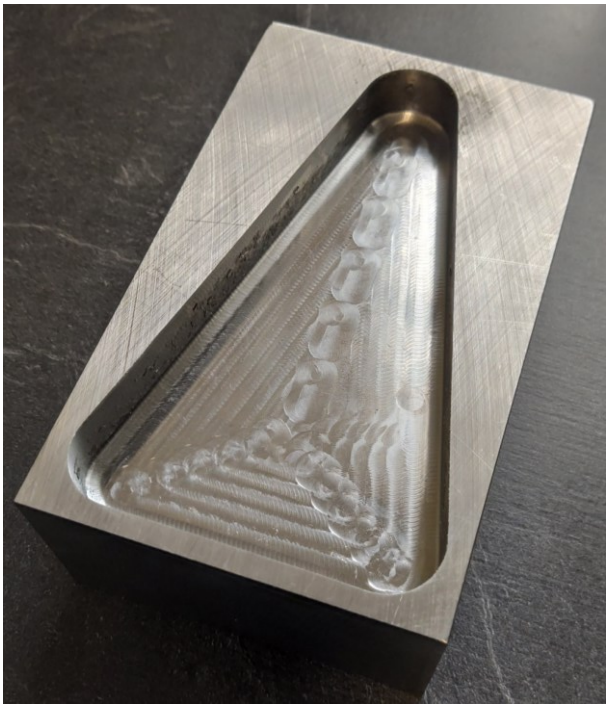
$$\overline{v_1} = \frac{v_2 * t_2}{t_1} = \frac{8\,880 * 364}{859} = 3763\ mm/min \tag{4}$$

Přestože tedy CAVITY MILL s hloubkou řezu 0,7 mm obráběla nejkratší dobu ze všech dostupných metod, jak je k vidění na Obr. 51, realita je značně odlišná a doba obrábění je více než dvojnásobná oproti očekávání. Při menších rozměrech kapsy je tedy vhodnější použít nástroj s menší posuvovou rychlostí, kdy je snáze dodrženo těchto výchozích podmínek a tím se co nejvíce přiblížit vygenerovaným časům. Přesto se však řezné podmínky osvědčily a obrábění probíhalo velmi dobře, což je viditelné z detailu řezné destičky na Obr. 81. Destička vykazuje pouze velmi malé znaky opotřebení na spodní straně.



Obr. 81 – Opotřebení břitové destičky LPHT060310TR-M06 MP2050 s tělesem R217.21-0816.RE-LP06.2A

Z Obr. 82 obrobené součásti č.1 je viditelná řezná dráha obráběcího procesu. Přestože se jedná pouze o hrubovací operaci, povrch je kvalitně obrobený bez otřepů a připravený pro dokončovací operace.



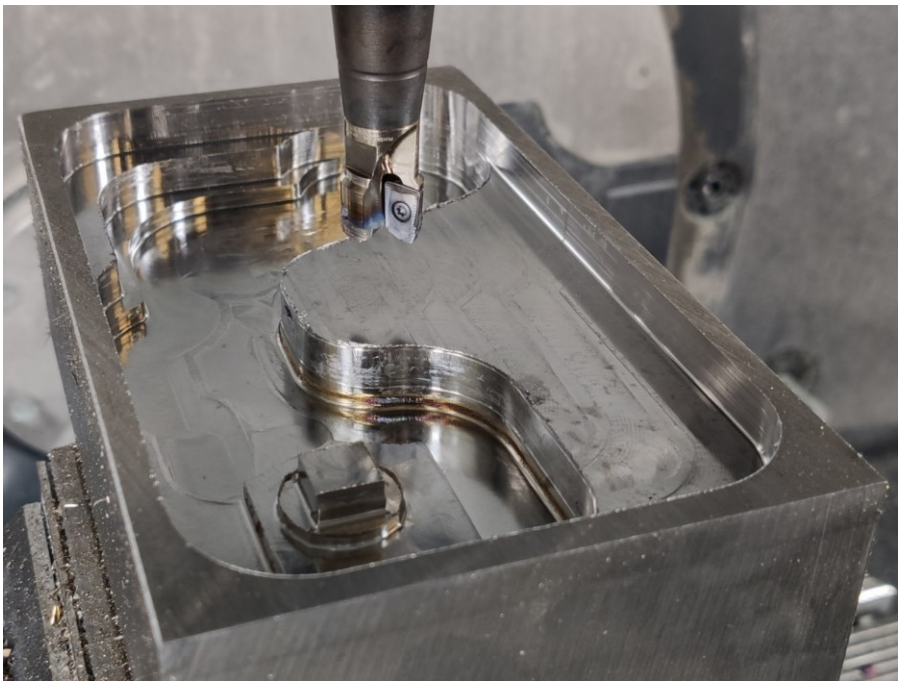
Obr. 82 – Obrobená součást č.1

8.2 Obrábění součásti č.2

Obrábění druhé součásti vzhledem k její složitosti ideální nebylo. Stroj byl v prvotní fázi obrábění nastaven dle doporučení výrobce destičky, tedy bez chlazení vzduchem. Tím však

nedocházelo k odvodu třísky z obráběcího prostoru, což je vzhledem k hloubce dutiny 29 mm žádoucí. To vedlo k výrazné kumulaci třísek.

V čase obrábění 10 min a 40 s došlo k zapečení třísek k tělesu nástroje, což vedlo ke vzniku velkého tření nástroje o stěny obrobku a tím ke tvorbě nežádoucího, enormního množství tepla. Z toho důvodu bylo nutno program pozastavit. Podmínky obráběcího procesu po zastavení lze vidět na Obr. 83.



Obr. 83 – Pozastavení obrábění součásti č.2

Pro pokračování obrábění bylo potřeba tyto třísky nejprve odstranit, aby nedocházelo k onomu tření. Toho bylo dosáhnuto obroušením. Vzhled nástroje po této operaci je ke zhlédnutí na Obr. 84. Kromě obroušených ploch si lze povšimnout značně opotřebované břitové destičky, jež je na obrázku již otočená a připravená k novému obrábění. Břitová destička má dle Tab. 17 životnost 31 min, což je bezmála trojnásobek vůči obráběcímu času v době zastavení stroje. Z Obr. 85 lze však vidět, že břitová destička je zničená a neschopná dalšího obrábění.

Obr. 84 – Nástroj R217.69-0816.RE-10-2A po obroušení zapečených třísek

Po otočení destičky a obroušení tělesa bylo možné pokračovat v obrábění. Tentokrát však se zapnutým vzduchem. V tomto případě bylo dosaženo výrazně lepšího obráběcího procesu nežli v prvním případě. Nástroj obráběl bezmála dalších 6 min. Při pohledu na destičku z Obr. 85 je možné si povšimnout, že při druhém pokusu je značně méně opotřebovaná. Na druhou stranu při porovnání s destičkou z Obr. 81, jež obráběla více než 14 min, je opotřebení znatelně větší. To je však způsobeno i proměnlivou posuvovou rychlostí v případě obrábění první součásti, což výrazně snížilo efektivitu.

