



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

# VYUŽITÍ ŘÍDICÍHO SYSTÉMU SINUMERIK ONE PŘI OBRÁBĚNÍ NA SVL EDU

USE OF THE SINUMERIK ONE CONTROL SYSTEM DURING MACHINING ON SVL EDU

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Svoboda

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

BRNO 2024

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky  
Student: **Ondřej Svoboda**  
Studijní program: Základy strojního inženýrství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Aleš Polzer, Ph.D.**  
Akademický rok: 2023/24

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

## Využití řídicího systému Sinumerik ONE při obrábění na SVL EDU

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V dnešních strojírenských podnicích se velmi úspěšně prosazuje příprava programů pro CNC stroje prostřednictvím externích softwarů. Tato závěrečná práce je proto zaměřena na návrh vlastní součástky, zpracování nezbytné výrobní dokumentace a naprogramování její výroby v softwaru SinuTrain. Kontrola vyrobitelnosti součásti je především formou grafické simulace.

### Cíle bakalářské práce:

Systémový rozbor řešené problematiky.  
Návrh testovacího obrobku včetně vytvoření technické dokumentace.  
Návrh měření a hodnocení obrobených povrchů.  
Zdůvodnění zvoleného způsobu řešení a posouzení dosažených výsledků.  
Vlastní závěry a doporučení pro praxi.

### Seznam doporučené literatury:

PETR, Karel. Geometrické tolerance dle ISO GPS. Praha: Verlag Dashöfer, 2019. ISBN 978-80-7635-019-9.

MAREK, Tomáš a Jiří MAREK. RENISHAW, S. R. O. Mít sondu nestačí. Brno: Renishaw, 2017, 121 s. ISBN 978-80-87017-20-3.

GUPTA, Kapil, ed. Advanced manufacturing technologies: Modern Machining, Advanced Joining, Sustainable Manufacturing. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 978-3-319-56098-4.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D., FEng.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Práce předkládá využití řídicího systému Sinumerik ONE při obrábění na obráběcím centru SLV EDU. Zahrnuje systémový rozbor řešené problematiky, návrh testovacího obrobku včetně vytvoření kompletní technické dokumentace, a návrh metod měření a hodnocení kvality obrobených povrchů. Materiálem obrobku je hliníková slitina EN-AW 2007. K obrábění byly použity nástroje z rychlořezné oceli. NC program byl zpracován v systému Sinumerik ONE.

## **ABSTRACT**

The thesis presents the use of the Sinumerik ONE control system in machining on the SLV EDU machining centre. It includes a systematic analysis of the problem, design of a test workpiece, including the creation of complete technical documentation, and proposition for measuring and evaluation of the quality of machined surfaces. The workpiece material is aluminium alloy EN-AW 2007. High speed steel tools were used for machining. The NC program was created in the Sinumerik ONE system.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Sinumerik ONE, SLV EDU, testovací obrobek, Run MyVirtual Machine, obrábění

## **KEYWORDS**

Sinumerik ONE, SLV EDU, test workpiece, Run MyVirtual Machine, machining

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

SVOBODA, Ondřej. *Využití řídicího systému Sinumerik ONE při obrábění na SVL EDU* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/156769>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Aleš Polzer.

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji panu Ing. Aleši Polzerovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Dále děkuji rodině přítelkyni a přátelům za podporu v průběhu celého studia.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Využití řídicího systému Sinumerik ONE při obrábění na SVL EDU vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

V Brně dne 23. 5. 2024

.....

Svoboda Ondřej

# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD.....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>SYSTEMATICKÝ ROZBOR ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY .....</b>	<b>10</b>
2.1	CNC obráběcí centrum SLV EDU 5 axis .....	10
2.2	Vybrané materiály odpovídající parametrům stroje.....	11
2.3	Vybrané nástrojové materiály vhodné k obrábění na SLV EDU .....	13
2.4	Řezný výkon a moment při frézování .....	15
2.5	Programování v řídicím systému Sinumerik ONE.....	17
2.6	Vybrané funkce při programování na SLV EDU.....	22
2.7	Tvorba programu pomocí CAD/CAM technologie .....	24
2.8	Software Run MyVirtual Machine.....	25
<b>3</b>	<b>NÁVRH TESTOVACÍHO OBROBKU .....</b>	<b>26</b>
3.1	Volba materiálu .....	26
3.2	Návrh modelu.....	27
<b>4</b>	<b>TVORBA NC PROGRAMU .....</b>	<b>29</b>
4.1	Použité nástroje a řezné podmínky .....	30
4.2	Tvorba NC programu .....	31
<b>5</b>	<b>NÁVRH MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ OBROBENÝCH POVRCHŮ .....</b>	<b>33</b>
5.1	Měření na třísořadnicovém stroji Eclipse 1000 .....	33
5.2	Vyhodnocení vybraných prvků.....	34
<b>6</b>	<b>ZÁVĚRY .....</b>	<b>36</b>
<b>7</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>37</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>41</b>



# 1 ÚVOD

Pokroky v technologii CNC (*Computer Numerical Control*) obrábění způsobily v posledních letech revoluci ve výrobním průmyslu a umožnily přesnou a efektivní výrobu složitých dílů napříč různými odvětvími. Vzhledem k tomu, že průmyslová odvětví stále více využívají automatizaci a digitalizaci, stávají se dovednosti v oblasti programování CNC pro inženýry a techniky zapojené do moderních výrobních procesů stále nepostradatelnější. Jednou z takových špičkových CNC platforem, která si získala značnou pozornost, je Sinumerik ONE vyvinutý společností Siemens, který slibuje vyšší výkon, flexibilitu a snadné použití při CNC obrábění.

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou programování CNC strojů se zaměřením na aplikaci systému Sinumerik ONE na stroji SLV EDU. V kontextu této práce přesahuje hlavní cíl teoretické zkoumání. Cílem je navrhnout testovací obrobek. Od programování až po výrobu a měření.

To znamená se nejprve seznámit s uživatelským rozhraním, programovacím prostředím a simulačními funkcemi softwaru a vytvořit tak pevné základy pro následné experimentování. Na tyto základy následně navázat znalostmi základních principů programování. Ručním programováním v ISO kódu pomocí G a M funkcí, definováním nástrojů a řezných podmínek, nastavováním obrobku a ovládáním simulace. Posléze postupně přejít k pokročilejším funkcím softwaru a technik programování zahrnujícím například adaptivní řízení, integraci kódu exportovaného z CAD/CAM technologií a jeho optimalizaci.

Všechny takto získané teoretické znalosti poté prakticky využít. Nejprve při návrhu testovacího kusu, schopného posoudit a vyhodnotit parametry a přesnosti obráběcích center. Znovu je využít při tvorbě programu navrhnutého dílce a ten ověřit vyrobením přímo na obráběcím centru SLV EDU. Nakonec pomocí měřících přístrojů a technik k posouzení přesnosti, kvality povrchu, rozměrových tolerancí a celkové kvality vyrobeného zkušební kusu posoudit a vyhodnotit daný stroj. Vše zakončit kritickým zhodnocením stroje a softwaru jako vzdělávacího nástroje pro školení CNC programování, včetně použitelnosti, účinnosti při předávání praktických dovedností a potenciálních oblastí.

Prostřednictvím tohoto přístupu zahrnujícího teoretické poznatky a praktické aplikace si tato práce klade za cíl spojit teorii CNC programování s reálnou výrobní praxí. Prostřednictvím návrhu, výroby a vyhodnocení zkušební kusu s využitím softwaru Sinumerik ONE na SLV EDU je snaha poskytnout komplexní porozumění technologii CNC obrábění a zároveň vybavit jednotlivce znalostmi a dovednostmi potřebnými k tomu, aby vynikl v dnešním dynamickém výrobním prostředí.

## 2 SYSTEMATICKÝ ROZBOR ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

První kapitola se zabývá teoretickým úvodem do řešené problematiky. V několika podkapitolách jsou shrnuty parametry a možnosti obráběcího centra, vhodné materiály, nástroje a výkon a kroutící moment při obrábění. V další části je popsán samotný software, a jeho možnosti tvorby NC programů, včetně vybraných funkcí důležitých s ohledem na parametry stroje.

### 2.1 CNC obráběcí centrum SLV EDU 5 axis

Jedná se o pětiosé, souvisle řízené obráběcí centrum, vyvinuté firmami Siemens a SolidVision (obr. 1). Disponuje automatickou výměnou nástroje se zásobníkem na 9 nástrojů. Na pracovní stůl o průměru 200 mm lze upínat obrobky o velikost až  $200 \times 200 \times 160$  mm a hmotnosti 10 kg pomocí T-drážek. Vřeteno dosahuje až  $24\,000 \text{ min}^{-1}$ , při nichž má výkon 1,5 kW a kroutící moment 0,6 Nm. Upínací rozhraní je kompatibilní s upínacími kuželi ISO20/BT20. Součástí vybavení stroje je obrobková a nástrojová sonda, v ceně je zahrnuta i nejnovější verze operačního systému Sinumerik ONE, stejně jako plně funkční digitální dvojče v softwaru Run MyVirtual Machine. Podrobnější specifikace jsou uvedeny v příloze 1.[1]

Stroj kvůli nízkému výkonu a horší tuhosti není určen pro velkosériovou výrobu. Uplatní se zejména jako výukové a zaškolovací pracoviště, nebo pro modelářské použití. Obsluha má možnost vyzkoušet si všechny funkce plnohodnotného pětiosého CNC obráběcího centra při nižších pořizovacích nákladech. Právě proto je doporučeno na stroji obrábět snadno obrobitelné materiály, s třídou obrobitelnosti vyšší než 12d, jako například hliníkové slitiny, barevné kovy nebo technické plasty. [1]



Obr. 1) Obráběcí centrum SLV EDU [1]

## 2.2 Vybrané materiály odpovídající parametrům stroje

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, na zvoleném obráběcím centru není vhodné obrábět oceli a železné slitiny. To ale neznamená, že stroj by v praxi nenašel uplatnění. Stále zbývá četný počet různých materiálů a slitin vhodných k obrábění. Tato kapitola se bude zabývat vybranými materiály vhodnými pro použití právě na CNC obráběcím centru SLV EDU.

### Hliník a jeho slitiny

V dnešní době je hliník (obr. 2), jako druhý nejpoužívanější kov, používán pro široké spektrum produktů a aplikací. Od nápojových plechovek a alobalových fólií až po komponenty v autech a letadlech. Za takto objemné zastoupení vděčí zejména svým vlastnostem. Mezi ty nejdůležitější patří:

- **Hustota:** Velmi málo kovů má menší hustotu než hliník. Železo a měď mají přibližně třikrát větší hustotu než hliník a titan je hustější o více než šedesát procent.
- **Poměr pevnosti a hmotnosti:** Díky kombinaci nízké hustoty a relativně vysoké pevnosti je tento poměr překonán u některých slitin pouze vysoce legovanými oceli a slitinami titanu.
- **Korozivzdornost:** Hliník odolává atmosférické korozi a většinou není vyžadována žádná povrchová úprava. Je také odolný vůči různým chemikáliím.
- **Elektrická a tepelná vodivost:** Vztaženo na váhu, nevede žádný další kov elektrinu a teplo lépe, vyjma sodíku. Vzhledem k objemu je hliník předčen pouze mědí a stříbrem.
- **Zpracovatelnost:** Hliník a jeho slitiny lze zpracovávat širokou škálou technologií.

Hliníkové slitiny jsou snadno obrobitelné a nabízí výhody jako je skoro neomezená řezná rychlost, dobrá kontrola rozměrů, nízká řezná síla a dlouhá životnost nástrojů. Slitiny s vhodnou třídou obrobitelnosti není třeba chladit. Pro obrábění lze použít nástroje z rychlořezné oceli, tvrdokovu nebo polykrystalického diamantu. Za správných řezných podmínek je odběr třísky velký. Při velkých řezných rychlostech je většina tepla odvedena v tříse a zbytkové teplo odvedeno chlazením. [2][3]

### Měď a její slitiny

V současnosti je většina mědi (obr. 2) spotřebována na elektrické aplikace a na součásti pro vedení tepla. Z měděných slitin jsou vyráběny například kluzná ložisková pouzdra, potrubí, armatury a další. Vlastnosti stojící za častým použitím mědi a jejích slitin, jsou zejména:

- **Elektrická a tepelná vodivost.** Čistá měď je překonána v teplené a elektrické vodivosti jediným kovem, stříbrem. To je ale několikanásobně dražší a zároveň rozdíl mezi vodivostmi je ve většině případů zanedbatelný. [4]
- **Poměr pevnosti a tažnosti.**
- **Zpracovatelnost.** Měď lze dobře zpracovat širokou škálou technologií. Má dobrou tažnost, je dobře obrobitelná a svařitelná.
- **Korozivzdornost.** Při vystavení koroznímu prostředí je mědi a jejími slitinami vytvořen stabilní ochranný povlak. Takový povlak brání dalšímu šíření koroze.

Měď a všechny její slitiny je možno obrábět pomocí standardních nástrojů a obráběcích operací. Rychlořezné oceli vystačí pro všechny slitiny, vyjma těch nejtvrdějších. U slitin s obsahem olova

Lze obrábět bez chlazení. Při obrábění vytváří měď a slitiny mědi tři druhy třísky, podle obrobitelnosti.

**I. Druh** – vzniká při obrábění olověných bronzů, mosazí a slitin mědi. Tříška je krátká lámaná a lze ji snadno odstranit z místa řezu. Slitiny tvořící tuto třísku mají výbornou obrobitelnost. Je dosahováno řezné rychlosti až  $150 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ . Největší rychlost je možno dosáhnout pomocí nástrojů ze slinutých karbidů. Při vysokorychlostním obrábění je nutno použít chlazení, ale při normálních řezných podmínkách ho lze zanedbat.

**II. Druh** – je tvořen obráběním hliníkových a niklo-hliníkových bronzů, manganových bronzů a slitin s obsahem beryllia. Tříška je krátká a zakroucená. Materiály tvořící tuto třísku jsou dobře obrobitelné, ale nelze dosáhnout takových řezných podmínek jako u předchozího druhu.

