



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

**ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ
A METROLOGIE**

OPTIMALIZACE HRUBOVÁNÍ VE 2,5D

DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTOR:

Bc. Jan Novotný

VEDOUČÍ PRÁCE:

Ing. Jan Tomíček, Ph.D.

STUDIJNÍ PROGRAM:

Výrobní inženýrství

Praha 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Novotný** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **484107**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Optimalizace hrubování ve 2,5D

Název diplomové práce anglicky:

2.5D rough milling optimization

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je analyzovat možnosti optimalizace hrubování kapes využitím 2,5D frézování. Tvar drah, délka obrábění a dosahované parametry je možné ovlivnit nastavením CAM, který generuje dráhy pro danou kapsu. Pro nastavení optimálních podmínek je tak nutné volit mezi více vzájemně propjenými parametry. Za účelem dosažení cíle práce proveďte:

1. Rešerši na téma 2,5D hrubování (zahrňte i technologické hodnocení procesu).
2. Zaměřte se na možnosti optimalizace daného procesu.
3. Na základě zjištění z rešerše navrhnete experiment určený pro ověření navržené optimalizační metody.
4. Proveďte experiment a zaznamenejte výsledky.
5. Proveďte hodnocení dosažených výsledků, proveďte analýzu.
6. Závěrečné vyhodnocení a doporučení.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jan Tomíček, Ph.D. ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **03.04.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2023**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Jan Tomíček, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Anotační list

Název práce:	Optimalizace hrubování ve 2,5D
Jméno autora:	Bc. Jan Novotný
Vedoucí práce:	Ing. Jan Tomíček, Ph.D.
Akademický rok:	2022 / 2023
Ústav:	Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Studijní obor:	Výrobní inženýrství
Klíčová slova:	Technologie obrábění; 2.5D frézování; hrubování; optimalizace obráběcího procesu; CAM; NX
Rozsah práce:	počet stran práce: 76 počet stran příloh: 21 počet obrázků: 75 počet tabulek: 39

Anotation

Thesis name:	2,5 D rough milling optimization
Author name:	Bc. Jan Novotný
Thesis supervisor:	Ing. Jan Tomíček, Ph.D.
Academic year:	2022 / 2023
Department:	Department of Machining, Process Planning and Metrology
Field of study:	Manufacturing engineering
Keywords:	Machining technology; 2.5D milling; roughing; machining process optimization; CAM; NX
Thesis extent:	number of pages of the thesis: 76 number of pages of appendices: 21 number of figures: 75 number of tables: 39

Abstrakt

Tato práce se zabývá optimalizací hrubovacího procesu ve 2,5D. Konkrétní aplikace je zaměřena na hrubování kapes. Řešební část obsahuje popis teorie obrábění s přihlédnutím převážně na mechaniku tvorby třísky, silové působení během obrábění, tepelné jevy a okrajově i na opotřebení nástroje. Dále jsou součástí i požadavky kladené na obráběcí stroje i nástroje. Důležitou částí jsou možnosti optimalizace obráběcího procesu a představení CAM softwarů včetně používaných strategií. V druhé části práce je navržen experimentální postup zjištění možností optimalizace hrubování kapes ve 2,5D. Tento postup je v průběhu postupně optimalizován. Na základě toho je provedena diskuze výsledků a následně vyvozeny příslušné závěry.

Abstract

This thesis deals with optimization of a roughing process in 2,5D. The specific application is focused on pocket roughing. The theoretical part contains a description of machining theory, taking into account mainly the mechanics of chip formation, force effects during machining, thermal effects and marginally also tool wear. Furthermore, the requirements for machine and machining tools are included. An important part is describing the possibilities of optimizing the machining process and an introduction to CAM software including the strategies used. In the second part of this thesis, an experimental procedure is proposed, finding out the possibilities of optimizing pocket roughing in 2,5D. This procedure is progressively optimized during the course of thesis creation. Based on this, a discussion of the given results is made together with appropriate conclusions.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona, ve znění pozdějších předpisů, zejména skutečnost, že České vysoké učení technické v Praze má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 citovaného zákona.

V Praze dne:

Bc. Jan Novotný

Poděkování

Rád bych touto formou poděkoval především vedoucímu této práce, panu Ing. Janu Tomíčkoví, Ph.D., za jeho čas a odborné vedení. Další dík patří i ostatním zaměstnancům Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie, kteří svou odbornou radou přispěli ke vzniku této práce. V neposlední řadě bych rád touto formou poděkoval i své rodině a nejbližším, kteří mne po celou dobu mého studia maximálně podporovali.

Seznam použitých zkratek

- **AC** - Adaptive Control
- **a_e** - radiální hloubka řezu (opásání nástroje)
- **a_p** - axiální hloubka řezu
- **CAD** - Computer Aided Design (počítačově podporované navrhování)
- **CAM** - Computer Aided Manufacturing (počítačově podporovaná výroba)
- **CNC** - Computer Numeric Control (počítačové numerické řízení)
- **f_{min}** - minutový posuv [mm/min]
- **f_z** - posuv na zub [mm/zub]
- **HFM** - High Feed Machining (obrábění vysokým posuvem)
- **HPM** - High Performance Machining (vysoce výkonné obrábění)
- **HRC** - vyjádření tvrdosti dle Rockwella
- **HSC** - High Speed Cutting (vysokorychlostní obrábění)
- **HSS** - High Speed Steel (rychlořezná ocel) - česky RO
- **MRR** - Material Removal Rate (úběr materiálu)
- **NO** - nástrojová ocel
- **PLM** - Product Lifecycle Management
- **PVD** - Physical Vapour Deposition (nízkoteplotní povlakování)
- **ŘK** - řezná keramika
- **SK** - slinutý karbid
- **TaC** - tantal karbid
- **TiC** - titan karbid
- **TiN** - titan nitrid
- **v_c** - řezná rychlost [m/min]
- **WC** - wolfram karbid

Obsah

1	Úvod	11
I	Teoretická část	12
2	Teorie obrábění	13
2.1	Rozdělení obrábění na základě odebíraného materiálu	13
2.1.1	Hrubování a dohrubování	13
2.1.2	Polodokončování a dokončování	13
2.2	Mechanika tvorby třísky	14
2.2.1	Oblast primární plastické deformace	15
2.2.2	Oblast sekundární plastické deformace	16
2.2.3	Oblast povrchové vrstvy řezu	17
2.3	Řezné síly při obrábění	18
2.3.1	Odvození řezné síly u čelního frézování	19
2.3.2	Určení řezných sil	20
2.3.3	Základní rozdělení dynamometrů	21
2.4	Tepelné jevy při obrábění	22
2.4.1	Praktické metody měření teploty řezání	23
2.5	Opotřebení a trvanlivost nástroje	23
2.5.1	Mechanismy a modely opotřebení nástrojů	23
2.5.2	Trvanlivost nástroje	26
3	Požadavky na frézovací stroje a nástroje	27
3.1	Požadavky na frézovací stroje	27
3.1.1	Požadavky na rám frézovacího stroje	28
3.2	Požadavky na materiál frézovací nástroje	28
3.2.1	Rychlořezné oceli	29
3.2.2	Slinuté karbidy	29
4	Optimalizace obráběcího procesu	31
4.1	Optimalizace technologie hrubování	32
4.1.1	Adaptivní frézování	32
4.1.2	Úhel opásání nástroje TEA	33
4.1.3	Vysoce výkonné frézování	35
4.2	Rychlost úběru materiálu	36

5	CAM software a hrubovací strategie	37
5.1	Popis vybraných CAM softwarů	37
5.1.1	Siemens NX	37
5.1.2	Autodesk PowerMill	38
5.2	Výběr nejpoužívanějších CAM hrubovacích strategií	38
5.2.1	Konturování	38
5.2.2	Řádkování	39
5.2.3	Trochoidní obrábění	40
5.2.4	Ponorné frézování	41
II	Experimentální část	42
6	Motivace k experimentální části	43
7	Podmínky experimentální části	45
7.1	Návrh zkušebních těles	45
7.2	Zvolené technologické podmínky	46
7.2.1	Materiál zkušebních těles	46
7.2.2	Používané nástroje	46
7.2.3	Řezné podmínky	46
7.3	Použité stroje/přístroje	47
8	Průběh experimentu	48
8.1	Iterace 1 - simulace NX	48
8.2	Iterace 2 - simulace NX	49
8.3	Iterace 3 - simulace NX	51
8.4	Iterace 4 - obrábění	51
8.4.1	Zjištění měrné řezné síly	52
8.4.2	Kontrola nástroje a zkušebního tělesa	55
8.5	Iterace 5 - obrábění	56
8.5.1	Kontrola nástroje	56
8.5.2	Zjištění měrné řezné síly	56
8.5.3	Kontrola nástroje a zkušebního tělesa	59
8.6	Iterace 6 - zpracování a odsimulování dat z obrábění	61
8.6.1	Simulace v NX	63
9	Diskuze výsledků	65
10	Závěr	67

III Přílohy	i
A Tabulky	ii
B Grafické závislosti	xvi
C DVD s datovými soubory	xxi

1. Úvod

Problematika optimalizace hrubování má obecně mnoho proměnných. Do optimalizačního procesu lze zahrnout působení řezných sil, tepelné působení, opotřebení nástroje, množství odebraného materiálu za čas, ekonomičnost procesu a mnoho dalšího. Ovšem nelze nebo spíše jen obtížně lze zahrnout vše do komplexního hodnocení a následné optimalizace. Jednou z omezujících podmínek této práce je zaměření se na optimalizaci 2,5D hrubování. Konkrétně se snahou aplikace na odfrézování kapes.

Existuje spousta možností, jak vyhotovit jednoduché kapsy pomocí různých frézovacích strategií. Ovšem na rozdíl od obrábění otevřených geometrií jsou kapsy o mnoho problematičtější, především z hlediska větší časové náročnosti, ale také i z hlediska nalezení optimálních řezných podmínek. Ovšem experimentální část této práce upozaduje právě nastavení řezných podmínek, jako je řezná rychlost a posuv. Snahou je zaměřit se na zkoumání vlivu nastavení záběrový podmíněk, jako je poměr mezi radiální a axiální hloubkou řezu. Právě toto nastavení může hrát velkou roli jak ve výsledné časové náročnosti obráběcího procesu, tak i v zatížení dané soustavy stroj / nástroj.

Cílem práce je především výzkum vlivu nastavení poměru právě těchto záběrových podmínek s primárním zaměřením se na výsledný čas obrábění. Ačkoliv experiment probíhá převážně v simulační rovině, součástí práce je i reálné experimentální podložení zachycení vlivu silového působení na obráběcí proces.

I. Teoretická část

2. Teorie obrábění

K analýze a popisu hrubovacích strategií je třeba nastínit a porozumět metodice obrábění i ze stránky teoretické. Obrábění je definováno jako oddělování materiálu z obrobku v důsledku relativního pohybu nástroje právě vůči obrobku. Při obrábění dochází ke tvoření třísky, k silovému působení nástroje na materiál obrobku a logicky i ke vzniku tepla. Proto je důležité si všechny tyto důsledky nejprve představit. [1]

2.1 Rozdělení obrábění na základě odebíraného materiálu

Obrábění samotné se dělí do několika kategorií. Na základě množství odebraného materiálu rozdělujeme obrábění na hrubování, dohrubování, polodokončování a dokončování.

2.1.1 Hrubování a dohrubování

Hrubovací operace při obrábění slouží především k rychlému a efektivnímu odebrání velkého množství materiálu a k prvotnímu hrubému tvarování polotovaru do požadovaného tvaru obráběné součásti. Po této operaci zůstává na součásti přídavek, který je dále odebrán následujícími operacemi. [2]

Hrubováním se především odstraní přebytečný materiál z polotovaru v co možná nejkratším čase, tím pádem jsou charakteristické velké posuvy a hloubky řezu. Tyto technologické podmínky úzce souvisí s požadavky na obráběcí stroj a použité nástroje. Při volbě podmínek je třeba brát ohled i na ekonomickou stránku věci. To znamená volit takové podmínky, které nám zajistí co možná nejkratší čas obrábění, ale zároveň i přijatelné náklady na použité nástroje. [2, 3]

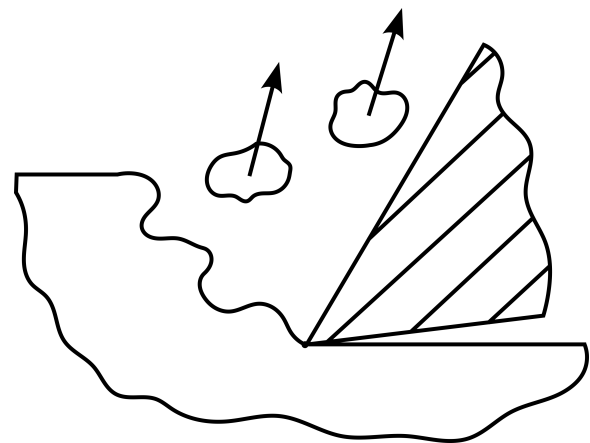
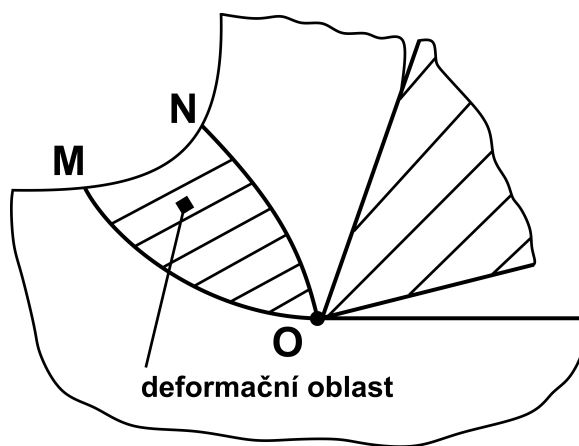
Po hrubování často následuje velice podobná operace, a to dohrubování. Jedná se také o operaci s cílem co nejrychleji odebrat velké množství materiálu, ale často se pro to využívá menšího nástroje a důraz je kladen hlavně na optimalizaci zbylého materiálu po hrubování. Například odstranění velkých schodů, či zmenšení rádiusů. [4]

2.1.2 Polodokončování a dokončování

Následující operace může být samotné dokončování nebo lze ještě využít mezi operaci polodokončování. Ta se využívá převážně pro odstranění nerovnoměrného přídavku. V CAM softwarech je polodokončování často zahrnuto v hrubovacích strategiích. Nakonec následuje již samotné dokončení povrchu, kdy se odebrá veškerý přídavek, a je tak kladen důraz na rozměrovou přesnost a integritu povrchu. Ideálně by mělo docházet k velmi malým úběrům materiálu a obecně se používají menší obráběcí rychlosti. Díky tomu jsme schopni dosahovat požadovaných kvalit. [3, 4]

2.2 Mechanika tvorby třísky

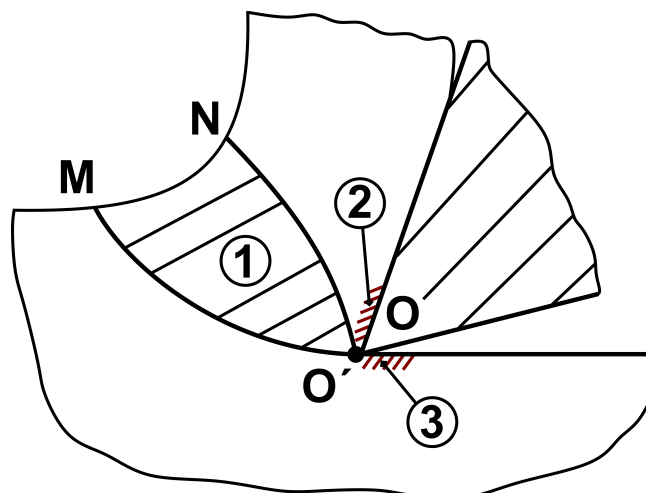
Jak již bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, obrábění je charakterizováno úběrem materiálu z obrobku ve formě třísek. Z pravidla rozlišujeme dva druhy vznikajících třísek, a to třísky tvářené (viz obrázek 1) a netvářené (viz obrázek 2). Vznik netvářené třísky není natolik častý, jelikož vzniká při obrábění například keramiky, dřeva, hornin či některých polymerních materiálů. Dochází doslova k vytrhávání jednotlivých kousků materiálu z obrobku. Daleko častější je vznik třísky tvářené. U naprosté většiny technických materiálů dochází u břitu řezného nástroje při kontaktu s obrobkem k plastické deformaci, a tím vzniká tříska tvářená. [1, 5]



Obrázek 1: Tvářená tříska - upraveno dle [1]

Obrázek 2: Netvářená tříska - upraveno dle [1]

Tvary třísek mohou být různého charakteru, ale lze je rozdělit do dvou hlavních kategorií, a to na soudržnou a elementární. Tvary třísek ovlivňuje mnoho faktorů, jako například obráběný materiál, plynulost záběru, geometrie břitu či řezné podmínky. Nicméně nelze zcela přesně stanovit vztah, který by univerzálně definoval takové parametry pro vhodné utváření třísek. Oblasti podmínek vhodného utváření třísek se zjišťují zcela experimentálně a liší se pro každý materiál. Zpravidla tyto informace přikládá výrobce do materiálového listu. Další způsob jak ovlivnit vhodné utváření třísek mohou být například utvářeče na nástrojích. [1]



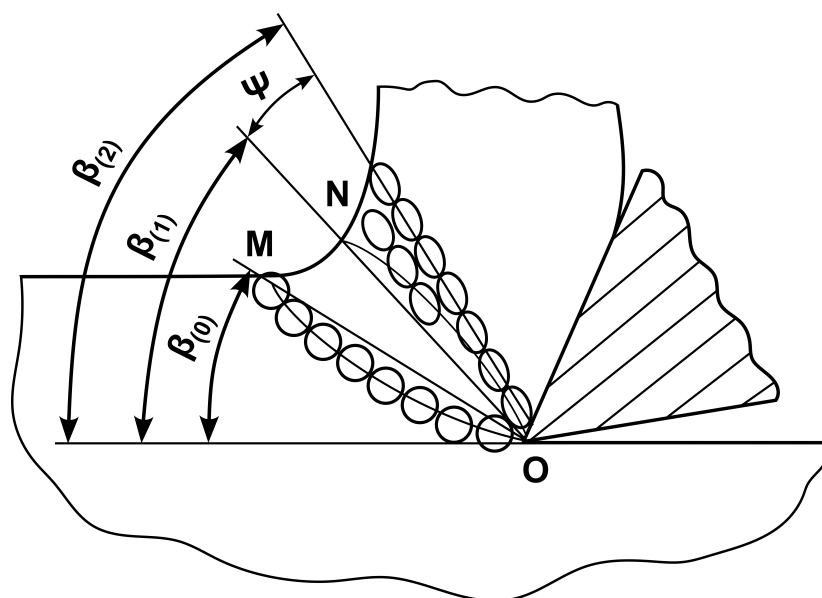
Obrázek 3: Oblasti plastických deformací - upraveno dle [1]

Z hlediska teorie vzniku tvářené třísky byl vytvořen zjednodušený model, který definuje jednotlivé deformační oblasti. Jednotlivé oblasti lze sledovat na obrázku 3. První oblast, označená číslicí „1“ nacházející se v rovině maximálních smykových deformací se nazývá oblast primární plastické deformace. Dále pod číslicí „2“ leží oblast sekundární plastické deformace, která zahrnuje tření třísky po čele nástroje. Poslední je oblast terciální plastické deformace, resp. povrchová vrstva obrobenej plochy. Ta zahrnuje tření nástroje o obrobenej povrch materiálu a má zároveň vliv i na výslednou kvalitu obrobenej povrchu. [1, 6]

2.2.1 Oblast primární plastické deformace

Název vychází z faktu, že zde materiál podléhá prvotní plastické deformaci. Materiál se nejprve zpevňuje, dokud nedojde k vyčerpání jeho plasticity a nedojde ke kluzu uvnitř materiálu. Tímto způsobem pak vznikají jednotlivé elementy třísky. V závislosti na materiálu a řezných podmínkách mohou být elementy krátké nebo mohou vznikat i dlouhé plynulé třísky. Z hlediska automatizace a efektivity procesu je žádoucí, aby jednotlivé elementy byly co nejkratší. [1, 5]

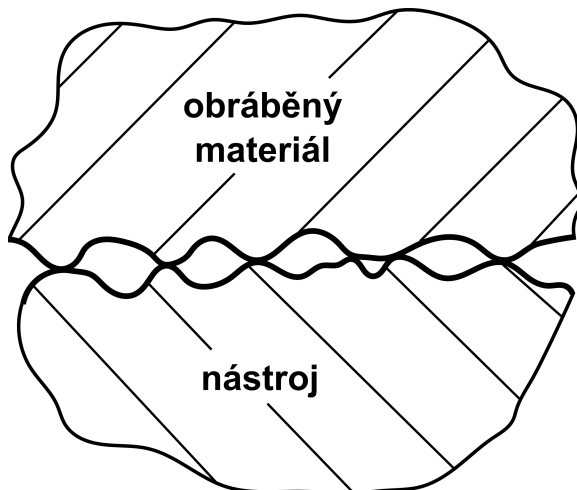
V oblasti primární plastické deformace se pro zjednodušení uvažuje převážně jako s rovinou. Na obrázku 4 lze pozorovat její vymezení, kde β_0 je úhel počátku primární plastické deformace a β_1 úhel konce primární plastické deformace, méně přesně ho lze nazvat i úhel střižné roviny. V návaznosti na deformaci dochází i ke změně struktury materiálu. Budeme-li zvažovat výchozí tvar zrn v řezu kruhový, tak po průchodu oblastí primární deformace se zrna budou deformovat na eliptický tvar. Směr hlavní poloosy těchto elips pak udává tzv. úhel příčné textury, který je na obrázku 4 popsán úhly β_2 a ψ . [1, 6]



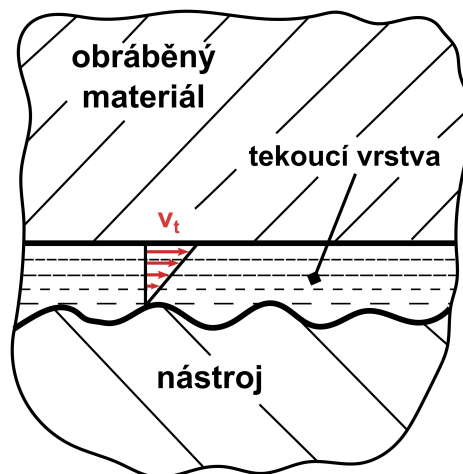
Obrázek 4: Vymezení oblasti primární plastické deformace - upraveno dle [1]

2.2.2 Oblast sekundární plastické deformace

Oblast sekundární plastické deformace vzniká vlivem působení síly, která nastává mezi čelem nástroje a obráběným materiálem a také v důsledku zvýšené teploty v oblasti řezu. Je důležité zmínit, že s oblastí sekundární plastické deformace souvisí také charakter styku nástroje se spodní stranou třísky obráběného materiálu. Rozlišujeme dva druhy styku, a to bodový (viz obrázek 5) a plošný (viz obrázek 6). [1, 5]



Obrázek 5: Bodový styk - upraveno dle [1]



Obrázek 6: Plošný styk - upraveno dle [1]

Bodový styk

Bodový styk je charakteristickým stykem břitu nástroje a obráběného materiálu pouze v určitých bodech. Tyto body jsou vrcholky mikronerovností obou povrchů. Vzniká při menším mechanickém a tepelném zatížení, tedy při nižších řezných rychlostech. Výhodou tohoto styku je možnost vniknutí řezného prostředí na plochu styku a zajištění mazacího účinku. [1]

Plošný styk

Plošný styk vzniká naopak za vyšších řezných rychlostí, kdy dochází k většímu mechanickému a tepelnému působení. Při tomto typu styku je charakteristický vznik tekoucí vrstvy na spodní straně třísky. [1]

Tvorba nárůstku

Vedlejší jev, který oblast sekundární plastické deformace může zapříčinit, je adheze obráběného materiálu a nástroji. Díky tomu může dojít k vytrhávání a následnému ulpívání malých částic obráběného materiálu na nástroji. Tyto částice se postupně hromadí, a vzniká tak nárůstek, který ovšem roste pouze do určité velikosti. Po dosažení této velikosti existují pak dvě možnosti, dle kterých nárůstky dělíme. [5]

Nárůstek může být stabilní, což se považuje za příhodnější možnost, jelikož dojde pouze k malé modifikaci geometrie nástroje a do určité míry nám nárůstek brání v opotřebování nástroje. Stabilní nárůstek pak může být žádoucí u hrubovacích operací, nicméně nelze předpokládat jeho vznik. Druhou možností je rozpad nárůstku po dosažení kritické velikosti

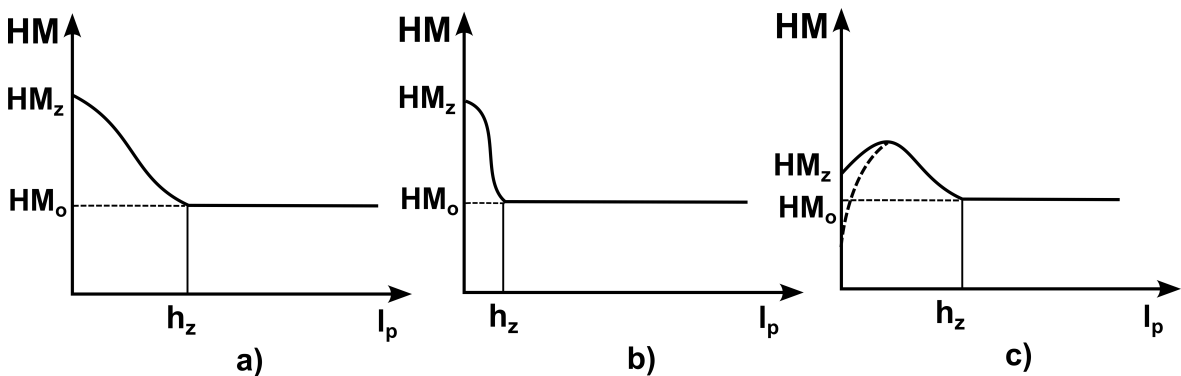
a následně jeho opětovný růst. Tento periodický jev není žádoucí, jelikož část rozpadajícího se nárůstku zůstává na obrobene ploše, zhoršuje tak jeho integritu a zároveň část je odvedena na spodní straně třísky. Jelikož materiál nárůstku prošel oblastí primární plastické deformace, tedy je zpevněný, má velký vliv i na opotřebení nástroje. [5]

2.2.3 Oblast povrchové vrstvy řezu

Drsnost a přesnost povrchu není pouze jediná charakteristika pro hodnocení kvality obrobene plochy. Celkově se o těchto charakteristikách hovoří jako o integritě povrchu. Kromě těchto topografických charakteristik sem řadíme i strukturní změny, vady, průběh zpevnění, průběh zbytkových pnutí a další. [5]

