



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ANALÝZA MOŽNOSTÍ NC PROGRAMOVÁNÍ UZAVŘENÝCH KAPES

ANALYSIS OF NC PROGRAMMING OPTIONS FOR ENCLOSED POCKETS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Janda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Jiří Janda
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	Ing. Aleš Polzer, Ph.D.
Akademický rok:	2016/17

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

Analýza možností NC programování uzavřených kapes

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při programování obráběcích strojů je možno využít řady různých programovacích jazyků a metodik. Frézování jednotlivými strategiemi CAM softwaru PowerMILL 2017 a cykly řídicího systému Sinumerik 840D (SinuTrain 4.7) vede k rozdílným výsledkům. Toto téma je proto zaměřeno na analýzu možností NC programování uzavřených kapes.

Cíle diplomové práce:

- Vytvoření stručného přehledu strategií použitelných pro frézování uzavřených kapes.
- Stručný rozbor zatížení frézovacího nástroje při hrubovacím a dokončovacím frézování kapes.
- Stručné zhodnocení výhod a nevýhod jednotlivých hrubovacích strategií pro frézování kapes.

Seznam doporučené literatury:

Autodesk PowerMill 2017: Getting Started. 1. United Kingdom, 2016.

Autodesk PowerMill 2017: What's New. 1. United Kingdom, 2016.

Traditional machining processes. 1. New York: Springer, 2014. ISBN 978-366-2450-871.

DAVIM, J. Paulo (ed.). Modern machining technology: a practical guide. 1st pub. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011. Woodhead Publishing in mechanical engineering. ISBN 978-0-857-9-099-7.

KRAR, Stephen F. Technology of machine tools. 7th ed. McGraw-Hill: , 2011, x, 925 s. ISBN 978-00-3510-835.

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

SHAW, Milton Clayton. Metal cutting principles. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2005, xix, 651 s. ISBN 01-951-4206-3.

QUESADA, Robert. Computer numerical control: machining and turning centers. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2005, 548 s. ISBN 01-304-8867-4.

AB SANDVIK COROMANT. Technická příručka obrábění: soustružení - frézování - vrtání - vyvrtávání - upínání nástrojů. 2005.10. Švédsko: Elanders, 2005.

MCMAHON, Chris. CAD/CAM principles, practice and manufacturing management. 2nd ed. Harlow: Prentice Hall, 1998, 665 s. ISBN 02-011-7819-2.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Cílem práce je přinést přehled dostupných strategií pro frézování uzavřených kapes. Zejména se zaměřením na moderní programování pomocí CAM programů. V dalších částech je práce zaměřena na rozbor silového zatížení nástroje při obrábění kapes. Zde se soustředí na průběh sil při frézování v rohu kapsy s využitím různých metod analýzy tohoto zatížení. Jsou zde také navrženy způsoby, jak toto zatížení snížit.

Klíčová slova

kapsa, frézování, hrubování, strategie, PowerMILL

ABSTRACT

The aim of this paper is to provide an overview of the available strategies for milling of closed pockets. In particular, it focuses on advanced programming using CAM programs. In the next parts, the work is focused on the analysis of the force load of tools in the machining of the pockets. Here it focuses on the course of forces in milling at the corner of the pocket using different methods of analyzing this load. There are also ways to reduce this burden.

Key words

Pocket, milling, roughing, strategy, Powermill

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Janda, Jiří. *Analýza možností NC programování uzavřených kapes*. Brno 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 78 s. 5 příloh. Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Analýza možností NC programování uzavřených kapes** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

.....
Bc. Jiří Janda
.....

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Aleš Polzer, Ph.D. za odborný dohled a cenné připomínky při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Čestmíru Ševčíkovi z Meopta – optika, s.r.o. za rady a poskytnutí polotovaru pro práci.

OBSAH

Abstrakt	3
Prohlášení	4
Poděkování	5
Obsah.....	6
Úvod.....	8
1 Strategie pro frézování uzavřených kapes	9
1.1 Problematika.....	9
1.2 CAD/CAM systémy.....	11
1.3 Konvenční metody obrábění kapes pomocí CAM.....	14
1.3.1 Konturováním.....	15
1.3.2 Obrábění řádkováním	16
1.3.3 Profilování	17
1.3.4 Využití dokončovacích strategií.....	17
1.4 Produktivní obrábění	18
1.4.1 HSC	18
1.4.2 HFC.....	19
1.4.3 HPC	19
1.4.4 Produktivní trochoidní dráha	20
1.4.5 Vortex.....	22
1.4.6 Ponorné frézování.....	24
1.4.7 iMachinig.....	26
1.4.8 TrueMill	28
1.4.9 Waveform.....	29
1.4.10 VoluMill.....	30
1.5 Možnosti frézování kapes pomocí řídicího systému cnc stroje.....	31
1.5.1 Dílenské Programování kapes v Sinumerik 840D.....	32
1.5.2 ShopMill program	33
1.5.3 Parametrické programování	34
1.6 Další možnosti	35
2 Silové poměry při obrábění	36
2.1 Volba materiálu.....	36
2.2 Volba nástroje.....	37
2.3 Kinematika obrábění.....	38
2.4 Výpočet základních parametrů	40
2.5 Výpočet řezné síly	41

2.6	Výchozí parametry kapsy	45
2.7	Zatížení v rohu kapsy pro vytvořené dráhy.....	47
2.7.1	Konturovací dráha.....	47
2.7.2	Konturovací dráha s trochoidou	49
2.7.3	Dráha založená na strategii Vortex	51
2.8	Úprava technologie dráhy konturování	53
2.8.1	Varianta č. 1	53
2.8.2	Varianta č. 2.....	55
2.8.3	Varianta č. 3.....	56
2.8.4	Další možnosti snížení zatížení.....	58
2.9	Dokončování frézování kapsy.....	59
3	Experimentální ověření	60
3.1	Návrh experimentu	60
3.2	Vyhodnocení experimentu	62
4	Diskuze	68
	Závěr	69
	Seznam použitých zdrojů	70
	Seznam použitých symbolů a zkratk	76
	Seznam příloh	78

ÚVOD

Obrábění součástí pomocí CNC strojů je v posledních letech velmi rozšířenou volbou při tvorbě obrobků pro celou řadu průmyslového odvětví. Díky těmto strojům se rozšířila automatizace a ušetřila se lidská práce. Dále se snížily náklady na kvalifikaci obsluhy stroje, nikoliv však na seřizování a samotné vytváření těchto řídicích kódů. Proto je tato práce zaměřena na téma možností NC programování uzavřených kapes.

Uzavřené kapsy se vyskytují v mnoha odvětvích, jako je např. letecký či automobilový průmysl, ale i v dalších. Dá se říci, že v každém odvětví se setkáme s uzavřenými kapsami. Budou se lišit velikostí i tvarem, mohou být kruhové, čtvercové, mnohoúhelníkové a jiné. Pro tyto kapsy je možné zvolit z mnoha způsobů obrábění. Každý způsob má své klady, ale taky zápory, na což se bude tato práce zaměřovat.

V první části se bude práce snažit uvést přehled možných způsobů, jak vybranou kapsu vyhrubovat. Budou zde znázorněny dráhy a další vlastnosti jednotlivých metod. Jde o přehled dostupných strategií dostupných na světovém trhu s CAM softwarem, ale i na dílenské programování, které probíhá přímo u strojů.

V druhé části se práce zaměřuje zejména silové poměry při obrábění rohů kapes s použitím různých strategií. V tomto rozboru zatížení jsou popsána problematická místa, v kterých se nástroj pohybuje. Součástí bude i návrh zlepšení základní strategie konturování. Jednotlivá místa jsou graficky rozlišena pro přehlednější způsob analýzy. Tyto vypočtené varianty jsou také ověřeny pomocí měření na dynamometru, který je umístěn v prostorách dílen na Ústavu strojírenské technologie v Brně.

1 STRATEGIE PRO FRÉZOVÁNÍ UZAVŘENÝCH KAPES

V této části práce bude uveden přehled možných strategií použitelných pro vytvoření uzavřených kapes. Jedná se o možnosti CAM softwarů a dále dílenského programování. U jednotlivých strategií je uveden stručný přehled výhod a možných nevýhod, s kterými se může uživatel setkat.

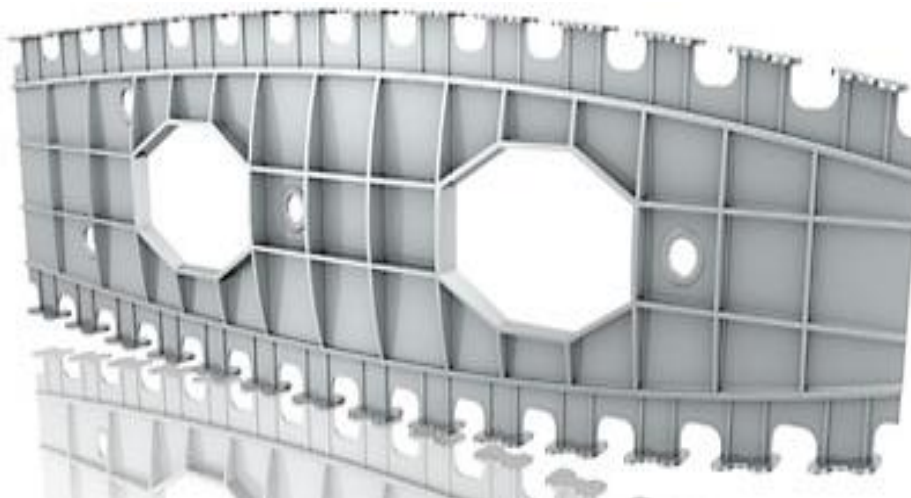
1.1 Problematika

V době rozvoje průmyslu a také strojírenství jsou kladeny větší nároky na efektivitu obrábění. Z toho důvodu se hledá mnoho cest, jak zefektivnit výrobu. Proto vznikají ve firmách speciální oddělení, které se zabývají CAD/CAM technologiemi, což by mělo mít za následek rychlejší tvorbu NC programů. Díky tomu odpadá práce obsluhy stroje a také se zkracuje prostoj stroje

Tvorba programů NC, respektive G-kódu pomocí ISO, neprobíhá pouze pomocí CAD/CAM systémů, lze ji realizovat také pomocí řídicích systémů. Mezi řídicí systémy, které jsou v dnešní době nejrozšířenější, patří Sinumerik, HEIDENHAIN a FANUC. V těchto programech mohou operátoři zadávat pohyb nástroje ručně, nebo pomocí integrovaných podprogramů. Ty však nemají tolik možností jako programování pomocí počítačového softwaru. Lze však pomocí úpravy korigovat každý krok nástroje. Další možností je programování ručně pomocí parametrických funkcí, ty mohou být vysoce efektivní.

Jednou z problematických částí obrábění je tvorba kapes, tedy uzavřených tvarů, které jsou vytvořeny odebráním materiálu od základního tvaru, tedy zjednodušené dutiny. Kapsy mohou mít různé tvary a dosahují různých hloubek. Na obrázku (viz. obr. 1) je vidět ukázka tvaru. Jedná se o jednoduchou ukázkou, jak mohou vypadat. Tvary mohou být od kulatých, čtvercových, až po tvary, které se nedají snadno definovat, například tvořené křivkami.

Jako ukázkou problematiky je možné prezentovat obrábění součástí pro letecký průmysl. Například obrábění křídel letadla je poměrně problematické. Lze tu však dobře vidět rozdělení mezi hrubovacími a dokončovacími operacemi. Na obr. 1 je vidět, že se jedná o opracování velké součásti. Na ní se aplikuje obrábění kapes, a rovněž obrábění tenkých stěn.



Obr. 1 Profil součástí pro letecký průmysl [1].

Za hrubovací operace, při třískovém obrábění můžeme považovat ty, při kterých dochází k velkým úběrům materiálu. Měly by být co nejefektivnější a provedeny v co nejmenším strojním čase. Na konkrétní součásti se tedy zvolí nástroj o velkém průměru, kterým se obrobí co nejvíce z požadovaného tvaru kapsy. Nástroj se však nedostane do všech míst, které jsou navrženy, což je případ rohů s menším rádiusem, než má poloměr hrubovacího nástroje.

Díky tomu však klesá čas opracování oproti nástroji o menším průměru, který by problematické místo obrobil. Čím menší bude čas, tím se výrazně sníží cena na výrobu jednoho kusu. U hrubování, na rozdíl od dokončovacích operací, nezáleží na povrchu opracovaného dílce. Drsnost se pohybuje $Ra\ 3,2-12,5\ \mu\text{m}$, s tím souvisí i přesnost, která je vyšší jak IT 11. Tyto parametry souvisí především s nastavením parametrů obrábění, ale také se zvolenou metodou. Jediným parametrem, který by měl být dodržen, je tloušťka přídavku na obrobku, aby se neohrozila drsnost požadovaného povrchu [2,3].

Zbytkové obrábění se vyznačuje jako proces, který následuje po hrubovacích operacích, nebo přímo mezi ně patří. Jsou to úkony, které jsou prováděny často nástroji o menším průměru, než jsou nástroje pro hrubování. V případě kapes na obrázku je tedy problematické místo již zmiňovaný roh kapsy. Zejména proto, aby se nástroj zbytkového obrábění „vešel“ do míst, kam se hrubovací nástroj nemohl dostat. Místa, kam se obvykle hrubovací nástroj nedostane jsou malé rádiusy a rohy, které svými úhly zabraňují obrobení hrubováním. Jak u předchozího obrábění i zde je důležité dodržet parametr přídavku na stěnu, a mohou se vyskytovat lepší povrchy než u hrubování. Za zbytkové obrábění lze také považovat operaci profilování, která následuje zpravidla po operaci řádkování [2,3].

Dokončování je způsob obrábění má za cíl obrobit díl na konečný rozměr s požadovanou přesností a drsností povrchu. U součásti na obrázku bude dokončování probíhat ve dvou krocích, dokončení dna a dokončení stěn. Nástroj, který se pro tyto operace zvolí, bude mít stejný nebo menší průměr než nástroj pro zbytkové frézování. Liší se ovšem geometrií a tvarem. Hrubovací nástroje mají velmi často upravenou geometrii kvůli lámání třísek (viz. obr. 2), nástroje pro dokončovací operace jsou tvarově velmi prosté, neobsahují geometrii, která by mohla narušovat výsledný povrch. Drsnost povrchu může dosahovat hodnot $Ra\ 0,8\ \mu\text{m}$. Dále ji lze považovat za nejvíce časově náročnou, je zde snížen posuv, což zlepšuje povrch výsledného povrchu. Příkladem může být tvorba forem na lisy, kde se výsledný tvar dokončuje kurovou frézou s velmi malým posuvem, díky tomu může dokončování trvat více jak 70 % času [2,3].



Obr. 2 Ukázka nástrojů: hrubovací fréza s utvařečem a fréza bez utvařeče [4].

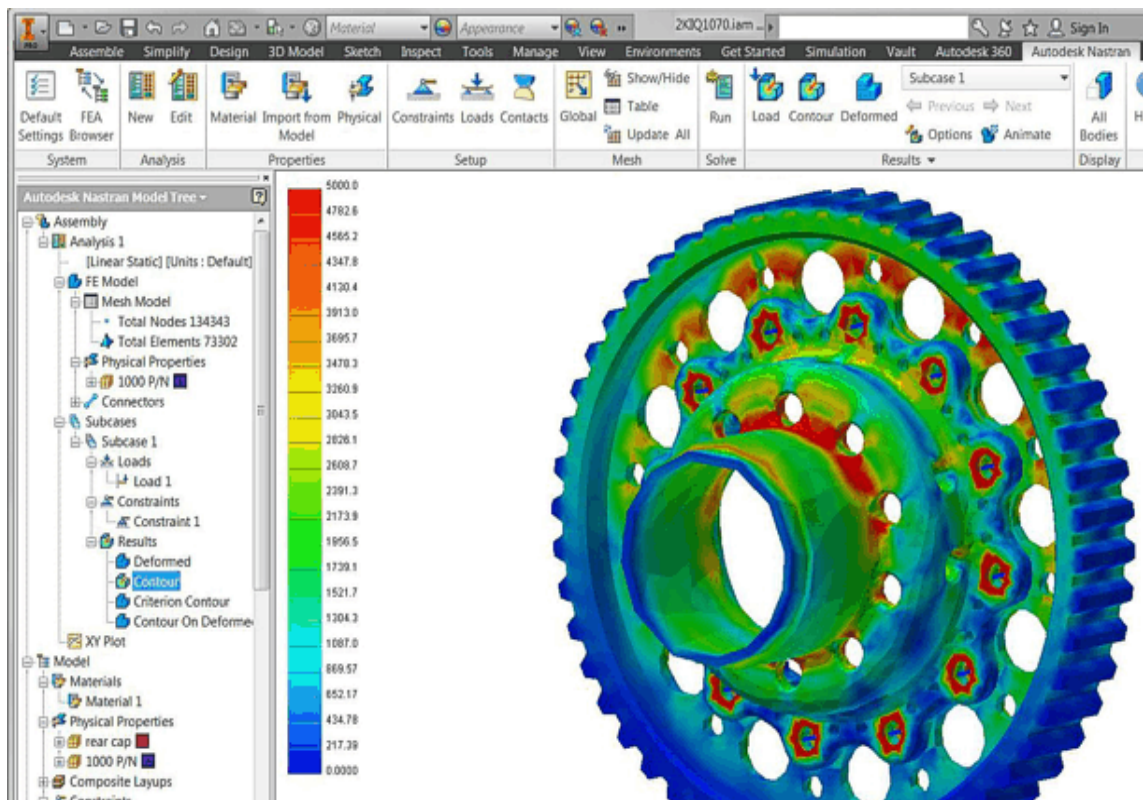
1.2 CAD/CAM systémy

CAD/CAM patří mezi skupinu s názvem CA. CA znamená počítačová podpora. Je to skupina softwarových programů, které mají za úkol zefektivnit výrobu a tvorbu výrobků. Příkladem, kde se dá využít, může být kontrola, plánování výroba [2,5].

Výhody používání CA [5]:

- zvýšení produktivity,
- snížení chyb,
- tvorba dokumentace,
- odborná provázanost,
- zajištění standartu.

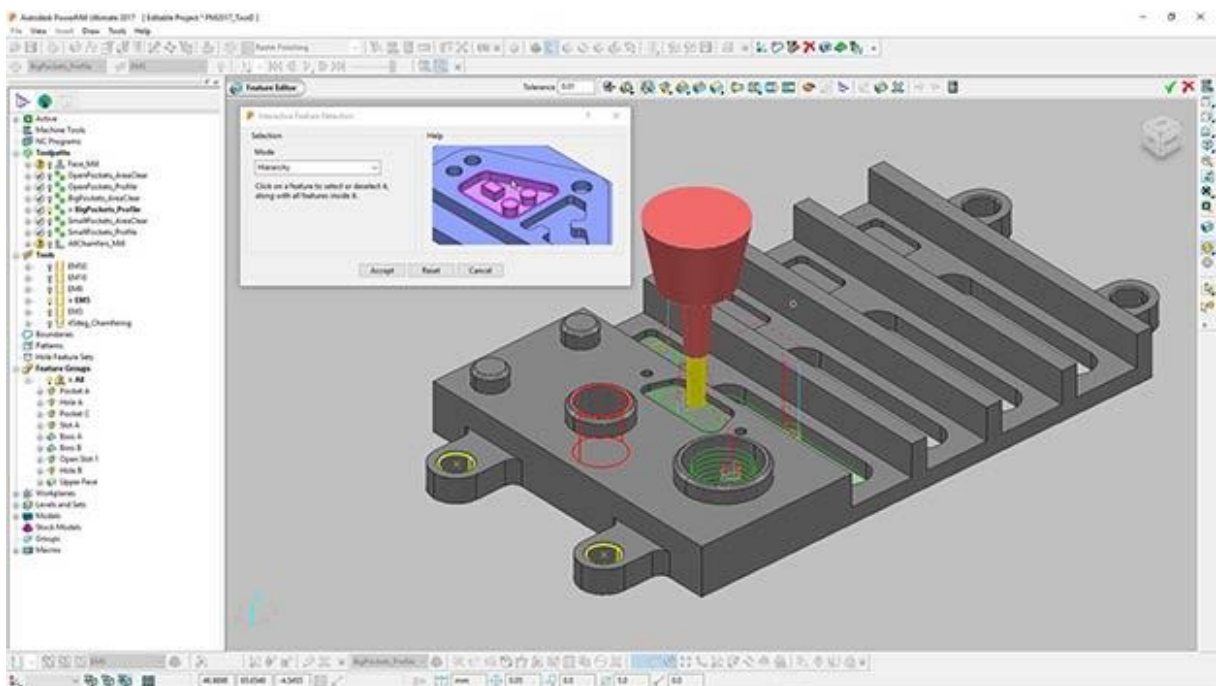
Při tvorbě modelů se využívá systému CAD, je to zjednodušení pro konstruktéry, kteří v minulosti strávili dny při tvorbě výkresu na prknech. V dnešní době se tato výkresová prkna udržují spíše jako ukázka práce. Další výhodou je možnost zobrazení navrhovaných součástí ve 3D, které většina systémů na CAD podporuje, a tím je možné si udělat lepší přehled o celkové koncepci dílu. Díky tomu se mohou snadno odhalit kolize a nesmontovatelnost. Tím se šetří čas celkové tvorby jednotlivých výrobků a snižuje počet prototypů, v rámci svázání s MKP (viz. obr. 3) [2,5].



Obr. 3 CAD model [6].

CAM systém je v překladu počítačově podporovaná výroba. Těch se využívá pro automatizaci výroby. Lze jich využít pro kusovou či hromadnou výrobu součástí různého druhu. Nemusí se jednat pouze o součásti pro obrábění, ale i jiných způsobů [2,5].

Výsledkem z CAM, je obvykle simulace procesu. Dále pak u obrábění díky postprocesoru NC program. Ten odpovídá nastavení a simulaci v CAM softwaru. Se vzrůstající automatizací dokážou tyto programy ovládat i nezkušení uživatelé. Mnohdy stačí jen pár nastavení, co by uživatel požadoval obrobit a program spočítá nevhodnější strategii a způsob, jak ho lze dosáhnout. Po tomto nastavení lze na simulaci vidět pohyb nástroje, kontrolují se také problémová místa, jako jsou kolize nástroje. Ze zvolených drah nástroje lze po nastavení řezných dat vyčíst i dobu, jakou bude proces probíhat, a tím lze pracovat i na zefektivnění procesu nastavením nevhodnější strategie [2,5].



Obr. 4 Ukázka frézování v CAM softwaru [7].

CAD/CAM je spojení dvou systémů, které se využívají při tvorbě. V první části se daná součást navrhne a další se pomocí systému určí jakým způsobem se vyrobí obrobek (viz. obr. 4). U strojírenství je úkol těchto systémů poměrně známý, ale lze jich využít i v jiných odvětvích. Jako ukázka může sloužit využití pro stomatologii, kdy se pomocí 3D skeneru převede pacientova čelist do systému CAD a po patřičných úpravách se vytvoří zubní náhrada. Je to poměrně moderní a rychlá metoda tvorby zubních náhrad, šetří čas pacientů i lékařů, díky velké přesnosti tvorby. Toto, jen dokazuje univerzálnost použití CAD/CAM technologií [2,5].

Jak bylo již zmíněné, programy se systémem CAM usnadňují tvorbu NC programů. Při základním nastavení však mívají chyby, které se projevují například vibracemi a dalšími nechtěnými efekty, jako je kolize nástroje s přípravkem. Ty se však po nastavení parametrů a například ručním nastavením dráhy dají eliminovat. To jsou jedny z faktorů, které ovlivňují volbu těchto metod při obrábění [5].

Programů, které pracují s CAM technologiemi, je na trhu spousta (viz. obr. 5). V základu je možné tyto programy rozdělit do dvou základních skupin. První skupinou jsou programy integrované mezi CAD systémy, například formou doplňků. Druhou skupinou jsou samostatně prodávané programy. Zpravidla samostatně prodávané jsou dražší než integrované, jelikož sebou přinášejí benefity ve formě určitého většího rozsahu nastavování [8].



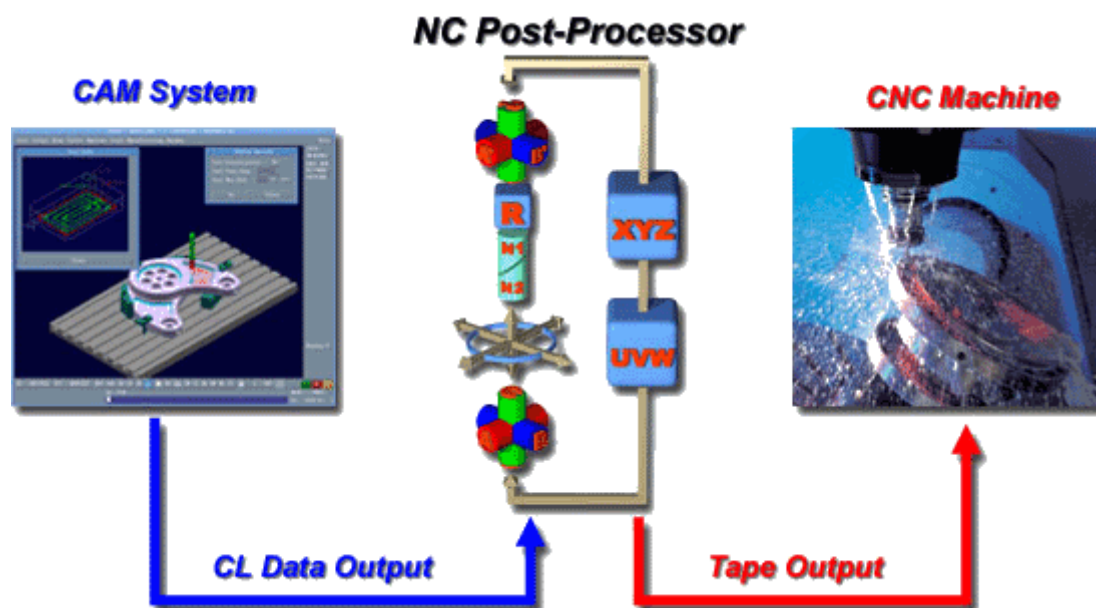
Obr. 5 Příklad programů pro CAM [8].

Hrubovací metody z pohledu CAM lze dělit na dvě skupiny. Jedna skupina se nazývá konvenční technologie, které jsou k dispozici ve všech programech. Mohou to být samostatné programy tak i integrované mezi CAD. Další skupina, která se poslední dobou velmi rozvíjí, je založena na principech vysokorychlostního a vysokoposuvového obrábění. U všech je však důležitý převod vytvořených CL dat, pomocí post-processoru. Tento CL data přeloží do požadovaného jazyka např. g-kódu. Jedná se tedy o velmi důležitou součást všech CAM programů, bez post-processoru, jde pouze o simulaci obrábění. Průběh přenosu dat je zobrazen na následujícím obr. 6 [5,9].

1.3 Konvenční metody obrábění kapes pomocí CAM

V této části jsou uvedeny základní možnosti obrobení kapes pomocí CAM systémů. Mezi konvenční, běžně používané technologie, lze zařadit strategie vytvoření dráhy kontury (offset) a řádkováním (rastr). Jsou to možnosti nastavení, které nabízí většina CAM programů na trhu.

Ukázky základních nastavení jsou zde uvedeny z programu PowerMILL 2017. Ten patří mezi nejlepší nastavitelný program na trhu. Tento program vyvíjí firma Autodesk, která jej koupila od firmy DELCAM. Není to však jediný program, který společnost prodává, jsou zde i další jako PowerMILL a PowerShape. FeatureCAM a HSM patří také mezi CAM programy, ale jsou na nižší úrovni oproti PowerMILLu, čemuž odpovídají i ceny [7,9].



Obr. 6 Propojení CAM s řídicím systémem stroje [10].

Při konvenčním obrábění se nejčastěji používá 3 osé nebo 2,5 osé obrábění. 5 osé obrábění se ve většině případech skládá ze složek 3+2 os, což je zjednodušeně řečeno 3 ose obrábění v různých polohách natočení, není tedy nutné měnit upnutí obrobku.

Pro obrábění kapes lze vybrat ze dvou metod, jak zvolit výchozí strategie, ty mohou být pro oba způsoby stejné. V základu se liší zvolením výchozího tvaru obráběné části. U 2,5 osého obrábění se nejprve zvolí tvar, který je potřeba vyrobit a vytvoří se 2 D sada, která tento tvar blíže specifikuje. Poté je generovaná dráha v požadovaných hranicích [5,11].

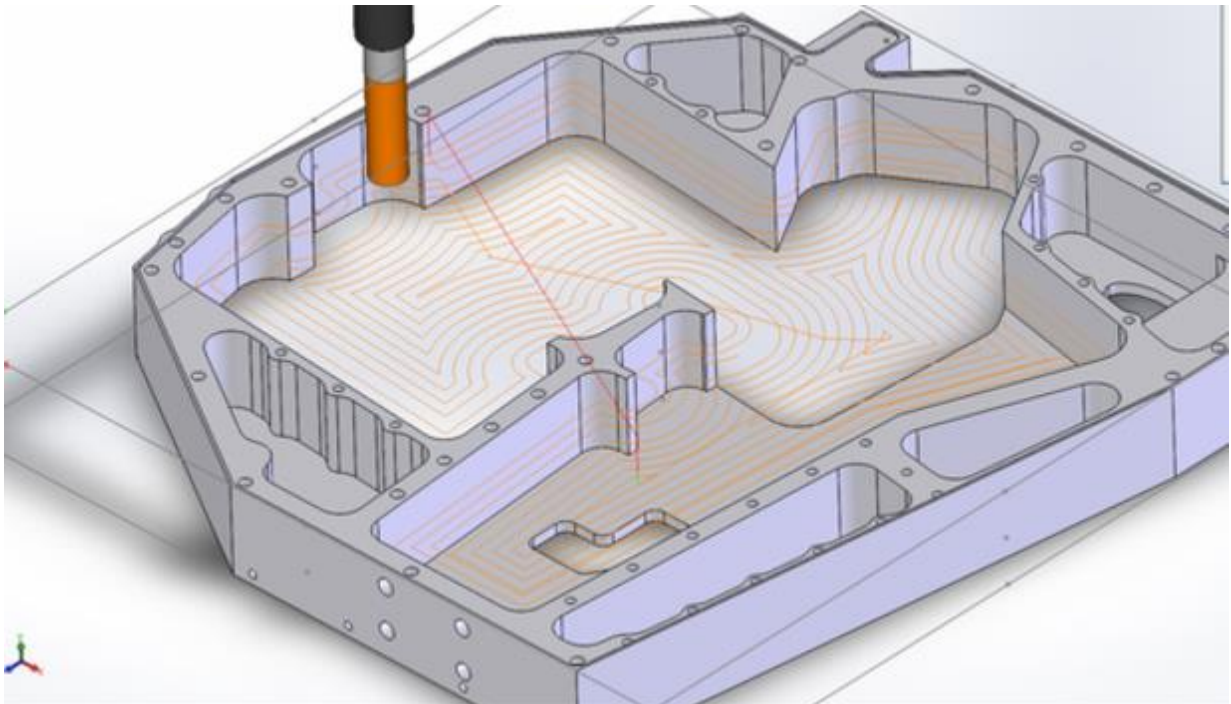
U 3 osého obrábění se výchozí tvar sám generuje pro zvolenou metodu obrábění. Z časového pohledu se tedy může zdát, že tento způsob volby je produktivnější. Při samotné volbě si program může vygenerovat i tvar, který není úplně vhodně zvolený. Jako příklad špatné volby je obrázek, zde je vidět, že při zvoleném způsobu, se dokončovacím nástrojem pohybuje i na zarovnané ploše. To při volbě kulové frézy s malým krokem není příliš produktivní, navíc výsledný povrch bude mít horší strukturu, než při volbě zarovnání plochy [5,12].

1.3.1 Konturováním

Tato metoda je založena na vytvoření drah nástroje odsazením křivky tvořící model (viz. obr. 7). Tento nástroj lze využít jako poměrně bezpečné a jednoduché řešení pro obrábění kapes různých tvarů. Odstup jednotlivých drah se řídí především parametrem kroku, tedy jakou částí nástroj pojede v odebírání materiálu. Obvykle se při hrubování volí krok, který odpovídá v procentech (20-75 %) průměru nástroje. Díky tomu se vytvoří souměrné dráhy [9,13].

Pro co nejvyšší životnost nástroje se volí obrábění souměrné, kdy se nástroj pohybuje pouze v jednom směru, podle tvaru kapsy může vypadat vykreslení drah jako spirála. Nástroj se zavrtá ve středu uvažované kapsy a následně se rozjíždí do podle sousledného směru po dráze. Pokud by naopak nástroj začínal na vnější straně konturované kapsy, došlo by k velkému zatěžování nástroje, což by ovlivňovalo životnost nástroje tak, i deformace na součásti. Další krok by vypadal velmi podobně jako u zavrtání ve středu kapsy [2, 9,13,14].

Tato dráha se pohybuje standardně po drahách vytvořených v jedné hladině kolmé na osu Z. Lze například nastavovat, aby výška jednotlivých hladin byla jiná, to zejména kvůli opotřebení nástroje. Aby nedocházelo ke styku materiálu s břitem nástroje stále ve stejném místě a tím k opotřebení ve tvaru vrubu [9].



Obr. 7 Ukázka frézování offsetem [11].