**III. Druh** – je formován při obrábění neolověných mosazí a bronzů, křemičitých bronzů a slitin s vysokým obsahem mědi. Tříška je tvarována do dlouhých spirál. Slitiny mají tendenci se lepit, proto je dosahováno rychlostí kolem  $15$  až  $45 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ . [2][5][6]

### Technické plasty

Hlavní výhodou plastů (obr. 2) je jejich vynikající slévatelnost. Vystává otázka, proč plasty obrábět? Náklady na výrobu formy jsou znatelně vysoké, proto u výrobků, které je třeba vyrobit z plastu, a jejich série není velká, je ekonomicky výhodnější zvolit obrábění. Při obrábění plastů je třeba klást zvýšený důraz na některé jejich vlastnosti.

Celková obrobitelnost plastů je ve většině případů velmi dobrá. Je vhodné vybírat materiály s dobrým poměrem tepelné a chemické odolnosti a stálosti rozměrů. Pokud zvolený plast dobře pohlcuje vlhkost, je třeba jej před obráběním dostatečně vysušit, k zabránění zkroucení. Pro zajištění stabilního procesu obrábění je nutno sledovat vlhkost, UV záření a teplotu. Pro běžné plasty lze použít nástroje z rychlořezné oceli, pro vyztužené materiály jsou vhodnější nástroje ze slinutých karbidů. Je doporučeno volit obráběcí strategie generující co nejmenší množství tepla, například trochoidní obrábění. [7][8][9]



Obr. 2) Příklady polotovarů z jednotlivých materiálů [32][33][34]

## 2.3 Vybrané nástrojové materiály vhodné k obrábění na SLV EDU

Snadno obrobitelné materiály, jako ty uvedené v předchozí kapitole, vyžadují specifický přístup k výběru rezných nástrojů pro dosažení optimálních výsledků výroby. Tato kapitola představuje a shrnuje běžně používané nástrojové materiály, například rychlořezné oceli, slinuté karbidy a polykrystalický diamant, a jejich vlastnosti.

### Nástroje z rychlořezné oceli

Nástroje z rychlořezné oceli, někdy také označované HSS (*High speed steel*), se vyznačují středním až vysokým obsahem legujících prvků. Použitím prvků jako wolfram, molybden, vanad nebo chrom je zvýšena tvrdost, pevnost, prokalitelnost a otěruvzdornost. Při vyšších teplotách (okolo 650 °C) svoji pevnost ztrácí, proto je doporučeno používat chlazení, k prodloužení jejich životnosti a trvanlivosti. Rychlořezné oceli jsou primárně používány na výrobu komplexních, lehkých a houževnatých nástrojů. Výhodou je také možnost nástroj po opotřebení nabrousit a znovu uvést do provozu. Díky své relativně nízké ceně oproti ostatním nástrojovým materiálům a jednoduché výrobě jsou hojně využívány i dnes pro výrobu různých druhů nástrojů (obr.3). [10][11][12]



Obr. 3 ) Nástroje z rychlořezné oceli [35]

### Nástroje ze slinutých karbidů

Tyto nástroje jsou vyráběny práškovou metalurgií. Základní složkou pro výrobu všech slinutých karbidů je karbid wolframu (WC) a jako pojivo je využíván kobalt (Co). Směs práškového karbidu wolframu a kobaltu je nejprve zformována a poté za vysokých teplot a tlaků slinována do hrubého tvaru nástroje nebo destičky. Hrubý tvar je následně broušen a případně povlakován. Právě díky vysokému obsahu karbidu wolframu vynikají nástroje vysokou tvrdostí, otěruvzdorností a dobrou pevností. Oproti rychlořezným ocelím jsou vlastnosti zachovány i při vyšších teplotách. [10][11][13]

Nástroje ze slinutých karbidů (obr. 4) se dělí na šest základních skupin, přičemž každá má své použití a vlastnosti.

- **P** – nástroje s tímto označením jsou určeny primárně k obrábění materiálů tvořících dlouhou třísku, jako uhlíkové, slitinové a feritické korozivzdorné oceli. Čelo nástroje je vystavováno vysokým silám a značnému opotřebení. Přísada TiC zabraňuje tvorbě výmolu na čele.
- **M** – slouží zejména k obrábění materiálů tvořících střední až dlouhou třísku, například lité oceli, austenitické nebo austenitickoferitické korozivzdorné oceli a tvárné litiny. Díky relativně vysoké houževnatosti se používá při těžkých hrubovacích operacích a přerušovaných řezech.
- **K** – je určena k obrábění materiálu s krátkou drobivou třískou, zejména litin. Řezné síly obvykle nejsou vysoké a převládá opotřebení abrazí a adhezí. Nástroje s tímto označením nejsou vhodné pro materiály tvořící dlouhou třísku, kvůli tepelnému zatížení čela nástroje.
- **N** – používá se pro obrábění neželezných kovů, zejména slitin hliníku a slitin mědi, ale i pro nekovové materiály – plasty, dřevo. Při obrábění plastických materiálů je zapotřebí malý poloměr zaoblení ostří, k zabránění navařování materiálu na čelo nástroje.
- **S** – je vhodná k obrábění žáruvzdorných a žárupevných slitin na bázi železa, kobaltu a niklu, titanu a titanových superslitin. Díky nízké tepelné vodivosti obráběných slitin, je teplo vznikající při obrábění akumulováno na čele nástroje. Proto je nutné co nejvíce snížit teplo vznikající při obrábění. Toho je dosaženo kladným úhlem sklonu hlavního ostří a velkým úhlem čela. Nástroje mají zároveň vysokou pevnost ostří a odolnost vůči bočnímu opotřebení.
- **H** – je určena na obrábění tvrdých materiálů, jako kalené a vysoce tvrdé oceli nebo tvrzené a kalené litiny. Materiál nástroje je vysoce tvrdý, odolný vůči opotřebení a plastickým deformacím. [12][14][15]



Obr. 4) Nástroje ze slinutých karbidů [36]

## Nástroje s polykrystalickým diamantem

Polykrystalický diamant je obzvláště tvrdý řezný materiál, jehož tvrdost téměř dosahuje přírodního diamantu. Výroba probíhá slinováním za vysokých teplot a tlaků formou malých břitů, ukotvených na vyměnitelné břitové destičce ze slinutého karbidu (obr. 5). Ta zajišťuje odolnost proti tepelným a rázovým šokům. Trvanlivost břitů je mnohonásobně vyšší než u slinutých karbidů.

Jelikož nemá diamant vysokou teplotní stálost (při teplotách nad 800 °C se transformuje na grafit), nesmí být použit pro obrábění železných materiálů. Zde by při dosažení vyšších teplot docházelo k silné difuzi a velmi rychlému opotřebení nástroje, zejména na jeho čele. Proto je používán především pro obrábění neželezných materiálů, jako například hliníkových slitin, bronzů, kompozitů vyztužených různými druhy vláken nebo titanu a jeho slitin. [13]



Obr. 5) Nástroje z polykrystalického diamantu (PD) [37]

## 2.4 Řezný výkon a moment při frézování

Jelikož stroj nedisponuje vysokým výkonem vřetene nebo silným kroutícím momentem, je třeba klást větší důraz na řezné síly vzniklé při obrábění. Pokud by v jeho průběhu došlo, při zvolených řezných podmínkách, k překročení maximálního dovoleného momentu, mohlo by dojít k přetížení a zastavení stroje. To by mělo negativní vliv na produktivitu, kvalitu povrchu obráběné součásti a životnost nástroje a stroje.

Řezná síla působící na jeden zub je dána rovnicí [12]:

$$F_{ci} = k_{ci} \cdot A_{Di} = k_{ci} \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin(\varphi_i) \quad (1)$$

kde:

$F_{ci}$  [N] – řezná síla na jednom zubu,

$k_{ci}$  [MPa] – měrná řezná síla,

$A_{Di}$  [mm<sup>2</sup>] – jmenovitý průřez třísky,

$f_z$  [mm] – posuv na zub,

$a_p$  [mm] – axiální hloubka řezu (obr. 6),

$\varphi_i$  [°] – úhel posuvového pohybu (obr. 6).



Měrná řezná síla  $k_{ci}$  je zde vyjádřena pomocí vztahu [12]:

$$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_i^{(1-x)}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z \cdot \sin \kappa_r \cdot \sin \varphi_i)^{1-x}} \quad (2)$$

kde:

$C_{Fc}$  [-] – konstanta vyjadřující vliv materiálu,

$h_i$  [mm] – jmenovitá tloušťka třísky,

$x$  [-] – exponent vlivu tloušťky třísky,

$\kappa_r$  [°] – úhel hlavního ostří nástroje (je uvažován 90°).

Dosazením rovnice 2 do rovnice 1 vznikne vztah:

$$F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^{(x-1)} \kappa_r \cdot \sin^x \varphi_i \quad (3)$$

Následným součtem všech řezných sil působících v řezu vznikne vztah pro celkovou řeznou sílu při čelním frézování:

$$F_c = \sum_{i=1}^{n_z} F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^{(x-1)} \kappa_r \cdot \sum_{i=1}^{n_z} \sin^x \varphi_i \quad (4)$$

$$n_z = \frac{\psi}{360} \cdot z \quad (5)$$

kde:

$n_z$  [-] – počet zubů v záběru (po výpočtu je nutno zaokrouhlit na nejbližší vyšší celé číslo),

$\psi$  [°] – úhel záběru frézy (obr. 6),

$z$  [-] – počet zubů frézy.

Z celkové řezné síly je následně stanoven užitečný výkon a řezný moment: [13]

$$P_c = F_c \cdot \frac{v_c}{60} \quad (6)$$

$$M_c = \frac{P_c}{2 \cdot \pi \cdot n} \quad (7)$$

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D} \quad (8)$$

kde:

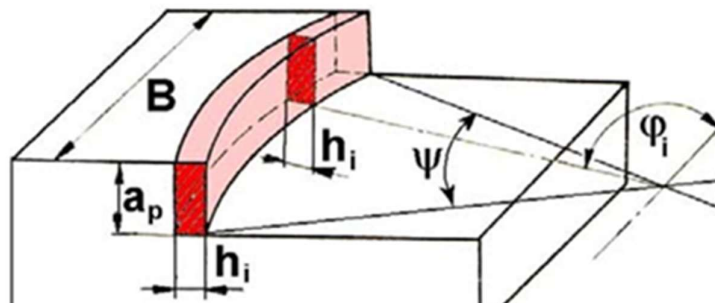
$M_c$  [Nm] – řezný moment,

$D$  [mm] – průměr nástroje,

$n$  [min<sup>-1</sup>] – otáčky vřetena,

$P_c$  [W] – užitečný výkon,

$v_c$  [m·min<sup>-1</sup>] – řezná rychlost.



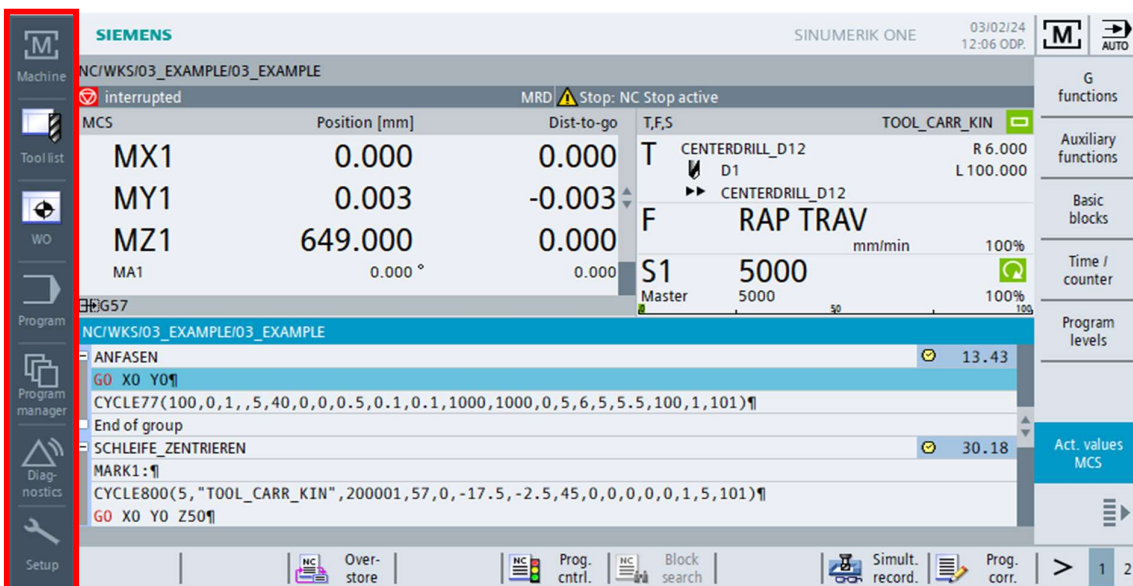
Obr. 6) Schéma čelního frézování [12]



## 2.5 Programování v řídicím systému Sinumerik ONE

Sinumerik ONE je programovací prostředí od firmy Siemens. Jedná se o přímého nástupce programů Sinumerik řady 800 vyvíjených od roku 1994. Proti svým předchůdcům plně využívá vícejádrových mikroprocesorů, kde je každé jádro využito na jinou operaci. Tím je dosaženo mnohem přesnějších kontur při zachování plynulosti chodu programu. Další výhodou je úplná zpětná kompatibilita se všemi předchozími verzemi programu Sinumerik (za podmínky dostupnosti všech funkcí ve starších verzích). [16][17]