Samotná integrita povrchu je ovlivněna celou řadou faktorů. Vliv má vysoká teplota, která způsobuje strukturní změny a má vliv i na průběh zbytkových pnutí. Dále může mít vliv například poloměr ostří nástroje, kdy v závislosti na poloměru odchází určitá část materiálu pod břit, a tím dojde ke zpevnění plastickou deformací. Vliv mohou mít i další faktory, jako je tvorba nárůstku, opotřebení břitu či další geometrie nástroje. [5]

Na obrázku 7 jsou znázorněny typické průběhy zpevnění v povrchové vrstvě. Příklad „a“ je z hlediska funkčních vlastností příznivý. Největší mikrotvrdotost HM je na povrchu a směrem k jádru pozvolna klesá. U případu „b“ je sice tvrdost vysoká, ale díky prudkému poklesu hrozí odlupování povrchové vrstvy. Nakonec u případu „c“ lze pozorovat, že proběhla plastická deformace, kdy byla plasticita materiálu plně vyčerpána. Při dalším silovém působení došlo ke vzniku trhlin, což se projevuje na tvrdosti, kdy hodnoty HM můžou být dokonce nižší než výchozí tvrdost materiálu. [5]



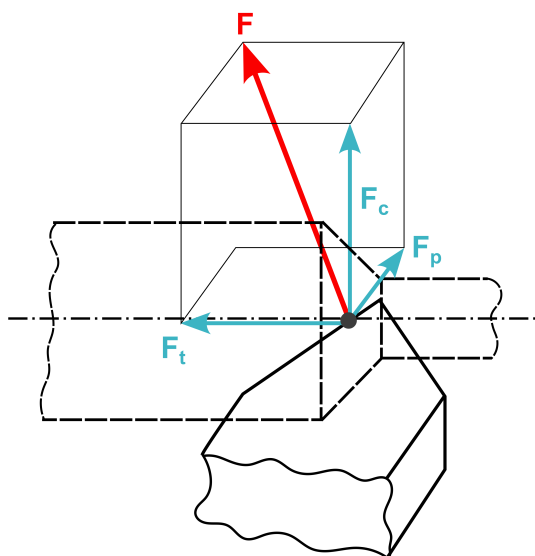
Obrázek 7: Typické průběhy zpevnění v povrchové vrstvě - upraveno dle [5]

Zbytková pnutí vznikají v povrchové vrstvě většinou v důsledku nerovnoměrné plastické deformace. Ovlivňujícími faktory může ale být i teplotní působení, strukturní změny či chemické procesy. Pokud ovšem při obrábění převažuje plastická deformace, ve většině případů dochází ke vzniku pouze tlakového napětí. Tento stav považujeme za výhodný, jelikož potenciální zárodky trhlin jsou tlakem zavírány. [5]

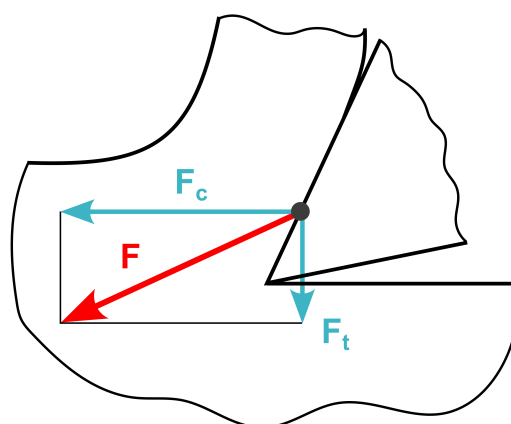
V případě současného tepelného a deformačního působení je horní nejteplejší část povrchu plasticky zkrácena. V důsledku chladnutí se poté v této části vrstvy vytvoří tahová napětí, která podporují růst trhlin a vznik únavových lomů. [5]

2.3 Řezné síly při obrábění

Obecně při určování řezných sil rozlišujeme dva druhy řezání, a to vázané (viz obrázek 8) a ortogonální (viz obrázek 9). Ortogonální řezání je charakteristické polohou síly řezání F v rovině kolmé na ostří. Tuto sílu pak lze rozdělit na složku řezné síly F_c a složku síly posuvu F_f . Tímto způsobem řezání se vyznačuje například frézování frézou s přímými zuby. Řezání vázané má na rozdíl od ortogonálního charakteristické tři složky řezné síly, tedy uvažuje se rozklad sil v prostoru. Skládá se z řezné síly F_c , síly posuvu F_f a pasivní síly F_p . Na obrázku 8 vlevo je vyobrazeno podélné soustružení, ale vázané řezání lze sledovat i například u vrtání nebo frézování frézou se šikmými zuby. [5, 7]



Obrázek 8: Síly při vázaném řezání - upraveno dle [5]



Obrázek 9: Síly při ortogonálním řezání - upraveno dle [5]

Řezná síla

Řezná síla působí ve směru vektoru řezné rychlosti, jinými slovy působí ve směru pohybu nástroje. Tato síla je největší a z celkového příkonu obráběcího procesu tvoří asi 99 %. [5, 7]

Síla posuvu

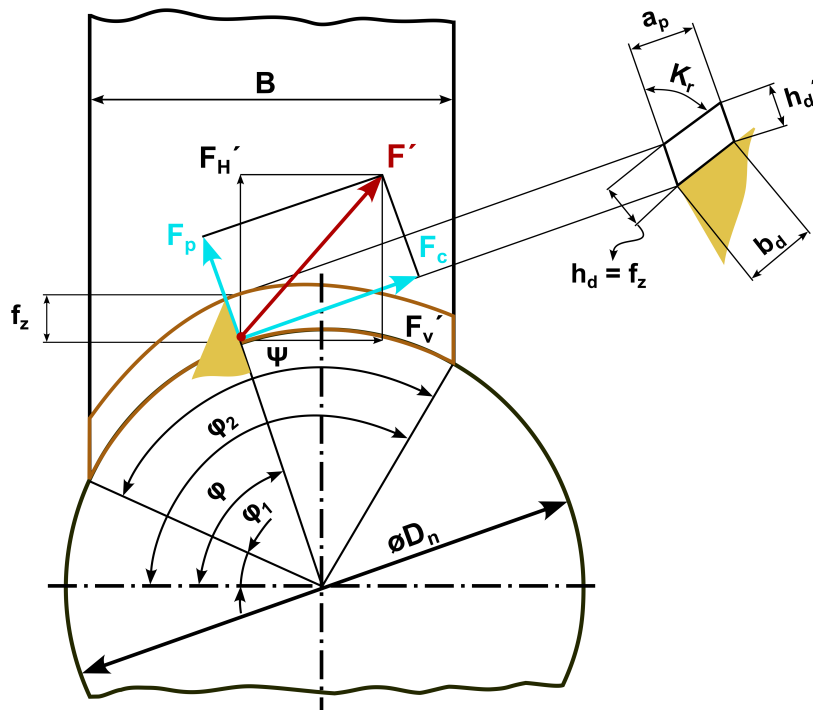
Síla posuvu působí ve směru posuvu a také ve směru největší tuhosti obráběcího stroje. Její velikost je asi 25 % velikosti řezné síly a na celkovém příkonu se podílí pouze nepatrně, jelikož velikost posuvu je v porovnání s řeznou rychlostí výrazně menší. [5, 7]

Pasivní síla

Jak již bylo zmíněno, pasivní síla působí pouze při vázaném řezání, a to kolmo na obrobenou plochu. Její velikost činí asi 40 % velikosti řezné síly a jelikož působí ve směru nejmenší tuhosti, má významný vliv na celé obrábění. Pasivní síla může ovlivňovat přesnost obrobené plochy nebo způsobovat chvění při obrábění. [5, 7]

2.3.1 Odvození řezné síly u čelního frézování

Teoretickou velikost tangencionální složky řezné síly lze odvodit pro jakýkoliv způsob obrábění. Vzhledem k zaměření experimentální části bude v této kapitole vyjádřeno pouze čelní frézování.



Obrázek 10: Příklad čelního frézování - upraveno dle [1]

Pro názornost je na obrázku 10 vyobrazen případ nesymetrického čelního frézování, ze kterého lze odvodit průřez odřezávané vrstvy pro obecnou polohu zubu. Tloušťka odřezávané vrstvy h_D , resp. šířka odřezávané vrstvy b_D pro obecnou polohu zubu danou úhlem φ jsou dány vztahy:

$$h_D = f_z \cdot \sin\varphi \cdot \sin\kappa_r \quad (2.1)$$

$$b_D = \frac{a_p}{\sin\kappa_r} \quad (2.2)$$

Průřez odřezávané vrstvy je pak dán vztahem:

$$A_D = h_D \cdot b_D = a_p \cdot f_z \cdot \sin\varphi \quad (2.3)$$

Předchozí vztah platí pouze, pokud je v záběru jen jeden zub. Pokud chceme uvažovat případ, kdy je v záběru více zubů, jak to u vícebřitých fréz bývá, je zapotřebí zahrnout efektivní počet zubů v záběru. Průřez je pak definován:

$$A'_D = a_p \cdot f_z \cdot \sum_{i=1}^{z'} \sin\varphi \quad (2.4)$$

kde z' je efektní počet zubů v záběru a spočítá se jako:

$$z' = \frac{z \cdot \sin \varphi_{max}}{360} \quad (2.5)$$

Velikost tangenciální složky řezné síly působící na jeden zub lze vyjádřit jako:

$$F_c = k_c \cdot A_D = k_c \cdot h_D \cdot b_D = k_c \cdot f_z \cdot a_p \cdot \sin \varphi \quad (2.6)$$

a při úvaze efektivního počtu zubů v záběru jako:

$$F_c = k_c \cdot f_z \cdot a_p \cdot \sum_{i=1}^{z'} \sin \varphi \quad (2.7)$$

kde k_c je měrná řezná síla. [1]

2.3.2 Určení řezných sil

Obecně se síla řezání zjišťuje měřením jednotlivých složek. K měření se používají různé typy dynamometrů, například mechanické, hydraulické nebo pneumatické. Dynamometry fungují na principu měření elastické deformace jeho určité části. Od toho, jakým způsobem je deformace měřena, se odvíjí právě typ dynamometru. Pro vzájemný vztah jednotlivých složek síly řezání a síly samotné pak platí:

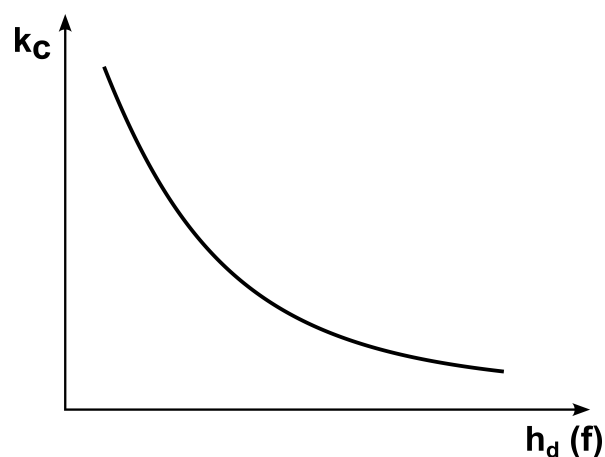
$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad (2.8)$$

kde všechny síly se uvažují v N. [5]

Důležitou silovou charakteristiku, kterou je potřeba zmínit je měrná řezná síla. Jinými slovy řezná síla vztahovaná na jednotku plochy řezu. Ta je dána vztahem:

$$k_c = \frac{f_c}{A_D} \quad (2.9)$$

kde k_c je právě měrná řezná síla daná v $\text{N} \cdot \text{mm}^2$ a A_D je průřez odřezávané vrstvy dané v mm^2 . [5]



Obrázek 11: Závislost měrné řezné síly na posuvu - upraveno dle [5]

Měrná řezná síla se výrazně mění v závislosti na různých parametrech. Svou roli hraje například obráběný materiál, použitý posuv, řezná síla, úhel řezu atd. Konkrétně posuv, resp. tloušťka odřezávané vrstvy, má na měrnou řeznou sílu významný vliv, jak lze sledovat na obrázku 11. [5]

Pro posuv pak platí:

$$k_c = \frac{C_{kc}}{f^{u_{kc}}} \quad (2.10)$$

kde f je posuv na otáčku v mm a C_{kc} , u_{kc} jsou empirické konstanty. Hodnoty u_{kc} se nejčastěji pohybují v rozmezí 0,15 - 0,3. [5]

2.3.3 Základní rozdělení dynamometrů

Rozdělení dynamometrů lze provést na základě několika kritérií. Může se jednat například o počet měřených složek síly řezání, pak dělíme dynamometry na jednosložkové, dvousložkové atd. Častější dělení je však dle aplikované měřicí metody. V tomto případě se jedná o dynamometry mechanické, pneumatické, hydraulické, elektrické a mnoho dalších. Nakonec lze dělit i dynamometry na základě metody obrábění, například pro soustružení, frézování, vrtání nebo dynamometry univerzální. [8]

Mechanické dynamometry

Mechanické dynamometry fungují tak, že síla je přenášena na měřicí prvek, jako například číselníkový úchylkoměr, buď přímo nebo znásobeně pomocí mechanického převodu. Velikost síly je určena podle deformace silových prvků, jako jsou třeba pružiny, kroužky, třmeny a nosníky. Tyto dynamometry, lze uvést třmenové pro zatížení do 10 000 N, nebo kruhové (prstencové) dynamometry pro vyšší zatížení, jsou jednoduché, spolehlivé a mají stálou přesnost v rozmezí 0,5-2 %. Nevýhodou těchto přístrojů je jejich závislost na teplotě, náročnost změny měřicího rozsahu nebo velká setrvačnost, což nedovoluje použití pro dynamická měření. [8]

Hydraulické dynamometry

Hydraulické dynamometry fungují na principu působení síly nebo momentu na píst či membránu v hydraulickém obvodu, a to se projevuje jako změna tlaku v kapalině. Tuto změnu je poté možné snímat pomocí manometru nebo jiného měřicího přístroje. Tyto dynamometry se vyznačují jednoduchou konstrukcí a schopností měřit více složek najednou, ale na druhou stranu jsou s nimi spojeny některé nedostatky, jako bývá nízká citlivost a nutnost dokonalého utěsnění systému. Tyto dynamometry nejsou vhodné pro měření dynamických veličin a v současnosti se používají pouze výjimečně. [8]

Pneumatické dynamometry

Základem pneumatických dynamometrů je měření deformace pomocí pneumatického systému skládajícího se z klapky a trysky, který využívá vlastností vzduchu proudícího štěrbinou. Tyto dynamometry jsou založeny na měření změny tlaku nebo průtoku v důsledku změny výtokového průřezu mezi klapkou a tryskou v deformačním prvku. Disponují výho-

dami představující snadnou obsluhu a údržbu, vysokou spolehlivost a citlivost ve srovnání s elektrickými metodami a též poměrně nízké náklady na nákup a provoz. [8]

Piezoelektrické dynamometry

Piezoelektrické dynamometry jsou založeny na snímání piezoelektrického jevu, kdy dochází ke vzniku elektrického náboje na povrchu určitých krystalů při mechanickém namáhání. Nejčastěji se používají křemen, titaničitan barnatý, Seignettova sůl a i jiné materiály. Základem piezoelektrického snímače je měřicí destička, která je vyříznuta z odpovídajícího krystalu. Velikost náboje přímo souvisí s velikostí působící síly a při snižování zatížení se náboj postupně snižuje, až zcela zmizí při nulovém zatížení. [8]

Existuje celá řada dalších typů dynamometrů, nicméně jejich definice by byla nad rámec této práce. Proto byly výše zmíněny jen základní typy.

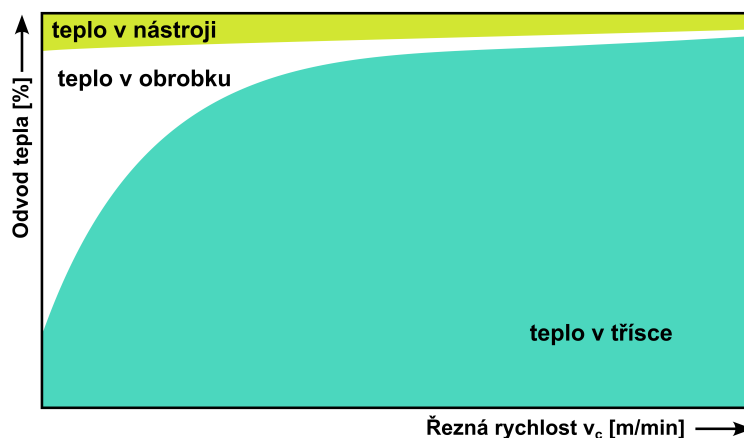
2.4 Tepelné jevy při obrábění

Při obrábění se prakticky všechna mechanická energie, která je vynaložena pro tvorbu třísky, přeměňuje na energii tepelnou. Procentuálně lze toto tvrzení vyjádřit přibližně 95-98 %. Zbytek energie je ukládáno jednak jako elastická energie v třískách, ale také ve zbytkové napjatosti obrobeného povrchu. Celkovou tepelnou energii, resp. celkové teplo pak můžeme definovat jako:

$$Q = Q_{S_h} + Q_{\gamma} + Q_{\alpha} + Q_{Ch} \cong E_e \quad (2.11)$$

kde Q_{S_h} značí teplo způsobené plastickou deformací ve smykové rovině, Q_{γ} je teplo způsobené třením mezi třískou a čelem nástroje, Q_{α} představuje teplo způsobené třením mezi obrobenou plochou a hřbetem nástroje a Q_{Ch} je teplo způsobené utvářením a dělením třísky. [6]

Vzniklá tepelná energie se poměrně odvádí nástrojem, obrobkem a třískou. Toto rozdělení není konstantní, jak lze sledovat na obrázku 12. Ovšem z velké části také závisí i na použité technologii. Například u soustružení se velká část tepla odvádí třískou a s rostoucí řeznou rychlostí se tento podíl dále zvyšuje. Extrémním případem může být obrábění řeznou keramikou, kdy až 95 % vzniklého tepla je odváděno do třísky. Naopak při broušení větší podíl tepla odvádí obrobek. [6]



Obrázek 12: Závislost odvodu tepla na řezné rychlosti - upraveno dle [9]

Obecně vzniklé teplo negativně ovlivňuje celý obráběcí proces. Má výrazný vliv na řezné účinky nástroje, na mechanické vlastnosti obráběného materiálu, ovlivňuje také přechování a zpevňování obráběného materiálu a má dopady na tření na čele i hřbetě nástroje. [6]

Při obrábění mohou vznikat dvě typická teplotní pole, jejichž vznik předchází rozdílná řezná rychlost. Při použití nižších řezných rychlostí je maximální teplota na ostří, resp. na špičce nástroje, naopak při obrábění vyššími řeznými rychlostmi dochází k posunutí bodu maximální teploty o určitou vzdálenost od ostří. Každé teplotní pole má určitý vliv na opotřebení nástroje, ale o tom více v následujících kapitolách. [5]

Při zkoumání tepelných jevů obráběcího procesu se zjišťuje střední teplota všech stykových míst mezi nástrojem a obrobkem, jinými slovy se jedná o teplotu řezání, která je vyjádřena jako funkce řezných podmínek empirickým vztahem:

$$\Theta_s = C_\Theta \cdot a_p^{y_\Theta} \cdot f^{z_\Theta} \cdot v_c^{z_\Theta} \quad (2.12)$$

kde θ_s je teplota řezání ve °C, C_Θ je empirická konstanta a x_Θ , y_Θ , z_Θ jsou empirické exponenty, jejichž velikosti se obvykle rovnají přibližně 0,1; 0,25 a 0,4. [5]

Z tohoto empirického vztahu lze pozorovat, která z řezných podmínek má na obráběcí proces největší vliv. To nám charakterizuje velikost právě zmíněných empirických exponentů. Největší vliv bude mít řezná podmínka s největším exponentem, tedy z uvedeného vztahu obecně platí, že největší vliv na teplotu řezání má řezná rychlost, poté posuv a nejmenší vliv má hloubka řezu. [5]

2.4.1 Praktické metody měření teploty řezání

Obecně je měření teploty řezání velmi problematické, jelikož se teplo rozkládá mezi jednotlivé členy obráběcího procesu a také se teplotní pole často mění v závislosti na pohybu nástroje, obrobku či času řezání. Pro měření se v praxi využívají termočlánky (přirozený, umělý), pyrometry (pro záznam teplotního pole), termokamery, kalorimetrické metody nebo se měří fázové přeměny vyvolané teplotou v třísece nebo nástroji. [6]

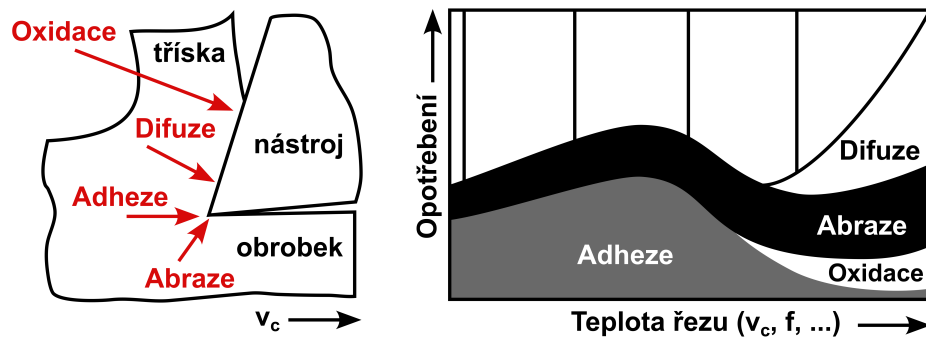
2.5 Opotřebení a trvanlivost nástroje

Životnost řezného nástroje je ovlivněna třením, což má vliv na kvalitu obrábění, náklady a produktivitu. Pokud opotřebení dosáhne kritické velikosti, zvyšuje se řezná síla, teplota a vibrace. Tyto aspekty mají za následek zhoršenou integritu povrchu a rozměrovou chybovost. Předpovídání tření hraje tedy klíčovou roli pro optimalizaci procesu. Přestože jsou k dispozici empirické rovnice životnosti, poskytují pouze informace o životnosti nástroje a nevysvětlují mechanismus opotřebení. Schopnost predikce opotřebení a profilu opotřebení je užitečná pro návrh materiálu a geometrie řezného nástroje. [10, 11]

2.5.1 Mechanismy a modely opotřebení nástrojů

Opotřebení nástroje není dáno pouze jedním faktorem, jako například samotné tření, ale kombinací několika různých faktorů. Mezi tyto faktory patří především teplota, dále mecha-

nické vlastnosti, chemické složení a struktura obráběného materiálu. Působením a vzájemnou kombinací rozlišujeme různé mechanismy opotřebení, a to především opotřebení otěrem, plastickou deformací a křehkým lomem. [5, 10]



Obrázek 13: Mechanismy opotřebení v závislosti na řezné rychlosti - upraveno dle [10]

Abrazivní otěr

Tento způsob opotřebení spočívá ve vybrušování měkčích částic materiálu nástroje částicemi tvrdšími v materiálu obrobku. Měkčími složkami v materiálu nástroje může být například ferit, kobalt, nikl atd. Naopak tvrdou složkou v materiálu obrobku může představovat například cementit. [5, 10]

Příčinou abrazivního otěru nemusí být pouze tvrdé částice v materiálu obrobku, ale také i části rozpadlého nárůstku, jehož tvrdost může být také relativně vysoká. Další vlivné částice mohou utkvět na povrchu po předchozí technologické operaci, jako například písek u odlitků. [5]

V kapitole 2.2.2 byl zmíněn charakter styku nástroje s obrobkem. Brusný otěr je typický při nižších řezných rychlostech, kdy dochází právě k bodovému styku. Tuto skutečnost lze sledovat i na obrázku 13, který zobrazuje závislost typu otěrového opotřebení na teplotě, resp. řezné rychlosti. Při zvýšení řezné rychlosti a tedy i zvýšení teploty v oblasti řezu, vzniká mezi nástrojem a obrobkem tekoucí plastická vrstva a k abrazi již tolik nedochází. Z tohoto faktu tedy vyplývá, že brusný otěr je charakteristický především u nástrojových a rychlořezných ocelích, kdy se nedosahuje příliš velké řezné rychlosti. [5]

Adhezní otěr

Adhezivní otěr je způsoben tvorbou a lomem adhezních spojů mezi nástrojem a obrobkem. De facto dochází k vytrhávání malých částic z břitu nástroje. Podobně jako abrazivní otěr je charakteristický zejména při nižších řezných rychlostech, kdy dochází k bodovému styku. Na rozdíl od brusného k němu při zvýšení řezné rychlosti prakticky nedochází. [5, 10]

Difuzní otěr

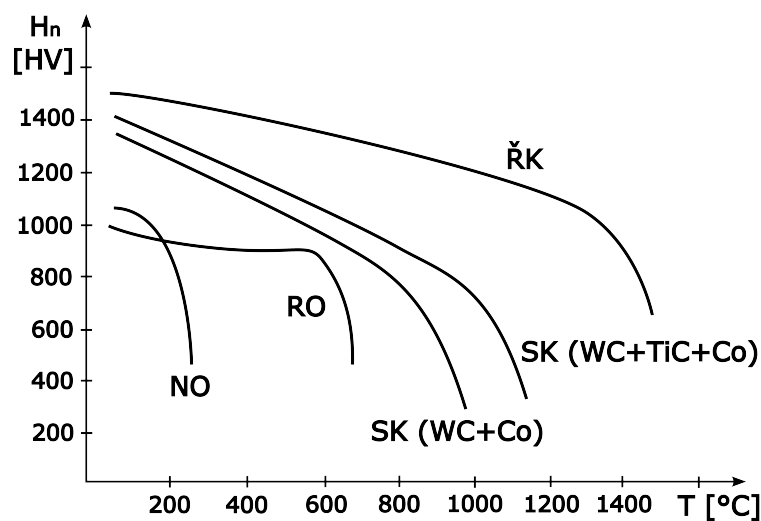
Difuzní opotřebení nástroje nastává především za zvýšené teploty, kdy s rostoucí teplotou exponenciálně roste rychlost difuze (viz obrázek 13). Opotřebení vzniká v důsledku přestupu hmoty z materiálu nástroje do obrobku. Jelikož je difuze charakteristická pro vysoké teploty,

dochází k tomuto opotřebení při obrábění pomocí slinutých karbidů, diamantu či řezné keramiky. [5, 10]