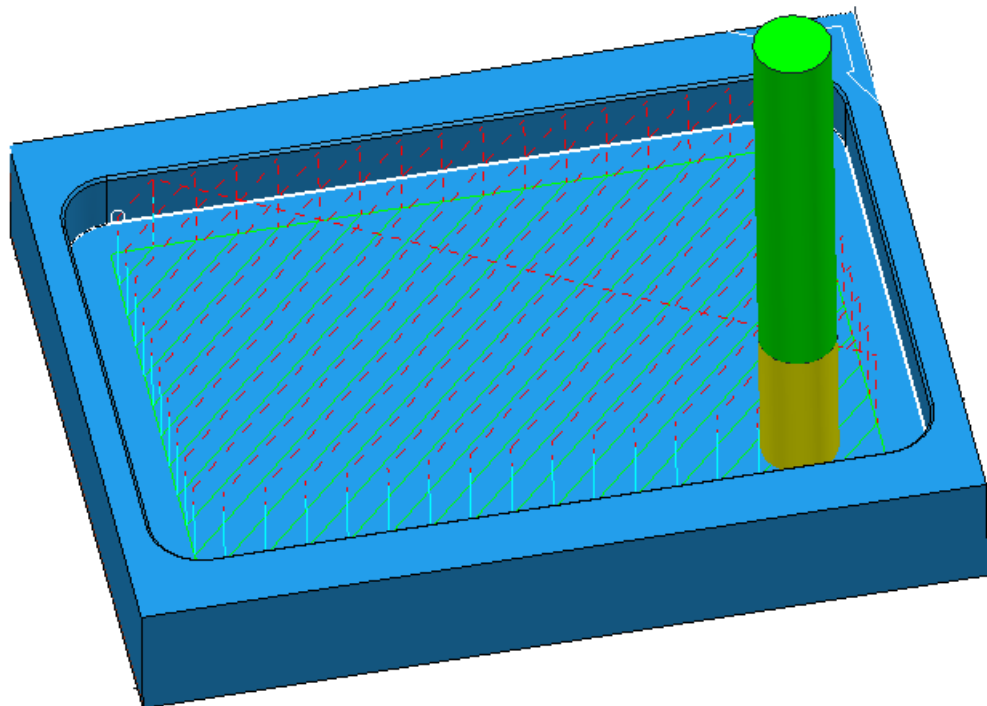
V nastavení programu PowerMILL se rozlišují dvě základní nastavení konturování kapsy. První variantou je konturování modelu, tedy reálně vytvořené dráhy podle modelu kapsy. Druhou variantou je konturování modelu, tato by měla být uzpůsobena pro možnost vysokorychlostního obrábění [9].

1.3.2 Obrábění řádkováním

Vytvoření drah pro řádkování (rastr) je poměrně jednoduché. Jak název napovídá, jedná se o vytvoření série lineárních rovnoběžných drah v dutině kapsy. I u této strategie frézování se dráhy vytvoří v jedné z-tové hladině, po provedení první vrstvy se nástroj posune o další úroveň [9].

Jednotlivé odsazení drah je rovněž závislé na nastavení vedlejšího kroku. Ten technolog zvolí podle vlastního uvážení, je však podobný jako u frézování konturováním. Při prvním zavrtání se poměrně dosti namáhá, pokud je dráha dlouhá, jelikož se odebírá materiál celým průměrem nástroje. Stejný postup se aplikuje na odebírání nejen kapes, ale i vnějšího tvaru. Pro snížení zatížení lze například v programu PowerMILL nastavit úhel sklonění drah (viz. obr. 8). To se uplatňuje u čtvercových kapes, kdy první záběr je v rohu součásti, a poté další kroky tuto první drážku rozšiřují [9, 13,14].

Při obrábění rastrem se kvůli většímu kroku u hrubování na stěně kapsy vytváří stopy po nástroji. Poté musí kvůli tomuto velmi hrubému povrchu jet i dráha, která kopíruje profil kapsy. Ale i u této operace se musí dodržet tloušťka přídavku na stěnu pro dokončování [9].

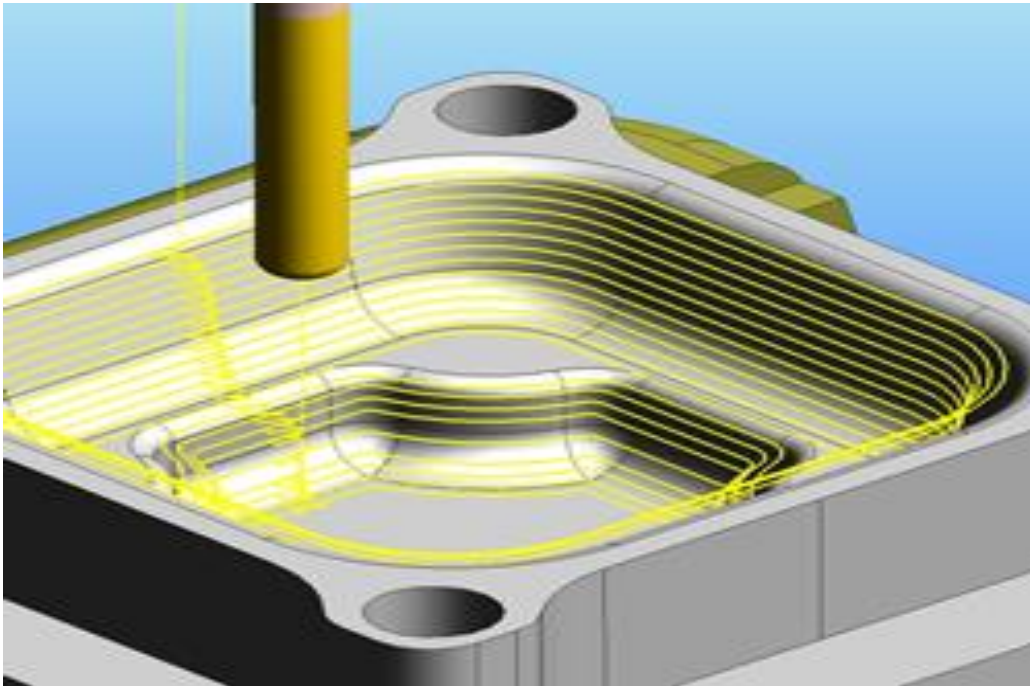


Obr. 8 Ukázka strategie řádkování.

U aplikace sousledného obrábění se poměrně dlouhou dobu pohybuje nástroj v rovině posuvu nad kapsou, což prodlužuje strojní čas obrábění. Při nastavení obousměrného obrábění se tento čas sníží, ale toto nastavení má negativní vliv průběh sil u obrábění. Obou směrné obrábění bude mít vliv také na životnost nástroje.

1.3.3 Profilování

Tato hrubovací strategie se s výhodou využívá pro obrábění křivek a jiných rovinných tvarů. Lze ji využít jako nástroj pro tvorbu textů do obráběného materiálu. Kde tloušťka textu bude definovaná průměrem nástroje. Dále ji uživatel může použít pro vytvoření hrubovací strategie pro odlitky a jiné obrobky (viz. obr. 9), kde je požadováno jen obrobení plochy formou kontury. Nástroj se pohybuje pouze po jedné dráze, která je blízká tvaru součásti, tedy co se týká roviny xy. Nástroj následně obrábí v po určitých z-hladinách kolmých na rovinu xy [9, 15].



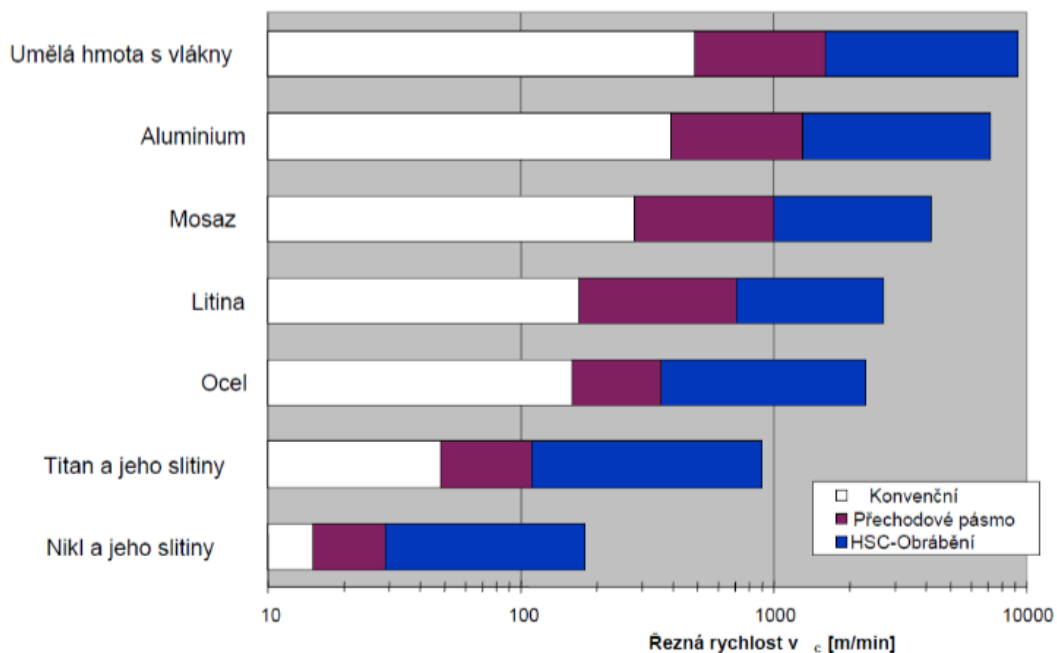
Obr. 9 Ukázka strategie profilování [15].

1.3.4 Využití dokončovacích strategií

Je další možností, jak vytvořit hrubovaný tvar pro kapsy, použitím jiných strategií než hrubovacích. Tedy zejména těch, které jsou určeny pro dokončování tvaru tělesa. Zde se většinou vyskytují strategie, které se soustředí především na obrábění stěny kapsy nebo na dno kapsy. Jejich tvary jsou velmi podobné jako pro hrubovací strategie, ale lze například využít dráhu ve tvaru spirály, která se v hrubovacích strategiích nevyskytuje. Oproti strategii konturování je zde pohyb do další úrovně plynulý, kdežto u konturování se nástroj posunuje skokem směru (po úpravě dráhy je možné i plynulý přechod). U spirální dráhy však poslední dráha kopíruje požadovaný tvar kapsy, to má za následek větší dráhu, a díky tomu i delší strojní čas [9,15].

1.4 Produktivní obrábění

Jde o metody zastoupené pod zkratkou HSM, což znamená high speed milling, v překladu vysokorychlostní frézování. Jedná se o nové metody zefektivnění výroby za dodržení některých předpokladů. Oproti klasickému obrábění se zde mění jeden, nebo více parametrů, také jejich dráha bývá často rozdílná oproti klasickému. Dále bývají kladeny větší požadavky na stoj a nástroj. Při volbě stroje je tedy nutné počítat například s požadavky na vřeteno, které by mělo zvládat vyšší otáčky (viz. obr. 10), než je obvyklé u klasických strojů [16,17,18].



Obr. 10 Tabulka porovnání obrábění HSC a konvenčního [18].

1.4.1 HSC

Jde o vysokorychlostní obrábění, základem je řádově vyšší řezná rychlost oproti konvenčnímu obrábění. Základním předpokladem je poznatek, že při zvýšení řezné rychlosti a posuvů, při menší nebo stejném objemu třísek, lze dosáhnout vyššího výkonu obrábění. Podle zvolené technologie nebo materiálů, může být řezná rychlost více jak desetinásobná. Vlivem těchto rychlostí vzniká více tepla, ale většina je odvedena třískou, protože při tomto obrábění nestačí tříška předat teplo do nástroje. Z toho vyplývá menší tepelné zatížení nástroje a zvyšuje se tím celková životnost. Další předností těchto metod je obvykle nižší řezná rychlost. Při vhodném nastavení parametrů může být tato síla konstantní, což rovněž prodlužuje životnost nástroje na maximum. Obrobený povrch dosahuje lepší kvality, lze jimi obrábět tenkostěnné součásti nebo může být obráběno bez chlazení. To je jen část výhod, které přináší vysokorychlostní obrábění [16,17,18,19,20].

Základní předpoklady pro HSC [17,19, 20]:

- dostatečná tuhost polohovacích zařízení,
- tuhost vřetene,
- velký rozsah otáček,
- vhodné nástroje,
- pět až desetkrát vyšší posuvové rychlosti.

Kromě výhod má tato metoda i několik nevýhod. Jednou z hlavních nevýhod je cena takového zařízení, a s tím souvisí i cena nástrojového vybavení. Kvůli vysokým otáčkám je nutné nástroj dostatečně vyvažovat, kvůli vibracím [16,17,19].

1.4.2 HFC

Tato metoda se nazývá obrábění s vysokými posuvovými rychlostmi. Jedná se o další produktivní metodu, která rovněž vyžaduje speciální nástroje a stroje. Na rozdíl od HSC se zde sleduje parametr maximální aplikované posuvové rychlosti. Jedním z parametrů při pořizování stroje je, zda má možnost zrychleného pohybu ve všech osách. Největším charakterem této metody je možnost úběru třísky s malou hloubkou (a_p do 2 mm) a vysokým posuvem na zub (až $f_z = 3$ mm/zub) [17,20].

Vhodné nástroje jsou ze slinutých karbidů, nebo jiné vyměnitelné břitové destičky. Stopky nástrojů mohou být delší (více jak 7 x průměr nástroje) než u běžných nástrojů a odlehčeny, díky menším radiálním silám. Tyto parametry jsou vhodné pro hrubovací obrábění a s výhodou se využívá zahořovacího obrábění [17,20].

1.4.3 HPC

Vysokovýkonné obrábění vzniklo kvůli žádanosti po metodě, která bude umožňovat velký úběr materiálu. Metoda je vhodná pro hrubovací obrábění a materiály, které jsou těžko obrobitelné. Z pohledu nástroje jsou zde podobné parametry na materiály jako u HFC, ale na rozdíl o něj může být hloubka záběru až 1,5x D. Požadavky na stroj jsou z těchto metod nejvíce náročné [17].

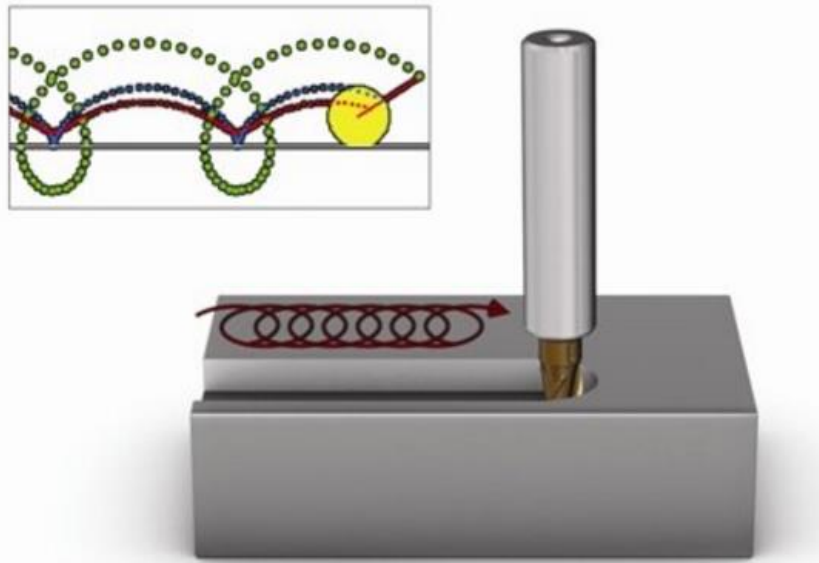
Předpokládá se, že stroj bude splňovat suché obrábění, dále bude mít automatizovaný odvod třísek ze stroje a automatickou výměnu obrobků. Díky automatizaci těchto prvků se snižují vedlejší časy, což tuto metodu činí produktivnější. Není snadné tento způsob odlišit od HSC, v mnohých ohledech jsou si velmi podobné. Rozdíl bychom při konkrétním případě našli až podrobnou analýzou [17,20].

1.4.4 Produktivní trochoidní dráha

Trochoida je křivka, definovaná rotačním a zároveň translačním pohybem (viz. obr. 11). Tato křivka se uplatňuje zejména u vysokorychlostního obrábění a u obrábění, kde chceme snížit zatížení nástroje. Příkladem, kde se trochoidní dráha uplatňuje je například hrubování pomocí offsetu. Původní dráha bez úprav je v rozích, kde je velké opásání nástroje, a tím i jeho větší zatížení. Využitím vysokorychlostního obrábění se v daných místech, s největším opásáním nástroje, vytvoří upravená dráha. Ta má charakter trochoidy. Díky tomu je úběr třísky konstantní a je možné zvýšit rychlost obrábění, jelikož nehrozí nárazové přetěžování nástroje. Je nutné také zmínit, že po trochoidním obrábění je podstatně horší povrch než u klasických trajektorií, vnikají „krajky“ na povrchu. Je tedy nutné po trochoidních drahách aplikovat dokončovací dráhu. [9,21].

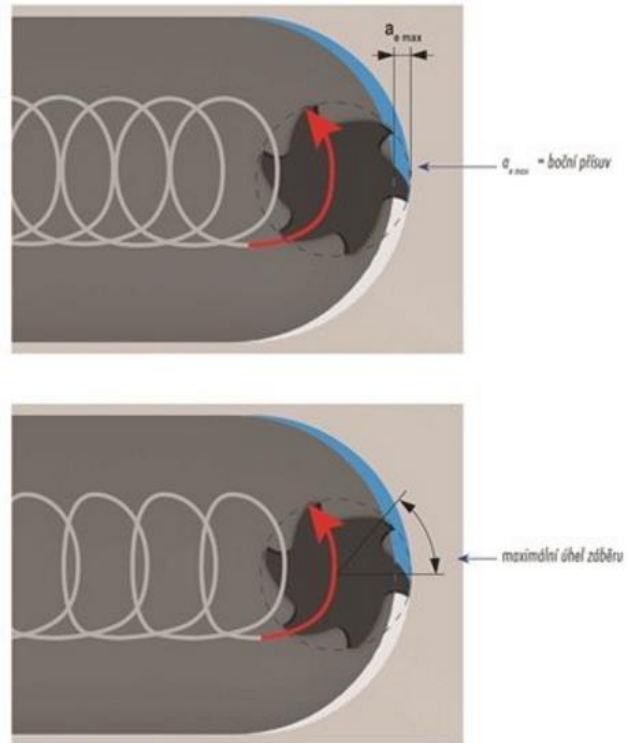
Výhody trochoidního frézování [21,22]:

- Je možné obrábět drážky, které jsou širší než průměr řezného nástroje.
- Možnost využít vyšších rychlostí posuvu a řezných rychlostí, při malé radiální hloubce.
- Rychlejší obrábění oproti klasickému.
- Vyšší životnost nástroje při obrábění.



Obr. 11 Trochoidní frézování [21].

Trochoidní dráha už v dnešní době mnohdy nevypadá podle obrázku, je upravená, aby byla produktivnější. Příkladem může být obrábění titanu, kdy se nástroj obrábí pomocí trochoidního pohybu, ale bez chlazení. Kvůli špatné obrobitelnosti titanu se zde uplatňuje proměnná rychlost nástroje. Když nástroj není v záběru, může se pohybovat rychleji, to až rychlostí rychloposuvu. Dráha může být upravená tvarem, kdy se už netvoří kružnice, ale křivky připomínající tvar C (viz. obr. 12) [23,24].



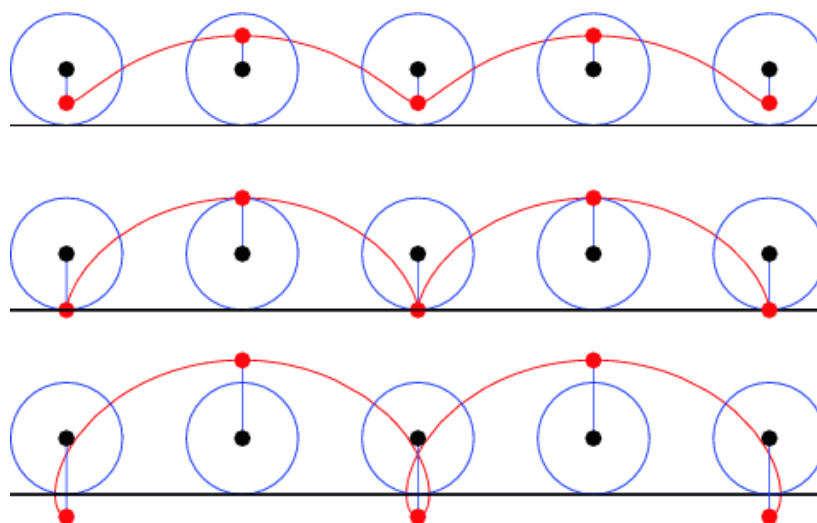
Obr. 12 Ukazka možných tvarů trochoidy [24].

Trochoidu lze vyjádřit jako parametrickou rovnicí. Trochoida je křivka bodu ve vzdálenosti b od středu kružnice o poloměru k válcování na a pevné linii [25].

$$x = a\phi - b \sin \phi$$

$$y = a - b \cos \phi$$

Pokud je $b < a$, trochoida se mění na přenesenou cycloidu, v opačném případě se tato křivka bude nazývat „prolate“ cykloida, dále pokud je $b = a$ bude výsledný tvar cykloida (viz. obr. 13) [25].

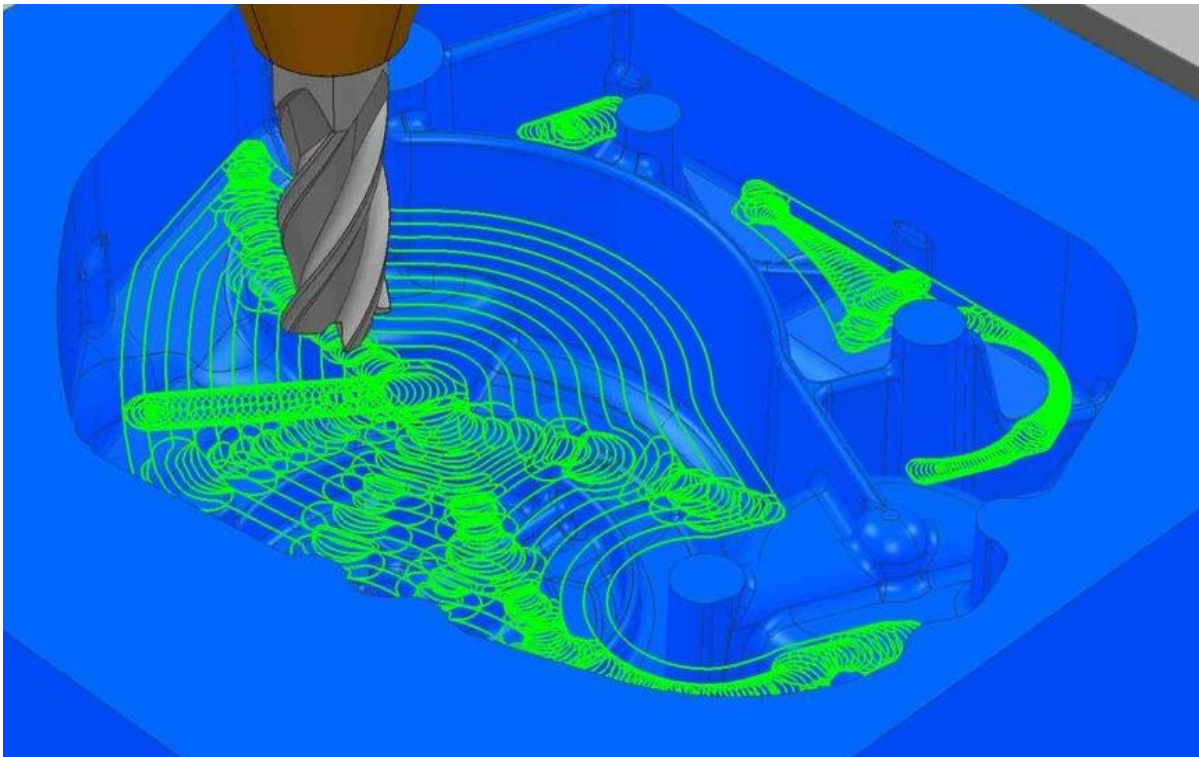


Obr. 13 Vliv polohy bodu na křivce [25].

1.4.5 Vortex

Tento způsob obrábění patří mezi produktivní strategie. Je to strategie, kterou vyvinula firma DELCAM pro program PowerMILL a FeatureCAM (viz. obr. 15). Reagoval tak na poptávku trhu, kde se rozšířily strategie pro vysokorychlostní obrábění [7,26].

Je založena na offsetové dráze (viz. obr. 14). Při tomto způsobu obrábění nástroj nesmí překročit úhel opásání. Úhel opásání přímo vychází z bočního kroku nástroje. Díky těmto parametrům se eliminuje zatížení nástroje, které by mohlo vést až k poškození. Dále nástroj nebude obrábět celým průměrem. V případě, že se dráha strategie blíží limitnímu stavu, kdy je uhel opásání větší než zadaný parametr, tak se dráha změní na trochoidní [9,26].



Obr. 14 Dráha vytvořená strategií Vortex [27].

Je možné také obrábět podstatně ve větší hloubce než u klasické strategie. To přímo vede ke zkrácení výrobních časů na požadované kape [9].

Kvůli způsobu obrábění, kdy se obrábí zejména bokem nástroje, jsou pro tuto strategii upřednostňovány monolitní karbidové nástroje oproti nástrojům s vyměnitelnými břitovými destičkami. Monolitní nástroje jsou zejména výhodné při vyšších hloubkách obrábění. Velký bonus, který tato strategie umožňuje, je nastavení minimálního rádius vygenerované trochoidy. To přímo ovlivňuje nežádoucí zpomalení u stroje, a to zejména v kruhových pohybech [9,26,27,28].

U této technologie se využívá další nástroj, který vyvinula společnost DELCAM společně se strategií Vortex. Jedná se o Machine DNA. Je to technologie, která umožňuje provázání kondice stroje s CAM systémem. Díky zabudované diagnostice programu, která se spustí, získáme potřebná data o stroji, na kterém chceme obrábět. To nám následně umožňuje lépe korigovat vygenerovanou dráhu a jiné. Příkladem může být minimální rádius trochoidy. Tím se také vyzkouší, zda daný stroj

dokáže program číst požadovanou rychlostí, a zda dokáže zpracovávat program, který generuje křivky [26,27].



Obr. 15 Výskyt strategie Vortex [26].

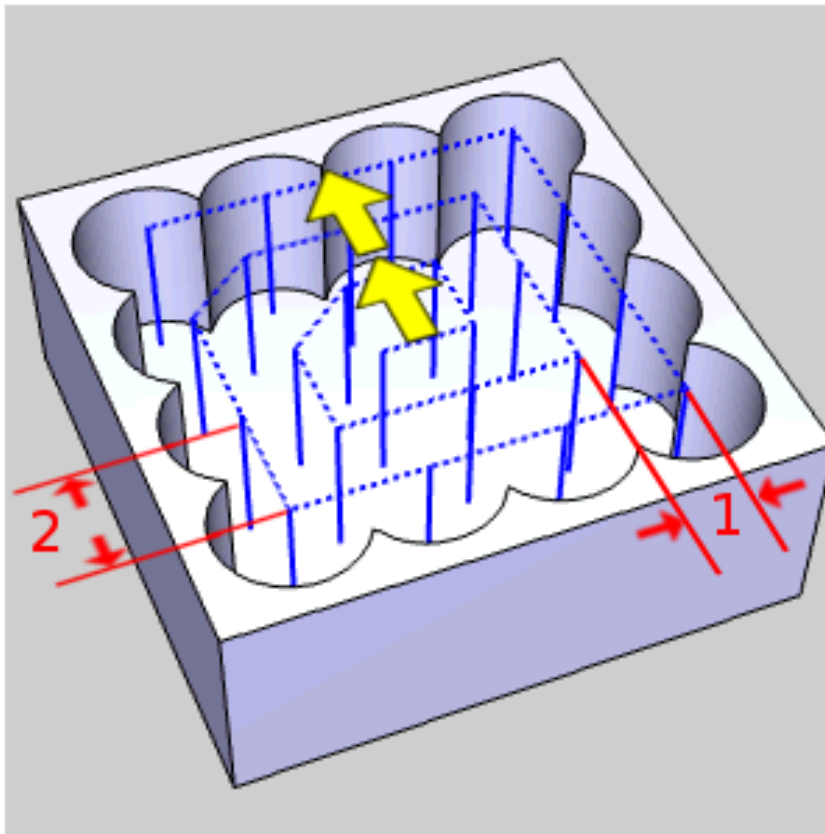
Při obrábění strategií Vortex, jehož výhodou je využití plné délky nástroje u monolitních fréz je díky tomu vygenerována dráha i upravena. V prvních krocích se nástroj zanoří do maximální hloubky s velkým rozestupem v z hladině. Po odstranění tohoto materiálu plnou délkou nástroje, což je z pohledu využití nástroje velmi efektivní, se fréza posune v jemnějším kroku o určitý krok zpět nahoru. Tímto se liší od klasických strategií, jako je konturování nebo řádkování, které se pohybují v jedné hladině nebo se pohybují směrem dolů. Při tomto kroku zpět se vytvoří plocha, která už lépe vystihuje požadovaný tvar než v prvním kroku. Zde už nástroj neobrábí plnou délkou, z čehož plyne, že následný krok není tak efektivní jako první fáze [26,27,28].

1.4.6 Ponorné frézování

Tímto způsobem frézování se nejčastěji obrábí hluboké a úzké drážky či kapsy. Při hledání této strategie se lze setkat s názvem „*Plunge Milling*“. Základní myšlenkou tohoto obrábění je proces podobný vrtání [7, 30].

Řez při frézování probíhá na čele nástroje, místo obvodu. Volí se kvůli lepšímu vlivu na materiál, kdy při obvodovém vznikají vibrace. Zatížení nástroje je rovněž jiné než u obvodového obrábění, mění se z radiálního na axiální, tedy podobně jako u vrtání. Dochází k velkému úběru materiálu za poměrně krátkou dobu [29,30].

Nástroje pro ponorné frézování se liší od klasických fréz. Vyložení nástroje je větší, což přímo souvisí se specifikací dutin. Dále je patrné odlehčení dřívku, ten je menšího průměru než největší rezný průměr, aby nedocházelo při pohybu nástroje v ose ke dření po stěně obrobku. Při stejném vyložení nástroje by při použití klasických strategií obrábění docházelo k průhybu nástroje, a tím zhoršení přesnosti [29,30].

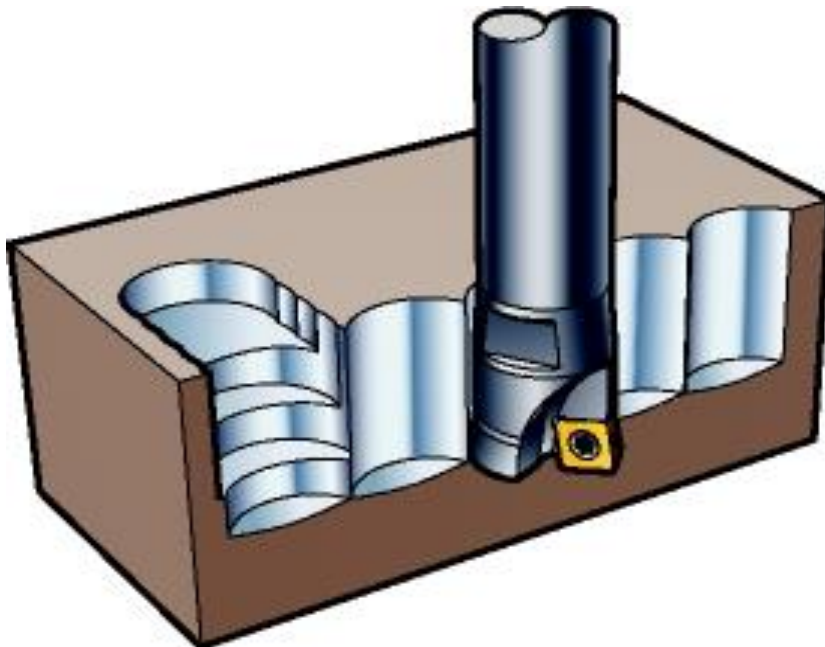


Obr. 16 Ponorné frézování vytvořené na strategii dokončovací [31].

Při obrábění tímto způsobem dochází k řadě problémů při zvolení špatného postupu. V programu PowerMILL je pro zvolení této strategie důležité zvolit zbytkový materiál, který se má obrábět, a také směr, jakým se nástroj bude zanořovat. Tento směr si uživatel může vytvořit samostatně nebo využije drah, které mu program nabídne. Dráhy, které program generuje, jsou v první řadě dokončovací, tedy nejsou určeny primárně pro hrubování. U ponorného frézování si tato strategie vygeneruje, po zadání kroku vedle, pohyby nástroje. Tento zavrtávací pohyb je kolmý na vytvořenou dokončovací dráhu (viz. obr. 16) [9,30,31].

Po vytvoření a od simulování frézování je výsledný povrch poměrně hrubý a je tedy obvykle žádoucí začlenit do procesu další operaci. Mohou to být hrubovací operace nebo zbytkové. Poté povrch nebude tak členitý a lépe připravený na dokončovací obrábění [30].

Důležitou volbou je po volbě jako u řádkového obrábění volba kroků a směr jakým se má nástroj pohybovat (viz. obr. 17). Například při volně zanořování po přímce nebo podobným způsobem dochází při obrábění k velkému zatěžování nástroje vlivem velkého množství odebíraného materiálu a také opásání nástroje. Proto je jednou z nejvhodnějších drah pro ponorné frézování je volit pohyb nástroje „cik cak“, nebo jiný pohyb, který by první zanoření postupně rozšiřoval. Jako i u jiných strategií je jedním z faktorů ovlivňujících proces i odvod třísek. Při nedostatečném odvodu bude nástroj tento materiál znovu obrábět, což bude mít ale za následek pouze větší otupení nástroje. To částečně řeší možnost rozšiřovat již existující kapsu po prvním zanoření nástroje. V tomto prostoru se budou třísky částečně kumulovat a nebudou zasahovat do procesu frézování požadované kapsy [30,31].



Obr. 17 Ponorné frézování [30].