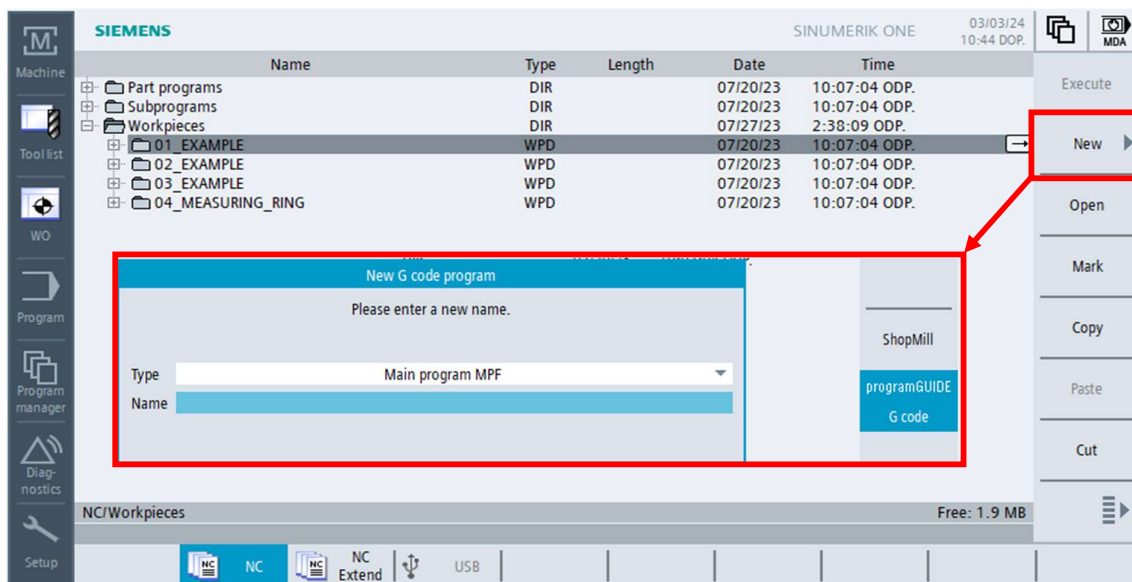
Po spuštění programu je otevřena základní obrazovka na kartě *Machine* (obr. 7). Na jejím levém okraji je umístěno navigační menu obsahující sedm karet. V kartě *Machine* lze vidět aktuálně zvolený nástroj, jeho pozici a korekce a aktivní posunutí nulového bodu. V závislosti na vybraném módu stroje se mění zobrazené funkce. V režimu JOG je dostupné měření nástroje a polotovaru nebo frézování čelní plochy. Mód MDA umožňuje jednoduché programování v ISO kódu, například pro odzkoušení. V režimu AUTO je spuštěn program a lze sledovat jednotlivé programované bloky.



Obr. 7) Program na kartě *Machine*

Karta *Toollist* umožňuje vytváření nových nástrojů pro simulace. Zároveň obsahuje tabulky s jejich korekcemi a opotřebením. V záložce *Working Offset* (WO) jsou v tabulkách uvedeny hodnoty posunutí jednotlivých programovatelných nulových bodů. Pod kartou *Diagnostics* se nachází seznam aktivních chybových hlášení a jejich historie. V záložce *Setup* jsou obsažena strojní a systémová data, lze zde změnit jazyk rozhraní nebo zadat heslo. Karta *Program* odkazuje na poslední spuštěný program. Pokud po zapnutí stroje nebyl žádný program otevřen, spustí se namísto toho záložka *Program manager* (obr. 8).

Zde lze volit a upravovat programy, přenášet je mezi úložišti, organizovat je do složek nebo vytvářet zcela nové. Při vytváření nových programů je možné volit mezi dvěma druhy. Programy v ISO kódu s podporou uživatelských cyklů, nebo programy s dílensky orientovaným programováním (ShopMill/ShopTurn).

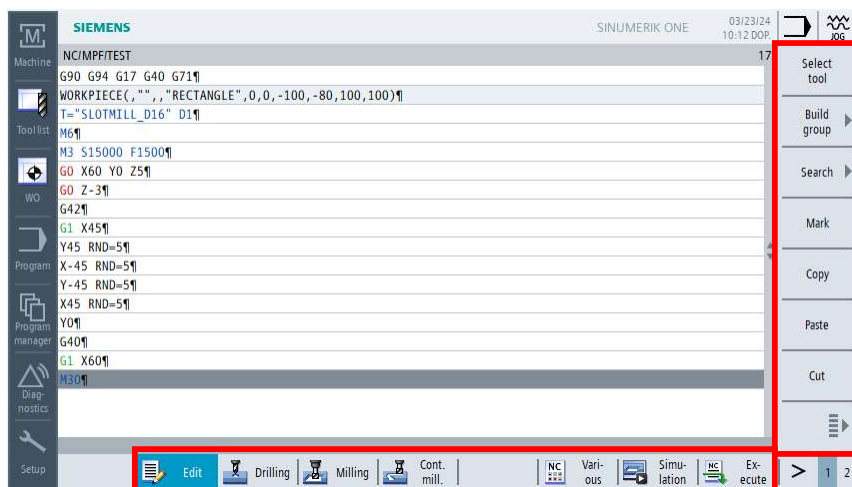


Obr. 8) Záložka Program manager

### Tvorba programu v ISO kódu s podporou cyklů

Programování v ISO kódu (G kódu) je jeden z nejstarších přístupů k programování CNC strojů. Program je složen z jednotlivých bloků. V blocích jsou obsažena data k provedení jednoho kroku obrábění. Bloky jsou zpravidla tvořené přípravnými G funkcemi a pomocnými M funkcemi. Seznam základních funkcí se nachází v příloze 2. Při programování v základním ISO kódu musí být programátor srozuměn s jednotlivými funkcemi a syntaxí. Z toho plyne, že náročnost programování je vyšší, a stejně tak i nároky kladené na programátora. Zároveň i čas potřebný na tvorbu programu je delší než u jiných přístupů k programování. I proto se od tohoto způsobu tvorby programu upouští. [18]

V systému Sinumerik ONE je základní ISO kód rozšířen o uživatelské cykly dodané výrobcem systému. Ty programátorovi zjednodušují tvorbu často využívaných základních prvků nebo programování běžných obráběcích operací. Po založení programu v prostředí ISO kódu je spuštěno rozhraní s textovým editorem a výběrem funkcí na dolní a pravé straně obrazovky (obr. 9).

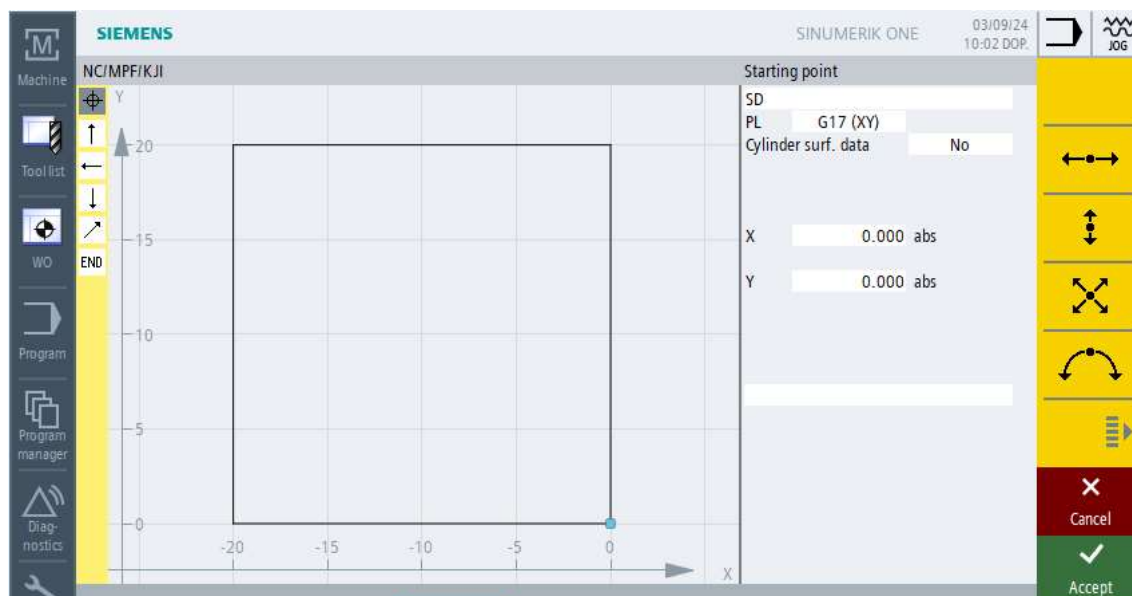


Obr. 9) Příklad programu v ISO kódu

Je obecně doporučováno začínat každý program úvodní hlavičkou. Ta se sice nepodílí na obrábění, ale může sloužit jako rychlý přehled programu. Většinou obsahuje rozměry polotovaru, jeho materiál, umístění nulového bodu, použité nástroje, nebo sled jednotlivých operací. Poté následuje samotné programování.

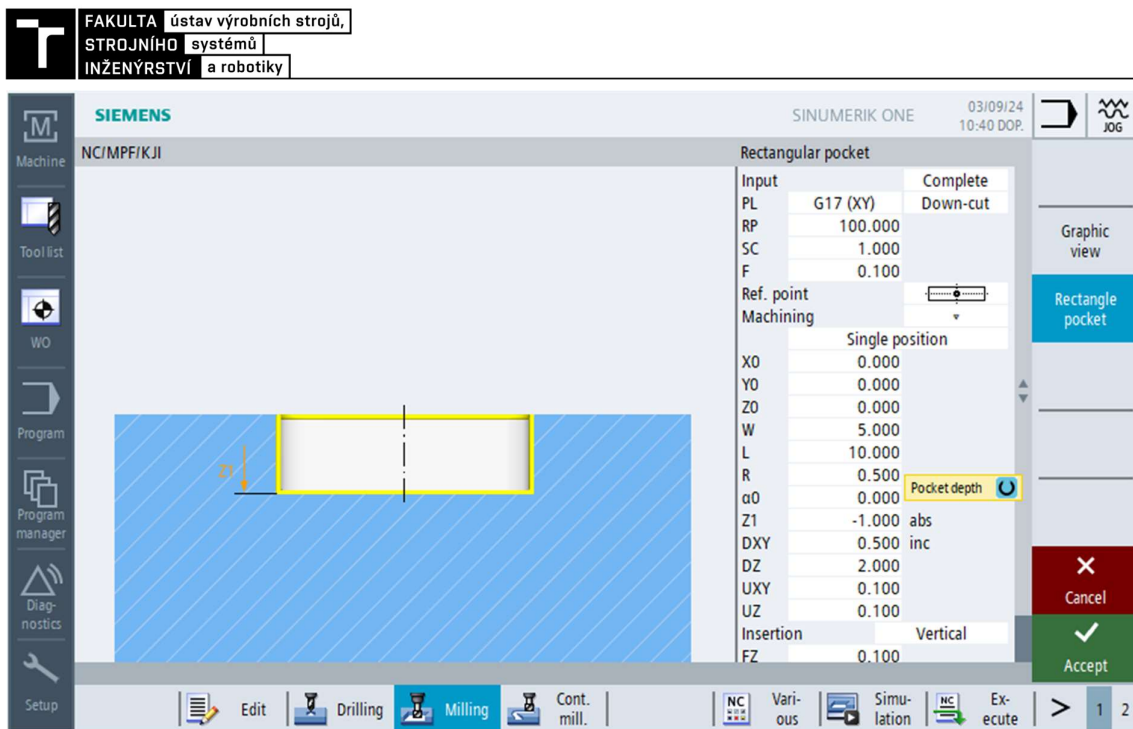
Začíná se G funkcemi pro volbu: posunutí nulového bodu, reference polohy, roviny obrábění a dalších. Poté je zvolen nástroj, zadány řezné podmínky a programovány jeho dráhy. Jak již bylo zmíněno, programování lze usnadnit využitím cyklů. Sinumerik ONE jich nabízí hned několik. Pod kartou *Drilling* se nachází cykly spojené s vrtáním, jmenovitě: středění, vrtání děr a vyvrtávání, ale i cykly pro řezání závitů závitníky nebo pozicovací cykly. Záložka *Milling* umožňuje použití cyklů na gravírování, frézování čelní plochy, kapsy, čepu či drážky, nebo řezání závitů závitovou frézou. V kartě *Contour milling* lze vytvářet v editoru nové kontury (obr. 10) a následně je obrábět. [19]

Položka *Various* umožňuje vytvoření polotovaru pro vizualizaci nebo natočení pracovní roviny u víceosých obráběcích center. Poslední záložkou je *Simulation*. Slouží k vizualizaci programu a odhalení hrubých chyb při programování. Podmínkou pro její fungování je definovaný polotovar z předchozí karty. Simulace ovšem není dokonalá, to že program úspěšně dokončil simulaci neznamená, že při spuštění programu na reálném stroji nedojde k chybě nebo kolizi. [20]



Obr. 10) Tvorba nové kontury v editoru

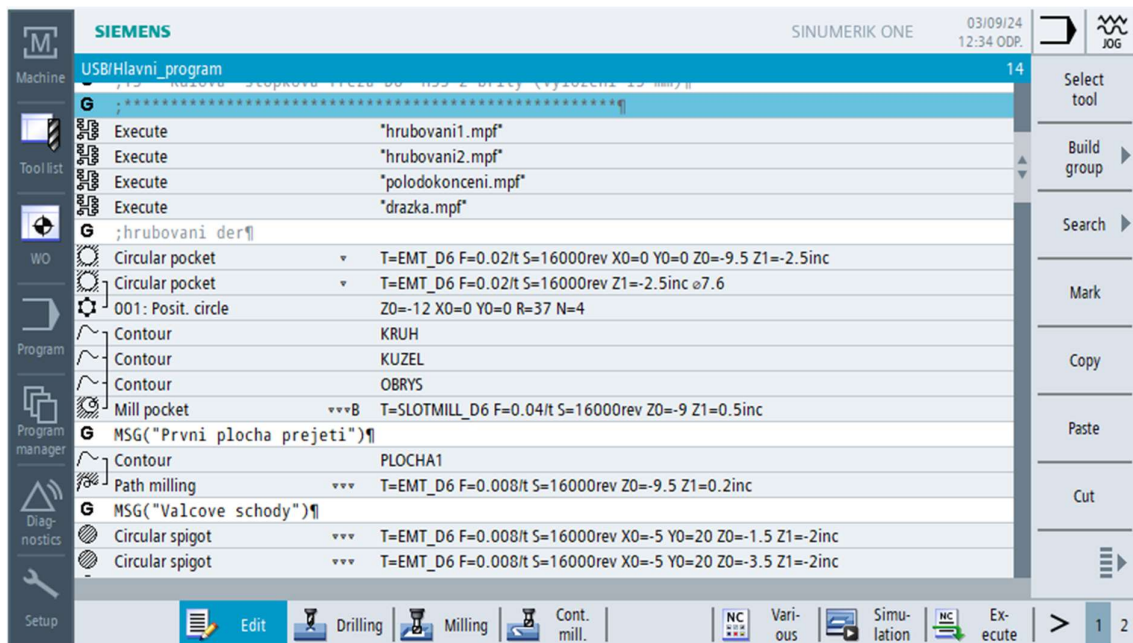
Všechny cykly jsou tvořeny zadáním potřebných parametrů do dialogového okna. Konkrétně na níže uvedeném příkladu frézování kruhové kapsy (obr. 11) jsou zadávány parametry polohy, rozměrů, posuvu, hloubky a šířky záběru a další. Prostředí dialogového okna pro zadávání je velmi intuitivní a nabízí více možností zadání jedné veličiny. Každý parametr je okomentován a zároveň podpořen grafickým znázorněním.