Chemický otěr

V důsledku oxidace vzdušným kyslíkem, ale také i působením řezných kapalin vzniká oxidická vrstva na povrchu nástroje. Mírná oxidace může mít i pozitivní vliv, jelikož izoluje nástroj a obrobek, a tím snižuje adhezi a difuzi. Ovšem při zvýšení rezné rychlosti, resp. teploty se začne oxidická vrstva zvětšovat a v důsledku snížení tvrdosti dochází k odstranění třískou a obrobkem. [5, 10]

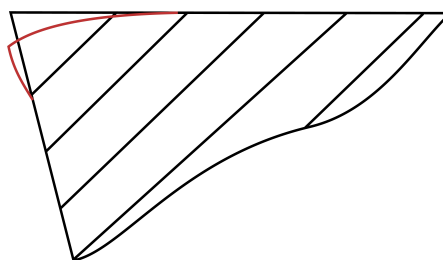
Dle rozložení teplot na čele nástroje lze předpokládat, že zde dochází ke kráterovému opotřebení především v důsledku abraze, difuze a oxidaci. Oproti tomu na hřbetu nástroje je dominantní abrazivní opotřebení v důsledku tvrdé druhé fáze v materiálu obrobku. [12]



Obrázek 14: Závislost tvrdosti řezných materiálů na teplotě - upraveno dle [10]

Plastická deformace

Opotřebení vlivem plastické deformace můžeme sledovat téměř u všech typů nástrojových materiálů. Vlivem vznikajícího tepla, po dosažení limitní teploty dochází k prudkému poklesu tvrdosti nástroje v důsledku strukturních změn. Jednotlivé poklesy v závislosti na teplotě lze pozorovat na obrázku 14. Jak je patrné z obrázku, pokles tvrdosti se pro každý materiál liší. Největší pokles zaznamenáváme obecně u nástrojových ocelích. [5]



Obrázek 15: Celková deformace břitu - upraveno dle [5]

Opotřebení plastickou deformací se projevuje vznikem slabé tekoucí vrstvy, skrze kterou dochází ke kontinuálnímu přesunu materiálu z povrchu nástroje většinou na povrch obrobku. Tento typ opotřebení se nazývá lavinovité opotřebení. V důsledku tohoto jevu dochází k úbytku značné části materiálu nástroje, což má vliv na celkovou přesnost celého procesu. Méně častým jevem, který je charakteristický pro tvrdší nástroje, příkladem mohou být slinuté karbidy, je celková deformace bříty. Tento jev lze sledovat na obrázku 15. [5]

Křehký lom

Narozdíl od plastické deformace nenastává křehký lom v důsledku zvýšené teploty, ale vlivem nadměrného silové působení. Křehký lom se poté projevuje jako vylomení větší části bříty, menších částic na ostří nástroje, a nebo dojde ke vzniku povrchových trhlin, které působí jako iniciátory pro další porušení. Křehký lom se obecně jeví jako velice nebezpečný druh opotřebení nástroje, jelikož vlivem odlomení kusu nástroje může dojít k závažnému poškození obráběcího stroje. [5]

2.5.2 Trvanlivost nástroje

Definice trvanlivosti nástroje byla již nastíněna v úvodu této kapitoly. Jedná se o dobu, tedy uvádí se v minutách, po kterou nový nástroj pracuje až do své výměny. Ukazatelem pro výměnu nástrojem by mohlo být kritérium opotřebení bříty, jinými slovy, nástroj by se měl vyměnit pokud dosáhne optimální velikosti opotřebení. [5]

Aby nedocházelo k nadměrnému opotřebení a krátké trvanlivosti nástroje, obráběcí procesy prochází různými optimalizacemi. Jedním z nástrojů pro optimalizaci je tzv. Taylorův vztah. Ten nám popisuje závislost trvanlivosti bříty na řezné rychlosti. Jednoduchý Taylorův vztah je definován jako:

$$T = \frac{C_T}{v_c^m} \quad (2.13)$$

Kde C_T , m jsou empirické konstanty a V_c řezná rychlost. Konstanta „ m “ nám charakterizuje kvalitu řezného nástroje a je možné jej nahradit exponentem „ n “, přičemž platí:

$$n = m^{-1} \quad (2.14)$$

3. Požadavky na frézovací stroje a nástroje

Obecně lze říci, že výsledek obrábění nezáleží pouze na zvolených řezných podmínkách, ale důležitou součástí procesu je i zvolený obráběcí stroj a nástroj. U hrubovacích operacích to platí dvojnásob, jelikož se využívají vysoké úběry a tím pádem jsou kladeny vyšší požadavky na tuhost obráběcího stroje a na výdrž a zachování vlastností obráběcího nástroje. V této kapitole budou shrnuty obecné požadavky kladené na obráběcí stroje a představeny možnosti volby správného nástrojového materiálu.

3.1 Požadavky na frézovací stroje

V zásadě lze definovat několik různých požadavků, na které je třeba dbát při návrhu použitého obráběcího stroje. Mezi základní požadavky a zásady lze zařadit:

- výkon obráběcího stroje,
- tuhost obráběcího stroje,
- pojezdové rozsahy stroje,
- tepelná stabilita stroje,
- vybavenost stroje (systém pro odvod třísek, různé indikační systémy, bezpečnostní systémy, zásobník pro automatickou výměnu nástrojů, a mnoho dalšího),
- přístupnost různých částí stroje (pro servisní a udržovací úkony),
- samotná konstrukce stroje (kvůli dopravě a umístění ve výrobní hale),
- upínací systém nástrojů,
- mazací a chladicí systém,
- řídicí systém a ovládací prvky na dostupném místě,
- u strojů s více pracovními místy možnost úplného ovládní z každého stanoviště. [13, 14, 15]

U parametru výkonu je důležité vědět, že maximální kroutící moment se udává pro konkrétní otáčky. Není tedy možné dosahovat maximálního kroutícího momentu v celém spektru otáček. Dále na parametr tuhosti nemá vliv pouze rám stroje, ale určuje se jako tuhost celé soustavy, včetně různých spojení, vedení či uložení. Průběh tuhosti tedy není lineární. [13]

3.1.1 Požadavky na rám frézovacího stroje

Ačkoliv na celkovou tuhost soustavy má vliv více částí, největší podíl zaujímá logicky rám. Rám je soustava těles, které mezi sebou přenáší účinky působících staticky i dynamických sil až na základ stroje. Má velký podíl na celkové přesnosti stroje, proto jsou na něj kladeny vysoké požadavky.

- Statická tuhost - vzniklé deformace na rámu v důsledku působení sil nesmí překročit dovolené hodnoty vzhledem k rozměrům výrobku. Je nutné zachování stálé polohy a tvaru jednotlivých částí rámu.
- Dynamická stabilita - jinými slovy odolnost vůči chvění. Samotné chvění způsobuje omezení využití veškerého výkonu stroje. Lze toto měřit mezní odebíranou hloubkou třísky, která musí být větší, než je maximální dovolená tříška v rámci určitých řezných podmínek.
- Tepelná stabilita, malé teplotní deformace. Souvisí s odvodem třísek, které jsou potenciálním zdrojem tepla na stroji. Proto je nutné zajistit jejich efektivní odvod.
- Snadná manipulace s výrobkem v rámci pracovního prostoru stroje.
- Celková velikost stroje.
- Hospodárnost výroby - čím jednodušší rám, tím snazší bude jeho výroba.
- Estetika a ergonomie. [14]

S ohledem na tuhost je nutné dbát i na volbu správného materiálu rámu. Ten by měl mít vysoký modul pružnosti, nízkou hustotu, malý koeficient tepelné roztažnosti, vysoké měrné teplo, dobrou tepelnou vodivost a také dobré tlumící vlastnosti. V dnešní době se na rámy používají nejčastěji šedá a tvárná litina nebo určitý typ oceli. [14]

3.2 Požadavky na materiál frézovací nástroje

Při volbě vhodného obráběcího nástroje je nutné dbát převážně na správnou volbu nástrojového materiálu, ale také například i na geometrii či konstrukčního řešení. V současné době existuje na trhu celá řada materiálů pro obráběcí nástroje. Požadavky na jejich vlastnosti jsou velice vysoké, ale také z části značně protichůdné, jelikož nelze vyrobit materiál, který by splňoval veškeré následující požadavky: [16]

- vysoká pevnost, tvrdost, odolnost vůči deformacím a opotřebení, a to i zachování těchto vlastností za zvýšené teploty,
- vysoká houževnatost a odolnost vůči křehkému porušení,
- odolnost vůči teplotnímu rázu,
- chemická stálost, odolnost vůči difuzi a oxidaci,

- snadná zpracovatelnost,
- dostupnost a přijatelná cena. [16]

Jak již bylo zmíněno, neexistuje materiál který by splňoval veškeré kladené požadavky. Proto se v průmyslu volí materiál dle převažujících splňujících požadavků. Jelikož představení všech existujících materiálů by bylo na rámec této práce, v následujících odstavcích budou představeny pouze ty dva nejpoužívanější, a to rychlořezná ocel a slinuté karbidy. [16]

3.2.1 Rychlořezné oceli

Rychlořezné oceli, známé taky pod zkratkou HSS (z anglického High Speed Cutting), nejsou již tolik využívány z důvodu postupného nahrazení slinutými karbidy. Avšak disponuje vlastnostmi, které jsou stále nenahraditelné, jako například jejich houževnatost, vyrobitelnost všemi dostupnými technologiemi nebo příznivá cena. Disponují také ale velkým omezením, a to je nižší tvrdost a hlavně pokles mechanických vlastností za zvýšených teplot. Jejich použitelnost se uvádí cca do 500-550 °C. [5, 16]

Rychlořezné oceli se dělí dle hlavního legujícího prvku na několik základních skupin, a to na wolframové, molybdenové a komplexně legované oceli W+Mo s přísadou Vanadu a dalších prvků. Wolfram se přidává v množství 6-18 % a vytváří tvrdé a odolné karbidy. Molybden se naopak přidává v množství 0,7-10 % a disponuje obdobnými vlastnostmi jako wolfram. Výhodou tohoto prvku je jeho větší intenzita, a proto není nutná tak velká koncentrace. Dále tvoří jemnější a ve struktuře jemněji rozložené karbidy, čímž je dána mnohem větší houževnatost oproti wolframovým ocelím. Z dalších prvků se přidává například vanad (tvrdé karbidy), chrom (prokalitelnost) nebo kobalt (teplotní odolnost). [5, 16]

Mechanické vlastnosti rychlořezných ocelí se mnohdy ještě vylepšují povlakováním. Povlakuje se metodou PVD, kvůli nízké popouštěcí teplotě ocelí a jako povlak se nejčastěji volí TiN. Tímto procesem se zvyšuje trvanlivost břitu až o 200 %. [5]

3.2.2 Slinuté karbidy

Slinuté karbidy, označovány jako SK, jsou tuhé roztoky karbidů kovů ve vhodném pojivu. Hlavní složkou karbidů je WC a TiC, jako pojivo se pak používá nejčastěji kobalt. SK vynikají vysokou tvrdostí a hlavně oproti HSS jsou mnohem více teplotně odolné. Uvádí se cca do 900 °C. Na druhou stranu jsou daleko méně houževnaté a mají nízkou teplotní vodivost. [16]

Slinuté karbidy se rozdělují na několik skupin dle chemického složení. Jednotlivé složky a jejich základní vlastnosti jsou následující:

- WC - nejzákladnější složka slinutých karbidů, zajišťuje pevnost břitu a odolnost vůči abrazivnímu opotřebení,
- TiC - zvyšuje odolnost vůči vymílání čela, ale snižuje odolnost vůči otěru, houževnatost a hlavně pevnost,
- Ta(Nb)C - v kombinaci s WC výrazně zvyšuje odolnost vůči opotřebení i při vysokých teplotách, houževnatost, mechanickou pevnost břitu a odolnost vůči teplotním rázům,

- Co - kobalt je nejběžnější pojivo využívané pro jeho houževnatost. Používá se v množství 6-20 %, kdy s rostoucím obsahem roste i celková houževnatost nástroje. [16]

V tabulce na obrázku 3.1 lze sledovat rozdělení do jednotlivých skupin, orientační složení a aplikaci konkrétního slinutého karbidu.

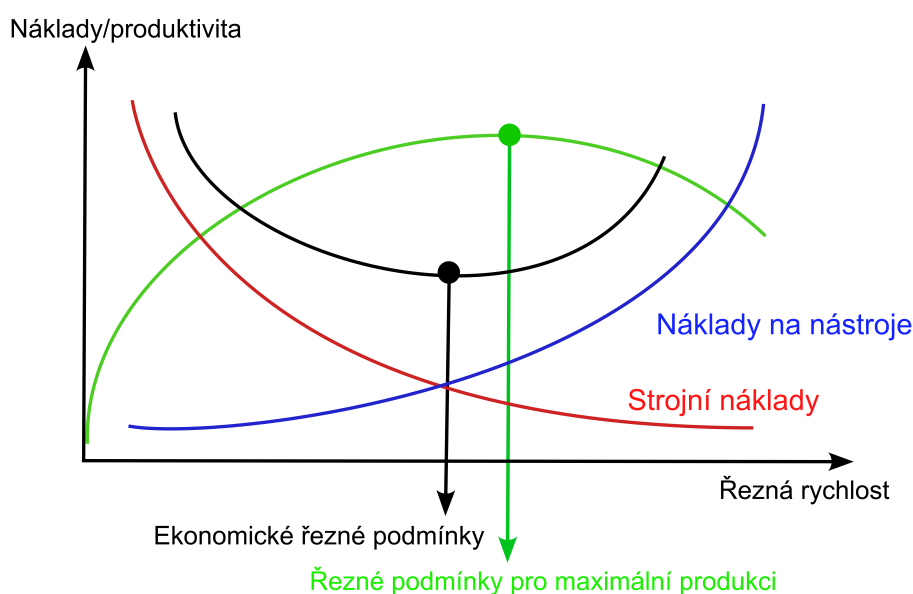
Tabulka 3.1: Rozdělení slinutých karbidů

Skupina	Podskupiny	Základní chem. složení	Aplikace
P	P01, 05, 10, 15, 20 až 50	WC (30-82) % + TiC (8-64) % + Co (5-17) % + (TaC.NbC)	materiály vytvářející dlouhou, plynulou třísku: nelegované, nízkolegované a vysoce legované oceli; lité, automatové, nástrojové, oceli; feritické a martenzitické korozivzdorné oceli
M	M01, 05, 10, 15, 20 až 40	WC (79-84) % + TiC (5-10) % + Co (6-15) % + TaC.NbC (4-7) %	materiály vytvářející dlouhou a střední třísku: austenitické a feriticko-austenitické korozivzdorné oceli, žáruvzdorné, žárupevné, otěruvzdorné oceli
K	K01, 05, 10, 15, 20 až 40	WC (87-92) % + Co (4-12) % + (TaC.NbC)	materiály vytvářející krátkou a drobnou třísku: nelegovaná a legovaná šedá litina; tvárná i temperovaná litina
N	N01, 05, 10, 15, 20 až 30		pro neželezné materiály: slitiny mědi, hliníku; duroplasty; fibry; tvrdá guma, ...
S	S01, 05, 10, 15, 20 až 30		žáruvzdorné slitiny na bázi Fe; superslitiny na bázi Ni nebo Co; titan a jeho slitiny
H	H01, 05, 10, 15, 20 až 30		zušlechtnuté oceli s pevností nad 1500 Mpa; kalené oceli HRC 48-60; tvrzené kokilové litiny

Na výrobu slinutých karbidů se využívá prášková metalurgie, kdy se směs prášků nalisuje do forem a následně se slinuje při teplotě cca 1400 °C. Mnohdy jsou po slinování nutné ještě dokončovací operace, jako například zpřesňující broušení, tryskání či kartáčování. [16]

4. Optimalizace obráběcího procesu

V oblasti strojírenské výroby je optimalizace obráběcího procesu důležitou ekonomickou záležitostí. S narůstající konkurencí jsou na podniky vyvíjeny stále větší nároky k dosažení co nejvyšší produktivity při co nejnižších výrobních nákladech. Optimalizace může být řešena z ekonomického hlediska pomocí výrobních nákladů. Graf na obrázku 16 ukazuje závislost mezi řeznou rychlostí, náklady a produktivitou. Exponenciální funkce reprezentují strojní náklady a náklady na nástroje v závislosti na řezné rychlosti. Parabola definuje součet těchto dvou nákladových funkcí, přičemž nejnižší bod paraboly představuje neekonomičtější volbu řezné rychlosti, která minimalizuje oba druhy nákladů. Graf také ukazuje závislost produktivity na řezné rychlosti, kde je patrné, že produktivita roste s řeznou rychlostí jen do určitého bodu, po kterém se zvyšuje opotřebení nástroje a nutnost častější výměny. [17]



Obrázek 16: Závislost minimálních nákladů ve spojení s maximální produktivitou - upraveno dle [17]

Spojením ekonomického hlediska a hlediska produktivity se vytváří oblast ideální řezné rychlosti. Výrobce může upřednostnit jedno z kritérií v závislosti na požadavcích výroby. Poté je zvolena optimální řezná rychlost spolu s dalšími parametry řezání. [17]

V současné době se více než jen o ekonomickou výhodnost podle strojních nákladů a nákladů na nástroje diskutuje o minimalizaci výrobního času. Pro tuto optimalizaci je možné pracovat se třemi základními řeznými parametry - hloubkou řezu, posuvem a řeznou rychlostí. Normativní model pro určení optimálních řezných podmínek zahrnuje několik kroků, včetně určení optimální trvanlivosti nástroje, hloubky řezu, velikosti posuvu a dopočtu řezné rychlosti. Tento model je doplněn o kontrolu výpočtů, aby respektoval maximální výkon stroje. Vzhledem k tomu, že tento normativní model nezahrnuje konkrétní parametry dané výroby, je výhodnější použít komplexní výpočet pomocí počítačové techniky, který

umožní určení optimálních řezných podmínek včetně trvanlivosti nástroje. Pro tento výpočet je nutné vložit konkrétní údaje o obráběcím procesu, jako jsou popis nástroje, stroje a řezného prostředí. [18, 19]

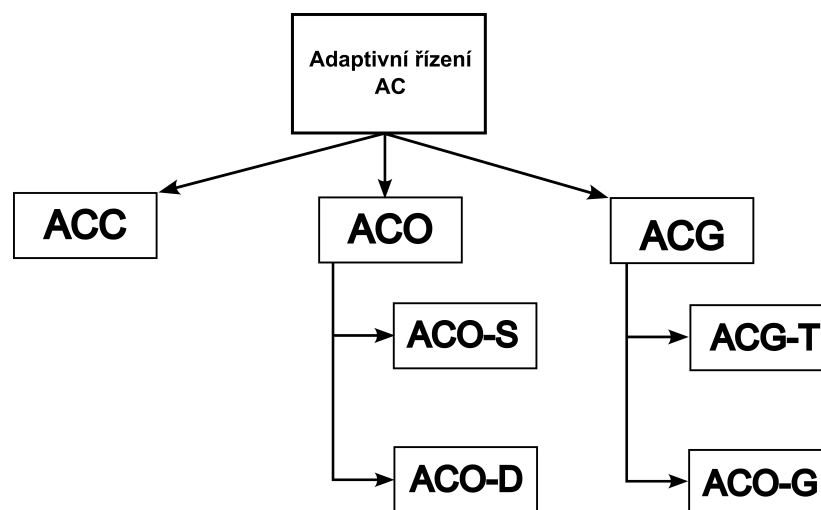
4.1 Optimalizace technologie hrubování

Následující odstavce jsou věnovány optimalizaci hrubovacího procesu. Jsou zde zmíněny technologické možnosti i optimalizační nástroje.

4.1.1 Adaptivní frézování

Adaptivní obrábění se vztahuje k upravování NC programů tak, aby mohly být přizpůsobeny variabilní geometrii dílu, což umožňuje vyrábět složité nebo proměnlivé geometrické tvary se stabilnějšími a konzistentnějšími výsledky. Opakovaná výroba součástí vyžaduje opakovaně použitelný stroj a proces, aby bylo zajištěno, že výrobek bude vždy zpracován stejným způsobem. Přestože je možné nastavit výrobní proces s minimálním zásahem operátora pomocí stabilního uchycení, stálých podmínek dodávky materiálu a opakovatelného stroje, tato úroveň stability není vždy dosažitelná. Odchytky v materiálu mohou způsobit nekonzistentní zatížení, které nelze při procesu obrábění předpovídat. Navíc, víceosé dráhy nástroje nemusí být zarovnané, když se k dílu přistupuje z různých orientací, což vede k delšímu času přípravy na díl, vyšší zmetkovitosti nebo ručnímu čištění po obrábění. [20, 21]

K realizaci adaptivní optimalizace se využívá limitních hodnot parametrů, mezi které patří výkon stroje, síla řezání, otáčky vřetena, teplota během řezání, opotřebení v čase a další faktory ovlivňující řezné podmínky. Tyto proměnné jsou regulovány adaptivními systémy, které rozlišujeme na několik typů. Základní rozdělení lze sledovat na obrázku 17. [18]



Obrázek 17: Rozdělení adaptivních řídicích systémů - upraveno dle [18]

První a úplně nejjednodušším systémem je systém ACC, neboli Adaptive Control Constraint. Při použití tohoto systému jsou optimalizovány pouze otáčky nebo posuv, ale není zohledňována jejich vzájemná vazba. Cílem optimalizace je dosáhnout maximálního úběru při dodržení omezení. Pokud adaptivní systém zjistí, že výkon při obrábění je nižší než maximální

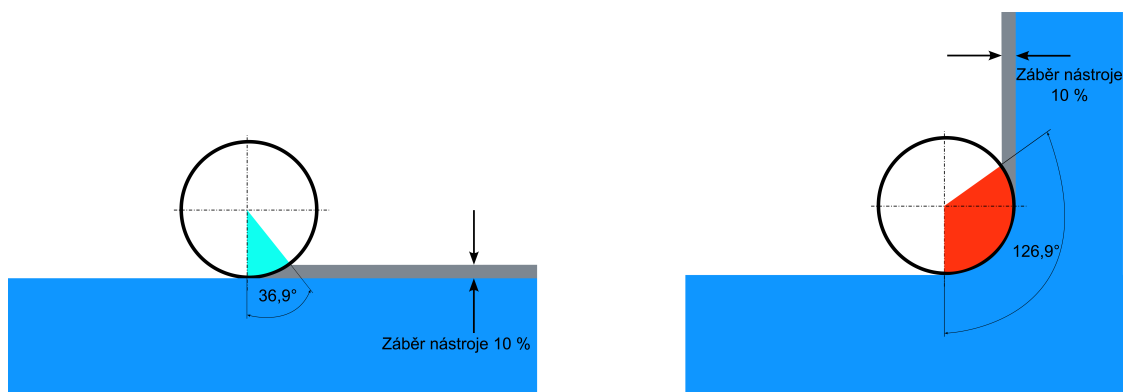
dovolený bezpečný výkon, systém zvýší posuv úměrně výkonu. Tento postup platí analogicky i při překročení maximálního výkonu stroje. [18]

Dalším stupněm adaptivních systémů je systém ACO, neboli Adaptive Control Optimization. Tento systém se podobá systému ACC s tím rozdílem, že dokáže regulovat řeznou rychlost v závislosti na posuvu a optimalizuje tak proces na minimální náklady nebo maximální produktivitu. Tento systém bere v úvahu vazbu mezi řeznými podmínkami a trvanlivostí nástroje a vypočítává dráhu nástroje tak, aby bylo v každém okamžiku dodrženo dané zatížení nástroje. To vede k prodloužení životnosti nástroje a zkrácení výrobních časů. Řídicími veličinami jsou obvykle příkon stroje, řezné síly, kroučící moment nebo drsnost obrobené plochy. Pro výpočet potřebujeme počítač, který je součástí řídicího systému obráběcího stroje. [18]

Poslední zde stojí za zmínku systém systém ACG, neboli Adaptive Control Geometry. Tento systém má velmi blízko k systémům ACC a ACO, ale cílovým parametrem je požadovaná přesnost, resp. drsnost obrobené plochy. Ačkoliv se upřednostňují tyto podmínky, systém stále dbá i na ekonomickou stránku věci. [18]

4.1.2 Úhel opásání nástroje TEA

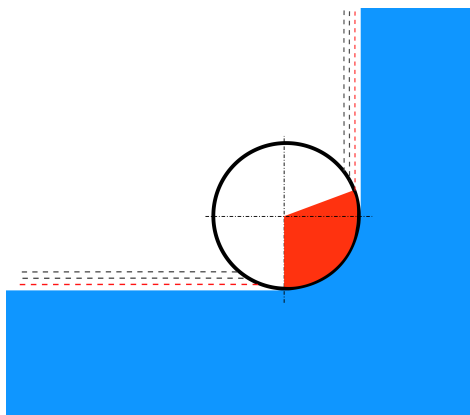
Během frézování se významně mění působení řezné síly. Důsledkem těchto změn je úhel opásání nástroje TEA. Zkratka plyne z anglického Tool Engagement Angle a je definován jako úhel mezi místem nájezdu břitu do materiálu a místem ukončení řezu břitu. Typická situace je při nájezdu do vnitřního rohu kapsy. Při této situaci se rapidně zvyšuje úhel záběru nástroje, a to může mít negativní dopad na výkon a kvalitu celého procesu. Zejména tak může docházet k vibracím, průhybu nástroje, nežádoucím zvukům při obrábění a v nejhorším případě ke zlomení nástroje. [22, 23]



Obrázek 18: Demonstrativní příklad změny úhlu opásání TEA - upraveno dle [24]

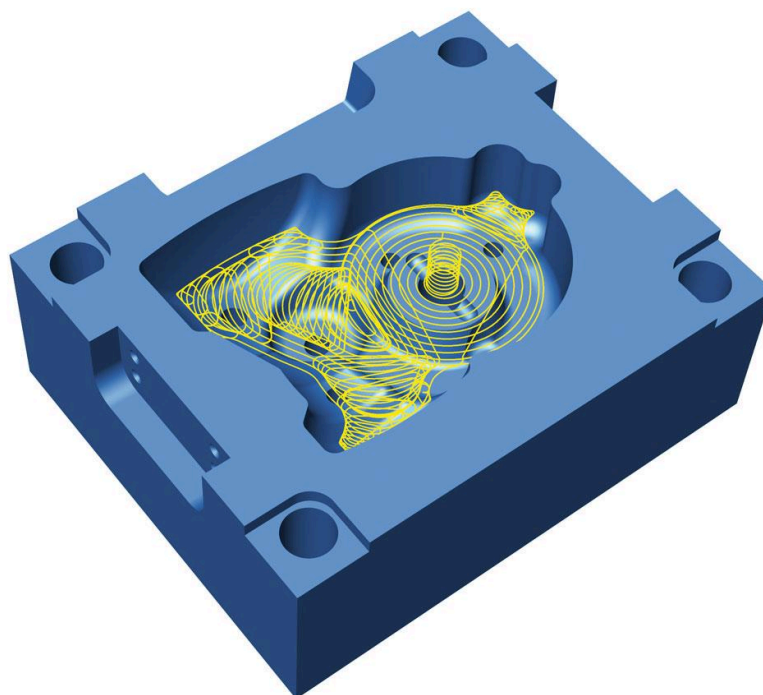
Na obrázku 18 lze sledovat, jak vypadá obrábění za použití klasických strategií, které neberou v potaz úhel opásání TEA. Při nastavení 10% záběru nástroje odpovídá TEA 36,9° při obrábění po přímce s konstantní radiální hloubkou. V případě, že nástroj dorazí do vnitřního rohu, TEA se zvýší až na 126,9°, což může mít za následek dopady zmíněné výše. [24]