Obecné pokyny [30]:

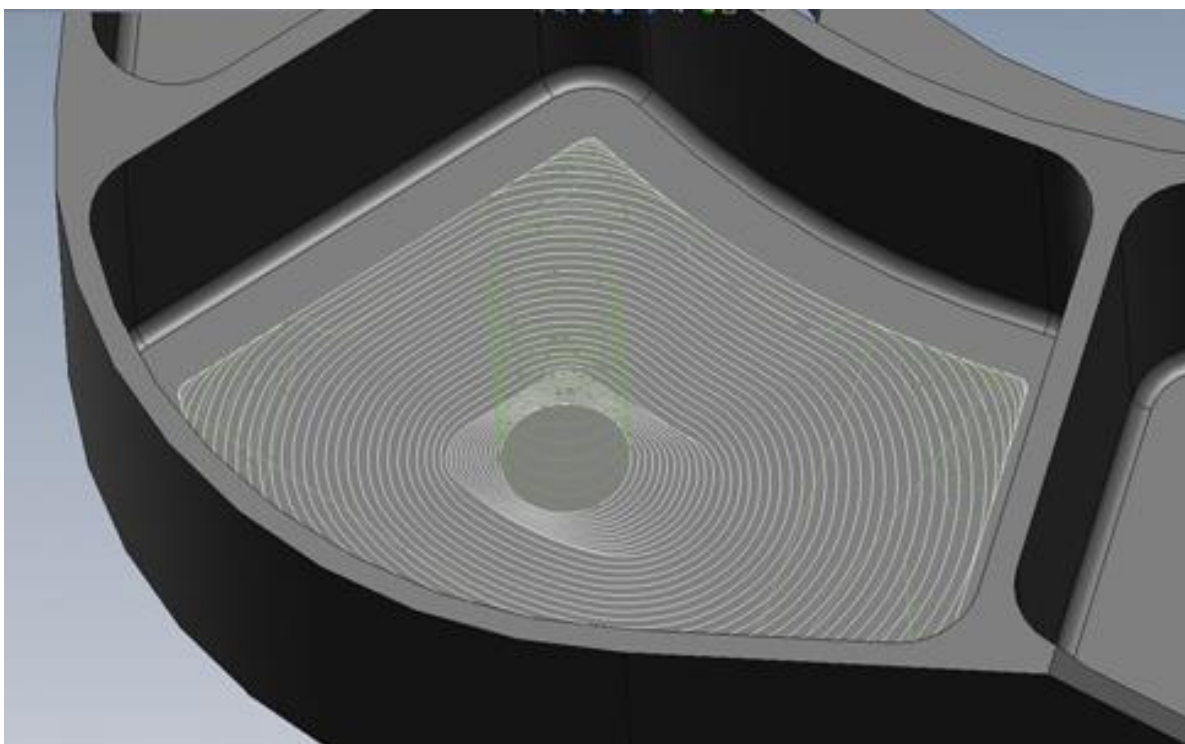
- Stroj s horizontální orientací vřetena pomáhá odvádění třísek.
- Frézování začne v dolní části a postupuje se nahoru (u horizontální).
- Menší posuv na zub oproti klasickému frézování.
- Použitá maximálního a_e .
- V záběru více než jeden zub.
- Pro krok do strany se používá vzdálenost $0,75 \times D$.
- Využívání smyček, měly by zabránit poškození obrobenej plochy (vytvoří se odskok od obrobenej plochy a nástroj se tak nevrací po zavrtávací dráze).
- Použití nástroje s jemnou zubovou roztečí.

1.4.7 iMachinig

Software pod názvem SolidCAM, který patří mezi další programy na CAM softwarové programování, vyvinul vlastní strategii obrábění pod názvem iMachinig. SolidCAM je v základu nástavbou softwaru SolidWorks, nebo také CAD systému Inventor, to umožňuje plynulejší přechod mezi jednotlivými programy a není takový problém s formáty dat pro obrábění [32,33,35].

iMachinig strategie podle názvu naznačuje chytré obrábění, v zásadě se jedná o další strategii pro vysoko otáčkové obrábění. Sama společnost jej označuje za revoluci v obrábění, ale jedná se o technologii dráhy, která má umožňovat rychleji a hlouběji obrábět než konvenční offsetové dráhy. Jedná se tedy o další způsob, kdy se optimalizuje opásání nástroje [33,35].

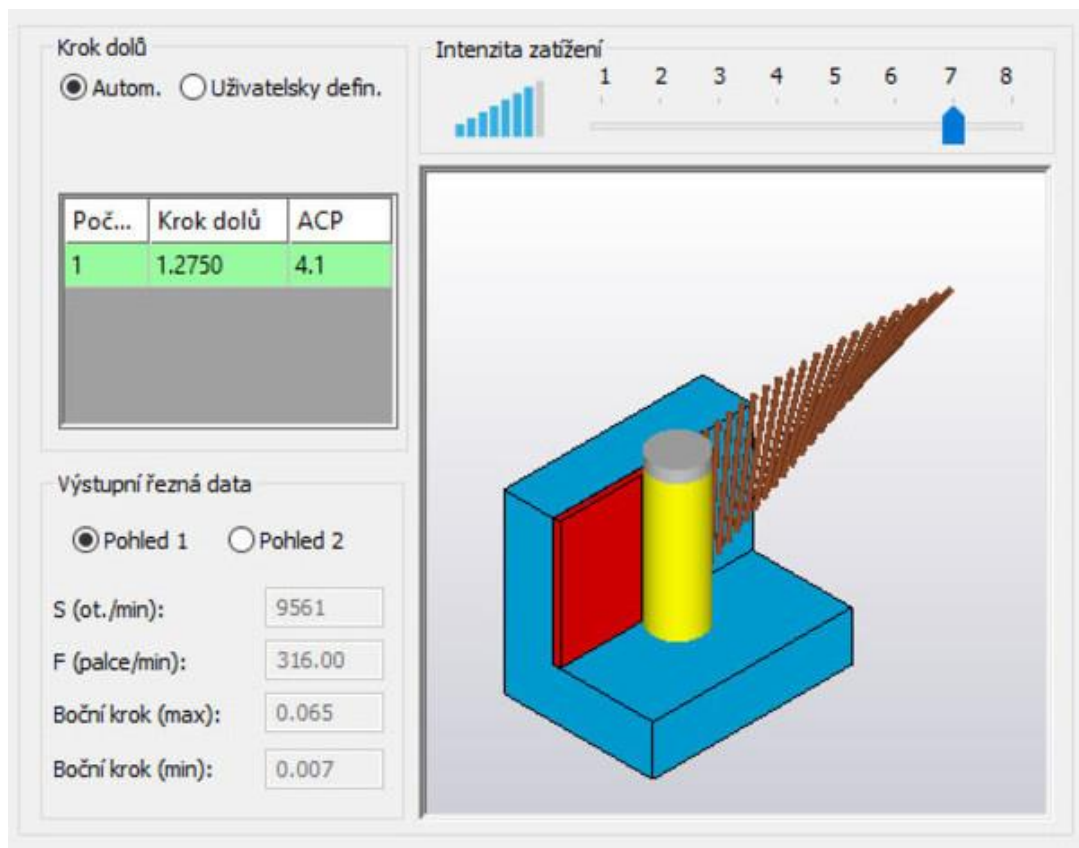
Jako výhody jsou zmiňovány vyšší životnost nástroje, stejně jako u jiných strategií. Dalším bodem je produktivita při obrábění tvrdých materiálů. K tomu způsobu je dodáváný přídatný podpůrný program (viz. obr. 19), který by měl umožňovat optimalizaci stávajících řezných podmínek u nástrojů, a to by mělo tedy fungovat bez pokusného obrábění pro stanovení optimálních parametrů [32,34,36].



Obr. 18 iMachinig – ukázka dráhy [36].

Tyto parametry jsou vypočítané na základě stávajících parametrů nástroje, které garantuje výrobce nástroje. Dále pak na základě nastavení vlastností obráběného materiálu jako je pevnost v tahu a v neposlední řadě i informace o obráběcím stroji [32,33].

Dráha je vytvořena na základě spirály (viz. obr. 18), uvádí se, že se jedná o patentované „morfující“ spirály. Po základním zavrtání se nástroj pohybuje od středu kapsy po spirálách, jak je vidět na obrázku. Po dosažení kratších hranic dané kapsy se spirála změní na dráhu tvořenou oblouky tvaru „C“, kdy je tato nová dráha dvojitá, jedna strana je řezná dráha, tedy kdy je nástroj v řezu a odebírá tak konstantní tloušťku materiálu. Druhá generovaná křivka je přejezdová, poté se nástroj vrací do řezu, zejména kvůli dodržení sousledného obrábění. Dá se říci, že takto vzniklá dráha je upravená trochoida o velkém průměru a poněkud změněném tvaru, ale výhody jsou zde zachovány [32,34,35].



Obr. 19 Průvodce technologií iMachinig [34].

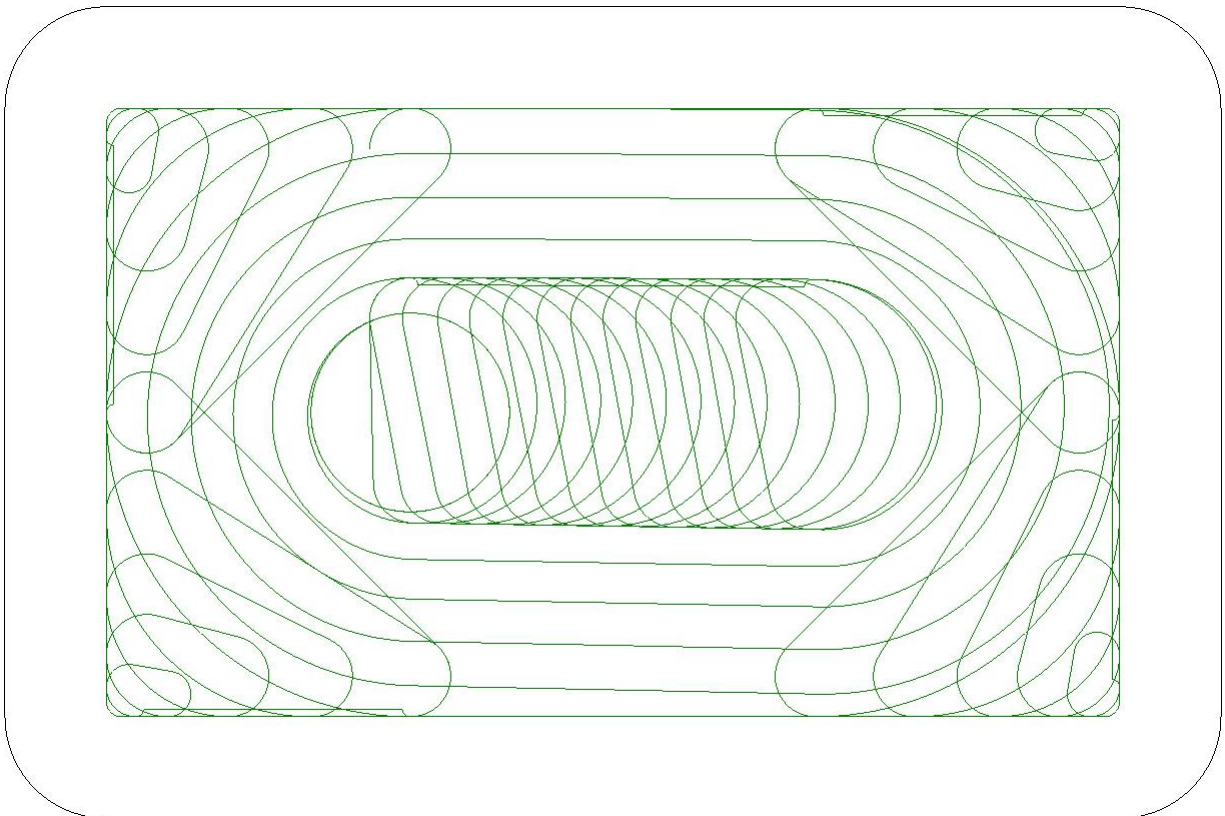
Hlavní udávané výhody [32,34,36]:

- zvýšení produktivity až 70 %,
- vyšší životnost nástroje,
- snadno naučitelný,
- automatické nastavení řezných parametrů,
- velmi dobré při obrábění tvrdých materiálů,
- dobrý výkon při použití malých nástrojů.

1.4.8 TrueMill

TrueMill je podle výrobce doplňkovou patentovanou funkcí systému. Je to další výkonná strategie pro produktivní hrubování. Opět se zde objevuje výhoda v podobě automatické kontroly úhlu styku nástroje s materiálem, tedy zejména aby nepřekročil limitní opásání nástroje [37,38].

Díky kontrole opásání se musí dráha v rozích na rozdíl od klasického obrábění upravit tak, že se zde vytvoří dráhy, které jsou v celkové délce větší než klasické obrábění. Mají však výhodu v menším zatížení nástroje. U strategie TrueMILL jsou tyto dráhy v rozích a problematických místech podobné jako trochoidní dráha a může také výrazně připomínat dráhu ze systému PowerMILL, zejména dráhy vygenerované při použití metody Vortex [37,38,39].



Obr. 20 Ukázka dráhy strategií TrueMill [39].

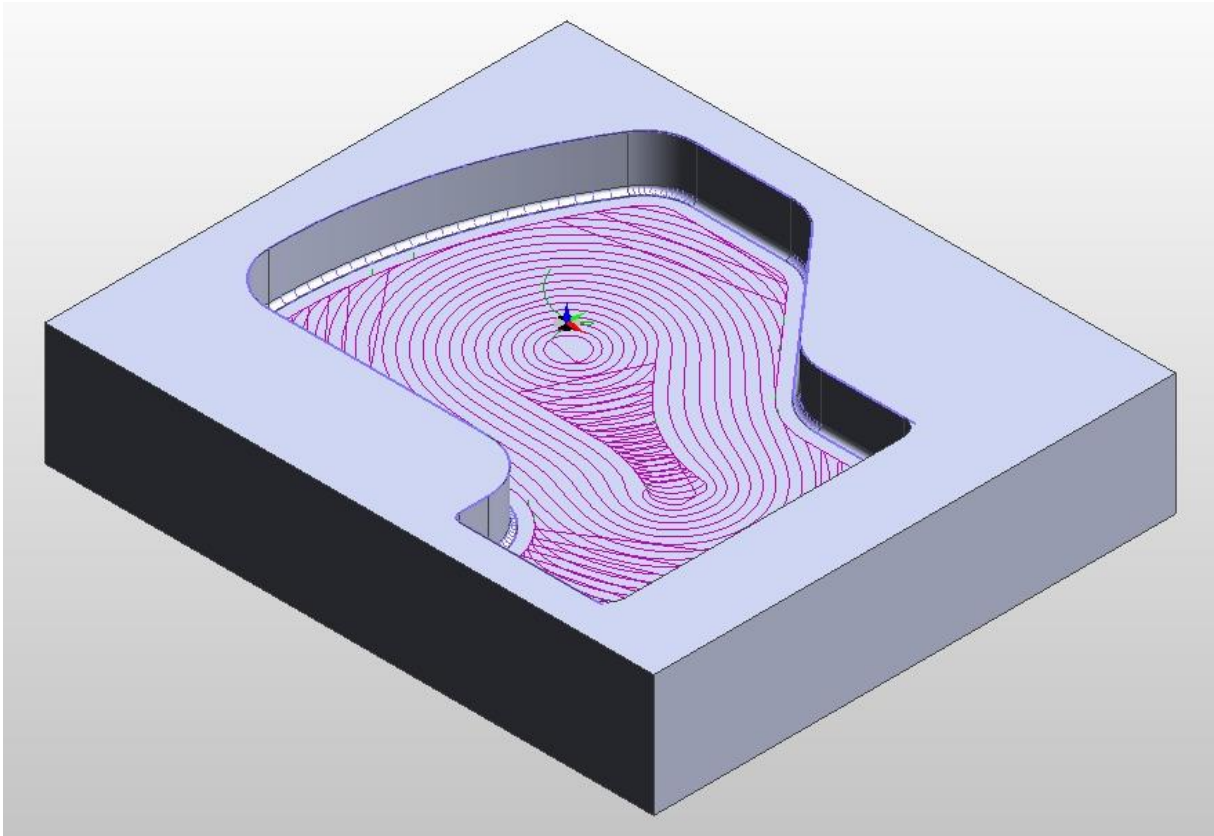
Vlivem těchto parametrů lze pomocí tohoto hrubovacího cyklu pracovat ve velkých hloubkách. Výsledkem je snížení strojního času až o 80 %. Dále se zvyšuje životnost nástroje až na desetinásobek, oproti klasickému obrábění [37,38,39].

Jak lze vidět na obr. 20, je tato strategie založena na konturovací strategii. Velká místa kapes, kde nehrozí přetížení nástroje, jsou obráběny na základě konturovací dráhy. Ovšem řeší také problematické místo jako je první nájezd do materiálu, kde konturovací dráha je spíše charakterizována jako drážkování, tedy opásání nástroje poměrně velké. Zde se však nástroj pohybuje po spirále a tím sníží riziko přetížení [39].

1.4.9 Waveform

Tato strategie se vyskytuje v programu EDGECAM, ale i v jiných. Hlavní myšlenkou této strategie je udržovat úhel opásání konstantní, aby nedocházelo v některých místech k nárůstu, a tím i k nárůstu zatěžování. To by mělo mít opět za následek razantní zvýšení životnosti nástroje. Také řezné podmínky díky úpravě těchto drah zůstanou v optimálních hodnotách [40,41].

Waveform klade důraz také na snížení množství vedlejších časů, tedy množství přejezdů a dalších pohybů, které se nepodílejí přímo na řezu materiálu. Díky tomu klesá množství přerušovaných řezů. To se týká zejména vnějších oblastí při frézování, ale lze ji i aplikovat na obrábění kapes [39,40,42].



Obr. 21 Ukázka dráhy strategií Waveform [39].

Při zavrtávání do materiálu, například u uzavřených kapes, využívá Waveform šroubové dráhy (viz. obr. 21). Nástroj se zavrtá do požadované hloubky, po dosažení tohoto rozměru nástroj obrábí materiál po spirálové dráze. To probíhá do doby, než dojde do kontaktu nástroje s některou z nejbližších stěn kapsy. Poté se dráhy upraví tak, aby dokázaly odstranit zbylé rohy a zároveň dodržely úhel opásání [41,42].

Strategie je vybavena systémem pro přejíždění nástroje během cyklu, které jsou nezávislé na nastavení rychloposuvu. V případě potřeby přejíždění vyhledá nejrychlejší metodu k dosažení dalšího bodu. Někdy nástroj zůstane v hloubce řezu, jindy se přesune do roviny rychloposuvu. Lze také nastavit malé nadzvednutí nástroje při pohybu během přejezdu, aby nedošlo k poškození obrobeného povrchu [39,40,41].

Vlivem obrábění nástrojem plnou hloubkou, místo opotřebení jen špičky, je u strategie Waveform velmi výhodné. Po úpravě parametru radiální hloubky řezu na nižší hodnotu se dosahuje konzistentních sil, ta pohodlně odvádí třísky z břitu. Ze

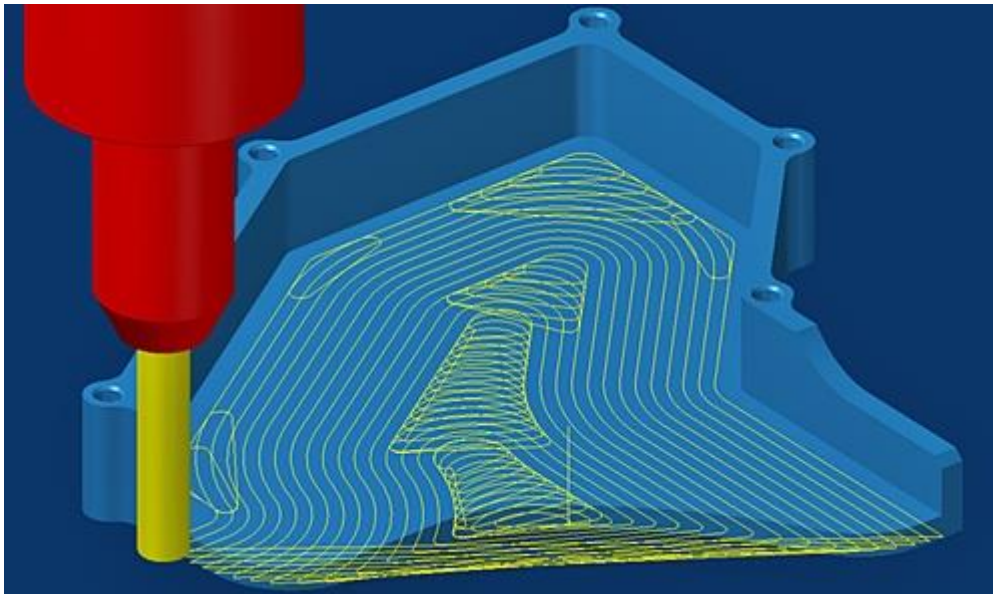
znalosti faktu, že třísky odvádí většinu tepla vzniklého při obrábění, se dosahuje vyšší životnosti nástroje [39,41,42].

1.4.10 VoluMill

Strategie pod názvem VoluMill vznikla pro program GibbsCam. VoluMill je možné využít i jako přídavný doplněk do systémů CAMWorks, CimatronE, ESPRIT, GibbsCAM, HyperMILL OPEN MIND, Mastercam, PTC, SIEMENS NX CAM a CAM Express, TopSolid, ale může být využíván i jako samostatný modul [43,44].

Tato vysoko produktivní metoda je určena k obrábění dutin, jáder a zbytkovému obrábění. Jedná se o univerzální způsob jak obrábět tvrdé i měkké materiály. Pracuje jak na vytvořených tělesech, plochách nebo drátěných modelech, ale i také na trojúhelníkových sítích a všemi jinými konstruovanými prvky jako ohraničení plotovaru i součásti [43,44].

Pomocí určitého algoritmu se generuje nativní, těčná a spojitá dráha. Draha je vysoce výkonná pro obrábění. Po vygenrování drah se dynamicky upravuje posuv a hloubka řezu. To umožní, aby bylo zabráněno překročení naprogramovanému množství odebírání materiálu [43,46].



Obr. 22 Ukázka dráhy strategií VoluMill [45].

Pomocí strategie VoluMill se zlepšuje návrat investic na servis a opravu obráběcích strojů. Dále pak klesají požadavky na nástroje, případně upínek a jiných přípravek. Tím je dosaženo efektivního využití strojů a zlepšuje produktivitu. To využijí podniky, které dbají na snížení ekonomických nákladů na výrobu [43,47].

VoluMill obsahuje algoritmus, který je efektivní se všemi styly obrábění (viz. obr.22). Dále jej lze velmi dobře využít u materiálu a obráběcích nástrojů, proto může operátor stroje nastavit optimální řezné podmínky, jako je řezná rychlost nebo posuv. Díky tomu algoritmu vznikne návrh podmínek, které lze zpracovávat paralelně, a tím se sníží výpočetní časů [43,47].

1.5 Možnosti frézování kapes pomocí řídicího systému cnc stroje

Moderní stroje, které patří mezi NC řízené stroje, jsou v základu vybaveny řídicím systémem. Díky němu se stroj chová podle požadovaných vlastností. Lze zde nastavit jednotlivé posuvy a jiné parametry, které řídí obráběcí proces. Jednotlivé stroje lze po patřičných úpravách osadit různými řídicími systémy. S výrobcem stroje lze domluvit, jaký řídicí systém zákazník bude chtít. Další možností je předělání stroje se stávajícím řídicím systémem na systém jiný, který může lépe vyhovovat zákazníkovi nebo jde například o modernizovaný systém [16].

Na trhu se nejčastěji vyskytují systémy od FANUC, HEIDENHAIN a Sinumerik. Tyto systémy jsou v základních funkcích a parametrech velmi podobné nebo lze říci, že stejné. Nastavení v podobě ISO/DIN kódu jsou u těchto programů podobné, liší se pouze označování jednotlivých funkcí. Například v systému Sinumerik a systému HEIDENHAIN se liší v popisu jednotlivých funkcí. U systému Sinumerik se většina pohybů popisuje pomocí G-kódu, naopak u systému HEIDENHAIN se tyto pohyby popisují jinak, například pro lineární pohyb písmenem L (viz. obr. 23) [16].

(MILLING CHAIN OFFSET)	/ MILLING CHAIN OFFSET
N13 G90 LL Z+2.5 FMAX	13 L Z+2.5 FMAX
N14 G01 Z-20. F27.	14 L Z-20 F27
N15 CC XC+100. YC-5.	15 CC X+100 Y-5
N16 G03 X+100. Y+0. DR+ F227.	16 C X+100 Y+0 DR+ F227
N17 G01 X+10.	17 L X+10
N18 G01 Y+80.	18 L Y+80
N19 G01 X+40.	19 L X+40
N20 CC XC+40. YC+70.	20 CC X+40 Y+70
N21 G02 X+50. Y+70. DR-	21 C X+50 Y+70 DR-
N22 G01 Y+60.	22 L Y+60
N23 CC XC+60. YC+60.	23 CC X+60 Y+60
N24 G03 X+60. Y+50. DR+	24 C X+60 Y+50 DR+
N25 G01 X+90.	25 L X+90
N26 CC XC+90. YC+40.	26 CC X+90 Y+40
	27 C X+100 Y+40 DR-
	28 L Y+0
	29 CC X+105 Y-0
	30 C X+105 Y-5 DR+
	31 L Z+2.5
	32 L Z+20 FMAX
	33 M05 M09
	34 L Z+0 FMAX M92
	35 L X+0 Y+10 FMAX M92
	36 M01
	/ TOOL COMMENT IS NOT FOUND
	37 TOOL CALL 22 Z S606
	38 L X+133.3294 Y+56.334 R0 FMAX M03
	39 L Z+20. FMAX M08

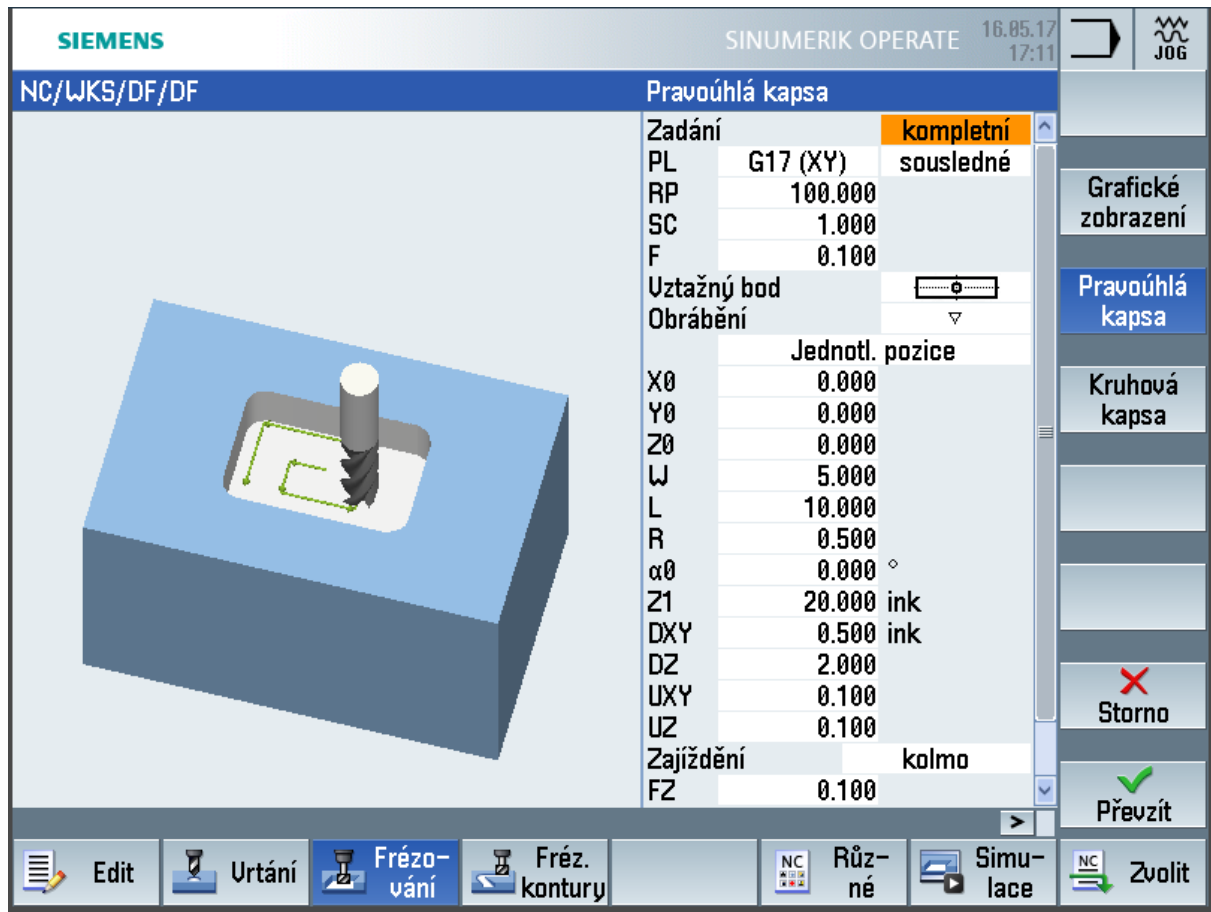
Obr. 23 Ukázka kódu Fanuc, a HEIDENHAIN [48].

Jako nedílnou součástí každého systému je i podpora předdefinovaných cyklů. Ty jsou nastaveny, aby zvládaly nejběžnější operace pro obrábění. Příkladem může být nastavení vrtání, či tvorby závitů, jak pro soustružení, tak i pro frézování. Po nastavení několika parametrů, které jsou důležité pro daný cyklus se vygeneruje podprogram, který šetří místo v celkové délce programu. Dále přináší výhodu ve zpětné úpravě těchto cyklů oproti dílenskému programování [16, 49].

Ačkoli vzhled jednotlivých programů je odlišný, důležitý je výsledek, a ten by měl být u všech řídicích systémů stejný. Někteří uživatelé jsou však spokojeni především se systémem Sinumerik, jako výhodu hodnotí velmi dobré zpracované manuály pro ovládání a tvorby cyklů.

1.5.1 Dílenské Programování kapes v Sinumerik 840D

Jednou z možností, jak kapsu vytvořit, NC kód je dílenské naprogramování. To je poměrně náročné, jak na zkušenosti obsluhy a její představitosti, tak i z pohledu časové náročnosti. Celý proces lze však vytvořit bez jakékoliv znalosti cyklů. K programu postačí znalost funkcí, které systém nabízí, jako je pohyb, rychloposuv a kruhová interpolace. U složitějších tvarů a větších hloubek je výsledný program poměrně dlouhý a přestává být přehledný. Kvůli nepřehlednosti se bude špatně upravovat a jiná osoba se ve výsledném programu nemusí vyznat [16].



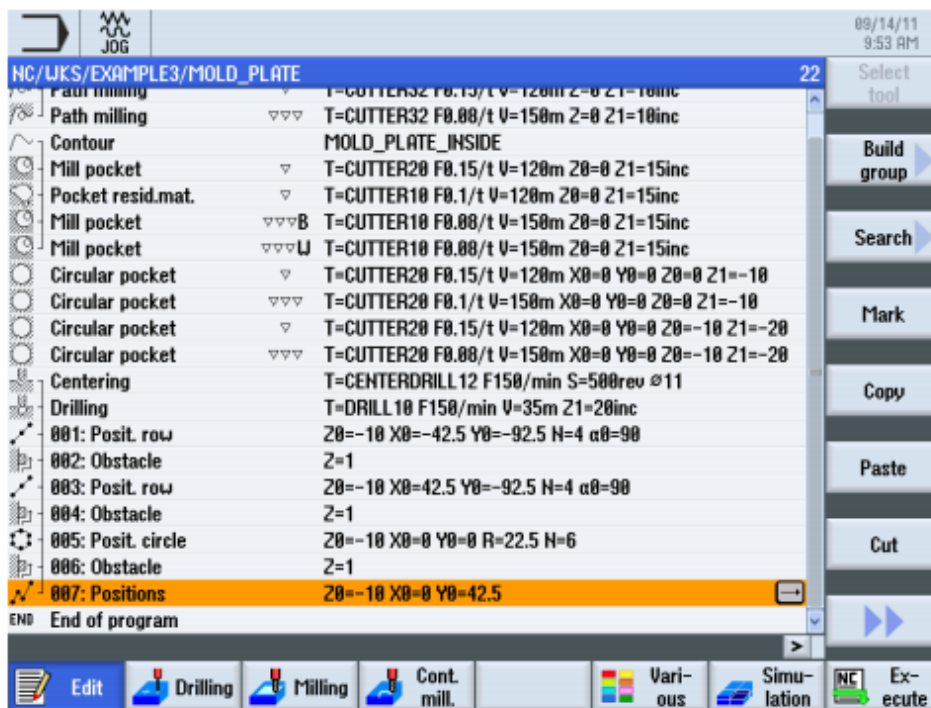
Obr. 24 Cyklus pro kapsy

Vytvoření kapsy pomocí cyklů (viz. obr. 24) je poměrně efektivní, po nastavení všech parametrů, které jsou uspořádané v přehledně v tabulce. Nastavují se zde parametry, jako je hloubka řezu a počet řezů. Jedním z prvních kroků je možnost nájezdu do dané kapsy, volí se například mezi zanořováním nebo po šroubové interpolaci. Dalšími parametry jsou i volby přídavek a další technologické veličiny důležité pro obrobení zadané kapsy. U každého parametru se zobrazí obrázek nebo simulace která přehledně vystihuje zadávané parametry.

1.5.2 ShopMill program

Jedním z dalších způsobů tvorby NC programu je v systému Sinumerik využití nadstavby pod názvem ShopMill. Jedná se o grafickou nastavbu, která je určena a vytvořena tak, aby byla přehledná, a i pro méně zkušeného uživatele použitelná.

Jako výhodu uvádí společnost Siemens úsporu času na zpracování, nevyskytují se zde cizojazyčné výrazy, které by se uživatel programu musel učit. Všechna potřebná okna se dají vyplnit prostým textem. Dále je zde optimální podpora v barevných obrázcích upřesňujících zadávaný parametr. Je zde možné vytvořit poměrně snadno pracovní postup, jak se má daná součást obrábět, jak je vidět na obrázku. Jednotlivé kroky jsou vázány v krocích, specifických pro daný tvar [49].



Obr. 25 ShopMill [49].

Při sestavování programu pro frézování kapsy se program příliš neliší od dílenského programování (viz. obr. 25). Vyplňují stejná okna a parametry pro výběr konkrétních kroků, jaké má stroj vykonat. Díky optimální podpoře zadávání technologických hodnot, jako je posuv na zub a řezná rychlost do přehledných tabulek, se uspoří čas a následně i zpětná editace pro program díky přehlednému řazení. Kdykoliv je možné přepínat mezi obrazovkou pro zadávání parametrů s obrázky a grafickým zobrazením [49].

V pracovním plánu s grafickou úpravou systému ShopMill je možné začlenit i příkazy DIN/ISO, což umožňuje programovat součást díky příkazům dle normy DIN/ISO 66025. Výhodou programu je vygenerování zbytkového obrábění, kdy je zbytkový materiál generován a rozpoznán automaticky, poté se zvolí nástroj s menším průměrem a systém obrobí zbytkový materiál [49,16].