Obr. 11) Dialogové okno pro definici cyklů

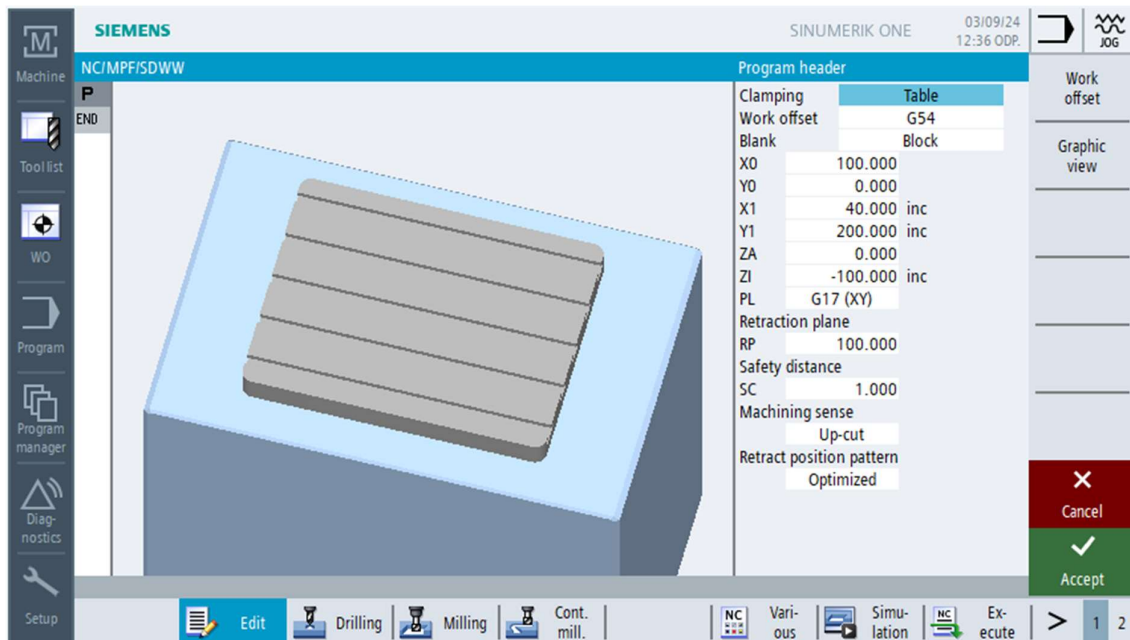
## Tvorba programu pomocí dílenského programování

Za vznikem dílenského přístupu k programování stojí zejména snaha o jeho zrychlení a zjednodušení. Tvorba programu probíhá postupným vyplňováním dialogových oken. Na programátora tak nejsou kladeny vysoké nároky v znalostech ISO kódu. Program je zároveň velmi přehledný. Každá operace je obvykle obsažena v jednom řádku. Mezi jednotlivými operacemi není třeba programovat příjezdy a odjezdy nástroje. Některé cykly je možné spojit do detailnější operace (obr. 12).












Obr. 12) Příklad programu tvořeného dílenským programováním

Při založení nového programu v prostředí *ShopMill* je jako první zobrazeno dialogové okno s hlavičkou programu (obr. 13). To obsahuje posunutí nulového bodu, rozměry polotovaru, rovinu obrábění, bezpečnou vzdálenost a rovinu návratu. Je zde také určen způsob obrábění, primárně používaný v celém programu (sousledné/nesousledné), a způsob návratu nástroje mezi jednotlivými operacemi.



Obr. 13) Dialogové okno při vytvoření programu v *SHOPMILL*

Následuje tvorba programu. Ta probíhá výběrem příslušné obráběcí operace a vyplněním dialogového okna. Výběr jednotlivých operací a potřebné doplňované parametry jsou shodné jako u programování v ISO kódu s podporou cyklů. Vyplněním dialogového okna tak vzniká jeden řádek programu. Některé na sebe mohou navazovat a v programu jsou poté označeny spojením (obr. 14). Takto spojené řádky pak označují jednu operaci. Například spojením několika kontur lze obrábět tvary se zbytkovým materiálem. První kontura vymezuje obrys obráběného tvaru a ostatní určují hranice, kde nástroj již nesmí obrábět. Celý program lze také prokládat ISO kódem. Ten může být užitečný pro zavedení parametrického programování, nebo použití speciálních funkcí. Funkčnost celého programu lze hrubě ověřit simulací.

	Circular pocket	T=EMT_D6 F=0.02ft S=16000rev Z1=-2.5inc ø7.6
	001: Posit. circle	Z0=-12 X0=0 Y0=0 R=37 N=4
	Contour	KRUH
	Contour	KUZEL
	Contour	OBRYS
	Mill pocket	▼▼▼B T=SLOTMILL_D6 F=0.04ft S=16000rev Z0=-9 Z1=0.5inc
	MSG("První plocha prejeti")	
	Contour	PLOCHA1
	Path milling	▼▼▼ T=EMT_D6 F=0.008ft S=16000rev Z0=-9.5 Z1=0.2inc

Obr. 14) Spojení operací



## 2.6 Vybrané funkce při programování na SLV EDU

Vzhledem k chování stroje při procesu obrábění a jeho celkovým vlastnostem je vhodné využít některých funkcí zlepšujících proces. Tato podkapitola se zabývá zejména funkcemi vhodnými pro kód exportovaný postprocesorem z CAD/CAM technologie. Jde zejména o funkce zlepšující chod programu a zamezující vibrace.

### Režim kontinuální dráhy

V režimu kontinuální dráhy není rychlost dráhy na konci bloku ("při změně bloku") zpomalena na úroveň, která by umožnila splnit kritérium přesného zastavení. Cílem tohoto režimu je totiž zabránit rychlému zpomalení os v místě změny bloku, aby rychlost os zůstala při přechodu programu na další blok co nejkonstantnější. K dosažení tohoto cíle je při volbě režimu kontinuální dráhy aktivována také funkce "Look-head". [21]

Tento mód je vhodný, pokud je třeba konturu obrobit co nejrychleji nebo pokud se přesný obrys může odchylovat od naprogramovaného obrysu v rámci určité tolerance. Není naopak vhodný, pokud je třeba přesně dodržet tvar kontury nebo pokud je vyžadována přesná konstantní rychlost. V programu je možné zapnout mód kontinuální dráhy pomocí příkazů (obr. 15):

- **G64** – Režim kontinuální dráhy se sníženou rychlostí podle součinitele přetížení. Při netangenciálních přechodech bloků je rychlost dráhy snížena do té míry, že netangenciální přechod bloku lze v cyklu interpolátoru obejít při zachování limitu zrychlení a s ohledem na faktor přetížení.
- **G641** – Režim kontinuální dráhy s vyhlazováním podle kritéria vzdálenosti ADIS (pro pracovní posuv) a ADISPOS (pro rychloposuv). Kritérium dráhy ADIS nebo ADISPOS popisuje maximální dráhu, kterou může vyhlazovací blok urazit před koncem bloku, respektive vzdálenost za koncem bloku, do které musí být vyhlazovací blok ukončen. Pokud není naprogramován žádný ADIS/ADISPOS, pak platí hodnota "nula", a tedy chování při objíždění jako u G64. U krátkých pojezdových vzdáleností se vůle vyhlazování automaticky sníží, až o 36 %.
- **G642** – Režim kontinuální dráhy s vyhlazováním v rámci definovaných tolerancí. V tomto režimu probíhá za normálních okolností vyhlazování v rámci maximální přípustné odchylky dráhy. Namísto těchto tolerancí specifických pro jednotlivé osy však lze nastavit sledování maximální odchylky kontury (tolerance kontury) nebo maximální úhlové odchylky orientace nástroje (tolerance orientace). [21]

### Syntaxe

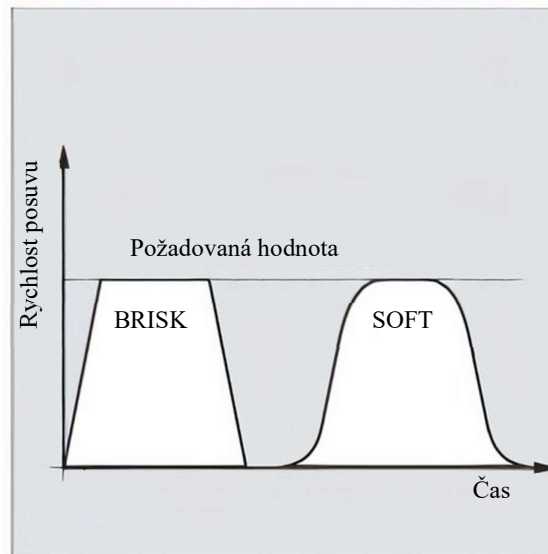
```
G64/G646 ...
G641 ADIS=.../ADISPOS=...
G642 .../G643 .../G644 .../G645 ...
```

Obr. 15) Příklad použití v programu [21]

## Akcelerační mód

Jedná se o nastavení zrychlování os stroje. Použitím správného nastavení lze zkrátit strojní čas, nebo zmenšit namáhání stroje při obrábění a zároveň zabránit trhaným pohybům. Lze volit z dvou módů (obr. 16): [21]

- **BRISK** – Jednotlivé osy nebo dráhové osy se pohybují s maximálním zrychlením, dokud není dosaženo naprogramované rychlosti posuvu (zrychlení bez omezení trhání).
- **SOFT** – Jednotlivé osy nebo dráhové osy se pohybují s konstantním zrychlením, dokud není dosaženo naprogramované rychlosti posuvu (zrychlení s omezením trhání).



Obr. 16) Akcelerační módy [21]

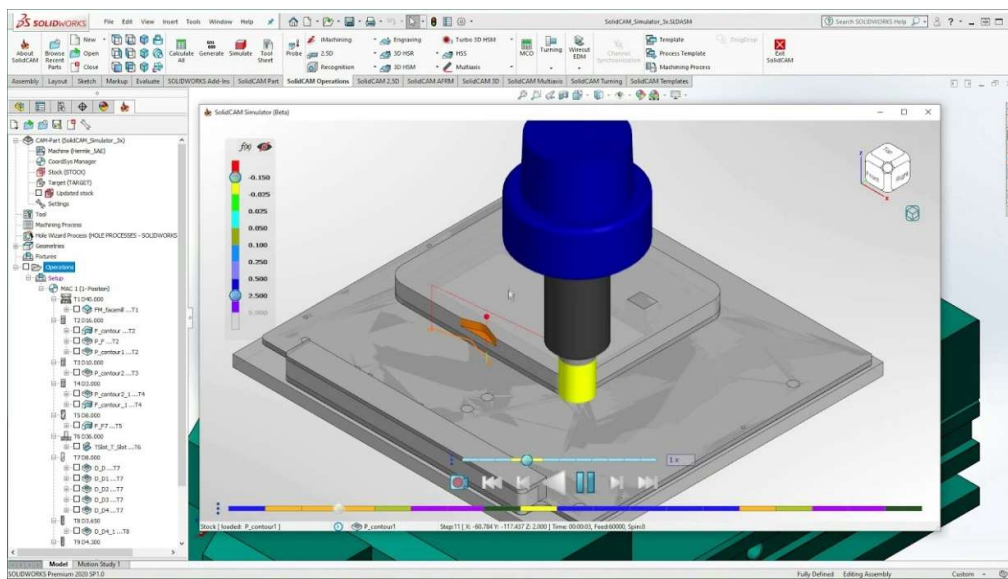
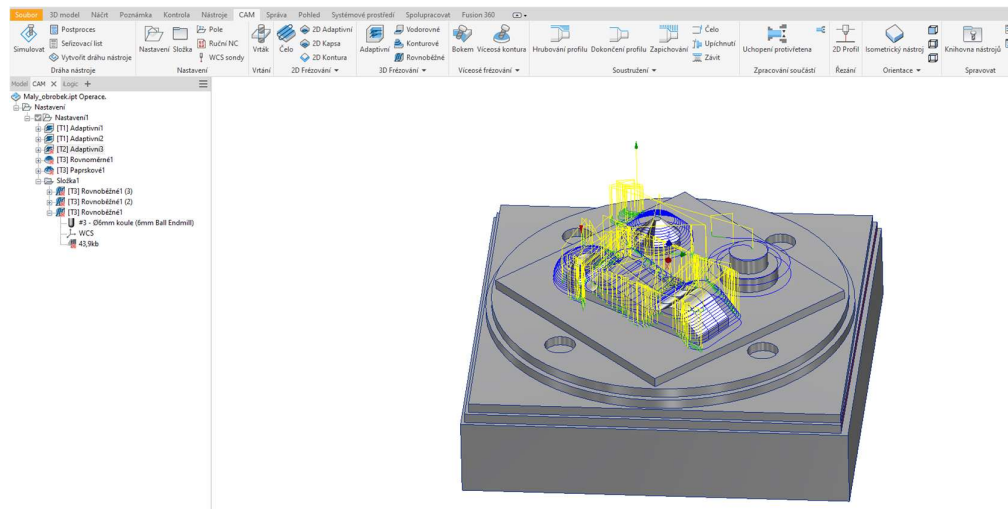
## Najíždění s dopřednou regulací

Chyby axiálního sledování lze pomocí dopředného řízení (*feedforward control*) snížit téměř na nulu. Proto se toto dopředné řízení nazývá také kompenzace chyb následování. Zejména při zrychlování v obrysových křivkách, např. v kruzích a rozích, vede axiální chyba následování k nežádoucímu porušování obrysu v závislosti na rychlosti. Funkci lze zapnout pomocí příkazu FFWON a vypnout příkazem FFWOF.