Jednou z možností jak se s tímto jevem vypořádat bez použití speciálních strategií je volba menší radiální hloubky řezu a poloměru nástroje, který odpovídá poloměru součásti, jak lze sledovat na obrázku 19. To nám do jisté míry pomůže řídit úhel záběru, ale při konečném průchodu bude úhel opásání stále velmi vysoký. [25]



Obrázek 19: Efektivnější přístup pro rohový záběr - upraveno dle [24]

Nejefektivnější způsob představuje používání menších nástrojů, než je poloměr součásti a využívání speciálních strategií, které nabízí CAM softwary. Tyto strategie generují dráhy tak, aby nebyl překročen maximální úhel opásání. I když generované dráhy mohou vypadat na první pohled dosti chaotické a neuspořádané, jak lze sledovat na obrázku 20, ve výsledku udržují proces obrábění konstantní a stabilní. Díky tomu lze používat i mnohem vyšší podmínky, než jsou doporučené výrobcem, a tedy tím snižovat výrobní časy. [25]

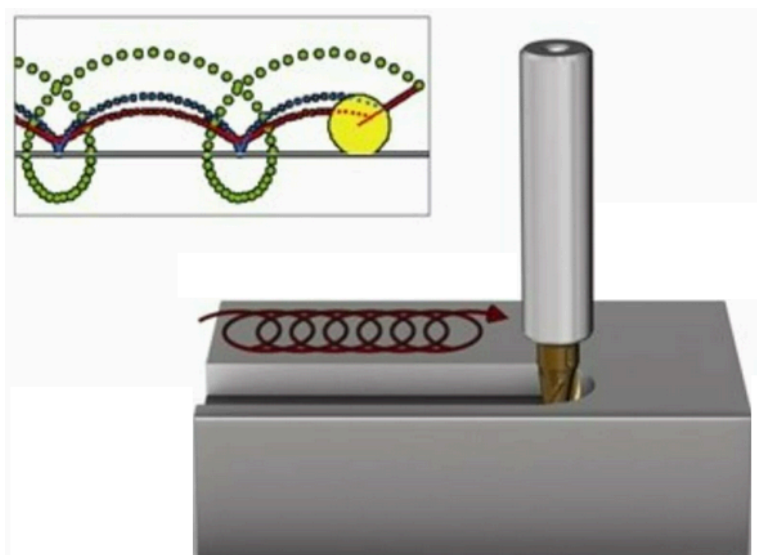


Obrázek 20: Ukázka drah využívající optimální velikost TEA [25]

4.1.3 Vysoce výkonné frézování

Pro vysoce výkonné frézování se používají strategie, které využívají principů zmíněných v předchozích odstavcích. Díky tomu lze tuto strategii rozdělit na tři technologické způsoby frézování. Tyto způsoby optimalizace umožňují využití tří různých vlastností ostří nástroje, jako je řezný materiál, řezná geometrie a celková pevnost ostří. Který z těchto postupů je pro danou situaci nejvhodnější, závisí na několika technologických faktorech, například na stabilitě obráběcího stroje a obrobku, materiálu obrobku a požadované kvalitě povrchu. [26]

Prvním způsobem, jehož princip je založen na vysoké nákladové efektivitě a vysoké produktivitě, je tzv. HPM (z anglického High Performance Machining). Český název by mohl být vysoce výkonné frézování, neboli frézování s velkou hloubkou řezu. Při tomto frézování se využívají frézy s možností nastavení velké axiální i radiální hloubky řezu. Posuv a řezná rychlost se nastavuje přiměřeně dle zatížení. Jelikož se volí velké hloubky řezu, je požadován stabilní proces, tedy je nutné využívat stroje s vysokou tuhostí a dostatečným výkonem. S touto metodou úzce souvisí například technologie Peel Milling neboli metoda jemného řádkování, která je charakteristická malou radiální hloubkou a naopak velkou axiální hloubkou řezu a vysokou řeznou rychlostí, jak lze pozorovat na obrázku 21. [26]



Obrázek 21: Technologie Peel Milling [26]

Další způsob frézování je HFM (z anglického High Feed Machining), neboli frézování vysokým posuvem. Pro tuto technologii jsou charakteristické menší axiální hloubky řezu a naopak vyšší radiální hloubky řezu a vysoké posuvy a řezné rychlosti. HFM je možné používat i u méně stabilních operací, jako je například hrubování s frézou s dlouhým vyložení. [26]

Posledním způsobem frézování můžeme zmínit HSC (z anglického High Speed Cutting), neboli vysokorychlostní frézování. Pro HSC se používají malé hloubky řezu, malé posuvy a naopak velmi vysoké řezné rychlosti. Důležitým faktorem je také používání tvrdých nástrojů s ostrými břity. Obecně je princip této technologie založen na skutečnosti velkého nárůstu teploty v místě oddělování třísky při zvyšování řezné rychlosti. Při dostatečné teplotě materiál

začne měknout a tím pádem dojde i k poklesu řezné síly a proces se zdá být mnohem efektivnější a ekonomičtější. Nicméně nelze zvedat řeznou rychlost bez následků do nekonečna. V závislosti na řezném materiálu, materiálu obrobku a mnoha dalších faktorech, do určité řezné rychlosti bude proces skutečně efektivnější. Nicméně po překročení tohoto bodu začne opotřebením nástroje rapidně růst a náklady budou převyšovat kladné stránky věci. Je tedy důležité, najít optimum využití tohoto způsobu frézování (viz obrázek 16). [13, 26]

4.2 Rychlost úběru materiálu

Rychlost úběru materiálu nebo také míra odstraňování materiálu, značeno zkratkou MMR (z anglického Material Removal Rate) je množství materiálu odstraněného za jednotku času, které přímo ovlivňuje produktivitu procesu. Při hrubovacích operacích a výrobě velkých sérií je potřeba tuto míru maximalizovat. Nicméně při dokončovacích operacích se tento faktor musí odložit a na první místo se dostávají parametry jako je drsnost nebo přesnost. Pro dosažení nízké drsnosti se obvykle používají nízké řezné rychlosti a posuv na zub, MRR je pak při dokončování velmi nízká. [27]

Existuje několik způsobů, jak vyhodnotit MRR (ekvivalentně značeno jako Q), následující způsob je pro okamžitý výpočet pomocí diferenciálního počtu:

$$Q = v_c \cdot A_c \quad (4.1)$$

kde Q je MRR v mm^3/min , v je řezná rychlost v m/min a A je velikost třísky v mm^2 . [27]

Velikost třísky se pak vypočítá jako:

$$A_c = h \cdot b \quad (4.2)$$

kde h je tloušťka třísky v mm , b je šířka třísky (obvykle axiální hloubka řezu) v mm . Tloušťka třísky závisí na radiální hloubce řezu a_e a úhlu nástroje κ_r . Hodnota tloušťky je závislá na úhlu otáčení, tedy velikost třísky je také proměnná. [27]

Vzhledem k rovnici 4.1 a přímému vztahu mezi řeznou silou a velikostí třísky, je MRR tedy spojena s výkonem spotřebovaným při obrábění. Okamžitá MRR není příliš užitečná. Jinou hodnotou je průměrná MRR, měřená a vypočítaná jako podíl celkového množství odstraněného materiálu a času provádění operace. Matematické vyjádření tohoto produktivního parametru je následující: [27]

$$Q = \frac{V_{trisky}}{T_{celk}} = a_p \cdot a_e \cdot v_f \quad (4.3)$$

5. CAM software a hrubovací strategie

Zkratka CAM vychází z anglického Computer Aided Manufacturing neboli v překladu počítačem podporovaná výroba. Jeho hlavní funkcí je sloučení návrhu v CAD a fyzické výroby. CAD software zahrnuje počítačovou podporu pro návrh výrobku. Jakmile konstruktér nebo inženýr dokončí model součásti v CAD programu, exportuje ho do CAM systému. Tento systém pak vytváří instrukce pro výrobní stroj, který vytváří součást. Tyto instrukce stroji říkají, kam a jak se má pohybovat, aby výsledný produkt odpovídal specifikacím. [28]

CAM software nám přináší nespočet výhod, jako je především rychlost tvorby NC kódu. Čas se ale nemusí ušetřit jen na přípravě kódu, ale také i při samotném obrábění, jelikož mnohdy CAM softwary nabízejí strategie, které jsou mnohem více efektivnější, než by mohl programátor napsat ručně. Dále lze CAM využívat i pro optimalizaci procesu obrábění i z hlediska úspory materiálu a šetření životnosti nástroje. Nabízí spousty analýz, které nám k tomu napomáhají. Nespornou výhodou je také možnost simulace obrábění, která nám pomůže odhalit různé nedostatky a opět šetřit čas a peníze. Co se týče přesnosti obrábění, dráhy generované CAM softwarem by měly být teoreticky přesnější než, které je schopen programátor napsat ručně. Eliminuje se lidský faktor, to ovšem neznamená, že dráhy generované pomocí CAM budou vždy 100 % správné. [28]

Samozřejmě CAM softwary nepřináší jen samé výhody, ale disponuje i řadou nevýhod. Hlavní nevýhodou je pořizovací a udržovací cena. CAM nebývá levnou záležitostí a to samé platí i o školení personálu, kteří ho budou využívat. Jak již bylo zmíněno, není zárukou, že dráhy generované z CAMu budou vždy 100%. Může nastat jakási softwarová chyba a nebo jednoduše programátor zadefinuje špatné vstupní nastavení. Ovšem k eliminaci těchto chyb nám slouží právě již zmiňovaná simulace. Poslední nevýhodou, která stojí za zmínku je složitost a délka samotného NC kódu. Pro jednoduché tvary CAM generuje zbytečně složité a dlouhé kódy, ovšem s dnešními řídicími systémy nám tento fakt příliš nevadí.

5.1 Popis vybraných CAM softwarů

5.1.1 Siemens NX

Siemens NX je výkonný software pro průmyslové navrhování a inženýrství, který nabízí širokou škálu funkcí pro 3D modelování, analýzu, simulaci a výrobu. Jednou z klíčových výhod Siemens NX je jeho schopnost poskytovat komplexní řešení pro průmyslový návrh a výrobu. Tento software umožňuje vytvořit 3D model výrobku, provést analýzu jeho výkonu, vyrobit z něj plány a nakonec použít tuto dokumentaci pro samotnou výrobu. Toto řešení zajišťuje přesný a účinný proces vývoje produktu, což zajistí snížení nákladů a čas potřebný k dokončení projektu. [29, 30]

Další výhodou Siemens NX je jeho schopnost integrace s dalšími softwarovými nástroji

a systémy v rámci PLM (z anglického Product Lifecycle Management). Tento systém nám poskytuje snadnou spolupráci mezi inženýry a konstruktéry při vývoji produktu, ale také napojení na nástroje pro řízení výroby a sledování životního cyklu produktu. Software také dokáže sdílet a spravovat data v rámci celé organizace, což vede k lepšímu toku informací a vyšší efektivitě. [29, 30]

Siemens NX dále obsahuje pokročilé nástroje pro simulaci, které zvládají ověřit a optimalizovat výkon výrobku ještě před jeho výrobou. Mezi tyto simulace patří například analýza pevnosti materiálů, proudění tekutin, simulaci chování produktu v různých podmínkách, simulace 3D tisku nebo simulaci právě našeho obrábění. Tímto způsobem lze minimalizovat rizika spojená s výrobou produktu, a snížit tak náklady a čas potřebný pro jeho vývoj. [29, 30]

5.1.2 Autodesk PowerMill

Autodesk PowerMill je opět výkonný softwarový nástroj, který se na rozdíl od Siemens NX zaměřuje především na oblast CNC frézování. Jeho hlavní funkcí je generování drah nástrojů pro frézování různých geometrických tvarů a povrchů, což umožňuje vyrábět kvalitní a přesné díly. Kromě toho nabízí také řadu funkcí pro simulaci procesu frézování, optimalizaci řezných podmínek a správu dat. Dále se PowerMill vyznačuje intuitivním uživatelským rozhraním a podporou nejnovějších technologií. Zvládá integraci s různými CAD/CAM systémy a podporuje rozsáhlou knihovnu nástrojů a materiálů. Díky tomu mohou uživatelé rychle a snadno vytvářet trajektorie nástrojů pro frézování složitých geometrických tvarů a zvládat i náročné aplikace. [31, 32]

Mezi další výhody softwaru Autodesk PowerMill patří také možnost vizualizace v reálném čase, podpora simulace řezných podmínek, výroby a možnost přizpůsobení nástroje pro specifické potřeby uživatele. Díky těmto funkcím mohou uživatelé vyrábět díly s vysokou přesností a efektivitou. [31, 32]

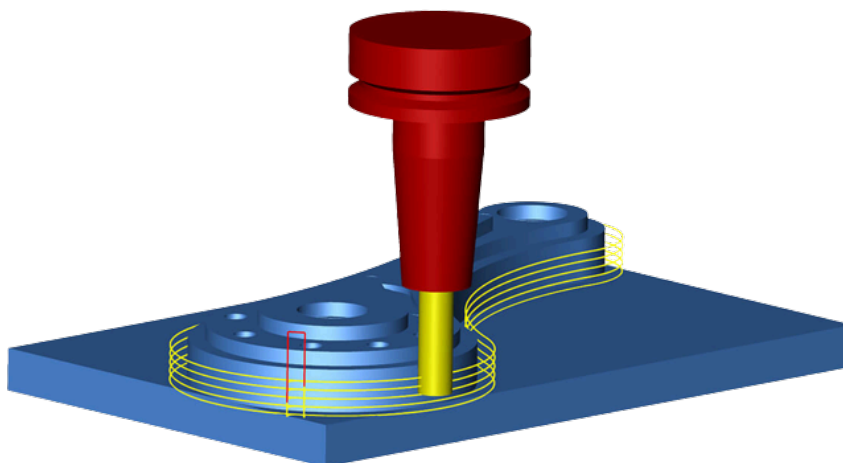
5.2 Výběr nejpoužívanějších CAM hrubovacích strategií

Obráběcích strategií existuje celá řada. Každý výrobce CAM softwaru nabízí svůj soubor strategií, ovšem většinou jsou rozdíly mezi jednotlivými strategiemi napříč softwary velmi malé, jelikož často fungují na stejném principu. Ale existují i strategie, které jsou specifické pouze pro určitý software, nicméně tato práce se zabývá optimalizací hrubovacího procesu, takže zde budou představeny pouze jen základní nejpoužívanější strategie, které je možné využít téměř v jakémkoliv softwaru.

5.2.1 Konturování

Jedná se o proces, kdy se postupně odřezává materiál pomocí jednotlivých řezů v Z souřadnici, kdy nástroj kopíruje požadovaný tvar obrobku v X a Y souřadnicích. Tato metoda se označuje jako 2D nebo 2,5D frézování, protože primární pohyb je pouze ve dvou osách. Konturování se nejčastěji používá pro obrábění vnějších částí obrobku a pro obrábění vnitřních objemových ploch (kapes) se používá termín kapsování. Konturování se využívá při obrábění běžných polotovarů, ale také i u odlitků, kde je důležité kopírování výsledné kon-

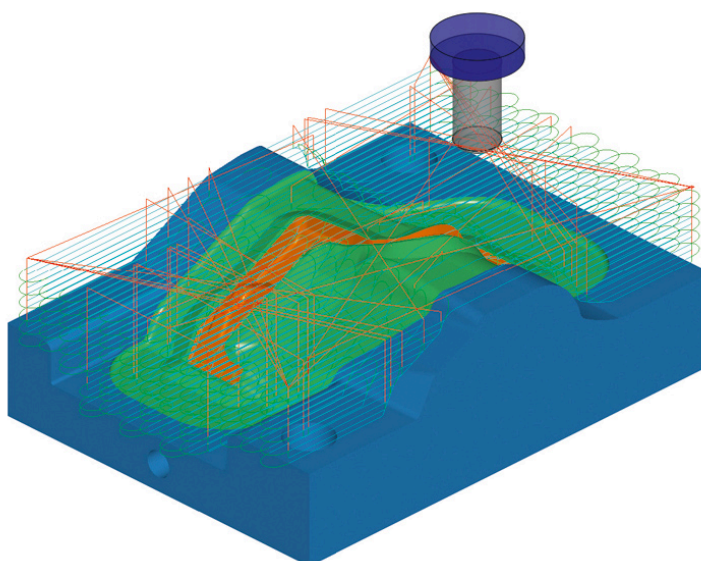
туры. Souměrné dráhy se používají pro zvýšení životnosti nástroje. U konturování jsou dráhy nástroje tvořeny offsetovými křivkami, které se podobají spirálám a kopírují požadovaný tvar z počátečního do koncového bodu podle tvaru kapsy nebo vnější kontury. Při vytváření drah se využívají korekce nástroje a adaptivní řízení úhlu opásání, což přispívá k úspěšnému a efektivnímu dokončení procesu. Příklad drah generovaných konturovací strategií lze sledovat na obrázku 22. [33]



Obrázek 22: Ukázka konturovací strategie [34]

5.2.2 Řádkování

Metoda řádkovacího hrubování vytváří přímé záběry v jednotlivých vrstvách materiálu v ose Z. Tato strategie využívá lineární záběry, což minimalizuje změny směru dráhy nástroje a vede k výrazně menšímu objemu dat ve výstupním NC kódu. Pro odstranění nerovností na povrchu dílu se před přesunutím na další vrstvu používá záběr po profilu. Při hrubování kulovou frézou je vhodné rozložit záběry pro minimalizaci nerovností na dně. Napojení záběrů při řádkovacím hrubování může být jednosměrné, obousměrné nebo cik-cak. [35]

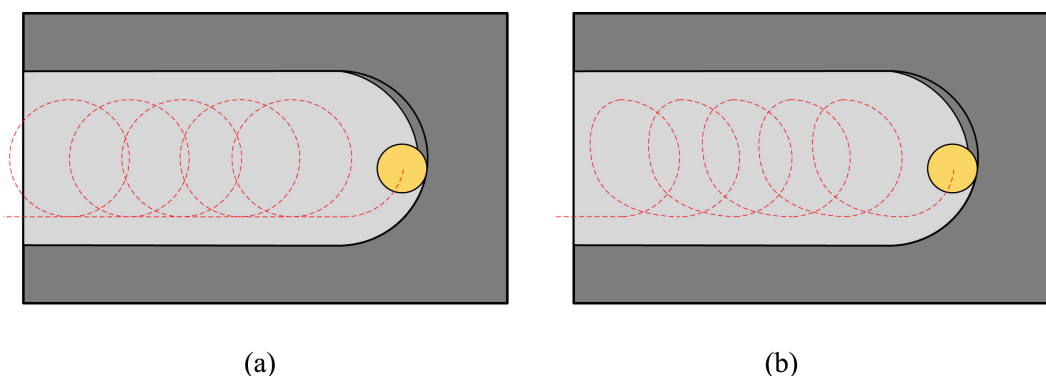


Obrázek 23: Ukázka řádkovací strategie [35]

Rovnoběžné hrubování je metoda, jež dělí materiál na vrstvy v ose Z. Při této metodě nástroj sleduje tvar dílu až na horní úroveň dané vrstvy, čímž se minimalizuje zbytek materiálu na povrchu. Při použití kulové frézy mohou být záběry rozloženy pro minimalizaci nerovností na povrchu. Napojení pro rovnoběžné hrubování může být jednosměrné nebo obousměrné. Příklad drah generovaných řádkovací strategií lze sledovat na obrázku 23. [35]

5.2.3 Trochoidní obrábění

Metoda trochoidního obrábění úzce souvisí s efektivním obráběním vnitřních rohů kapes. Obrábění takových geometrií způsobuje náhlý nárůst úhlu opásání, což vede ke značnému zvýšení zatížení nástroje. Jedním z řešení tohoto problému je úprava drah řezného nástroje. Trochoidní obrábění využívá při zajíždění do rohů kruhových drah, tvořených v několika po sobě jdoucích sérií. To má za následek stabilizace úhlu opásání a tím i stabilizaci celého procesu. [36, 37]



Obrázek 24: Ukázka trochoidní strategie [36]

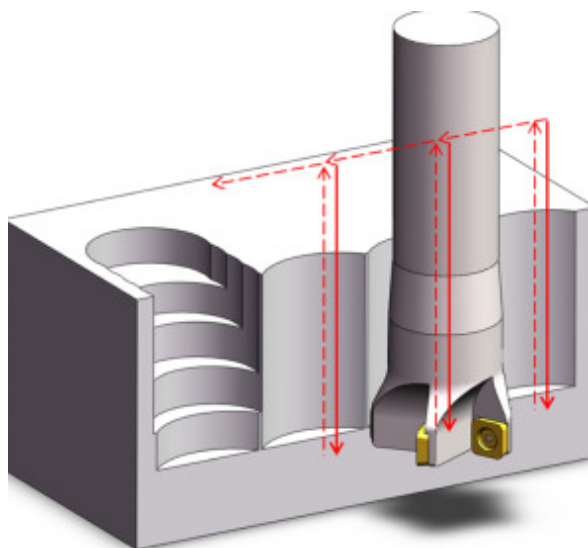
Při trochoidním frézování se trajektorie nástroje tvoří kombinací kruhových a lineárních pohybů, jak lze vidět na obrázku 24a,b. Jako u každé strategie se i tento způsob skládá ze dvou částí, a to z části řezné a části neřezné. Během řezné části dochází k odstraňování materiálu při konstantním úhlu opásání, který je menší než u konvenčních metod, což vede k nízkým řezným silám. To umožňuje použití velké axiální hloubky řezu. Radiální hloubka řezu při trochoidním frézování je nízká, nepřesahuje 1/5 průměru nástroje. [36, 37]

Díky výše popsáným principům, lze trochoidní obrábění využívat například i pro drážkování, kdy lze dosáhnout lepších výsledků než při použití konvenčního lineárního drážkování. Další využití lze nalézt u obrábění hůře obrobitelných nástrojů. Při trochoidním obrábění vznikají menší řezné síly a dochází také k efektivnímu odvádění tepla, což ho staví do výhody oproti běžnému způsobu obrábění. [36, 37]

Obecně další využití trochoidního obrábění je velice široké, jelikož celá řada hrubovacích operací využívá základní principy tvorby trochoidních drah. Dráhy nemusí být přímo trochoidní, jelikož je kladen důraz na zachování konstantního úhlu opásání, klasické trochoidy se mohou měnit na obecné tvary. Jak lze pozorovat na obrázku 24b, kdy se dráhy neskládají z trochoidních křivek, ale ze série pravidelných elips. [36, 37]

5.2.4 Ponorné frézování

Ponorné frézování (anglicky Plunge Milling) je specifickou metodou hrubování, kdy nástroj nevykonává převážně pohyby v osách X a Y, ale dochází k postupnému zavrtávání do materiálu v ose Z. Schematický princip lze sledovat na obrázku 25. Tato strategie se využívá především k hrubování hlubokých kapes. [38, 39]



Obrázek 25: Ukázka strategie ponorného frézování [40]

Výhodou oproti běžnému způsobu frézování je silové působení. U ponorného frézování je převládající silovou složkou axiální síla, která pozitivně ovlivňuje tuhost celého procesu, ale také i přesnost a integritu povrchu. Tedy nabízí se aplikace tohoto obrábění u procesu náchylného na vibrace. [38, 39]

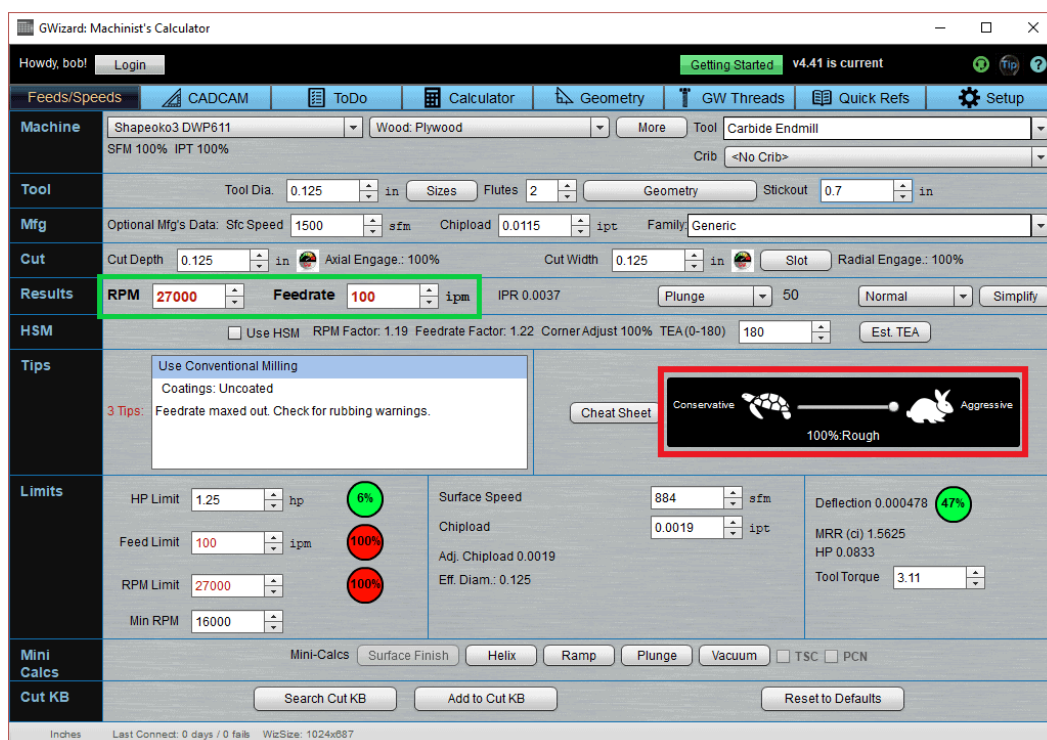
Samozřejmě pro použití ponorného frézování je nutné použít i vhodný nástroj. Oproti klasickým frézám mají frézy pro ponorného frézování rozdílnou geometrii. Jelikož k obrábění dochází na čele nástroje, největší průměr se nachází právě na začátku řezné části. Dřík má pak menší průměr, aby nedocházelo ke kontaktu se stěnou dutiny. Další důležitou charakteristikou je zajištění dostatečného přívodu procesní kapaliny a tedy i odvodu třísek. K tomu nejčastěji slouží dutiny uvnitř nástroje, kterými je procesní kapalina přiváděna do místa řezu. Pro správný odvod třísek pak může být použito tzv. postupné zahlubování, kdy jednou za určitou vzdálenost nástroj udělá zpětný pohyb a umožní tak odvod třísek z místa řezu. [38, 39]

