

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



Bakalářská práce

Strategie adaptivního soustružení

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Chlouba** Jméno: **Vladimír** Osobní číslo: **491272**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Strategie adaptivního soustružení

Název bakalářské práce anglicky:

Adaptive turning strategies

Pokyny pro vypracování:

1. Rešerše v oblasti strategií v CAM a nadstavbových sw zaměřených na dodržování konstantních řezných podmínek při soustružení
2. Návrh vlastního dílce (3D model) pro testování soustružnických strategií
3. Příprava a realizace adaptivních a konvenčních drah nástroje na vlastním dílci
4. Vyhodnocení přínosu adaptivních drah nástroje oproti konvenčnímu způsobu

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Pavel Zeman, Ph.D. ústav výrobních strojů a zařízení FS

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

Bc. Jan Tomis Dormer Pramet s.r.o.

Datum zadání bakalářské práce: **16.03.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Pavel Zeman, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

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

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne.....

Podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce, panu Ing. Pavlu Zemanovi, Ph.D. a panu Ing. Michalu Stejskalovi za poskytnuté rady, zkušenosti a připomínky a za vstřícný přístup při konzultacích. Dále bych chtěl poděkovat panu Bc. Janu Tomisovi z firmy Dormer Pramet s.r.o. za pomoc s uskutečněním experimentu a za jeho cenné rady a poznatky. Na závěr bych rád poděkoval své rodině a přátelům za jejich pomoc a podporu ve studiu i v životě.

Anotace

Autor:	Vladimír Chlouba
Název BP:	Strategie adaptivního obrábění
Rozsah práce:	48 str., 31 obr., 4 tab.
Akademický rok vyhotovení:	2021/2022
Škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ú12134 – Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí BP:	Ing. Pavel Zeman, Ph.D.
Konzultanti:	Bc. Jan Tomis
Zadavatel:	ČVUT FS
Klíčová slova:	adaptivní soustružení, trochoidální dráhy, Siemens NX, CAM
Abstrakt:	Bakalářská práce se zabývá návrhem adaptivních drah soustružnického nástroje. V teoretické části je vysvětlena podstata adaptivního obrábění a jsou popsány CAM programy podporující tuto metodu. V praktické části je pak vytvořena vlastní metoda návrhu drah, která je následně otestována na testovacím dílci.

Annotation

Author:	Vladimír Chlouba
Title of thesis:	Adaptive turning strategy
Extent:	48 p., 31 fig., 4 tab.
Academic year:	2021/2022
University:	CTU in Prague, Faculty of mechanical engineering
Department:	Ú12134 – Department of machining, process planning and metrology
Supervisor:	Ing. Pavel Zeman, Ph.D.
Consultants:	Bc. Jan Tomis
Submitter of the theme:	CTU FME
Key words:	adaptive turning, trochoidal toolpath, Siemens NX, CAM
Abstract:	This bachelor thesis focuses on adaptive toolpaths for turning. In theoretical part, adaptive machining is explained and CAM softwares, which support this technology, are described. In practical part, custom method for creating adaptive turning toolpaths is developed and tested.

Obsah

Přehled použitých veličin, jednotek a symbolů	9
Přehled použitých zkratk	9
1. Úvod	10
2. Technologie soustružení	11
2.1 Technický popis	11
2.2 Tříska, její tvorba a klasifikace	11
2.3 Řezné podmínky a řezné síly	12
2.4 Soustružnický nástroj	15
2.4.1 Klasifikace nástroje.....	15
2.4.2 Geometrie obráběcího nástroje	15
2.4.3 Řezné materiály	18
2.5 Dosahované přesnosti výroby a strategie při soustružení	18
3. Adaptivní dráhy nástroje pro soustružnické operace	20
3.1 CAM programování	20
3.2 Nadstavbový software pro CAM	24
3.3 Stav problematiky	24
4. Shrnutí řešerše	26
5. Návrh metody a program Siemens NX CAM	27
5.1 Prostředí programu Siemens NX CAM	27
5.2 Odlišnosti verzí programu.....	28
6. Příprava experimentu.....	30
6.1 Obráběcí stroj	30
6.2 Nástroje a řezné podmínky.....	31
6.3 Návrh testovacího dílce.....	32
6.4 Programování drah nástroje v Siemensu NX CAM 12.0.2.9.....	33
6.5 Programování drah nástroje v Siemensu NX CAM 2015.....	35
6.6 Generování NC kódů.....	36
7. Realizace a vyhodnocení experimentu	38
7.1 Výrobní čas	39
7.2 Vizualní kontrola nástroje po obrábění	40
7.3 Úhel opásání.....	42
8. Závěr	43

Seznam použité literatury	45
Seznam obrázků	47
Seznam tabulek	48
Seznam použitého softwaru	48
Seznam příloh	48

Přehled použitých veličin, jednotek a symbolů

A_D	[mm ²]	Plocha odřezávané vrstvy
a_p	[mm]	Hloubka řezu
C_k	[-]	Konstanta
C_{kc}	[N·mm ⁻¹]	Empirická konstanta
D	[mm]	Průměr obráběné plochy
f	[mm]	Posuv na otáčku
F	[N]	Celková řezná síla
F_C	[N]	Řezná síla
F_f	[N]	Síla posuvu
F_p	[N]	Pasivní síla
k_c	[N·mm ⁻²]	Měrná řezná síla
M_K	[N·mm]	Krouticí moment
n	[min ⁻¹]	Otáčky vřetene
P_C	[W]	Řezný příkon
R_m	[N·mm ⁻²]	Pevnost v tahu
u_{kc}	[-]	Empirická konstanta
v_c	[m·min ⁻¹]	Řezná rychlost
v_e	[m·min ⁻¹]	Celková rychlost nástroje
v_f	[mm·min ⁻¹]	Posuvová rychlost

Přehled použitých zkratk

CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CL	Cutter Location
CNC	Computer Numerical Control
NC	Numerical Control
VBD	Vyměnitelná břitová destička

1. Úvod

Soustružení je jednou z nejstarších výrobních metod, jejíž první použití je datováno až do období starověku zhruba kolem roku 2000 př. n. l. Více se ale tento výrobní postup začal rozvíjet až na přelomu 18. a 19. století. Ve 20. století a zejména pak po konci druhé světové války přichází období největšího rozvoje a pokroku, které trvá prakticky dodnes. [1]

Jednou z relativně nových metod obrábění je obrábění adaptivní. Já se v této bakalářské práci budu přesněji zabývat adaptivním soustružením. Jedná se o technologii, při které se nemění úhel opásání nástroje při záběru do materiálu. Díky tomu je zatížení působící na nástroj konstantní a adaptivní soustružení tak může oproti konvenčním metodám nabízet jisté výhody, jako je např. rovnoměrně rozložené opotřebení nástroje nebo možnost použití vyšších hodnot řezných podmínek. Tyto výhody vyniknou zejména při obrábění drážek nebo kuželových ploch, kde nabízejí přínos v podobě vyšší hospodárnosti a efektivity výroby.

Dráhy nástroje pro metodu adaptivního soustružení mají tvar cyklických (trochoidálních) křivek, jejichž tvorbu je nutné realizovat ve speciálních CAM programech (Computer Aided Manufacturing). Příslušná funkce však není dostupná ve všech CAM programech používaných pro soustružení. Hlavní část řešerše proto rozebírá a popisuje některé z těchto programů, které příslušnou funkcí pro adaptivní soustružení disponují.

Je vhodné si udělat předtím, než se touto problematikou budu zabývat, základní přehled o záležitostech soustružení, jako je např. tvorba třísky, stanovení řezných podmínek, nebo geometrie břítu soustružnického nástroje.

Hlavním cílem této práce je vytvoření vlastního postupu pro návrh adaptivních soustružnických drah, který by bylo možné použít i v CAM programech, které nepodporují funkcí pro adaptivní soustružení. Tento postup bude založen na již dostupné funkci CAM programu Siemens NX CAM 12.0.2.9, která je primárně určena pouze pro 2,5D frézování. Program Siemens NX CAM 12.0.2.9 nedisponuje funkcí pro adaptivní soustružení a byl zvolen z důvodu svého rozšíření v praxi. Navrženým postupem bude následně vytvořen NC (Numerical Control) program k obrobení testovacího dílce soustružením. Za účelem porovnání bude dílec vyroben i konvenčním podélným soustružením a adaptivním soustružením navrženým v nové verzi Siemensu NX CAM 2015, která již v základu obsahuje funkci pro adaptivní soustružení.

2. Technologie soustružení

2.1 Technický popis


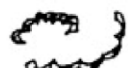
Jako obrábění označujeme soubor výrobních technologií, při kterých je požadovaný tvar součástí vytvářen pomocí úběru materiálu. Tento úběr je obvykle realizován pomocí řezného nástroje, který mechanicky odděluje přebytečný materiál. Existují i jiné metody úběru, založené např. na elektrických nebo chemických jevech. [2]

Jednou z nejpoužívanějších obráběcích technologií je soustružení, jehož princip spočívá v odřezávání materiálu z rotujícího dílce řeznou částí nástroje. Oddělený materiál je z obrobku odváděn v podobě třísky. Kinematika této technologie je složena ze dvou pohybů. Hlavní řezný pohyb představuje rotace obrobku, vedlejší posuvový pohyb pak vykonává nástroj. Při posuvu nástroje ve směru osy rotace obrobku se jedná o podélné soustružení, při posuvu ve směru kolmém k ose rotace jde pak o soustružení čelní. [2]

2.2 Tříska, její tvorba a klasifikace

Základní materiál, oddělený z obrobku nástrojem, se označuje jako tříska. Parametry této odříznuté vrstvy, jako je např. tvar třísky, rozměry průřezu nebo délka, jsou určeny řeznými podmínkami, typem obráběného materiálu, geometrií břitu nástroje, řezným prostředím a dalšími vlivy.

Při obrábění dochází v oblasti tvoření třísky vlivem vnikání nástroje do obrobku k plastické deformaci a zpevnění třísky. Po vyčerpání zásoby plasticity dochází ke kluzu uvnitř materiálu. Tak vznikají jednotlivé elementy, které mohou odcházet z procesu jednotlivě (tzv. dělená tříska) nebo spojené v plynulé třísce. Tříska může mít různý tvar, jako je např. stužkový, vinutý či spirálový. Oddělení třísky o správné délce lze ovlivnit utvařečem třísky na nástroji, který se nejčastěji používá na vyměnitelných břitových destičkách (VBD). Obecně je žádoucí, aby se tříska oddělila v co nejmenší délce, a aby byl její objem co nejmenší. Také je vhodné, aby docházelo k dobrému odvodu třísek z místa řezu a nedocházelo k jejich navinutí na nástroj či dílec. [3], [4]

TVAR TŘÍSEK		w	TVAR TŘÍSEK		w
	STUŽKOVÉ DLOUHÉ	400 a více		SPIRÁLOVÉ PLOCHÉ	10 až 20
	STUŽKOVÉ SMOTANÉ	300 až 400		OBLOUKOVITÉ SPOJENÉ	8 až 10
	VINUTÉ DLOUHÉ	80 až 150		ELEMENTÁRNÍ	4 až 6
	VINUTÉ KRÁTKÉ	40 až 60			

Obr. 1: Klasifikace tvarů třísek [5]

Náročné podmínky v místě řezu mohou způsobit, že dojde k adhezi, tzn. svaření nástroje s obrobkem. Dochází tak k vytrhávání materiálu z obrobku, čímž je zhoršena

drsnost povrchu. Materiál třísky dále ulpívá na ostří a vytváří na něm tzv. nárůstek, který dále zhoršuje výsledné parametry.[3], [4]

2.3 Řezné podmínky a řezné síly

Řezné podmínky jsou základní charakteristikou obráběcího procesu. Obvykle se jimi rozumí řezná rychlost, posuvová rychlost a hloubka řezu. Volba těchto parametrů je založena na řadě podmínek, jako je např. tvrdost obráběného materiálu, opracováváný rozměr, tvrdost řezného nástroje, požadovaná přesnost a drsnost výrobku nebo požadavky na opotřebení řezného nástroje. Zjednodušeně lze tedy říct, že při vyšších rychlostech je výrobní čas nižší, avšak za cenu např. horší drsnosti povrchu nebo vyšší intenzity opotřebení nástroje. Je tedy třeba řezné podmínky optimalizovat tak, aby bylo dosaženo minimálních výrobních nákladů či maximální produktivity výroby. [6]

Řezná rychlost je definována jako obvodová rychlost na obráběné ploše rotujícího dílce. Její hodnota se v praxi může pohybovat zhruba od 5 m.min⁻¹ u těžkoobrobitelných slitin až do hodnot nad 1000 m.min⁻¹ např. u slitin hliníku. Řeznou rychlost lze určit dle následujícího vzorce. [2]

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

D - průměr obráběné plochy [mm]

n - otáčky vřetene [min⁻¹]

Posuv na otáčku označuje vzdálenost v axiálním směru, kterou nástroj urazí na obrobku během jedné otáčky vřetene. Na výši tohoto parametru je mimo jiné závislá drsnost opracovaného povrchu. Při hrubování tak může posuv dosahovat až 3,5 mm. Naopak při jemném dokončování může poklesnout jeho hodnota až na 0,03mm v závislosti na obráběném materiálu či geometrii nástroje. Ze znalosti tohoto údaje lze určit posuvovou rychlost v_f , která je nutná ke zjištění celkové rychlosti nástroje v_e . [2]

$$v_f = \frac{f \cdot n}{1000} [m \cdot \text{min}^{-1}] \quad (2)$$

f – posuv na otáčku [mm]

n – otáčky vřetene [min⁻¹]

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} [m \cdot \text{min}^{-1}] \quad (3)$$

Hloubka řezu a_p se při soustružení, v závislosti na materiálu a na nástroji, obvykle pohybuje mezi desetinami a jednotkami milimetru. Při podélném soustružení lze její hodnotu určit jako rozdíl poloměrů plochy před obrobením a po něm, zatímco při

čelním obrábění je tato veličina rovna rozdílu délek plochy před operací a po ní. Výsledný průřez odcházejícího materiálu je pak nejvíce ovlivněn posuvem, hloubkou řezu nebo úhlem nastavení nástroje. Plochu odřezávané vrstvy lze určit z rovnice. [2]

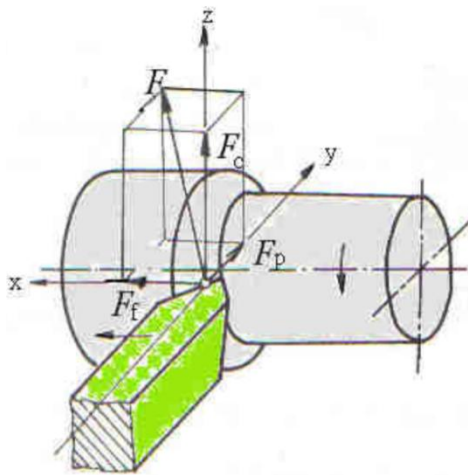
$$A_D = a_p \cdot f \text{ [mm}^2\text{]} \quad (4)$$

a_p – hloubka řezu [mm]

f – posuv na otáčku [mm]

Řezné síly

Při soustružení vniká nástroj do povrchu obrobku, který klade určitý odpor. K jeho překonání musí nástroj vynaložit sílu, označovanou jako **celková řezná síla F**. Ta dle zákona akce a reakce ovlivňuje jak nástroj, tak obráběný dílec, a lze ji rozložit do tří na sebe kolmých složek. [4]



Obr. 2: Rozklad celkové řezné síly při soustružení [3]

Řezná síla F_c , někdy též označovaná jako **tangenciální**, působí ve směru řezné rychlosti. Velikost této síly má největší podíl při stanovení výkonu vřetene. Přímo z ní můžeme určit krouticí moment vřetene M_K . [4]

$$M_K = F_c \cdot \left(\frac{D - a_p}{2}\right) \text{ [N} \cdot \text{mm]} \quad (5)$$

D - průměr obráběné plochy [mm]

a_p – hloubka řezu [mm]

V případě, že průměr dílce je výrazně větší než hloubka řezu, lze její hodnotu zanedbat.

$$M_K = F_c \cdot \frac{D}{2} [N \cdot mm] \quad (6)$$

Řezná síla představuje největší složku celkové síly. Má také rozhodující vliv na určení řezného příkonu P_c , na které se podílí z téměř 99 %. [4]

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60} [W] \quad (7)$$

Pasivní neboli **radiální síla F_p** má vliv na průhyb obrobku. Obecně působí ve směru nejmenší tuhosti stroje. Je také ze všech složek nejmenší a její velikost dosahuje zhruba 25 % hlavní řezné síly. Na její působení je třeba dát pozor zvláště při obrábění dlouhých a štíhlých dílců, při kterém může docházet k nežádoucímu chvění soustavy stroj-nástroj-obrobek. Tato silová složka ovlivňuje tedy přesnost a kvalitu obrobené plochy. [4]

Posuvová neboli **axiální síla F_f** je nezbytně nutná např. při návrhu posuvového mechanismu stroje. Její velikost odpovídá zhruba polovině hlavní řezné síly. Při podélném soustružení leží ve směru osy rotace, naopak při zapichování, resp. při soustružení bez podélného posuvu, leží ve směru kolmém k ose. Na rozdíl od pasivní síly působí tato síla ve směru největší tuhosti stroje. Vzhledem k tomu, že velikost rychlosti posuvu v_f je řádově nižší, než velikost řezné rychlosti v_c , má tato složka síly malý vliv na určení řezného příkonu a není omezujícím faktorem při návrhu stroje. [4]

Řeznou sílu lze vztáhnout na plochu odřezávané vrstvy A_D .