## 2.7 Tvorba programu pomocí CAD/CAM technologie

CAM neboli *computer aided manufacturing* je určen k zhotovení programu pro výrobu zejména tvarově složitých součástí. Vychází přímo z CAD (*computer aided design*) modelu hotové součásti. Na něj je nejprve „nabalen“ polotovar a postupným odebráním materiálu jednotlivými obráběcími operacemi je dosaženo finálního výrobku. Programátor v každé operaci definuje použité nástroje, řezné rychlosti, posuvy a další parametry a software podle nich vygeneruje dráhy nástroje. Takto vytvořené dráhy jsou následně zpracovány postprocesorem převádějícím je na kód pro systém do konkrétního stroje. [18][22]

CAD/CAM software lze získat jako samostatný program (EdgeCAM, PowerMILL), nebo jako rozšíření v CAD softwarech například SolidCAM nebo InventorCAM (obr. 17). Programování v CAM prostředí je intuitivní, a zároveň nabízí širokou škálu detailů pro optimalizaci obrábění. Největší výhodou je rychlost, software vygeneruje program do několika minut po zadání parametrů i u velmi složitých součástí.



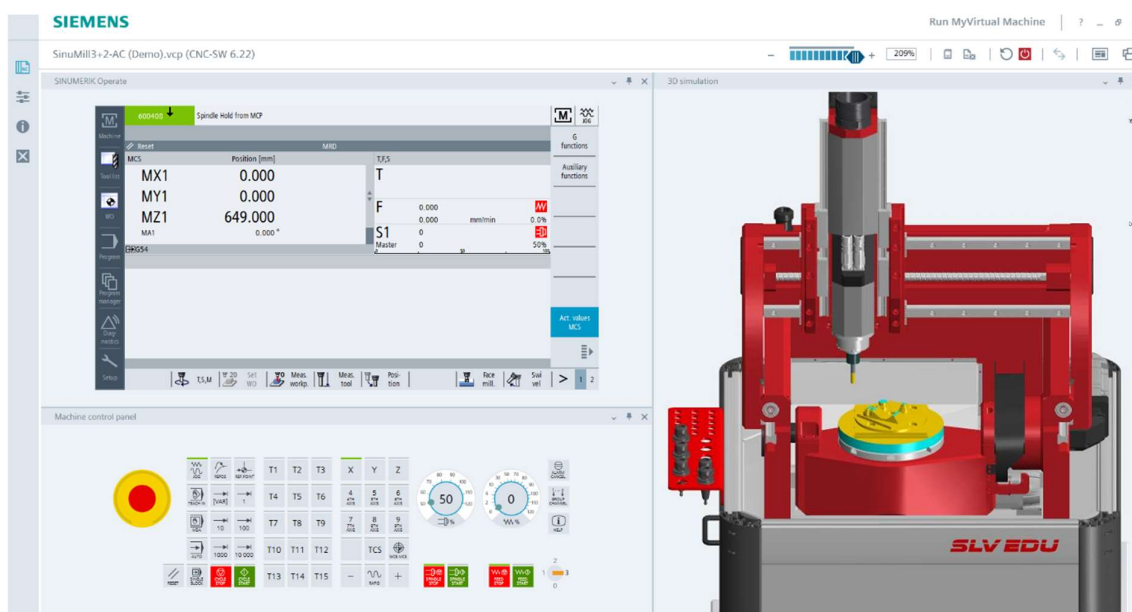
Obr. 17) Příklady CAD/CAM softwaru [22]



## 2.8 Software Run MyVirtual Machine

Run MyVirtual Machine je software společnosti Siemens. Zaměřuje se nejen na možnost programování, ale i na celkovou simulaci stroje se všemi jeho parametry a úplnou vizualizací procesu obrábění. Software vytváří digitální dvojče konkrétního stroje. Simulace poté umožňuje přehledně kontrolovat schopnost stroje vyrobit danou součást a zároveň přesně odhadnout čas výroby [7][8].

Programování v Run MyVirtual Machine je realizováno v Sinumerik ONE. Software zobrazuje obrazovku jako na reálném stroji i s plně funkčním ovládacím panelem (obr. 18). V dalším okně je zároveň zobrazeno digitální dvojče stroje. Virtuální stroj se chová stejně jako ten reálný. To znamená, že program nemůže být nahrán do stroje, pokud není klíč obsluhy ve správné poloze, a nelze ho spustit bez vyzkoušení simulace. Simulace provedená na digitálním dvojčeti zároveň poskytuje přesnější vizualizaci výrobního procesu. Lze sledovat kolize včetně nebo spínání koncových spínačů při odjezdu mimo pracovní prostor.



Obr. 18) Rozhraní programu Run MyVirtual Machine

## 3 NÁVRH TESTOVACÍHO OBROBKU

### 3.1 Volba materiálu

Vzhledem k technickým parametrům obráběcího centra, je třeba zvolit vhodný materiál polotovaru. Stroj nedisponuje dostatečným výkonem a kroutícím momentem k obrábění ocelí a jiných pevnějších materiálů, výběr materiálu byl proto zúžen na technické plasty a slitiny hliníku nebo mědi. Pokud by byl obrobek zhotoven z plastu, byla by výsledná přesnost velmi ovlivněna tepelnou roztažností při obrábění. Slitiny mědi nebyly voleny z hlediska jejich ceny. Proto jako finální materiál obrobku, vhodný pro zvolené obráběcí centrum, bylo voleno ze slitin hliníku.

Těchto slitin existuje rozsáhlé množství, odvíjejících se od použitých přísadových prvků. Při volbě použité slitiny byl kladen důraz zejména na tyto parametry (tab. 1) – obrobitelnost, mechanické vlastnosti, cena a dostupnost polotovaru přímo na skladě prodejce. Výběr byl omezen na tyto varianty:

**EN AW-6082** (AlSi1MgMn) – jedná se o středně odolnou, dobře obrobitelnou slitinu s velmi dobrou korozivzdorností. Slitiny třídy 6xxx jsou charakteristické svými mechanickými vlastnostmi a tvařitelností. Jako zástupci vysokopevnostních slitin nejsou vhodné pro obrábění na zvoleném stroji. S vyšší pevností je zároveň spojena i vyšší cena materiálu. [19]

**EN AW-7075** (AlZn5.5MgCu) – je hliníková slitina s obsahem zinku. Disponuje velmi vysokými mechanickými vlastnostmi, dobrou eloxovatelností a vynikající obrobitelností. Obráběcí centrum nedisponuje potřebným výkonem pro obrábění této slitiny a cena je úměrná vynikajícím vlastnostem. Slitina také není k dispozici na skladě v požadované velikosti polotovaru. [20]

**EN AW-2007** (AlCu4PbMgMn) – hlavní přísadou slitiny je měď. Také disponuje velmi dobrou obrobitelností (zejména díky obsahu olova) a relativně nízkou cenou. Naopak korozivzdornost, svařitelnost a eloxovatelnost je poměrně nízká. Dané vlastnosti však významně nesouvisí s kritérii posuzovanými při výběru slitiny. Další výhodou, mimo nízké ceny, je dostupnost polotovaru v potřebných rozměrech čtvercové tyče 100 x 100 mm. Proto byla jako materiál obrobku zvolena právě tato slitina. [21][23][24]

Tab. 1) Zhodnocení vybraných slitin [25][26][27][28][29]

	EN AW-2007	EN AW-7075	EN AW-6082
Obrobitelnost [%]*	280	170	280
Mez pevnosti [MPa]	184	275	280
Cena [Kč/kg]	175	215	165
Dostupnost polotovaru v požadovaných rozměrech	Polotovar skladem	Nutnost tvorby objednávky	Polotovar skladem

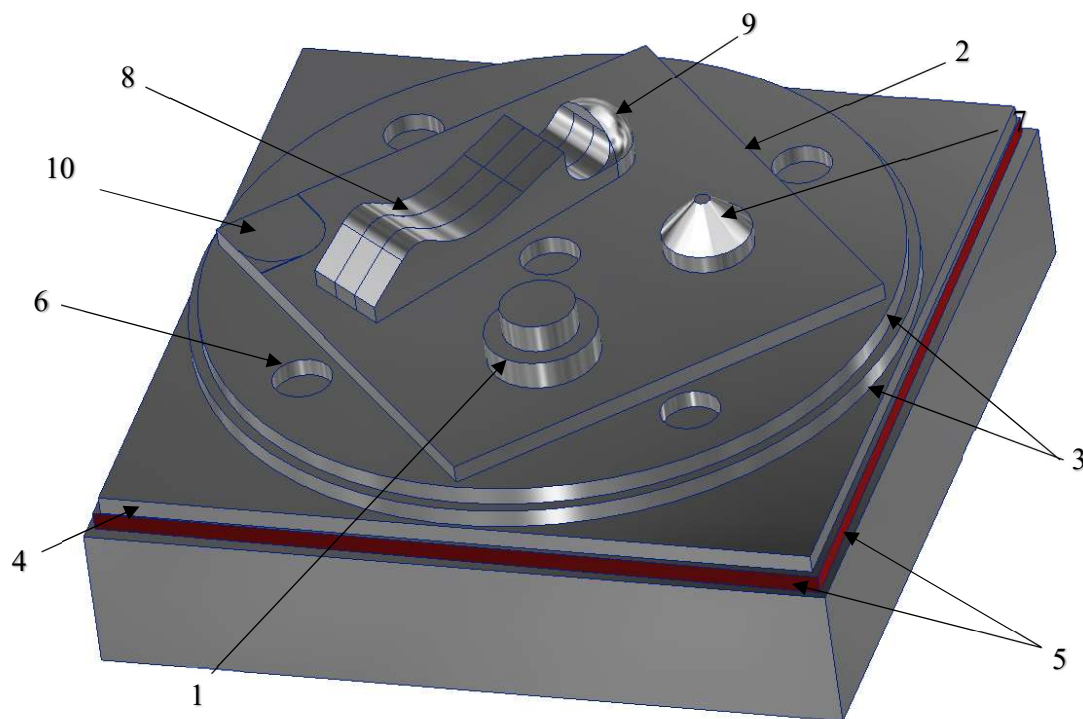
\*obrobitelnost odkazuje na index obrobitelnosti získaný ze studie AISI v referenci k oceli 11SMn30 pro kterou platí obrobitelnost 100%

### 3.2 Návrh modelu

Testovací dílec (obr. 16) vyhodnocuje přesnost a kinematické vlastnosti stroje a jeho chování v průběhu vysokorychlostního obrábění. Obrobek byl zpracován dle německé normy VDI/NCG 5211, kde každá část obrobku zkoumá jiné parametry stroje. Jeho technickou dokumentaci lze nalézt v příloze 3.

Norma definuje testovací dílce pro vysokorychlostní obrábění na obráběcích centrech. Ty jsou určeny k rychlému vizuálnímu vyhodnocení přesností stroje přímo v procesu obrábění a k porovnávání mezi různými stroji. Je důležité zmínit, že součást je určena k opakovanému obrobení pro větší využití materiálu. To znamená, že po vyhodnocení obrábění se v programech změní hloubka záběru a obrobek lze znovu použít.

Norma doporučuje hrubování s odděleným programem a přídavkem na dokončení 0,3 mm. Pokud bude v jediném programu hrubování i dokončování, je třeba nechat obrobek mezi operacemi vychladnout. Všechny operace mohou probíhat za sucha, nebo s chlazením. Obrábění by mělo probíhat co nejrychleji k zamezení vlivů tepelné roztažnosti a s co nejmenším vyložení nástroje pro eliminaci vibrací. Pro všechny dokončovací operace je doporučováno dodržet vzdálenost 0,2 mm od spodní plochy k eliminaci axiálních sil působících na nástroj. Následujících několik odstavcích je popsána postupná tvorba modelu jednotlivých prvků, jejich význam a doporučené tolerance k měření. [30]



Obr. 19) Model testovacího dílce

- **Element 1 – Válcové schody**

Element je složen ze dvou válcových ploch různých průměrů ve schodovitém tvaru. Pomocí prvku se kontroluje odchylka, od vytvořeného průměru mimo osu obrobku, při různých rychlostech posuvu (vliv součinitele  $k_v$ ). U menších průměrů válcových ploch je třeba ověřit, zda je stroj schopen dosáhnout požadované rychlosti posuvu. Výsledná odchylka je závislá přímo na posuvové rychlosti. Na elementu je vyhodnocována kruhovitost každé sekce schodu a změna průměru oproti nominální hodnotě. Jednotlivé úseky schodů se mezi sebou porovnávají. [30]

- **Element 2 – Kvádr pod 45°**

Element slouží ke kontrole seřízení os stroje. Pro správné obrobení pod daným úhlem si musí být rychlosti v kolmých osách rovny. Jakákoliv odchylka se projeví jako změna úhlu a nedodržení kolmosti či rovnoběžnosti hran. Na kvádru je vyhodnocováno natočení, rovinnost, rovnoběžnost protilehlých a kolmost přilehlých ploch. [30]

- **Element 3 – Válec**

Jedná se dvě jednoduché válcové plochy velkého průměru. Náhlou změnou smyslu pohybu jedné osy, když se druhá osa hýbe maximální rychlostí, jsou vyvolány vibrace na rozhraní kvadrantů. Ty musí být kompenzovány systémem a projevují se jako zubaté hrany obrobku, především na právě zmíněném rozhraní. První válcová plocha je sousledně obrobena kruhovou interpolací a následně porovnána s druhou plochou, zhotovenou nesouslednou kruhovou interpolací. Je hodnocena kruhovitost válce, obzvlášť na přechodu mezi kvadranty, a sousost se středovou dírou. [30]