1.5.3 Parametrické programování

Jedná se o dílenské programování, které se však od klasického zadávání poměrně výrazně liší. Zde se může zadávat základní funkce stejně jako u dílenského, ale využívá se zde zvolených parametrů, které jsou sestaveny v tabulkách. V integrované tabulce programů je možné nastavit až 1000 volitelných parametrů (viz. obr 26). Každý parametr může znamenat jinou hodnotu, některé na sebe mohou navazovat a být výsledkem, např. rozdílu různých parametrů [50].

R variables channel-specific	
R0	0
R1	0
R2	0
R3	0
R4	0
R5	0
R6	0
R7	0
R8	0
R9	0
R10	0
R11	0
R12	0
R13	0
R14	0
R15	0
R16	0
R17	0
R18	0
R19	0
R20	0
R21	0
R22	0
R23	0
R24	0
R25	0

Obr. 26 Zadání hodnot pro parametrické programování

Po načtení jednotlivých dat se program sestavuje pomocí funkcí. Lze tak sestavovat flexibilní programy. Jako součásti těchto programů bývá často matematický popis funkce, či jiných parametrů. Je tedy vhodné pro obrábění tvarově komplikovaných ploch, jako jsou parabolické tvary a jiné [16,50].

Součástí těchto programů jsou funkce, které určují s jakou pravidelností nebo do jakého rozměru se daný cyklus má opakovat. Jestliže program dosáhne například požadované hloubky, může se posunout o další z – hladinu níže až do dosažení maximálního nastaveného rozměru.

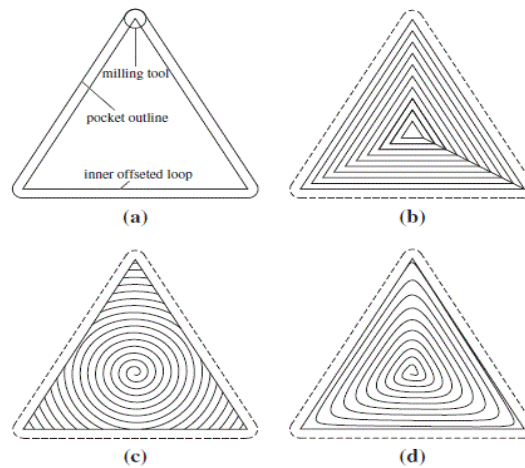
N10 G90 G54	;začátek NC programu
....	
N40 GOTOF SKOK_VPRED	;skok směrem ke konci NC programu
N50 SKOK_VZAD:	;cíl druhého skoku
N60 G0 X25 Z1	;rychluposuv
N70 M30	;konec NC programu
N80 SKOK_VPRED:	;cíl prvního skoku
N90 G1 X30 Z-5 F0.3	;lineární interpolace
....	
N100 GOTOB SKOK_VZAD	;skok směrem k začátku programu

Obr. 27 Ukázka parametrického programování [50].

Sestavení programů pomocí parametrických funkcí je poměrně náročné (viz. obr. 27), vyžaduje určitou zručnost a zkušenost operátora. Výsledkem je však plocha, která přesněji popisuje požadovaný tvar [50].

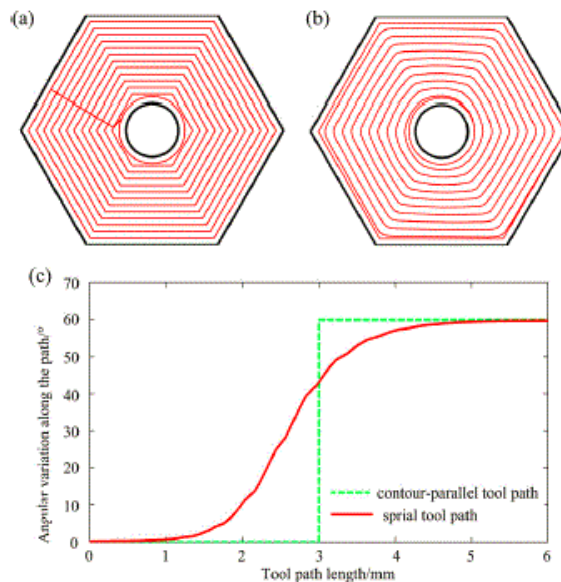
1.6 Další možnosti

Problematikou frézování kapes se zabývají lidé po celém světě, každý jej řeší z jiného pohledu. Firmy zabývající se vývoje CAM softwaru s ohledem na efektivitu, jak bylo ukázáno v předešlých kapitolách, tedy zejména snížení zatížení nástroje a dodržení uhlů opásání při obrábění [51].



Obr. 28 Vyhlazení přechodů [51].

Jednou dalších z možných úprav drah je plynulost a návaznost jednotlivých drah nástroje, respektive napojení lineárních částí. Na obr. 28 jsou zobrazeny rozdíly v jednotlivých metodách trajektorie. Zde se využilo návaznosti spojitosti C1 nebo C2, aby stroj nebyl zatěžován kvůli brzdění pohybu [51].



Obr. 29 Úprava dráhy vyhlazením [52].

K vytvoření drah mohou tedy sloužit i NURBS křivky (viz. obr. 29). Po takových úpravách jsou dráhy nepřerušované a nevzniká tak rázové zatížení stroje v některém směru. Jsou tedy vhodné pro produktivní obrábění, kde tyto změny směru působí problémy. Stroj musí na určitém místě zastavit a znovu z něj zrychlit opačným směrem [52].

2 SILOVÉ POMĚRY PŘI OBRÁBĚNÍ

Při frézování součásti dochází k zatěžování nástroje vlivem odebírání třísky. Hodnotí se zejména řezná síla F_c . Ta závisí na druhu odebíraného materiálu a tím i řezných podmínkách nastavených pro daný materiál. Při velkém zatížení nástroje může docházet i k průhybu nástroje. Tím se snižuje přesnost obrábění zejména v nejnižších polohách kapes. Tímto parametrem, který ovlivňuje daný proces průhybu je zejména vyložení nástroje.

2.1 Volba materiálu

Pro následný výpočet byl zvolen jako referenční materiál hliníková slitina s označením EN AW 6061. Hliník se ve většině případů používá ve formě slitin. Samotný čistý hliník se v praxi vyskytuje zcela výjimečně, kvůli svým mechanickým vlastnostem. Hliníkové slitiny se liší podle účelu zpracování, a to na slitiny, které byly tvářeny nebo odlévány. Mezi další vlastnosti ovlivňující vlastnosti dané slitiny je tepelné zpracování [53].

EN AW 6061 se jako hliníková slitina nejčastěji používá ve výrobě vysoce namáhaných konstrukcí. Další vlastností je velmi dobrá odolnost proti korozi. Jako materiál se používá nejčastěji na součástech pro nákladní automobily a námořnictví, dále ve vlcích, nábytku, části strojů, hydraulická ventilová tělesa, díly ventilů, součásti pojistek, ozubená kola, šnekové převodovky. Všeobecné použití této slitiny je u konstrukčních a vysokotlakém použití k výrobě potrubí. Chemické složení slitiny se také označuje jako AlMg1SiCu [53,54].

Tab. 1 Chemické vlastnosti hliníkové slitiny 6061 [54,55].

Prvek	Chemické. složení [%]	Prvek	Chemické. složení [%]	Prvek	Chemické. složení [%]
Al	95,8-98,6	Mg	0,8-1,2	Zn	Max 0,25
Cr	0,04-0,35	Mn	Max 0,15	ostatní	Max 0,15
Cu	0,15-0,4	Si	0,4-0,8		
Fe	Max 0,7	Ti	Max 0,15		

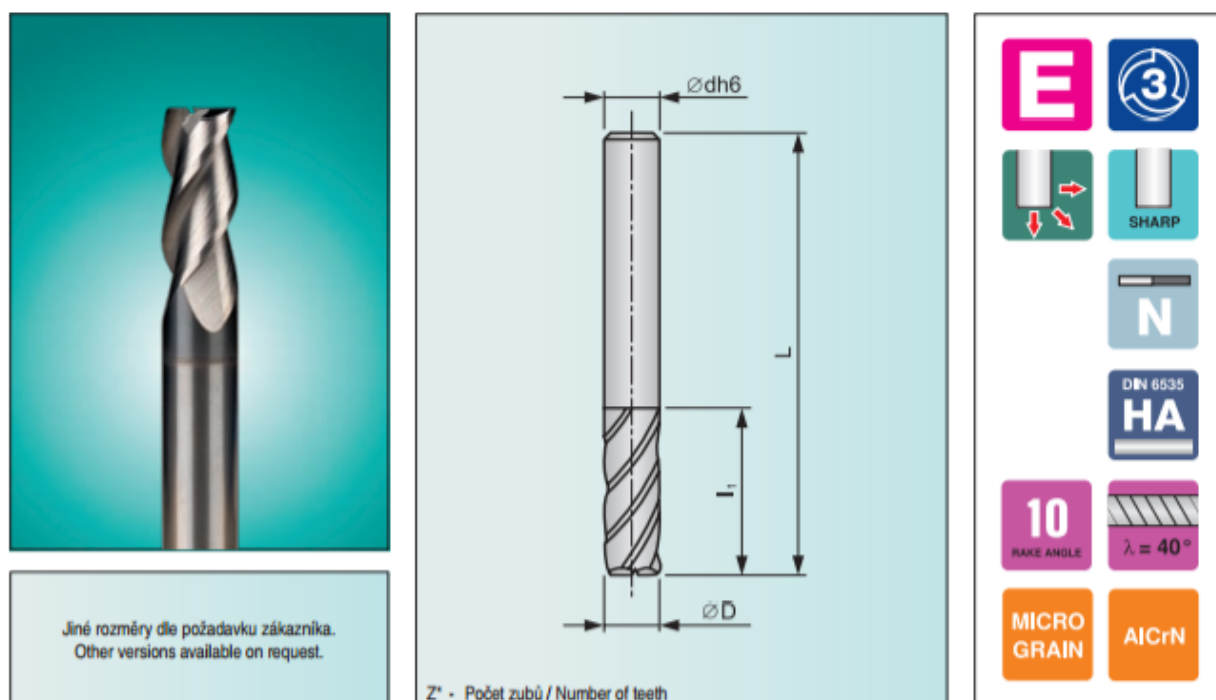
Tab. 2 Mechanické vlastnosti slitiny 6061 [54,55].

Mez pevnosti R_m [MPa]	Mez kluzu $R_p 0,2$ [MPa]	Tažnost A_5 [%]	Youngův modul pružnosti E [GPa]	Hustota ρ [g/cm ³]	Tvrdość HB
310	276	9	69	2,70	95

Slitina byla tepelně ošetřena, což lze vyčíst z označení. U této slitiny je to značení AW 6061 T651. Toto označení tepelného zpracování T651 má základní charakter takový, že slitina byla vytvrzena umělým stárnutím, a to vede ke zlepšení mechanických vlastností [55].

2.2 Volba nástroje

S ohledem na volbu materiálu byl vybrán i nástroj. Jedná se o stopkovou frézu určenou pro frézování hliníku s označením E3S N SUMA (viz. obr. 30), dodávaný firmou Pramet. Jedná se o řadu monolitních karbidových fréz z HSS pro všeobecné obrábění. Tento nástroj zajišťuje flexibilitu, rychlost a nízké náklady. Tento nástroj je v řezné části kratší než nástroj původně navrhovaný. Toto kratší vyložení nástroje zajišťuje lepší tuhost frézy a díky tomu i menší vliv k vibracím. Při správně definované dráze nabízí nástroj v kombinaci s konstantním úhlem záběru velmi dobrý výkon [56].



Obr. 30 Zvolený nástroj [56].

Kódové označení nástroje je 12E3S75-25A12 SUMA tomu odpovídají rozměry nástroje.

Rozměry zvoleného nástroje [56]:

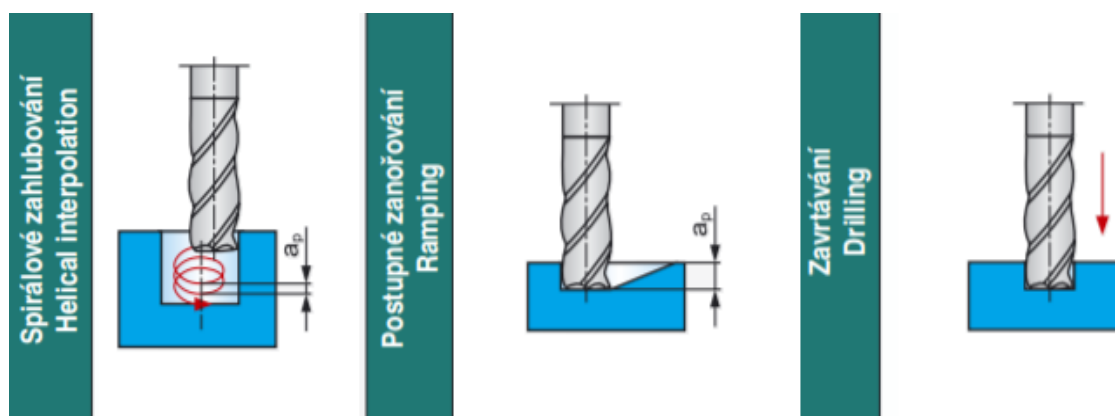
- průměr nástroje $D = 12$ mm,
- délka řezné části $l_1 = 25$ mm,
- celková délka nástroje $L = 75$ mm,
- průměr stopky $dh_6 = 12$ mm,
- počet břitů $z = 3$,
- nastavení úhlu čela $\gamma_o = 10^\circ$,
- stoupání šroubovice $\lambda = 40^\circ$,
- povlak nástroje AlCrN.

Volba řezných podmínek je provedena na základě volby materiálu, který je označován 6061 nebo AlMg1SiCu. Tomu materiálu přiřadila firma Pramet označení materiálu N. To je standartní označení pro neželezné materiály. Pro tuto skupinu odpovídají následující řezné podmínky (viz. tab. 3)[56].

Tab. 3 Zvolené řezné podmínky [56].

Posuv na zub f_z [mm/zub]	Řezná rychlost v_c [m / min]	Boční úběr a_e [mm]	Hloubka záběru a_p [mm]
0,07	250	4,5	12

Pro tento nástroj je také důležité rozdělení břitů, které podle výrobce není pravidelné, to by podle zkušeností výrobce mělo zabránit vibracím. Dále pak je uvedeno, že břity jsou přes střed nástroje, kvůli tomuto faktu je nástroj vhodný pro zavrtání do materiálu (viz. obr. 31). Kvůli nemožnosti nástroje se zavrtat do obrobku je nutné zvolit náhradní strategie, těmi jsou strategie zafrézování a šroubová interpolace. Pro tyto jsou výrobcem doporučené hodnoty [56,57].



Obr. 31 Nájezd do materiálu [57].

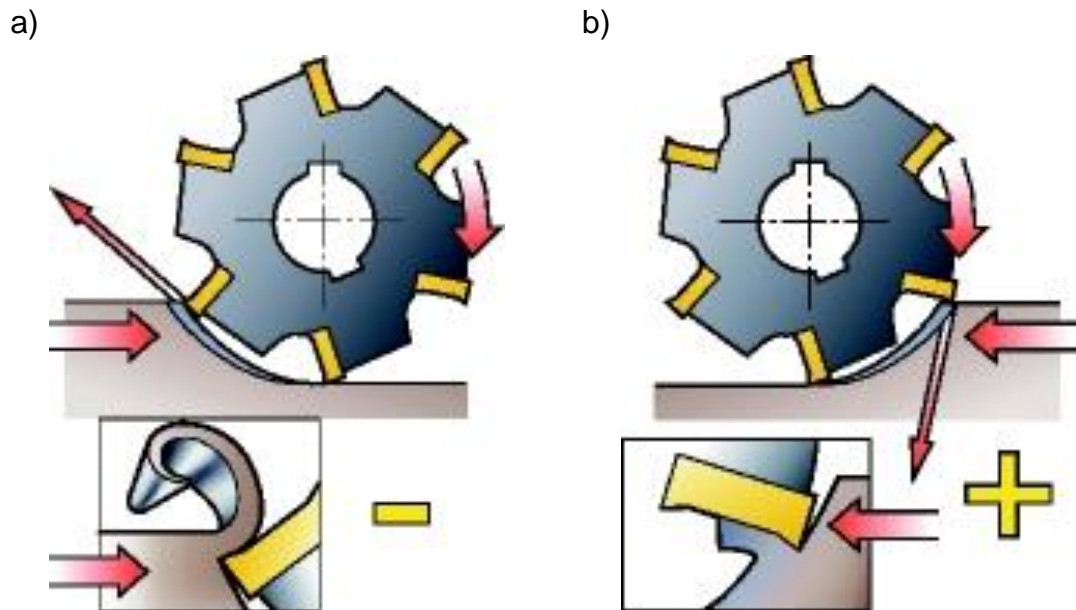
2.3 Kinematika obrábění

Z hlediska kinematiky obráběcího procesu se rozlišují dva základní způsoby: sousledné (sousměrné) a nesousledné (protisměrné) frézování.

Nesousledné frézování (viz. obr. 32 a) nastává tehdy, když je smysl rotace nástroje proti směru posuvu obrobku. Tento proces je charakteristický měnící se tloušťkou odebírané třísky, ta je při začátku procesu nulová a postupně roste do maximální. Tříska je při nulové tloušťky, ale až za určitých podmínek, to jsou dosažení určitého skluzu [2,58,59].

Výhody nesousledného frézování [2,54]:

- Trvanlivost nástroje je nezávislá na stavu povrchu (písčítý, okuje).
- Záběr zubů nástroje je nezávislý na hloubce řezu při vřezávání.
- Jsou zde menší namáhání šroubů a matic.



Obr. 32 Hlediska kinematiky [60], a) nesousledné b) sousledné.

Sousledné frézování (viz. obr. 32 b) je opačný proces na rozdíl od nesousledného. Zde je smysl rotace nástroje ve směru posuvu obrobku. Dále se liší v začátku procesu je tříška maximální a dokončuje se v nulové hodnotě. Síly řezné působí obvykle směrem dolů, na rozdíl od nesousledného, kde síly obvykle směřují nahoru a mají tendenci vytahovat obrobek [2,59,60].

Výhody sousledného frézování [2,58,59]:

- není třeba velkého řezného výkonu,
- proces nezpůsobuje takové chvění,
- lepší povrch obrobeneé plochy (lepší drsnost)
- netvoří se tak často nárůstek,
- řezné síly směřují dolů a tím tlačí na obrobek, díky tomu lze použít snadnější upínání,
- hlavní výhodou je zvýšená trvanlivost břitů, díky tomu lze použít vyšší řezné rychlosti.

2.4 Výpočet základních parametrů

Ve většině případů frézování se uplatňuje frézování sousledné. Při frézování se často využívá vzorců pro výpočet parametrů, ze kterých lze vyčíst, zda při dané operaci na zvoleném stroji lze obrábět, nebo bude potřeba zvolit jiné podmínky pro dosažení parametrů (přesnost, drsnost). Zde jsou uvedeny základní vzorce, které byly použity pro výpočet potřebných parametrů důležitých pro výpočet řezných sil a řezného výkonu. Dosazované parametry odpovídají zvoleným řezným podmínkám pro materiál EN 6061 a pro nástroj o průměru 12 mm [2,58,59].

Výpočet otáček nástroje [2,59,60].

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

$$n = \frac{1000 \cdot 250}{\pi \cdot 12} = 6631,5 \text{ min}^{-1}$$

kde:

- v_c ...řezná rychlost [m.mm⁻¹]
- D ...průměr nástroje [mm]
- n ...otáčky nástroje [min⁻¹]

Výpočet posuvu na otáčku [2].

$$f_n = f_z \cdot z_n \text{ [mm]} \quad (2)$$

$$f_n = 0,07 \cdot 3 = 0,21 \text{ mm}$$

kde:

- f_n ...posuv na otáčku [mm]
- f_z ...posuv na zub [mm]
- z_n ...počet zubů [-]

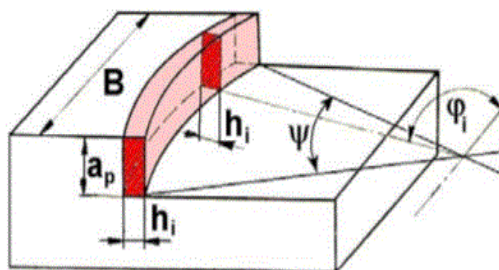
Posuvová rychlost [2,59].

$$v_f = f_n \cdot n = f_z \cdot z \cdot n \text{ [mm.min}^{-1}\text{]} \quad (3)$$

$$v_f = 0,21 \cdot 3 \cdot 6631,5 = 1392,6 \text{ mm.min}^{-1}$$

kde:

- v_f ...posuvová rychlost [mm.min⁻¹]



Obr. 33 Průřez třísky při čelním frézování [54].

U těchto kapes se v převážné většině případu uplatní je frézování stopkovou frézou, kdy se osa nástroje pohybuje kolmo k obráběnému povrchu (viz. obr. 33). Pro válcové frézování se uplatňují poněkud jiné vzorce. Hodnota posuvného úhlu se liší v závislosti na pohybu nástroje a hodnota nastavení hlavního úhlu závisí na konkrétním nástroji (45°, 90° a jiné). V tomto případě se jedná o čelní frézování, kdy radiální hloubky řezu jsou menší než poloměr nástroje. Ze zvolených parametrů je hodnota radiální hloubka $a_e = 4,5$ mm a tomu odpovídá úhel úběru $\varphi = 75,5^\circ$. Zde uvedený výpočet odpovídá pouze pro frézování na lineární dráze, kde se nemění průřez. Tyto vzorce však byly použity pro následný výpočet průběhu zatížení u nájezdu do rohu, kde se výrazně mění úhel opásání. Poté i pro strategie trochoidní a Vortex, kde také není průřez konstantní.

Jmenovitá tloušťka třísky pro čelní frézování [2,59].

$$h_i = f(\varphi_i) = f_z \cdot \sin \varphi_i \cdot \sin \kappa_r \quad [\text{mm}] \quad (4)$$

$$h_i = 0,07 \cdot \sin 75,5 \cdot \sin 90 = 0,0677 \text{ mm}$$

kde:

- φ_i ...úhel posuvového pohybu [°]
- κ_r ...úhel nastavení hlavního ostří [°]

Jmenovitá šířka třísky [2,59].

$$b_D = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \quad [\text{mm}] \quad (5)$$

$$b_D = \frac{12}{\sin 90} = 12 \text{ mm}$$

kde:

- a_p ...axiální šířka záběru ostří [mm]
- b_D ...jmenovitá šířka třísky [mm]

Při nastavení $\kappa_r = 90^\circ$ bude jmenovitý průřez třísky [2,59].

$$A_{Di} = b \cdot h_i = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \quad [\text{mm}^2] \quad (6)$$

$$A_{Di} = 12 \cdot 0,07 \cdot \sin 75,5 = 0,813 \text{ mm}^2$$

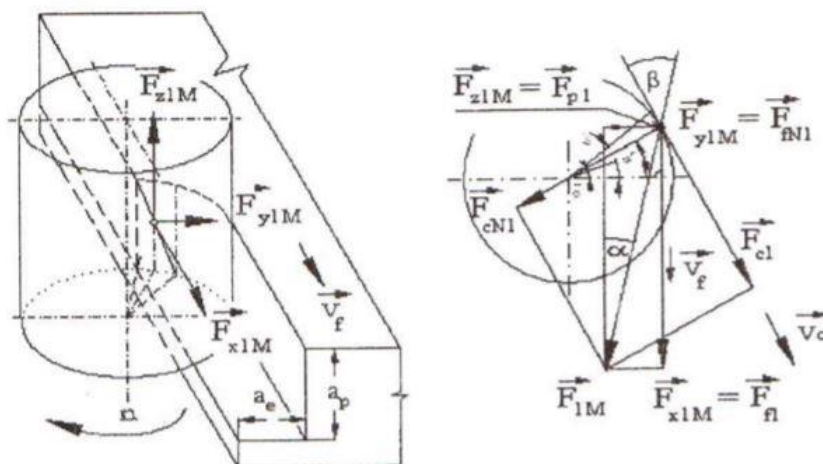
kde:

- A_{Di} ...jmenovitý průřez třísky [mm²]

2.5 Výpočet řezné síly

Při frézování vznikají síly, které výrazně ovlivňují jak samotné obrábění, tak i životnost nástroje a i stroje. Velikost sil závisí především na úhlu záběru φ , který svírá nástroj s obrobkem k jednomu břitu. Součtem sil, které působí na jednotlivé zuby, lze určit silové poměry v jednotlivých krocích, například, když bude v záběru maximální počet zubů nebo minimální. Tyto výkyvy sil posléze budou způsobovat vibrace, které mají špatný vliv na frézování [2].

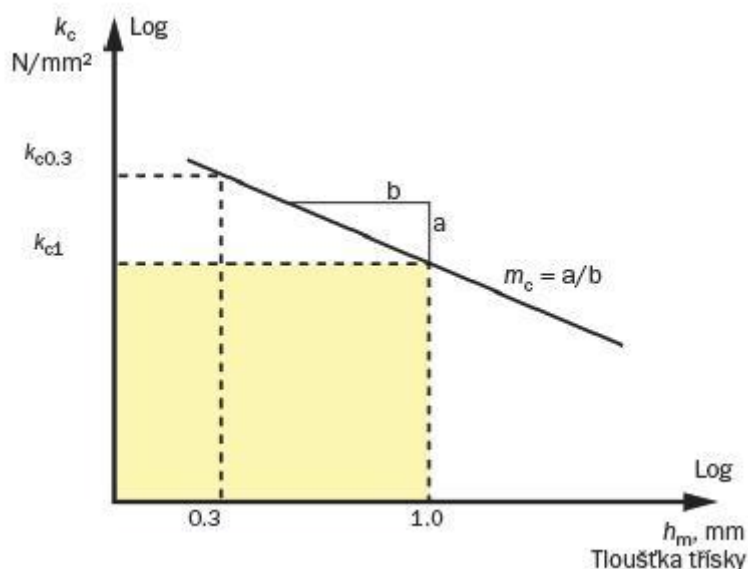
Po výpočtu působící na jeden břit se výslednice rozkládá do několika směrů. Obvykle se rozloží na sílu řeznou, posuvovou a pasivní (viz. obr. 34). Posuvová síla F_f působí ve směru pohybu a řezná síla F_c je tečná k rotaci nástroje [2,59].



Obr. 34 Průběh sil u čelního frézování válcovou frézou [59].

Výpočet hodnot je nutné přepočítat na aktuální hodnoty, zejména měrnou řeznou sílu. Ta hraje velkou roli při určování potřebného výkonu, a té je nutné pro výpočet řezných sil. Jde o parametr, který udává hodnotu obrobitelnosti určitého materiálu při různé geometrii břitu a tloušťky třísky. Měrná řezná síla je parametr, který označuje sílu potřebnou k odebrání materiálu o průřezu 1 mm^2 [61].

Při použití břitových destiček je také důležité volit dostatečně vhodná efektivní úhel čela. Se stoupajícím kladným úhlem čela klesá hodnota měrné řezné síly. K tomu slouží převodové tabulky, kde jsou uvedeny korelační faktory [61, 59].



Obr. 35 Závislost měrné řezné síly na jmenovité tloušťce třísky [61].

Udávané hodnoty měrné řezné síly jsou obvykle u frézování udávány pro tloušťku třísky $0,2 \text{ mm}$. Tento graf (obr. 35) ukazuje změnu tohoto parametru, kde se zvětšující se tloušťkou třísky klesá jeho hodnota. A to platí i pro opačný případ, kde menší průřez způsobí nárůst měrné řezné síly [59, 61].

Pro výpočet je tedy nutné znát vlastnosti materiálu. Pro něj byla zvolena hodnota $k_{c1} = 650 \text{ N.mm}^{-2}$. Ta byla vyčtena z tabulek, které uvádí firma Sandvik-Coromant [62].

Pro hliníkové slitiny je zde uvedeno několik hodnot. Z tabulek lze vyčíst, že hodnota zvolená odpovídá materiálu, který byl tepelně vytvrzený. Tato hodnota byla dosazena do následujícího vztahu. Hodnota nastavení úhlu čela je stanovena na základě parametrů nástroje [58].

Vztah pro výpočet k_c [58,61].

$$k_c = k_{c1} \cdot h_m^{-m_c} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_o}{100}\right) [\text{N.mm}^{-2}] \quad (7)$$

$$k_c = 650 \cdot 0,0677^{-0,25} \cdot \left(1 - \frac{10}{100}\right) = 1146,56 \text{ N.mm}^{-2}$$

kde:

- k_c ...skutečná měrná řezná síla [N.mm⁻²]
- k_{c1} ...měrná řezná síla [N.mm⁻²]
- m_c ...exponet [-]
- γ_o ...jmenovitý průřez třísky [°]

Při simulaci byl ukázán pouze výsledek ve formě řezného výkonu, který byl však v obou případech, sousledného a nesousledného frézování, stejně veliký.

Řezný výkon P_c při čelním frézování [2,59].

$$P_c = \frac{ae \cdot ap \cdot vf \cdot k_c}{6 \cdot 10^7} [\text{kW}] \quad (8)$$

$$P_c = \frac{4,5 \cdot 12 \cdot 1392,6 \cdot 1146,56}{6 \cdot 10^7} = 1,437 \text{ kW}$$

kde:

- P_c ...řezný výkon [N.mm⁻²]
- ap ...axiální šířka záběru ostří [mm]
- vf ...posuvová rychlost [mm.min⁻¹]
- ae ...radiální šířka záběru ostří

Řezná síla F_c se odvodí z rovnice (8) [2,16].

$$P_c = F_c \cdot v_c [\text{kW}] \quad (9)$$

$$F_c = \frac{P_c}{v_c} [\text{N}] \quad (10)$$

$$F_c = \frac{1,437 \cdot 1000 \cdot 60}{250} = 344,888 \text{ N}$$

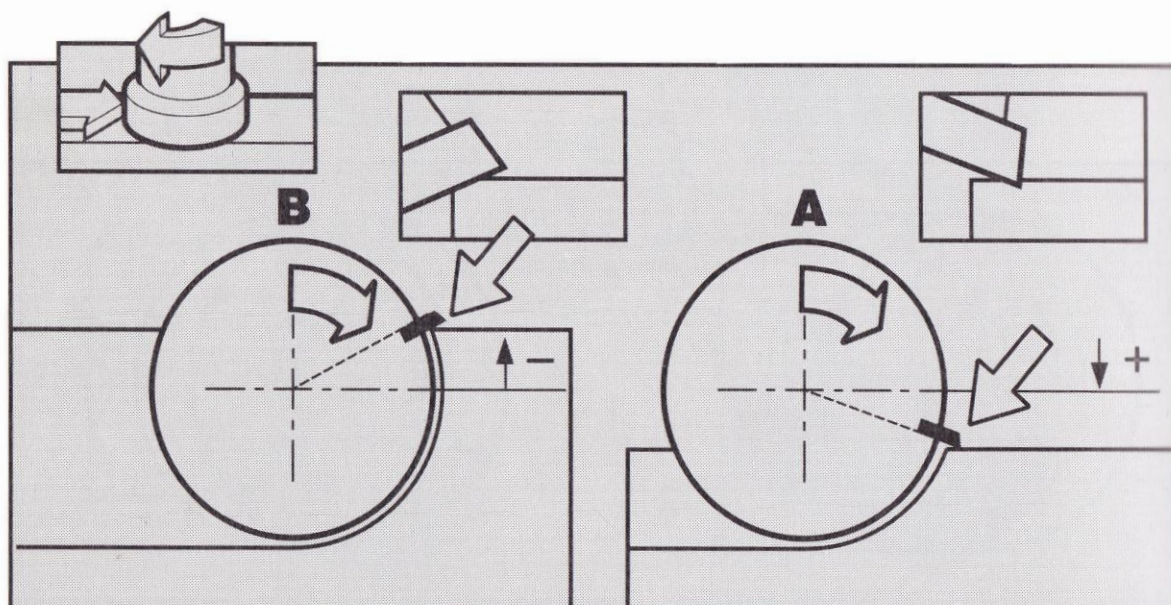
kde:

- P_c ...řezný výkon [N.mm⁻²]
- F_c ...tangenciální řezná síla [N]
- v_c ...řezná rychlost [mm.min⁻¹]

Při sousledném frézování, jako i u nesousledného, ovlivňuje řezné síly i otupení břítu. U zcela nového ostří, kde není měřitelné otupení, má nástroj jiné chování než po prvních operacích, tento nový nástroj má tendenci se do materiálu zarávat, a tím odebrat větší množství materiálu, než bylo stanoveno. To vede i k vibracím a dalším negativním vlivům. Tyto však po určitém čase zmizí a nástroj pracuje s určitou časovou rezervou ve stanovených podmínkách. S rostoucím časem, kdy je nástroj v řezu, roste i otupení nástroje. Následně s rostoucím otupením rostou i potřebné síly pro oddělování jednotlivých třísek [13].

Na tomto obr. 36 je ukázáno, jak u sousledného obrábění ovlivňuje velikost radiálního řezu rázové zatížení, a tím i spojené otupení ostří. Na obrázku (A) je vidět, že nástroj odpovídá zvolené variantě obrábění, a to je případ, kdy je radiální hloubka menší než průměr nástroje. Zde dochází k rázovému zatížení, jelikož ke kontaktu dochází v krajní a nejzranitelnější poloze nástroje, tedy na špičce ostří. To ale ovlivňuje také nastavení uhlů nástroje, je tedy možné že při variantě A při určitém nastavení nedojde k prvnímu kontaktu v místě ostří [13].