Samozřejmě nacházíme zde i řadu nevýhod. Jednou z nich je celkový vzhled po dokončení hrubování. V závislosti na použitém kroku se objevují na stěnách dutin značné nerovnosti, které by mohly mít negativní dopad při dokončování povrchu. Při obrábění nerovnoměrného povrchu dochází ke skokovému zatížení nástroje, což má jednak vliv na životnost a také to může způsobovat vibrace, tedy negativní dopad na drsnost a přesnost povrchu. Pro zamezení se často využívá dohrubovací operace, která vytvoří na stěnách dutin rovnoměrný přírůstek. Dále je nutné zmínit, že v praxi je tato strategie minimálně využívána a v této práci byla zmíněna jen pro doplnění. [38, 39]

II. Experimentální část

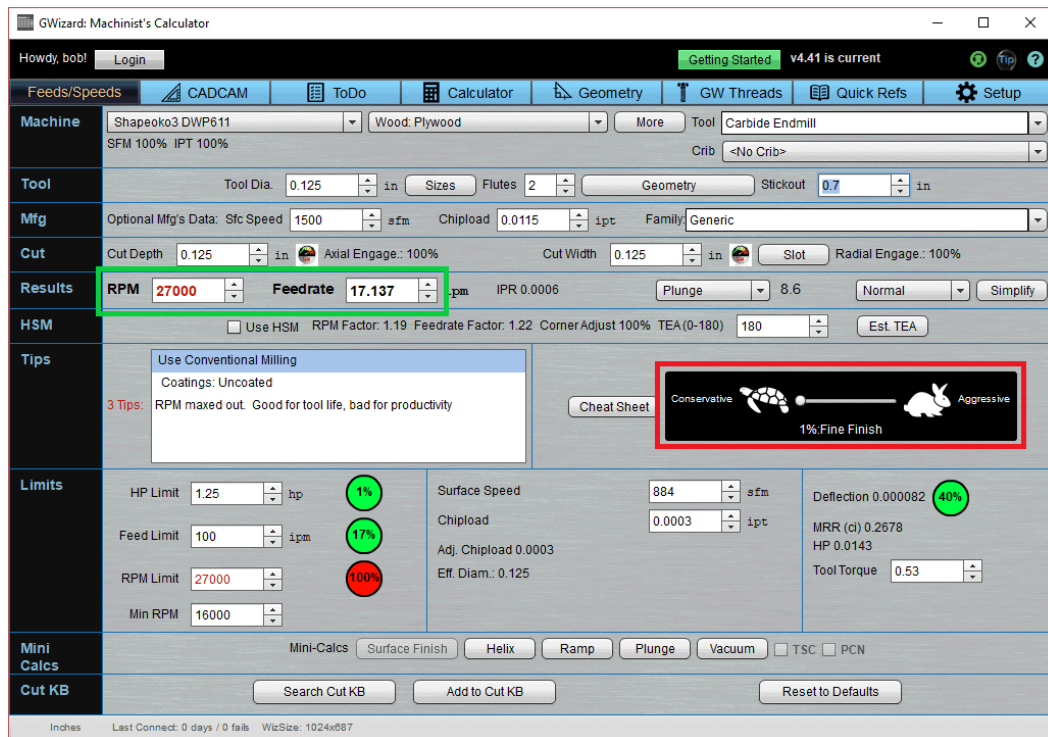
6. Motivace k experimentální části

Problematika optimalizace hrubování má obecně mnoho proměnných a jen optičně můžeme všechny zahrnout do jednoho experimentu. Inspirací pro návrh experimentální části této práce je software G-Wizzard Feeds and Speeds Calculator. Tento software od společnosti CNCCookBook se zaměřuje na optimalizaci obráběcího procesu, kdy je uživateli poskytnuta speciální kalkulačka, kde si může zadat parametry svého obrábění a software mu poté navrhne optimální řezné podmínky. [41]



Obrázek 26: Ukázka SW G-Wizzard - 100% agresivita [41]

Uživatel má možnost nastavit konkrétní stroj, který využívá nebo alespoň stroj podobný, pokud jeho konkrétní není v databázi. Dále si uživatel volí použitý nástroj, včetně materiálu a geometrie. Nakonec je potřeba nastavit ještě radiální a axiální hloubku řezu, kterou uživatel požaduje. Software dál již sám vypočítá optimální řezné podmínky pro aktuální nastavení. Ve výchozím nastavení je také možnost zvolit agresivitu obrábění, jak lze sledovat na obrázku 26 v červeném rámečku. Nachází se zde posuvník, který je na pozici 100 %. To znamená, že software bude generovat co nejvyšší možné řezné podmínky. Pokud uživatel bude nastavovat posuvník směrem doleva, software bude řezné podmínky čím dál tím více přizpůsobovat jemnému obrábění. Koncová pozice je 1 %. Rozdíly v navržených řezných podmínkách lze porovnat na obrázcích 26 a 27 v zelených rámečcích. [41]



Obrázek 27: Ukázka SW G-Wizzard - jemné obrábění [41]

Tento software lze do jisté míry považovat za optimalizační. Z pohledu správně optimalizace je ale nutné, mimo změny rezných podmínek také brát do úvahy změny geometrického nastavení řezu. To znamená na základě nějakého doporučeného zatížení nástroje od výrobce měnit i poměr mezi radiální a axiální hloubku řezu. Pokud bychom zvyšovali agresivitu obrábění pouze reznými podmínkami, mohlo by docházet k nadměrnému přetěžování nástroje a tedy i jeho zrychlenému opotřebení. Na základě těchto poznatků a inspirace tímto softwarem byl navržen následující experiment.

7. Podmínky experimentální části

S ohledem na velké množství proměných týkající se problematiky hrubování ve 2,5D a inspiraci softwarem zmíněném v předchozí kapitole byl navržen experiment zaměřující se na problematiku hrubování kapes. V rámci tohoto tématu byly zohledněny možné podmínky experimentu a dále navržen následující postup. Oproti softwaru G-Wizzard je experiment zaměřen na sledování závislosti nastavení záběrových podmínek hrubování, tj. poměr mezi radiální a axiální hloubkou řezu, na výsledném čase. Nastavení řezných podmínek jako je posuv a řezná rychlost se zde upozaduje, aby vynikl vliv nastavení hloubek řezu.

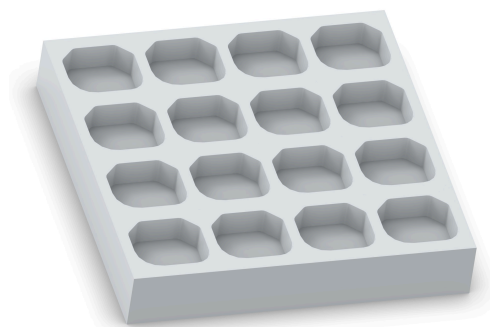
Experimentální část se rozděluje do dvou rovin. První rovina je čistě simulační, kdy je odsimulováno velké množství kombinací řezných a geometrických podmínek, a následně vyhodnoceno optimální nastavení z hlediska obráběcího času. V druhé části experimentu s ohledem na velké množství možných kombinací nelze vše reálně ověřit. Z tohoto důvodu reálné obrábění zahrnuje pouze výzkum měrné řezné síly.

Pro tvorbu partprogramu experimentální části byl zvolen software Siemens NX, kde byly využity tři nejběžnější strategie hrubování kapes, a to strategie „Follow Part“, „Follow Periphery“ a „ZIG-ZAG“. Dále byly vybrány čtyři velikosti řezného nástroje a simulační zkušební těleso bylo navrženo se 16 kapsami. Celkem je v jedné iteraci odsimulováno 192 různých kombinací řezných a technologických podmínek.

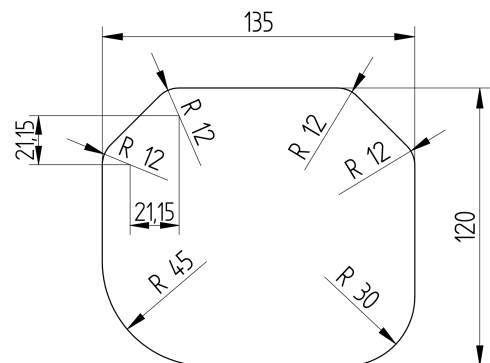
7.1 Návrh zkušebních těles

Důležitou charakteristikou zkušebních těles není jejich celkový tvar, ale konkrétní kapsy nacházející se na tělese. Na základě rešerše byl navrhnut tvar kapsy dle [42]. Jedná se o relativně obecný tvar kapsy pouze s několika rádiusy. Jelikož se experiment zabývá obecnou optimalizací hrubování kapes ve 2,5D, není třeba používat složité geometrie.

Pro simulační část experimentu bylo navrženo těleso o 16 kapsách (viz obrázek 28) s rozměry znázorněny na obrázku 29. Hloubka kapsy je 40 mm. Další tělesa jsou uvedeny u dané iterace.



Obrázek 28: Zkušební těleso - simulační



Obrázek 29: Rozměry kapsy - simulační

7.2 Zvolené technologické podmínky

7.2.1 Materiál zkušebních těles

Jako zkušební materiál byla zvolena hliníková slitina EN AW-7075, nebo také známá pod názvem "letecký dural". Jedná se o slitinu na bázi hliníku s hlavní příměsí v podobě zinku a hořčíku. Může obsahovat také měď, chrom či titan. Úplné chemické složení lze sledovat v tabulce 7.1. Mezi hlavní vlastnosti patří vysoká pevnost, která může dosahovat až 600 MPa a zároveň nízká hmotnost. Proto je ve velké míře využíván v letectví na vysoce namáhané díly. Tento dural se používá ve vytvrzeném stavu, špatně se svařuje a eloxuje. [43]

Tabulka 7.1: Chemické složení EN AW-7075 - převzato z [44]

Složení EN AW-7075 [%]							
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
≤ 0,4	≤ 0,5	1,2 - 2	≤ 0,3	2 - 2,1	0,18 - 0,28	5,1 - 6,1	≤ 0,2

Hlavním důvodem pro volbu materiálu v experimentální části je jeho vynikající obrobitelnost. Při obrábění neulpívá na nástrojích a tvoří krátké třísky. Byl zvolen také z ekonomických důvodů, aby nedocházelo k velkému opotřebení nástrojů při obrábění kovových materiálů. Lze předpokládat, že výsledky experimentu pak lze reprodukovat i na kovové a jiné materiály. [43]

7.2.2 Používané nástroje

Pro simulační část experimentu byla provedena rešerše několika výrobců nástrojů a na základě toho byly zvoleny referenční nástroje od firmy Gühring. Jedná se o čtyřbřité frézy ze slinutého karbidu, které se dodávají v povlakovaném nebo nepovlakovaném stavu. Jak bylo již zmíněno, byly testovány čtyři velikosti nástrojů, a to D10, D12, D16 a D20. Výrobce je uvádí pod označením 3257 a 3713. Nástroje jsou vhodné jak pro obrábění kovů, tak i neželezných slitin.

Pro reálné testovací obrábění byl z kapacitních důvodů využit pouze nástroj o průměru 10 mm od výrobce Dormer Pramet. Nástroj nese označení S814HA a jedná se o čtyřbřitou frézu ze slinutého karbidu.

7.2.3 Řezné podmínky

Pro simulační část experimentu se vycházelo z katalogu nástrojů pro zmíněný typ frézy. Konkrétně byla nastavena řezná rychlost na 180 m/min a posuvy dle průměru frézy (viz tabulka 7.2). Řezné podmínky pro reálné ověření se poté volily dle použitého nástroje a aplikace. Konkrétní nastavení je uvedeno u dané iterace.

Tabulka 7.2: Řezné podmínky pro simulační část experimentu - převzato z [45]

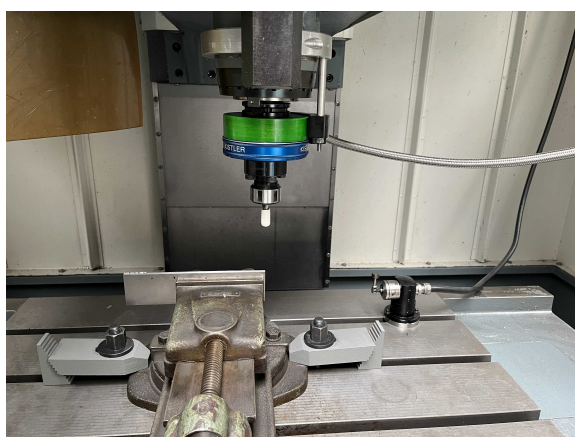
	f_z [(mm/z)/D]			
V_c [m/min]	pro $a_p = 1 \times D$, $a_e = 0,75 \times D$			
180	0,064	0,08	0,1	0,13

7.3 Použité stroje/přístroje

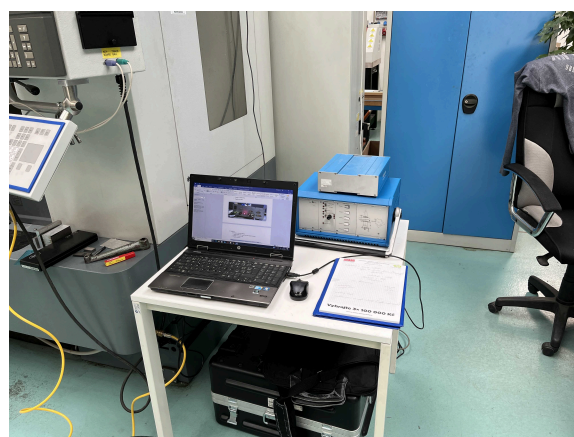
Experimentální část byla provedena za pomoci zařízení uvedených v tabulce 7.3. Veškeré obráběcí operace byly provedeny na stroji MAS VMC 500 s namontovaným rotačním dynamometrem od firmy Kistler (viz obrázky 30 a 31). Dále úprava polotovaru či hotového zkušebního tělesa proběhla na pásové pile od značky Pilous. Kontroly pak probíhaly na zařízení Zoller Smile a digitálním mikroskopu.

Tabulka 7.3: Seznam použitých zařízení

použití zařízení	název	výrobce
tří-osá vertikální frézka	VMC 500	Kovosvit MAS
rotační dynamometr	9123C	KISTLER
zesilovač a převodník signálu	Type 5223	KISTLER
pásová pila	ARG 300 plus S.A.F.	Pilous
vertikální měřící a seřizovací zařízení	Zoller smile 620	Zoller
digitální mikroskop	VHX-6000	VHX



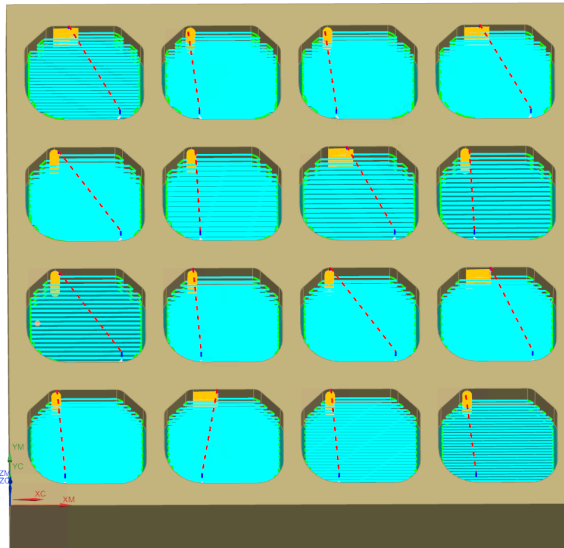
Obrázek 30: Dynamometr - nástroj upnutý ve stroji



Obrázek 31: Dynamometr - zesilovač, převodník, PC

8. Průběh experimentu

Simulační část experimentu probíhala v několika iteracích, kdy se postupně zkoušela různá nastavení záběrových a poté i řezných podmínek, přičemž se v následujících pokusech tyto nastavení modifikovaly, popřípadě vylučovaly různé proměnné na základě předchozích výsledků. Hlavním společným cílem je zkoumání vlivu nastavení záběrových podmínek na výsledný čas obrábění jednotlivých kapes. V ideálním případě nalezení optimálních podmínek, či sestavení určitých doporučení při obrábění dílců obsahující velké množství kapes. V této kapitole jsou postupně rozebrány všechny iterace, včetně zdůvodnění jejich modifikací na základě vzniklých problémů.



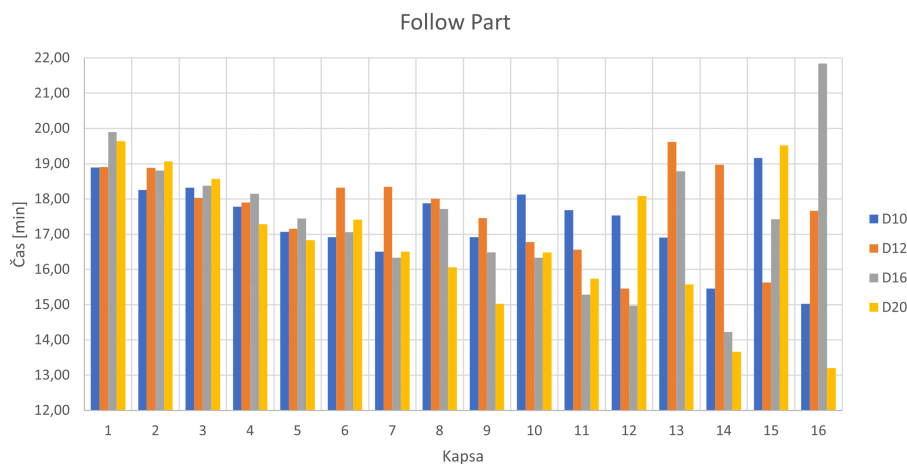
Obrázek 32: Ukázka programu ze SW NX

8.1 Iterace 1 - simulace NX

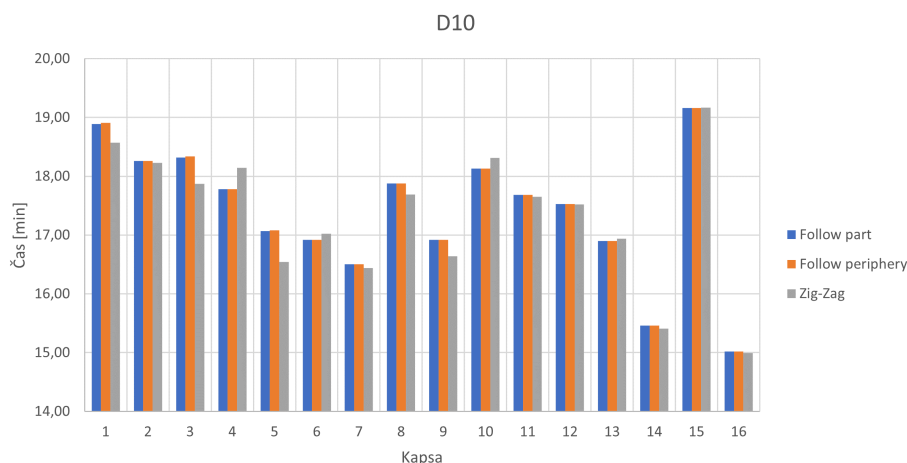
První iterace byla spíše zkušební, kde se ukázala pouze struktura celé experimentální části, jakým směrem bude směřována a jak bude vypadat. Jak již bylo poznamenáno v úvodu experimentální části práce, zkušební těleso obsahující 16 kapes se obrábí různými kombinacemi záběrových podmínek. V softwaru NX byly vybrány tři strategie, a to Follow Part, Follow Periphery a ZIG-ZAG. Příklad programu v softwaru NX lze sledovat na obrázku 32. Dále byly zvoleny čtyři referenční nástroje D10, D12, D16 a D20. Cílem experimentu bylo zkoumat vliv nastavení zvoleného poměru mezi axiální hloubkou řezu a_p a radiální hloubkou řezu a_e . Celkem tedy vzniklo 192 různých kombinací obrábění stejné kapsy. Detailní nastavení lze sledovat v příloze A. Řezné podmínky, respektive řezná rychlost a posuv na zub byly zvoleny pro všechny nástroje stejné z důvodu zanedbání jejich vlivu na výsledný čas.

Na obrázku 33 je uveden příklad jednoho z výsledků této iterace, konkrétně kombinace všech nástrojů a použití strategie Follow Part. Zbylé grafy jsou uvedeny v příloze B. Nicméně

výsledky jsou čistě náhodné a nevyovídající, neboť při volbě kombinací záběrových podmínek nebyl brán v potaz průřez odřezávané vrstvy a jsou zvoleny čistě náhodně. Zatížení nástroje je tedy v každé kapse jiné a nelze to posuzovat jednotně. Jediné, co z této iterace lze usuzovat jako relevantní závěr, je porovnání vlivu jednotlivých strategií mezi sebou. Z obrázku 34 je patrné, že volba základních strategií při hrubování kapsy obecného tvaru má minoritní vliv. Tento závěr je ještě ověřen v další iteraci.



Obrázek 33: Porovnání vlivu velikosti nástroje a nastavení záběrových podmínek na čas obrábění - iterace 1, strategie Follow Part

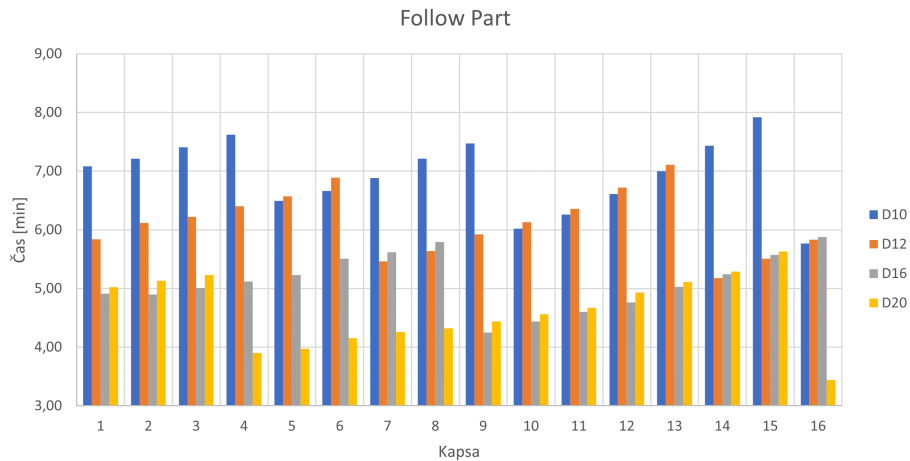


Obrázek 34: Porovnání vlivu jednotlivých strategií na výsledný čas obrábění - iterace 1, nástroj D10

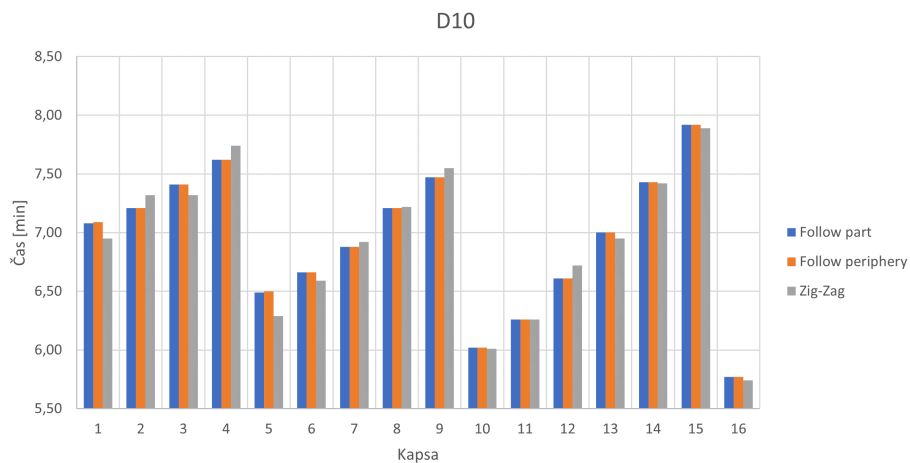
8.2 Iterace 2 - simulace NX

U následující iterace byla již provedena modifikace v nastavení řezných podmínek, kdy byl upraven postup volby poměru axiální hloubky řezu a_p a radiální hloubky řezu a_e . Hlavním záměrem bylo využít maximální možné zatížení uváděné výrobcem nástroje. Budeme-li předpokládat, že v katalogu uvádí výrobce řezné podmínky, právě pro maximální zatížení, při kterém ještě nedochází k nadměrnému opotřebení a zatěžování nástroje, lze toto zatížení brát jako výchozí hodnotu a dále rozpočítat pouze kombinace axiální a radiální hloubky

řezu a_p a a_e , při kterém je dosahováno právě toto maximální zatížení. Výrobce udává řezné podmínky pro hloubku řezu $1xD$ a opásání nástroje 75 %. Jednoduchou úvahou byl pak dopočítán průřez třísky jako obsah obdelníku. Dále probíhal experiment jako v předchozí iteraci. Konkrétní nastavení lze sledovat v příloze A.



Obrázek 35: Porovnání vlivu velikosti nástroje a nastavení řezných podmínek na celkový čas obrábění - iterace 2, strategie Follow Part



Obrázek 36: Porovnání vlivu jednotlivých strategií na výsledný čas obrábění - iterace 2, nástroj D10

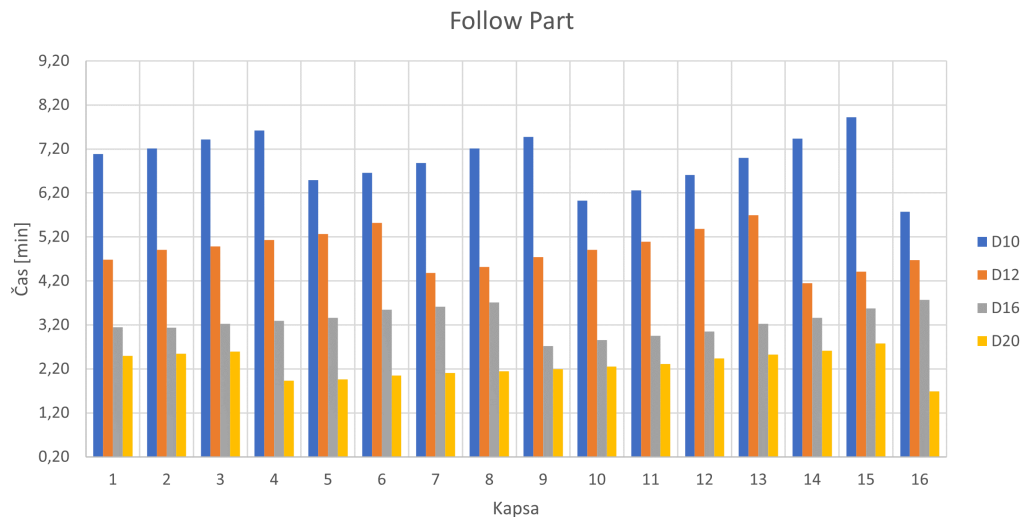
Na obrázku 35 lze pozorovat již o něco relevantnější výsledky. Na první pohled je patrné nerovnoměrné rozložení obráběcích časů, jak by se mohlo z logiky věci jevit. Z grafu můžeme vyzorovat i určitou periodiku, kdy při určitém nastavení dochází k výraznému zrychlení obrábění. Při bližším zaměření lze pozorovat, že tyto nastavení mají souvislost s hloubkou řezu a_p . K nejlepším časům dochází, když je aktuální hloubka řezu nastavena jako celočíselný násobek hloubky obráběné kapsy.