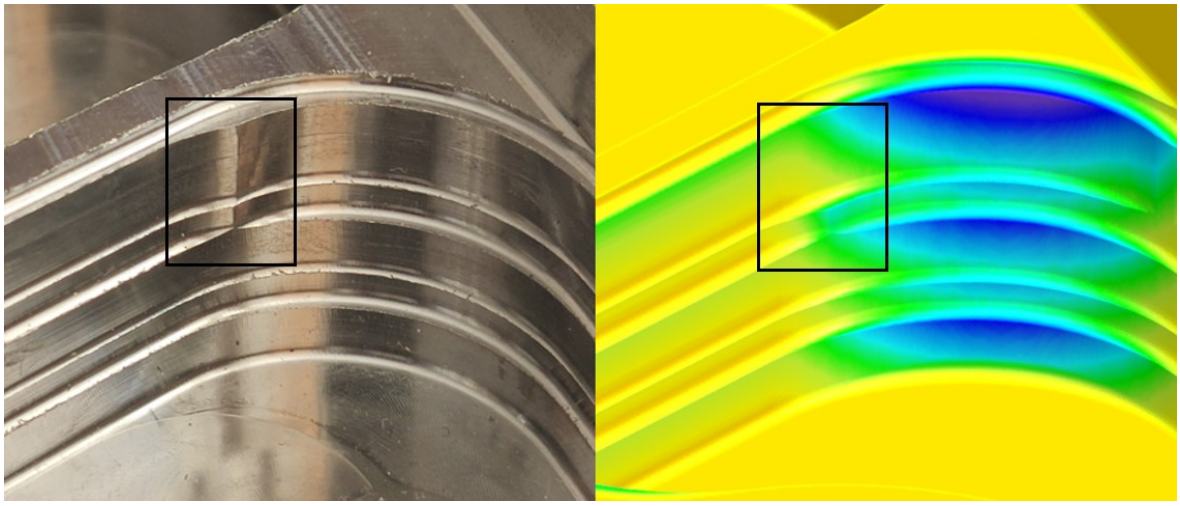
Obr. 85 – Opotřebení břitové destičky XOMX10T308TR-ME07 MS2050 s tělesem R217.69-0816.RE-10-2A

Při obrábění druhé součásti došlo k zachování posuvové rychlosti bez větších korekcí procesu. Díky tomu byla součást obrobena za 16 min a 18 s při 70 % rychloposuvu. Při 100 % rychloposuvu bylo provedeno obrábění nanečisto jako u součásti č. 1. V tomto případě byl čas obrábění 16 min a 12 s. Přestože tedy přejezdů nástroje bylo značně více nežli u první součásti, změnou rychloposuvu nedochází k výrazným časovým rozdílům.

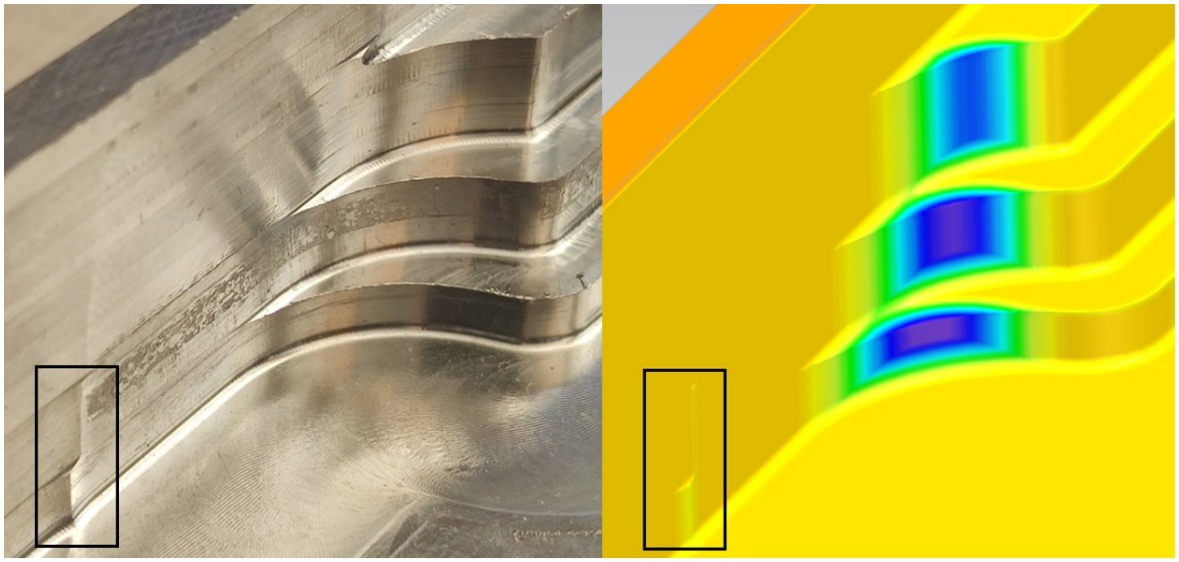
Vzhledem k tomu, že očekávaná doba obrábění dle vygenerovaných dat ze softwaru Siemens NX byla 16 min a 5 s, je reálný čas obrábění velice podobný. Přesto by bylo vhodnější použit mírně nižší hloubku řezu. Snížila by se tím efektivita, avšak životnost destičky by se značně zvýšila. Obrobenou součást č.2 lze vidět na Obr. 86. Na rozdíl od první součásti jsou k povšimnutí mírné otřepy. Dráhu nástroje viditelnou na dně součásti je navíc možné nahmatat. Povrch tedy není stejné jakosti jako první součást, přesto je však dostačující v případě hrubovací operace.

Obr. 86 – Obrobená součást č.2

Z Obr. 87 je možné si povšimnout neobrobené části v oblasti rádiusu kapsy se zkosenými stěnami stejně tak jako u nejdelší stěny větší dutiny na Obr. 88. Program Siemens NX je natolik precizní, že tyto místa jsou viditelná i v analýze s vynikající přesností umístění a tvaru korespondující s realitou.



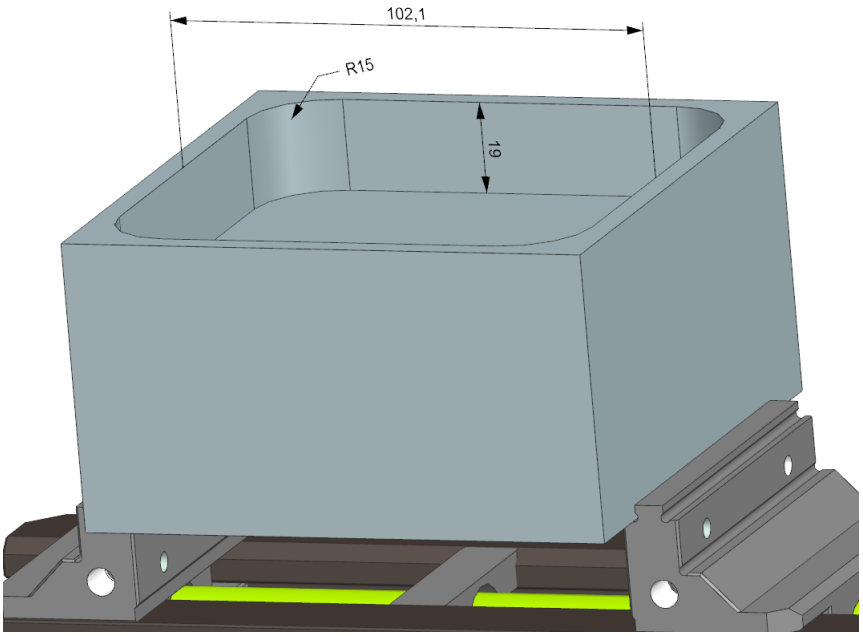
Obr. 87 – Porovnání neobrobených míst zaoblení s analýzou zbytkového materiálu