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} [N \cdot mm^{-2}] \quad (8)$$

Výsledná hodnota je označována jako měrná řezná síla k_c . Její hodnota je závislá na obráběném materiálu, řezných podmínkách, geometrii břitu, řezném prostředí a jiných vlivech. Lze ji určit jako funkci posuvu na otáčku f . [4]

$$k_c = \frac{C_{kc}}{f^{u_{kc}}} [N \cdot mm^{-2}] \quad (9)$$

Kde C_{kc} a u_{kc} představují empiricky zjištěné konstanty vyplývající z obráběcího procesu. Hodnota konstanty u_{kc} nepřesahuje 1 a nejčastěji dosahuje 0,25. Při nižší hodnotě posuvu je dosaženo menší drsnosti obrobeného povrchu. Z výše uvedeného vzorce si lze ale uvědomit, že měrná řezná síla tak bude vyšší a obráběcí proces náročnější. Alternativně také lze určit měrnou řeznou sílu jako násobek pevnosti v tahu daného materiálu R_m . [4], [7]

$$k_c = C_k \cdot R_m [N \cdot mm^{-2}] \quad (10)$$

Konstanta C_k je závislá na dané obráběcí operaci. Při soustružení leží její hodnota mezi 3 až 5, při frézování ale může dosáhnout až 10 a při jemném broušení dokonce až 35. [4]

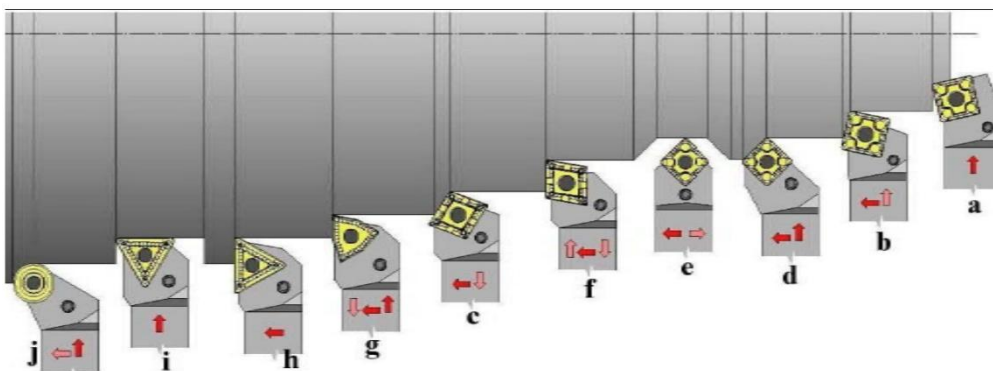
2.4 Soustružnický nástroj

Obráběcí nástroj představuje jednu z nezbytných komponent při obráběcí operaci. Použitý nástroj a jeho vlastnosti významně ovlivňují produktivitu, přesnost i hospodárnost výroby. Nejjednodušeji lze nástroj charakterizovat materiálem, ze kterého je vyroben a geometrií jeho řezné části.

2.4.1 Klasifikace nástroje

Nástroje používané při soustružení jsou obecně označovány jako soustružnické nože. Z konstrukčního hlediska je můžeme dělit na nástroje celistvé (též monolitní), kde je upínací i řezná část vyrobena z jednoho materiálu a tvoří celek, a na nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami (VBD), u kterých se řezná destička upevňuje do nosiče z méně kvalitního materiálu. VBD bývají do tělesa nástroje upnuty pomocí spojovacích součástí nebo připájeny. [2]

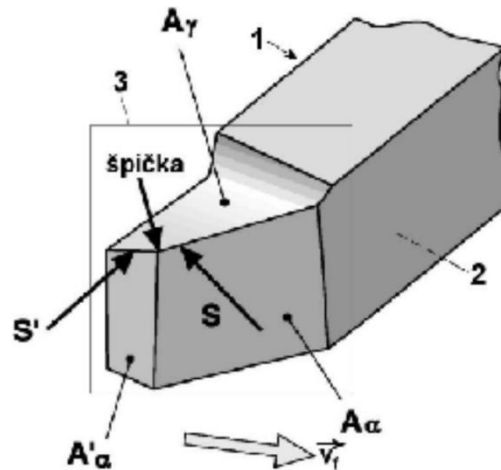
Dle směru obrábění můžeme soustružnické nože rozdělit na pravé, které jsou určeny k obrábění ve směru od koníka k vřetenu, a na levé, pracující v opačném směru. Řada výrobních operací vyžaduje speciální tvar a parametry nástroje. Rozlišujeme tedy např. soustružnické nástroje ubírací, upichovací, závitové nebo tvarové. Stejně tak se liší nástroje určené k obrábění vnitřních nebo vnějších ploch. Dále existuje celá řada nástrojů pro specifickou operaci. Zmíňme např. nástroj pro obrábění metodou free-turn se specifickým tvarem, kdy se na jednom nástroji nachází více břitů pro různé soustružnické operace. [2]



Obr. 3: Vnější soustružnické nože [2]

2.4.2 Geometrie obráběcího nástroje

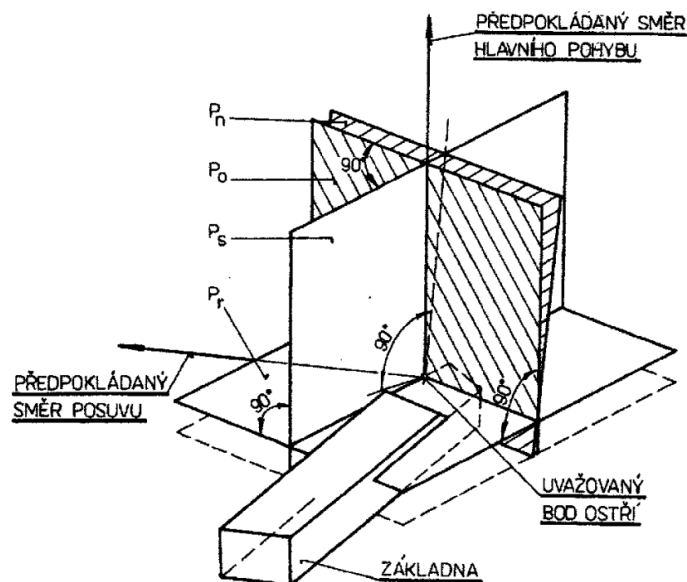
Nejen použitý materiál, ale i geometrie řezného nástroje má vliv na parametry obráběcí operace jako je např. velikost řezných sil, trvanlivost břitu nebo kvalita a přesnost vyrobeného povrchu. Geometrický popis je realizován pomocí rovin na nástroji a úhlů mezi nimi. Kromě toho je třeba jmenovat alespoň několik pojmů definujících součásti nástroje.



Obr. 4: Části, plochy a ostří na řezné části soustružnického nože [5]

Břit (řezná část) je klínovitá část nástroje vnikající při obrábění do obrobku. Skládá se z hřbetu, čela a ostří. **Hřbet $A\alpha$** je plochou na nástroji, která při obráběcím procesu směřuje k obráběné ploše. Vedlejší hřbet $A\alpha'$ směřuje k již obrobené ploše dílce. Třísky odříznutá z dílce odchází po ploše označované jako **čelo $A\gamma$** . Ta může být dále doplněna utvařečem třísky. **Ostří S** je křivka na nástroji, která realizuje samotný řezný proces. Tato křivka vzniká jako průsečnice ploch hřbetu a čela. Kromě hlavního ostří obrábějícího neobrobenou plochu dílce, existuje dále vedlejší ostří S' , které provádí dokončovací práce na obrobené ploše. **Špička nástroje** je průsečíkem hlavního a vedlejšího ostří. Reálně jde však o plochu s určitým poloměrem. [8]

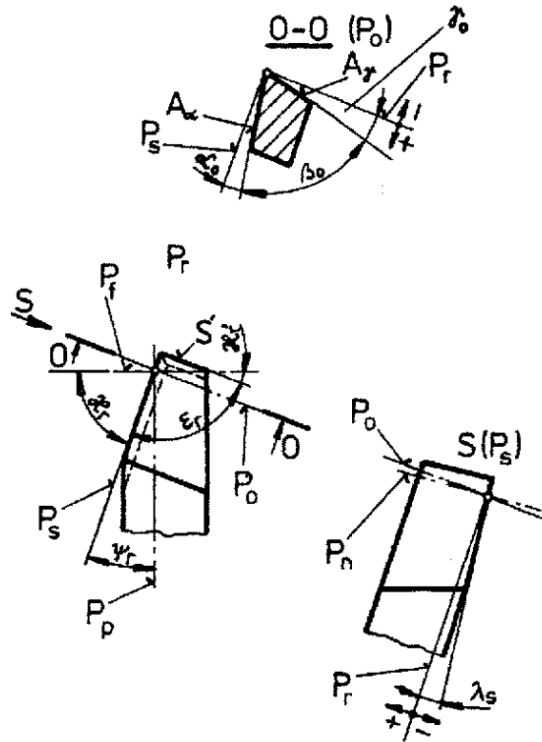
Popis nástroje pomocí rovin je realizován pro zvolený bod na ostří, ke kterému se pak výsledná geometrie vztahuje.



Obr. 5: Nástrojová souřadnicová soustava soustružnického nože [8]

Základní rovina P_r je rovina kolmá k vektoru řezné rychlosti a hlavního pohybu. Leží v ní bod ostří, uvažovaný pro obráběcí proces. **Boční rovina P_f** prochází stejným

bodem ostří jako základní rovina. Na rozdíl od ní ale obsahuje boční rovina vektor posuvové rychlosti a na základní rovinu je tak kolmá. **Zadní rovina P_P** také prochází bodem ostří a je kolmá zároveň k základní i boční rovině. **Rovina ostří P_S** se tečně dotýká ostří nástroje a zároveň je kolmá k základní rovině. **Ortogonalní rovina P_O** prochází bodem ostří a je kolmá k základní rovině a rovině ostří. **Normálová rovina P_N** prochází ostřím v uvažovaném bodě. K ostří je kolmá, což znamená, že na rozdíl od ostatních rovin obecně není kolmá k základní rovině. Úhly na nástroji se vyhodnocují při řezech nástroje některou z výše zmíněných rovin. [4]



Obr. 6: Nástrojová geometrie břitu soustružnického nože [8]

V řezu ortogonální rovinou můžeme v nástroji vyšetřit tři úhly. **Úhel hřbetu α_0** je úhlem mezi rovinou ostří a hřbetem nástroje, čelo a hřbet svírají **úhel břitu β_0** a mezi čelem a základní rovinou leží **úhel čela γ_0** . Již bylo zmíněno, že rovina ostří a základní rovina jsou na sebe kolmé. To znamená, že součet těchto tří úhlů je konstantní a roven 90° . [5]

V řezu základní rovinou leží **hlavní úhel nastavení ostří κ_r** sevřený mezi boční rovinou a rovinou ostří. **Vedlejší úhel nastavení ostří κ_r'** se pak obdobně nachází mezi rovinou vedlejšího ostří a boční rovinou. Úhel mezi hlavním a vedlejším ostřím pak označujeme jako **úhel špičky ϵ_r** . Součet těchto tří úhlů je roven 180° . [5]

Úhel sklonu hlavního ostří λ_s je úhlem mezi ostřím a základní rovinou v řezu nástroje rovinou ostří. Tento úhel může být i menší než nula, je-li špička nože nejnižším bodem břitu. [5]

2.4.3 Řezné materiály

Vyšší tvrdost materiálu nástroje umožňuje obrábět tvrdší materiály při náročnějších řezných podmínkách a vyšších řezných rychlostech. Nevýhodou tvrdých materiálů však může být jejich křehkost a jiné mechanismy jejich opotřebení.

Nástrojová ocel je nejstarším používaným materiálem na soustružnické nástroje. Jedná se o běžnou uhlíkovou ocel s obsahem zhruba 1,25 % C. [4]

Jako **rychlořezné** označujeme ocele vysoce obohacené legujícími prvky, jako je wolfram či molybden. Koncentrace těchto prvků může dosáhnout až 18 %. Výsledkem je ve srovnání s uhlíkovými oceli vyšší tvrdost a odolnost vůči tepelnému namáhání. V dnešní době se nástroje z těchto materiálů používají spíše pro běžné a nenáročné operace. [4]

Struktura nástrojů ze **slinutých karbidů** je tvořena karbidy kovů (wolframu často doplněného titanem, niobem či tantalem) vázanými v kovové matici (obvykle kobaltové). Obvykle bývají nástroje z těchto materiálů povlakovány nitridy či jinými karbidy. Karbidové nástroje se vyznačují vyšší tvrdostí a otěruvzdorností než ocelové, jejich problémem je ale nižší houževnatost. Kromě monolitních karbidových nástrojů se také používají vyměnitelné břitové destičky (VBD), vyráběné metodou práškové metalurgie. [4]

Materiály vzniklé spékáním karbidů, nitridů či karbonitridů titanu s kovovým (Ni, Mo, Co) pojivem se označují jako **cermety**. Původně se (při použití nitridů nepřesně) označovaly jako bezwolframové slinuté karbidy, jejich současný název vznikl jako zkratka z označení CERamic/METal (keramika/kov). [4], [9]

Kromě výše zmíněných nástrojových materiálů existuje i celá řada jiných řezných materiálů. V praxi se používá např. řezná keramika na bázi oxidu hlinitého obohacená tvrdšími materiály, kubický nitrid bóru nebo diamantové materiály. [4]

2.5 Dosahované přesnosti výroby a strategie při soustružení

Ve srovnání s jinými výrobními operacemi, jako je např. odlévání či tváření, lze při obrábění dosáhnout nejlepší rozměrové i geometrické přesnosti výrobku. Při soustružnickém hrubování lze dosáhnout rozměrové přesnosti IT11 s drsností povrchu mezi 12,5 až 100 μm . Soustružení načisto zlepšuje rozměrovou přesnost o 2 stupně a drsnost obrobeného povrchu až na Ra 1,6. V extrému lze při jemném obrábění slinutými karbidy či diamantovými nástroji dosáhnout stupně přesnosti IT5 a drsnosti Ra 0,2. Tato rozměrová i povrchová přesnost je ale častěji dosahovaná při broušení, které v krajním případě poskytuje stupeň přesnosti IT3 a Ra 0,025. [10]

Technologie soustružení v sobě zahrnuje řadu strategií, které jsou určeny k různým výrobním účelům. Volba vhodné strategie pro provedení konkrétní operace je závislá na celé řadě podmínek a souvisí s volbou obráběcího nástroje. Těchto strategií existuje celá řada, v textu jsou zmíněny některé z nich.