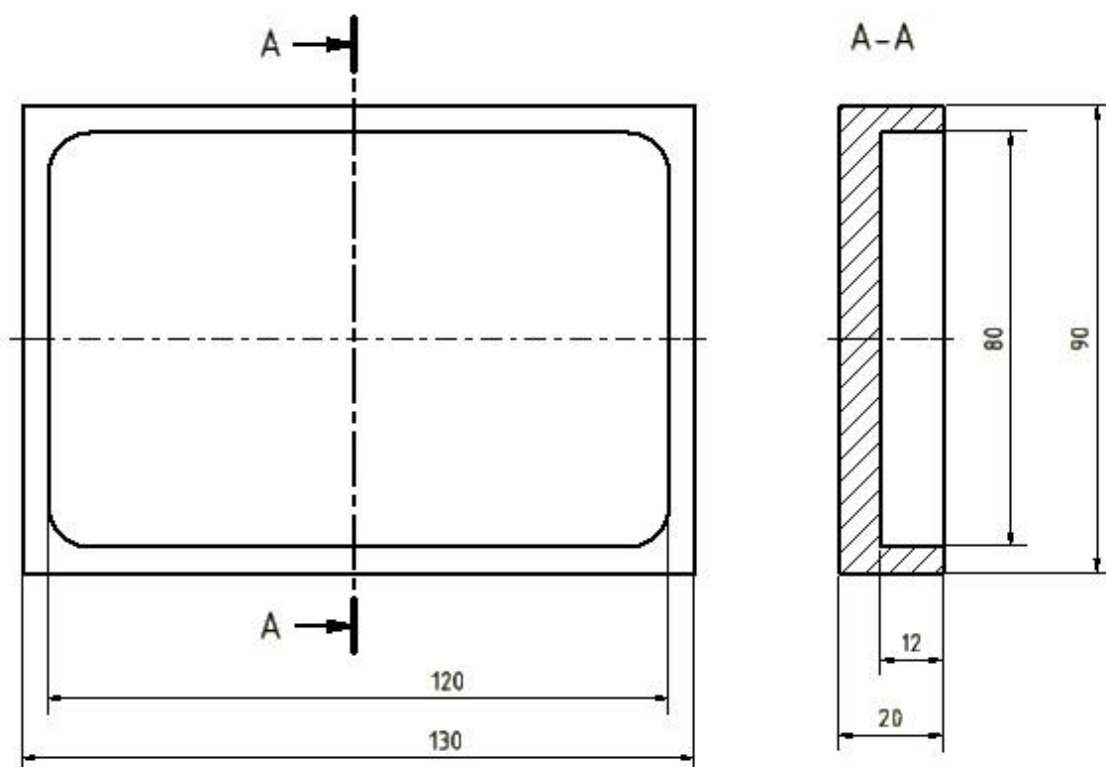
U druhé varianty sousledného frézování (B), dojde k prvnímu kontaktu břítu v delší vzdálenosti od ostří. V tomto místě má břitová destička větší pevnost, a není tedy tak zatěžována jako u předchozí variantě. Stejně podmínky jako pro břitové destičky platí také pro monolitní nástroje, zejména ty, které nemají zuby ve šroubovici. Avšak tento případ nemusí být vždy výhodný, zejména v případě, kdy břit vyjíždí ze záběru v rovině osy frézy, snižuje se podstatně celková velikost trvanlivosti ostří [13].



Obr. 36 Poloha a průměr frézovací hlavy ovlivňují záběr břítu [13].

2.6 Výchozí parametry kapsy

Kvůli porovnání různých strategií byla zvolena součást tvaru elementární kapsy o daných rozměrech (viz. obr. 37). Rozměry byly stanoveny kvůli přehlednosti dostatečně velké, aby bylo přehledně vidět jakým způsobem probíhá dráha pro jednotlivé strategie. Hloubka této kapsy je 12 mm, tento rozměr je zvolen tak aby se plně využila délka nástroje, která byla stanovená při volbě nástroje, při větší hloubce se dráhy překrývaly. Kvůli překrývání drah se zmenšila přehlednost. Dalším důležitým rozměrem je rádius v rohu dané kapsy. Ten byl zvolen jako krajní hodnota, pro kterou je možné zvolit nástroj o průměru 12 mm, proto má rádius rozměr 8 mm. Při tomto rozměru nebude strategie potřebovat pro hrubování zbytkové obrábění, a také se v tomto místě nebude nástroj pohybovat pouze po kolmých drahách, které zvětšují zatěžování nástroje.



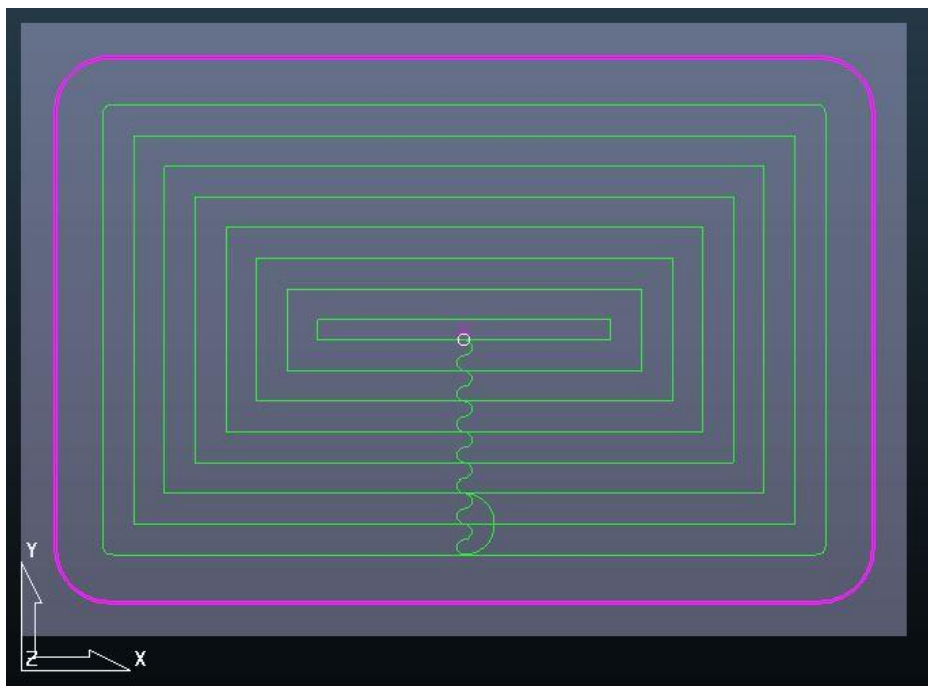
Obr. 37 Náčrt rozměrů zvolené kapsy.

Na základě požadavku pro obrábění této součásti v programu PowerMILL 2017 bylo vygenerováno několik drah, které jsou vhodné pro opracování zadané kapsy. Při dodržení zvolených parametrů, jako řezná rychlost a posuv, které byly vyčteny výše (tab. 3), ale také přídavek na opracování. Tento byl zvolen na základě konzultace několika obráběčů kovů, jež se opracováním hliníku a jeho slitin živí, byl stanoven na hodnotu 0,3 mm.

Takto vytvořené dráhy se podstatně lišily, hlavním kritériem pro hodnocení byl celkový čas, který jednotlivé strategie potřebují pro opracování zadané kapsy. Zde vycházela nejlépe konturovací strategie, při zadání stejných parametrů pro všechny strategie. To však nebyla příliš vypovídající hodnota, jelikož mezi tyto strategie byla začleněna i strategie Vortex a konturovací strategie s trochoidní dráhou, kde se mění hodnoty úběru třísky a řezná rychlost, protože patří mezi vysokorychlostní strategie. Jsou tedy k porovnání nevhodné ve výchozím stavu.

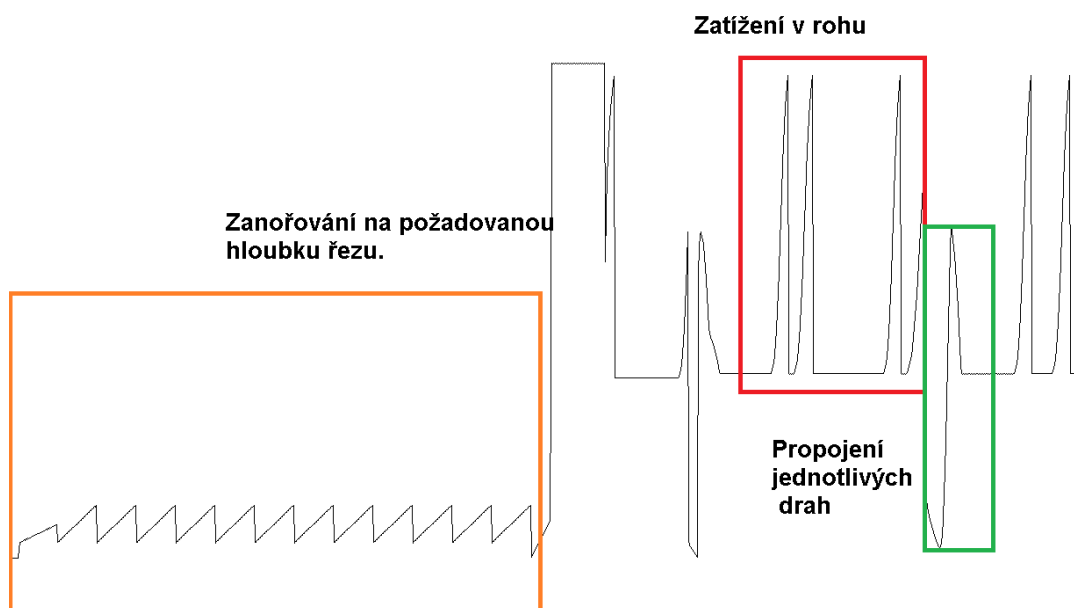
Ty jsou však založeny na vyšších rychlostech, a také na zamezení přetížení nástroje při obrábění, kdy strategie Vortex garantuje, že úhel záběru nepřesáhne úhel, jenž je stanovený pro lineární dráhu, jak už bylo zmíněno. Dále pro strategii vysokorychlostního obrábění, která je stejná jako klasická konturovací strategie ale obohacena o trochoidní dráhu v problematických místech. Tato místa jsou zpravidla místa, kde se má zvedat úhel záběru, a tím se zvětšovat zatížení nástroje, jako jsou místa rohů v kapse a také první nájezdová dráha, kdy nástroj při standardní dráze jede zprvu plným průměrem. Tyto strategie zde vytvoří křivky, které jsou tvaru c nebo kruhové, a tím zamezí přetěžování, ale jedná se prodloužení, a tedy celková dráha a také jsou delší než u standardní technologie [9].

Kvůli tomuto faktu, byly dráhy prověřeny v rámci simulace zatížení. Pro srovnání byly vybrány dráhy konturování, konturování s trochoidní drahou a Vortex. Jako první je zde uvedena celá dráha konturovací (viz. obr. 38) a výřez ze zátěžového diagramu (viz. obr. 39). Tento diagram byl získán z programu FeatureCAM, který umožňuje při nastavení simulace vykreslovat také zatížení nástroje při obrábění. Tento diagram ze simulace však slouží pouze jako ukázka a není možné jej podrobněji analyzovat, jelikož se nedalo podrobně sledovat průběh dat, které tento program vygeneroval.



Obr. 38 Výchozí neupravená konturovací dráha.

Z těchto dat, které poskytl program FeatureCAM je vidět, že při vygenerované a neupravené dráze dochází v průběhu obrábění v několika místech k prudkým nárůstům potřebného výkonu pro obrábění, tedy jinak řečeno k většímu zatížení. Po sledování, kde k těmto výkyvům dochází, bylo zjištěno, že se jedná zejména o obrábění rohů kapsy a také k přejezdům mezi jednotlivými konturovacími drahami. První část zobrazené na obr. 39 je vidět i nájezd do kapsy, který je provedený postupným zanořováním „cik cak“.



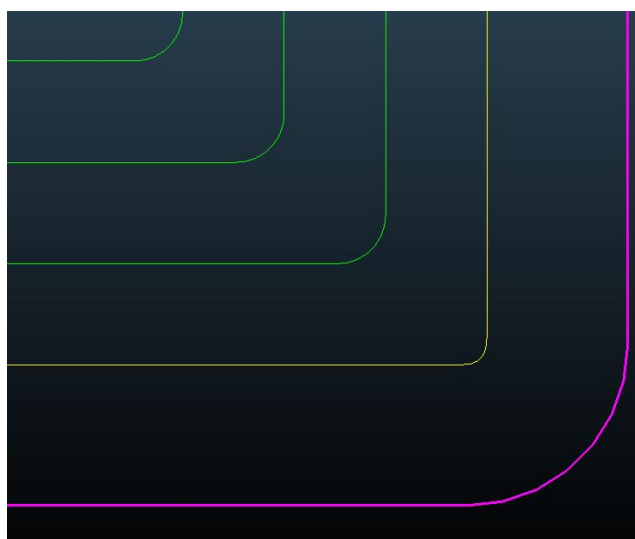
Obr. 39 Výstup ze simulace pro neupravenou konturovací dráhu.

2.7 Zatížení v rohu kapsy pro vytvořené dráhy

Jak z předchozí podkapitoly vyplývá, že nejproblematičtějšími místy obrábění jsou rohy kapsy. Proto v následných podkapitolách je stručný rozbor průběhu zatížení při obrábění různými strategiemi obrábění. Pro přehlednost je zde uvedena vždy simulace a následně průběh zatížení v grafu, který byl stanoven na základě výpočtu. Pro provedení výpočtu bylo nutné znát hodnoty pro následný výpočet, těmito hodnotami byly radiální hloubka a úhel opášení. Ty byly stanoveny na základě překreslení drah do programu Inventor. Zde se po určitých krocích nástroj pohyboval po překreslených drahách a byly změřené potřebné hodnoty.

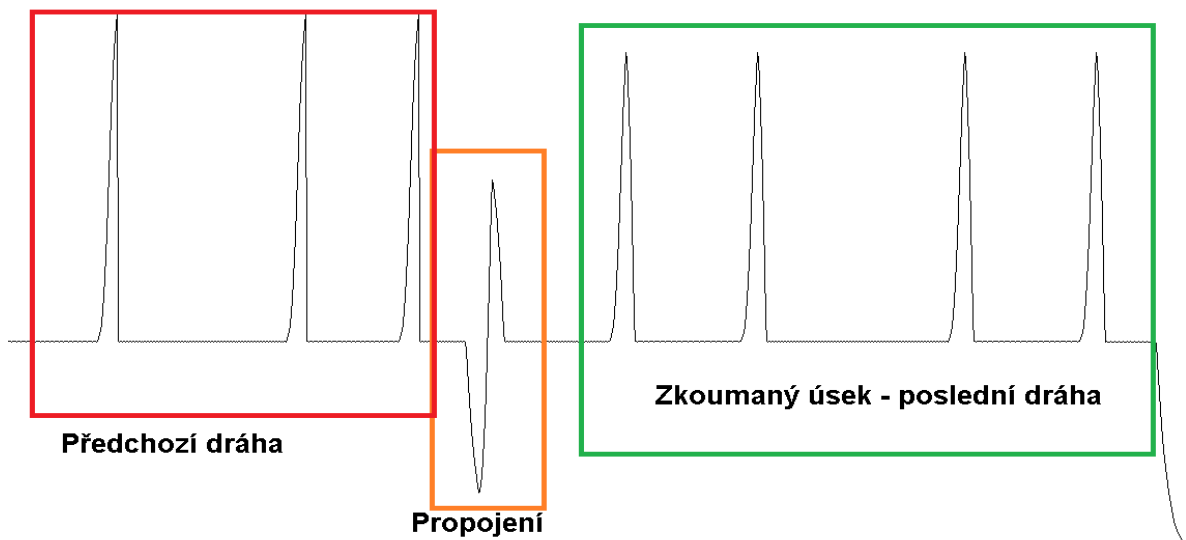
2.7.1 Konturovací dráha

Jak už bylo řečeno, u ní se vyskytuje několik problematických míst. Zde je ukázáno a vypočteno, jaký průběh má zatížení nástroje řeznými silami při obrábění rohu. Jedná se o výpočet v krajní poloze, kdy nástroj kopíruje výsledný tvar požadované kapsy a je zároveň dodržen přídavek.



Obr. 40 Konturovací dráha.

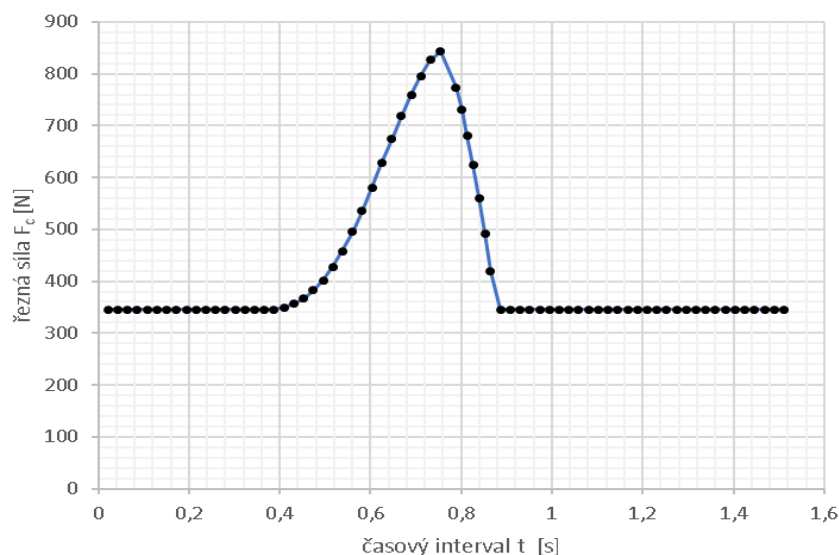
Tato dráha je typická tím, že kopíruje již zmiňovaný tvar u předchozích drah lze nastavit vyhlazení a tím snížit zatížení nástroje. Pro dráhu zvýrazněnou žlutě (obr. 40) byl proveden výpočet a následně vytvořený graf.



Obr. 41 Simulace konturovací strategií.

Ze simulace (viz. obr. 41) je vidět také průběh zatížení při přejezdu do další úrovně konturovací dráhy. Je zde patrné, že v první fázi je pokles zatížení na hodnoty blízké nule a poté prudký nárůst zatížení, toto zvýšení dosahuje do dvou třetin zatížení v rohu. V první fázi, kdy dojde k poklesu, je způsobeno úběrem zbylého materiálu po předchozím propojení. Průřez, který se při tomto poklesu odebrává, lze zjednodušeně vyjádřit jako trojúhelník, kdy s postupným posuvem klesá průřez odebíraného materiálu.

Vyšší hodnoty u předchozí dráhy, jde vysvětliti neupravenou dráhou. U neupravené dráhy nebylo nastaveno vyhlazení dráhy, a proto je zde vyšší zatížení nástroje.

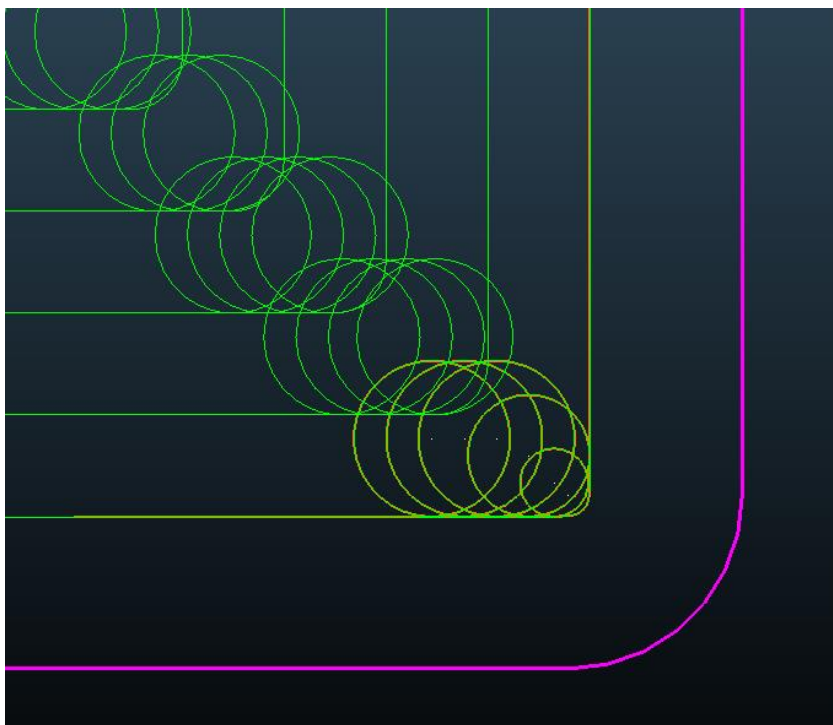


Obr. 42 Vypočtené zatížení u aplikaci konturování.

Zde je ukázaný průběh řezných sil v jednom rohu konturovací dráhy (viz. obr. 42). Oproti simulovanému výsledku. Tato křivka má poněkud odlišný tvar od simulované, to je způsobeno kratším časovým intervalem. Tento interval byl spočítán na základě přepočtu dráhy nástroje podělený posuvovou rychlostí v_f . Při dostatečně velkém rádiu kapsy, který je větší než poloměr nástroje, vznikne v rohu dráhy zaoblení. V tomto rádiu silové zatížení postupně klesá, jak je vidět. Při zcela kolmé dráze by došlo ke skokové změně zatížení, to je vidět na simulaci. Skoková změna se také projevuje vyššími hodnotami, jako u přechozí dráze, na které se nástroj pohyboval.

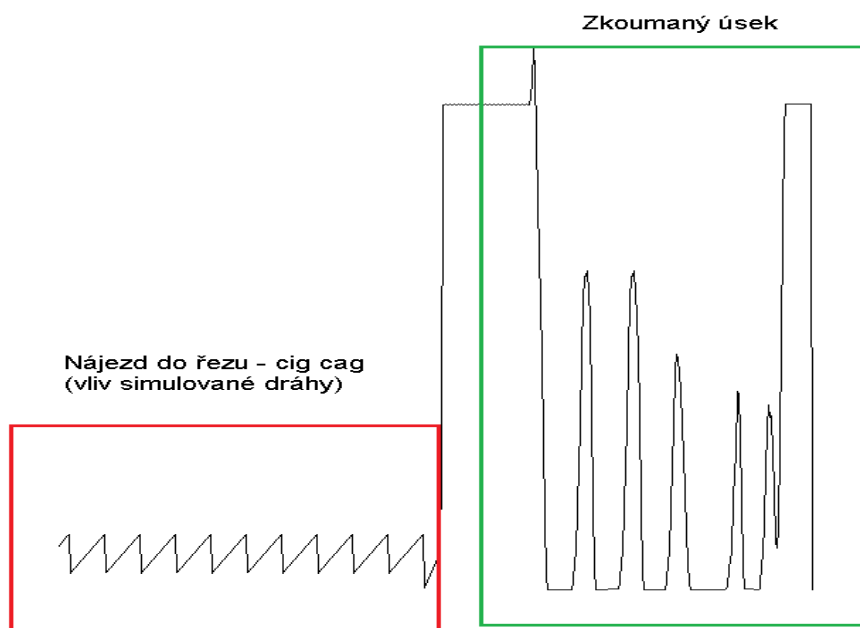
Vypočtené hodnoty jsou uvedeny pro maximální průřez třísky, což vede i k maximální řezné síle F_c . V místech kde nástroj vjíždí do rohu kapsy se zvedá úhel záběru téměř na dvounásobnou hodnotu. Přestože úhel záběru je v kritickém místě téměř 150° a je zvolena s třemi břity fréza, kde je teoretický úhel mezi jednotlivými zuby 120° . Je v těchto místech pro zjednodušení počítáno s jedním břitem v záběru pro maximální průřez třísky. V reálném případě by tedy nástroj nedosáhl zatížení, až trojnásobku výchozích hodnot.

2.7.2 Konturovací dráha s trochoidou



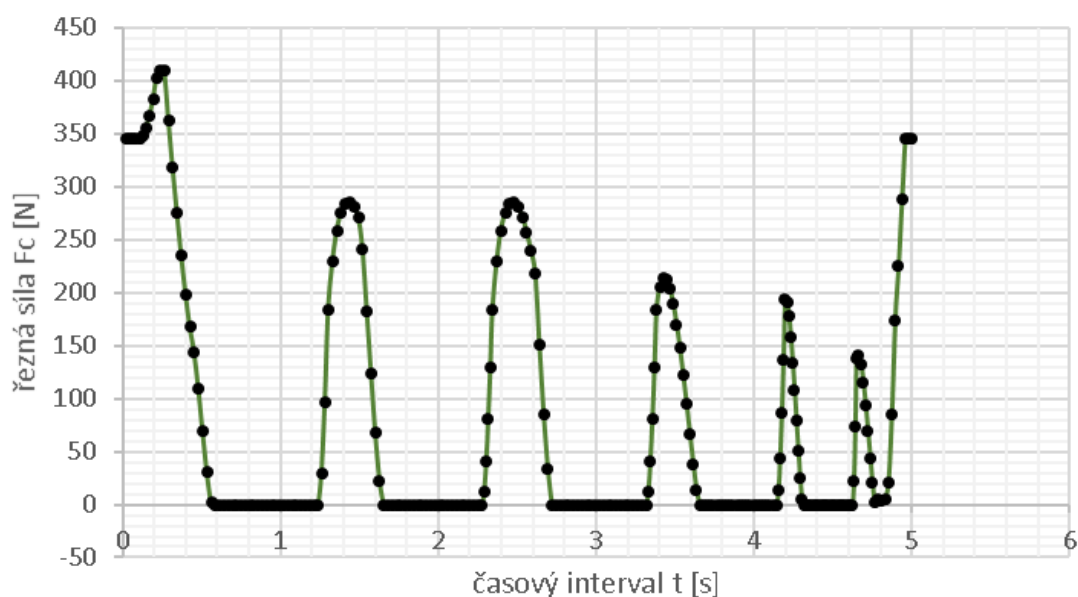
Obr. 43 Dráha trochoidy.

Takto vytvořená dráha neodpovídá vysokorychlostnímu obrábění (viz. obr. 43). U vysokorychlostního obrábění by dráhy byly mnohem hustější, jelikož je radiální hloubka třísky mnohem menší než na výpočtovém případě. Při nastavení parametrů, které odpovídají klasickému obrábění (tab. 3), je dráha s trochoidním krokem přehlednější. Je zde uvedený větší časový interval, a tedy průběh je poněkud delší a je lépe vidět průběh zatížení (viz. obr. 44).



Obr. 44 Simulace dráhy Trochoidy.

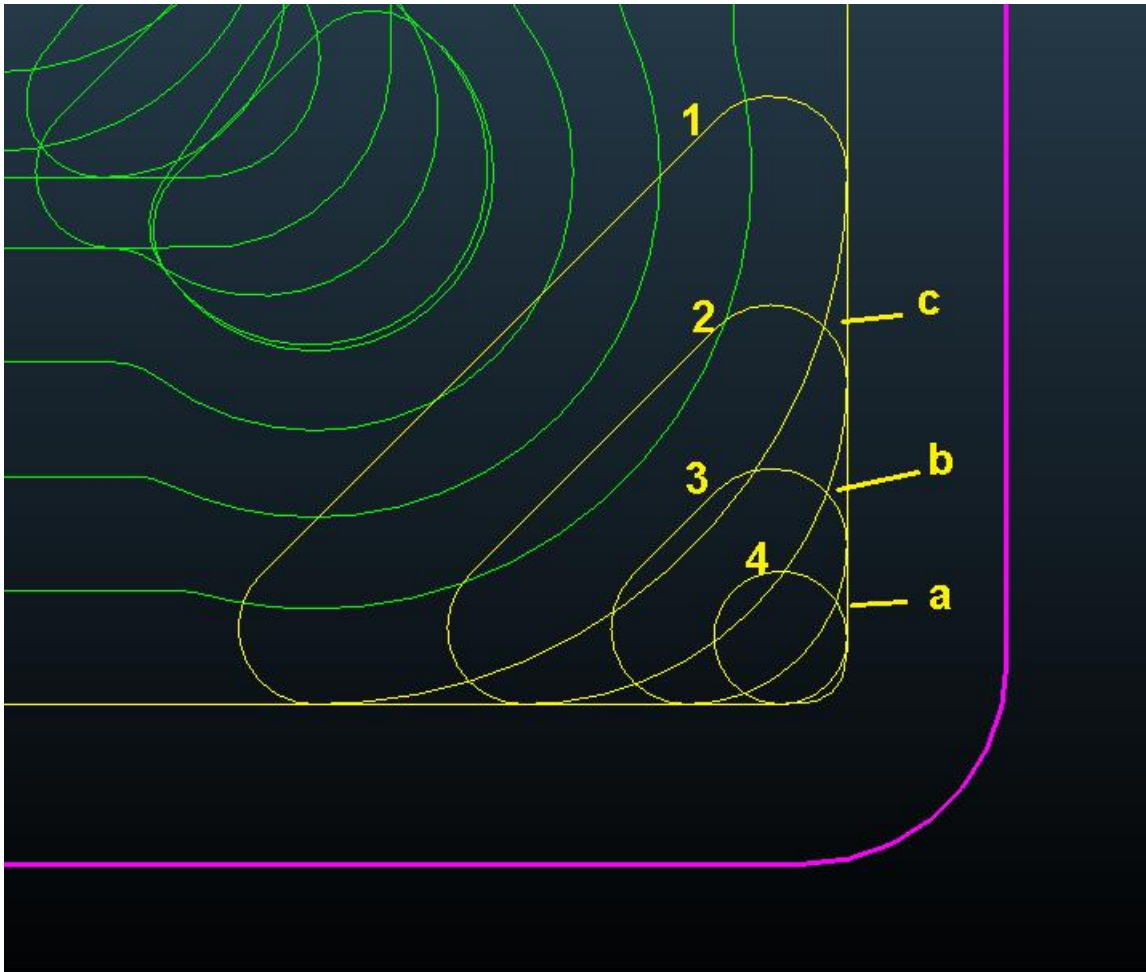
U obou případů je vidět prvotní nárůst zatížení. Ten se projevuje u vypočteného grafu (viz. obr. 45) nárůstem z hodnot 345 N na hodnoty blízké 410 N. Toto je způsobeno zadáním při vytváření dráhy, kdy jedním z parametrů, které se zadávají při tvorbě trochoidní dráhy je přetížení nástroje v procentech. Při hodnotách blízcích se zadanému přetížení si v těchto místech systém vytvoří trochoidní křivky. Proto je zde vidět na grafu (viz. obr. 45) prvotní nárůst zatížení, který po přepočtení označuje hodnotu zvýšení o 19 %. Ta to hodnota nedosahuje zadanému přetížení 30 %. Při zadání nižšího přetížení si systém vytvoří větší počet trochoidních křivek, aby vyhověl danému požadavku.



Obr. 45 Vypočtené zatížení u aplikaci trochoidy.

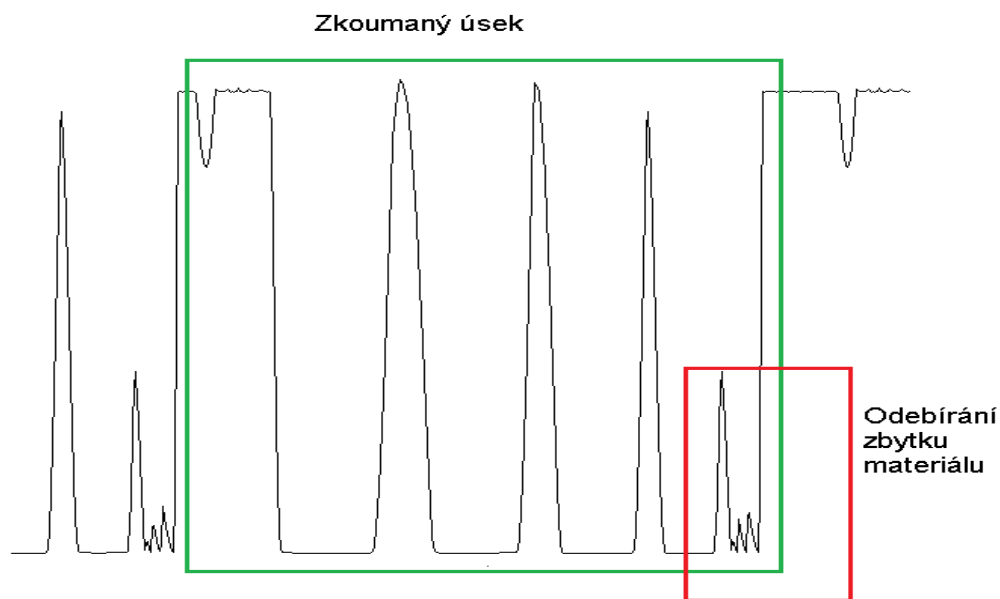
V dalším průběhu je však zaručené, že zatížení nástroje nestoupne o výchozí hodnotu zatížení, která odpovídá 345 N. Místa, která jsou rovna nulové síle, jsou místa výjezdu z řezu po kruhové dráze. Ve většině takto vytvořených kruhových drah se nástroj pohybuje ze šedesáti procent v nezatíženém stavu, tedy naprázdno. Jednou z možností, jak tato místa zefektivnit, je v nezatíženém stavu zvýšit posuvovou rychlost, tím dojde ke kratšímu časovému intervalu mezi jednotlivými výchylkami a proces se stává produktivnější.

2.7.3 Dráha založená na strategii Vortex



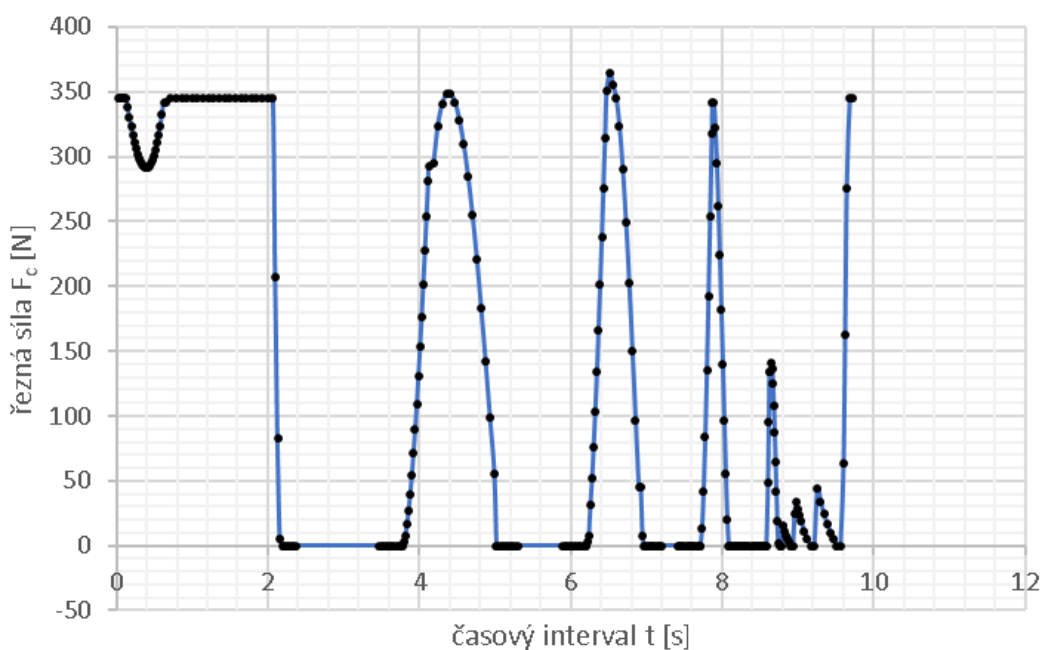
Obr. 46 Dráha založená na Vortex.