Obr. 88 – Porovnání neobrobených míst stěny s analýzou zbytkového materiálu

8.3 Obrábění součásti č.3

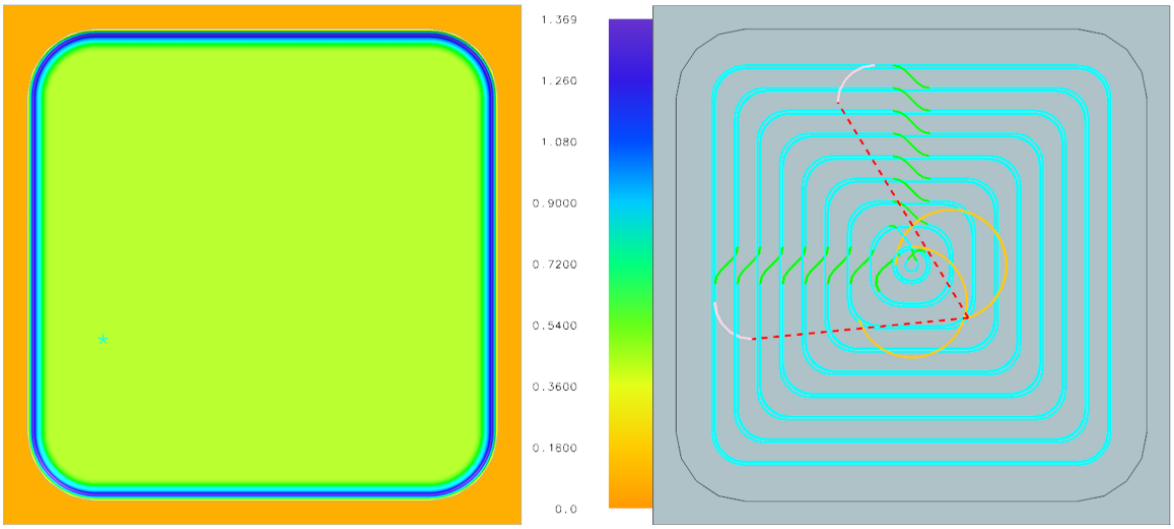
Z důvodu enormního časového rozdílu při obrábění součásti č.1 došlo ke tvorbě již třetí dutiny. Byla vytvořena z důvodu porovnání odlišného tvaru kapsy a její velikosti na změnu reálné posuvové rychlosti. Nejprve došlo k vytvoření součásti čtvercového průřezu o velikosti strany 102,1 mm. Plocha kapsy této součásti je identická s tou v obrobku č.1, tedy 10 230 mm^2. Jsou taktéž zachovány rozměry vnitřních zaoblení, stejně tak jako hloubka dutiny či řezné podmínky, jež jsou k nahlédnutí v Tab. 24. Tvar součásti je možno vidět na Obr. 89. Obrábění probíhalo v dílnách pouze za pomocí simulace na stroji, tedy bez úběru třísky.



Obr. 89 – Obráběná součást č.3

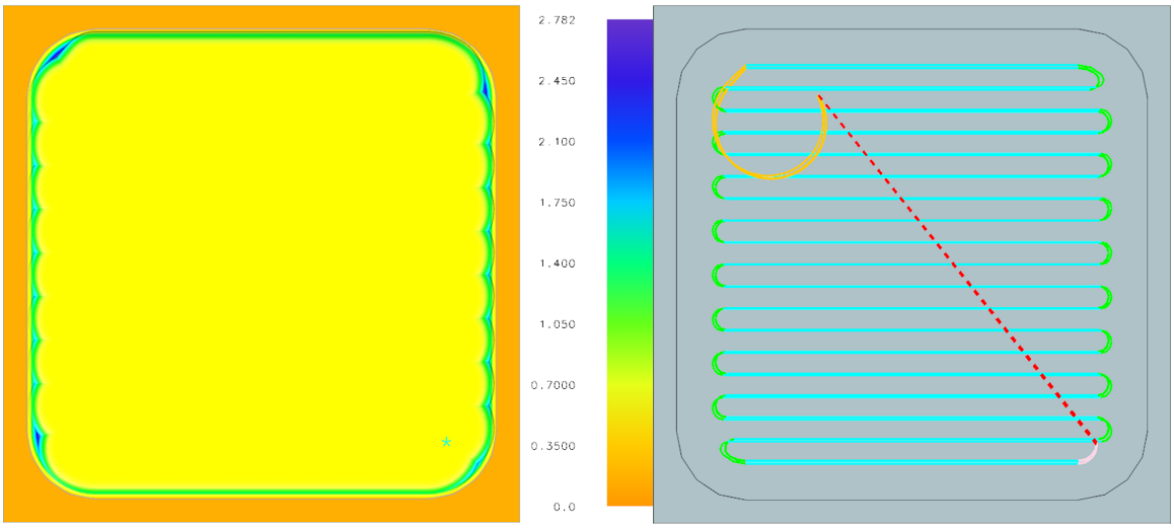
Kapsa byla dle simulace z Obr. 90 obrobena se vzorem řezu FOLLOW PART za 5 min a 14 s. V praxi však součást trvá vyhrubovat 9 min a 31 s. Při procentuálním porovnání se součástí č. 1, kdy byl nárůst reálného času vůči simulaci vyšší o 236 %, je reálný čas operace součásti č. 3 vyšší o 182 %. Přestože je tedy plocha identická, čtvercový průřez dutiny je přívětivější, co se obrábění týče. Průměrná hodnota posuvové rychlosti dle výpočtu z 8.1 činí 4 883 mm/min, což je značně vyšší rychlost nežli při obrábění součásti č.1.

Vzhledem k tomu, že se jedná o součást čtvercového průřezu, je zde možnost uplatnění vzoru řezu ZIG ZAG, který je znázorněn v kapitole 6.4. Přestože je vzor FOLLOW PART univerzální strategií, při počátečním obrábění jednotlivých hloubek dochází ke krátkým řezným pohybům, než dojde k dostatečnému rozfrézování k dosažení předepsaného posuvu. V těchto místech stroj nedovolí obrábět s vysokou posuvovou rychlostí kvůli bezpečnosti. Vzhledem k hloubce řezu pouze 0,7 mm je takových míst značné množství, což vede k výraznému prodloužení reálného času obrábění.



Obr. 90 – Vizualizace dráhy nástroje vzorem řezu FOLLOW PART společně s analýzou zbytkového materiálu součásti č.3

Vzor řezu ZIG ZAG na druhou stranu neobrábí ze středu symetricky ke kraji, avšak od kraje ke kraji, jak je znázorněno na Obr. 91. Samotný nájezd ve tvaru šroubovice je umístěn v rohu součásti. Tím je zajištěno nejdelší možné dráhy nástroje a napomáhá tak dosahovat předepsané posuvové rychlosti. Přesto však dle simulace trvá součást obrobit 5 min a 33 s, tedy déle nežli v případě první operace. V praxi obrobení trvá pouze 8 min a 24 s, tedy o 67 s rychleji nežli v případě vzoru řezu FOLLOW PART. Průměrná posuvová rychlost obrábění činí 5 867 mm/min. Reálný čas je tedy o 151 % vyšší nežli v případě simulovaných dat. Přestože je obrábění vzorem řezu ZIG ZAG značně efektivnější, zanechává větší množství zbytkového materiálu.