Mezi nejběžnější strategie soustružení patří soustružení čelní, podélné a zapichovací. Při **podélném soustružení** se obráběcí nástroj při záběru pohybuje ve směru osy rotace obrobku. Výsledný řezný pohyb nástroje má pak při jednom průjezdu tvar šroubovice. Po odříznutí jedné vrstvy materiálu se nástroj může přisunout blíže k ose a opakovat celý postup. Někdy bývá tato metoda hovorově označována jako „zig-zag“. Při **čelním soustružení** je obráběna plocha kolmá na osu rotace obrobku a nástroj se pohybuje v radiálním směru. V jedné vrstvě materiálu se tak nástroj pohybuje po Archimédově spirále. Při **zapichovacím soustružení** se nástroj zanořuje do materiálu obrobku ve směru kolmém k ose rotace. Tímto postupem je možné vytvářet drážky na dílci, nebo dokončený výrobek oddělit od upnutého materiálu. Případně je také možné touto metodou zmenšovat průměr obrobku podobně jako při podélném soustružení. [11], [12]

Kromě těchto nejběžnějších strategií existuje celá řada dalších metod. Zmíníme např. **konturovací soustružení**, při němž se nástroj pohybuje po ekvidistantních drahách, které kopírují tvar výsledného obrobku. Mezi speciální soustružnické strategie, patří např. „**Freeturn**“ **obrábění**, při kterém je použit speciální nástroj vybavený více břity, které umožňují provést v rámci jedné operace kromě hrubování i např. dokončování či čelní soustružení. Tato metoda však vyžaduje, aby byl daný soustruh vybaven poháněnou nástrojovou osou. [13]

Při řadě výrobních operací nastává komplikace, neboť úhel opásání nástroje se mění. To vede k tomu, že nároky kladené na nástroj nejsou rovnoměrné. Tento jev nastává např. při podélném soustružení, kdy je nástroj při obrábění v rohu příliš namáhán a musí být proto použity méně náročné řezné podmínky. Nevýhodou poté je, že ve zbytku operace nepracuje nástroj natolik produktivně, jak by jeho konstrukce umožňovala. Z tohoto důvodu se začíná přistupovat k používání metody tzv. adaptivního obrábění. Tato strategie je založena na návrhu takových drah nástroje, kdy úhel opásání nástroje zůstane konstantní a nároky na nástroj jsou v celé operaci stejné. [14]

Pro tuto strategii není vhodné použít klasický ubírací nůž. Proto je v průmyslové praxi nejčastěji používán nástroj s kruhovým břitem. Ten nabízí i další výhody, jako je např. rovnoměrné opotřebení, nižší vrubové namáhání nebo menší množství generovaného tepla při záběru, které tak méně ovlivňuje nástroj i obrobek. [15]

3. Adaptivní dráhy nástroje pro soustružnické operace

Adaptivní soustružení lze také nazvat jako „přizpůsobivé“ soustružení. Název samotný poukazuje na to, že generování drah při této strategii je založeno na přizpůsobování se zadaným kritériím, jako je např. úhel opásání nebo rychlost úběru materiálu, která nesmí být při návrhu trajektorie nástroje překročena. Důsledkem těchto podmínek je také to, že dráhy nástroje pro adaptivní obrábění jsou tvořeny obecnými rovinnými (přesněji trochoidálními) křivkami. [16]

Tento přístup je rozdílem oproti konvenčním soustružnickým metodám (např. podélné soustružení), kde je návrh dráhy nástroje založen na geometrii obráběného dílce a nebere v potaz potřeby nástroje. Výhodou „geometrického“ přístupu je jeho jednoduchost návrhu drah, nevýhodou je ale měnící se namáhání působící na nástroj, které může vést např. ke zvýšenému opotřebení nástroje a snížení produktivity a ekonomičnosti výroby. [16]

Složitost návrhu drah pro adaptivní soustružení však vede k tomu, že jejich tvorbu je nutné realizovat pomocí výpočetní techniky. Obvykle se pro tento účel používají CAM programy. Samotné adaptivní soustružení je pak realizováno na CNC (Computer Numerical Control) obráběcích strojích. [17]

3.1 CAM programování

CAM programy slouží zejména k návrhu drah obráběcího nástroje při výrobě, také ale umožňují provést např. simulaci výrobního procesu, čímž lze předejít různým kolizím a chybám.

Prvním krokem návrhu obráběcí operace je vytvoření modelu výsledného obrobku. Tento postup je obvykle shodný s postupem v CAD (Computer Aided Drawing) programech, někdy je dokonce možný i import modelu z CAD programu. Modelování je založeno na nákresu geometrie, která je pomocí funkcí, jako je např. Vytažení či Rotace, převedena na těleso. Následně je třeba stanovit souřadnicový systém výrobku a obráběcího stroje. Před tvorbou samotné operace je pak ještě nutné přiřadit obrobku model výchozího polotovaru. Ten může buď vymodelován, nebo přiřazen jako opsané těleso. Dále je již možné vytvořit obráběcí operaci. Nejprve je třeba vybrat požadovanou strategii (např. adaptivní soustružení). V rámci operace je pak nutné vymezit opracovávanou oblast, zvolit obráběcí nástroj, určit rezné podmínky a další parametry. Výsledná vygenerovaná dráha je popsána CL (Cutter Location) daty, která lze dále transformovat do NC kódu ve formátu čitelném pro CNC stroj. Popsaný postup tvorby obráběcích drah není obecně stejný a v jednotlivých CAM programech se může lišit. [18]

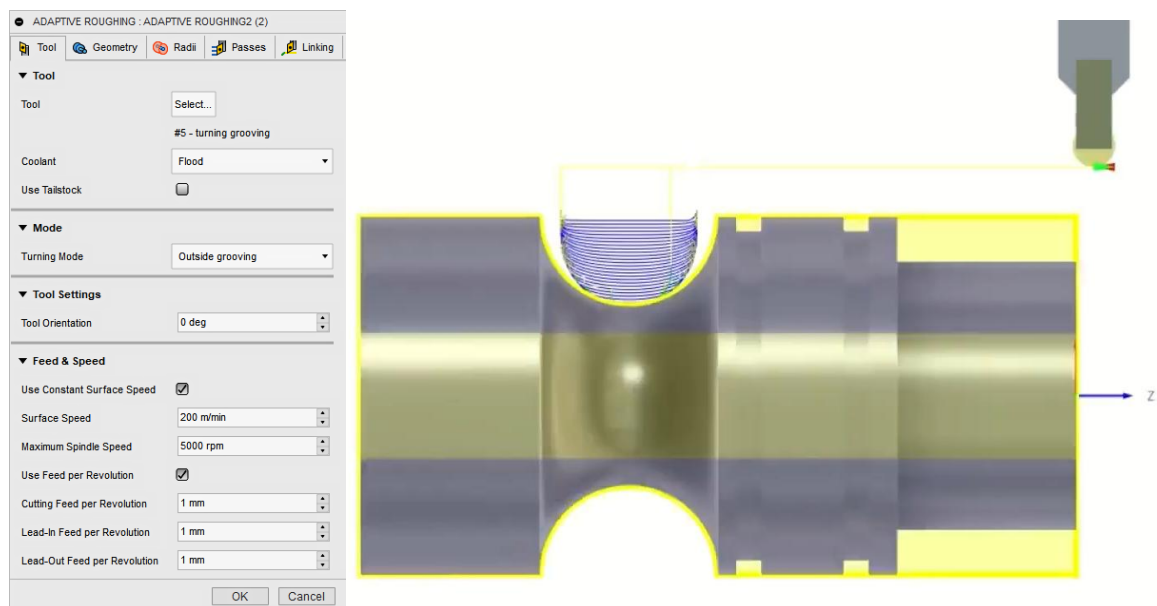
Adaptivní soustružení je ale vcelku novým postupem a jako samotná funkce je tak dostupné jen v některých programech. Na následujících stránkách zmiňuji několik těchto programů a popisuji, jakým způsobem je v nich adaptivní obrábění nastavováno.

Jedná se jen o ty nejpoužívanější CAM programy a je pravděpodobné, že existují méně známé CAM programy, které také podporují adaptivní soustružení. [16]

Autodesk Fusion 360

Tento program označuje adaptivní soustružení pojmem „Turning Adaptive roughing“. Při jejím nastavování je třeba zvolit příslušné parametry, které jsou pro lepší přehlednost rozděleny do pěti záložek.

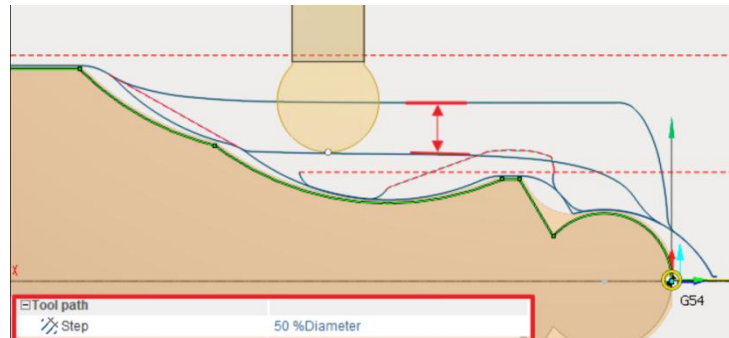
První z nich se zabývá nástrojem a dá se zde tedy zvolit jeho model (výrobce doporučuje nástroj s kruhovou VBD), orientace k obrobku či náklon. Další částí této karty je volba řezných podmínek, jako jsou otáčky vřetene, posuv či řezná rychlost. Tu lze nastavit buď konstantní, či proměnou s konstantním úběrem materiálu. Druhá karta se věnuje geometrii procesu. Pomocí dvou rovin je zde vymezena oblast na dílci, ve které dojde k soustružení. Také zde lze povolit funkci zbytkového obrábění, při které nástroj obrobí pouze materiál zbylý po předchozí operaci. Geometrií se zabývá i třetí panel, na rozdíl od předchozího ale řeší radiální vymezení obráběné oblasti. Za zmínku stojí parametr „světlá výška“ (Clearance), vymežující předěl mezi zónou pracovní a „bezpečnou“, ve které se nástroj může pohybovat rychloposuvem. Čtvrtá záložka se věnuje přejezdům nástroje. Parametr tolerance stanovuje, jak moc se reálná trajektorie nástroje odchyluje od ideální. G kód totiž umožňuje pohyb nástroje pouze po přímce (G1) či po kružnici (G2 a G3) a obecné křivky aproximuje. Malá tolerance a následně obsáhlý NC kód dříve představovaly komplikaci na strojích s omezenou operační pamětí, což dnes již nehrozí. Další parametr „Optimální záběr“ (Optimal Load) je analogický k hloubce řezu a vyjadřuje vzdálenost mezi jednotlivými chody nástroje. Poslední karta se týká dalších pohybových parametrů nástroje. Lze zde nastavit, v jakém bodě se má nástroj nacházet před započítáním operace, či jaký má být poloměr dráhy při vyjíždění z materiálu. [17]



Obr. 7: Vlevo-tabulka nastavení nástroje-Vpravo-vizualizace dráhy nástroje v programu Autodesk Fusion360 [17], [19]

SprutCAM

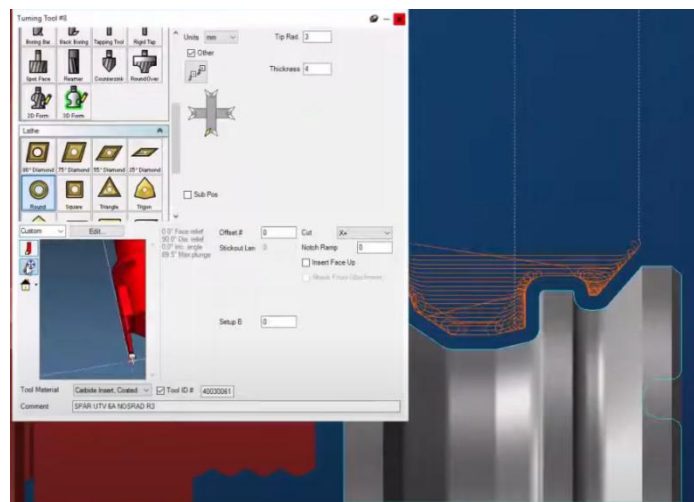
Dle manuálu k tomuto programu se nastavení operace „adaptivního hrubování“ (Adaptive roughing turning) téměř neliší od nastavení konvenční soustružnické operace. Po volbě nástroje a obráběné plochy je třeba zvolit pouze 7 dodatečných parametrů. Těmi jsou např. „Krok“ (Step), určující vzdálenost křivek trajektorie, směr obrábění, určení poloměrů dráhy při výjezdu z materiálu či nastavení hranice bezpečné zóny. [20]



Obr. 8: Vizualizace trochoidální dráhy se zvýrazněnou vzdáleností křivek v programu SprutCAM [20]

GibbsCAM

Adaptivní soustružení je v tomto programu označováno jako „VoluTurn“ a jeho nastavení je celkem jednoduché. Na jediném panelu operace je třeba zvolit typ soustružení (vnitřní/vnější průměr nebo čelní plocha), jeho směr a nastavit řezné podmínky jako je řezná rychlost, posuv nebo hloubka řezu. Dodatečně lze také zvolit přídavek na obrábění na čisto. Výběr použitého nástroje je realizován prostým přiřazením zvoleného nástroje k operaci v tabulce. Další potřebné parametry, jako jsou např. poloměry vstupních a výstupních drah, jsou vyhodnoceny automaticky tak, aby bylo dosaženo optimálních výkonů a minimálního opotřebení. [21]

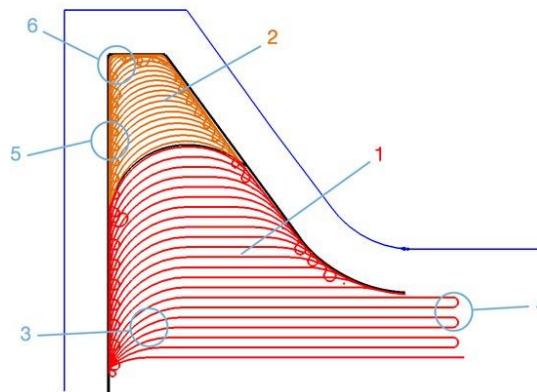


Obr. 9: Tabulka volby nástroje a obrobek s adaptivními drahami v programu GibbsCAM [21]

EspritCAM

Adaptivní strategie v tomto CAMu je nazvána „Profit Turning“. Po výběru typu operace je na čtyřech panelech třeba zvolit vhodný nástroj, řezné podmínky a dodatečné informace jako např. minimální poloměry dráh nástroje při pracovním pohybu. Příložený obrázek 10, dostupný na stránkách výrobce, popisuje jednotlivé úseky adaptivní dráhy. [22]

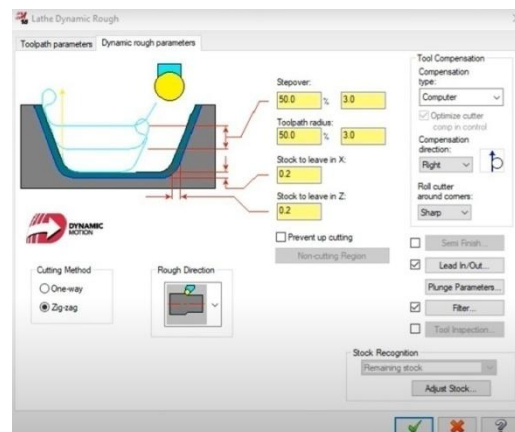
- 1- oblast regulérních přejezdů
- 2- oblast trochoidálních přejezdů
- 3- vjezdy do materiálu
- 4- plynulé přechody
- 5- plynulé napojení trochoid
- 6- vybírání rohu



Obr. 10: Ilustrace adaptivní dráhy s vyznačením různých složek [23]

MasterCAM

Návrh adaptivního soustružení pomocí funkce „Dynamického hrubování“ (Dynamic Roughing) je v tomto programu velmi jednoduchý. V prvním panelu je třeba vybrat vhodný typ nástroje, jeho rozměry a řezné parametry jako je posuv nebo řezná rychlost. Druhý panel pak umožňuje měnit parametry dráhy, jako je např. vzdálenost jednotlivých křivek nebo přídavek na dokončovací obrábění. Také zde lze stanovit směr obrábění. [24]



Obr. 11: Tabulka parametrů operace v programu MasterCAM [24]

3.2 Nadstavbový software pro CAM

Některé pokročilé či méně obvyklé funkce nejsou z různých důvodů zahrnuté v běžné verzi CAM programu. Někdy je ale možné získat od výrobce požadovaný dodatečný obsah. Případně existují i specializované programátorské firmy, poskytující tyto pokročilé funkce, které lze následně implementovat do vybraných CAM programů. Někdy se také jedná o produkty vzniklé pro potřeby strojírenských podniků, věnujících se speciálním výrobním metodám. Těchto rozšiřujících programů a funkcí existuje celá plejáda, z nichž dva dále zmiňuji.

