



# Robotické obrábění prostorových dílů

## Bakalářská práce

*Studijní program:* B2301 – Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* 2301R000 – Strojní inženýrství  
*Autor práce:* **Tomáš Jarkovský**  
*Vedoucí práce:* Ing. Marcel Horák, Ph.D.



# Originál zadání

# Originál zadání

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že texty tištěné verze práce a elektronické verze práce vložené do IS STAG se shodují.

23. 6. 2019

Tomáš Jarkovský

## **Poděkování**

Rád bych nejprve poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Marcelu Horákovi, Ph.D. za odborné vedení práce, cenné rady, trpělivost a hlavně za čas, který věnoval mé práci.

V neposlední řadě bych rád vyjádřil svůj dík panu Ing. Ondřeji Matúškovi, Ph.D. za vedení při realizaci praktické části této práce i jeho rady a čas, které mi poskytl.

Na závěr bych rád poděkoval své rodině, přítelkyni Bc. Barboře Šedivé a její rodině za podporu při mém dosavadním studiu na fakultě strojní.

## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývá analýzou možností využití robotů v obráběcích procesech a následným návrhem laboratorního pracoviště pro využití angulárního robotu k frézování prostorových dílů. Dále je zde předložen koncepční návrh laboratorního pracoviště a mechanických uzlů, jako je stůl s upínací deskou nebo mezipříruba ke spojení vysokootáčkového vřetene, 6-osého senzoru pro měření sil a momentů a příruby samotného angulárního robotu. Ke všem mechanickým uzlům byla zpracována konstrukční dokumentace. Nakonec je v práci uveden postup při vytváření programu v SW SprutCAM a následná výroba jednoduché formy pro difuzor mezi chladič a ventilátor studentské formule.

Klíčová slova: Koncový efektor, Robotické obrábění, SprutCAM, Robot KUKA, Studentská formule

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with analysis of robot application in milling processes. Furthermore it presents a design of laboratory workplace for application of angular robot spatial parts milling. Conceptual design of laboratory workplace and mechanical parts are presented as a table with clamp desk or part between high-speed spindle, 6-axis sensor for measuring forces and moments and flange of robot itself. There is also a structural documentation of all mechanical parts. Finally, creation process of a new program in SW SprutCAM and further production of simple mold for difusor between radiator and ventilator of student formula are presented.

Keywords: End efector, Robotical milling, SprutCAM, KUKA Robot, Student formula

# OBSAH

Seznam použitých zkratk a značek .....	8
Úvod .....	9
1. Základní analýza možností využití robotů v obráběcích procesech.....	10
1.1. Využití robotů v obráběcích procesech.....	10
1.2. Technologie obrábění.....	12
1.3. Efektor.....	15
1.4. Programování robotu .....	15
1.4.1. Online programování .....	15
1.4.2. Offline programování.....	16
2. Návrh laboratorního pracoviště.....	17
2.1. Robot.....	17
2.2. Vřeteno .....	20
2.3. Mezipříruba pro vřeteno.....	21
2.4. Stůl s upínací deskou .....	21
2.5. Obrobek.....	24
2.6. Sestava laboratorního pracoviště .....	25
3. Realizace laboratorního pracoviště .....	26
4. SprutCAM.....	27
4.1. Volba nástrojů a řezných podmínek .....	27
4.2. Kleštinový upínač .....	29
4.3. Import dílce a nastavení polotovaru.....	29
4.4. Nastavení souřadného systému.....	32
4.5. Výběr obráběcího stroje .....	33
4.6. Obráběcí strategie formy .....	34
4.6.1. Frézování čela.....	34
4.6.2. Hrubování v Z – řezech.....	37
4.6.3. 5D Obrábění povrchů.....	38
5. Výsledek obrábění.....	40
Závěr a zhodnocení přínosu práce.....	43
Seznam použitých zdrojů.....	44
Seznam příloh .....	45

## Seznam použitých zkratek a značek

Zkratka	Význam
\$BASE	báze – souřadný systém
\$TOOL	definice nástroje
\$VEL.CP	rychlost pohybu
3D	trojrozměrný
5D	pětirozměrný
$a_p$	hloubka záběru [mm]
CAD	počítačová podpora projektování
CAM	počítačová podpora obrábění
CIRC	kruhový pohyb
CNC	počítačové číslicové řízení
d	průměr [mm]
$f_z$	posuv na zub [mm]
HW	hardware
I/O	vstup/výstup
KRL	Kuka Robot Language – programovací jazyk
l	délka [mm]
LIN	lineární pohyb
n	otáčky vřetene [ $\text{min}^{-1}$ ]
NC	číslicové řízení
PTP	lineární pohyb
r	poloměr frézy [mm]
SS	souřadný systém
SW	software
$v_f$	rychlost posuvu [mm/s]
z	počet zubů [-]



## Úvod

Předkládaná bakalářská práce je rozčleněna do pěti hlavních kapitol a závěru. V kap. 1 je provedena analýza možností využití robotů v obráběcích procesech.

V kap. 2 je podrobně popsán návrh laboratorního pracoviště. Jsou zmapovány aktivity spojené s výběrem angulárního robotu, výběrem vřetene, návrhem stolu s upínací deskou a koncepcí mechanického uzlu mezi vřetenem a 6-osým senzorem pro měření sil a momentů, který je připevněn na přírubě robotu a konstrukční dokumentace mechanických komponent. 3D modely jsou vytvořeny v SW produktu Autodesk Inventor Professional 2018.