Jak již bylo avizováno, lze touto iterací potvrdit fakt, že volba strategie u hrubování obecných kapes má minoritní vliv na celkový čas obrábění. Potvrzuje to závislost uvedená na obrázku 36. Tento fakt lze konstatovat pouze u obrábění obecných kapes za použití obecných strategií. V dnešní nabídce softwarů jsou i další optimalizační strategie, které by mohly mít

vliv na celkový čas obrábění. Avšak pro tento experiment byly vyřazeny z hodnocení, z důvodu jejich omezených možností volby řezných podmínek. Defacto jsou podmínky dané již od výrobce. Z těchto důvodů bude vliv strategie pro další iterace zanedbán a bude používána pouze jedna reprezentativní strategie.

8.3 Iterace 3 - simulace NX

V předchozích iteracích byly řezné podmínky nastaveny pro všechny nástroje stejné z důvodu zanedbání jejich vlivu. Ve třetí iteraci byly tyto podmínky nastaveny dle katalogu od výrobce. Jak lze předpokládat, na obrázku 37 jsou patrné stejné průběhy času v závislosti na nastavení radiální a axiální hloubky řezu, pouze jsou posunuty na ose Y. Čím větší nástroj, tím agresivnější podmínky, tedy i posun k nižším časům. Tato iterace byla provedena pouze pro doplnění.



Obrázek 37: Porovnání vlivu velikosti nástroje a nastavení řezných podmínek na celkový čas obrábění - iterace 3, strategie Follow Part

8.4 Iterace 4 - obrábění

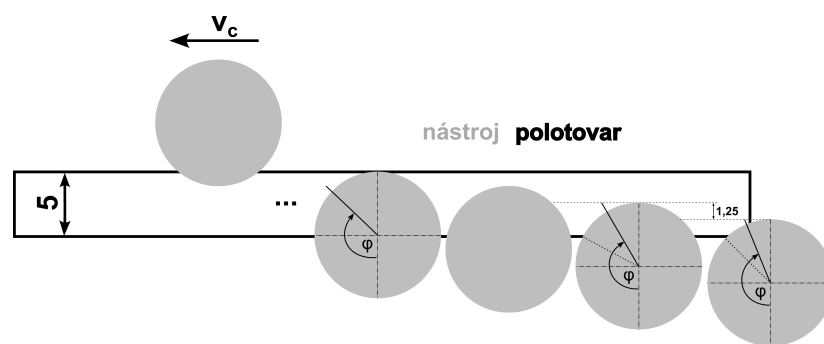
Postupem experimentální části byl zjištěn zásadní nedostatek. Jedná se o reálné zatížení nástroje. Doteď bylo zatížení bráno jako jednoduchý průřez odřezávané třísky, respektive $a_p \times a_e$. Bohužel s touto úvahou nelze získat relevantní výsledky, jelikož u vícebřitých fréz se v závislosti na radiální hloubce řezu mění počet zůbu v záběru. Předchozí úvaha je pouze zjednodušená a pro reálné obrábění by neměla takový význam. Proto bylo nutné modifikovat volbu poměru záběrových podmínek.

Bylo potřeba zahrnout vliv dvou důležitých parametrů. Jednak již zmíněný vliv záběru více zůbu najednou a také vliv měrné řezné síly k_c . V kapitole 2.3 je detailněji odvozeno silové působení při čelním frézování a také průběh měrné řezné síly při frézování. Měrná řezná síla není vždy konstantní. V závislosti na tloušťce odřezávané vrstvy se mění její průběh. Bohužel k obrábění materiálu EN AW 7075 je obtížné dohledat data týkající se měrné řezné

síly. Proto byl na základě této teorie navržen a proveden experiment k určení měrné řezné síly při obrábění hliníkové slitiny EN AW 7075, který pomůže k dosažení relevantních výsledků při nalézání optimálních záběrových podmínek.

8.4.1 Zjišťování měrné řezné síly

První návrh spočíval v obrábění pět milimetrů tlustého plechu v různých polohách nástroje. Jelikož při odvozování řezné síly závisí na úhlu záběru daného zubu, experiment měl ukázat, jaký vliv to bude mít na měrnou řeznou sílu. Nástroj začal ve výchozí poloze, kdy byl záběr nástroje 1,25 mm a postupně se s každým dalším řezem posouval o dalších 1,25 mm. To zajistilo změnu záběrového úhlu. Přibližné schéma, jak experiment probíhal lze sledovat na obrázku 38. Experiment probíhal na stroji s rotačním dynamometrem, kdy bližší údaje jsou poskytnuty v kapitole 7. V průběhu obrábění se zaznamenávaly různé složky řezné síly, přičemž pro tento experiment byla důležitá složka tečná a radiální.



Obrázek 38: Schéma určování měrné řezné síly - polotovar plech 5 mm

Zkušební těleso po obrábění pak vypadalo viz obrázky 39 a 40. Je patrný reliéf, jak se v průběhu obrábění měnila poloha nástroje a tím tedy úhel záběru.

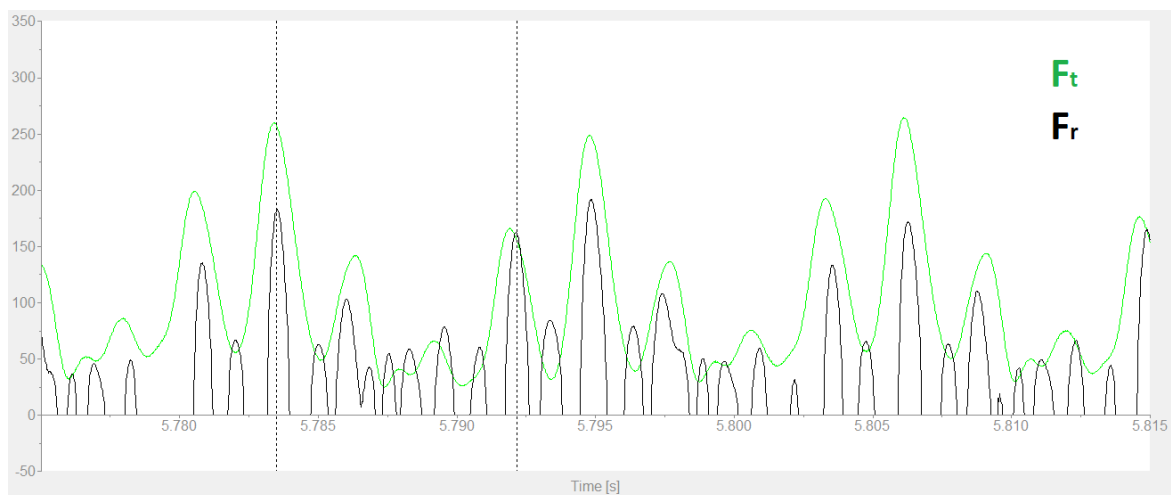


Obrázek 39: Polotovar pro určování měrné řezné síly - plech 5 mm, upnutý



Obrázek 40: Polotovar pro určování měrné řezné síly - plech 5 mm

Na obrázku 41 lze sledovat výstup z programu DynoWare. Jelikož byla nastavena frekvence měření na 50 kHz, celková závislost obsahuje obrovské množství hodnot. Z toho důvodu je uvedeno pouze detailní zobrazení jedné části obrábění. Ze signálu je patrný rozdíl při záběru jednotlivých zubů. Důvodem, proč je signál pro každý zub jinak velký, může být například nedokonalé upnutí nástroje. Tato skutečnost byla ověřena a bude zmíněna později. Každopádně pro vyhodnocení experimentu bylo žádoucí odečíst naměřené hodnoty tečné síly F_t a radiální síly F_r . Vzhledem k množství dat byl proveden odečet několika hodnot z různých míst a vytvořena střední hodnota. Konkrétní hodnoty jsou uvedeny v tabulce 8.1.



Obrázek 41: Ukázka záznamu ze SW DynoWare - polotovar plech 5 mm

Tabulka 8.1: Určení k_c - polotovar plech 5 mm

i	ϕ_1 [°]	ϕ_2 [°]	$d\phi$ [°]	$\sin\phi$	h_d [mm]	F_t [N]	F_r [N]	F_c [N]	k_c [N]
1	138,79	180,00	159,39	0,35	0,0201	161,09	124,06	203,33	2027,04
2	120,10	180,00	150,05	0,50	0,0285	234,29	187,43	300,04	2108,72
3	104,52	180,00	142,26	0,61	0,0349	283,09	232,91	366,59	2101,54
4	90,00	180,00	135,00	0,71	0,0403	307,61	183,65	358,26	1777,76
5	75,48	138,79	107,13	0,96	0,0545	324,04	283,53	430,57	1580,93
6	59,90	120,10	90,00	1,00	0,0570	324,46	281,53	429,57	1507,25
7	41,21	104,52	72,87	0,96	0,0545	321,44	257,49	411,85	1512,18
8	0,00	90,00	45,00	0,71	0,0403	313,93	92,20	327,19	1623,56
9	0,00	75,48	37,74	0,61	0,0349	271,52	223,61	351,75	2016,45
10	0,00	59,90	29,95	0,50	0,0285	227,85	180,56	290,72	2043,21
11	0,00	41,21	20,61	0,35	0,0201	171,28	104,43	200,61	1999,92

Řezné podmínky byly zvoleny dle doporučení výrobce a jsou uvedeny v tabulce 8.2. Obrábění bylo provedeno frézou o průměru 10 mm, jak je uvedeno v kapitole 7. Jednotlivé výpočty byly provedeny dle následujících vztahů:

$$h_D = f_z \cdot \sin\varphi \quad (8.1)$$

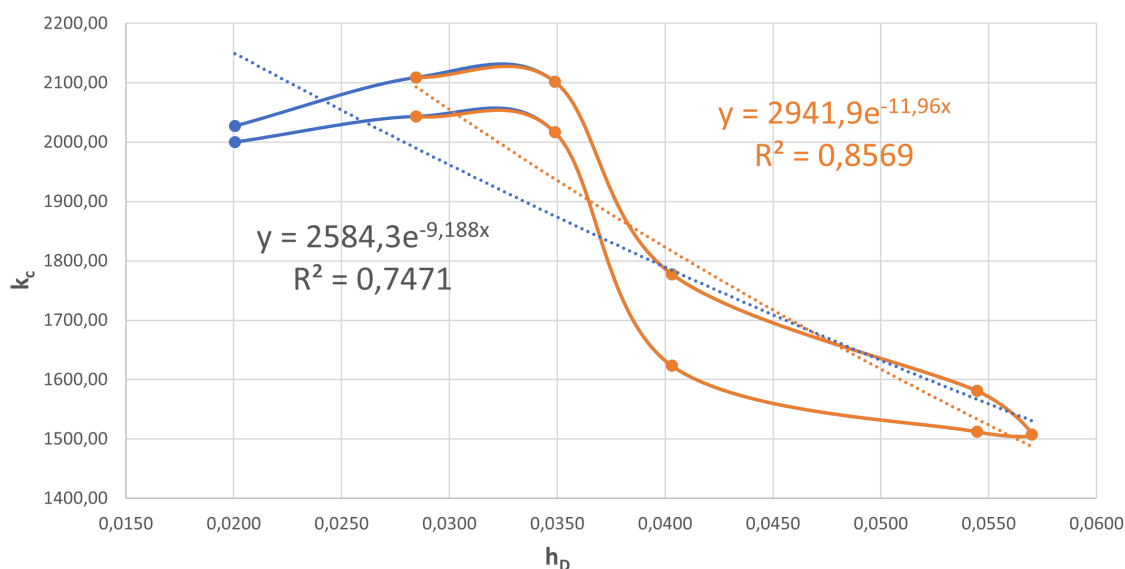
$$F_c = \sqrt{F_t^2 + F_r^2} \quad (8.2)$$

$$k_c = \frac{F_c}{a_p \cdot f_z \cdot \sin\varphi} \quad (8.3)$$

Tabulka 8.2: Řezné podmínky pro zjišťování k_c - polotovar plech 5 mm

f_z [mm/z]	a_p [mm]	v_c [m/min]
0,057	5	166

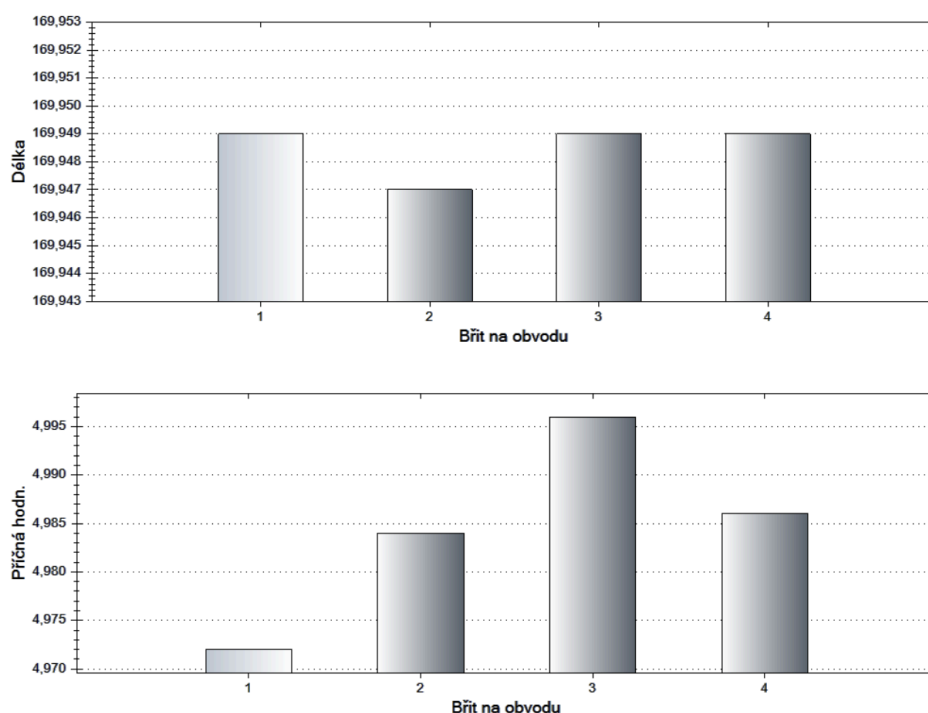
Z naměřených hodnot byla získána závislost uvedená na obrázku 42. Již na první pohled nemá optimální klesající tendenci. Modře je uvedena závislost ze všech hodnot a oranžově jsou zanedbány okrajové hodnoty. Dle teorie má mít závislost měrné řezné síly na tloušťce odřezávané vrstvy jasně klesající tendenci. Naměřený průběh může mít několik důvodů. Vzhledem k tloušťce zkušebního tělesa dochází k značným vibracím a hodnoty jsou poté zkreslené. Dále při prvních a posledních řezích mohlo dojít k částečnému vypružení plechu a tím se ovlivnila velikost měrné řezné síly. I po zanedbání krajních hodnot není stále průběh ideální. Z těchto důvodů tento experiment nelze považovat za relevantní a byla nutná modifikace pro další iteraci.



Obrázek 42: Závislost k_c na h_D - polotovar plech 5 mm

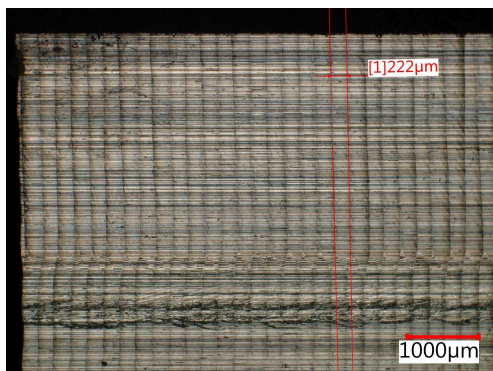
8.4.2 Kontrola nástroje a zkušební tělesa

Před další iterací byla ještě provedena kontrola nástroje na vertikálním měřícím zařízení Zoller Smile, a to z důvodu zmíněného výše. Na obrázku 43 lze sledovat grafický výstup z přístroje, který ukazuje nesymetrickou polohu břitů vůči středu. Největší rozdíl činní 0,024 mm, reálný průměr nástroje je pak 9,97 mm. Z výsledků vyplývá, že nástroj vykazuje mírné házení a z toho důvodu bylo silové zatížení na jednotlivých břitech rozdílné. Pro zjednodušení experimentu se ale počítalo pouze se střední hodnotou zatížení.

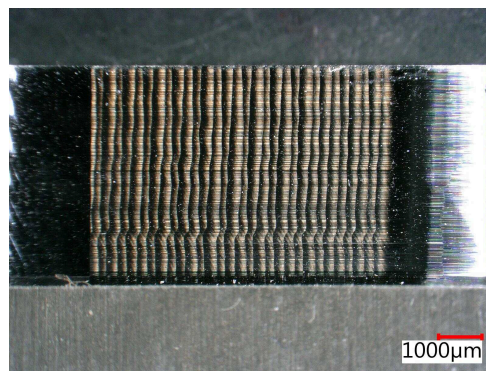


Obrázek 43: Grafické zobrazení kontroly nástroje na přístroji Zoller po prvním obrábění

Pro úplnost byl vzorek ještě zkontrolován na digitálním mikroskopu SHX-6000. Na obrázku 44 je znázorněn první řez. Na povrchu jsou patrné jednotlivé záběry a lze tak ověřit hodnotu posuvu na otáčku. Zároveň se ale ve spodní části řezu nachází souvislá vydřenina. Patrně došlo k nahromaděný třísky v daném místě a následnému vydření do povrchu obrobku. Na obrázku 45 je příklad řezu z druhé strany.



Obrázek 44: Snímek z mikroskopu, první řez - polotovar plech 5 mm



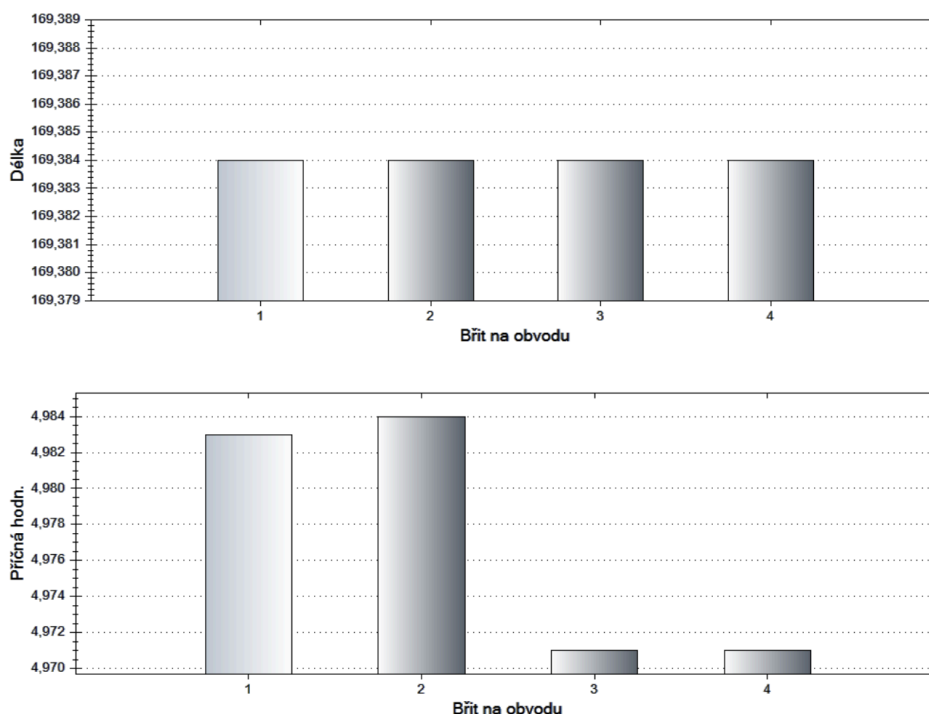
Obrázek 45: Snímek z mikroskopu, řez z druhé strany - polotovar plech 5 mm

8.5 Iterace 5 - obrábění

Z důvodu nedostatků z předchozí iterace bylo nutné postup zjišťování měrné řezné síly modifikovat. Po získaných zkušenostech byl nástroj přeupnut a lehce vyrovnan, aby se minimalizoval vliv házení.

8.5.1 Kontrola nástroje

Nástroj byl klasickým způsobem vyndán z kleštiny a důkladně očištěn, včetně celého držáku, aby se eliminoval vliv cizího tělesa. Dále byl nástroj opět upnut a proměřen na již zmíněném přístroji Zoller Smile. Výsledky lze sledovat v grafickém zobrazení na obrázku 46. Rozdíl v umístění jednotlivých břitů se snížil na 0,013 mm a reálný průměr nástroje byl pak 9,954 mm. Tento výsledek byl považován za dostačující pro experiment a další vyrovnaní již nebylo prováděno.



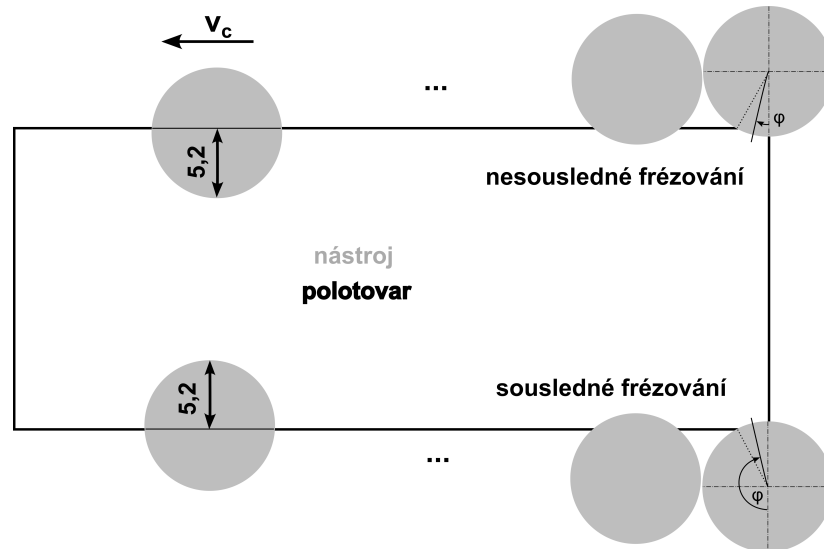
Obrázek 46: Grafické zobrazení kontroly nástroje na přístroji Zoller po přeupnutí

8.5.2 Zjišťování měrné řezné síly

Vzhledem k předchozí iteraci byl zvolen polotovár ve formě bloku, a to z důvodu eliminace chvění na minimum. Další změnou byla úprava jednotlivých záběrů, kdy se záběr zvětšoval o 0,5 mm. Obrábění se provádělo z obou stran polotovaru až do záběru 5,2 mm. Tím se zajistilo měření jak při sousledném, tak i nesousledném smyslu obrábění. Schéma experimentu lze sledovat na obrázku 47. Řezné podmínky byly nejprve zachovány z předchozí iterace, ale z důvodu rozdrncení nástroje, byly upraveny viz tabulka 8.3.

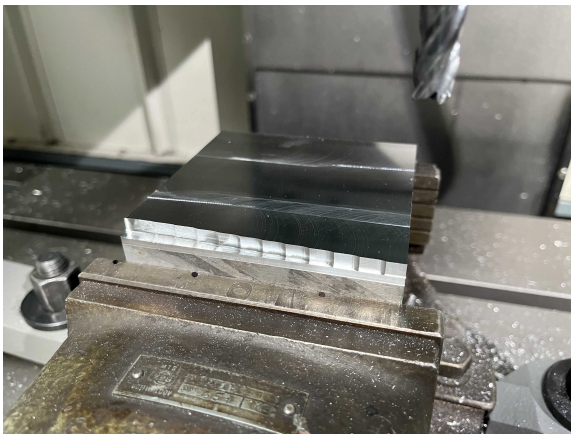
Tabulka 8.3: Řezné podmínky pro zjišťování k_c - polotovary blok

f_z [mm/z]	a_p [mm]	v_c [m/min]
0,042	5	166



Obrázek 47: Schéma určování měrné řezné síly - polotovary blok

Obrábění po všech úpravách probíhalo již bez problému. Jak vypadal obrobek, lze sledovat na obrázcích 48 a 49.



Obrázek 48: Polotovary pro určování měrné řezné síly - blok, upnutý



Obrázek 49: Polotovary pro určování měrné řezné síly - blok

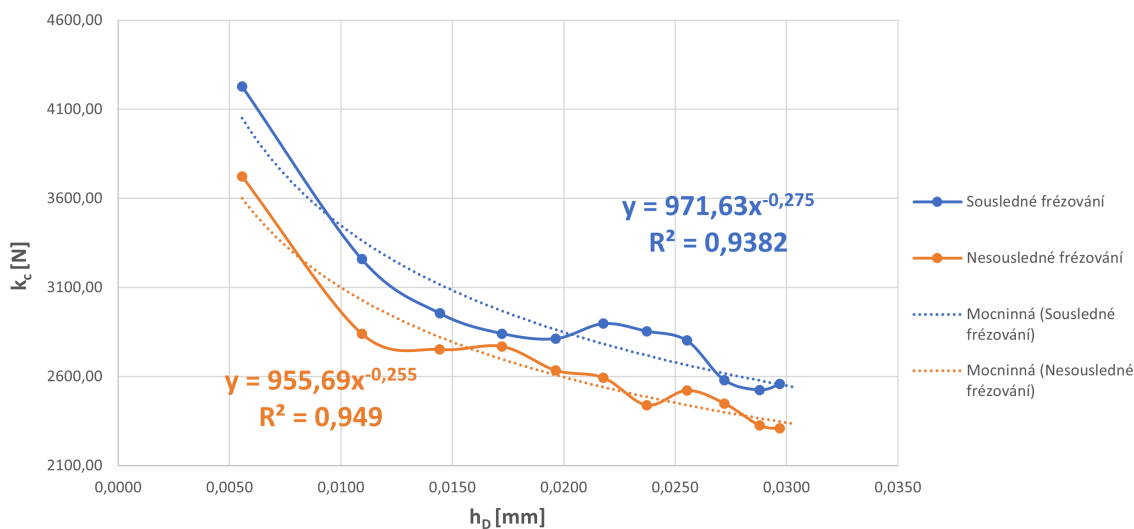
Odečet probíhal stejně jako u předchozí iterace, konkrétní hodnoty jsou uvedeny v tabulkách 8.4 a 8.5. Na obrázku 50 je pak znázorněno grafické srovnání závislostí měrné řezné síly na tloušťce odřezávané vrstvy při sousledném a nesousledném frézování. Až na některé odchylky mají závislosti klesající tendenci, jak uvádí teorie. Během obrábění bylo také omezeno chvění na minimum, proto tyto výsledky lze považovat za relevantní.