ModuleWorks

ModuleWorks GmbH je německá firma zabývající se optimalizací obráběcích procesů a poradenstvím v této oblasti. S tím souvisí i vývoj CAM/CAD softwarových komponent, které lze dále použít v CAMEch jiných výrobců. Často jsou tyto produkty začleněny již přímo do základní verze. Mezi komponenty vytvořené společností ModuleWorks patří např. programy pro návrh drah nástroje při víceosém frézování, při adaptivním soustružení kruhovým i nekruhovým nástrojem, nebo různé programy pro simulaci obráběcího procesu. [25]

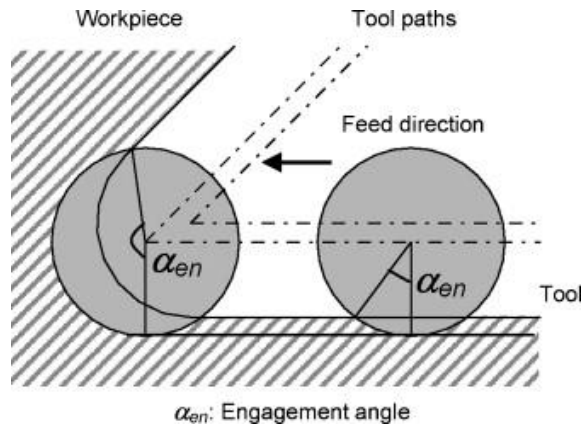
HSMworks

Program HSMworks je produktem společnosti Autodesk Inc. vytvářející řadu CAM/CAD programů jako je např. Autodesk Inventor, Fusion 360, AUTOCAD nebo Solidworks. HSMworks je nadstavbovým obsahem právě pro poslední jmenovaný program, ze kterého vytváří regulérní CAM se širokou škálou podporovaných funkcí jako je např. návrh drah nástroje při víceosém frézování, konvenčním i adaptivním soustružením, nebo při kombinaci frézování a soustružení ve frézce s rotační osou. [26]

3.3 Stav problematiky

V této podkapitole jsou zmíněny a rozebrány tři články, věnující se tvorbě adaptivních a trochoidálních drah obráběcího nástroje. Při hledání vhodných podkladů jsem našel sedm článků zabývajících se danou problematikou, z nichž jsem vybral tři nejvhodnější.

První článek, který vyšel ve vědeckém časopise *Precision Engineering*, se věnuje 2,5D frézování, u kterého autoři zmiňují vysoké nároky kladené na nástroj při nekonstantním úhlu opásání. Následně autoři lokalizují oblasti, kde k těmto komplikacím dochází a jako řešení navrhuje metodu adaptivního frézování. Následně rozebírají princip návrhu vhodné dráhy nástroje. Závěr článku se pak věnuje experimentální studii, která na základě efektivity výroby a opotřebení nástroje ukazuje výhody adaptivní metody oproti konvenční. Tento článek mi ukázal, jakým způsobem je vhodné porovnávat metodu adaptivního soustružení s konvenční metodou. [27]



Obr. 12: Úhel opásání α_{en} [27]

Ve druhém článku poukazuje jeho autor na vysoké nároky kladené na nástroj při vyšším úhlu záběru. Dále se zmiňuje o řešení této nevýhody pomocí metody adaptivního obrábění. Překážkou v dalším šíření této metody do praxe je však nejednotný postup tvorby drah nástroje. Autor tohoto článku proto navrhuje nový přístup, který je založen na dvou parametrech: rychlosti úběru nástroje a řezné síle. Poté je stanoven optimalizační model dráhy nástroje, při kterém je dosaženo nejnižšího času obrábění. V poslední části článku je tato metoda uplatněna na konkrétním příkladu. Podobně jako tento článek se i má bakalářská práce zabývá metodou pro tvorbu adaptivních drah. [28]

V úvodu třetího textu jsou zmíněny obvyklé komplikace související s nekonstantním úhlem opásání při obrábění, jako je nerovnoměrné zatěžování nástroje, problematický odvod třísky nebo nepřiměřené zahřívání stroje. Jako řešení je navrženo soustružení s trochoidální dráhou, jehož návrh je realizován v CAM programu ESPRIT pomocí strategie ProfitTurning. Jsou zmíněny výhody této strategie, jako je např. udržování konstantní řezné síly pomocí paralelních pohybů nebo kvalitnější obrobení špatně dostupných oblastí. Na závěr je provedeno experimentální srovnání konvenční a adaptivní metody. Výsledky ukazují, že při adaptivním postupu je dosaženo výrobního času nižšího o zhruba 25 %. [29]

4. Shrnutí řešení

Druhá kapitola této bakalářské práce byla věnována obecnému úvodu k technologii obrábění. Zabýval jsem se parametry jako je např. řezná či posuvová rychlost, které charakterizují obráběcí proces. Zmiňoval jsem jednotlivé řezné síly působící na nástroj a jejich význam. Zabýval jsem se nástrojem z pohledu geometrie, použitých materiálů nebo konstrukce a užití. V závěru této kapitoly jsou pak rozebírány vybrané strategie soustružení.

V rámci zlepšení hospodárnosti výroby je vhodné používat obráběcí nástroj tak, aby byl rovnoměrně zatěžován, a aby bylo jeho opotřebení rozloženo po celém břitu. To může být při konvenčních soustružnických metodách komplikované. Jedním z možných řešení je strategie adaptivního soustružení, při které zůstává úhel opásání nástroje konstantní. Tím je dosaženo lepšího silového působení na nástroj a rovnoměrného opotřebení.

Dráhy nástroje pro adaptivní soustružení je ale vzhledem k jejich složitosti nutné vytvářet v CAM programech. Příslušnou funkcí jsou však vybaveny jen některé. Několik programů, které funkcí disponují je zmíněno a zběžně popsáno ve třetí kapitole.

Jednou z překážek rozšíření adaptivního soustružení je jeho nižší zastoupení v CAM programech, např. Siemens NX CAM 12.0.2.9, který je stále hojně rozšířen v praxi, touto funkcí nedisponuje. Bylo by tedy přínosné vytvořit postup, který by umožňoval navrhovat dráhy pro adaptivní soustružení v CAM programech, které příslušnou funkcí nedisponují.

Tomuto návrhu budou věnovány další kapitoly této bakalářské práce. Metoda návrhu bude vytvořena v již zmíněném programu Siemens NX CAM 12.0.2.9 a bude založena na funkci pro 2,5D frézování, která bude použita jiným způsobem, než k jakému je určena. Navrženým postupem bude následně vytvořena dráha pro obrobení testovacího dílce. Aby bylo možné porovnat možnosti vytvořeného adaptivního soustružení s konvenčními metodami, budou navrženy i jiné soustružnické strategie. Testovací dílce pak budou vyrobeny na CNC soustruhu v podniku Dormer Pramet s.r.o.

Porovnání metod bude založeno na sledování výrobního času a kontrole tepelného ovlivnění nástroje. Nejvhodnější by bylo kontrolovat nástroj z hlediska abrazivního opotřebení, pro to by však bylo nutné vyrobít vysoké množství testovacích dílců, což nebylo z časových důvodů možné.

5. Návrh metody a program Siemens NX CAM

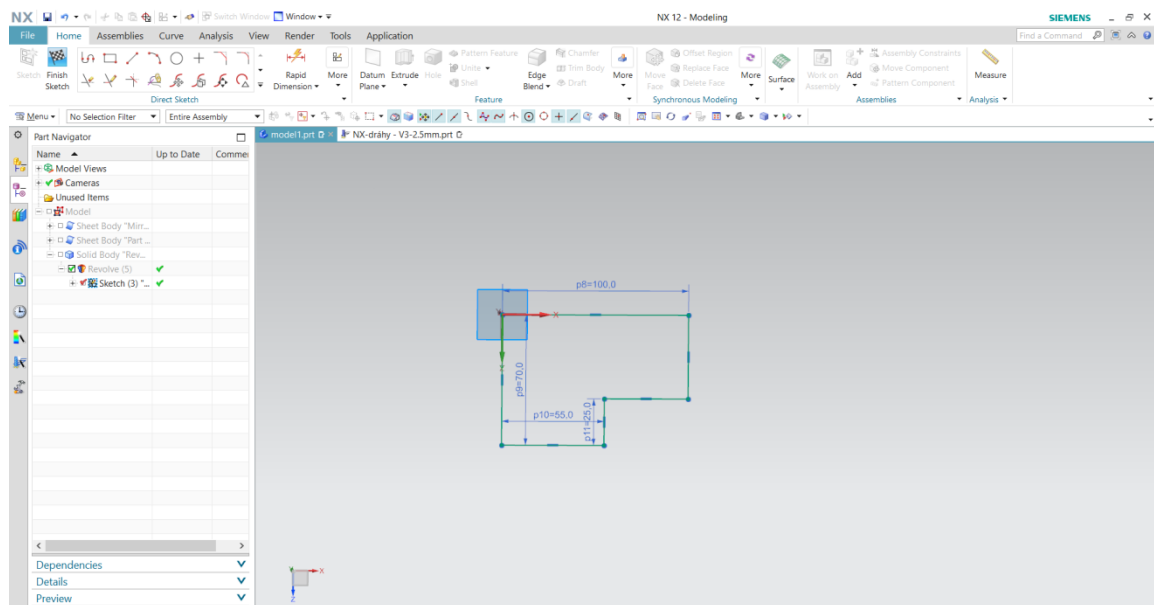
Cílem praktické části této bakalářské práce je navrhnout takový postup, který by umožňoval tvorbu drah pro adaptivní soustružení v CAM programu, který touto funkcí nedisponuje. Tato část byla realizována v prostředí Siemensu NX CAM 12.0.2.9, stejný postup by však mělo být možné uskutečnit i v jiném CAM programu.

Jak již bylo uvedeno, obsahuje tento program funkci pro 2,5D adaptivní frézování. Pokud je toto frézování realizováno jedním přejezdem nástroje v jediné vrstvě materiálu, leží výsledné dráhy nástroje, podobně jako při soustružení, pouze v jedné rovině. Při použití vhodného souřadného systému by tak mělo být možné použít dráhy frézy i pro soustružení.

5.1 Prostředí programu Siemens NX CAM

Program Siemens NX CAM obsahuje široké spektrum funkcí umožňujících provádět rozličné úkony. Je zde možné např. vytvářet a vyhodnocovat simulace mechanických systémů, hlavním účelem programu je však tvorba výrobních programů.

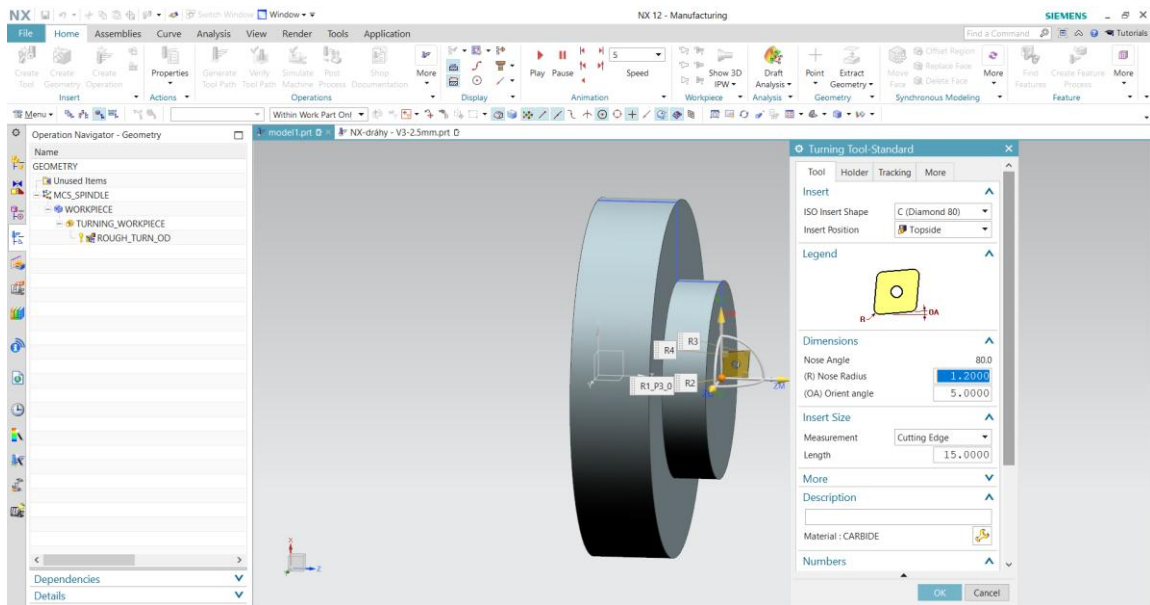
Základem návrhu výrobního programu je tvorba 3D modelu a k němu příslušnému polotovaru. V programu Siemens NX CAM je tento proces realizován podobně jako např. v CAD programech Autodesk Inventor nebo SolidEdge. Základem je načrtnutí geometrie v jedné z rovin souřadnicového systému. Pomocí funkcí Vytažení (Extrude) nebo Rotování (Revolve) je pak z tohoto 2D nákresu vytvořeno 3D těleso. Opakované použití tohoto postupu, doplněné dalšími funkcemi jako je např. Zkosení (Chamfer) či Zaoblení (Edge blend) hran, umožňuje vytvářet i tvarově komplexní objekty.



Obr. 13: Náčrt modelu v prostředí Siemens NX CAM

Pro samotnou tvorbu programu je třeba vytvořit souřadnicové systémy obrobku a stroje, a zvolit výchozí obráběný polotovar. Ten může být buď vymodelován podobně jako výrobek, nebo od něj odvozen jako opsané těleso. Dále je vybrána příslušná metoda

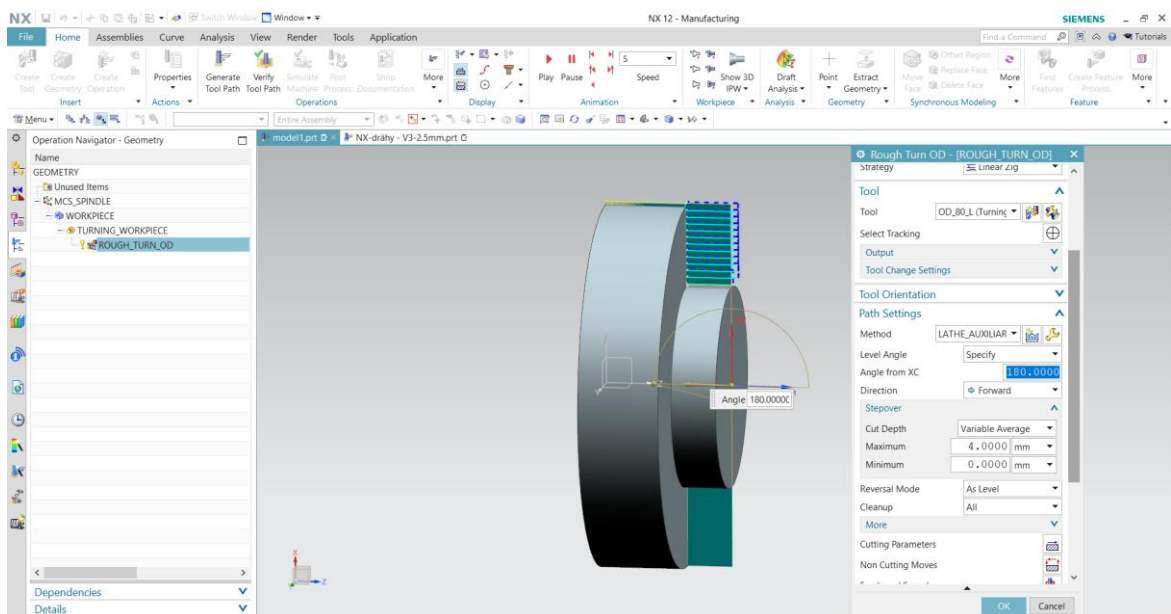
obrábění a pro ni vhodný nástroj, jehož parametry lze editovat. V rámci operace lze volit řezné podmínky a upravovat rozličné parametry jako je např. směr obrábění nebo přejezdy nástroje.