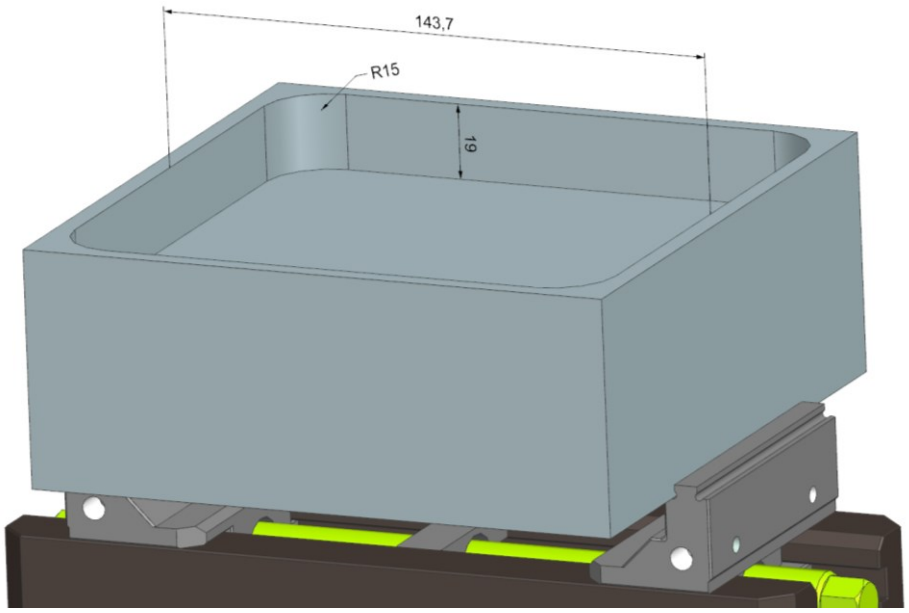


Obr. 91 – Vizualizace dráhy nástroje vzorem řezu ZIG ZAG společně s analýzou zbytkového materiálu součásti č.3

Při rozhodování, jakou z dostupných variant zvolit je potřeba brát v úvahu změnu posuvové rychlosti, a to především u fréz typu HFM, kdy posuv dosahuje značných hodnot. Pro jistotu je vhodné provést simulaci na stroji bez obrábění, kdy nedochází k opotřebení tělesa či destiček pro zjištění reálných obráběcích časů, jež se dle Siemens NX značně liší. Obecně lze však říci, že vzor řezu FOLLOW PART je univerzální variantou, která dosahuje dobrých výsledků při jakémkoliv tvaru dutiny.

8.4 Obrábění součásti č.4

Pro úplnost byla vytvořena součást č.4, jejíž průřez je taktéž čtvercový, avšak plocha dutiny je dvakrát větší nežli u součásti č.3. Tím je snaha zjistit trend při obrábění rozměrnějších dílců. Strana dutiny činí 143,7 mm. Ostatní rozměry, jako je hloubka kapsy či poloměry zaoblení jsou zachovány, jak je možno vidět na Obr. 92. Jsou použity taktéž identické řezné podmínky. Vzhledem k délce strany součásti 153,7 mm došlo však k otočení čelistí svěráku.



Obr. 92 – Obráběná součást č.4

Dle očekávání jsou analýzy zbytkového materiálu téměř identické jako u menší součásti č.3, které jsou k nalezení na Obr. 90 a Obr. 91.

Co se však značně liší je porovnání vygenerovaného času se simulací na stroji. Vygenerovaný čas se vzorem řezu FOLLOW PART byl stanoven na 10 min a 55 s. Obrábění na stroji však ve skutečnosti trvalo 17 min a 20 s, tedy nárůst o 159 %. Při obrábění za pomoci vzoru řezu ZIG ZAG byl čas dle softwaru stanoven na 11 min a 17 s, přičemž při reálných podmínkách byla součást obrobena v čase 15 min a 5 s, což je nárůst pouze o

134 %. Porovnání obráběcích časů vygenerovaných softwarem s těmi skutečnými je k nalezení v Tab. 25.

Tab. 25 – Porovnání časů simulace a reálných časů obrábění součásti č.3 a č.4

Typ součásti	**Vygenerovaný čas [min]**		**Reálný čas [min]**	
	FOLLOW PART	ZIG ZAG	FOLLOW PART	ZIG ZAG
Součást č.3	5:14	5:33	9:31	8:24
Součást č.4	10:55	11:17	17:20	15:05

Jak je z výsledků možno vidět, obrábění součásti za pomocí vzoru řezu ZIG ZAG je rychlejší variantou, avšak zanechává více neobrobeného materiálu. Zbytek je v tomto případě identický bez ohledu na velikost součásti. Lze tedy říci, že s rozměrnějšími součástmi roste uplatnění vzoru řezu ZIG ZAG. Při porovnání procentuálního nárůstu v čase součásti č.3 se součástí č.4 je patrné, že při menší zmíněné nebylo dosáhnuto takové efektivity. Větší součást dovoluje nástroji konat delší pohyb, který vede ke stabilnější posuvové rychlosti, což je viditelné při porovnání průměrné hodnoty posuvu v Tab. 26.

Tab. 26 – Porovnání průměrné hodnoty posuvu součásti č.3 a č.4

Typ součásti	**Průměrná hodnota posuvové rychlosti [mm/min]**	
	FOLLOW PART	ZIG ZAG
Součást č.3	4 883	5 867
Součást č.4	5 593	6 643

9 DISKUSE VÝSLEDKŮ

Po určení přijatelné hodnoty procentuálního zastoupení nástroje při tvorbě zaoblení činící 40 % došlo k porovnání vlivu volby řezné destičky metodou CAVITY MILL na výsledný čas společně s ekonomickou stránkou věci. Přestože destička XOMX10T308TR-ME07 MS2050 zajišťující větší hloubku řezu obráběla nejkratší čas při hloubce dutiny 9 mm z Obr. 51, po kalkulaci ceny obrábění včetně amortizace byla destička LPHT060310TR-M06 MP2050 s nižší hloubkou řezu efektivnější, což je viditelné na Obr. 52. V případě skutečného obrábění však výhodnější varianta vykazovala značné rozdíly v obráběcích časech z důvodu nedodržení předepsaných hodnot posuvové rychlosti.

Následně došlo k porovnání typu nájezdů na výsledný čas. Z výsledků vyplývá, že doba nájezdu trvá přibližně 3 % z celkového času obrábění, přičemž strategie RAMP a HELICAL jsou v případě tvaru součásti č.1 časově téměř identické, jako je znázorněno na Obr. 60. Dále byly zjištěny rozdíly ve vzorech řezu, kde se jako nejvhodnější a také nejuniverzálnější jeví strategie nájezdu FOLLOW PART z Obr. 66, při již zmíněném tvaru kapsy.

V případě porovnání metod součásti č.1 na Obr. 67 bylo zjištěno minimálních rozdílů mezi metodami CAVITY MILL, FLOOR WALL a POCKETING. Přestože nástroj společně s břitovou destičkou není metodě PLUNGE MILLING uzpůsoben, je čas s analýzou zbytkového materiálu přijatelný s přihlédnutím k nutnosti využít vrtací operace.

Vzhledem k minimálním rozdílům tří zmíněných operací došlo k tvorbě druhé, značně složitější dutiny. Metody byly porovnány při změně procentuálního zastoupení nástroje při obrábění zaoblení. Při vyšších hodnotách zastoupení operace vykazovaly velmi podobných hodnot zbytkového materiálu s obráběcím časem. Při snižování procentuálního zastoupení docházelo ke snižování výsledného času až o 30 s v případě operací bez aktivního přizpůsobení posuvu viditelné v Tab. 23. To je způsobeno faktem, že při vyšších hodnotách zastoupení dochází k návratu do užších míst k úplnému obrobení. Zároveň jsou delší dráhy nástroje, a to z důvodu větší míry zaoblení. Hodnoty zbytkových analýz ukázaly, že při snížení procentuálního zastoupení jsou zaoblené oblasti kvalitněji obrobeny, a to v krajních případech o necelých 1,8 mm vůči výchozím hodnotám, což je znázorněno v Tab. 22. Stejně tak jako u součásti č.1, rozdíly metod CAVITY_MILL, FLOOR WALL a POCKETING jsou při obrábění druhé součásti co se produktivní dráhy týče téměř k nerozeznání. U neproduktivních pohybů však došlo ke změnám, kdy metoda CAVITY MILL z Obr. 78 vykazovala více chaotické přejezdy především u 5 % zastoupení nástroje při tvorbě zaoblení

nežli u zbylých dvou jmenovaných. To by mělo vést k prodloužení výsledného času, což se však neprojevilo a metoda trvá nejkratší dobu.