Tabulka 8.4: Určení k_c - polotovár blok - přední část

i	Záběr [mm]	ϕ_1 [°]	ϕ_2 [°]	$d\phi$ [°]	$\sin\phi$	h_d [mm]	F_t [N]	F_r [N]	F_c [N]	k_c [N]
1	0,2	164,76	180,00	172,38	0,13	0,0056	117,45	8,51	117,75	4228,69
2	0,7	149,81	180,00	164,91	0,26	0,0109	168,30	58,53	178,19	3258,28
3	1,2	139,80	180,00	159,90	0,34	0,0144	197,46	80,47	213,22	2954,51
4	1,7	131,55	180,00	155,78	0,41	0,0172	227,82	89,48	244,76	2840,55
5	2,2	124,25	180,00	152,13	0,47	0,0196	249,04	119,16	276,07	2811,80
6	2,7	117,54	180,00	148,77	0,52	0,0218	271,19	160,92	315,34	2896,22
7	3,2	111,21	180,00	145,61	0,56	0,0237	285,44	182,07	338,56	2853,99
8	3,7	105,15	180,00	142,58	0,61	0,0255	298,15	197,31	357,53	2801,47
9	4,2	99,25	180,00	139,63	0,65	0,0272	306,89	170,10	350,88	2579,31
10	4,7	93,46	180,00	136,73	0,69	0,0288	317,66	176,37	363,34	2524,19
11	5	90,00	180,00	135,00	0,71	0,0297	326,71	193,50	379,71	2557,08
12	5,2	87,70	180,00	133,85	0,72	0,0303	322,03	177,57	367,74	2428,27

Tabulka 8.5: Určení k_c - polotovár blok - zadní část

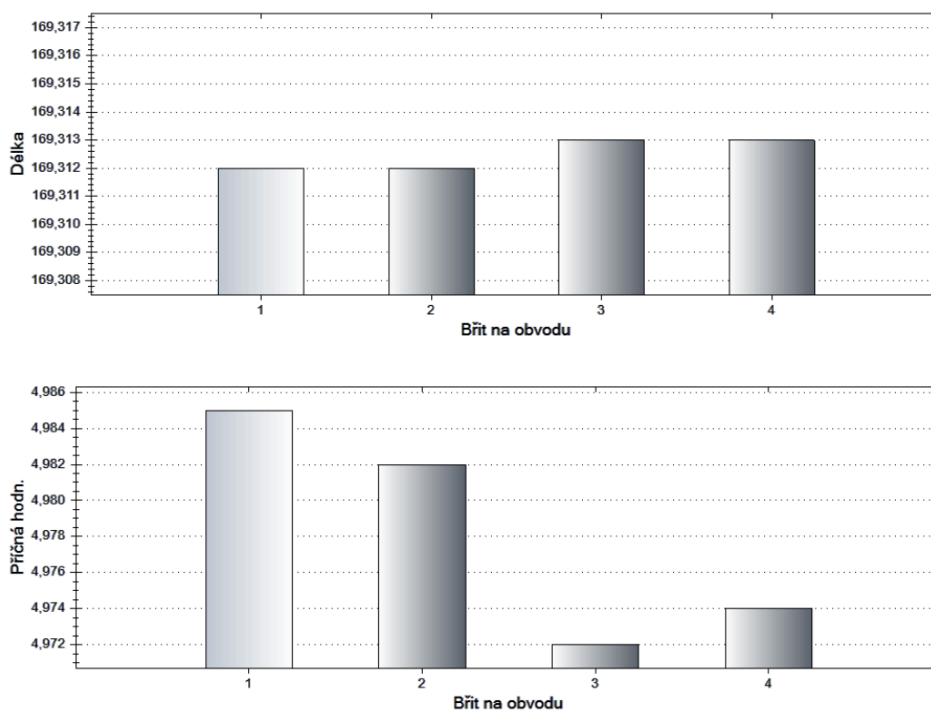
i	Záběr [mm]	ϕ_1 [°]	ϕ_2 [°]	$d\phi$ [°]	$\sin\phi$	h_d [mm]	F_t [N]	F_r [N]	F_c [N]	k_c [N]
1	0,2	0,00	15,22	7,61	0,13	0,0056	103,47	4,03	103,54	3723,22
2	0,7	0,00	30,18	15,09	0,26	0,0109	149,50	41,82	155,24	2839,58
3	1,2	0,00	40,19	20,10	0,34	0,0144	184,76	72,53	198,49	2750,95
4	1,7	0,00	48,44	24,22	0,41	0,0172	209,77	113,46	238,49	2768,29
5	2,2	0,00	55,75	27,88	0,47	0,0196	229,59	119,00	258,60	2633,78
6	2,7	0,00	62,46	31,23	0,52	0,0218	244,84	140,55	282,31	2592,89
7	3,2	0,00	68,79	34,40	0,56	0,0237	261,66	123,30	289,26	2438,35
8	3,7	0,00	74,85	37,43	0,61	0,0255	274,11	168,50	321,76	2521,19
9	4,2	0,00	80,75	40,38	0,65	0,0272	287,21	168,68	333,08	2448,46
10	4,7	0,00	86,54	43,27	0,69	0,0288	296,15	155,75	334,61	2324,61
11	5	0,00	90,00	45,00	0,71	0,0297	300,66	164,55	342,75	2308,17
12	5,2	0,00	92,30	46,15	0,72	0,0303	298,36	121,05	321,98	2126,08



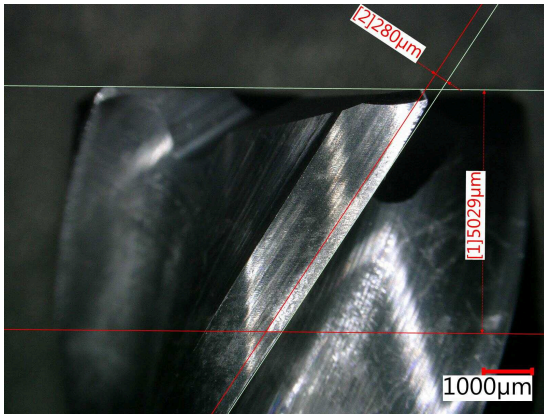
Obrázek 50: Závislost k_c na h_D - srovnání sousledné a nesousledné obrábění, polotovar blok

8.5.3 Kontrola nástroje a zkušební tělesa

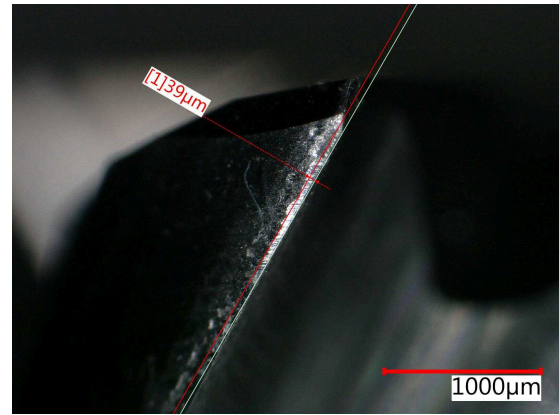
Po skončení experimentu byla opět provedena kontrola nástroje, jak na měřícím zařízení Zoller, tak i na digitálním mikroskopu. Co se týče vyrovnání nástroje, grafický výstup lze sledovat na obrázku 51. Nástroj se v kleštině pouze nepatrně pohl. Největší rozdíl v poloze mezi jednotlivými zuby je stejný jako před provedením experimentu, a to 0,013 mm. Pod mikroskopem na obrázku 52 nástroj vykazuje mírné sedření povlaku na hřbetě, na některých místech je evidentní začátek tvorby nárůstku (viz obrázky 54 a 55) a na obrázku 53 je patrné zřejmě počínající mírné opotřebení.



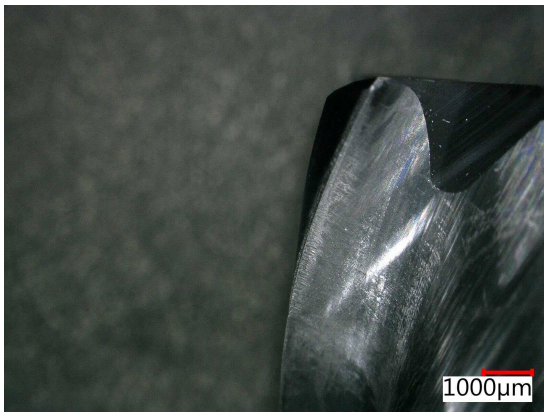
Obrázek 51: Grafické zobrazení kontroly nástroje na přístroji Zoller po druhém obrábění



Obrázek 52: Sedření povlaku z nástroje



Obrázek 53: Počínající mírné opotřebení nástroje

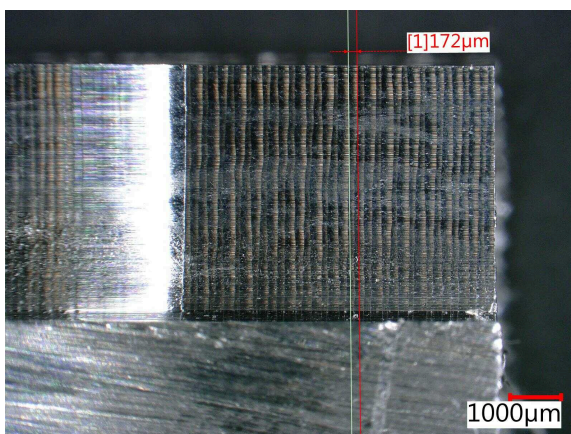


Obrázek 54: Tvorba nárůstku na čele nástroje

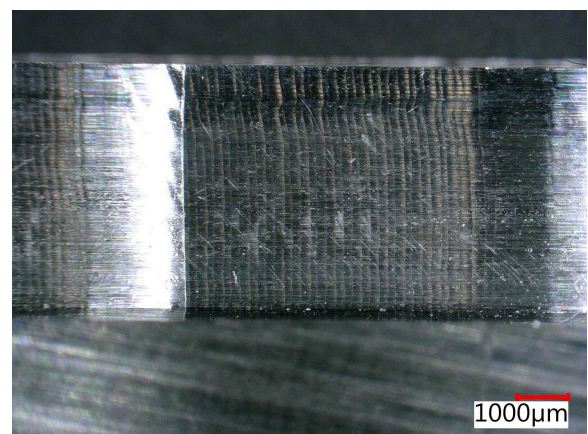


Obrázek 55: Tvorba nárůstku na hřbetě nástroje

Na obrázcích 56 a 57 je možné sledovat obrobený povrch. Je patrná menší hodnota posuvu a v dolní části se opět vyskytuje jistá vydřenina. Tentokrát ale v menším měřítku než u předchozí iterace. Jinak se obrábění jeví jako konstantní bez dalších problémů.



Obrázek 56: Snímek z mikroskopu, první řez - polotovár blok



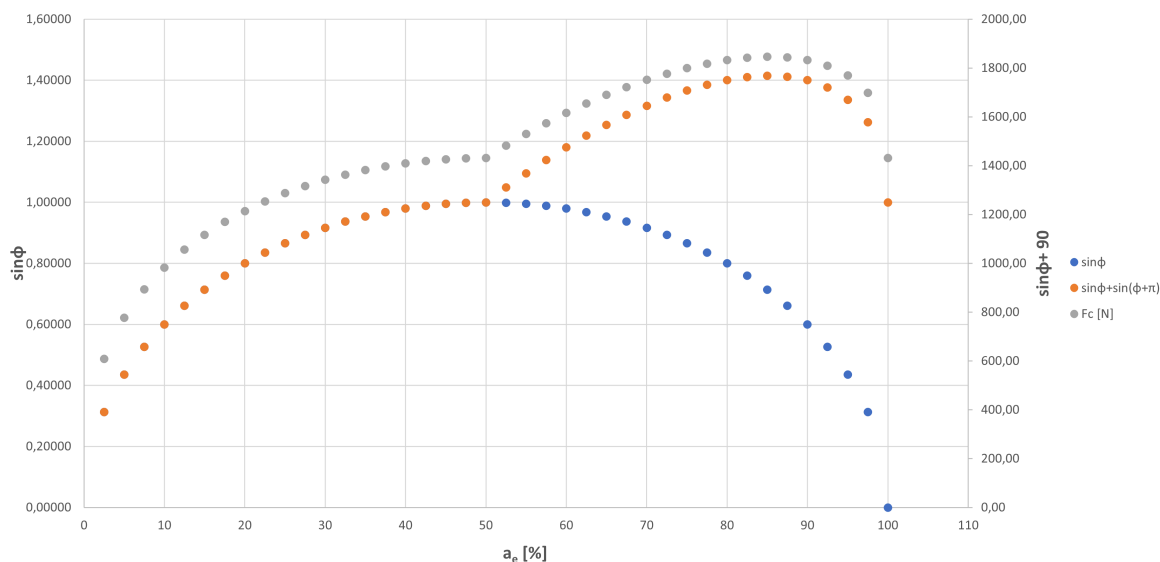
Obrázek 57: Snímek z mikroskopu, šestý řez - polotovár blok

8.6 Iterace 6 - zpracování a odsimulování dat z obrábění

V předchozích iteracích byl zkoumán vliv měrné řezné síly. Dalším již zmíněným vlivem na silové zatížení je reálný počet zubů v záběru. Dasavadní poznatky jsou uplatněny v této iteraci, kdy je sestavena tabulka s přepočtem hloubky řezu a_p tak, aby byl respektovaný vliv měrné řezné síly a počet zubů v záběru.

V tabulce 8.6 jsou uvedeny veškeré získané hodnoty, včetně požadované přepočítané axiální hloubky řezu a_p' . Pro výpočty bylo vycházeno ze vztahů a závislostí uvedených v kapitole 2.3. Vycházelo se z předpokladu, že u čtyřbřité frézy může dojít pouze k situaci, kdy budou současně v záběru maximálně dva zuby. Za předpokladu běžného rozložení břitů frézy po 90° , k současnému záběru dvou zubů bude docházet při radiálním záběru větším než 50 % průměru nástroje. Za využití těchto předpokladů a získaných závislostí vývoje měrné řezné síly, byla sestavena tabulka, kdy při zachování maximálního zatížení nástroje uvaděné výrobcem, máme různé kombinace hloubek řezu a_p a a_e .

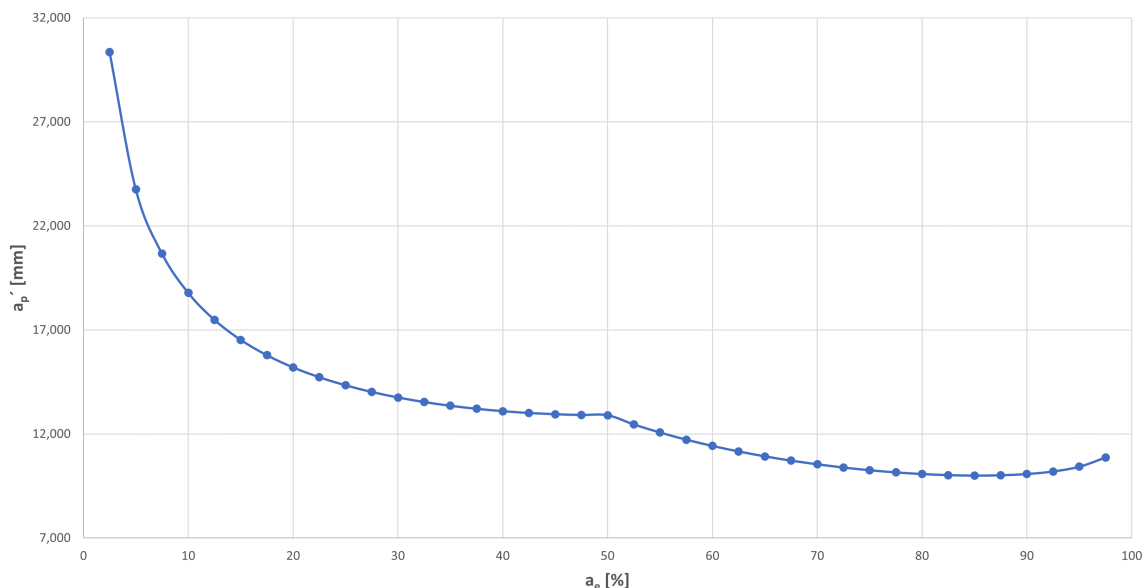
Průběh řezné síly F_c v závislosti na radiální hloubce řezu lze sledovat na obrázku 58. Na obrázku 59 je dále k dispozici vývoj získaných možných hloubek axiálních řezu a_p' v závislosti též radiální hloubce řezu při zachování konstantního zatížení nástroje. Ze závislosti je patrný pravděpodobný nárůst řezné síly se zvětšováním radiálního záběru nástroje. Je tak velký, že zvětšování hloubky řezu a_p se vyplatí pouze cca do 20-30 %. Závislosti nám také naznačují, že vliv dalšího zubu v záběru není tak velký, jak bylo původně předpokládáno. Pravděpodobně dochází k relativně symetrickému rozložení sil na jednotlivé zuby a celkový nárůst síly není tak razantní jako při zvětšování záběru jednoho zubu.



Obrázek 58: Závislost řezné síly na radiální hloubce řezu a_e s respektováním více zubů v záběru a měrné řezné síly k_c

Tabulka 8.6: Výpočet odpovídající hloubky řezu a_p' v závislosti na k_c a počet zubů v záběru

i	a_e [%]	a_e [mm]	ϕ [rad]	ϕ [°]	$\phi+\pi$ [rad]	F_c [N]	$F_{c\max}$ [N]	k_c [Mpa]	a_p' [mm]
1	2,5	0,25	0,31756	18,2	1,88836	608,17	1845,77	3043,28	30,350
2	5	0,5	0,45103	25,8	2,02182	777,15	1845,77	2785,80	23,750
3	7,5	0,75	0,55481	31,8	2,12561	893,23	1845,77	2649,43	20,664
4	10	1	0,64350	36,9	2,21430	982,89	1845,77	2559,61	18,779
5	12,5	1,25	0,72273	41,4	2,29353	1055,90	1845,77	2494,34	17,480
6	15	1,5	0,79540	45,6	2,36620	1117,11	1845,77	2444,17	16,523
7	17,5	1,75	0,86321	49,5	2,43401	1169,32	1845,77	2404,25	15,785
8	20	2	0,92730	53,1	2,49809	1214,33	1845,77	2371,73	15,200
9	22,5	2,25	0,98843	56,6	2,55923	1253,33	1845,77	2344,85	14,727
10	25	2,5	1,04720	60,0	2,61799	1287,21	1845,77	2322,41	14,339
11	27,5	2,75	1,10403	63,3	2,67483	1316,59	1845,77	2303,59	14,019
12	30	3	1,15928	66,4	2,73008	1341,95	1845,77	2287,80	13,754
13	32,5	3,25	1,21323	69,5	2,78402	1363,66	1845,77	2274,60	13,535
14	35	3,5	1,26610	72,5	2,83690	1382,01	1845,77	2263,66	13,356
15	37,5	3,75	1,31812	75,5	2,88891	1397,22	1845,77	2254,75	13,210
16	40	4	1,36944	78,5	2,94023	1409,45	1845,77	2247,67	13,096
17	42,5	4,25	1,42023	81,4	2,99102	1418,84	1845,77	2242,30	13,009
18	45	4,5	1,47063	84,3	3,04143	1425,48	1845,77	2238,53	12,948
19	47,5	4,75	1,52078	87,1	3,09157	1429,44	1845,77	2236,29	12,913
20	50	5	1,57080	90,0	3,14159	1430,75	1845,77	2235,55	12,901
21	52,5	5,25	1,62082	92,9	3,19161	1481,69	1845,77	2207,53	12,457
22	55	5,5	1,67096	95,7	3,24176	1529,43	1845,77	2182,43	12,068
23	57,5	5,75	1,72136	98,6	3,29216	1574,06	1845,77	2159,92	11,726
24	60	6	1,77215	101,5	3,34295	1615,63	1845,77	2139,71	11,424
25	62,5	6,25	1,82348	104,5	3,39427	1654,17	1845,77	2121,61	11,158
26	65	6,5	1,87549	107,5	3,44629	1689,65	1845,77	2105,43	10,924
27	67,5	6,75	1,92837	110,5	3,49916	1722,04	1845,77	2091,07	10,719
28	70	7	1,98231	113,6	3,55311	1751,23	1845,77	2078,44	10,540
29	72,5	7,25	2,03756	116,7	3,60836	1777,08	1845,77	2067,48	10,387
30	75	7,5	2,09440	120,0	3,66519	1799,40	1845,77	2058,20	10,258
31	77,5	7,75	2,15316	123,4	3,72396	1817,89	1845,77	2050,63	10,153
32	80	8	2,21430	126,9	3,78509	1832,18	1845,77	2044,85	10,074
33	82,5	8,25	2,27838	130,5	3,84918	1841,73	1845,77	2041,02	10,022
34	85	8,5	2,34619	134,4	3,91699	1845,77	1845,77	2039,41	10,000
35	87,5	8,75	2,41886	138,6	3,98965	1843,17	1845,77	2040,44	10,014
36	90	9	2,49809	143,1	4,06889	1832,18	1845,77	2044,85	10,074
37	92,5	9,25	2,58678	148,2	4,15758	1809,80	1845,77	2053,93	10,199
38	95	9,5	2,69057	154,2	4,26136	1770,13	1845,77	2070,40	10,427
39	97,5	9,75	2,82403	161,8	4,39483	1697,88	1845,77	2101,75	10,871

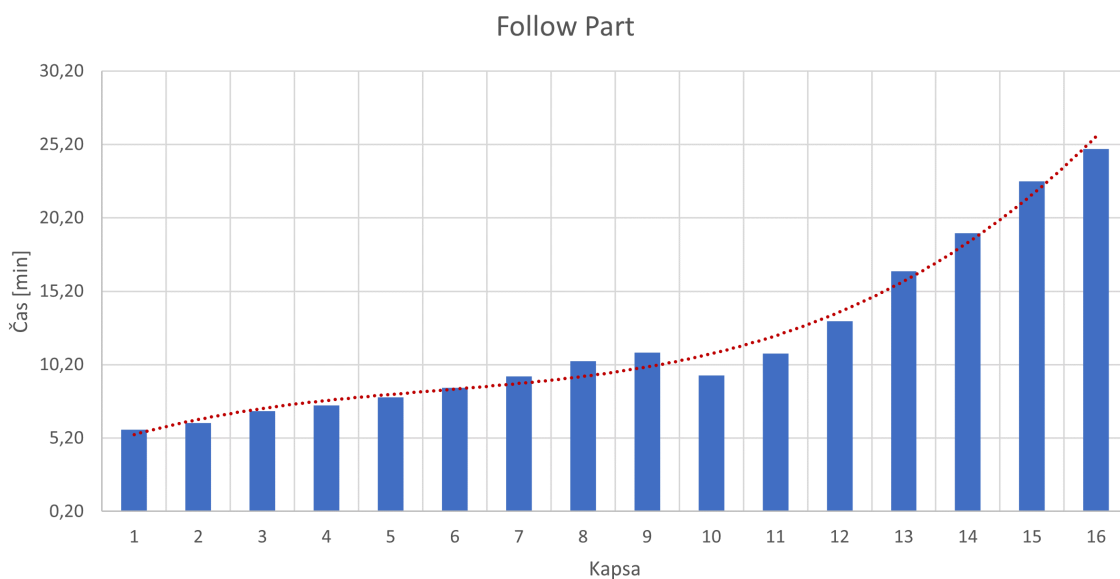


Obrázek 59: Závislost přepočítané hloubky řezu a_p' na radiální hloubce řezu

8.6.1 Simulace v NX

Získaný přepčet hloubky řezu, lze již využít pro další simulaci v softwaru NX za účelem nalezení optimálních podmínek. Postup zůstal stejný jako u prvotních iteracích, pouze se nesimulovalo všech 192 kombinací. Konkrétně se odsimulovala pouze strategie Follow Part, z důvodu minoritního vlivu ostatních strategií v předchozích iteracích a nástroj D10 z důvodu jeho využití při získávání závislosti měrné řezné síly. Bylo tedy vybráno pouze 16 kombinací, které byly odsimulovány v softwaru NX s cílem zjištění jednotlivých časů obrábění kapes.

V tabulce 8.7 lze vidět konkrétní nastavení simulace včetně zjištěných časů. Grafické znázornění výsledných časů je pak vyobrazeno na obrázku 60.



Obrázek 60: Porovnání vlivu záběrových podmínek na výsledný čas obrábění - iterace 6, nástroj D10, strategie Follow Part

Tabulka 8.7: Iterace 6 - D10 - Follow Part

Kapsa	a_e [%]	a_e [mm]	a_p [mm]	v_c [m/min]	Otáčky [ot/min]	f_z [mm/z]	f_{min} [mm/min]	Čas [min]
1	85,00%	8,5	10,000	180	5729,6	0,064	1466,8	5,76
2	75,00%	7,5	10,258	180	5729,6	0,064	1466,8	6,22
3	65,00%	6,5	10,924	180	5729,6	0,064	1466,8	7,03
4	60,00%	6,0	11,424	180	5729,6	0,064	1466,8	7,42
5	55,00%	5,5	12,068	180	5729,6	0,064	1466,8	7,98
6	50,00%	5,0	12,901	180	5729,6	0,064	1466,8	8,62
7	45,00%	4,5	12,948	180	5729,6	0,064	1466,8	9,39
8	40,00%	4,0	13,096	180	5729,6	0,064	1466,8	10,43
9	37,50%	3,8	13,210	180	5729,6	0,064	1466,8	11,03
10	32,50%	3,3	13,535	180	5729,6	0,064	1466,8	9,48
11	27,50%	2,8	14,019	180	5729,6	0,064	1466,8	10,97
12	22,50%	2,3	14,727	180	5729,6	0,064	1466,8	13,17
13	17,50%	1,8	15,785	180	5729,6	0,064	1466,8	16,56
14	15,00%	1,5	16,523	180	5729,6	0,064	1466,8	19,16
15	12,50%	1,3	17,780	180	5729,6	0,064	1466,8	22,70
16	7,50%	0,8	20,664	180	5729,6	0,064	1466,8	24,89

Ze simulace nám vychází relativně velký rozptyl časů. Jelikož se jedná o nespojitě hodnoty, jsou výsledky zobrazeny ve sloupcové závilosti a pouze pro srovnání proloženy spojnicí trendu. Možné důsledky velkých časových rozdílů jsou okomentovány v diskuzi této práce.