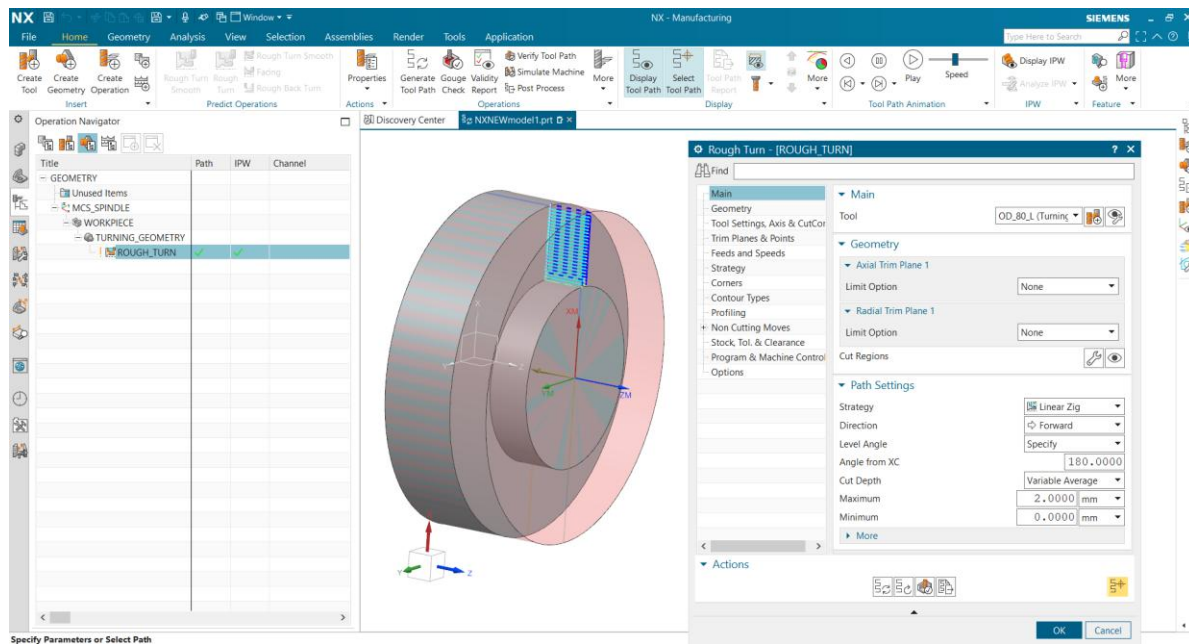
Obr. 14: Siemens NX CAM - tabulka volby nástroje

5.2 Odlíšnosti verzí programu

Pro návrh byla použita starší verze programu (přesněji Siemens NX CAM 12.0.2.9 z roku 2017), která je dnes (2022) stále hojně rozšířená mezi firmami zabývajícími se technologií obrábění. V době tvorby této práce je již k dispozici verze 2015 vydaná v únoru 2022. Mezi těmito verzemi je rozdíl jednak v uživatelském rozhraní (nejvíce patrný je v systému tabulek operací), zejména však v možnostech obsažených funkcí.



Obr. 15: Siemens NX CAM 12.0.2.9



Obr. 16: Siemens NX CAM 2015

Pro tuto práci nejvýznamnějším rozdílem je přidání funkce adaptivního soustružení. Ta bude později použita k alternativnímu návrhu drah pro experiment.

6. Příprava experimentu

Cílem experimentu bylo ověření výhodnosti adaptivního soustružení z hlediska hospodárnosti výroby a jeho porovnání s konvenční strategií při výrobě testovacího obrobku. Porovnání je založeno na sledování výrobního času a kontrole tepelného ovlivnění nástroje. Nižší výrobní čas a rovnoměrně rozložené opotřebení přispívají k vyšší ekonomičnosti a produktivitě výroby.

V této bakalářské práci sice není prostor pro správnou kontrolu opotřebení nástroje, neboť by bylo nutné vyrobit vysoké množství výrobků, je však alespoň možné porovnat nástroje z hlediska tepelného ovlivnění. To bylo sledováno na základě poměru velikosti tepelně ovlivněné plochy k celé ploše čela nástroje a na základě rozložení ovlivněných oblastí.

Při výrobě nebude sledována kvalita výsledného obrobeného povrchu, neboť použité metody soustružení budou pouze hrubovací. Dle informací poskytnutých výrobcem nástrojů se výroba finálního povrchu provádí dokončovacími nástroji za speciálních podmínek, a proto by zde aplikace adaptivního soustružení nevedla k velkému přínosu.

Byly vytvořeny celkem tři programy pro CNC soustruh: jeden pro konvenční podélné soustružení a dva pro soustružení adaptivní. Jeden z adaptivních programů byl vytvořen navrženým postupem přes adaptivní frézování v Siemensu NX CAM 12.0.2.9 a druhý pomocí samostatné funkce v novém Siemensu NX CAM 2015.

6.1 Obráběcí stroj

Experiment byl proveden na CNC soustruhu KOVOSVIT KL 435Y. Jeho vybrané parametry jsou uvedeny v tabulce.

Tabulka 1: Parametry soustruhu KL 435Y [30]

Parametr	Hodnota
Maximální soustružený průměr [mm]	550
Maximální délka soustružení [mm]	1100
Maximální výkon [kW]	22
Maximální otáčky vřetene [1/min]	3800
Pojezd osy X1 [mm]	345
Pojezd osy Z1 [mm]	1225
Rychloposuv os X1 a Z1 [1/min]	30

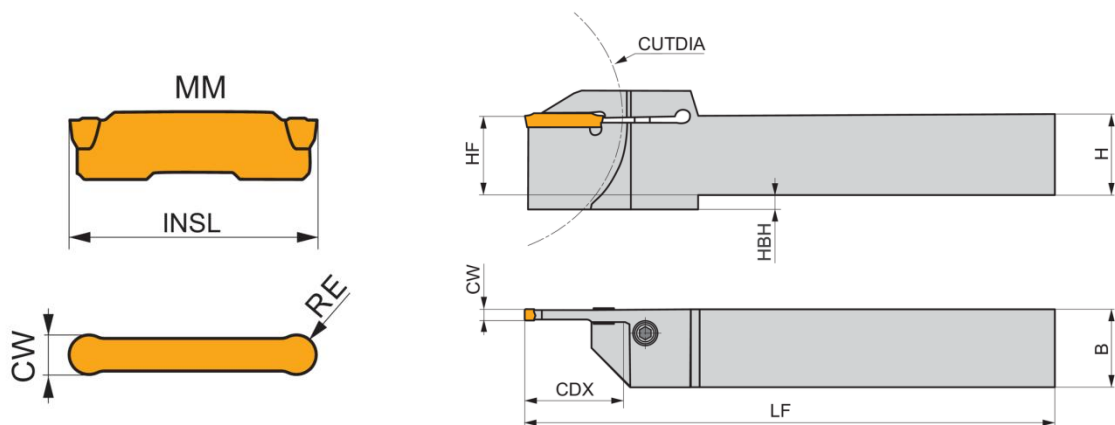
Soustruh je vybaven řídicím systémem SINUMERIK 840Dsl. Jedná se o modulární digitální systém, který umožňuje ovládání až 93 os na 30 přenosových kanálech. [31]



Obr. 17: CNC soustruh KL 435Y [30]

6.2 Nástroje a řezné podmínky

Použitý nástroj byl složen ze zapichovací VBD tvaru G s kruhovou řeznou částí GL6-D600MMO a držáku GL6-S2525PFL. Jejich rozměry jsou uvedeny v tabulce.



Obr. 18: Nákresy VBD a držáku [32], [33]

Tabulka 2: Parametry břitové destičky a držáku [32], [33]

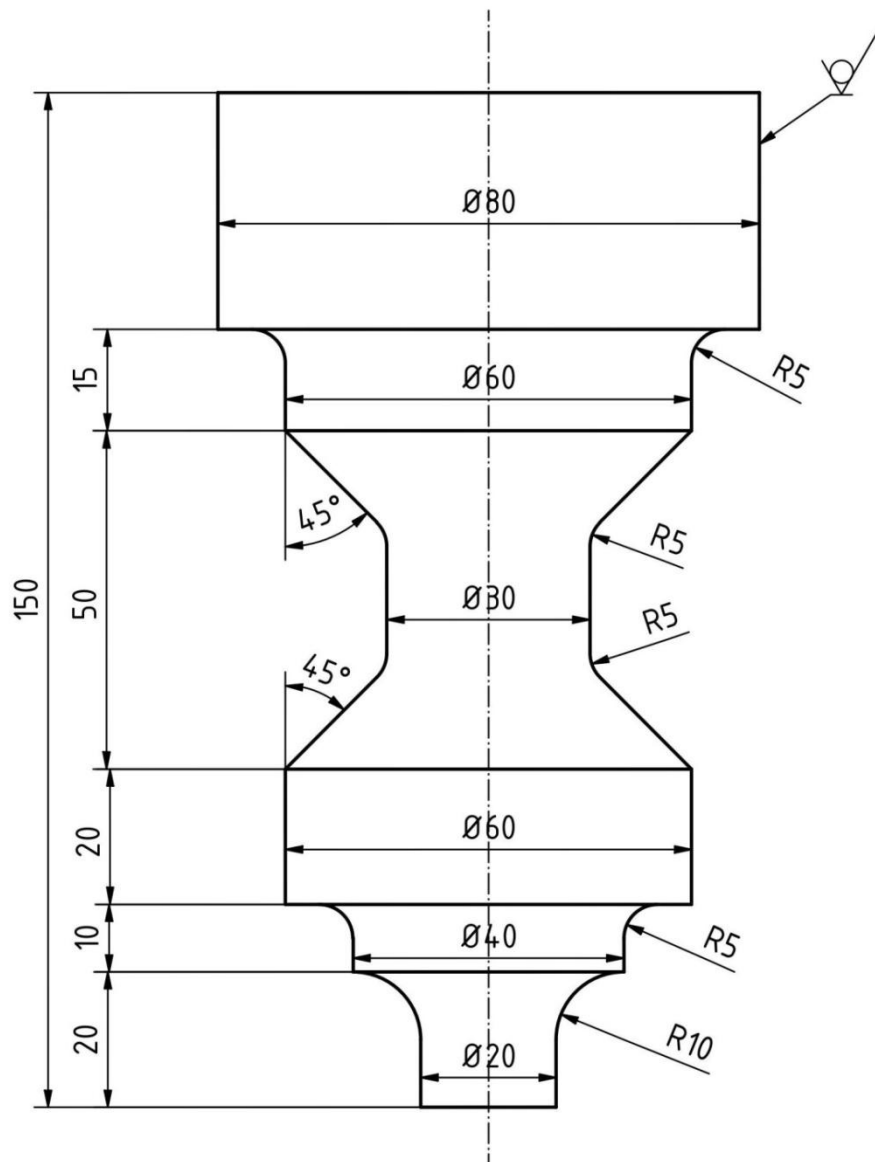
VBD	Hodnota	Držák	Hodnota	Držák	Hodnota
INSL	26 mm	HF	25 mm	CW	6 mm
CW	6 mm	CUTDIA	100 mm	CDX	32 mm
RE	3 mm	HBH	5 mm	LF	170 mm
		H	25 mm	B	25 mm

Řezné podmínky a materiál

Hodnota hloubky řezu byla vzhledem k parametrům nástroje zvolena jako 2,5mm. Další parametry, jako otáčky vřetene a jimi limitovaná řezná rychlost, budou určeny na začátku experimentu při zkoušce záběru nástroje do materiálu. Materiálem obrobku bude uhlíková normalizačně žíhaná ocel 12 050.1.

6.3 Návrh testovacího dílce

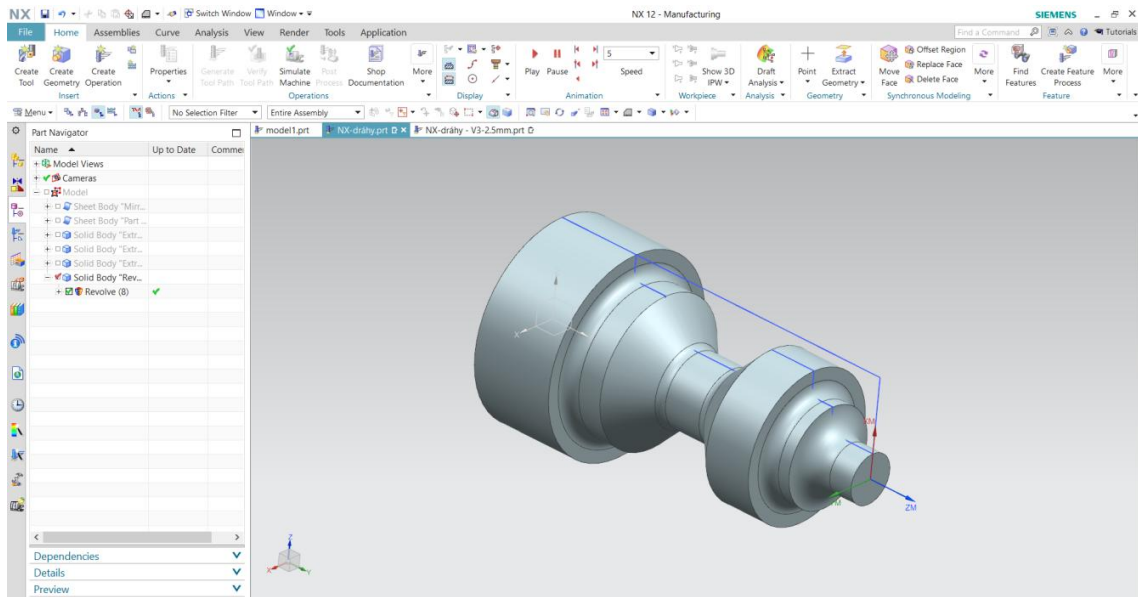
Postupnou iterací byl navržen vhodný testovací dílec. Ten na délku měří 150 mm a jeho největší průměr dosahuje hodnoty 80 mm. Na dílci se nacházejí prvky jako je osazení, zaoblení či kuželová drážka, jejichž obrobení konvenční metodou by mohlo být problematické. Naopak adaptivní soustružení by mělo proběhnout bezproblémově a přínosy této metody by tak mohly vyniknout. Dílec je zobrazen na obrázku 19, jeho výrobní výkres je pak vložen v příloze.



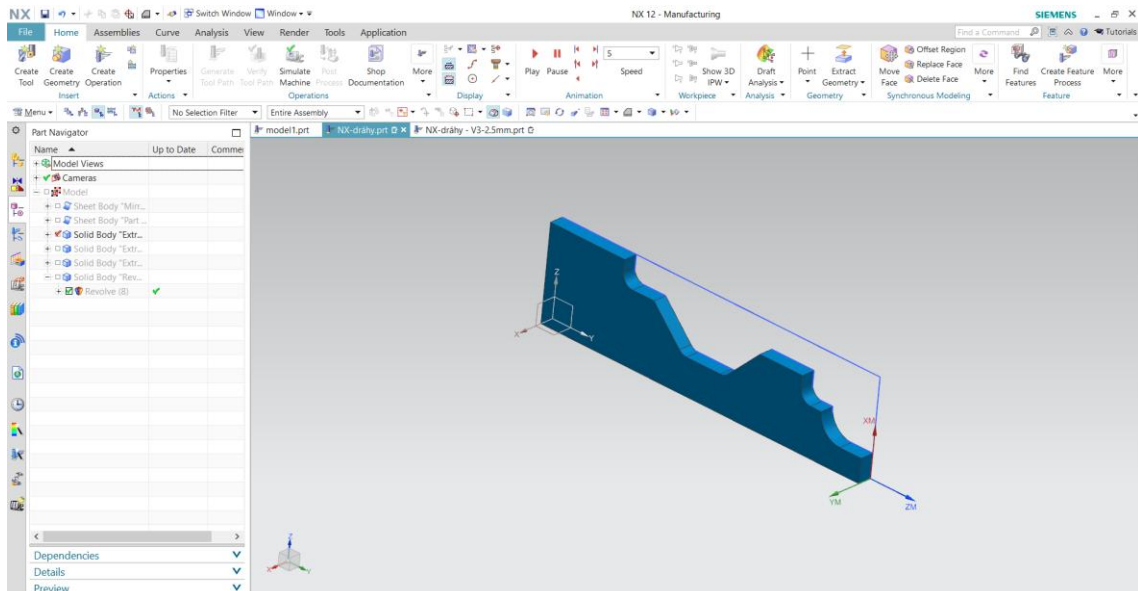
Obr. 19: Obrázek testovacího dílce

6.4 Programování drah nástroje v Siemensu NX CAM 12.0.2.9

Prvním krokem návrhu výrobních programů je tvorba modelu navrženého výrobku. Prostředí Siemensu NX umožňuje vytvořit více modelů v jedné instanci, na které mohou být použity různé výrobní metody. Nejprve byl vytvořen skutečný model součásti (obrázek 20), který bude použit jednak pro návrh konvenčního podélného soustružení, z jeho profilu bude ale hlavně odvozeno nerotační těleso (obrázek 21), na které bude uplatněno adaptivní frézování. Jako nástroj je v operaci nastavena válcová fréza, reprezentující použitý soustružnický nástroj s kruhovým břitem (viz obrázek 18).