Pro ověření údajů vygenerovanými softwarem Siemens NX s těmi skutečnými bylo nejprve potřeba mírně upravit vstupní hodnoty pro zvýšení bezpečnosti, které jsou znázorněny v Tab. 24. Obrábění součásti č.1 vykazovalo značné rozdíly oproti výsledkům softwaru, neboť docházelo k proměnlivým hodnotám posuvové rychlosti z důvodu menších rozměrů dutiny. Součást bylo možno obrobit v čase 14 min a 16 s při 100 % hodnotě rychloposuvu, což je více než dvojnásobná hodnota vůči vygenerovaným výsledkům. Přestože se operace s nižší hloubkou řezu jevila jako nejvýhodnější, skutečné údaje značí opak.

Obrábění součásti č.2 probíhalo bez chlazení vzduchem, což vedlo ke kumulaci třísek v hlubší dutině a tím došlo k zapečení k tělesu nástroje. Z toho důvodu bylo operaci potřeba pozastavit k odstranění těchto nárůstků za pomoci broušení. Následující obrábění probíhalo se zapnutým vzduchem, což mělo za následek kvalitnější obráběcí proces. Skutečný čas obrábění činil 16 min a 12 s při 100 % rychloposuvu, což je pouze o 7 s více nežli vyhodnotil software. Velmi podobný výsledek je přikládán daleko nižší hodnotě posuvové rychlosti, jež byla při obrábění stabilní. Přesto by pro optimalizaci procesu bylo třeba mírné změny řezných podmínek, jelikož obrábění se zdálo být agresivní při hloubce řezu 4,5 mm. Snížila by se efektivita obrábění, avšak životnost destičky by se značně zvýšila. Při porovnání analýzy zbytkového materiálu se skutečně obrobeným povrchem došlo k vynikající shodě, kdy analýza předvídala neobrobená místa, jež se v dutině skutečně objevily s velmi podobným tvarem a identickou lokalitou, jak je vidět na Obr. 87 a Obr. 88.

Obrábění součásti č.3 a č.4 probíhalo bez úběru třísky, a to pouze pomocí simulace na stroji. Dutina čtvercového tvaru, jejíž plocha je identická se součástí č.1, napomohla k vyšší průměrné hodnotě posuvové rychlosti, což vedlo k obrobení za 9 min a 31 s. Při obrábění dutiny plochy čtverce bylo možné využít strategii ZIG ZAG, kde nedochází k nutnosti nejprve obrobek rozfrézovat, jako v případě FOLLOW PART a dráhu tak tvoří dlouhé úseky. Výsledek ukázal výrazné zlepšení obráběcího času 8 min a 24 s, avšak při vyšších hodnotách zbytkového materiálu. Dle softwaru má strategie ZIG ZAG trvat delší dobu nežli FOLLOW PART, což je viditelné v Tab. 25. Tato predikce se však nepotvrdila.

Součást č.4 je stejného průřezu jako předchozí, avšak její plocha je dvojnásobná. Obrábění na stroji se vzorem řezu FOLLOW PART trvalo 17 min a 20 s, zatímco se vzorem ZIG ZAG byla součást obrobena v čase 15 min a 5 s. Průměrná posuvová rychlost z Tab. 26 byla opět vyšší, neboť stroj má dostatek času a prostoru této hodnoty dosáhnout a setrvat na ni.

ZÁVĚR

V teoretická části práce byla popsána technologie frézování společně s jejími druhy. Byla představena kinematika řezného procesu včetně geometrie fréz. Zevrubně byly vysvětleny druhy frézovacích nástrojů s upínači. V práci jsou popsány diference při použití jednotlivých nástrojových materiálů společně s technologií povlakování a jaký vliv mají při výsledném obrábění. Dále jsou vysvětleny rozdíly osových systémů a jakým způsobem dochází k tvorbě CNC programu. Byly porovnány metody CNC obrábění, které se následně prolínají do praktické části práce.

V praktické části byl nejprve určen polotovar, který se skutečně obráběl. Následně byly vybrány vhodné nástroje s rozdílnými řeznými podmínkami pro zajištění viditelných diferencí. Společně s nástroji došlo k volbě korespondujících držáků, jež slouží k upnutí do vřetena stroje DMG MORI DMU 3. generace. Dutiny polotovarů byly vymodelovány dle těchto nástrojů s přihlédnutím k základním rozměrům obrobku. Jejich tvar se však v průběhu práce měnil z důvodu zjištění změn a zviditelnění rozdílů jednotlivých metod a strategií s využitím softwaru Siemens NX.

Za účelem srovnání vygenerovaných údajů se skutečností došlo k reálnému obrobení dvou součástí, další dvě byly simulovány pouze na stroji bez úběru materiálu. V některých případech bylo vypozorováno velkých časových rozdílů, a to především při obrábění první součásti. Vysoko posuvové obrábění lze plně využít v případě rozměrnějších dílců z důvodu delších, produktivních drah nástroje. V opačné situaci dochází k výraznému snížení posuvových rychlostí, což se negativně projevuje na době obrábění. Součást č.2 byla obrobena v téměř identickém čase jako předpovídal program. Úběr třísky byl však poměrně agresivního charakteru, což výrazným způsobem snižovalo životnost břitové destičky, přestože byly řezné podmínky zadány dle výrobce. Proto je nutné řídit se výslednými podmínkami při obrábění a případně je pozměnit. Porovnáním analýzy zbytkového materiálu s jakostí obrobeného povrchu bylo zjištěno nebývalé shody, kdy program s přesností predikoval tvar a lokaci neobrobených míst. Při obrábění dílců č.3 a č.4 byla patrná změna posuvových rychlostí v závislosti na tvaru a velikosti dutiny.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] What Is Milling Machine? History Of Milling Machine. *BANKA* [online]. 2016 [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: https://ravimachines.com/what-is-milling-machine-history-of-milling-machine/

[2] KOCMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-807-2047-222.

[3] FNS-55PD - NÁSTROJÁŘSKÁ FRÉZKA S DIGITÁLNÍM ODMĚŘOVÁNÍM. *Forsteel.eu: Profesionální technologie pro zpracování ocelí* [online]. [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: https://www.forsteel.eu/fns-55pd-nastrojarska-frezka-s-digitalnim-odmerovanim/?gclid=Cj0KCQiA7oyNBhDiARIsADtGRZYMKoid96vV_4OUNOrT2YNh56XJx6n1Q2So4r7vN_P4SHCzGM164dMaAtzfEALw_wcB

[4] BÍLEK, Ondřej a Imrich LUKOVICS. *Výrobní inženýrství a technologie*. 1. vydání. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, 2014. ISBN 978-80-7454-471-2.