Pro tuto dráha byla zvolena jako výchozí strategie Vortex (viz. obr. 46), nejedná se opět o vysokorychlostní obrábění. Je zde možné vidět, že je průběh velmi podobný dráze trochoidní. Jsou zde opět místa kde se zatížení pohybuje na hranici nuly, tedy nástroj není v těchto místech v záběru. Oblast označená jako č. 1 je první dráha této strategie, která kopíruje tvar odebíraného materiálu a je zde konstantní zatížení. V dalších místech však už není zachován stejný krok, a proto se zde zatížení postupně mění až do maximální hodnoty, která významně nepřekročí výchozí hodnoty a_e a s tím spojený úhel záběru φ . Je tedy ověřeno, že strategie Vortex splňuje požadavek na nepřekročení hodnoty zatížení. U vysokorychlostního opracování by tato dráha byla také téměř lineární a nynější nulové hodnoty by nebyly přehledně vykresleny, jelikož by časový interval obrábění rohu trval jen zlomek takto vypočtených hodnot.



Obr. 47 Simulace dráhy Vortex.

Z vypočtených hodnot (viz. obr. 48) je taky patrné, že dráha je oproti trochoidní dráze podstatně delší a tomu odpovídá i časový interval v kterém se nástroj pohybuje v rohu zadané kapsy. Malé výchyly zatížení, které jsou patrné z výpočtů i ze simulace (viz. obr. 47) v poslední části je způsoben úběrem zbytků materiálu po předchozích obloukových drahách (1-4) (obr. 46), jde o oblasti označené jako a, b, c (obr. 46). Při opětovném lineárním pohybu nástroje z výjezdu nástroje po kopírovacím pohybu uvnitř zadaného rádiu kapsy. Při tomto téměř nezatíženém stavu nástroj obrábí tento zbývající materiál což způsobuje tyto drobné zvýšení zatížení v oblasti.



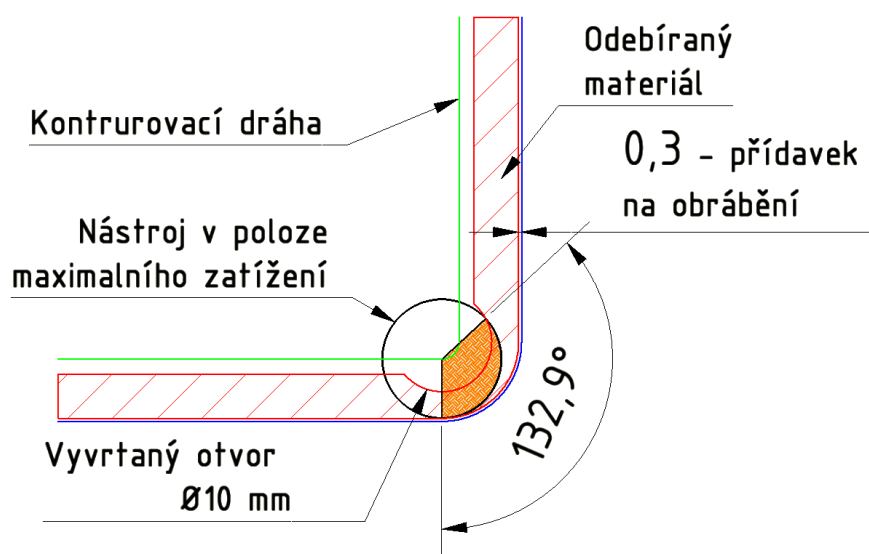
Obr. 48 Vypočtené zatížení u aplikaci Vortex

2.8 Úprava technologie dráhy konturování

Základní myšlenkou, jak zlepšit klasickou konturovací dráhu, která byla ukázaná v předešlých stranách (obr. 40), je odlehčení v místě rohu. Tedy návrh takové technologie, která by nevyžadovala významnější změnu dráhy jako to je to v případě trochoidní a Vortex strategie. Vhodnou technologií se zdá být vyvrtání otvoru ve středu rádiusu kapsy. To by mělo snížit zatížení nástroje na minimum a zlepšit tak proces obrábění. Tato volba má však jednu chybu je vhodná zejména pro poslední a předposlední konturovací dráhu. Dále je nutné správně zvolit sled jednotlivých operací a to tak, aby vyvrtání díry v rohu předcházela frézování samotné kapsy. U předešlých drah jde snížit zatížení zvětšením vyhlazení v rohu. Takto vzniklé dráhy nekopírují přesně tvar kapsy, ale pohybují se spíše po kruhových drahách.

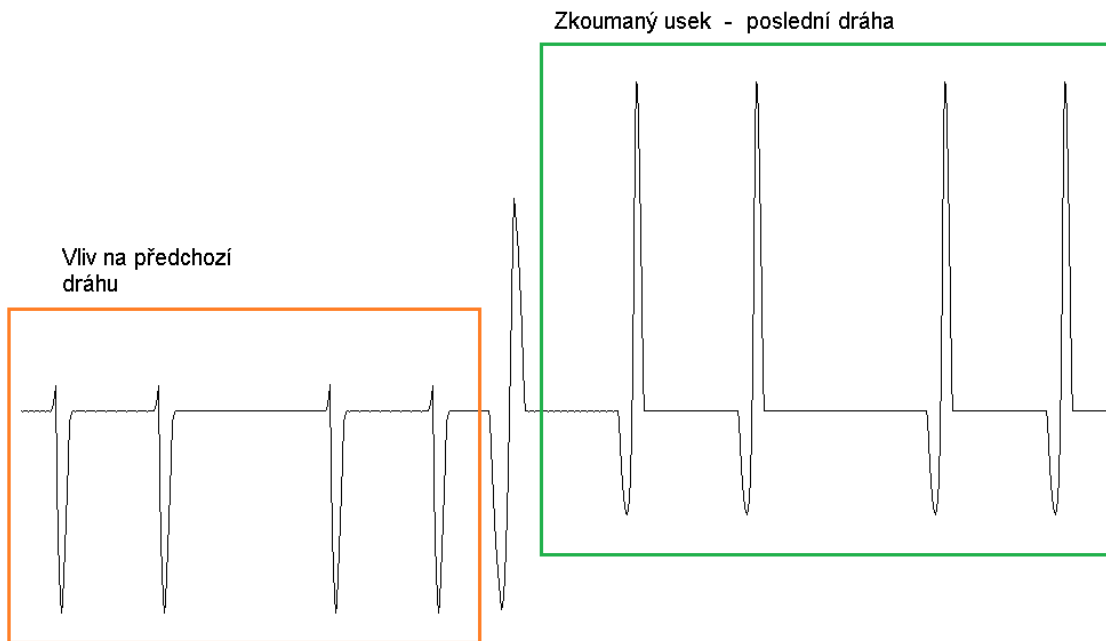
2.8.1 Varianta č. 1

První variantou, která byla vytvořena a od simulována, je vyvrtání otvoru ve středu rádiusu. Vyvrtaný otvor je menší než průměr nástroje. Tak to zvolený otvor byl první zkoušené odlehčení zvolené dráhy. Průměr otvoru byl zvolen na 10 mm, což se zdálo jako vhodné, z hlediska dostatečné velké přídavku na stěnu, aby se vrtáním nepoškodil povrch kapsy.

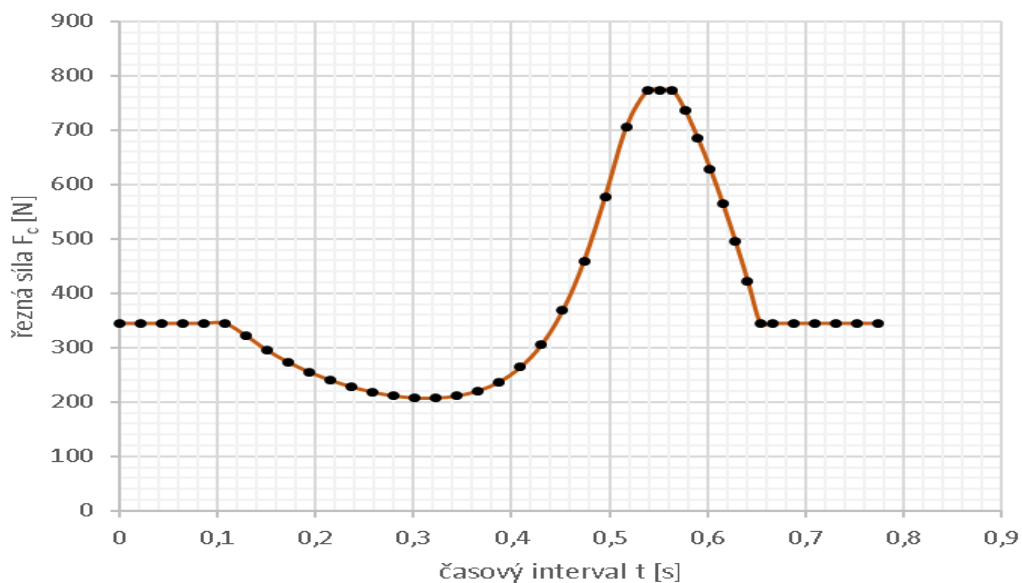


Obr. 49 Vyvrtání otvoru ve středu rádiusu ϕ 10 mm.

Na náčrtu (obr. 49) je vidět jakým způsobem je vytvořena dráha materiál, který je nutné odebrat při frézování jedné kapsy s vyvrtaným otvorem o průměru 10 mm. Dále je vidět i problémové místo, které způsobuje velký nárůst na simulaci tak i na výpočtu. Přesto lze dokázat, že největší úhel záběru je v tomto případě 133°, což je o 17° nižší hodnota než v případě klasické konturovací dráha bez úpravy. Což je ukazuje mírný pokles zatížení.

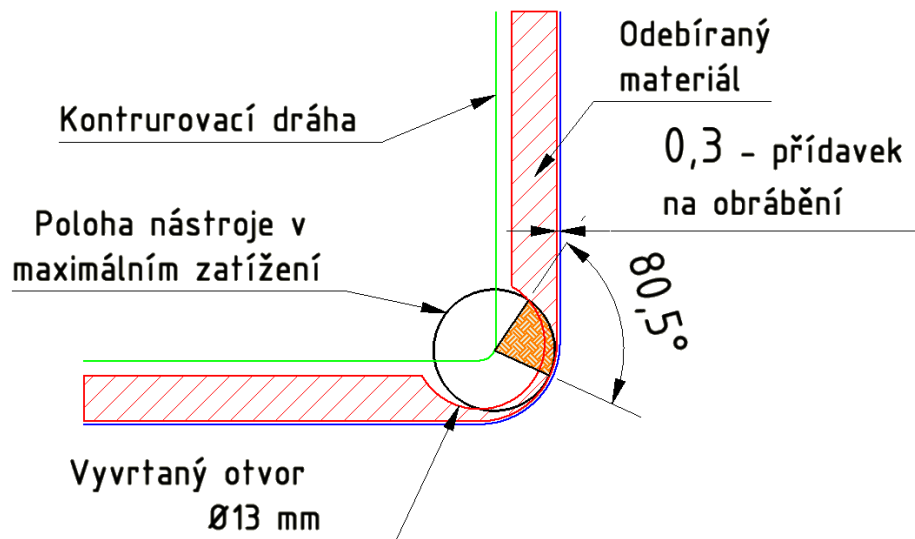
Obr. 50 Simulace – vyvrtání otvoru ve středu rádiusu ϕ 10 mm.

Na simulaci (viz. obr. 50) i na vypočteném grafu (viz. obr. 51) je vidět, že v poslední konturovací dráha na rozdíl od předposlední má významné zvýšení zatížení. U poslední dráhy, jak ukazuje graf vypočtených hodnot, je v první části vidět mírný pokles zatížení nástroje, což by mohlo vést k myšlence, že takto zvolená technologie je správná. Avšak v další části se nástroj dostane do míst, kde nástroj zabírá do materiálu, u něhož vyvrtání nemělo tak velký vliv na zatížení. Proto je zatížení téměř stejně veliké jako u klasické konturovací strategie, z toho vyplývá, že vyvrtání otvoru menšího, než je průměr nástroje nemá požadovaný vliv na zatížení, jaký byl očekáván.

Obr. 51 Vypočtené hodnoty pro vyvrtání otvoru ve středu rádiusu ϕ 10 mm.

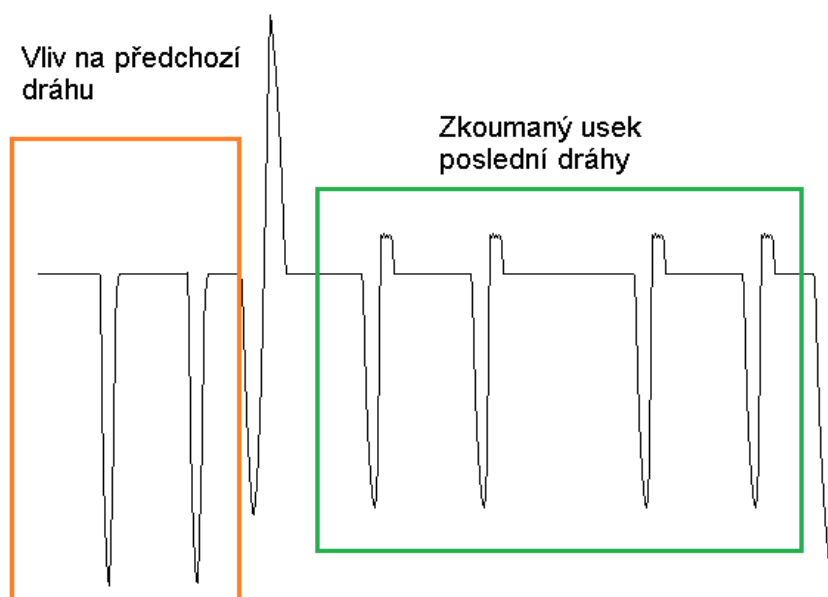
2.8.2 Varianta č. 2

U předchozí varianty se očekávání na snížení zatížení u poslední dráhy, která kopíruje tvar kapsy nespnilo. Varianta číslo dvě počítá s vyvrtáním otvoru rovněž ve středu rádiusu jako u předchozí, ale průměr vyvrtané díry je zvolen větší, než je průměr nástroje. Při volbě tohoto průměru je také nutné dodržet kritérium dané kapsy, tedy průměr se musí pohybovat mezi průměrem nástroje a zároveň být menší než velikost rádiusu zadané kapsy. V konkrétním případě se jedná o průměr 13 mm, který splňuje požadované kritérium (viz. obr. 52).

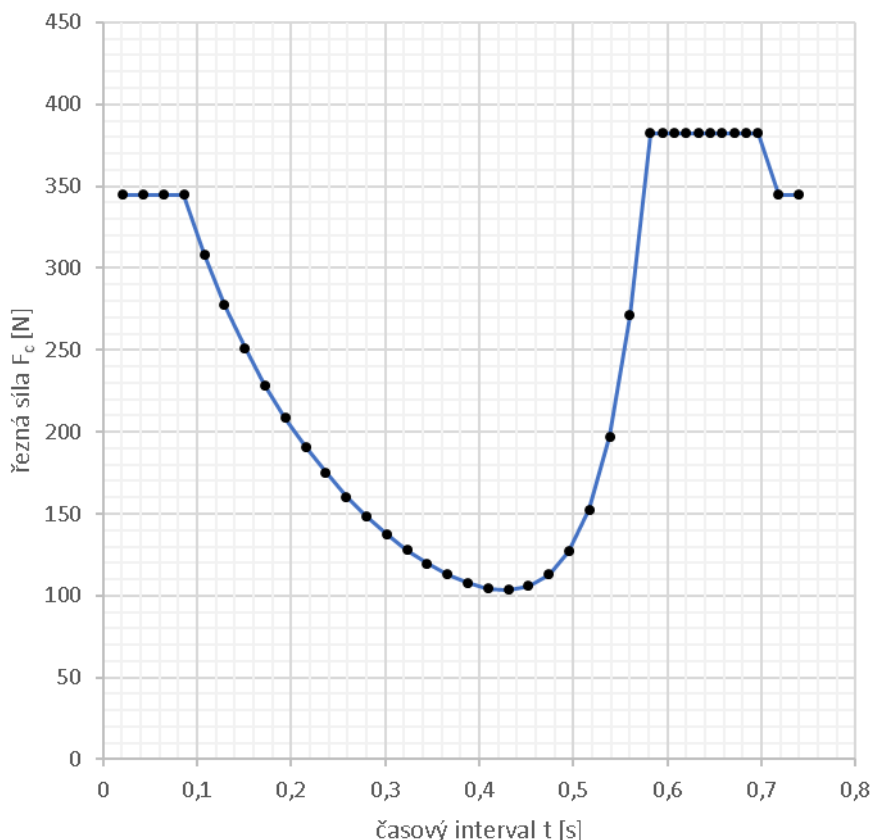


Obr. 52 Vyvrtání otvoru ve středu rádiusu ϕ 13 mm.

Stejně jako v předchozím případě je na obrázku znázorněn výchozí materiál pro odebrání. Dráha se neliší od předchozích jde opět o konturovací dráhu liší se však množství materiálu, který je třeba při této operaci odebrat. Zde nejvyšší úhel záběru dosahuje pouze hodnoty 81° . Což je výrazné zlepšení zatížení nástroje.



Obr. 53 Simulace – vyvrtání otvoru ve středu rádiusu ϕ 13 mm.



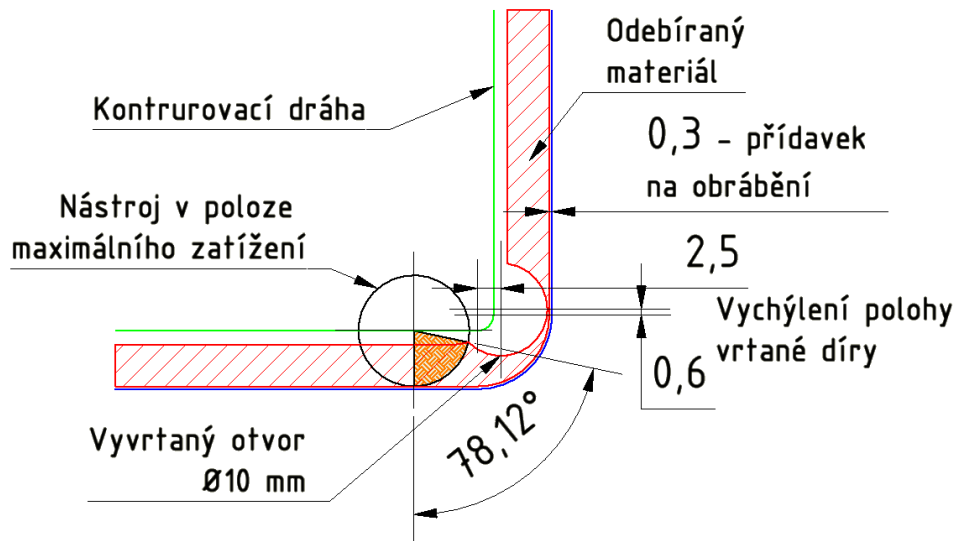
Obr. 54 Vypočtené hodnoty pro vyvrtání otvoru ve středu rádiusu ϕ 13 mm.

Z výsledku simulace (obr. 53) a výpočtu (obr. 54) vyplývá, že vyvrtáním otvoru o průměru 13 mm ve středu rádiusu kapsy, dochází pouze k menšímu nárůstu řezné síly F_c v poslední fázi frézování kapsy, kdy jsou hodnoty, jsou stejné. Alespoň co se týče výpočtu a simulace.

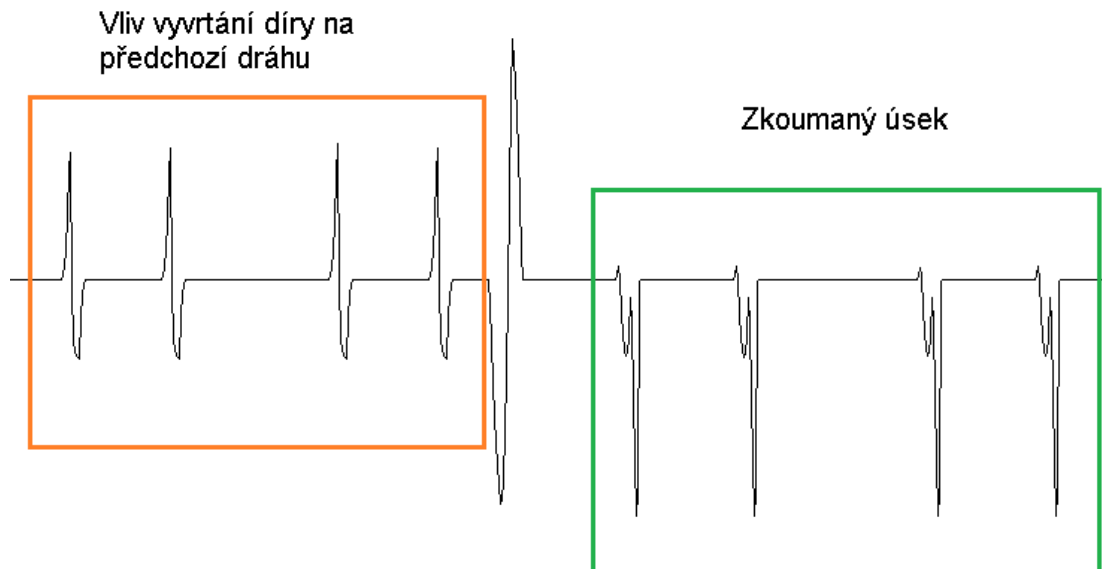
Další úpravou pohody díry, ve směru pohybu nástroje přiblížením ke stěně kapsy, s dodržením přídávku na opracování se nárůst, který je zde pozorovaný zmizí. Což je z časového opracování rohu frézováním efektivnější než například trochoidní dráha. Je však nutné počítat také s časem vrtání a výměnou nástroje, která není v zobrazeném grafu zohledněna.

2.8.3 Varianta č. 3

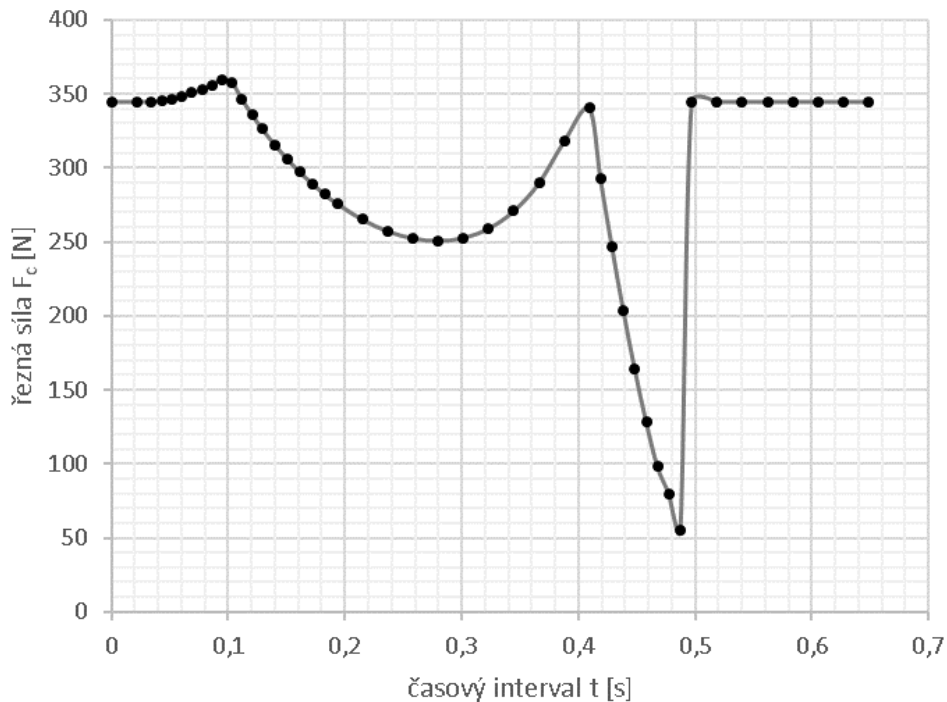
S ohledem na zjištěné faktory ovlivňující zatížení při vyvrtání otvoru na odlehčení. Byla zvolena následující varianta, která je založena vrtání otvoru o průměru 10 mm. Na rozdíl od první varianty neleží vyvrtaný otvor ve středu, ale mimo něj. Hledané rozměry vychýlení byly stanoveny na základě simulace v programu FeatureCAM. Ze simulování vychýlení polohy díry průměru 13 mm, bylo patrné že při změně polohy ve směru pohybu najíždějícího nástroje o 0,5 mm ve směru y (u zvolené simulace, pozice se v rámci obrábění mění z x na y). Z toho to poznatku byl otvor volen co nejbližší stěny ve směru x, to ale nemělo požadovaný výsledek, proto byla díra dále vyosení ve směru y. Výsledné hodnoty vyosení jsou vidět na obrázku, v ose y je hodnota 0,6 mm a ve směru x o 2,5 mm.

Obr. 55 Vyvrtání otvoru mimo středu rádiusu ϕ 10 mm.

Na zobrazeném náčrtu dráhy (obr. 55) je zobrazen, rovněž největší úhel záběru, který je v místě nájezdu do rohu, jde pouze o malé navýšení oproti lineární dráze. Je zde také zaznamenána výchylka ze středu rádiusu, pro kterou byla data simulována a vypočtena.

Obr. 56 Simulace – vyvrtání otvoru mimo středu rádiusu ϕ 10 mm.

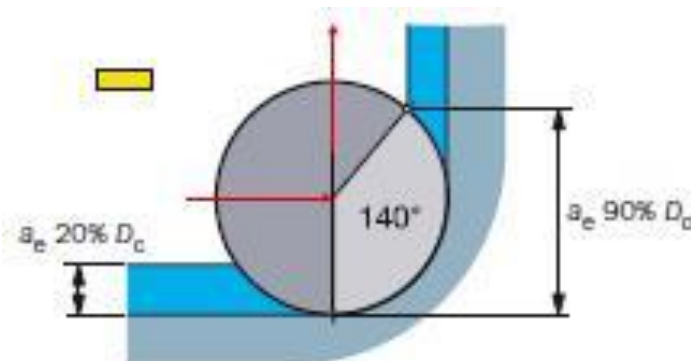
V této variantě je dráha, co se týče výsledného zatížení nejlépe zpracovaná. Nepochází zde při výjezdu z rohu kapsy k navýšení jako v předchozích případech, je zde pouze mírný nárůst v oblasti, kdy se nástroj přibližuje do rohu kapsy. Jako rozdíl a nevýhodu je možné hodnotit předchozí dráhu, která se projevuje mírným nárůstem zatížení řezné síly F_c a následným poklesem, je však patrné, že největší zatížení v tomto případě je přenášeno propojením jednotlivých drah, což je opačný stav oproti konturovací dráze bez vyvrtání otvoru, kde zatížení vzniklé propojením je menší než zatížení v rohu kapsy.



Obr. 57 Vypočtené hodnoty pro vyvrtání otvoru ve středu rádiusu ϕ 10 mm.

2.8.4 Další možnosti snížení zatížení

Jak bylo již ukázáno největšího zatížení dosahuje nástroj při obrábění rohů, a také přejezdů. To je způsobeno rostoucím úhlem záběru v rozích, jak ukazuje následující obrázek. V případě této zvolené kapsy se jednalo o zvýšení z hodnoty $75,5^\circ$ na hodnotu 150° , což je téměř dvojnásobná hodnota. Často tak dochází ke ztrátě stability obrábění a ke vzniku vibrací. To vše vede ke snížení bezpečnosti obráběcího cyklu. Dalšími nežádoucími faktory jsou vlivem kolísání řezné síly podříznutí rohu, a také riziko vylamování břitů, nebo celková destrukce nástroje vlivem lomu [13, 63].

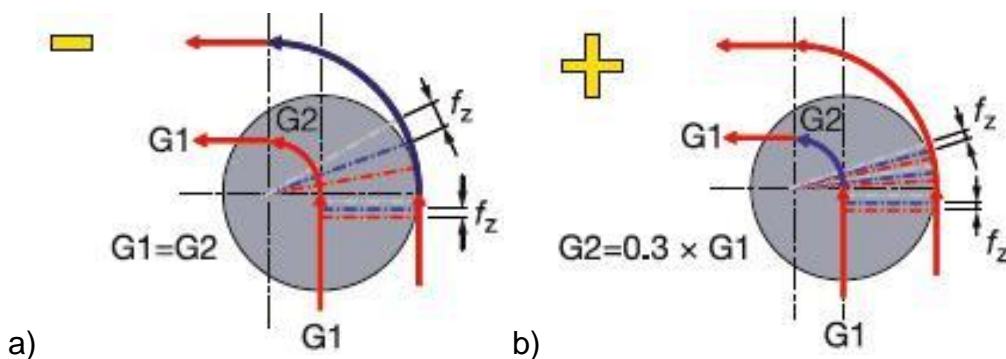


Obr. 58 Změna velikosti záběru na poloze [63].

Řešení tohoto problému (viz. obr 58) je několik. Mezi ně patří zmenšení velikosti oblouku záběru. To znamená, že při programování poloměru na obráběném rohu se zmenší velikost úhlu opásání a šířka radiálního záběru, to povede také ke snížení vibrací při obrábění [63].

Jednou z možností, jak toho dosáhnout je vyfrézovat daný roh větším rádiusem, než je udáváno na výkrese. U hrubování je tato volba velice vhodná, jelikož se může zvolit nástroj s větším průměrem a proces se stane efektivnějším. Poté se zvolí nástroj menšího průměru, který provede zbytkové obrábění na požadovaný rádius rohu, který je daný výkresovou dokumentací. Při dokončování není vždy možné použití tak velkého poloměru dráhy nástroje; průměr frézy by ale neměl přesáhnout hodnotu 1.5 x poloměr rohu součásti [63].

Další variantou, jak je možné snížit velikost zatížení v problematickém místě jako je roh, je využití proměnné velikosti posuvu na zub (viz. obr. 59). Způsob zmenšení posuvu nevede ke snížení opásání a radiální hloubky řezu, ale ke snížení sil v tomto místě. Je však nutné snížit posuv ještě před najetím frézy do rohu [64].

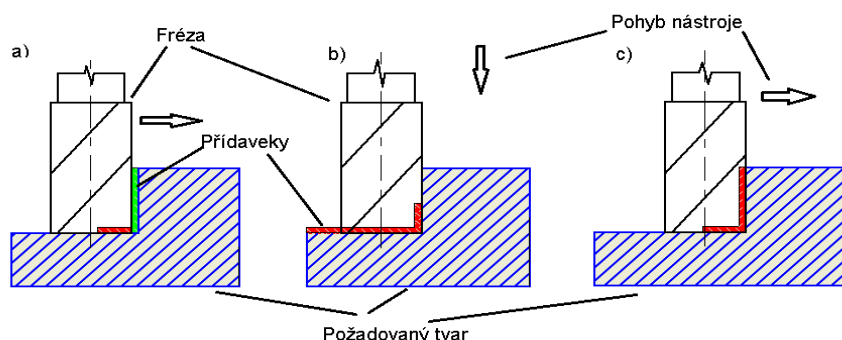


Obr. 59 změna posuvu při frézování rohu [64].

2.9 Dokončování frézování kapsy

Při dokončování jsou velmi podobné problémy, jako jsou zde zpracovány. Dokončovací dráha, však má za úkol odebrat jen velmi malé množství materiálu. Není zde také možné aplikovat odlehčení pomocí vyvrtání otvoru. A dráhy založené na trochoidních křivka zde nemají velký význam. Molo by dojít k vlnitosti výsledného povrchu, vlivem opakovaném zatěžování a odlehčování nástroje.

Problematickou částí dokončování je špatná volba technologického postupu. Při návrhu dokončování je nutné zvolit správný postup dokončovacích drah. Jestliže se jedná o kapsu, která má kolmé stěny, lze říci že finální tvar bude rozdělen na dvě operace. První operací je například frézování dna kapsy a následující operací bude dokončení stěn. Při nevhodném sledu dojde k nárůstu zatížení, pokud nebudou dodržena určitá pravidla. Při dokončení dna by nástroj neměl pokračovat až na hranice stěny (viz. obr. 60 a), ale měl by také dodržet přídavek na stěně. V opačném případě by došlo k velkému úběru materiálu (viz. obr. 60 c), což způsobí nárůst zatížení. Stejná situace nastane i v opačném sledu, kdy se začíná obrábět stěna a následně dno (viz. obr. 60 b).



Obr. 60 Problematika dokončování a) vhodná strategie b), c) nevhodná strategie

3 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ

Součástí práce je experimentální ověření zatížení nástroje při obrábění. Jedná o stejná místa, která byly v předešlé kapitole rozebíraný. V první části této kapitole návrh experimentu pro měření sil působících na zvolený monolitní nástroj. V následujících podkapitolách jsou zobrazeny a vyhodnoceny síly při obrábění. Jedná o se o měření rohů, které jsou popsány v grafech výše.

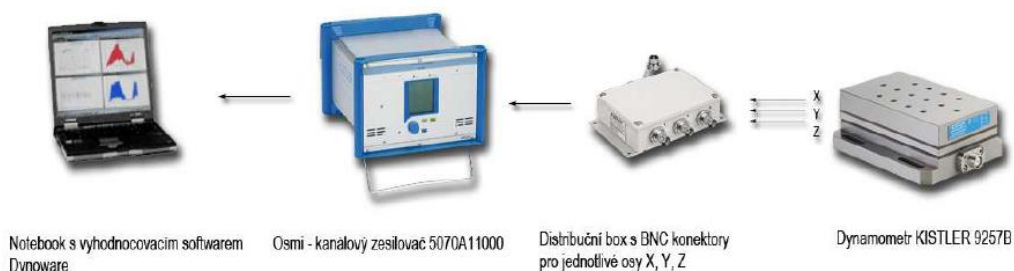
3.1 Návrh experimentu

K ověření zatížení jsou připraveny dráhy pro jednotlivé ukázky výpočtu (viz. příloha č. 3). Jedná se o dráhy, které byly zobrazeny v předešlých simulovaných úsecích. Základním předpokladem rozdílu je fakt, že provedené výpočty byly provedeny pro frézovací nástroj s přímými zuby. Kdežto reálná fréza má zuby ve šroubovici, z čehož lze předpokládat, že zatížení nebude tak veliké jako je vypočtené. Dále se jednalo o výpočet pro jeden zub v záběru, kdežto pro reálné obrábění bude v záběru více zubů.