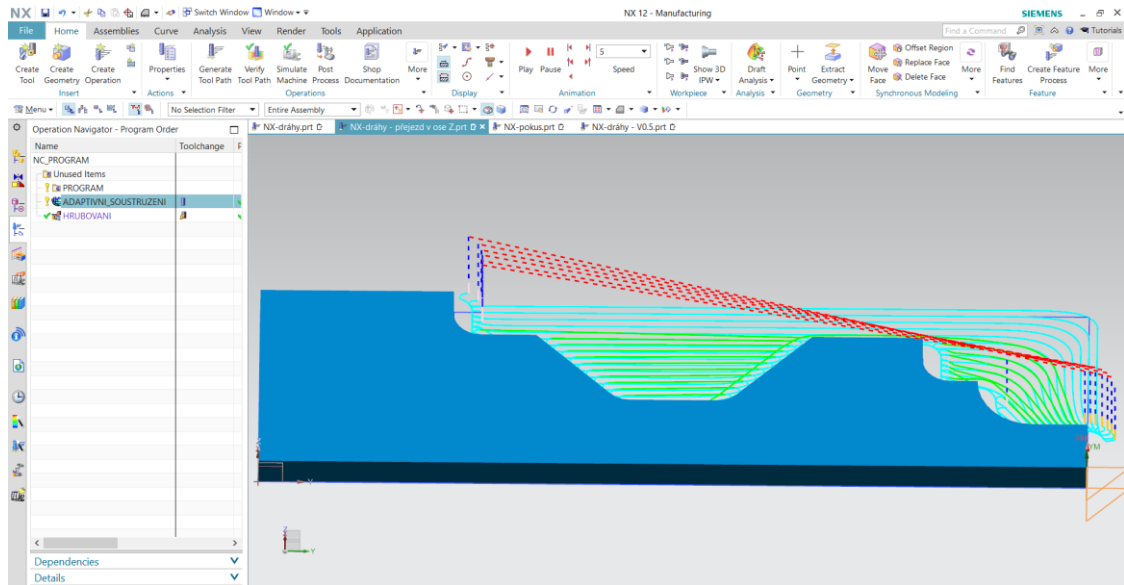
Obr. 20: Skutečný model obrobku



Obr. 21: Model pro adaptivní frézování

Při tvorbě souřadnicových systémů operace je nutné přihlídnout k tomu, že soustruhy obvykle pracují s pohybem nástroje v rovině XZ a souřadnicové systémy obou operací je vhodné takto zvolit.

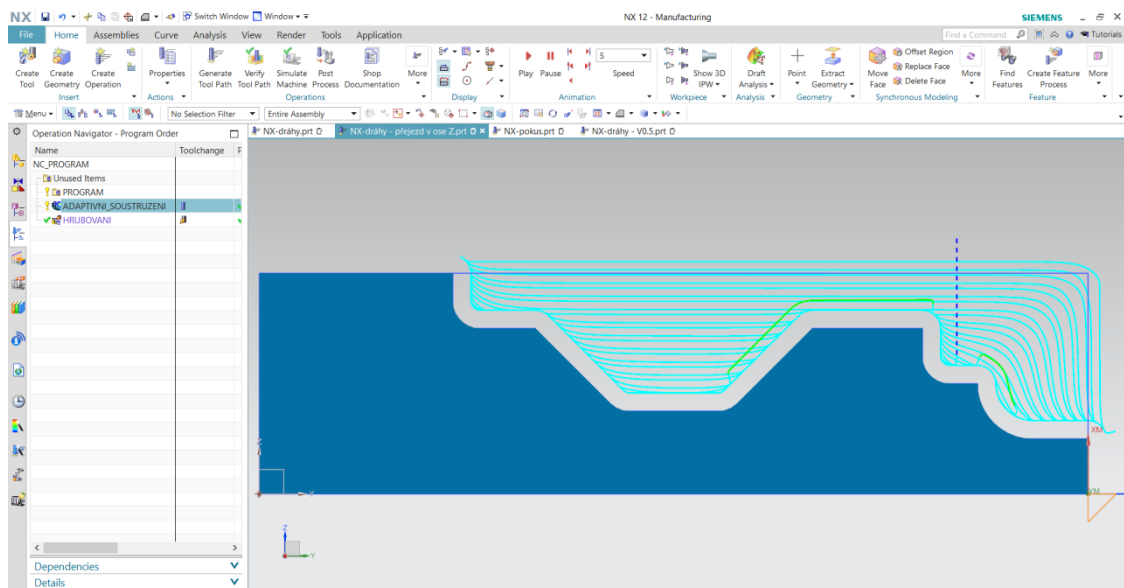
Po vytvoření obrobku a souřadných systémů je už možné vytvořit frézovací operaci. Na obrázku 22 je zobrazena prvotní varianta drah nástroje, kterou je však nutné dále zkontrolovat a případně upravit, neboť se stále jedná o frézovací funkci a výchozí návrh by tak mohl obsahovat pohyby, které jsou při soustružení nemožné či nevhodné.



Obr. 22: První verze drah

Jednou z komplikací návrhu jsou přejezdy nástroje, při nichž dochází také k pohybu v ose Y (kolmé k pracovní rovině). Takovéto přejezdy nelze realizovat na běžném soustruhu. Změnou obrábění z jednosměrného na obousměrné odstraníme podstatnou část těchto přejezdů a zajistíme, že nástroj zůstane během operace v rovině.

Nástroj se stále pohybuje v ose Y při vstupu do materiálu a výjezdu z něj. Změnou nastavení „světél výšky“ (Clearance) v tabulce operace pak dosáhneme toho, že i tyto pohyby zůstanou v pracovní rovině. Upravené dráhy jsou zobrazeny na obrázku 23.

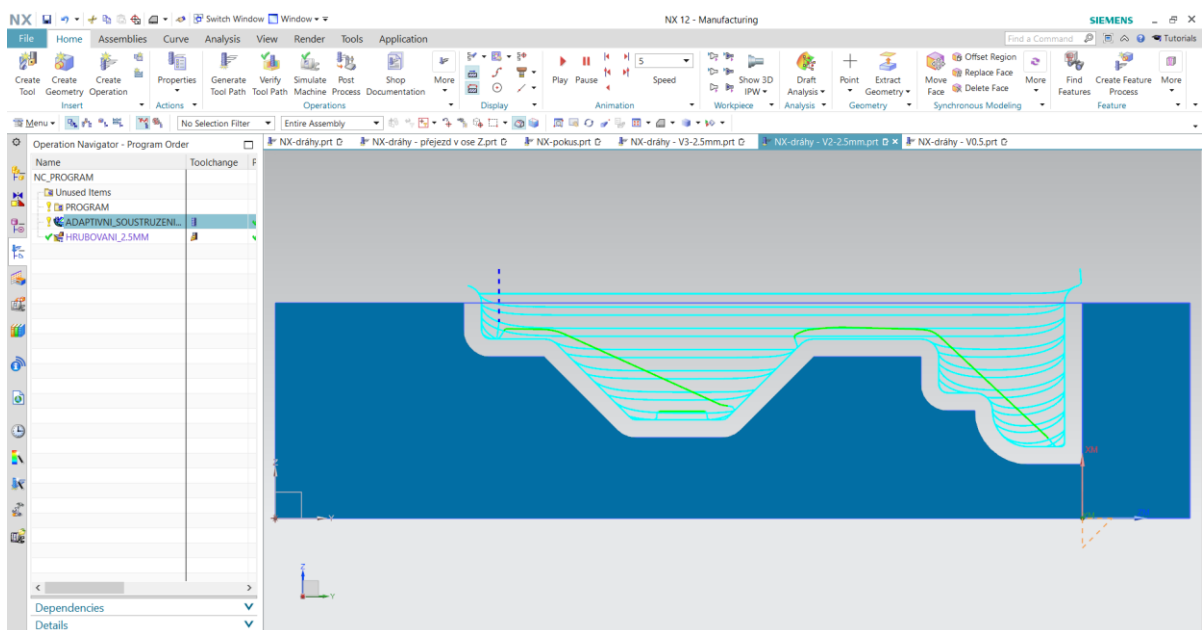


Obr. 23: Druhá verze drah

Dále je třeba vyřešit pracovní pohyb nástroje u čela obrobku, kdy se nástroj pohybuje ve směru osy X, kolmé k ose rotace Z. Tento pohyb by nepředstavoval problém u frézování, kde by se nelišil od pohybu ve směru osy Z. Avšak dle vyjádření výrobce zvoleného nástroje, může použitá VBD při tomto „čelním“ soustružení pracovat jen s velmi nízkou hloubkou řezu ($\gg 2,5\text{mm}$). Při překročení této meze je nástroj silně namáhán a může se poškodit. Jedním z řešení je vytvoření „virtuální stěny“ – zábrany, která z otevřeného čela dílce vytvoří kapsu. Tato zábrana ale před skutečným obrobkem nebude přítomna. Nástroj tedy nebude začínat obrábění z čela, ale bude postupovat podobně jako při obrábění kuželové kapsy dále na modelu. Virtuální zábrana je patrná z porovnání obrázků 23 a 24.

Navržená funkce by dále mohla být vylepšena optimalizací dráhy v reverzních bodech. V těchto bodech na konci každého průjezdu se nástroj zastaví, aby změnil směr svého pohybu a zanořil se hlouběji do materiálu. Tím ale dochází k časovým ztrátám. Nejvhodnější by tedy bylo, kdyby se tento děj uskutečnil bez zastavení a nástroj se pohyboval po dráze, jejíž derivace se nemění skokem. Řešením by mohla být změna obrábění z obousměrného na jednosměrné, časová úspora by ale byla nižší, než čas ztracený na přejezdech. Toto řešení tedy nebude použito.

Na obrázku 24 je zobrazen finální tvar drah nástroje.



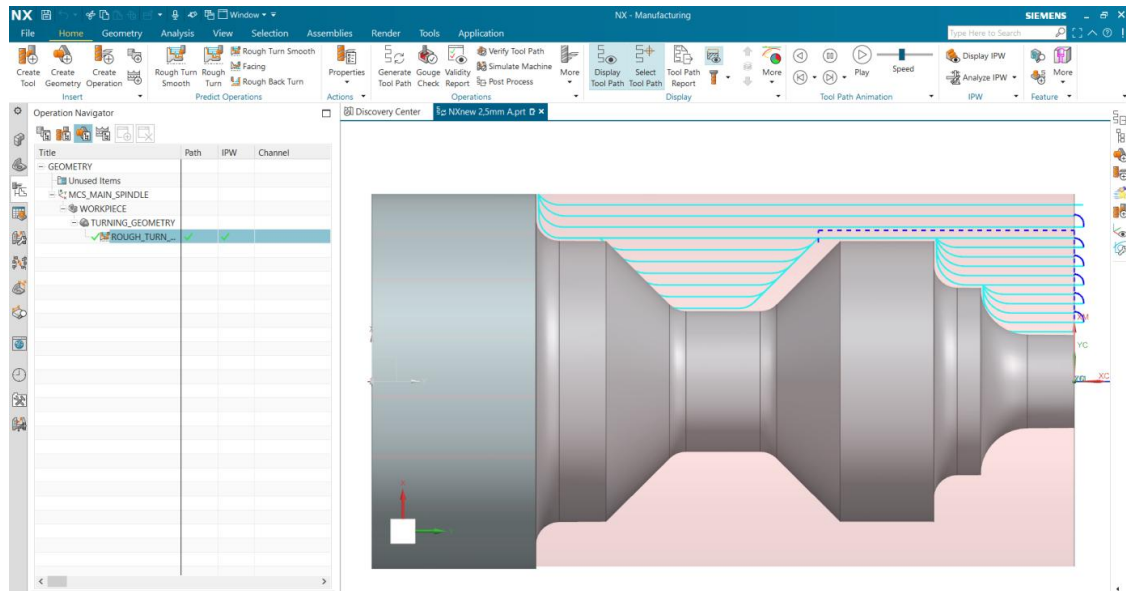
Obr. 24: Finální návrh drah pro adaptivní soustružení

6.5 Programování drah nástroje v Siemensu NX CAM 2015

Pro porovnání byly vytvořeny adaptivní dráhy i v nové verzi programu. Tvorba probíhá podobně jako ve starší verzi, rozdílem je však použití samostatné funkce adaptivního soustružení, pro kterou již můžeme použít rotační model i souřadnicový systém.

Oproti drahám ze Siemensu NX CAM 12.0.2.9 zde není nutné vytvořit virtuální kapsu na čele obrobku, kde tak může nástroj vyjíždět z obrobku přímo a při přejezdu se

nemusí pohybovat po trochoidální dráze. Vzhledem k tomu, že tato funkce je primárně určena pro soustružení, není zde třeba řešit komplikace spojené s pohybem nástroje v rovině Y. I zde by šlo optimalizovat dráhu nástroje v reverzních bodech, jednosměrné soustružení by však snížilo efektivitu procesu.



Obr. 25: Adaptivní soustružení v nové verzi NX

6.6 Generování NC kódů

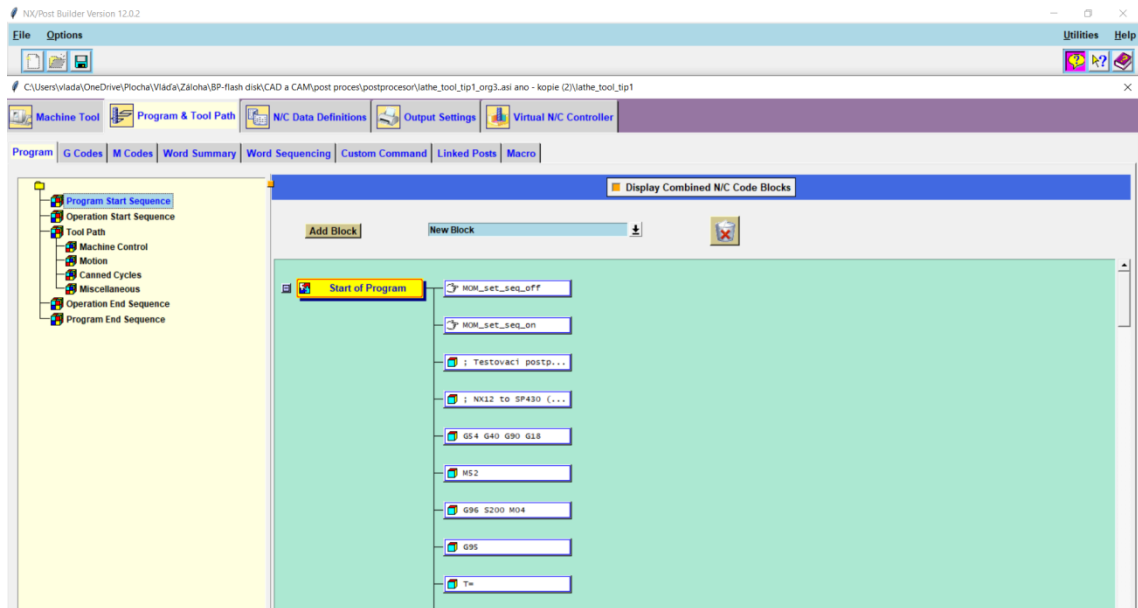
Dráhy vytvořené v prostředí Siemensu NX CAM nelze přímo použít na CNC soustruhu a je třeba je postprocesem (součástí CAM programu) převést do NC kódu. Siemens NX CAM je vybaven více postupy (tzv. postprocesory), vhodnými pro různé obráběcí stroje a metody.

Na vygenerovaný kód máme několik nároků. Pro použití na soustruhu KL435Y musí hlavička kódu obsahovat několik příkazů, jako je např. definování souřadnicového systému či vypnutí korekcí na poloměr nástroje. Řezné parametry, jako jsou rezná rychlost a posuv nástroje, je vhodné řešit parametricky a určit jejich hodnoty během experimentu na základě chování rezného procesu. Dále musí NC kód obsahovat instrukce pro bezpečný nájezd do obrobku a výjezd z něj po zadaných souřadnicích. Bude tedy vhodné, editovat jeden z vestavěných postprocesorů tak, aby odpovídal našim požadavkům.

K úpravě postprocesoru byl použit program Post Builder, který je součástí Siemensu NX. Post Builder má široké spektrum možností (např. změna struktury vygenerovaných G adres), pro naše účely bude postačovat připsání požadovaných funkcí do hlavičky a závěru kódu.