[5] GIRSANG, Irving Paul a Jaspreet Singh DHUPIA. Machine Tools for Machining. *Handbook of Manufacturing Engineering and Technology*. London: Springer London, 2015, **2015**, 811-865. ISBN 978-1-4471-4669-8. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4471-4670-4_4

[6] Machining: Climb Milling vs. Conventional Milling: Which One Should CNC Machining Choose?. *MACHINEMFG* [online]. [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: https://www.machinemfg.com/climb-milling-vs-conventional-milling/

[7] HELICAL ANGLE SELECTION: CHOOSING THE CORRECT ANGLE END MILL FOR YOUR JOB. *CONICAL CUTTING TOOLS* [online]. [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: https://conicalendmills.com/ordering/selection-guide/helical-angle-selection/

[8] End Mill Terminology. *MISTUBISHI MATERIALS: METALWORKING SOLUTIONS COMPANY* [online]. [cit. 2021-12-11]. Dostupné z: http://www.mitsubishicarbide.com/en/technical_information/tec_rotating_tools/tec_solid_end_mills/tec_solid_end_mills_technical/tec_solid_end_mills_terminology

[9] Why Flute Count Matters. *Harvey Performace Company* [online]. 2017 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: https://www.harveyperformance.com/in-the-loupe/flute-count-matters/

[10] TATE, Christopher. Pros and cons of indexable tools. *CUTTING TOOL ENGINEERING* [online]. 2016 [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: https://www.ctemag.com/news/articles/pros-and-cons-indexable-tools

[11] SME MEDIA STAFF. How Indexable Tools Keep Their Edge. *Sme* [online]. [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: https://www.sme.org/technologies/articles/2020/may/how-indexable-tools-keep-their-edge/

[12] OBRÁBĚNÍ OTVORŮ: VRTÁNÍ. *SECO* [online]. [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: https://www.secotools.com/article/m_7136

[13] GROOVER, Mikell P. *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*. 4. vydání. USA: JOHN WILEY & SONS, INC., 2010. ISBN 978-0470467008.

[14] SECO: Produkty. *SECO* [online]. [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: https://www.secotools.com/

[15] VELLING, Andreas. Milling Cutters and Tools – an Overview. *Fractory* [online]. [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: https://fractory.com/milling-cutters-and-tools/

[16] Introduction to Milling Tools and their Application. *Machining Cloud: Smart Manufacturing* [online]. [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: https://www.machiningcloud.com/wp-content/uploads/2016/05/MachiningCloud_MillingToolsAndTheirApplication.pdf

[17] R230.19-0050-SN1203-5A. *SECO* [online]. [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: https://www.secotools.com/article/p_02735719?language=en

[18] R220.53-0050-09-5A. *SECO* [online]. [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: https://www.secotools.com/article/p_02422232?language=en

[19] Co je to tvarové frézování?. *SANDVIK Coromant: Frézování* [online]. [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/pages/profile-milling.aspx

[20] BOROVAN, Petr. Upínače nástrojů. *Technickyportal.cz* [online]. [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/obrabeci-stroje-a-jejich-prislusenstvi/upinace-nastroju-2_8498.html

[21] The Universal Hydraulic Expansion Toolholder. *SCHUNK* [online]. [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: https://schunk.com/fileadmin/user_upload/Live_ab_2016/00_Startseite/HERO/TENDO_E_compact/Prospekt_TENDO-E-compact_EN_201506.pdf

[22] How Shrink Fit Technology Works. *Briney: Tooling Systems* [online]. [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: http://brineytooling.com/resources/how-shrink-fit-works/

[23] SMITH, Scott. Shrink-fit toolholder fundamentals. *CUTTING TOOL ENGINEERING* [online]. [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: https://www.ctemag.com/news/articles/shrink-fit-toolholder-fundamentals

[24] HAIMER Shrink Fit Toolholders: How Long Do They Last?. *HAIMER: Quality Wins.* [online]. [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: https://www.haimer-usa.com/news/blog/blog-articles-pages/2018/21218-haimer-shrink-fit-toolholders-how-long-do-they-last.html

[25] RICHARDSON, Simon. Why Weldon Flats?. *ANCA: CNC MACHINES* [online]. [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: https://machines.anca.com/E-Sharp-News/November-2019/Why-Weldon-Flats

[26] BT30TFAD-EM06-065-L1. *SECO* [online]. [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: https://www.secotools.com/article/p_03301726

[27] Chucks CENTRO|P - Precision Holder: Greater profitability through unique precision. *FAHRION: PRAZISION* [online]. [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: https://www.fahrion.de/chucks-centrop-precision-holder.html

[28] Comparision Of Tool Holder Types. *GUHRING* [online]. [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: https://www.guhring.com/Support/Technical/GM300-Comparision-Of-Tool-Holder-Types

[29] CERAZIT. Cemented tungsten carbide: material properties. *Matmatch* [online]. [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: https://matmatch.com/suppliers/cera-ceratizit/examples/cemented-tungsten-carbide-properties

[30] Conventional HSS metallurgy. *ERASTEEL* [online]. [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: https://www.erasteel.com/technologies/conventional-metallurgy/

[31] GRZESIK, Wit. *Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications*. 2. vydání. Amsterdam: Elsevier, 2008. ISBN 978-0-08-044534-2.

[32] ASP 2052: Powder metallurgy HSS. *ERASTEEL* [online]. [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: https://www.erasteel.com/wp-content/uploads/2021/04/GB_Grade_ASP-2052.pdf

[33] CERAZIT. Cemented tungsten carbide: cutting and wear applications. *Matmatch* [online]. [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: https://matmatch.com/suppliers/cera-ceratizit/examples/cemented-tungsten-carbide-applications

[34] Řezná keramika: Moderní a produktivní způsob obrábění žárovzdorných slitin. *SANDVIK Coromant* [online]. [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: https://coromantstrgprod.blob.core.windows.net/files/sitecollectiondocuments%2Fdownloads%2Fglobal%2Fbrochures%2Fcs-cz%2Fc-2929-61.pdf

[35] KUZLER, Frank. ADVANCED ARENA: Why Ceramic Cutting Tools?. *CERAMIC INDUSTRY* [online]. [cit. 2021-10-10]. Dostupné z: http://www.ceramicindustry.com/articles/92178-advanced-arena--why-ceramic-cutting-tools-/

[36] MARINESCU, Ioan, Brian ROWE, Boris DIMITROV a Hitoshi OHMORI. *Tribology of Abrasive Machining Processes*. 2. vydání. USA: William Andrew, 2013. ISBN 978-1-4377-3467-6.

[37] WHAT IS CBN?. *TOP TECH: DIAMOND TOOLS* [online]. [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: https://www.toptechdiamond.com/what-is-cbn/

[38] PCD and CBN tools. *GUHRING* [online]. Albstadt [cit. 2021-10-10]. Dostupné z: https://www.guhring.com/media/catalogs/p4celvsa4hy.pdf

[39] OOSTHUIZEN, Gert Adriaan, Guven AKDOGAN a Nico TREURNICHT. The performance of PCD tools in high-speed milling of Ti6Al4V. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2011, **52**(9-12), 929-935 [cit. 2021-12-06]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-010-2804-2

[40] Cutting tools – Which is the right coating?. *CERAZIT* [online]. [cit. 2021-10-10]. Dostupné z: https://cuttingtools.ceratizit.com/cn/en/machining-know-how/turning/advisor/cutting-tool-coating.html?referrer=direct

[41] PVD Povlakování. *Voestalpine: ONE STEP AHEAD.* [online]. [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: https://www.voestalpine.com/highperformancemetals/cs/cs/sluzeb/povlakovani/pvd-povlakovani/

[42] Coatings for cutting tools. *STATON* [online]. Turany [cit. 2021-10-10]. Dostupné z: https://www.statoncoating.com/en/coatings/coatings-cutting-tools

[43] Titanium Nitride (TiN) PVD Coating. *CALICO COATINGS: The Performance Advantage* [online]. [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: https://www.calicocoatings.com/coating-data-sheets/titanium-nitride-pvd-tin-coating/

[44] What is NC Machining?. *THOMAS: A Xometry Company* [online]. [cit. 2021-12-14]. Dostupné z: https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/nc-machining/

[45] JACOBS, PETER. 3-Axis to 12-Axis: CNC Milling Machine Capabilities Compared. *Fictiv* [online]. [cit. 2021-12-13]. Dostupné z:

https://www.fictiv.com/articles/3-axis-to-12-axis-cnc-milling-machine-capabilities-compared