Stroj, který byl pro simulaci vybrán je Tajmac – ZPS MCV 1210, ten se nachází v dílnách Ústavu strojírenské technologie na Fakultě Strojního inženýrství v Brně. Základní charakteristikou stroje je, že zvládá pěti osé obrábění. Jako dalším důležitým faktorem je řídicí systém Sinumerik 840D. Tento stroj také zvládá obrábění ve vyšších otáčkách, které byly stanoveny pro daný nástroj. Nástroj je stejný jako pro vypočtené hodnoty, tedy 12E3S75-25A12 SUMA. Ten se bude použít i pro vytvoření polotovaru pro měření a následně i pro měření na zkoumaných trajektoriích.

Nejvhodnějším způsobem, jak měřit řezné síly při obrábění je pomocí rotačních dynamometrů. Ten by však měl být zvolen tak, aby šli analyzovat síly, a zvláště řezná síla přímo ze změřených dat. Tyto rotační dynamometry se upínají přímo na vřeteno stroje a lze přímo měřit průběh tangenciální řezné síly, normálové řezné síly a pasivní síly na čase t .

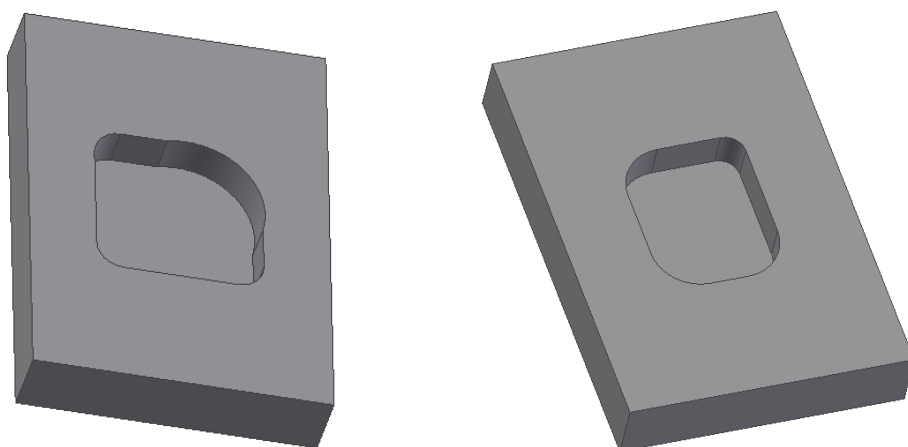
V tomto případě je však zvolený deskový dynamometr Kistler typ 9257B, kterým je dílna na Ústavě strojírenské technologie vybavena. Jedná se o deskový dynamometr, z kterého lze získat hodnoty sil pomocí kartézského systému, jde tedy o hodnoty F_x , F_y , F_z . Takto změřené hodnoty odpovídají souřadnému systému stroje. Je však možné pomocí rovnic vyjádřit výslednici sil zatěžující proces frézování. Nejčastěji se na tomto přístroji měří zatížení na lineárních drahách, ale pro zvolený experiment bude složitější vyhodnotit řeznou sílu. Zapojení dynamometru je zobrazeno na obr. 61.



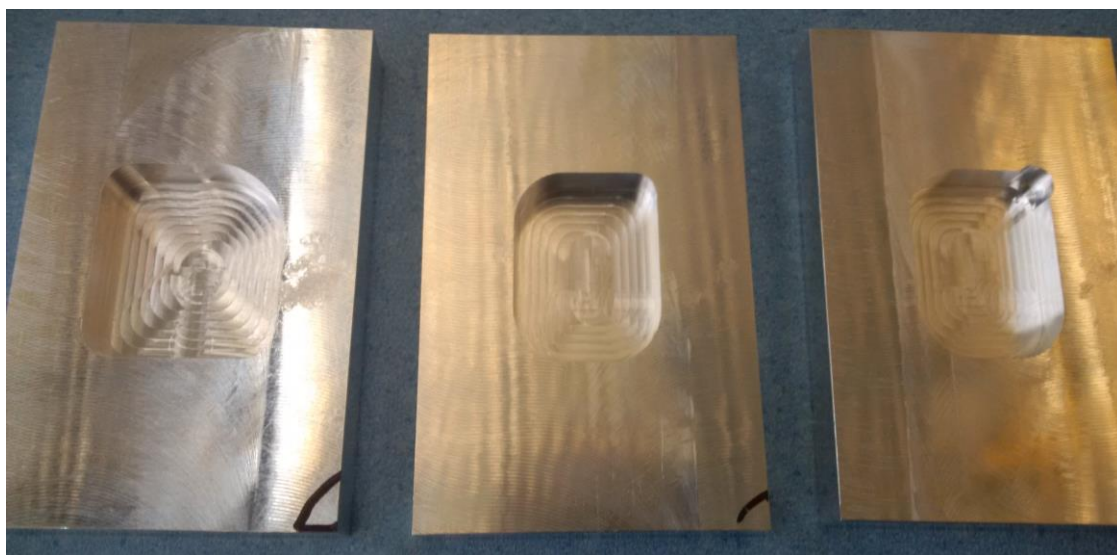
Obr. 61 Schéma zapojení měřící aparatury [65].

Prvním krokem byl návrh výchozího polotovaru pro měření jednotlivých drah. U většiny simulovaných drah je možné využít stejný tvar polotovaru. Avšak pro dráhu založenou na Vortex je nutné polotovary upravit. Polotovary musí odpovídat podmínkám obrábění při využití celé dráhy Vortex. Na obr. 62 je vidět tvar těchto kapes, které jsou určeny jako výchozí polotovary. Pro varianty vyvrtání otvoru v místě rádiusu bude polotovar vypadat v reálném případě poněkud jinak. Budou se lišit tím, že první operací pro tvorbu polotovaru bude již zmíněné vrtání otvoru o definovaném průměru a poloze.

a)



b)



Obr. 62 Tvar polotovaru pro měření, a) modelované, b) vytvořené.

Podle vytvořených modelů, byly vytvořeny kapsy. Celkem bylo vytvořeno šest kapes sloužící jako polotovary. V jednotlivých variantách šlo rozdělit na dvě čisté kapsy konturovací, a tři s vyvrtanými otvory pro odlehčení, poslední byl tvar kapsy odpovídající pro dráhu založenou na Vortex strategii. Takto vytvořené kapsy byly hlubší, než bylo stanoveno v náčrtu, aby se eliminovala možnost kolize při nájezdu do řezu. Proto je výsledná hloubka 12,7 mm, pro výchozí tvar kapsy pro měření.

3.2 Vyhodnocení experimentu

Měření probíhalo podle předem nastavených parametrů, které byly vytvořeny v programu PowerMILL 2017. Dráhy byly vytvořeny zkopírováním základní dráhy nástroje v rohu odpovídající opracování, výchozí kapsy. Po úpravě prodloužením drah do volného prostoru, aby bylo zajištěno, že nástroj nebude kolidovat při najíždění a výjezdu z řezu. Zde však nastal při měření problém. Jak ukazuje graf vygenerovaný z měření, při nájezdu do materiálu došlo k velkému zatížení nástroje a tím jsou částečně data na počátku zkoumaného úseku zkreslená. Tento nájezd se projevoval výrazným zvukovým projevem a následně i na měřených vzorcích na jakosti povrchu. Povrch byl poměrně drsný, což bylo patrné pohledem. Po změření drsnosti pomocí drsnoměru Surtronic S128, byla hodnota na po zkoušení R_a 2,73 μm a R_z 15,5 μm . Jedná se o hrubovací cyklus, kde není příliš kladen požadavek na výslednou drsnost. Nejhorší průběh je zatížení vlivem špatného nájezdu je vidět na konturovací dráze bez vrtání díry v rohu.



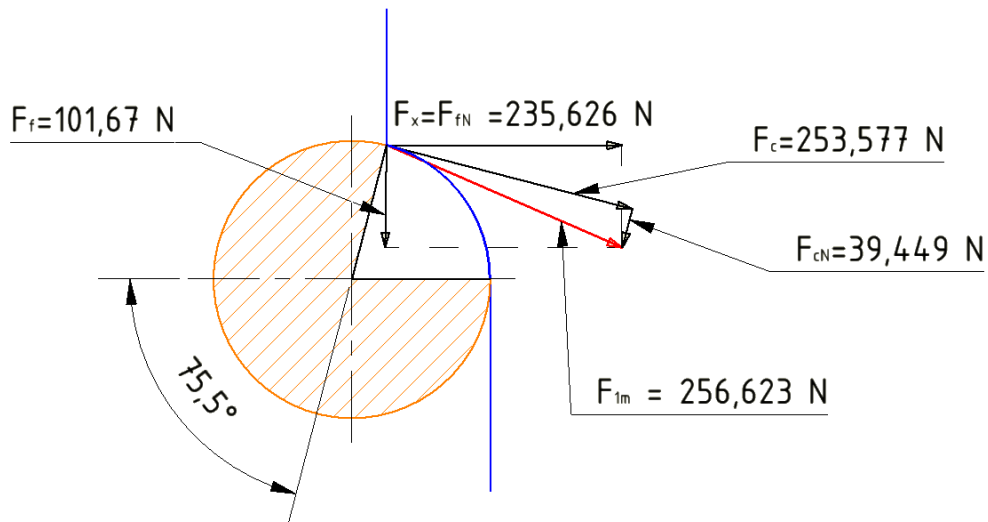
Obr. 63 Neupravovaná data z měření.

Při vykreslování se špatný nájezd projevoval nárůstem zatěžujících sil, ty se pohybovaly v poměrně velkém rozptylu velikosti zatěžujících sil (viz. obr 63). To nasvědčuje tomu, že při nájezdu vznikly vibrace, a to způsobilo zhoršení povrchu při obrábění.

Data k porovnání byly upraveny, tak aby byl vidět přehledně zkoumaný úsek. Tedy úsek z měření byl zkrácen z hodnot 10 s na pouze omezený úsek, v kterém je jasně vidět průběh zatížení a následně i výslednice sil. Celé průběhy jsou součástí příloh.

Pro jasnější porovnání bylo také nutné přepočítat výsledné síly vniklé při experimentu s vypočtenými hodnotami. Ačkoliv hodnoty byly poměrně podobné, je nutné podotknout, že při vypočtených hodnotách se jednalo o tangenciální řeznou sílu F_c a z experimentu se jednalo o výslednici sil F . Z toho lze odvozovat, že při experimentu vznikaly menší síly, než s kterými bylo počítáno. To je nejspíše

způsobeno výpočtem hodnot, kde byl zvolen výpočet hodnot pro frézování čelní s přímými zuby a byl zanedbám faktor šroubovice frézy. Díky šroubovici se síly rozkládají na více břitů a není tedy v záběru pouze jeden břit, s kterým bylo počítáno.



Obr. 64 Náčrt zatížení řezného nástroje.

Zde je ukázka vykreslení dat, pro které je možné vypočítat zpětně řeznou sílu F_c , jedná se o úsek vybraný na obr. 63. Na tomto úseku má výsledná zatěžující síla hodnotu 265,5 N. U frézování nejsou tyto síly na sebe kolmé jako u soustružení, tedy jedná se o řeznou sílu F_c , posuvovou sílu F_f a pasivní sílu F_p . Výslednici sil, která je zobrazena na grafech lze získat ze vztahu č. 15. Pro odvození řezné síly bylo využito těchto vztahů, které lze vyčíst z obr. 34. Při určení pasivní síly F_p , jako hodnotu síly $F_z = 68,11$ N. Lze předpokládat, že řezná síla a normálová řezná síla, lze odvodit ze změřených dat převedených na sílu posuvovou F_f a normálová posuvovou sílu F_{fN} [55].

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \text{ [N]} \quad (11)$$

$$F_x = F_f \quad (12)$$

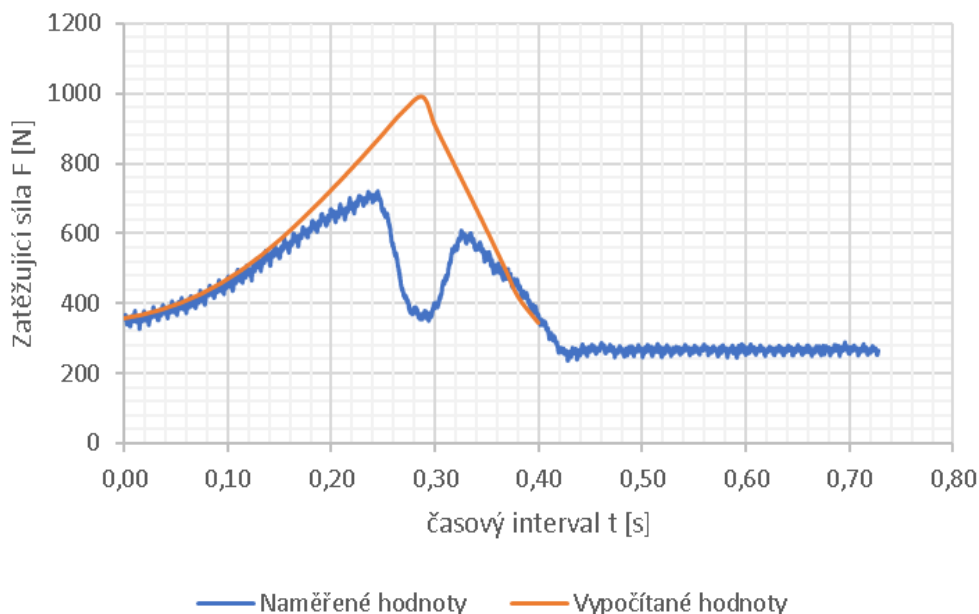
$$F_y = F_{fN} \quad (13)$$

$$F_z = F_p \quad (14)$$

$$F_{1M} = \sqrt{F_f + F_{fN}} = \sqrt{F_c + F_{cN}} \text{ [N]} \quad (15)$$

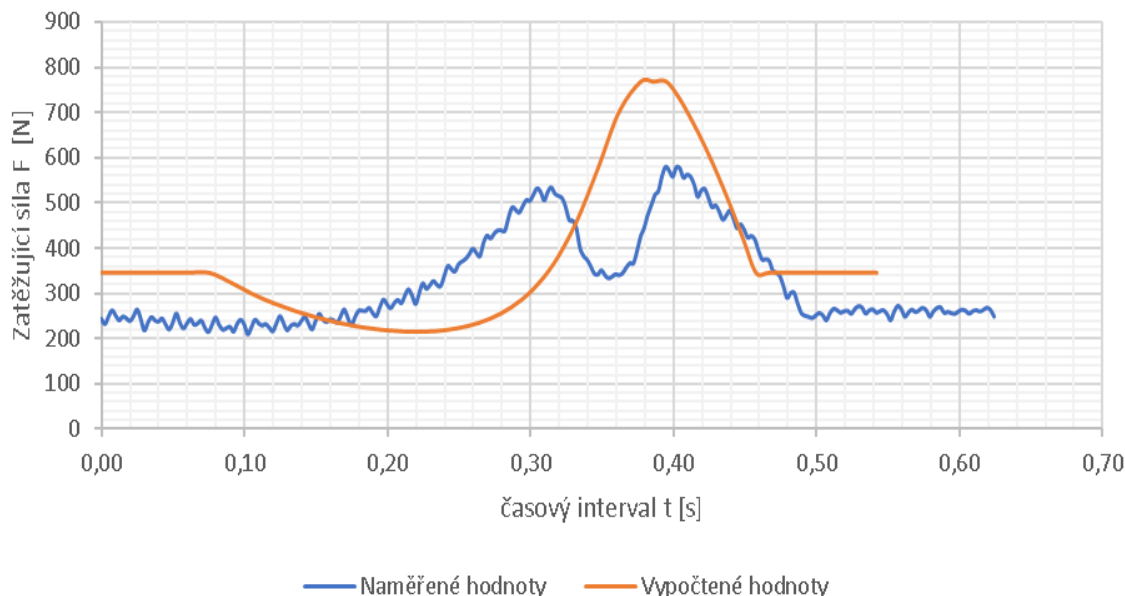
Z tohoto náčrtu (obr. 64) plyne, že řezná síla F_c pro změřená data odpovídá hodnotě 253,577 N a normálová řezná síla F_{cN} je 39,45 N. Pro změřené hodnoty posuvové síly F_f 101,67 N a normálovou posuvovou sílu $F_{fN} = 235,63$ N.

Z obrázku (obr. 65) je vidět průběh naměřených dat, které jsou částečně proloženy vypočtenými hodnotami. Proložená data vystihují zvýšení zatížení v rohu nástroje. Je zde také vidět, rozdíl oproti předpokládanému zatížení. Ze změřených dat je vidět prudký pokles zatížení, který by bylo nutné upřesnit. K odůvodnění tohoto poklesu by bylo nutné provést větší řadu měření, aby byl problém důsledně vysvětlen a popsán.

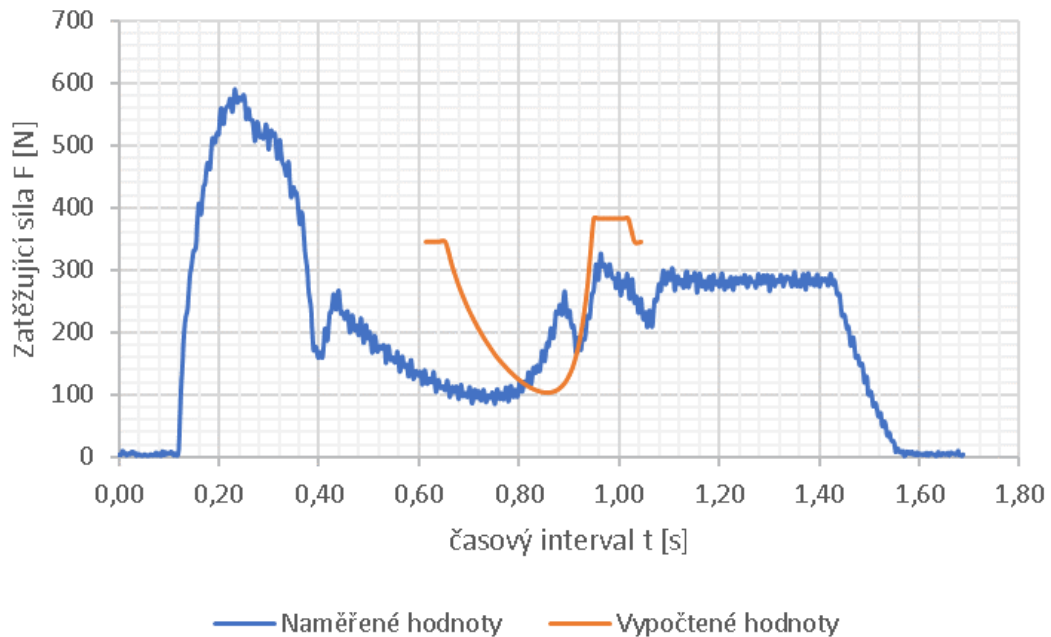


Obr. 65 Porovnání dat u konturovací dráhy.

Podobný problém nastal u navržené varianty pro snížení zatížení, kdy se v rohu kapsy vyvrtila díra o průměru 10 mm ve středu rádiusu. Tady se částečně projeví nižší síly v první fázi, následně však dochází opět k poklesu zatížení, v místech, kde by mělo zatížení dosahovat maximálních hodnot.

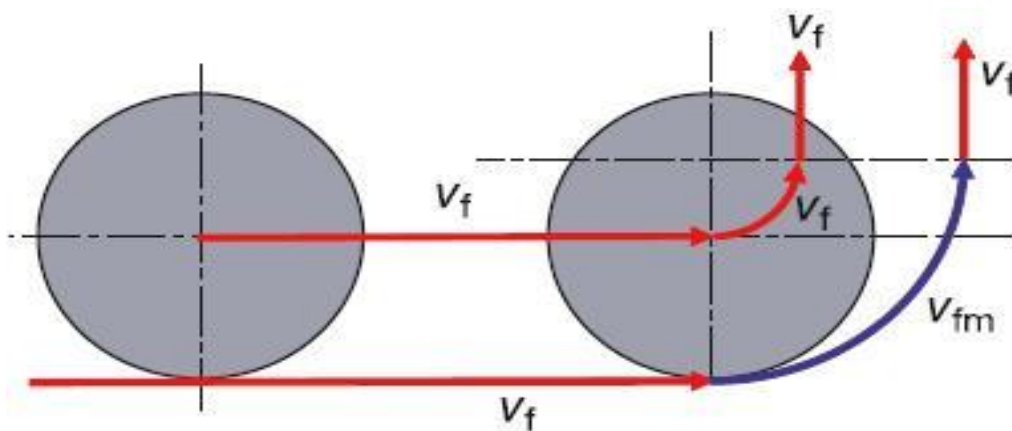
Obr. 66 Porovnání dat vyvrtní otvoru ve středu rádiusu ϕ 10 mm.

U konturovacích drah, tedy drah s vyvrtním otvoru a čisté dráhy bez úpravy je patrné, že při porovnání hodnot vypočtených a hodnot z grafu se poměrně výrazně liší. Je zde patrný rozdíl velikosti sil, což lze považovat za přijatelnou hodnotu vzhledem ke měření a způsobu zatížení břitů při obrábění kdy se střídavě mění, a proto je zde poměrně velký rozptyl hodnot. Větší problematikou je však rozdíl hodnot v oblasti časového intervalu. Zde se zatížení projevuje v řádu desetin sekund, kdežto v u vypočtených dat je rozdíl až dvakrát větší.

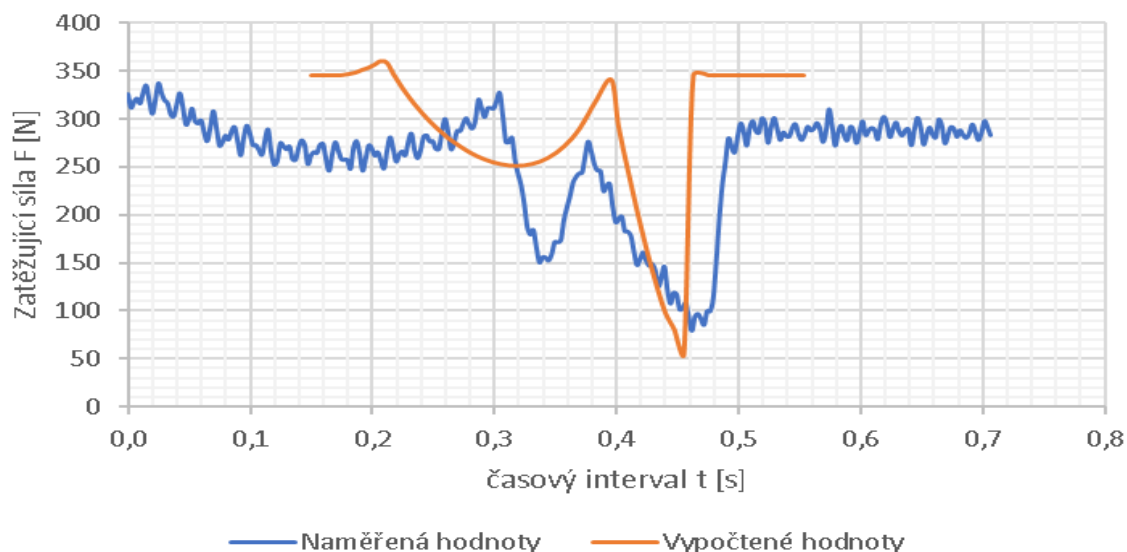
Obr. 67 Vyvrtání otvoru ve středu rádiusu ϕ 13 mm.

V případě odvrtání otvoru o průměru 13 mm (viz. obr 67), vlivem špatného nájezdu není snadné určit oblast, kde se má projevit pokles zatížení, díky odvrtání rohu. Z tohoto důvodu je zde určena vypočtená data pouze orientačně umístěna, podle předchozích uprav, které byly stejně upravovány. Lze zde však vidět trvalý pokles zatížení, na rozdíl od konturovací dráhy bez úprav.

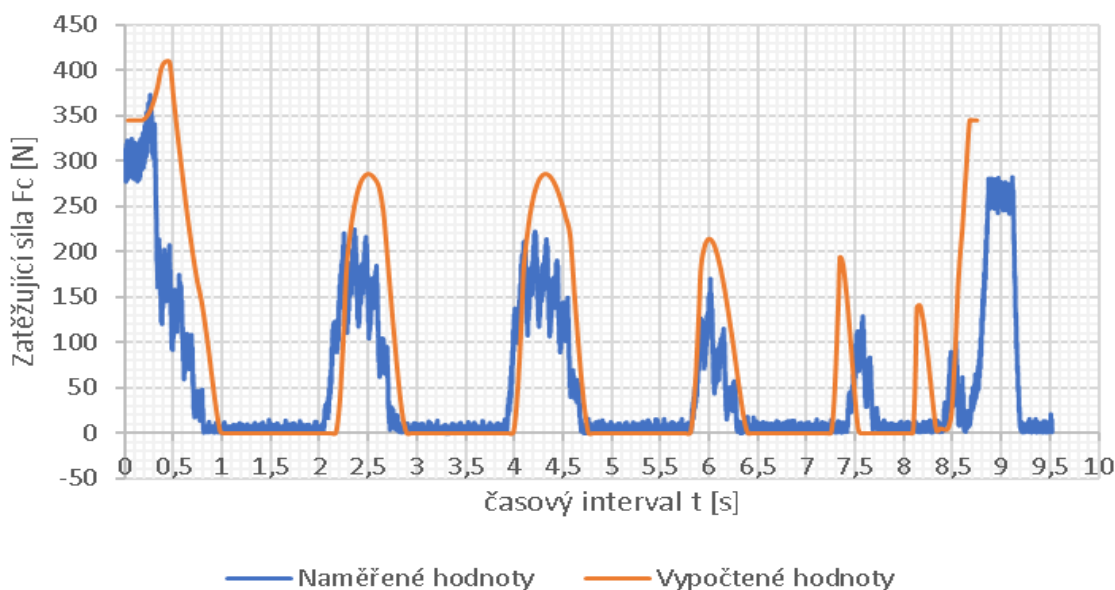
Pro vytvoření porovnávacího grafu bylo nutné upravit data. Tedy již zmiňovaný časový úsek. Ten byl vydělen celou konstantní hodnotou, aby bylo lépe vidět porovnání. Z toho je patrné, že spočtené hodnoty částečně kopírují tvar naměřených. Rozdíl zpočátku je možné zdůvodnit vlivem špatného nájezdu, který mohl data částečně zkreslit. Čas obrábění v místě rohu lze vysvětlit podle obr. 68. Zde je názorně vidět, že se posuvová rychlost místě rohu mění. V konkrétním případě roste, to znamená, že v místě kontaktu bude břit nástroje pohybovat podstatně vyšší rychlostí, než se kterou je počítáno. Tedy v kritickém místě bude nástroj kratší čas [64].



Obr. 68 Posuvová rychlost v ose nástroje a na obvodu nástroje [64].

Obr. 69 Vyvrtání otvoru mimo střed rádiusu ϕ 10 mm.

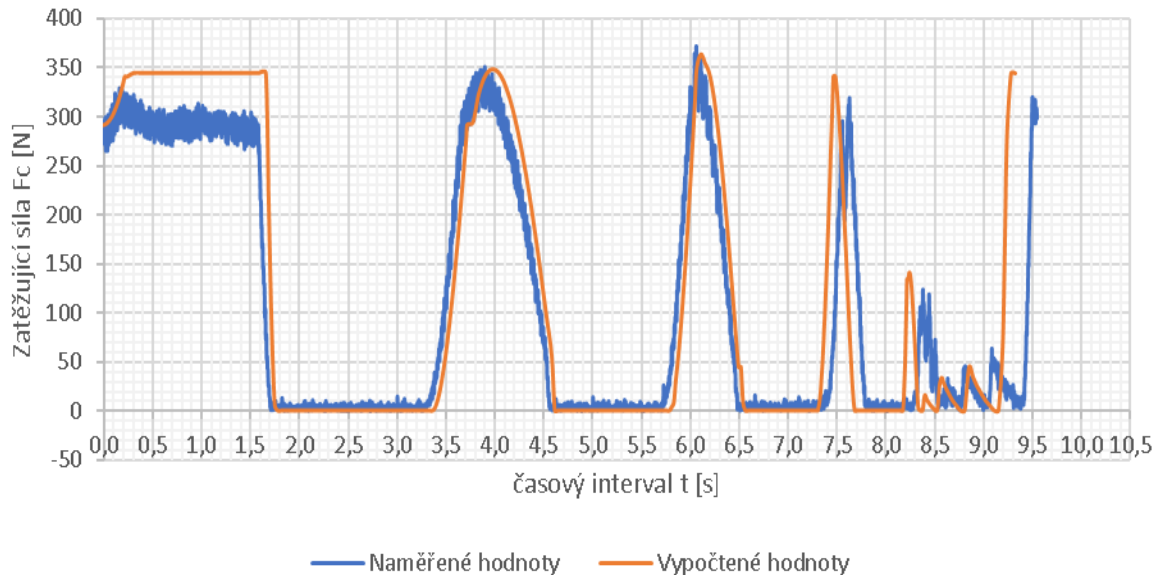
Pro konturovací dráhu vytvořeným otvorem mimo střed rádiusu, je vidět, že spočtená data poměrně dobře kopírují tvar naměřených hodnot. Na grafu zatížení je zobrazena pouze oblast, v které se zatížení mění. Výsledná data odpovídají lépe tvaru než předchozí varianta (obr. 67) je zde však patrná odchylka, kdy spočtená data předpokládají pozvolnější pokles, než je to zobrazeno na naměřených hodnotách.



Obr. 70 Porovnání naměřených a spočtených hodnot u dráhy Trochoida.

Trochoidní dráha, která byla změřena a vykreslena (viz. obr. 70) na rozdíl od předchozích drah, založené na konturovací dráze vykazuje delší časový interval v místě obrábění. Ačkoliv se nástroj také pohybuje po rádiusových drahách, kde by bylo možné předpokládat stejný efekt jako u předchozích. Naopak je zde nárůst času, místě kontaktu je téměř dvojnásobný (1,75 x) oproti spočtenému. Tento nárůst se vysvětluje kinematikou konkrétního stroje. Jelikož pro výpočet dráhy nebyl použit přídatný modul, například Machine DNA, nebylo možné přesně nastavit dráhu, aby byla co nejvíce efektivní. Simulovaný čas se přibližně shodoval s časem vypočteným. Avšak praktické měření ukázalo nárůst času.

Z pohledu kinematiky stroj na drahách, které jsou kruhové, o malém rádiu, se pohybuje nástroj podstatně menší rychlostí. Stroj při požadovaných rychlostech nemůže pracovat, kvůli dynamicky se měnícím směru rychlosti. Pokud se stroj pohyboval s nastavenou rychlostí v malých rádiusech by mohlo dojít k nedodržení trajektorie.



Obr. 71 Porovnání naměřených a spočtených hodnot u dráhy Vortex.

Nejlépe kopíruje tvar frézování rohu pro silové poměry, dráha založená na strategii Vortex. Zde jsou hodnoty (viz. obr 71), jen částečně nižší a rozptýl zatížení je však poměrně ve velkém rozsahu. Je způsobeno zejména nestejnou zatížením v krajní poloze, kterou jsou jednotlivé výstupky, při jednotlivých drahách. Jsou zde také vidět menší vrcholy ke konci posledního vychýlení zbytkem materiálu, který zbyl po prvních rádiusových drahách. Tyto dráhy, založené na trochoidních drahách, způsobily na povrchu vlnitost. Toto je způsobeno přerušovaným řezem, kdy nástroj většinu času pohybuje v nezátíženém stavu, při opětovném nájezdu do řezu, má nástroj tendenci se zařezávat do materiálu. Tato vlnitost lze z pohledu zvolené strategie považovat za zanedbatelné, jelikož se jednalo o hrubovací strategii. Příklad na stěnu byl dodržen, nedošlo ke kritickému úběru materiálu, který by byl z pohledu požadovanému tvaru kritický. Problém by mohl nastat při dokončování, kdy díky vlnitosti dojde k nepravidelnému zatěžování.

4 DISKUZE

Zatížení nástroje je zobrazeno pomocí simulace a výpočtu. Grafy zde umístěné jsou vytvořeny pomocí souboru excel, který je součástí příloh. Lze jej tedy použít pro výpočet průběhu grafů pro jiné hodnoty, než které jsou zvoleny pro konkrétní případ. Hodnoty velikosti třísky by bylo však nutné pro jinou hodnotu spočítat či jinak změřit. Pro konkrétní případ byl zvolen CAD program Inventor 2017, v kterém byl simulovaný pohyb nástroje po malých krocích. Malý krok je důležitý pro detailnější vykreslení zatížení.

Při srovnání vypočtených dat se simulací nelze přesně definovat rozdíly, ale při zastavení simulace v určitém okamžiku ukazoval program nižší výkon než ke, kterého bylo dosaženo výpočtem. Pro výpočet bylo použito vzorce pro výpočet řezné síly F_c odvozený od výpočtu řezného výkonu P_c . Existují i další vzorce, které by nám měli dát hodnoty řezných sil. V tabulce je uveden další způsob výpočtu, kromě hodnot, které jsou zobrazeny v grafu. Kvůli různým proměnným se tyto síly podstatně liší, rozdíl činí výpočet jmenovitého průřezu třísky.