9. Diskuze výsledků

Prvotním záměrem diplomové práce bylo zkoumání vlivu v poměrovém nastavení záběrových podmínek, respektive axiální hloubky řezu a_p a radiální hloubky řezu a_e , s cílem nalezení optimálních podmínek z hlediska výsledného času, ale i zatížení nástroje. Zpravidla výrobce uvádí v katalogu nástrojů doporučené řezné podmínky. Tyto podmínky jsou uvedeny většinou pouze pro jednu nebo jen několik málo kombinací záběrových podmínek. Za předpokladu, že tyto podmínky jsou uváděny jakožto maximální možné zatížení nástroje, bylo cílem toto zatížení respektovat a vytvořit simulaci pro další kombinace záběrových podmínek.

Několik prvních iterací bylo prováděno pouze simulací v softwaru NX, kdy byl navržen jednoduchý postup rozdělení záběrových podmínek. Z těchto iterací lze usoudit dva závěry. Za prvé se ukazuje, že k nejlepším časům dochází, pokud je aktuální hloubka řezu a_p nastavena jako celočíselný násobek hloubky obráběné kapsy. Víme-li velikost kapsy, může mít smysl uvažovat o velikosti nástroje, jelikož tomu odpovídá i jeho obvyklá délka. Tato úvaha je ale už nad rámec této práce. Druhý závěr je možnost vyloučit vliv volby obecné strategie. Dle simulací má obecná strategie minoritní vliv na výsledný čas obrábění. Lze tedy volit strategii, která je pro nás výhodná z hlediska technologie.

Bohužel tento postup volby podmínek se později ukázal jako nedostačující, jelikož nebral v potaz parametry jako je měrná řezná síla nebo možnost záběru více zubů naráz. V průběhu se tedy experiment postupně optimalizoval vzhledem k odhaleným nedostatkům. Byl vytvořen teoretický průběh silového zatížení jednoho, respektive více zubů v záběru. Z tohoto průběhu bylo stanoveno maximální možné zatížení nástroje, které odpovídá podmínkám uvedeným výrobcem. Vzhledem k tomu, že při změně záběrových podmínek, respektive hlavně při změně radiální hloubky řezu se mění tloušťka odřezávané vrstvy, bylo nutné tento průběh podložit experimentálním zjištěním průběhu měrné řezné síly při obrábění materiálu EN AW 7075. Bylo potvrzeno, že největší měrná řezná síla se vyskytuje při malých tloušťkách odřezávané vrstvy a postupně s její rostoucí tloušťkou klesá. Na základě toho bylo možné sestavit optimalizované rozložení záběrových podmínek, které se odsimulovalo v softwaru NX. Rozdíly v získaných časech jsou značné a důvody tohoto jevu by mohly být následující.

V první řadě je nutné podotknout, že v důsledku omezeného času již nebylo možné odsimulované kombinace podložit reálným obráběním s kontrolou silového zatížení. Ze získaného silového průběhu a výsledků simulace, lze usuzovat, že standartní nástroj nedokáže snést zatížení, které vyvolává kombinace malého a_e a velkého a_p . Při stanoveném limitu F_c je nutné zatížení snížit úpravou právě těchto záběrových podmínek, což vede k prodloužení času. Aby bylo možné tuto formu optimalizace využít, je vhodné využít speciální nástroje určené k této formě obrábění. Konkrétně se jedná o nástroje určené pro tzv. slicing či trochoidální obrábění. Tyto nástroje disponují zesíleným jádrem na úkor zmenšených drážek.

Další vliv na průběh experimentu mohla mít samotná upínací kleština. Jak již bylo

zmíněno, nástroj vykazoval určité házení. Pro vyhodnocení experimentu bylo toto házení vykompenzováno odečtem hodnot silového zatížení na jednotlivých zubech jako střední hodnota, ale v praxi to znamená, že nástroj při záběru jednotlivých zubů zabírá pokaždé jinak. Jinými slovy dochází ke změnám tloušťky odřezávané vrstvy. Z teorie a následně i z experimentu víme, že největší měrná řezná síla je při malých tloušťkách. Dalším faktorem je, že poměr velikosti házení a posuvu na zub je poměrně velký. Jedná se o poměr kolem 20 %. Z těchto důvodů by házení nástroje mohlo ovlivnit celý experiment. Další parametr, který by mohl ovlivnit výsledky měření je zkosení na špičce nástroje. To v rámci provedení experimentální části nebylo zahrnuto ve výpočtech průřezu odřezávané vrstvy.

Dalším závěrem, který je možné vyvodit z provedeného experimentu je již zmiňovaný vliv záběru více zubů. Jak ze získaného silového průběhu na obrázku 58, tak i ze závislosti vypočítané a_p' na obrázku 59, lze usoudit, že vliv záběru dalšího zubu nemá na celkové silové působení tak významný vliv. Při začátku záběru druhého zubu se první zub pravděpodobně dostává za hranici maximálního zatížení a postupně se silové zatížení na něj snižuje. Zároveň tedy zatížení na druhý zub postupně roste a dalo by se říci, že se zatížení na obou zubech vzájemně kompenzuje a zatížení tedy není dvojnásobné, ale dál narůstá jen částečně, a to pouze do určité chvíle. Nad radiální záběr nástroje větší jak 85 % zatížení začíná opět klesat. Je to z důvodu rozložení záběrových úhlů, který má na celkovou sílu velký podíl. Tento jev je možné pozorovat i v závislosti získané a_p' , kdy od záběru 85 % průměru nástroje je opět možné mírně zvednout axiální hloubku řezu.

Úplným závěrem lze tedy prohlásit, že ze závislosti na obrázku 59 vyplývá následující. Z hlediska silového působení lze hloubku řezu zvyšovat významně pouze do určitého procenta radiálního záběru nástroje. Číselně to lze vyjádřit kolem 20 - 25 %. Poté je silový nárůst takový, že při větším opásání nástroje nelze využívat větších hloubek řezu. Ze závěrečné simulace vyplývá, že nejrychlejších časů hrubování kapes lze dosahovat naopak menší hloubkou řezu a větším opásáním nástroje.

10. Závěr

Tato práce se zabývá problematikou optimalizace hrubování kapes ve 2,5D. Hlavním cílem bylo navrhnout a provést experiment, ze kterého lze vyvodit doporučení pro volbu řezných a záběrových podmínek při hrubování kapes. Součástí práce je provedena rešerše na téma teorie obrábění obecně, ale i na téma optimalizace obráběcího procesu. V experimentální části práce bylo navrženo několik postupů provedení. Tyto postupy byly simulovány v softwaru NX a následně dle jejich výsledků dále optimalizovány. Součástí experimentu je i reálné ověření vlivu změny měrné řezné síly v závislosti na tloušťce odřezávané vrstvy při obrábění hliníkové slitiny EN AW 7075.

V diskuzi práce jsou popsány výsledky provedených experimentů. Lze tedy konstatovat, že cíle práce byly splněny, ale zpracováním této studie vznikl prostor pro další a detailnější výzkum této problematiky. Byla zmíněna řada vlivů, které byly z časových důvodů zanedbány, ale reálně mohly ovlivnit daný experiment. Získané závěry teoretického výzkumu a provedených experimentů by bylo dobré verifikovat i při reálném obrábění, aby došlo k ověření získaného modelu. S ohledem na rozsah nutných experimentů, které představuje obrábění všech kombinací parametrů, to nebylo provedeno.

Za nejdůležitější poznatky v této práci lze považovat následující. Při obrábění kapes je výhodné volit axiální hloubku řezu a_p s ohledem na velikost dostupných nástrojů a hloubku kapsy samotné. Ideálně tedy volit hloubku řezu odpovídající celočíselnému podílu hloubky kapsy. Dále je možné konstatovat, že při obrábění obecných kapes podobného tvaru, jako je uvedeno v práci, volba obráběcí strategie nemá velký vliv na výsledný čas, a je tedy možné upřednostnit jiné kritérium pro volbu, například technologickou vhodnost. Je nutné ale brát v potaz, že do optimalizačního procesu vstupuje celá řada proměnných. V práci byl zmíněn vliv měrné řezné síly, počtu zubů v záběru, geometrie nástroje a další. Bylo experimentálně potvrzeno, že měrná řezná síla klesá s rostoucím radiálním záběrem frézy, což odpovídá teorii, neboť se zvětšuje tloušťka odřezávané vrstvy. Navíc byly získány hodnoty, které je možné použít při výpočtech či simulaci obrábění daného materiálu.

Závěrečné doporučení je tedy takové, že při použití standartních nástrojů je rychlejší využívat menší axiální hloubku řezu a naopak vyšší tu radiální. Což ale nejde ruku v ruce s trvanlivostí nástroje, neboť by se opakovaně namáhala pouze jeho malá část. Pro využití větších axiálních hloubek je vhodnější z důvodu silového zatížení využívat nástroje se zesíleným jádrem.

Reálné využití poznatků z této práce lze aplikovat například při obrábění mnohonásobných forem do vstřikovacích lisů nebo při výrobě různých panelů v leteckém průmyslu, kdy je odebíráno velké množství materiálu, převážně tedy ve formě odfrézování velkého počtu kapes a jiných dutin.

Seznam obrázků

1	Tvářená tříska - upraveno dle [1]	14
2	Netvářená tříska - upraveno dle [1]	14
3	Oblasti plastických deformací - upraveno dle [1]	14
4	Vymezení oblasti primární plastické deformace - upraveno dle [1]	15
5	Bodový styk - upraveno dle [1]	16
6	Plošný styk - upraveno dle [1]	16
7	Typické průběhy zpevnění v povrchové vrstvě - upraveno dle [5]	17
8	Síly při vázaném řezání - upraveno dle [5]	18
9	Síly při ortogonálním řezání - upraveno dle [5]	18
10	Případ čelního frézování - upraveno dle [1]	19
11	Závislost měrné řezné síly na posuvu - upraveno dle [5]	20
12	Závislost odvodu tepla na řezné rychlosti - upraveno dle [9]	22
13	Mechanismy opotřebení v závislosti na řezné rychlosti - upraveno dle [10] .	24
14	Závislost tvrdosti řezných materiálů na teplotě - upraveno dle [10]	25
15	Celková deformace břitu - upraveno dle [5]	25
16	Závislost minimálních nákladů ve spojení s maximální produktivitou - upraveno dle [17]	31
17	Rozdělení adaptivních řídicích systémů - upraveno dle [18]	32
18	Demonstrativní příklad změny úhlu opásání TEA - upraveno dle [24]	33
19	Efektivnější přístup pro rohový záběr - upraveno dle [24]	34
20	Ukázka drah využívající optimální velikost TEA [25]	34
21	Technologie Peel Milling [26]	35
22	Ukázka konturovací strategie [34]	39
23	Ukázka řádkovací strategie [35]	39
24	Ukázka trochoidní strategie [36]	40
25	Ukázka strategie ponorného frézování [40]	41
26	Ukázka SW G-Wizzard - 100% agresivita [41]	43
27	Ukázka SW G-Wizzard - jemné obrábění [41]	44
28	Zkušební těleso - simulační	45
29	Rozměry kapsy - simulační	45
30	Dynamometr - nástroj upnutý ve stroji	47
31	Dynamometr - zesilovač, převodník, PC	47
32	Ukázka programu ze SW NX	48

33	Porovnání vlivu velikosti nástroje a nastavení záběrových podmínek na čas obrábění - iterace 1, strategie Follow Part	49
34	Porovnání vlivu jednotlivých strategií na výsledný čas obrábění - iterace 1, nástroj D10	49
35	Porovnání vlivu velikosti nástroje a nastavení řezných podmínek na celkový čas obrábění - iterace 2, strategie Follow Part	50
36	Porovnání vlivu jednotlivých strategií na výsledný čas obrábění - iterace 2, nástroj D10	50
37	Porovnání vlivu velikosti nástroje a nastavení řezných podmínek na celkový čas obrábění - iterace 3, strategie Follow Part	51
38	Schéma určování měrné řezné síly - polotovar plech 5 mm	52
39	Polotovar pro určování měrné řezné síly - plech 5 mm, upnutý	52
40	Polotovar pro určování měrné řezné síly - plech 5 mm	52
41	Ukázka záznamu ze SW DynoWare - polotovar plech 5 mm	53
42	Závislost k_c na h_D - polotovar plech 5 mm	54
43	Grafické zobrazení kontroly nástroje na přístroji Zoller po prvním obrábění	55
44	Snímek z mikroskopu, první řez - polotovar plech 5 mm	55
45	Snímek z mikroskopu, řez z druhé strany - polotovar plech 5 mm	55
46	Grafické zobrazení kontroly nástroje na přístroji Zoller po přeupnutí	56
47	Schéma určování měrné řezné síly - polotovar blok	57
48	Polotovar pro určování měrné řezné síly - blok, upnutý	57
49	Polotovar pro určování měrné řezné síly - blok	57
50	Závislost k_c na h_D - srovnání sousledné a nesousledné obrábění, polotovar blok	59
51	Grafické zobrazení kontroly nástroje na přístroji Zoller po druhém obrábění	59
52	Sedření povlaku z nástroje	60
53	Počínající mírné opotřebení nástroje	60
54	Tvorba nárůstku na čele nástroje	60
55	Tvorba nárůstku na hřbetě nástroje	60
56	Snímek z mikroskopu, první řez - polotovar blok	60
57	Snímek z mikroskopu, šestý řez - polotovar blok	60
58	Závislost řezné síly na radiální hloubce řezu a_e s respektováním více zubů v záběru a měrné řezné síly k_c	61
59	Závislost přepočítané hloubky řezu a_p' na radiální hloubce řezu	63
60	Porovnání vlivu záběrových podmínek na výsledný čas obrábění - iterace 6, nástroj D10, strategie Follow Part	63
61	Iterace 1 - porovnání časů jednotlivých nástrojů - Follow Part	xvi
62	Iterace 1 - porovnání časů jednotlivých nástrojů - Follow Periphery	xvi
63	Iterace 1 - porovnání časů jednotlivých nástrojů - Zig-Zag	xvi
64	Iterace 1 - porovnání časů jednotlivých strategií - D10	xvii
65	Iterace 1 - porovnání časů jednotlivých strategií - D12	xvii

66	Iterace 1 - porovnání časů jednotlivých strategií - D16	xvii
67	Iterace 1 - porovnání časů jednotlivých strategií - D20	xviii
68	Iterace 2 - porovnání časů jednotlivých nástrojů - Follow Part	xviii
69	Iterace 2 - porovnání časů jednotlivých nástrojů - Follow Periphery	xviii
70	Iterace 2 - porovnání časů jednotlivých nástrojů - Zig-Zag	xix
71	Iterace 2 - porovnání časů jednotlivých strategií - D10	xix
72	Iterace 2 - porovnání časů jednotlivých strategií - D12	xix
73	Iterace 2 - porovnání časů jednotlivých strategií - D16	xx
74	Iterace 2 - porovnání časů jednotlivých strategií - D20	xx
75	Iterace 3 - porovnání časů jednotlivých nástrojů - Follow Part	xx

Seznam tabulek

3.1	Rozdělení slinutých karbidů	30
7.1	Chemické složení EN AW-7075 - převzato z [44]	46
7.2	Řezné podmínky pro simulační část experimentu - převzato z [45]	47
7.3	Seznam použitých zařízení	47
8.1	Určení k_c - polotovar plech 5 mm	53
8.2	Řezné podmínky pro zjišťování k_c - polotovar plech 5 mm	54
8.3	Řezné podmínky pro zjišťování k_c - polotovar blok	57
8.4	Určení k_c - polotovar blok - přední část	58
8.5	Určení k_c - polotovar blok - zadní část	58
8.6	Výpočet odpovídající hloubky řezu a_p v závislosti na k_c a počet zubů v záběru	62
8.7	Iterace 6 - D10 - Follow Part	64
A.1	Iterace 1 - D10 - Follow Part	ii
A.2	Iterace 1 - D12 - Follow Part	ii
A.3	Iterace 1 - D16 - Follow Part	iii
A.4	Iterace 1 - D20 - Follow Part	iii
A.5	Iterace 1 - D10 - Follow Periphery	iv
A.6	Iterace 1 - D12 - Follow Periphery	iv
A.7	Iterace 1 - D16 - Follow Periphery	v
A.8	Iterace 1 - D20 - Follow Periphery	v
A.9	Iterace 1 - D10 - Zig-Zag	vi
A.10	Iterace 1 - D12 - Zig-Zag	vi
A.11	Iterace 1 - D16 - Zig-Zag	vii
A.12	Iterace 1 - D20 - Zig-Zag	vii
A.13	Iterace 2 - D10 - Follow Part	viii
A.14	Iterace 2 - D12 - Follow Part	viii
A.15	Iterace 2 - D16 - Follow Part	ix
A.16	Iterace 2 - D20 - Follow Part	ix
A.17	Iterace 2 - D10 - Follow Periphery	x
A.18	Iterace 2 - D12 - Follow Periphery	x
A.19	Iterace 2 - D16 - Follow Periphery	xi
A.20	Iterace 2 - D20 - Follow Periphery	xi
A.21	Iterace 2 - D10 - Zig-Zag	xii
A.22	Iterace 2 - D12 - Zig-Zag	xii
A.23	Iterace 2 - D16 - Zig-Zag	xiii

A.24 Iterace 2 - D20 - Zig-Zag	xiii
A.25 Iterace 3 - D10 - Follow Part	xiv
A.26 Iterace 3 - D12 - Follow Part	xiv
A.27 Iterace 3 - D16 - Follow Part	xv
A.28 Iterace 3 - D20 - Follow Part	xv

Seznam literárních zdrojů

1. MÁDL, Jan. *Teorie obrábění*. Praha 6: Ediční středisko ČVUT, 1990.
2. *What is Roughing in Machining – Difference Between Roughing and Finishing* [online]. 2021. [cit. 2022-12-17]. Dostupné z: <https://www.cnclathing.com/guide/what-is-roughing-in-machining-difference-between-roughing-and-finishing-cnclathing>.
3. VLACH, Bohumil. *Technologie obrábění a montáží*. 1. vydání. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1990. ISBN 80-03-00143-9.
4. KOČMAN, K.; PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 2. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3068-0.
5. MÁDL, Jan; VRABEC, Martin; KAVKA, Jindřich; DVOŘÁK, Rudolf. *Technologie obrábění: 1. díl*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03752-2.
6. FOREJT, Milan; PÍŠKA, Miroslav. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
7. 2. TVORBA A TVAROVÁNÍ TRŽSKY: Studijní dokument. In: Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, [b.r.]. Dostupné také z: http://home1.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_02.pdf.
8. BRYCHTA, Josef; ČEP, Robert; SADÍLEK, Marek; PETŘKOVSKÁ, Lenka; NOVÁKOVÁ, Jana. *Nové směry v progresivním obrábění*. První vydání. Ostrava: Ediční středisko VŠB - TUO, 2007. ISBN 978-80-248-1505-3.
9. ŠKOPEČEK, T.; VODIČKA, J.; PAHL, J.; HERKNER, V. *Základy vysokorychlostního obrábění - HSC*. 1. vydání. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. ISBN 80-704-3344-2.
10. LI, Bin. A review of tool wear estimation using theoretical analysis and numerical simulation technologies. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2012, s. 143–151. ISSN 0263-4368. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2012.05.006>.
11. LIEW, W.Y.H.; DING, X. Wear progression of carbide tool in low-speed end milling of stainless steel. *Wear*. 2008, č. 1, s. 155–166. ISSN 0043-1648. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.09.003>.
12. XIE, L.-J.; SCHMIDT, J.; SCHMIDT, C.; BIESINGER, F. 2D FEM estimate of tool wear in turning operation. *Wear*. 2005, č. 10, s. 1479–1490. ISSN 0043-1648. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.11.004>.
13. MAREK, Jiří; BLECHA, Petr. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. 2. přepracované vydání. Praha: MM Publishing, 2010. ISBN 978-80-254-7980-3.

14. LAŠOVÁ, Václava. *Základy stavby obráběcích strojů*. 1. vydání. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Vydavatelství Univerzitní 8, 2012. ISBN 978-80-261-0126-0. Dostupné také z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/16835/1/Zaklady_stavby.pdf.
15. POKORNÝ, Přemysl. *Obráběcí stroje: Skripta*. Technická univerzita v Liberci, 2001. Dostupné také z: http://www.kvs.tul.cz/download/vyrobn_i_stroje/obrabeci.pdf.
16. ŠTAJNOCHR, Lubomír. *Nástrojové materiály: Studijní podklad*. Praha, 2013. Dostupné také z: http://u12134.fsid.cvut.cz/podklady/ON/2013_1_Nastrojove_materialy.pdf.
17. VOS, Patrick De. Příručka pro technology: Ekonomika výroby a celková optimalizace: SECO Tools CZ. *MM Průmyslové spektrum*. 2013, č. 10. ISSN 1212-2572.
18. MÁDL, Jan; KVASNIČKA, Ivo. *Optimalizace obráběcího procesu*. První vydání. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1998.
19. VRABEC, Martin; MÁDL, Jan. *NC programování v obrábění*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-03045-8.
20. *Adaptive Machining*. [B.r.]. Dostupné také z: <http://machining4.eu/technology-sheets/adaptive-machining>.
21. ALBERT, Mark. Adaptive Machining Makes a Robot More Productive. 2015. Dostupné také z: <https://www.mmsonline.com/articles/adaptive-machining-makes-a-robot-more-productive>.
22. COMPANY, Harvey Performance. *Corner Engagement: How to Machine Corners*. 2017. Dostupné také z: <https://www.harveyperformance.com/in-the-loupe/corner-engagement/>.
23. WU, Shixiong; MA, Wei; BAI, Haiping; WANG, Chengyong; SONG, Yuexian. Engagement Angle Modeling for Multiple-circle Continuous Machining and Its Application in the Pocket Machining. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2017, č. 2, s. 256–271. ISSN 2192-8258. Dostupné z DOI: 10.1007/s10033-017-0092-6.
24. ALBERT, Mark. Steering Clear Of Corner Concerns. *Modern Machine Shop*. 2006. Dostupné také z: <https://www.mmsonline.com/articles/steering-clear-of-corner-concerns>.
25. ROBERTS, Sue. High-efficiency milling speed changes rules: Tooling, software, and equipment combine capabilities to make the process work. *Canadian Metalworking*. 2018, č. January. Dostupné také z: <https://www.canadianmetalworking.com/canadianmetalworking/article/cuttingtools/high-efficiency-milling-speed-changes-rules>.

26. VOS, Patric De. Příručka pro technology: Dynamické frézování - využití kompenzačního přístupu. *MM Průmyslové spektrum*. 2013, č. 7,8. ISSN 1212-2572. Dostupné také z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-dynamicke-frezovani-vyuziti-kompenzacniho-pristupu>.
27. DAVIM, J. Paulo. *Modern Machining Technology: A practical guide*. 1. vydání. Philadelphia, USA: Woodhead Publishing, 2011. ISBN 978-0-85709-494-0.
28. NEMETH, Michelle. *What is CAM?* 2022. Dostupné také z: <https://www.mastercam.com/news/blog/what-is-cam/>.
29. NX. 2023. Dostupné také z: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/nx/>.
30. SIEMENS. *NX: Transforming the entire product development process with high-performance, integrated solutions for design, simulation and manufacturing*. 2023. Dostupné také z: <https://www.appliedcax.com/docs/nx/brochure-overview-nx.pdf>.
31. *PowerMill: Expert CAM software for high-speed and 5-axis CNC machining*. 2023. Dostupné také z: <https://www.autodesk.com/products/powermill/overview>.
32. *Autodesk PowerMill*. 2023. Dostupné také z: <https://cam.cadstudio.cz/powermill/>.
33. RAUCH, Matthieu; DUC, Emmanuel; HASCOET, Jy. Improving trochoidal tool paths generation and implementation using process constraints modelling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2009, s. 375–383. Dostupné z DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2008.12.006.
34. *2.5D Machining: Milling and Drilling*. 2023. Dostupné také z: <https://www.openmind-tech.com/en-gb/cam/25d-milling/>.
35. *Rovnoběžné hrubování & Cik-Cak hrubování*. 2023. Dostupné také z: https://www.ncgcam.cz/03_rovnobezne_hrubovani%5C&cik_cak_hrubovani.php.
36. LI, Zhaoyu; CHEN, Lufeng; XU, Ke; GAO, Yongsheng; TANG, Kai. Five-axis Trochoidal Flank Milling of Deep 3D Cavities. *Computer-Aided Design*. 2020, s. 102775. ISSN 0010-4485. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2019.102775>.
37. SHIXIONG, Wu; WEI, Ma; BIN, Li; CHENGYONG, Wang. Trochoidal machining for the high-speed milling of pockets. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016, s. 29–43. ISSN 0924-0136. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.01.033>.

38. RAUCH, Matthieu; HASCOET, Jean-Yves. Selecting a milling strategy with regard to the machine tool capabilities: application to plunge milling: application to plunge milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012, č. 1, s. 47–54. ISSN 1433-3015. Dostupné z DOI: 10.1007/s00170-011-3498-9.
39. HUANG, Nuodi; KREBS, Eugen; BAUMANN, Jonas; ZHOU, Yuansheng; WU, Shijing; BIERMANN, Dirk. Experimental investigation on influence of engagement angle and tool geometry on plunge milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. Dostupné z DOI: 10.1007/s00170-020-05480-x.
40. *8-plunge milling*. 2023. Dostupné také z: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/top-8-milling-tools-new-cnc-machinists/8-plunge-milling/>.
41. *G-Wizzard Feeds and Speeds Calculator*. 2023. Dostupné také z: <https://www.cnccookbook.com/>.
42. BOŠNJAKOVIĆ, Mladen. CNC PROGRAMMING OF POCKET MACHINING. In: 2017.
43. *EN AW-7075 (AlZn5.5MgCu)*. 2023. Dostupné také z: <https://proal.cz/hlinik/slitiny-hliniku/en-aw-7075/>.
44. *Mechanické a fyzikální vlastnosti hliníkových slitin*. 2023. Dostupné také z: <http://www.alunet.cz/pouzito>.
45. *Gühring Milling Tools: katalog řezných podmínek*. Germany, 2017. Dostupné také z: https://guehring.com/wp-content/uploads/2018/dokumente/EN/milling-cutters/Katalog_Fraeswerkzeuge_EN_2017_lowres.pdf.