[46] What is CNC Machining? 3 Axis | 4 Axis | 5 Axis. *Rgbsi* [online]. [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: https://blog.rgbsi.com/what-is-cnc-machining

[47] An intro to CNC machine programming. *FAST RADIUS* [online]. [cit. 2021-12-14]. Dostupné z: https://www.fastradius.com/resources/intro-to-cnc-machine-programming/

[48] WARFIELD, Bob. CAM Post Processors for G-Code Dialects. *CNC Cookbook* [online]. [cit. 2021-12-14]. Dostupné z: https://www.cnccookbook.com/cnc-post-processor-cam/

[49] HUANG, Leon. G and M Codes: Understanding the CNC Programming Languages. *RapidDirect* [online]. [cit. 2021-12-14]. Dostupné z: https://www.rapiddirect.com/blog/g-and-m-codes/

[50] SELVARAJ, P. a P. RADHAKRISHNAN. Algorithm for Pocket Milling using Zig-zag Tool Path. *Defence Science Journal*. 2006, **56**(2), 117-127. ISSN 0011748X. Dostupné z: doi:10.14429/dsj.56.1876

[51] DHANIK, Sandeep a Paul XIROUCHAKIS. Contour parallel milling tool path generation for arbitrary pocket shape using a fast marching method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2010, **50**(9-12), 1101-1111. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-010-2580-z

[52] Taking the Plunge. *CUTTING TOOL ENGINEERING* [online]. 2012 [cit. 2021-12-20]. Dostupné z: https://www.ctemag.com/news/articles/taking-plunge

[53] DMU 50 3. generace. *DMG MORI* [online]. [cit. 2022-04-05]. Dostupné z: https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/frezovani/petiose-frezovani/dmu/dmu-50

[54] Makro•Grip® 77, 5-Axis Vise: jaw width 77 mm, clamping range 0 - 200 mm. *LANG TECHNIK: simple. gripping. future* [online]. [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: https://lang-technik.de/en/products/48200-77-makrogripr-77-5-axis-vise-jaw-width-77-mm-clamping-range-0-200-mm

[55] LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: učebnice pro školy technického zaměření*. Sedmé vydání. Úvaly: Albra, 2021. ISBN 978-80-7361-124-8.

[56] 1.1730 (C45W) / C45U TOOL STEEL. *WALDUN STEEL* [online]. [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: https://waldunsteel.com/products/1-1730-c45w-c45u-tool-steel/

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

CNC	Počítačově řízené strojní obrábění
%	Procento
°	Stupeň
mm	Milimetr
µm	Mikrometr
kg	Kilogram
°C	Stupeň Celsia
PVD	Fyzikální depozice vrstev
HSS	Rychlořezná ocel
C	Uhlík
Cr	Chrom
Mo	Molybden
W	Wolfram
Co	Kobalt
V	Vanad
KBN	Kubický nitrid boru
HK	Tvrdost podle Knoopa
HRC	Tvrdost podle Rockwella
PKD	Polykrystalický diamant
MPa	Megapascal
m	Metr
s	Sekunda
m/s	Metr za sekundu
CVD	Chemická depozice z plynné fáze
GPa	Gigapascal

v_c	Řezná rychlost
a_p	Hloubka řezu
v_f	Posuvová rychlost
NC	Číslicové řízení
CAM	Počítačová podpora obrábění
CAD	Počítačová podpora konstruování
VBD	Vyměnitelná břitová destička
UTB	Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
FT	Fakulta technologická
d	Délka
š	Šířka
v	Výška
HFM	Vysoko posuvové obrábění
HSM	Vysoko rychlostní obrábění
ot/min	Otáčky za minutu
Kč	Koruna česká
kN	Kilonewton
ks	Kus
Nm	Newtonmetr
Mn	Mangan
Si	Křemík
P	Fosfor
S	Síra
m/min	Metr za minutu
mm^2	Milimetr čtverečný

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 – Nástrojařská frézka s digitálním odměřovačem [3] 12
Obr. 2 – Čelní frézování [5] 13
Obr. 3 – Válcové frézování [5] 13
Obr. 4 – Sousledné frézování [6] 14
Obr. 5 – Nesousledné frézování [6] 15
Obr. 6 – Kinematika řezného procesu při nesousledném frézování [2] 16
Obr. 7 – Geometrie frézy [8] 17
Obr. 8 – Porovnání počtu břitů s množstvím odebrané třísky [8] 17
Obr. 9 – Varianty VBD [13] 19
Obr. 10 – Rohová hrubovací fréza [16] 20
Obr. 11 – Čelní frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami [17], [18] 21
Obr. 12 – Řezná rychlost u kulových fréz [19] 21
Obr. 13 – Hydraulický upínač [21] 22
Obr. 14 – Princip technologie tepelného upínače [22] 23
Obr. 15 – Přístroj pro tepelné upínání s upínačem [24] 24
Obr. 16 – Upínač Weldon [26] 25
Obr. 17 – Kleštinový upínač firmy Fahrion [27] 25
Obr. 18 – Porovnání nástrojových materiálů dle odolnosti proti opotřebení a křehkosti [29] 26
Obr. 19 – Graf znázorňující změnu tvrdosti při různých kalících teplotách [32] 27
Obr. 20 – Nástroje ze slinutých karbidů společnosti CERAZIT [33] 29
Obr. 21 – Porovnání životnosti PKD (CMX850) a slinutého karbidu (VP15TF) [39] 31
Obr. 22 – Hlaveň zbraně s povlakem TiN [43] 33
Obr. 23 – Porovnání povlaku TiAlN (vlevo) a KTRN (vpravo) [42] 34
Obr. 24 – Souřadnicový systém [45] 36
Obr. 25 – Příklad 5osého obrábění [45] 37
Obr. 26 – Schéma tvorby CNC programu [48] 37
Obr. 27 – Dráha metody CAVITY MILL 40
Obr. 28 – Vzor řezu ZIG 40
Obr. 29 – Vzor řezu ZIG ZAG 41
Obr. 30 – Dráha metody PLUNGE MILLING 41
Obr. 31 – Polotovar upnutý ve svěráku před obráběním 44
Obr. 32 – Fréza R217.21-0816.RE-LP06.2A 45
Obr. 33 – Břitová destička LPHT060310TR-M06 MP2050 46