- **Element 4 – Kvádr**

Obrábění každé hrany elementu je realizováno pohybem pouze v jedné ose. Tím jsou na obrobku vizualizovány osy  $x$  a  $y$  a jejich kolmost. Pokud by byla kolmost nedostatečná, kvádr by byl zdeformován na rovnoběžník. Na elementu je kontrolována rovinnost, rovnoběžnost protilehlých a kolmost přilehlých hran. [30]

- **Element 5 – Hrana pod úhlem 0,5°**

Interpolace probíhá při extrémně odlišných rychlostech posuvu v jednotlivých osách. Pohyb v pomalejší ose je zatížen menší chybou. Výsledkem je zkreslení kontury a vznik stínů, které indikují rozlišovací schopnost systému. Je kontrolována rovinnost hran a úhel zkosení. [30]

- **Element 6 – Pole děr**

Středová díra slouží jako základna pro měření celého obrobku. Odchylky ve vzdálenostech mezi středy děr reflektují přesnost pozicování stroje. Tuhost soustavy vřeteno-nástroj je posouzena na základě odchylky od kruhovitosti. Každá z děr je zároveň obrobena lehce jinou metodou. První díra je obráběna sousledně se zapnutou korekcí posuvu, druhá díra je taktéž obráběna sousledně, ale již s vypnutou korekcí posuvu. Třetí a čtvrtá díra jsou obdobou prvních dvou, ale s využitím nesousledného obrábění. Výsledkem je vznik odlišností v drsnosti povrchu a odchylky od jmenovitého průměru děr nebo kruhovitosti. U všech děr je měřena kruhovitost a mezi-osová vzdálenost. Dále je vyhodnocena sousost středové díry a elementu 3. [30]

- **Element 7 – Kužel**

Kužel je od základny obráběn postupnými kruhovými interpolacemi. Dráhy nástroje mají mezi sebou stejnou vzdálenost v směru osy  $z$ . Zachování konstantního posuvu vede ke stále větším nárokům na zrychlení stroje, potřebných k obrábění kontury. Při zmenšujícím se průměru zároveň dochází stále častěji k ovlivnění na rozhraní kvadrantů. To může způsobit posunutí přechodů mezi kvadranty. Je měřena kruhovitost v několika výškových hladinách a přímost drah na přechodech mezi kvadranty. Měření času umožňuje vyhodnotit dobu změny bloku nebo kontrolovat čas interpolace vzhledem k teoretické nebo skutečné době obrábění. [30]

- **Element 8 – 3D plocha**

Element je rozdělen na tři samostatné oddíly, kde je každý obráběn různou posuvovou rychlostí. První oddíl je obráběn normální posuvovou rychlostí, druhý trojnásobnou a třetí pětinasobnou. Všechny tři oddíly jsou obráběny po délce křivky s rozestupy  $0,1 \text{ mm}$  mezi jednotlivými dráhami nástroje. Jednotlivé úseky podávají informace o tendenci stroje vibrovat při různých rychlostech. Extrémy na této křivce představují obzvláště velké obtíže. Jedná se zejména o inflexní body s velkým poloměrem zakřivení a přechody ze zakřivení na přímky (poloměr zakřivení je náhle změněn z konečného na nekonečný). Ovlivnění lze pozorovat na částech ploch právě v těchto bodech. Na jednotlivých plochách je kontrolována geometrická přesnost, drsnost povrchu a čas potřebný k obrobení každé plochy. [30]

- **Element 9 – Kulová plocha**

Kulová plocha je obráběna samostatně, na rozdíl od předešlého elementu. Nástroj začíná obrábění u půlkruhové základny plochy a pomocí lineární interpolace obrábí postupnými tažnými řezy směrem do středu. Po každém řezu je nástroj posunut o  $1^\circ$ . Maximální délka tětiny vzniklé mezi interpolovanými body, je  $0,01 \text{ mm}$ . Po obrobení poloviny kulové plochy je zbylá část plochy obráběna s navýšením posuvu a otáček o  $20 \%$ . Zvolená strategie zaručuje konstantní lineární interpolaci v malých přírůstcích ve třech osách. Chyby v interpolaci mohou způsobit nesprávné mapování kontury a poukázat na nepřesnosti stroje. Je hodnocena celková geometrická přesnost plochy, vizuálně drsnost povrchu, případně rozdíl mezi dvěma vytvořenými povrchy. [30]

- **Element 10 – Ploché překrytí**

Tímto prvkem je započat a ukončen program dokončování. Kontura tvaru „n“ je vytvořena před obrobením ostatních elementů. Následuje postupné dokončení všech ostatních prvků a poté vyhotovení kontury tvaru „c“ ve stejné výškové hladině. Element slouží k vyhodnocení růstu vřetene. Pokud při postupném obrábění jednotlivých prvků dojde k dosažení vysokých teplot, může být nástroj prodloužen. To lze pozorovat na rozdílu výšek mezi protínajícími se plochami. Rozdíl výšek však může také poukazovat na tepelnou roztažnost obráběného materiálu nebo nepřesnost pozicování stroje. Mezi oběma plochami je měřen rozdíl v souřadnic v ose  $z$ . [30]

## 4 TVORBA NC PROGRAMU

Celý program byl tvořen v softwaru Run MyVirtual Machine v systému Sinumerik ONE v prostředí dílenského obrábění ShopMill a je uveden v příloze 4. K programování jednotlivých prvků bylo přístupováno se záměrem využít co nejvíce funkcí a možností programu Sinumerik ONE na stroji SLV EDU. Před začátkem programování je třeba zvolit vhodné nástroje a jejich řezné podmínky, kterými se zabývá následující podkapitola.

## 4.1 Použité nástroje a řezné podmínky

K obrábění jsou využity celkem tři nástroje. Všechny jsou kleštinami upnuty do upínacích kuželů ISO20. Všechny nástroje jsou vyrobeny z rychlořezné oceli, zejména kvůli nižší ceně a zároveň v důsledku omezení vřetene. Při vyšších otáčkách dochází k jeho přehřevu a nebylo by možné plně využít nástroje z kvalitnějších řezných materiálů. Řezné podmínky byly stanoveny dle výpočtů v kapitole 2.4 (rovnice 1 až 8) a jsou uvedeny v příloze 5.

- **Válcová stopková fréza  $\varnothing 10$  mm**

Jako první nástroj je použita standardní tříbřitá válcová stopková fréza o průměru 10 mm (obr. 20). Je určena pro hrubovací operace. Vypočtením řezných podmínek ze zmíněných rovnic je následně určena hodnota posuvu  $1\,146\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  a otáček  $9\,554\text{ min}^{-1}$ .



Obr. 20) Válcová stopková fréza  $\varnothing 10$  mm [38]

- **Válcová stopková fréza  $\varnothing 6$  mm**

Druhý nástroj je použit při dvou operacích s dvěma sadami řezných podmínek. Fréza (obr. 21) má čtyři břity, díky čemuž dosahuje vyšších posuvových rychlostí, při menším posuvu na zub. Pro polodokončování vychází posuv  $1\,910\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  a pro dokončování  $510\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ . Pro obě operace vychází otáčky vřetene na  $16\,000\text{ min}^{-1}$ .



Obr. 21) Válcová stopková fréza  $\varnothing 6$  mm [39]

- **Kulová stopková fréza  $\varnothing 6$  mm**

Jako poslední nástroj byla vybrána kulová fréza, z nutnosti přesného dokončení tvarových ploch (obr. 22). Po dosazení do rovnic byl pro frézu vypočten posuv  $640\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  a otáčky vřetene  $16\,000\text{ min}^{-1}$ .



Obr. 22) Kulová stopková fréza  $\varnothing 6$  mm [40]

## 4.2 Tvorba NC programu

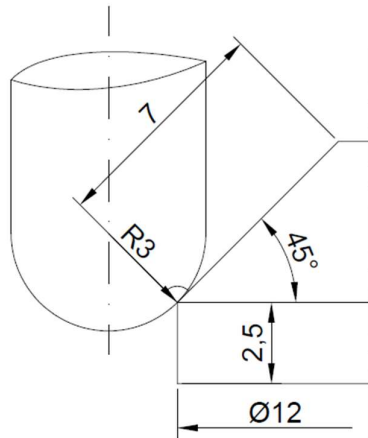
Obrábění je rozděleno do šesti hlavních programů a čtyř dalších podprogramů. V následujících několika odstavcích jsou postupně popsány jednotlivé kroky obrábění. Fotky z procesu obrábění lze nalézt v příloze 6

- **Hlavička programu** – celý program začíná úvodním řádkem a hlavičkou. V úvodním řádku jsou do tabulky vyplněny hodnoty rozměru polotovaru, vybraný nulový bod, bezpečné vzdálenosti, pracovní rovina a směr obrábění. Hlavička programu obsahuje rychlé shrnutí programu, polotovaru, materiálu a seznam použitých nástrojů.
- **Hrubování** – je rozděleno do dvou podprogramů a realizováno válcovou stopkovou frézou o průměru 10 mm. V první část je polotovar obroben do hloubky 3D prvků s celkovým přídávkem 0,5 mm. Z důvodu tvarové složitosti těchto prvků bylo jako nejvhodnější metoda zvolen export pomocí postprocesoru z CAD/CAM technologie. Ta byla s využitím 3D modelu bylo zpracována v doplňku pro Autodesk Inventor, InventorCAM.  
V druhém podprogramu byl InventorCAM opět využit k vyhrubování zbylé části obrobku. Jelikož se zde již nevyskytují tvarové prvky, je obráběno pouze s radiálním přídávkem 0,3 mm.  
Následuje třetí podprogram určený k polodokončení tvarových ploch a zmenšení přídávku na obrábění na hodnotu 0,3 mm. Obráběno je válcovou stopkovou frézou o průměru 6 mm, která umožňuje přesnější opisování tvaru, s využitím CAD/CAM technologie. Touto frézou je posléze vyhrubována středová díra a pole děr s radiálním přídávkem 0,1 mm.
- **Válcové schody** – každý schod je obráběn ve dvou fázích. V první fázi je pomocí kruhové interpolace na nominálním průměru schodu obroben do hloubky 2 mm (počítáno od horní plochy) při maximálních otáčkách. Druhá operace obrábí zbytek schodu (2 mm) při polovičních otáčkách a zvětšením průměru o 0,1 mm. Nástroj najíždí a odjíždí po kružnici ve směru obrábění. V programu je využito cyklu kruhového čepu.
- **Kvadr pod úhlem 45°** – element je obráběn pomocí lineární interpolace kolem vnějšího obvodu ve smyčce. Nájezd k prvku a odjezd od něj je realizován po prodloužené hraně kvádru. K obrobení je použit cyklus obdélníkového čepu pod úhlem.
- **Válec velkého průměru** – první válec o průměru 92 mm je sousledně obráběn kruhovou interpolací vnější plochy cyklem kruhového čepu. Nájezd a odjezd probíhá po kružnici ve směru následného obrábění. K obrábění druhého válce (průměr 95 mm) je taktéž využito cyklu kruhového čepu, avšak s pomocí nesousledného způsobu obrábění.
- **Kvadr** – obvod kvádru je obráběn lineární interpolací v uzavřené smyčce. Nájezd a odjezd probíhá po prodloužené hraně prvku, stejně jako u kvádru pod úhlem 45°. Obrábění je programováno pomocí cyklu obdélníkového čepu.
- **Hrana pod úhlem 0,5°** - Obrábění je realizováno lineární interpolací pod úhlem v rovině  $x-y$ . Nájezd a odjezd je na prodloužené dráze prvku. Dráha nástroje je naprogramována pomocí kontury a sousledně dokončena.
- **Pole děr** – nejprve je pomocí cyklu kruhové kapsy dokončena středová díra. Následně jsou kombinací absolutního a inkrementálního ISO programování postupně

dokončovány ostatní otvory. Všechny otvory musí být programovány bez korekce poloměru nástroje. Kvůli nemožnosti odjet nástrojem alespoň o jeho poloměr nelze korekci aktivovat. První otvor je dokončen nesousledně pomocí kruhové interpolace se zapnutou korekcí posuvu, při pohybu po křivce. Druhá díra je obrobena taktéž nesousledně, ale již s vypnutou posuvovou korekcí. Třetí díra má korekci opět zapnutou, ale je vyhotovena sousledně. Poslední otvor je sousledně dokončen s vypnutou posuvovou korekcí.

- **Překrytí ploch** – je naprogramováno jednoduchým přejetím nástroje kolem kontury tvaru „U“ ve stejné výšce z. První plocha je obráběna na začátku a druhá na konci dokončování pomocí válcové stopkové frézy průměru 6 mm.
- **Kužel** – díky snadnému popisu matematickými rovnicemi je kužel dokončen metodou parametrického obrábění. Je zapotřebí tři parametrů. Parametrem R10 (0,05 mm) je vyjádřen posuv v ose z a také závislý posuv v ose x. Pomocí R11 (rovnice 9) je při každém kroku dopočten poloměr kružnice ve styku frézy s obrobkem (obr. 23). Parametr R12 je výška vztažená k základně kuželové plochy. Postupnými kruhovými interpolacemi při proměnném poloměru R11 a zvyšující se souřadnici z o R10 je kužel dokončen.

$$R11 = 6 + 3 \cdot \cos 45^\circ - R12 \quad (9)$$



Obr. 23) Schéma rozměrů kužele

- **3D kontura a kulová plocha** – všechny tři části jsou pro svou tvarovou složitost dokončovány pomocí CAD/CAM technologie. Jako nejvhodnější strategie bylo zvoleno rovnoběžné frézování jedním směrem ve smyslu dlouhé strany křivkové plochy. Každá z částí má vlastní řezné podmínky. První plocha je obráběna posuvovou rychlostí o velikosti  $320 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , druhá  $960 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  a poslední  $1600 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Následuje tvorba kulové plochy. Byla zvolena strategie paprskového obrábění s úhlovým krokem  $1^\circ$ . Jelikož se jedná o programy vytvořené postprocesorem v CAD/CAM technologii jsou zapnuté funkce G641, SOFT a FFWON pro dosažení co nejhladšího povrchu a co nejmenšího trhání stroje při obrábění.