Výsledkem provedeného experimentu v práci je srovnání vypočtených dat se změřenými. Zde se ukazují rozdíly mezi těmito hodnotami, největším rozdílem byl časový průběh při jednotlivých měření. U naměřených hodnot byl u drah založených na kontuře modelu průběh podstatně rychlejší. Kdežto u trochoidní se čas prodloužil vlivem kinematiky stroje. Hodnoty naměřené hodnoty se téměř kryly s hodnotami vypočtenými, jedinou problematikou je skutečnost, že vypočtené hodnoty jsou stanoveny pro řeznou sílu, kdežto naměřené vyjadřují výslednici. Ta by měla být oproti řezné síle větší, jelikož se skládá ze síly posuvové, řezné síly a pasivní. Pro porovnání byl vybrán úsek na konturovací dráze, kde se nástroj pohyboval po lineární dráze. Bylo tak snadnější spočítat skutečnou tangenciální řeznou sílu F_c . Ta byla stanovena na hodnotu 253,77 N což je oproti spočteným hodnotám pro stejný úsek snížení o 36 %.

U porovnávání konturovací dráhy bez odvrtní a s vyvrtáním otvoru do středu o průměru 10 mm, by bylo nutné provést další měření k vysvětlení poklesu zatížení v při očekávání jeho nárůstu. Lze to přikládat špatnému nájezdu nástroje do řezu, které mohlo ovlivnit měření a tím zkreslit celé hodnoty a jejich průběh. Ovšem při aplikaci ostatních variant opracování rohu se zatížení chovalo předpokládaným způsobem.

Dalším pokračováním by měla být analýzy propojení mezi jednotlivými úrovněmi obrábění. Jak bylo ukázáno jedná se o další místo, kde se zatížení poměrně dynamicky mění. Po zpracování různých úhlů nájezdu do další úrovně by se mohl výsledný simulovaný graf zobrazovat příznivěji, podobně jako u produktivních drah, které ten to problém řeží pomocí trochoidních trajektorií.

ZÁVĚR

Při porovnání strategií použitelných pro frézování uzavřených kapes, byly hodnoceny jejich výhody a také nevýhody. Produktivní strategie se ve své podstatě příliš neliší, jsou zde však výjimky, které vytvoří dráhu, jenž se od ostatních naprosto odliší. V porovnání produktivní a běžné strategie, je rozdíl podstatný. Využitím produktivních strategií je možné snížit čas na obrábění, je k tomu však nutné znát velmi dobře proces obrábění a nastavení jednotlivých parametrů, což je jednou z nevýhod pro všechny takové strategie. Dále pak i strojové a nástrojové vybavení musí být uzpůsobeno potřebám produktivního obrábění. Z těchto důvodů se v některých podnicích se zaváděním produktivního obrábění vyčkává.

U silových poměrů byly zjištěny velké rozdíly ve vybraných strategiích. Jsou zde podle analýzy vybraný problematická místa, zejména problematika obrábění rohů. Pro tuto část jsou provedeny simulace i měření, aby bylo možné zjistit velikosti sil, které působí na nástroj. Vypočtené hodnoty napomohly upřesnit místa, kde se má projevit úprava drah pro jednotlivá měření. Výsledkem bylo proložení vypočtených teoretických dat se změřenými hodnotami. Byl také stanoven rozdíl mezi výpočtem a měřením, zejména ve velikosti tangenciální řezné síly F_c . Měření probíhalo v prostorách dílen Ústavu technologie. Navržené úpravy technologie, odvrtání otvoru v rohu se ukázalo být poměrně efektivní zejména varianta č. 2 a č. 3, kde nebyl patrný nárůst zatížení. U varianty č. 2 se jednalo o vyvrtání otvoru ve středu rádiusu o průměru větším než je nástroj (ϕ 13 mm) a ve variantě č. 2 je počítáno s otvorem menším, než je průměr nástroje (ϕ 10 mm). To vede tedy k závěru, že snížení zatížení nástroje lze dosáhnout pouze úpravou zvolené technologie. S porovnáním drah vytvořených na základě vysokorychlostního obrábění se ukázala, že jsou navržené úpravy efektivnější.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Aeospace: Wing rib. *Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2017-04-20]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/en-gb/industrysolutions/aerospace/aluminium/pages/wing-rib.aspx>
2. KOČMAN, Karel. *Technologie obrábění*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3068-0.
3. HRABOVSKÝ, Adam. *Porovnání výkonných hrubovacích operací v CAM softwarech* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2014 [cit. 2017-03-14]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/31964>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jan Zouhar.
4. Frézování: Monolitní frézy. *Dormer Pramet* [online]. [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://www.dormerpramet.com/cs-cz/products/milling/milling>
5. ŠTULPA, Miloslav. *CNC: programování obráběcích strojů*. Praha: Grada, 2015. ISBN 978-80-247-5269-3.
6. *Konstrukční a výrobní software: Speciální příloha. Technický týden [online]. 2015, , 32 [cit. 2017-04-04]. Dostupné z: <http://www.technickytydenik.cz/priloha/54e75f7dd3c8e/kvsw-2015-01-54e75f9425323.pdf>*
7. PowerMILL. *CAD CAM SYSTEMS* [online]. 2017 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <https://www.cadcam-systems.cz/cad-cam-software/powermill/>
8. STANĚK, Vlastimil. CAM ve výrobě (7). *Technický týdeník*[online]. Business Media CZ, 2011 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/cad-cam-ve-vyrobe/cad-cam-ve-vyrobe-7_8489.html
9. ŠIMONEK, Pavel, Michal JELÍNEK a Aleš POLZER. *Aplikace CAD/CAM v technologii: (vzdělávací a tréninkový modul): učební text byl vytvořen v rámci projektu: OPUS - vzdělanostní síť k výrobním technologiím*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012.
10. What is Post-Processing?: NC post-processing. *ICAM* [online]. 2017 [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <http://icam.com/what-is-post-processing/>
11. 2.5D Frézování. *SolidCAM CAM Software: iMaxhinig - The Revolution in CAM!* [online]. [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://www.solidcam.cz/produkty/cam-moduly/25d-frezovani/>
12. Obrábění 3D. *3E Praha Engineering, a.s.*[online]. [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://3epraha.cz/obrabeni-3d>
13. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění - Kniha pro praktiky*. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. Přel. z: *Modern Metal Cuttig - A Practical Handbook*. ISBN 91-97 22 99-4-6
14. *Produktivní obrábění kovů*. Sandviken: Sandvik Coromant, c1997.

15. *Produkční obrábění: Obrábění ploch. Nexnet a.s. - Cabinet Vision [online]. [cit. 2017-03-21]. Dostupné z:*
<http://www.cabinetvision.sk/old/www/2produkty/produkcni.php>
16. ŠTULPA, Miloslav. *CNC: programování obráběcích strojů*. Praha: Grada, 2015. ISBN 978-80-247-5269-3.
17. PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
18. MAREK, Tomáš a Vlastimil CHRÁST. HSC obrábění rotačních obrobků. *MM spektrum*[online]. 2011, (10) [cit. 2017-05-25]. Dostupné z:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/hsc-obrabeni-rotacnich-obrobku.html>
19. PROKOP, Jaroslav, Alena KOČMANOVÁ a Karel KOČMAN. Ekologické a technologické aspekty HSC obrábění. *MM spektrum* [online]. Brno: MM publishing, 2001, (6) [cit. 2017-05-25]. Dostupné z:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/ekologicke-a-technologicke-aspekty-hsc-obrabeni.htm>
20. POLZER, Aleš. Akademie CNC obrábění (13). *Technický týdeník* [online]. Praha: Business Media CZ, 2009 [cit. 2017-03-23]. Dostupné z:
http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/akademie-cnc-obrabeni/akademie-cnc-obrabeni-13_8548.html
21. DE VOS, Patrick. Příručka pro technology: Dynamické frézování - využití kompenzačního přístupu. *MM spektrum: Nejčtenější strojírenský časopis* [online]. 2013, (7), 82 [cit. 2017-03-21]. Dostupné z:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-dynamicke-frezovani-vyuziti-kompenzacniho-pristupu.html>
22. Trochoidal Milling. *WIDIA* [online]. [cit. 2017-03-21]. Dostupné z:
<https://www.widia.com/en/featured/trochoidal-milling.html>
23. SZALÓKI, I., CSESZNOK, S., CSUKA, S., SIPOS, S., Can trochoidal milling be ideal? Manufacturing 2012 The XXI. Conference of GTE on Manufacturing and related technologies. [online]. [cit. 2017-03-21] Dostupné z:
http://www.forgacsolaskutatas.hu/innovacio/can_trochoidal_milling_be_ideal/
24. GRYČ, Jan. Evoluce v trochoidním frézování. *MM spektrum* [online]. 2016, 2016(9), 120 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/evoluce-v-trochoidnim-frezovani.html>
25. Trochoid. *Wolfram MathWorld: The Web's Most Extensive Mathematics Resource*[online]. 1999 [cit. 2017-03-28]. Dostupné z:
<http://mathworld.wolfram.com/Trochoid.html>
26. PAGÁČ, Marek. Seminář Delcam představil novinky Vortex a Machine DNA. Konstrukter [online]. Nová média, 2012 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z:
<http://www.konstrukter.cz/2012/06/26/seminar-delcam-predstavil-novinky-vortex-a-machine-dna-pk/>

-
27. Delcam's latest developments on show at EuroMold. *TCT Magazine: Accelerating 3D technologies* [online]. 2013 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.tctmagazine.com/euromold-news/delcams-latest-developments-on-show-at-euromold/>
 28. NEWTON, Randall. Delcam adds Vortex high-speed roughing to PowerMill: Time savings of between 40% and 70% have been achieved using the new technology. *GraphicSpeak: News and Commentary for CAD and DCC Professionals* [online]. 2017 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://gfxspeak.com/2013/09/17/delcam-adds-vortex-high-speed-roughing-to-powermill/>
 29. *New Strategies For Speed*. 29. *Machinery News: Products and Features for Production Engineers* [online]. Dartford, 2006 [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <http://www.machinery.co.uk/article-images/4456%5CNewStrategiesForSpeed.pdf>
 30. Ponorné frézování. *Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2017-04-02]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/application_overview/holes_and_cavities/plunge_milling/pages/default.aspx
 31. Add strategy: Plunge roughing in HSM Express. *Autodesk Community* [online]. 2016 [cit. 2017-04-20]. Dostupné z: <https://forums.autodesk.com/t5/hsm-ideas/add-strategy-plunge-roughing-in-hsm-express/idi-p/6222842>
 32. GRMELA, Vladimír. Revoluce místo evoluce. *MM spektrum* [online]. 2011, 2011(09), 76 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/revoluce-misto-evoluce.html>
 33. iMachining - revoluce v CNC obrábění. *SolidCAM software: iMachinig - The Revolution in CAM!* [online]. [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <http://www.solidcam.cz/imachining-revoluce-v-cnc-obrabeni/>
 34. Exkluzivní Průvodce technologií iMachining. *SolidCAM: iMachinig - The Revolution in CAM!* [online]. [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://www.solidcam.cz/imachining-revoluce-v-cnc-obrabeni/pruvodce-technologie-i-machining/>
 35. *iMachining by SolidCAM*. In: JEŘÁBEK, Zbyněk. *CAD* [online]. Praha [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <https://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/2376-imachining-by-solidcam.html>
 36. Výhody iMachingu: Zkrácení času obrábění o 70% a více na vašich stávajících CNC strojích!. *SolidCAM CAM Software: iMachinig - The Revolution in CAM!* [online]. [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://www.solidcam.cz/imachining-revoluce-v-cnc-obrabeni/vyhody-imachingu/>
 37. Technologie TrueMill. *3E Praha Engineering, a.s.* [online]. [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://3epraha.cz/technologie-truemill>
 38. TrueMill. *Surface finishing industry* [online]. 1996 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <https://www.surfacefinishing.com/doc/surfware-truemill-0001>
-

-
39. ALLCOCK, Andrew. Rules of engagement. *Machinery* [online]. 2011, 2011 [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <http://www.machinery.co.uk/machinery-features/cnc-toolpath-optimisation/30923/>
 40. Edgecam Waveform. *Edgecam: CAD CAM Software for 3D Milling* [online]. 2017 [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://www.edgecam.com/edgecam-waveform>
 41. SLATINOVÁ, Petra a Jindřich NEVAŘIL. Revoluční hrubovací strategie pro vysokorychlostní obrábění. *MM spektrum*[online]. **2012**(05) [cit. 2017-04-20]. Dostupné z: <http://www.digitovarna.cz/clanek-84/revolucni-hrubovaci-strategie-pro-vysokorychlostni-obrabeni.html>
 42. Waveform. *3E Praha Engineering* [online]. [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://3epraha.cz/waveform>
 43. Ukázky vysoce výkonného hrubování prostřednictvím softwaru VoluMill. *MM spektrum: Nejčtenější strojírenský časopis*[online]. [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/navsteva/ukazky-vysoce-vykonneho-hrubovani-prostrednictvim-softwaru-volumill.html>
 44. VoluMill - vysoce výkonné 2- a 3-osé hrubování pro CNC obrábění. *T-support: trvalá podpora vašich provozů* [online]. Praha [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <https://www.t-support.cz/kat/volumill-vysoce-vykonne-2-a-3-ose-hrubovani-pro-cnc-obrabeni>
 45. *Component Technology – There’s no fun without it. CAMzone* [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <https://mfgtalk.wordpress.com/tag/cadcam/>
 46. *VoluMill pro GibbsCAM. Gibbs CAM* [online]. [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <https://www.gibbscam.com/cs/solutions/gibbscam-modules/volumill-gibbscam#.WSIFf-vyiiS>
 47. KAKÁČ, Martin. *Technologie frézování na CNC obráběcím centru metodou VoluMill* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2016 [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/59538>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Miroslav Píška.
 48. Převodník. In: *Camservis* [online]. [cit. 2017-03-29]. Dostupné z: <http://www.camservis.cz/file-checker/prevodnik.png>
 49. ShopMill [online]. [cit. 25.04.2017]. Dostupné z: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/317/58503317/att_108303/v1/TUSM_0911_cz_cs-CZ.pdf
 50. VRBKA, Petr. *Parametrické programování v systému Sinumerik 810D* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2007 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: http://cadcam.fme.vutbr.cz/studentске_ prace/DP_Vrbka.pdf. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Aleš Polzer
-

-
51. LI, Xiongbing, Jiajia LIANG, Peijun NI, Yuguo WANG, Yongfeng SONG a Linjun TONG. Novel path generation algorithm for high-speed pocket milling. *International Journal of Production Research* [online]. Routledge, 2013, , 1-8 [cit. 2017-04-22]. DOI: 10.1080/00207543.2013.828172. ISSN 0020-7543.
 52. ZHU, Hu, Zhijun LIU a Jianhui FU. Spiral tool-path generation with constant scallop height for sheet metal CNC incremental forming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. London: Springer-Verlag, 1106, **54**(9), 911-919 [cit. 2017-04-22]. DOI: 10.1007/s00170-010-2996-5. ISSN 0268-3768.
 53. Značení hliníku a jeho slitin vč. stavů. *Be Group* [online]. 2017 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://www.begroup.com/cz/BE-Group-Czech-Republic/Produkty/Hlinik-1/znaeni-hliniku-a-jeho-slitin-v-stav/>
 54. 6061-T651 Wrought Aluminum Plate. *Speedy Metals: Online Industrial Metal Supply* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <https://www.speedymetals.com/information/Material6.html>
 55. Aluminum 6061-T6; 6061-T651. *ASM: Aerospace specification Metals* [online]. Pompano Beach [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=ma6061t6>
 56. Monolitní frézy [online]. *BOS HK, 2012* [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: http://www.bos-teplice.cz/dokumenty/Monolitni_frezy_2012_CZ.pdf
 57. *TECHNICKÉ INFORMACE* [online]. *ECatalog Pramet tools, 2012* [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: [http://ecat.pramet.com/img/PICTURES/SolidCutters/Main/Techinfo%20\(PDF\)/English/SolidEnd.pdf](http://ecat.pramet.com/img/PICTURES/SolidCutters/Main/Techinfo%20(PDF)/English/SolidEnd.pdf)
 58. HUMÁR, Anton. *Technologie 1: Studijní opory pro magisterskou formu studia* [online]. 2003. Brno [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
 59. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. První. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9
 60. Poloha frézy vůči obrobku. *Sandvik Coromand* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/getting_started/general_guidelines/cutter_position/pages/default.aspx
 61. Měrná řezná síla. *Sandvik Coromand* [online]. [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece_materials/the_specific_cutting_force/pages/default.aspx
 62. ISOISO N Neželezné materiály. *Sandvik Coromand* [online]. [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece_materials/iso_n_non_ferrous_materials/pages/default.aspx
 63. Frézování rohů. *Sandvik Coromand* [online]. [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/getting_started/general_guidelines/milling_in_corners/pages/default.aspx
-

64. Programování. *Sandvik Coromand* [online]. [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/getting_started/general_guidelines/programming/pages/default.aspx
65. VAŠÍČEK, Jiří. *Silové zatížení řezných nástrojů při frézování* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2014 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/33313>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Aleš Polzer

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

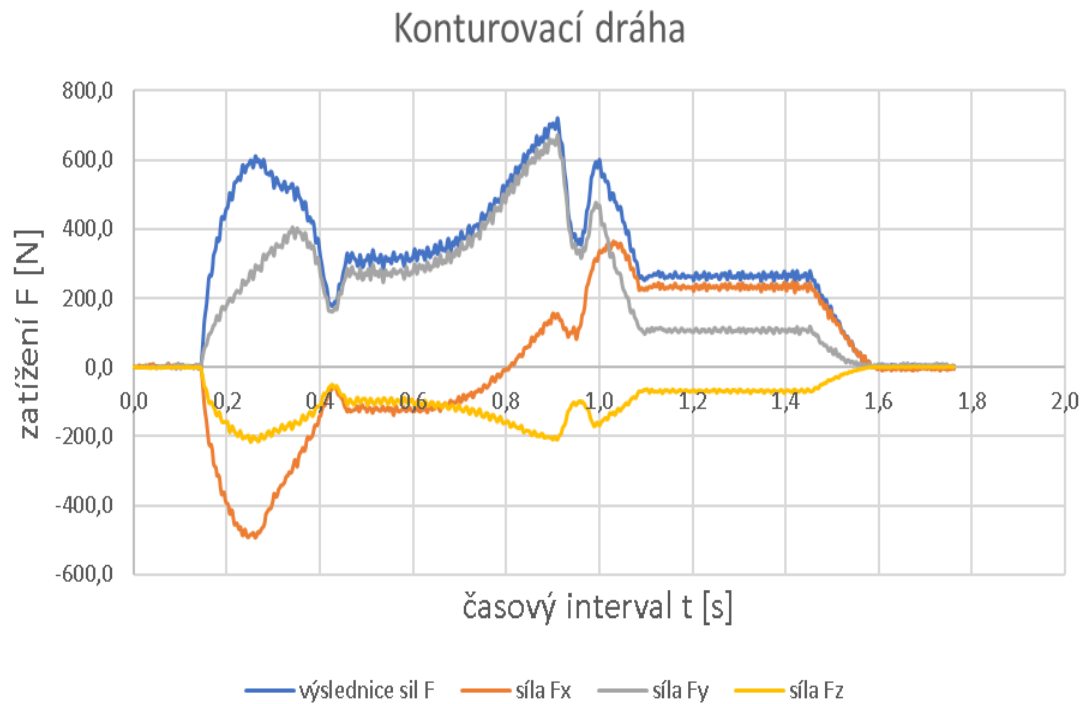
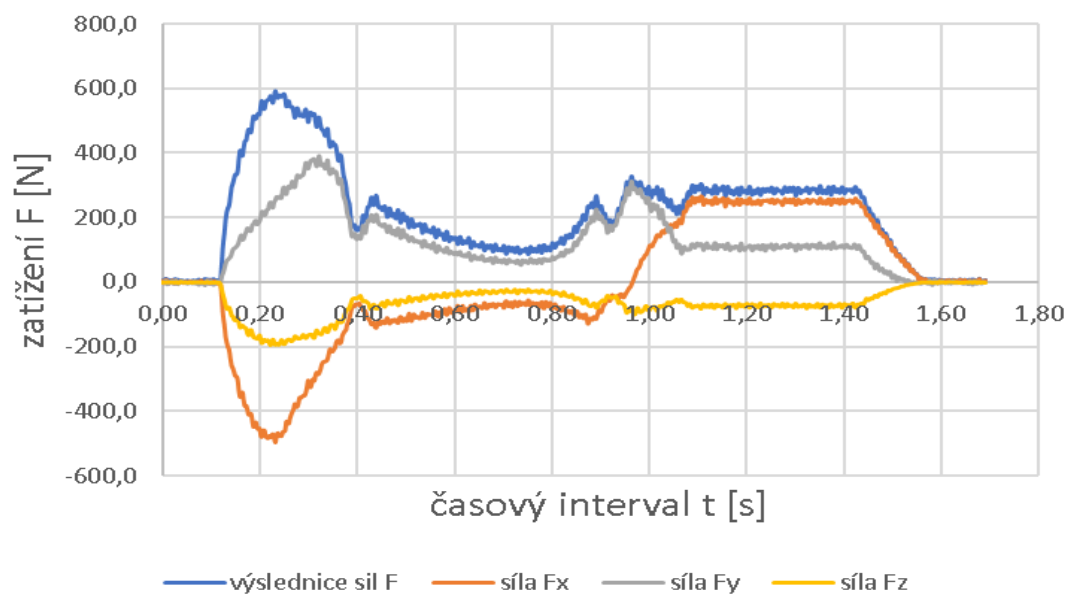
Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
A	%	Tažnost
A_{Di}	mm^2	Průřez třísky
CA	-	Computer Aided - počítačem podporované
CAD	-	Computer Aided Design - počítačem podporované navrhování
CAM	-	Computer Aided Manufacturing - počítačem podporovaná výroba
CL data	-	Cutting Location Data
CNC	-	Computer numeric control
E	GPa	Youngův modul pružnosti
D	mm	Průměr nástroje
F	N	Výsledné silové zatížení
F_{1m}	N	Výslednice sil v xy rovině
F_c	N	Tangenciální řezná síla
F_{cN}	N	Normálová řezná síla
F_f	N	Posuvová síla
F_{fN}	N	Normálová posuvová síla
F_p	N	Pasivní síla
F_x	N	Síla působící ve směru x
F_y	N	Síla působící ve směru y
F_z	N	Síla působící ve směru z
HB	-	Tvrdost podle Brinella
HFC	-	High Feed Cutting – vysokoposuvové obrábění
HPC	-	High Performance Cutting - Vysocevýkonné řezání
HSC	-	High Speed Cutting - Vysokorychlostní řezání
HSM	-	High Speed Milling - Vysokorychlostní frézování
HSS	-	High Speed Steel - rychlořezná ocel
IT	-	Rozměrová přesnost
L	mm	Celková délka nástroje
MKP	-	Metoda konečných prvků
NC	-	Numeric control – číslicově řízený
NURBS	-	Non-uniform rational basis spline- neuniformní racionální B-spline
P_c	kW	Řezný výkon
R_a	μm	Průměrná aritmetická úchylka
R_m	MPa	Mez pevnosti
$R_{p0,2}$	MPa	Smluvní mez kluzu
R_z	μm	největší výška profilu
T651	-	Tepelné zpracování hliníku-vytvrzení
a_p	mm	Axiální šířka záběru ostří
a_e	mm	Radiální šířka záběru ostří
b_D	mm	Jmenovitá tloušťka třísky
dh_6	mm	Průměr stopky

f_z	mm	Posuv na zub
f_n	mm	Posuv na otáčku
h_i	mm	Jmenovitý tloušťka třísky
k_{c1}	$N \cdot mm^{-2}$	Měrná řezná síla
k_c	$N \cdot mm^{-2}$	Skutečná měrná řezná síla
l_1	mm	Délka řezné části
m_c	-	Exponent vlivu tloušťky třísky
v_c	$mm \cdot min^{-1}$	Řezná rychlost
v_f	$mm \cdot min^{-1}$	Posuvová rychlost
n	min^{-1}	Otáčky nástroje
t	s	čas
x	-	Osa kartézského systému
y	-	Osa kartézského systému
z	-	Osa kartézského systému
Z_n	-	počet zubů frézy(břitů)
K_r	°	úhel nastavení hlavního ostří
ρ	g/cm^3	hustota
γ_o	°	ortogonální úhel čela
λ	°	úhel stoupání šroubovice nástroje
φ	°	úhel posuvového pohybu

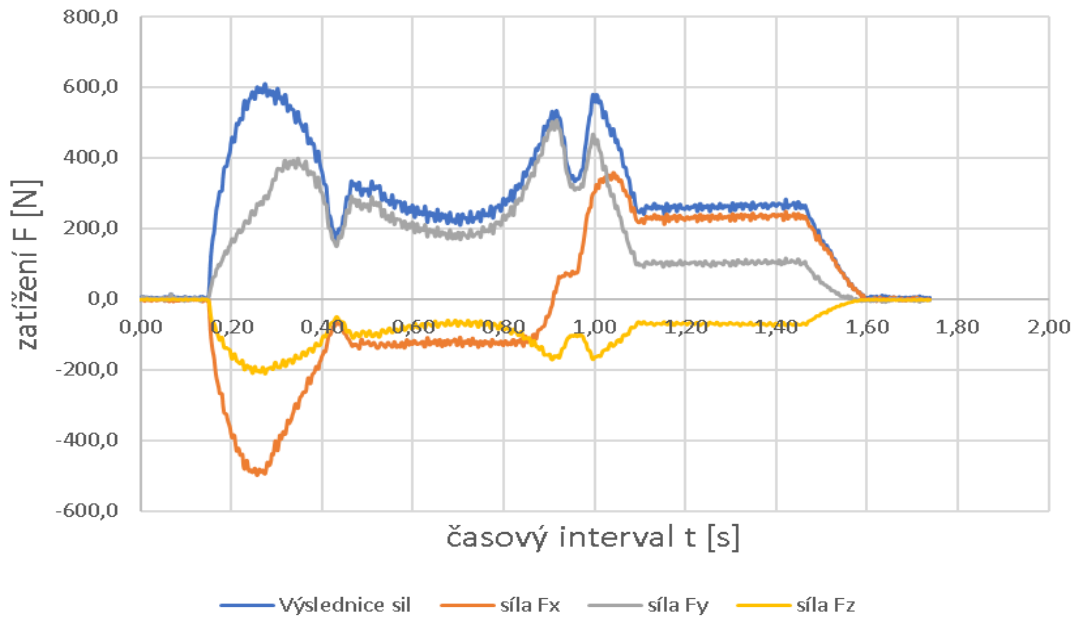
SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Změřené průběhy zatížení
- Příloha 2 Tabulky vypočtených hodnot řezné síly
- Příloha 3 CNC programy měřených dráh
- Příloha 4 Měření drsnosti na Surtronic S128
- Příloha 5 Upnutí vzorku ve stroji Tajmac-ZPS MCV 1210

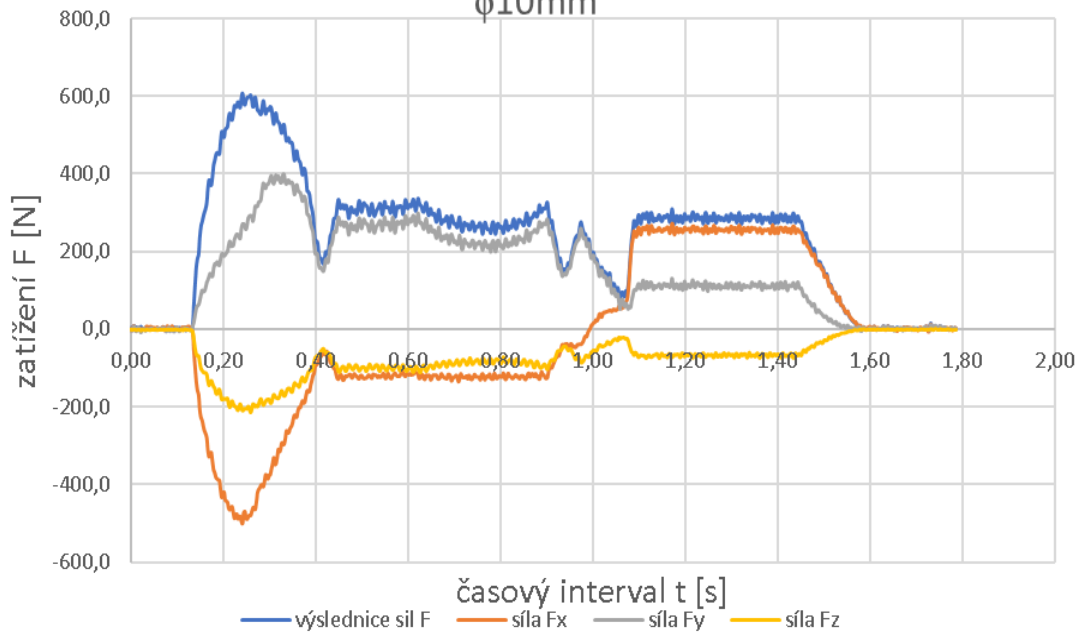
Změřené průběhy zatížení

Konturovací dráha s vyvrtáním ve středu
rádiusu $\phi 13$ mm

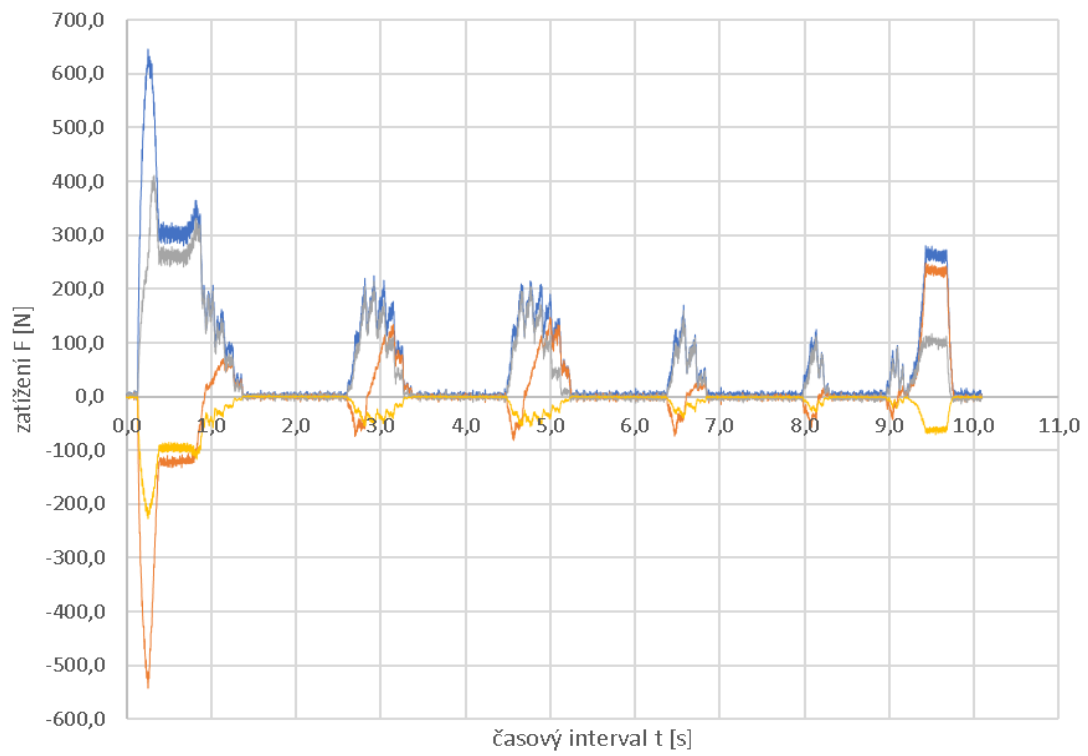
Konturovací dráha s vyvrtáním ve středu rádiusu $\phi 10\text{ mm}$



Konturovací dráha s vyvrtáním mimo střed rádiusu $\phi 10\text{ mm}$

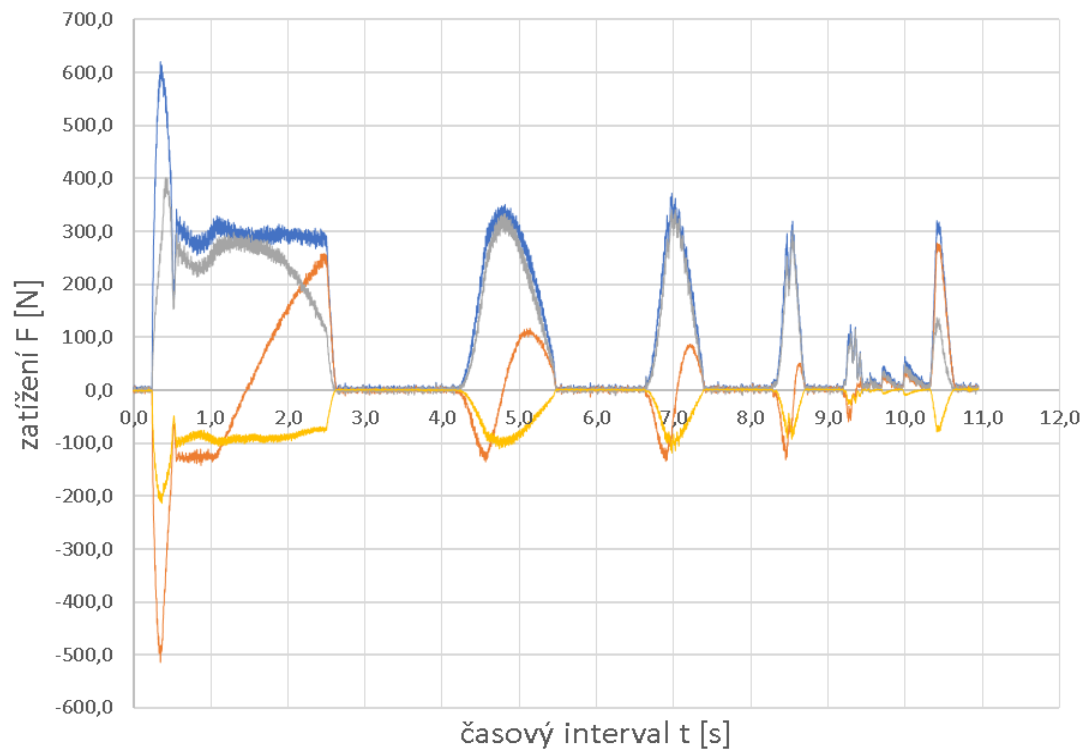


Trochoidní dráha



— výslednice sil F — síla Fx — síla Fy — síla Fz

Dráha Vortex



— výslednice sil F — síla Fx — síla Fy — síla Fz