Obr. 34 – Vymodelovaný nástroj R217.21-0816.RE-LP06.2A s upínačem v programu Siemens NX 46
Obr. 35 – Fréza R217.69-0816.RE-10-2A 47
Obr. 36 – Břitová destička XOMX10T308TR-ME07 MS2050 48
Obr. 37 – Vymodelovaný nástroj R217.69-0816.RE-10-2A s upínačem v programu Siemens NX 48
Obr. 38 – Držák E347658200860 49
Obr. 39 – Vrták SD523-16-48-25R7 50
Obr. 40 – Břitové destičky SPGX0502-C1 T400D (nahoře) a SCGX050204-P2 DP3000 (dole) 51
Obr. 41 – Vymodelovaný nástroj SD523-16-48-25R7 s upínačem v programu Siemens NX 52
Obr. 42 – Upínač E346958425100 52
Obr. 43 – Stroj DMG MORI DMU 50 3. generace [53] 54
Obr. 44 – Čelisti a upínací deska výrobce LANG Technik GmbH [54] 54
Obr. 45 – Sestava svěráku LANG v případě součásti č.1 a č.2 55
Obr. 46 – Obráběná součást č.1 57
Obr. 47 – Upravené řezné podmínky destičky XOMX10T308TR-ME07 MS2050 58
Obr. 48 – CAVITY MILL s hloubkou řezu 0,7 mm (vlevo) a 0,4 mm (vpravo) při hloubce kapsy 9 mm 59
Obr. 49 – Detailní pohled CAVITY MILL s hloubkou řezu 0,7 mm (vlevo) a 0,4 mm (vpravo) 60
Obr. 50 – CAVITY MILL s hloubkou řezu 4,5 mm (vlevo) a 2 mm (vpravo) při hloubce kapsy 9 mm 60
Obr. 51 – Graf obráběcích časů v závislosti na hloubce kapsy a použitých řezných podmínkách 61
Obr. 52 – Graf znázorňující výrobní cenu jednoho kusu v závislosti na hloubce kapsy a použitých řezných podmínkách 62
Obr. 53 – Analýza metody CAVITY MILL_0,7 při hloubce kapsy 9 mm 63
Obr. 54 – Analýza metody CAVITY MILL_4,5 při hloubce kapsy 9 mm 64
Obr. 55 – Analýza metody CAVITY MILL_4,5 s 50 % zastoupením nástroje při obrábění zaoblení při hloubce kapsy 9 mm 65
Obr. 56 – Vizualizace dráhy nájezdu RAMP při hloubce kapsy 29 mm 66
Obr. 57 – Vizualizace dráhy nájezdu HELICAL při hloubce kapsy 29 mm 66
Obr. 58 – Vizualizace dráhy nájezdu NONE při hloubce kapsy 29 mm 67
Obr. 59 – Vizualizace dráhy nájezdu PLUNGE při hloubce kapsy 29 mm 67
Obr. 60 – Porovnání vlivu volby nájezdu na obráběcí čas v případě metody CAVITY MILL_0,7 68

Obr. 61 – Nastavení vzoru řezu v Siemens NX 69

Obr. 62 – Vizualizace dráhy nástroje vzorem řezu PROFILE společně s analýzou zbytkového materiálu při hloubce kapsy 9 mm 70

Obr. 63 – Vizualizace dráhy nástroje vzorem řezu ZIG společně s analýzou zbytkového materiálu při hloubce kapsy 9 mm 71

Obr. 64 – Vizualizace dráhy nástroje vzorem řezu ZIG ZAG společně s analýzou zbytkového materiálu při hloubce kapsy 9 mm 72

Obr. 65 – Vizualizace dráhy nástroje vzorem řezu ZIG WITH CONTOUR společně s analýzou zbytkového materiálu při hloubce kapsy 9 mm 73

Obr. 66 – Vliv volby vzoru řezu na obráběcí čas v případě CAVITY MILL_0,7 74

Obr. 67 – Porovnání dráhy nástroje metod POCKETING, FLOOR WALL a CAVITY MILL (zleva) pro kapsu hloubky 29 mm 76

Obr. 68 – Vliv volby metody na obráběcí čas 76

Obr. 69 – Analýza zbytkového materiálu metody POCKETING při hloubce kapsy 29 mm 77

Obr. 70 – Analýza zbytkového materiálu metody FLOOR WALL a CAVITY MILL při hloubce kapsy 29 mm 77

Obr. 71 – Nastavení dráhy řezu operace PLUNGE MILLING 79

Obr. 72 – Vizualizace dráhy nástroje metody PLUNGE MILLING společně s analýzou zbytkového materiálu při hloubce kapsy 29 mm 79

Obr. 73 – Obráběná součást č.2 81

Obr. 74 – Parametry Tvaru dráhy v rozích 82

Obr. 75 – Analýza metody FLOOR WALL a POCKETING při 5 % zastoupení průměru nástroje 84

Obr. 76 – Analýza metody CAVITY MILL při 5 % zastoupení průměru nástroje 84

Obr. 77 – Výchozí hodnoty přizpůsobení posuvu 85

Obr. 78 – Dráha nástroje metody CAVITY MILL, FLOOR WALL a POCKETING s 5% zastoupením nástroje (zleva) 87

Obr. 79 – Prostor mezi tvarovou součástí a stěnou dutiny 87

Obr. 80 – Metoda CAVITY MILL s 50 % zastoupení nástroje (vlevo) a 5 % (vpravo) 88

Obr. 81 – Opotřebení břitové destičky LPHT060310TR-M06 MP2050 s tělesem R217.21-0816.RE-LP06.2A 91

Obr. 82 – Obrobená součást č.1 91

Obr. 83 – Pozastavení obrábění součásti č.2 92

Obr. 84 – Nástroj R217.69-0816.RE-10-2A po obroušení zapečených třísek 93

Obr. 85 – Opotřebení břitové destičky XOMX10T308TR-ME07 MS2050 s tělesem R217.69-0816.RE-10-2A 93

Obr. 86 – Obrobená součást č.2 94

Obr. 87 – Porovnání neobrobených míst zaoblení s analýzou zbytkového materiálu 95

Obr. 88 – Porovnání neobrobených míst stěny s analýzou zbytkového materiálu 95

Obr. 89 – Obráběná součást č.3 96

Obr. 90 – Vizualizace dráhy nástroje vzorem řezu FOLLOW PART společně s analýzou zbytkového materiálu součásti č.3 97

Obr. 91 – Vizualizace dráhy nástroje vzorem řezu ZIG ZAG společně s analýzou zbytkového materiálu součásti č.3 97

Obr. 92 – Obráběná součást č.4 98

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 – Rozdíly mezi sousledným a nesousledným frézováním [6] 15
Tab. 2 – Porovnání jednotlivých upínačů [21], [28] 26
Tab. 3 – Obsah legujících prvků v HSS oceli ASP 2052 společnosti ERASTEEL [32] 27
Tab. 4 – Porovnání NC a CNC obrábění [44] 35
Tab. 5 – Příklady funkcí pro programování CNC stroje [2] 39
Tab. 6 – Specifikace frézy R217.21-0816.RE-LP06.2A 44
Tab. 7 – Specifikace břitové destičky LPHT060310TR-M06 MP2050 45
Tab. 8 – Specifikace frézy R217.69-0816.RE-10-2A 47
Tab. 9 – Specifikace břitové destičky XOMX10T308TR-ME07 MS2050 48
Tab. 10 – Specifikace držáku E347658200860 49
Tab. 11 – Parametry vrtáku SD523-16-48-25R7 50
Tab. 12 – Specifikace břitových destiček SPGX0502-C1 T400D a SCGX050204-P2 DP3000 51
Tab. 13 – Specifikace upínače E346958425100 52
Tab. 14 – Parametry stroje DMG MORI DMU 50 3. generace [53] 53
Tab. 15 – Parametry svěráku LANG [54] 55
Tab. 16 – Chemické složení oceli 1.1730 [56] 56
Tab. 17 – Porovnání cen a životnosti destiček 57
Tab. 18 – Řezné podmínky destiček metodou CAVITY_MILL 58
Tab. 19 – Všeobecné podmínky zvolené při obrábění součásti č. 1 63
Tab. 20 – Řezné podmínky při obrábění součásti č.2 75
Tab. 21 – Řezné podmínky vrtáku SD523-16-48-25R7 a frézy R217.69-0816.RE-10-2A 78
Tab. 22 – Zbytkový materiál jednotlivých operací v závislosti na procentuálním zastoupení nástroje při tvorbě zaoblení 83
Tab. 23 – Obráběcí čas jednotlivých operací v závislosti na procentuálním zastoupení nástroje při tvorbě zaoblení 86
Tab. 24 – Řezné podmínky pro obrobení reálných dílců 89
Tab. 25 – Porovnání časů simulace a reálných časů obrábění součásti č.3 a č.4 99
Tab. 26 – Porovnání průměrné hodnoty posuvu součásti č.3 a č.4 99