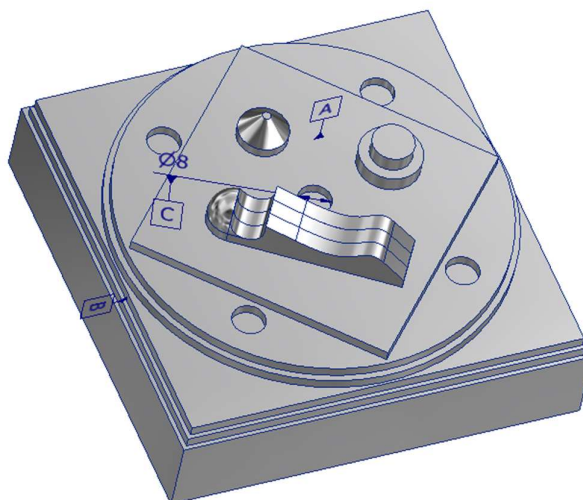
## 5 NÁVRH MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ OBROBENÝCH POVRCHŮ

Návrh měření je zpracován v programu Calypso 2021 od společnosti Zeiss. Jednotlivé prvky pro měření jsou naprogramovány dle technické dokumentace (příloha 3). Měření je realizováno na tříosouřadnicovém stroji Eclipse 1000 s měřicí dotykovou sondou s kuličkou z nitridu křemíku. Pro měření hliníkových slitin je zapotřebí použít tento druh sondy, jelikož je vůči hliníku neutrální. Běžně používaná rubínová kulička by reagovala s materiálem a během měření narůstala. Výsledné měření by tím pádem bylo s narůstajícím časem stále nepřesnější.

### 5.1 Měření na tříosouřadnicovém stroji Eclipse 1000

Po zkalibrování stroje je obrobek ustaven v jeho souřadném systému. To je provedeno změřením ploch se základnami A a B a osy se základnou C vycházející ze středové díry (obr. 24). Následuje postupné měření jednotlivých naprogramovaných prvků.

Jako první je měřena rovinnost plochy A. Sonda měří výšku na různých bodech na horní ploše, ze kterých je následně určena rovinnost celé plochy. Následuje měření průměru a kruhovitosti středové díry, průměry a soustřednosti válcových ploch s velkým průměrem. Poté jsou měřeny přímosti, kolmosti a rovnoběžnosti ploch kvádrů se základnou B a kvádrů pod úhlem 45°. Nakonec je vyhodnocena kruhovitost, průměr a poloha pole čtyř děr průměru 8 mm a kruhovitost, průměr a soustřednost válcových schodů. Celé měření bylo provedeno třikrát pro ověření jeho opakovatelnosti. Výstupem jsou měřicí protokoly obsažené v příloze 7.



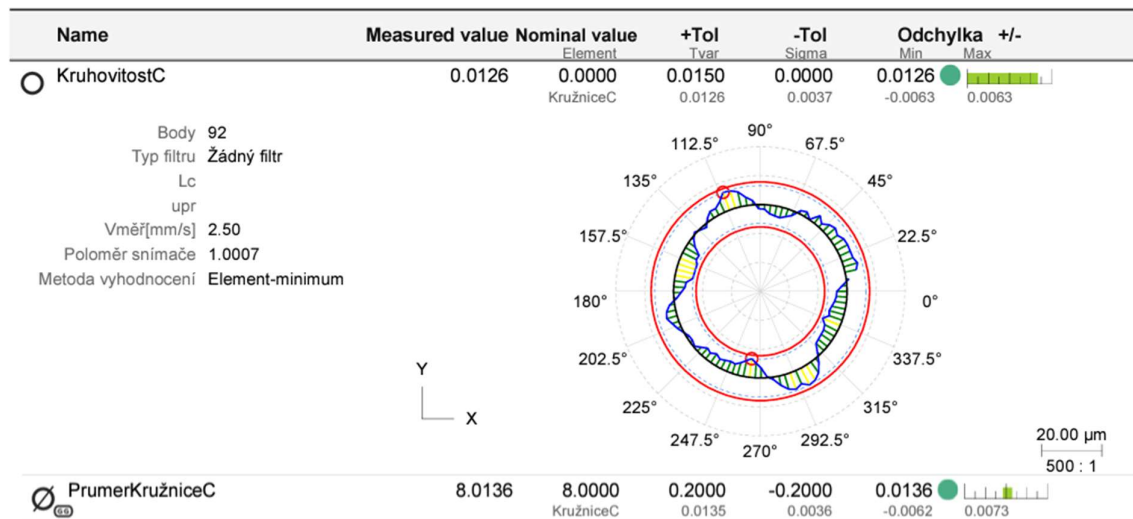
Obr. 24) Základny obrobku

## 5.2 Vyhodnocení vybraných prvků

Na závěr je z protokolu vybráno několik měřených prvků a jsou zhodnoceny jejich výsledky. Z důvodu rozsahu práce jsou uvedeny a vyhodnoceny pouze některé měřené prvky.

### Středová díra

Na výsledcích z protokolu měření pro tento element (obr. 25) lze pozorovat kruhovitost a úchylku průměru. Obě tolerance byly měřeny 92 body a jejich nominální hodnoty se pohybují v mezi tolerance. Z toho lze vyvodit, že daný element, který zároveň slouží jako základna pro zbytek měření byl vyroben s dostatečnou přesností a jeho odchylka nebude mít zásadní vliv na ostatní k němu vztažené elementy.



Obr. 25) Výsledky měření středové díry

### Pole kruhových děr

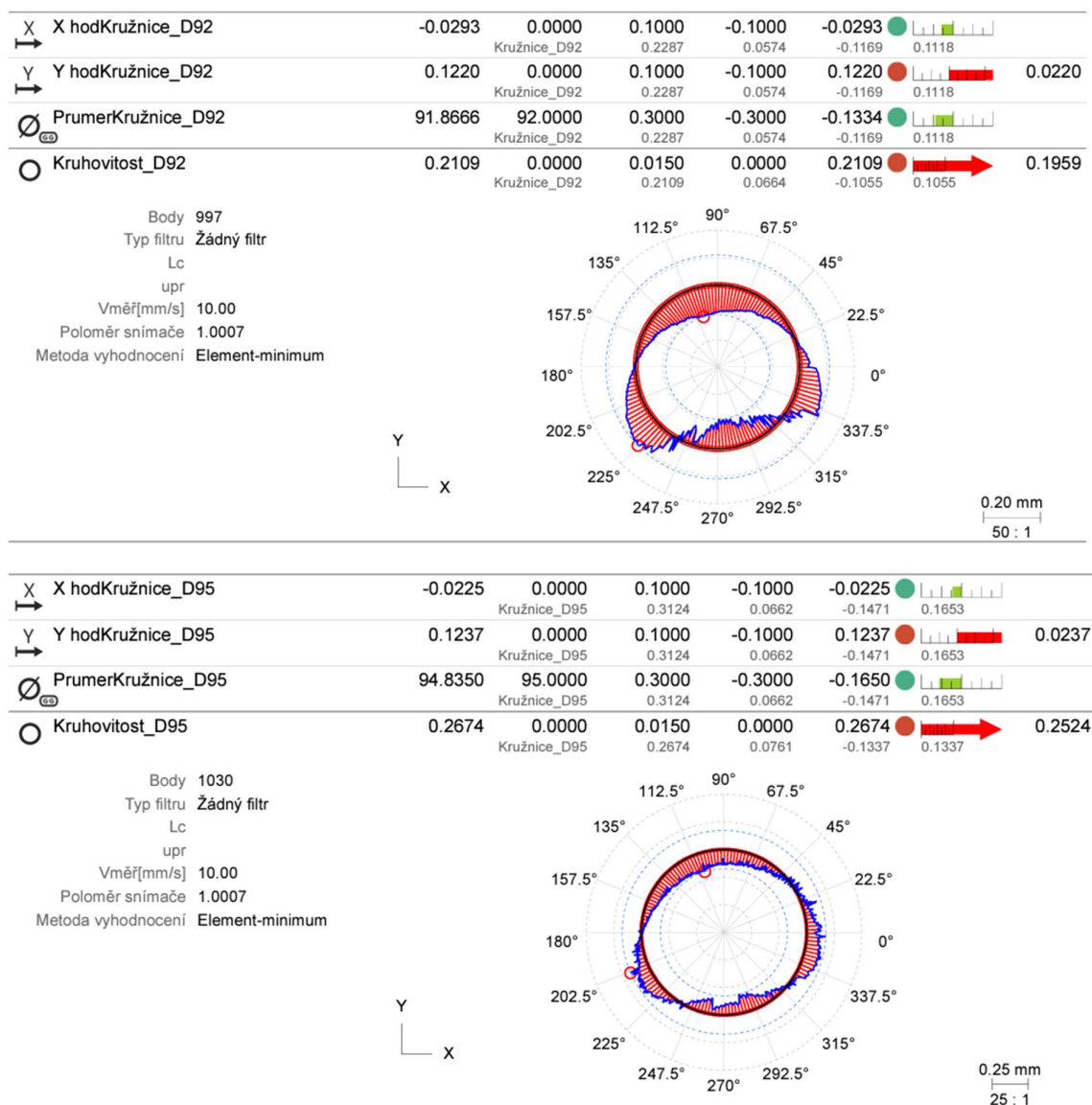
K vyhodnocení byly z protokolu vybrány k porovnání dva otvory (obr. 26). První otvor byl vytvořen sousledným a druhý nesousledným frézováním. Na výsledcích kruhovitosti je zřejmé, že sousledné frézování je vhodnější strategie k dokončovacím obrábění. Dále lze pozorovat, že rozdíl v sousledné nebo nesousledné strategii obrábění neměl zásadní vliv na ostatní měřené parametry jako jmenovitý rozměr nebo polohu.

X	X hodKružnice_PP	26.1437	26.1630	0.2000	-0.2000	-0.0193	0.0086
			Kružnice_PP	0.0144	0.0039	-0.0058	0.0086
Y	Y hodKružnice_PP	-26.1447	-26.1630	0.2000	-0.2000	0.0182	0.0086
			Kružnice_PP	0.0144	0.0039	-0.0058	0.0086
Ø	PrumerKružnice_PP	7.9741	8.0000	0.2000	-0.2000	-0.0259	0.0086
			Kružnice_PP	0.0144	0.0039	-0.0058	0.0086
○	Kruhovitost_PP	0.0143	0.0000	0.0150	0.0000	0.0143	0.0071
			Kružnice_PP	0.0143	0.0043	-0.0071	0.0071
X	X hodKružnice_PZ	26.1482	26.1630	0.2000	-0.2000	-0.0147	0.0162
			Kružnice_PZ	0.0412	0.0083	-0.0249	0.0162
Y	Y hodKružnice_PZ	26.1536	26.1630	0.2000	-0.2000	-0.0094	0.0162
			Kružnice_PZ	0.0412	0.0083	-0.0249	0.0162
Ø	PrumerKružnice_PZ	7.9871	8.0000	0.2000	-0.2000	-0.0129	0.0162
			Kružnice_PZ	0.0412	0.0083	-0.0249	0.0162
○	Kruhovitost_PZ	0.0351	0.0000	0.0150	0.0000	0.0351	0.0201
			Kružnice_PZ	0.0351	0.0085	-0.0176	0.0176

Obr. 26) Výsledky měření pole děr

## Válcové plochy velkého průměru

Vyhodnocení se týká válcových ploch o průměrech 92 a 95 mm (obr. 27). Každý prvek byl měřen přibližně v tisíci bodech. Výsledky ukazují, že první válcová plocha o průměru 92 mm vykazuje maximální odchylku od ideální kruhovitosti ve výši 0,21 mm. Na druhé válcové ploše byla naměřena odchylka v kruhovitosti 0,26 mm. Z toho opět vyplývá, že sousledné obrábění se jeví jako lepší strategie pro dokončování. Na tomto elementu lze také pozorovat rozdílnou kvalitu povrchu při sousledném a nesousledném obrábění. Ať už vizuálně na obrobku, nebo na grafech kruhovitosti jednotlivých prvků (obr. 27).



Obr. 27) Výsledky měření válcových ploch

## 6 ZÁVĚRY

Bakalářská práce byla zaměřena na programování v systému Sinumerik ONE na CNC obráběcím centru SLV EDU. Cílem bylo navrhnout testovací obrobek, včetně technické dokumentace, vytvořit NC program pro jeho obrobení, ověřit vyrobiteľnosť a provést návrh měření. Návrh obrobku probíhal v souladu s normou VDI/NCG 5211-2013. Technická dokumentace i 3D model byly tvořeny v programu Autodesk Inventor 2024. NC programování probíhalo v softwaru Run MyVirtual Machine v prostředí Sinumerik ONE s využitím exportu z CAD/CAM technologií. Měření bylo provedeno na tříosřadnicovém stroji Eclipse 1000. Výsledkem práce je obrobený a změřený testovací obrobek, NC programy sloužící k jeho výrobě a protokoly z měření. V dírách o průměru 8 mm bylo dosaženo hodnoty kruhovitosti 0,0143 mm sousledným obráběním a 0,0351 mm nesousledným obráběním. Vnější válcové plochy byly vyrobeny s odchylkou od kruhovitosti 0,21 mm pro sousledné obrábění a 0,26 mm pro nesousledné obrábění.

Navržený obrobek by v praxi mohl sloužit pro rychlé vyhodnocení vlastností a přesností napříč různými obráběcími centry. Výhodou je opakovatelné použití jednoho dílce pro evaluaci několika strojů při nižší spotřebě materiálu.

V průběhu práce se vyskytla různá omezení. Nízký výkon a řezný moment vřetene znemožnil efektivní využití výkonnějších řezných nástrojů. Stroj taktěž disponoval pouze vzduchovým chlazením a vřeteno se při delším provozu na maximálních otáčkách přehřívalo. V neposlední řadě bylo nutné z důvodu tuhosti obráběcího centra dbát co největší důraz na omezení vibrací při obrábění. Výše zmíněná omezení mohla ovlivnit přesnost a čas výroby. Ovlivnění vibracemi je například patrné z měřících protokolů nebo vizuálním vyhodnocením obrobku.