Při ověřování vygenerovaného kódu na stroji se vyskytlo několik problémů. Při použití kruhových interpolací vypisoval řídicí systém soustruhu chybové hlášení. Nejjednodušším řešením byla náhrada kruhových interpolací lineárními. Dále se vyskytly drobné komplikace jako použití poloměru v souřadnicích namísto průměru

nebo automatická změna posuvu v průběhu operace. Obojí bylo vyřešeno změnou nastavení Post Builderu.



Obr. 26: Prostředí programu Post Builder

Na obrázku 27 je zobrazen začátek finálního kódu s vysvětlením použitých funkcí.

```

ad_soustr_2_5mm_chlouba2 - kopie - Poznámkový blok
Soubor Úpravy Formát Zobrazení Nápověda
N0010 ; Testovací postprocesor CVUT
N0020 ; NX12 to SP430 (Dormer Pramet)

N0030 G54 G40 G90 G18 ;funkce pro: posunutí 0 bodu _ zrušení korekci _ absolutní odměrování _ volbu prac. roviny XZ
N0040 M52 ;adaptivní posuv|
N0060 G95 ;stanovení - posuv na otacku

N0070 T= ;pouzity nastroj
N0080 R10= ;prumer obrobnku mm
N0090 R15= ;rezná rychlost m min-1
N0100 R16= ;posuvová rychlost mm ot-1

N0110 G0 X300 ;bezpečný najezd nástroje k obrobnku
N0120 G0 Z100
N0130 G0 X=R10
N0140 G0 Z=10
N0150 G1 X=R10
N0160 G0 X300
N0170 G0 Z100

N0180 G97 S=(R15*1000)/3.14/R10 M3 ;konst otacky vřetene _ vypočet otacek a roztocení vřetene ve směru HR
N0185 F=R16 ;posuv

N0190 G00 X92.804 Z-.4157 ;samotný kód
N0210 G01
N0220 X87.7693 Z-.2267
N0230 X87.7114 Z-.2272
N0240 X87.5463 Z-.2324
    
```

Obr. 27: Hlavičky finálního kódu

7. Realizace a vyhodnocení experimentu

Experiment byl uskutečněn v prostorách firmy Dormer Pramet s.r.o. v Šumperku, která je výrobcem použitých obráběcích nástrojů. Na začátku experimentu byla provedena zkouška pro nastavení řezných podmínek. Byly tak určeny vhodné řezné podmínky pro ideální utváření třísky při výrobě. Zkouška byla provedena bez přívodu chladicí kapaliny k obrobku, pro výrobu s chlazením byly podmínky určeny na základě předchozí zkušenosti s chováním nástroje.

Tabulka 3: Řezné podmínky

Chladicí kapalina	Ne	Ano
Řezná rychlost v_c [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	180	300
Posuv f [mm]	0,25	0,4
Hloubka řezu a_p [mm]	2,5	2,5
Maximální průměr D [mm]	80	80
Otáčky vřetene n [min^{-1}]	716	1194

Následně byl proveden samotný experiment, při němž byly vyrobeny celkem 4 testovací dílce. Jeden dílec vyroben konvenčním podélným soustružením, jeden adaptivním soustružením dle vytvořeného postupu v Siemensu NX CAM 12.0.2.9 a jeden adaptivním soustružením z funkce Siemensu NX CAM 2015. Všechny tři byly vyrobeny za stejných řezných podmínek bez použití chladicí kapaliny a pro každý dílec byla použita nová VBD. Metody byly porovnány na základě jejich výrobního času a tepelného ovlivnění použitých nástrojů. Tepelné ovlivnění je porovnáno na základě procentuálního zastoupení tepelně ovlivněných ploch na čele nástroje a na základě jejich rozmístění. V rozhraní CAM programu byly také změřeny délky drah nástrojů a u navrženého adaptivního obrábění ze Siemensu NX CAM 12.0.2.9 byl pro kontrolu určen úhel opásání nástroje ve vybraných bodech.

Poslední (čtvrtý) dílec byl vyroben adaptivním soustružením ze Siemensu NX CAM 2015 za zvýšených řezných podmínek při použití chladicí kapaliny a byla na něm obrobena pouze kuželová drážka. Tento dílec byl obroben za účelem pozorování průběhu výroby při použití maximálních dostupných řezných podmínek.

Samotný průběh výroby nebyl plně dokonalý. Dílec je vzhledem ke svému průměru poměrně dlouhý, což spolu s jinými vlivy vedlo ke vzniku nežádoucích vibrací. Ty se projevovaly zejména zvýšenou hlučností. Jedno z řešení tohoto problému představuje použití koníka. Určitý problém představovalo také utváření třísek. Při výrobě vznikaly zejména drobné, dobře oddělené třísky, při obrábění rohů se ale vytvářely dlouhé spirálové třísky, které jsou obecně nežádoucí, neboť hrozí jejich zachycení vřetenem či nástrojem.

V tabulce 4 jsou zapsány výsledky experimentu. Jako řezná dráha je v ní označena ta část dráhy, při které je nástroj v záběru s obrobkem. Celková dráha je pak součtem řezné dráhy a délky přejezdů nástroje.

Tabulka 4: Výsledky experimentu

Verze Siemensu NX CAM	12.0.2.9	12.0.2.9	2015	2015
Metoda soustružení	konvenční	Adaptivní	Adaptivní	Adaptivní
Chlazení	NE	NE	NE	ANO
Posuv [mm]	0,25	0,25	0,25	0,4
Řezná rychlost [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	180	180	180	300
Výrobní čas [s]	230	325	220	50
Délka řezné dráhy nástroje [mm]	1044,2	1450,5	1037,1	540,2
Délka přejezdů nástroje [mm]	958,3	9,9	101,2	24,3
Celková délka dráhy [mm]	2002,5	1460,4	1138,3	564,5
Poměr opotřebené plochy k ploše čela nástroje [-]	0,345	0,43	0,57	0,57
Poměr řezné dráhy a výrobního času [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	4,54	4,46	4,71	10,8
Poměr celkové dráhy a výrobního času [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	8,71	4,49	5,17	11,3

7.1 Výrobní čas

Tyto výsledky jsou na první pohled vcelku překvapivé. Bylo očekáváno, že oba návrhy adaptivního soustružení budou dosahovat, co se výrobního času týče, lepších výsledků, než konvenční podélná metoda, což se nepotvrdilo. Adaptivní soustružení, navržené v Siemensu NX CAM 12.0.2.9 dle postupu vytvořeného v této bakalářské práci, má v porovnání s konvenční metodou výrobní čas vyšší o téměř 42 %.

To je především způsobeno nedostatečně využitou hloubkou řezu, neboť výchozí 2,5D frézování pracuje tak, že nastavená hloubka řezu je pouze maximem a nástroj se pohybuje po hustších drahách s nižší hloubkou řezu. Za cenu prodloužení řezné dráhy a následného zvýšení výrobního času je tak sníženo namáhání působící na nástroj a řezná dráha nástroje je tak oproti konvenčnímu soustružení delší o 39 %. Relativní nárůst dráhy téměř odpovídá relativnímu nárůstu času, což je patrné i z téměř shodných poměrů řezné dráhy a výrobního času u konvenčního i adaptivního soustružení. Lze se tedy domnívat, že při další optimalizaci adaptivní metody by bylo možné lépe využít hloubku řezu nástroje, snížit délku řezné dráhy a dosáhnout tak lepšího časového výsledku.

Je také třeba dále uvážit, že navzdory svému lepšímu časovému výsledku má konvenční soustružení oproti adaptivnímu soustružení ze Siemensu NX CAM 12.0.2.9 celkovou délku dráhy nástroje vyšší o 37 %. Z této celkové dráhy pak 48 % připadá na rychloposuvem realizované přejezdy, při nichž není nástroj v záběru. U adaptivního soustružení ze Siemensu NX 12.0.2.9 připadá na přejezdy pouhých 0,68 % celkové dráhy nástroje. Pokud by se u adaptivního soustružení podařilo dosáhnout stejného výrobního času jako u konvenční metody, byl by nástroj, díky nižší hloubce řezu, méně silově a tepelně namáhán, což by mělo dopad na ekonomičnost výroby.

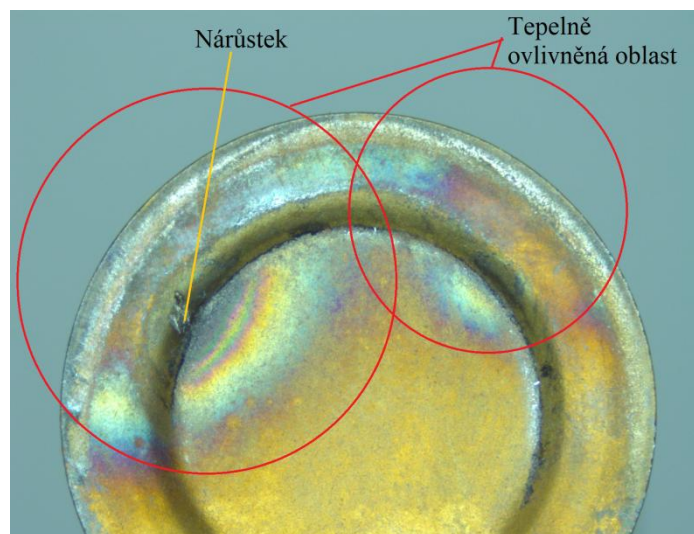
Adaptivní soustružení ze Siemensu NX CAM 2015 má v porovnání s konvenční metodou výrobní čas nižší pouze o 4,6 % a řeznou dráhu téměř shodnou. Celková dráha

nástroje je však téměř poloviční. Téměř zanedbatelný časový rozdíl může poukazovat na to, že navržený dílec není plně vhodný na prokázání výhod adaptivního soustružení. Ve srovnání s adaptivním soustružením ze Siemensu NX CAM 12.0.2.9 jsou při této metodě přejezdy nástroje delší a představují 8,9 % z celkové dráhy nástroje. To je zřejmě způsobeno jiným rozložením drah nástroje na čele obrobku, neboť při postupu ze Siemensu NX CAM 12.0.2.9 nástroj obrábí tuto část jako uzavřenou kapsu, zatímco při postupu ze Siemensu NX CAM 2015 vyjede nástroj z čela obrobku, provede přejezd a zanoří se do další vrstvy materiálu.

7.2 Vizuální kontrola nástroje po obrábění

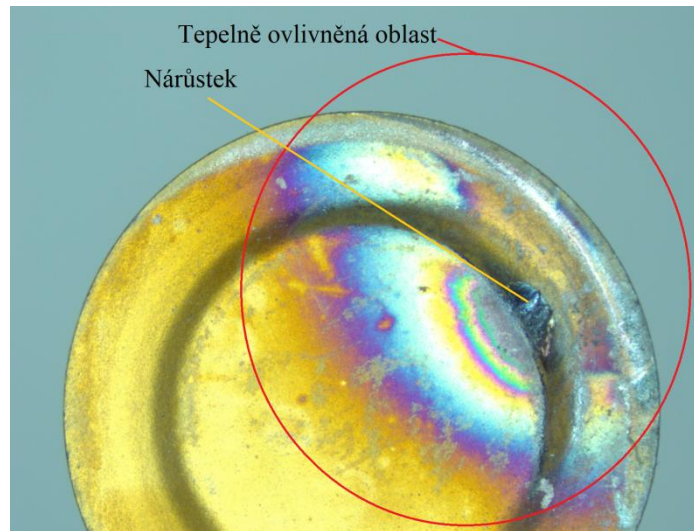
Vyhodnocení tepelného ovlivnění nástroje bylo provedeno na základě poměrné velikosti ovlivněné oblasti a jejího rozložení. Po každé operaci byla VBD vyměněna. Projevy opotřebení po obrobení jednoho kusu nebyly pozorovatelné, a proto byla provedena vizuální kontrola stavu čela bříty.

Je třeba ještě zmínit, jakým způsobem je tepelně ovlivněná oblast identifikována. Dle informací získaných při konzultaci s výrobcem nástrojů se působení tepla projevuje změnou struktury povlaku na nástroji. Dojde tak ke změně barvy daného místa, přičemž vyšší intenzita poukazuje na vyšší tepelné ovlivnění.



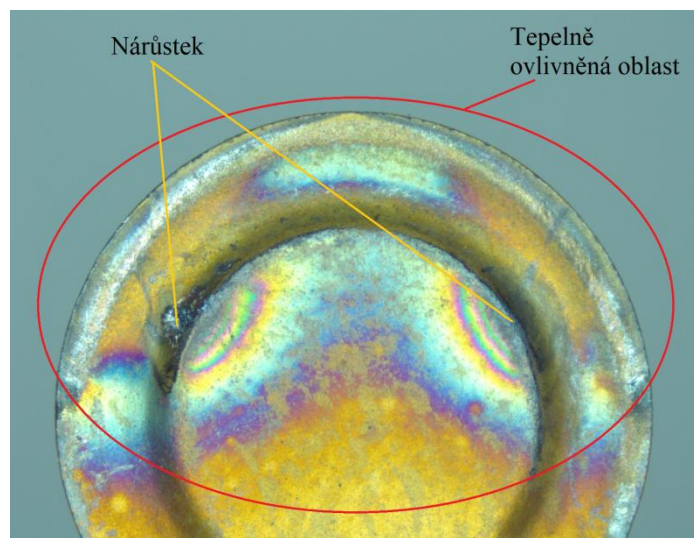
Obr. 28: VBD pro adaptivní soustružení ze Siemensu NX CAM 12.0.2.9

VBD na obrázku 28 byla použita pro adaptivní soustružení ze Siemensu NX CAM 12.0.2.9. Na obrázku si můžeme povšimnout dvou oblastí, kde se duhově mění barva nástroje. Právě tyto oblasti byly použity při soustružení a barevná změna ukazuje na tepelné namáhání, kterému byl nástroj při obrábění vystaven. Při použití chladicí kapaliny by bylo teplo lépe odváděno od nástroje a toto ovlivnění by bylo minimální. Nestejná velikost těchto oblastí také poukazuje na to, že nástroj byl při výrobě zatížen spíše v jednom směru. Ve větší z oblastí lze také spatřit tmavý shluk ulpěného materiálu. Jedná se o nárůstek - materiál třísky ulpívající na nástroji. Jeho vznik je nežádoucí, neboť mimo jiné zpravidla zhoršuje kvalitu obráběného povrchu.



Obr. 29: VBD pro konvenční soustružení

Obrázek 29 zobrazuje VBD použitou pro konvenční soustružení. Obrábění probíhalo pouze jednosměrně, čemuž odpovídá tepelné ovlivnění povrchu nástroje. Ze zbarvení je patrné, že opotřebená oblast byla více tepelně ovlivněna. Také nárůstek je větší, než u adaptivní metody.



Obr. 30: VBD pro adaptivní soustružení ze Siemensu NX CAM 2015

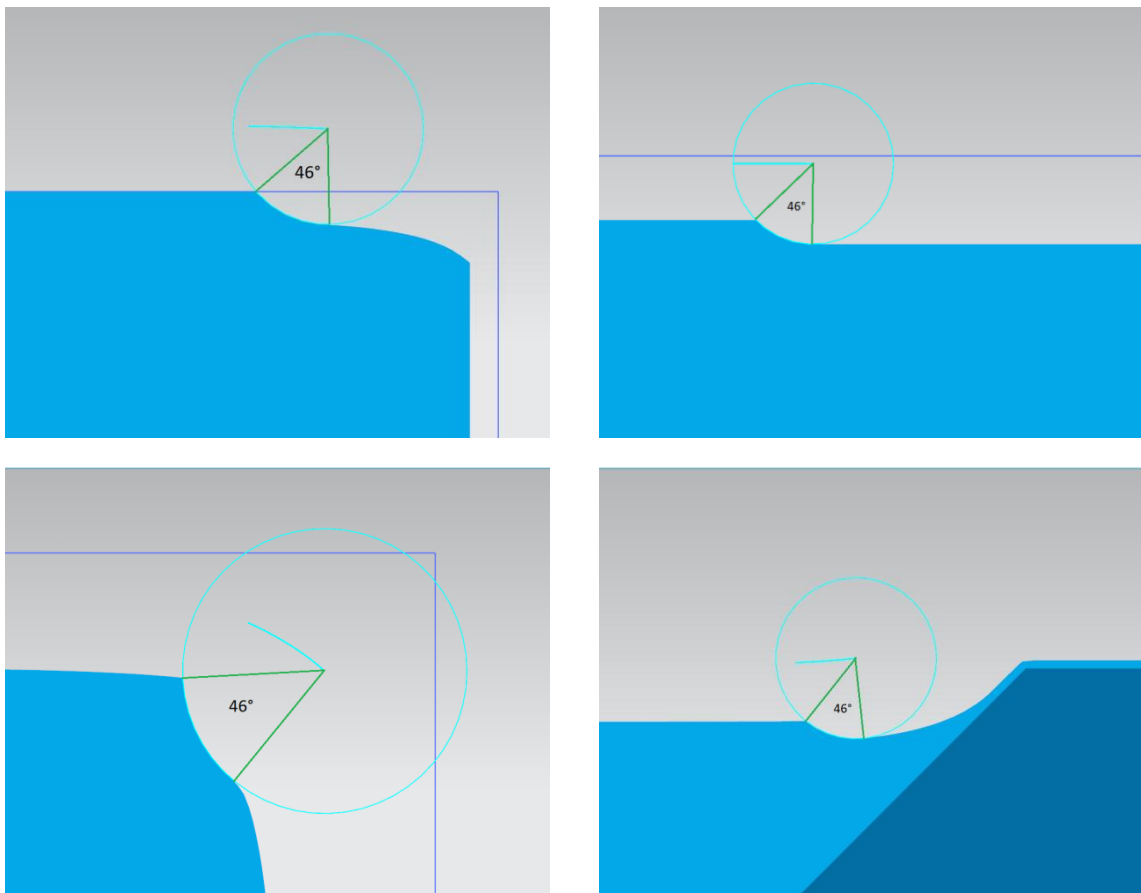
Na obrázku 30 je zachycena VBD použitá pro adaptivní soustružení ze Siemensu NX CAM verze 2015. Tepelně ovlivněné oblasti i nárůstky jsou zde symetricky rozloženy po obou stranách. VBD je tak efektivně využita a při použití není nutné měnit upnutí nástroje pro rovnoměrné opotřebení.

Pro vyšší ekonomičnost výroby je vhodné, aby bylo opotřebení rovnoměrně rozloženo po co největší ploše nástroje. Z obrázků a výsledků v tabulce je patrné, že metody adaptivního soustružení vychází z tohoto srovnání lépe, než konvenční podélné soustružení. Při klasickém soustružení představuje opotřebená plocha 34,5 % plochy nástroje, zatímco u adaptivních metod je to 43 % (12.0.2.9) resp. 57,5 % (2015). Již

dříve byla zmíněna proměnlivost hloubky řezu u adaptivního soustružení ze Siemensu NX CAM verze 12.0.2.9. To mohlo mít vliv také na rozložení opotřebení, protože se snížená hloubka řezu zřejmě uplatňovala pouze při jednom směru obrábění, což způsobilo nerovnoměrné rozložení opotřebovaných oblastí.

7.3 Úhel opásání

Během přípravy NC kódů byl také v prostředí programu Siemens NX CAM 12.0.2.9 v určitých bodech analyzován úhel opásání nástroje při navrženém adaptivním soustružení. Získané hodnoty ukazují, že při adaptivním obrábění zůstává úhel opásání konstantní



Obr. 31: Úhel opásání nástroje

8. Závěr

Rovnoměrně rozložené opotřebení obráběcího nástroje přispívá k vyšší ekonomičnosti výroby. Při konvenčních soustružnických strategiích je však nástroj nerovnoměrně namáhán a opotřebován. Jedním z řešení této komplikace je použití strategie adaptivního soustružení. Při něm jsou dráhy nástroje vytvářeny tak, aby byl úhel opásání nástroje konstantní, a zatížení a opotřebení byly rovnoměrné. Takovéto dráhy nástroje je však nutné vytvářet v CAM programech, z nichž však jen některé obsahují funkci pro adaptivní soustružení. Bylo by tedy přínosné vytvořit postup, který by umožňoval návrh drah pro adaptivní soustružení i v programech, které příslušnou funkci neobsahují. To bylo cílem této bakalářské práce.

Metoda návrhu drah byla vytvořena v programu Siemens NX CAM 12.0.2.9 a je založena na funkci adaptivního frézování, která je v CAM programech více rozšířená. Pokud je toto frézování realizováno pouze v jedné vrstvě materiálu, leží dráhy nástroje, podobně jako při soustružení, pouze v jedné rovině. Při použití vhodného souřadného systému a převodu profilu rotačního obrobku na rovinné těleso je tak možné použít vytvořené dráhy i pro adaptivní soustružení.

Dalším cílem práce bylo porovnání adaptivního soustružení, vytvořeného navrženou metodou, s jinými strategiemi. Pro toto porovnání byly vytvořeny NC kódy pro obrobení testovacího dílce příslušnými strategiemi. Kódy byly následně použity při experimentu, kdy byl vyroben dílec v několika provedeních. Metody byly mezi sebou porovnávány na základě výrobního času a charakteru tepelného ovlivnění nástroje. Tepelné ovlivnění bylo zvoleno proto, že pro kontrolu opotřebení by bylo nutné vyrobit vysoké množství dílců, což nebylo z časových důvodů možné.

Na první pohled porovnání ukázalo, že, co se výrobního času týče, navržená metoda zaostává za konvenční podélnou metodou i profesionálně vytvořeným adaptivním soustružením. Je však třeba vzít v potaz další parametry, jako je např. délka dráhy nástroje, nebo hloubka řezu. Ta byla u adaptivního soustružení ze Siemensu NX CAM 12.0.2.9 využita méně, než u konvenční metody, což ve výsledku vedlo k vyššímu výrobnímu času. Na druhou stranu tak bylo sníženo namáhání působící na nástroj a je možné se tedy domnívat, že při dalším vylepšování metody by bylo možné dosáhnout lepších výsledků. Ve prospěch adaptivního soustružení dále hovoří lepší využití dráhy nástroje, při které není nutné realizovat tak vysoké množství přejezdů. Je také nutné poznamenat, že toto porovnání bylo realizováno při stejných rezných podmínkách. Při adaptivním soustružení zůstává úhel opásání nástroje konstantní, což přispívá k rovnoměrnému silovému zatížení v průběhu obráběcího procesu. Naopak při konvenčním soustružení dochází vlivem proměnného úhlu opásání k silovým rázům a nekonstantnímu zatížení nástroje. Na základě těchto odlišností lze soudit, že adaptivní soustružení by bylo možné, na rozdíl od konvenčního soustružení, realizovat i při zvýšených rezných podmínkách, což by vedlo ke zvýšení produktivity a ekonomičnosti této metody.

Z pohledu tepelného ovlivnění nástroje porovnání metod dopadlo ve prospěch obou adaptivních metod, které prokázaly výrazně lepší rozložení tepla na větší ploše nástroje. Zatížení bylo tak na nástroji rozloženo rovnoměrněji a byla využita větší část řezné hrany nástroje. Nástroj je tak hospodárněji využit a není třeba jej tak často měnit.

Tento experiment přinesl cenné zkušenosti a vhled do problematiky adaptivního obrábění. Nová metoda návrhu skýtá potenciál pro další zdokonalení a je možné, že by její výsledky mohly být srovnatelné s výsledky naprogramované funkce adaptivního soustružení ze Siemensu NX CAM 2015. Mohu konstatovat, že stanovené cíle práce byly splněny.

Závěrem je třeba říci, že problematika adaptivního soustružení je mnohonásobně obsáhlejší, než je rozsah této práce a nabízí se zde celá řada oblastí k dalšímu zkoumání a bádání. Bylo by např. možné zabývat se zvyšováním řezných podmínek u adaptivních strategií a tím zvýšit jejich produktivitu oproti konvenčnímu soustružení.

Seznam použité literatury

1. DOMÁCÍ SOUSTRUŽENÍ. *Historie soustružení* [online] [cit. 2022-01-10]. Dostupné z: <http://www.domaci-soustruzeni.cz/historie-soustruzeni.html>
2. BRYCHTA, Josef, CEP, Robert, NOVÁKOVÁ, Jana, PETŘKOVSKÁ, Lenka. *Technologie II - 2. díl*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008. ISBN 978-80-248-1822-1.
3. VASILKO, Karol. *Analytická teória tryskového obrábania*. Prešov: Technická univerzita v Košiciach, 2012. ISBN 978-80-8073-759-7
4. MÁDL, Jan, VRABEC, Martin, KAFKA, Jindřich, DVOŘÁK, Rudolf. *Technologie obrábění - 1. díl*. Praha: ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03752-2
5. BRYCHTA, Josef, CEP, Robert, NOVÁKOVÁ, Jana, PETŘKOVSKÁ, Lenka. *Technologie II - 1. díl*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008. ISBN 978-80-248-1822-1.
6. MÁDL, Jan, KVASNIČKA, Ivo. *Optimalizace obráběcího procesu*. Praha: ČVUT, 1998. ISBN 80-01-001864-6
7. MÁDL, Jan. *Teorie obrábění*. Praha: ČVUT, 1990.
8. MÁDL, Jan, BARCAL, Jaroslav. *Základy Technologie II*. Praha: CVUT, 2008. ISBN 80-01-02610-8.
9. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM Publishing, 2008. ISBN 978-80-254-2250-2
10. LEINVEBER, Jiří, VÁVRA, Jan. *Strojnické tabulky*, Praha: ČVUT, 2017. ISBN 978-80-7361-111-8
11. SANDVIK COROMANT. *Soustružení vnějších ploch* [online] [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general-turning/pages/external-turning.aspx>
12. SANDVIK COROMANT. *Upichování* [online] [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/parting-grooving/pages/parting-off.aspx>
13. CERAZIT. *High Dynamic Turning a FreeTurn* [online] [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: https://cuttingtools.cerazit.com/cz/cs/nastroje/soustru_eni/p_iru_ka/hdt-programovani.html
14. AUTODESK. *Turning* [online] [cit. 2022-01-10]. Dostupné z: <https://knowledge.autodesk.com/search-result/caas/CloudHelp/cloudhelp/ENU/Fusion-CAM/files/GUIDBA872366-97D5-4607-8A76-D8F0A5FA28B5-htm.html>

15. SANDVIK COROMANT. *The modern approach to turning with round inserts* [online] [cit. 2022-01-31]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/industry-solutions/medical/advances-in-medicine/pages/default.aspx>
16. 1CPRO. *Adaptivní obrábění* [online] [cit. 2022-01-10]. Dostupné z: https://www.1cpro.cz/inventor_hsm_adaptivni_obrabeni.php
17. AUTODESK. *Turning Adaptive Roughing Dialog* [online] [cit. 2022-01-10]. Dostupné z: <https://knowledge.autodesk.com/search-result/caas/CloudHelp/cloudhelp/ENU/Fusion-CAM/files/reference/turn/Fusion-CAM-reference-turn-turn-adaptive-html-html.html>
18. AUTODESK. *What is CAM* [online] [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/computer-aided-manufacturing-beginners/>
19. AUTODESK. *Fusion 360-Adaptive Turning* [online] [cit. 2022-01-10]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=5RvbP1b4M1U&ab_channel=RajeshKanna
20. SPRUTCAM. *Adaptive roughing (turning)* [online] [cit. 2022-01-10]. Dostupné z: <https://kb.sprutcam.com/SC15manual/en/creating-machining-technology/lathe-machining/lathe-cycles/adaptive-roughing-turning>
21. GIBBSCAM. *GibbsCAM – Voluturn, „dynamic roughing“* [online] [cit. 2022-01-10]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=2Geh0gurPGc&ab_channel=FructusDataAB
22. ESPRIT. *Esprit Tips & Tricks: ProfitTurning* [online] [cit. 2022-01-10]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=1Rp-E7HQsSo&ab_channel=ESPRITCAM
23. ESPRIT. *High-speed turning* [online] [cit. 2022-01-10]. Dostupné z: <https://www.espritcam.com/cs-cz/product/high-speed-turning>
24. MASTERCAM. *Dynamic Roughing Operation for CNC lathe in Mastercam (Dynamic Rough-lathe Programmer)* [online] [cit. 2022-01-10]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=ljxM4LMeKGG&ab_channel=VirenderSinghBhati
25. MODULEWORKS. *ModuleWorks* [online] [cit. 2022-01-12]. Dostupné z: <https://www.moduleworks.com/>
26. AUTODESK. *HSMworks* [online] [cit. 2022-01-16]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/products/hsmworks/overview>
27. IBARAKI, Soichi, YAMAJI, Iwao, MATSUBARA, Atsushi. *On the removal of critical cutting regions by trochoidal grooving* [online] [cit. 2022-01-16]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141635910000103#fig2>

28. DENG, Qi. *A new approach to generating trochoidal toolpaths* [online] [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/321476295_A_new_approach_to_generating_trochoidal_tool_paths_for_effective_corner_machining
29. CNCTIMES. *Taking the plunge in turning* [online] [cit. 2022-01-27]. Dostupné z: <https://www.cnctimes.com/editorial/taking-the-plunge-in-turning>
30. KOVOSVIT. *KL 435* [online] [cit. 2022-06-23]. Dostupné z: <https://www.kovosvit.cz/kl-435/>
31. SIEMENS. *Proven performance in the premium class of CNC controls* [online] [cit. 2022-06-23]. Dostupné z: <https://new.siemens.com/global/en/products/automation/sinumerik/automation-systems/sinumerik-840.html>
32. DORMER PRAMET. *GL6-D600MMO-MM:G8330* [online] [cit. 2022-06-23]. Dostupné z: <https://dormerpramet.com/cz/en/p/8023036>
33. DORMER PRAMET. *GL6-S2525PFL-32-100* [online] [cit. 2022-06-23]. Dostupné z: <https://dormerpramet.com/cz/en/p/7983504>

Seznam obrázků

Obr. 1: Klasifikace tvarů třísek [5]	11
Obr. 2: Rozklad celkové řezné síly při soustružení [3].....	13
Obr. 3: Vnější soustružnické nože [2]	15
Obr. 4: Části, plochy a ostří na řezné části soustružnického nože [5]	16
Obr. 5: Nástrojová souřadnicová soustava soustružnického nože [8]	16
Obr. 6: Nástrojová geometrie břitu soustružnického nože [8].....	17
Obr. 7: Vlevo-tabulka nastavení nástroje-Vpravo-vizualizace dráhy nástroje v programu Autodesk Fusion360 [17], [19].....	21
Obr. 8: Vizualizace trochoidální dráhy se zvýrazněnou vzdáleností křivek v programu SprutCAM [20].....	22
Obr. 9: Tabulka volby nástroje a obrobek s adaptivními drahami v programu GibbsCAM [21]	22
Obr. 10: Ilustrace adaptivní dráhy s vyznačením různých složek [23].....	23
Obr. 11: Tabulka parametrů operace v programu MasterCAM [24].....	23
Obr. 12: Úhel opásání α_{en} [27].....	25
Obr. 13: Náčrt modelu v prostředí Siemens NX.....	27
Obr. 14: Siemens NX - tabulka volby nástroje.....	28
Obr. 15: Siemens NX 12.....	28
Obr. 16: Siemens NX 2015.....	29
Obr. 17: CNC soustruh KL 435Y [30]	31
Obr. 18: Nákresy VBD a držáku [32], [33]	31

Obr. 19: Obrázek testovacího dílce.....	32
Obr. 20: Skutečný model obrobku.....	33
Obr. 21: Model pro adaptivní frézování	33
Obr. 22: První verze drah.....	34
Obr. 23: Druhá verze drah	34
Obr. 24: Finální návrh drah pro adaptivní soustružení	35
Obr. 25: Adaptivní soustružení v nové verzi NX	36
Obr. 26: Prostředí programu Post Builder	37
Obr. 27: Hlavičky finálního kódu	37
Obr. 28: VBD pro adaptivní soustružení ze Siemensu NX CAM 12.0.2.9	40
Obr. 29: VBD pro konvenční soustružení	41
Obr. 30: VBD pro adaptivní soustružení ze Siemensu NX CAM 2015	41
Obr. 31: Úhel opásání nástroje	42

Seznam tabulek

Tabulka 1: Parametry soustruhu KL 435Y [30]	30
Tabulka 2: Parametry břitové destičky a držáku [32], [33]	31
Tabulka 3: Řezné podmínky	38
Tabulka 4: Výsledky experimentu	39

Seznam použitého softwaru

- Siemens NX 12.0.2.9
- Siemens NX 2015
- Autodesk Inventor 2019

Seznam příloh

[A] Výkres testovacího dílce
 [B] NC kódy
 [C] Fotografie nástroje

Tištěná
 Elektronická
 Elektronická