Pro zlepšení výsledků v budoucnu by bylo zapotřebí se zaměřit na ještě větší potlačení vibrací v programu pomocí příslušných funkcí, nebo se pokusit odstranit limity stroje.

Na závěr lze říci, že implementace pokročilých programovacích technik pro CNC obráběcí centra nejen zvyšuje přesnost a efektivitu výrobního procesu, ale také přináší významné úspory času a nákladů. Tato práce demonstruje potenciál moderních technologií v transformaci tradičního průmyslu a ukazuje, jak klíčovou roli hraje neustálý vývoj v oblasti programování a automatizace pro budoucnost výrobních systémů.

## 7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *SVL EDU 5axis Siemens*. Online. CNC stroj. 2023. Dostupné z: <https://www.cncstroj.cz/stroje/slv-edu-5axis-siemens/>. [cit. 2024-02-18].
- [2] KUTZ, Myer. *Mechanical engineers' handbook*. Fourth edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, [2015]. ISBN 978-111-8112-854.
- [3] JAN, Vít. *Neželezné kovy a jejich slitiny I, Struktura a vlastnosti materiálů, Základy strojního inženýrství, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické, Brno, 2022*.
- [4] *Elektricky vodivé materiály*. Online. Publi. Dostupné z: <https://publi.cz/books/353/04.html>. [cit. 2024-02-21].
- [5] *Comparative Machinability of Brasses, Steels and Aluminum Alloys*. Online. In: Copper.org. Dostupné z: <https://copper.org/applications/rodbar/pdf/a7009.pdf>. [cit. 2024-02-23].
- [6] JAN, Vít. *Neželezné kovy a jejich slitiny II, Struktura a vlastnosti materiálů, Základy strojního inženýrství, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické, Brno, 2022*.
- [7] *EXPERT GUIDE TO CHOOSING THE BEST MATERIALS FOR MACHINED PLASTIC PARTS*. Online. Atlasfibre.com. 2024. Dostupné z: <https://www.atlasfibre.com/expert-guide-to-choosing-the-best-materials-for-machined-plastic-parts/>. [cit. 2024-02-23].
- [8] *Machining of plastics*. Online. British plastic federation. C2024. Dostupné z: [https://www.bpf.co.uk/plastipedia/processes/Machining\\_of\\_Plastics.aspx](https://www.bpf.co.uk/plastipedia/processes/Machining_of_Plastics.aspx). [cit. 2024-02-23].
- [9] *Guide to plastic machining*. Online. Thomasnet. 2023. Dostupné z: <https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/plastic-machining/>. [cit. 2024-02-23].
- [10] *Different types of cutting tools materials and their properties*. Online. Mecholic. C2024. Dostupné z: <https://www.mecholic.com/2016/02/different-types-of-cutting-tools-materials-and-their-properties.html>. [cit. 2024-02-24].
- [11] *Metal Machining: The 5 Key Cutting Tool Materials*. Online. In: MachineMFG. 2023. Dostupné z: <https://www.machinemfg.com/types-of-cutting-tool-materials/>. [cit. 2024-02-24].
- [12] *Technologie obrábění - 1.část*. Online. In: DTB/BtoP - technologie obrábění. 2003. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI\\_TO-1cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-1cast.pdf). [cit. 2024-02-24].
- [13] SEDLÁK, Josef. *Nástrojové materiály, Technologie obrábění, Základy strojního inženýrství, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické, Brno, 2023*.

- [14] *Classification And Use Of Cemented Carbide*. Online. Yatech Materials. C2024. Dostupné z: <https://www.yatechmaterials.com/en/technology/classification-and-use-of-cemented-carbide/>. [cit. 2024-02-24].
- [15] *Cemented carbides*. Online. In: Cemented carbides Mitsubishi. Dostupné z: <https://www.mmc-carbide.com/permanent/courses/91/cemented-carbides.html>. [cit. 2024-02-24].
- [16] SIEMENS. *Run MyVirtual Machine*. Online. SIEMENS. Run MyVirtual Machine ... Siemens Global Website. C1996-2024. Dostupné z: <https://www.siemens.com/global/en/industries/machinebuilding/machine-tools/cnc4you/run-myvirtual-machine.html>. [cit. 2024-01-20].
- [17] SIEMENS. *SINUMERIK ONE – synthesizes continuity and change in one CNC system*. Online. SIEMENS. SINUMERIK ONE ... Siemens Global Website. C1996-2024. Dostupné z: <https://www.siemens.com/global/en/industries/machinebuilding/machine-tools/cnc4you/basics-articles/sinumerik-one-fully-compatible.html>. [cit. 2024-01-20].
- [18] ŠTULPA, Miloslav. *CNC: programování obráběcích strojů: programování obráběcích strojů*. Praha: Grada, 2015. ISBN 978-80-247-5269-3.
- [19] SMID, Peter. *CNC programing handbook: A comprehensive guide to practical CNC programing*. Third edition. Industrial press, 2008. ISBN 978-0-8311-3347-4.
- [20] *SINUMERIK ONE Milling*. Online. In: Siemens SiePortal. C1996-2024. Dostupné z: [https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/109925735/ONE\\_milling\\_op\\_man\\_0124\\_en-US.pdf](https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/109925735/ONE_milling_op_man_0124_en-US.pdf). [cit. 2024-03-03].
- [21] *SINUMERIK ONE NC programming*. Online. In: Siemens SiePortal. 2024. Dostupné z: [https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/109925763/ONE\\_ncprogramming\\_prog\\_man\\_0124\\_en-US.pdf](https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/109925763/ONE_ncprogramming_prog_man_0124_en-US.pdf). [cit. 2024-03-03].
- [22] *SolidCAM: CAM software*. Online. In: SolidCAM. 2020. Dostupné z: <https://i.ytimg.com/vi/5VOzK1vLHUs/maxresdefault.jpg>. [cit. 2024-05-17].
- [23] ČSN. ČSN EN 573-3+A1, *Hliník a slitiny hliníku - Chemické složení a druhy tvářených výrobků - Část 3: Chemické složení a druhy výrobků*. 2023.
- [24] ANDERSON, Kevin; WERITZ, John a KAUFMAN, J. Gilbert (ed.). *ASM Handbook, Volume 2B: Properties and Selection of Aluminum Alloys*. Online. ASM International, c2019. ISBN 978-1-62708-210-5. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.31399/asm.hb.v02b.9781627082105>. [cit. 2024-04-03].
- [25] *DATA AND FACTS FOR APPLICATION EN AW-7075*. Online. In: LEICHTMETALL. C2024. Dostupné z:



- <https://www.leichtmetall.eu/app/uploads/leichtmetall-data-sheet-EN-AW-7075.pdf>. [cit. 2024-04-07].
- [26] *DATA AND FACTS FOR APPLICATION EN AW-6082*. Online. In: LEICHTMETALL. C2024. Dostupné z: <https://www.leichtmetall.eu/app/uploads/leichtmetall-data-sheet-EN-AW-6082.pdf>. [cit. 2024-04-07].
- [27] *DATA AND FACTS FOR APPLICATION EN AW-2007*. Online. In: LEICHTMETALL. C2024. Dostupné z: <https://www.leichtmetall.eu/app/uploads/leichtmetall-data-sheet-EN-AW-2007.pdf>. [cit. 2024-04-07].
- [28] *Machinability Chart For Wrought Aluminum Alloys*. Online. In: Machining doctor. C2024. Dostupné z: <https://www.machiningdoctor.com/machinability/aluminum/>. [cit. 2024-05-17].
- [29] *Tyče 4 hranné ze slitin hliníku*. Online. ALMS s.r.o. C2022. Dostupné z: <https://www.alms-brno.cz/produkt/hlinik-tyce-4-hranne/>. [cit. 2024-05-17].
- [30] VDI. VDI/NCG 5211, *Prüfrichtlinien und Prüfwerkstücke für hochdynamische Bearbeitungen (HSC) - Fräsmaschinen und Bearbeitungszentren für 3-Achs-Bearbeitung*. 2013.
- [31] *G and M code references*. Online. In: Machmotion. Dostupné z: <https://machmotion.com/downloads/GCode/Mach4-G-and-M-Code-Reference-Manual.pdf>. [cit. 2024-05-22].
- [32] *Vysokovýkonné plasty*. Online. In: Ensingerplastics. C2024. Dostupné z: [https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.ensingerplastics.com%2Fcs-cz%2Fpolotovary%2Fvysokovykonne-plasty&psig=AOvVaw2-TEfU8TSi36VeAkRdRrb\\_&ust=1713792289945000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBiQjRxqFwoTCOjSq\\_G004UDFQAAAAAdAAAAABAS](https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.ensingerplastics.com%2Fcs-cz%2Fpolotovary%2Fvysokovykonne-plasty&psig=AOvVaw2-TEfU8TSi36VeAkRdRrb_&ust=1713792289945000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBiQjRxqFwoTCOjSq_G004UDFQAAAAAdAAAAABAS). [cit. 2024-04-21].
- [33] *Měď a její slitiny*. Online. In: Interspark. C2020. Dostupné z: [https://www.google.com/url?sa=i&url=http%3A%2F%2Fwww.interspark.cz%2Fprodukty%2Fmed-a-jeji-slitiny%2F&psig=AOvVaw0VkcglgumojxCxzjFGtCLy&ust=1713779961092000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=2ahUKEwjW7tn\\_hdOFaxVk\\_gIHHSOVCS0QjRx6BAgAEBY](https://www.google.com/url?sa=i&url=http%3A%2F%2Fwww.interspark.cz%2Fprodukty%2Fmed-a-jeji-slitiny%2F&psig=AOvVaw0VkcglgumojxCxzjFGtCLy&ust=1713779961092000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=2ahUKEwjW7tn_hdOFaxVk_gIHHSOVCS0QjRx6BAgAEBY). [cit. 2024-04-21].
- [34] *Hliníkové ploché tyče*. Online. In: Thesteel. C2024. Dostupné z: [https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.thesteel.com%2Fsk%2Fplny-tycovy-material%2Fplne-materialy%2Fploche%2Fhlinikove&psig=AOvVaw2v3ssM70ySd\\_2DhAjMV3Zt&ust=1713780033921000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=2ahUKEwjo\\_baihtOFaxVOvv0HHeKFCasQjRx6BAgAEBY](https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.thesteel.com%2Fsk%2Fplny-tycovy-material%2Fplne-materialy%2Fploche%2Fhlinikove&psig=AOvVaw2v3ssM70ySd_2DhAjMV3Zt&ust=1713780033921000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=2ahUKEwjo_baihtOFaxVOvv0HHeKFCasQjRx6BAgAEBY). [cit. 2024-04-21].



- [35] *Slotting Cutters Retailer from Chennai*. Online. In: ExportersIndia. Dostupné z: <https://www.exportersindia.com/a-t-s-tools-engineering/other-products.htm#6092810>. [cit. 2024-02-24].
- [36] *Solid carbide milling cutter*. Online. In: Direct Industry. C2024. Dostupné z: <https://www.directindustry.com/prod/oke-precision-cutting-tools-co-ltd/product-163351-2535908.html>. [cit. 2024-02-25].
- [37] *Diamond cutting tools*. Online. In: Meyco. C2013. Dostupné z: <https://www.meycotools.ch/wow/Produkte/Start/data1/images/wowslider2.jpg>. [cit. 2024-03-23].
- [38] *Throw-away milling cutter, HSS-E Co 8*. Online. In: CERATIZIT. Cutting Tool Solutions. Dostupné z: [https://cuttingtools.ceratizit.com/tr/en/products/50092100.html#/filters/\\_m/N%3AHN/\\_r-ISO\\_DC%3A%3AMM%3AIN/range%3A%3AMM%3A10%3AIN%3A10--%3A%3AMM%3A10%3AIN%3A10](https://cuttingtools.ceratizit.com/tr/en/products/50092100.html#/filters/_m/N%3AHN/_r-ISO_DC%3A%3AMM%3AIN/range%3A%3AMM%3A10%3AIN%3A10--%3A%3AMM%3A10%3AIN%3A10). [cit. 2024-05-21].
- [39] *End milling cutter HSS-E Co 8*. Online. In: CERATIZIT. Cutting Tool Solutions. Dostupné z: [https://cuttingtools.ceratizit.com/tr/en/products/50110060.html#/filters/\\_m/N%3AHN/\\_r-ISO\\_DC%3A%3AMM%3AIN/range%3A%3AMM%3A6%3AIN%3A6--%3A%3AMM%3A6%3AIN%3A6](https://cuttingtools.ceratizit.com/tr/en/products/50110060.html#/filters/_m/N%3AHN/_r-ISO_DC%3A%3AMM%3AIN/range%3A%3AMM%3A6%3AIN%3A6--%3A%3AMM%3A6%3AIN%3A6). [cit. 2024-05-21].
- [40] *Ball nosed end milling cutter HSS-E Co 8*. Online. In: CERATIZIT. Cutting Tool Solutions. Dostupné z: [https://cuttingtools.ceratizit.com/tr/en/products/50320060.html#/filters/\\_m/N%3AHN/\\_r-ISO\\_DC%3A%3AMM%3AIN/range%3A%3AMM%3A6%3AIN%3A6--%3A%3AMM%3A6%3AIN%3A6](https://cuttingtools.ceratizit.com/tr/en/products/50320060.html#/filters/_m/N%3AHN/_r-ISO_DC%3A%3AMM%3AIN/range%3A%3AMM%3A6%3AIN%3A6--%3A%3AMM%3A6%3AIN%3A6). [cit. 2024-05-21].



## 8 SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Technické parametry stroje SLV EDU [1]
- Příloha 2 Seznam G a M funkcí [31]
- Příloha 3 Technická dokumentace
- Příloha 4 NC program
- Příloha 5 Výpočty řezných podmínek
- Příloha 6 Fotodokumentace obrábění
- Příloha 7 Protokoly z měření