Kap. 3 popisuje aktivity spojené s realizací navrženého laboratorního pracoviště, během které bylo nutné provést základní propojení dílčích HW komponent a SW nastavení řídicího systému robotu a vřetene.

V kap. 4 se práce zabývá off-line programováním v CAM softwaru SprutCAM, kde je popsáno programování obrábění prostorového dílu, konkrétněji formy pro následnou laminaci kompozitu z uhlíkových vláken a simulací obráběcího procesu.

Kap. 5 popisuje průběh reálného obráběcího procesu, charakterizuje dílčí problémy, jejich řešení a v závěru prezentuje dosažený výsledek, kterým je forma pro výrobu kompozitového difuzoru.

V závěru práce jsou specifikovány výhody a přínosy navrženého řešení laboratorního pracoviště v porovnání s obráběcími procesy na konvenčních strojích.

# 1. Základní analýza možností využití robotů v obráběcích procesech

## 1.1. Využití robotů v obráběcích procesech

Průmyslové roboty v současné době prezentují polohovací systémy s vysokou přesností polohování a flexibilitou pohybu v závislosti na uspořádání kinematického řetězce, úrovni pohonů a konfiguraci řídicího systému. Podle aplikačního nasazení je nutné přírubu robotu osadit specifickým typem efektoru, odpovídajícím dané výrobní nebo servisní operaci.

Roboty jsou obecně využívány v celé řadě odvětví od manipulace po nejrůznější technologické i montážní operace.

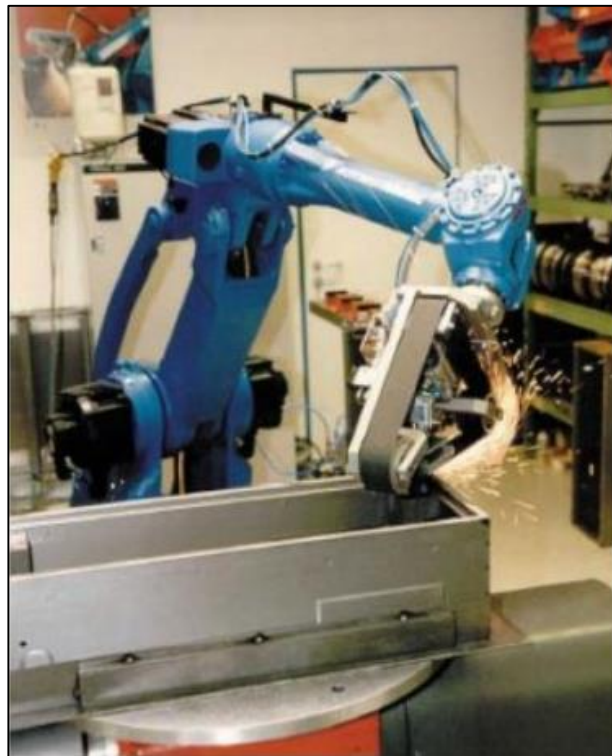
Podle průzkumu na internetové síti a odborných člancích se roboty nejčastěji využívají v těchto obráběcích procesech [2]:

- Frézování,
- Vrtání,
- Závítování,
- Gravírování,
- Řezání (pila, laser, plasma, vodní paprsek),
- Broušení,
- Leštění,
- Tryskání.

Z obráběných materiálů lze technologie použít jak pro kovové materiály od slitin hliníku až po různé oceli (omezeně), tak pro obrábění plastů, skla, dřeva, nerostů i kompozitních materiálů [5].



Obr. 1 Robot při frézování prototypu automobilu [3]



Obr. 2 Robot při broušení [4]

V obráběcích procesech se nejčastěji užívají průmyslové roboty s multiúhlovým kinematickým řetězcem (antropomorfní, angulární), které mají 6 stupňů volnosti (po připojení na pojezdové ústrojí 7 stupňů volnosti – obr. 1), tudíž je jejich velkou výhodou dobrá manévrovatelnost v prostoru. Tyto roboty nejsou určeny k nahrazení současných obráběcích center, kterým nemohou konkurovat z hlediska tuhosti a přesnosti, ale mohou je doplnit nebo nahradit tam, kde nejsou centra vhodným řešením, například obráběním tvarově složitých nebo rozměrných dílů (obr. 3) [5][6].



Obr. 3 Robot KUKA s pojezdem [6]

## 1.2. Technologie obrábění

Obrábění všeobecně je technologický proces, při kterém řezná síla vtlačuje nástroj ve tvaru řezného klínu do povrchu polotovaru a odebírá z něj při vzájemném pohybu polotovaru a nástroje materiál v podobě třísky. Obrábění se uskutečňuje v soustavě *stroj – nástroj – obrobek*. Existují ale ovšem i technologie, které této definici neodpovídají, jako je řezání laserem, elektroerozivní obrábění, řezání vodou nebo i chemické obrábění (obr. 4, obr. 5). Tyto technologie nejsou až tak běžné, ale jejich používání roste [1].

Obrábění se dělí na několik specifických technologií, jako jsou například frézování, soustružení, řezání, vrtání, hoblování, obrážení, broušení apod. Tato bakalářská práce se věnuje technologii frézování.

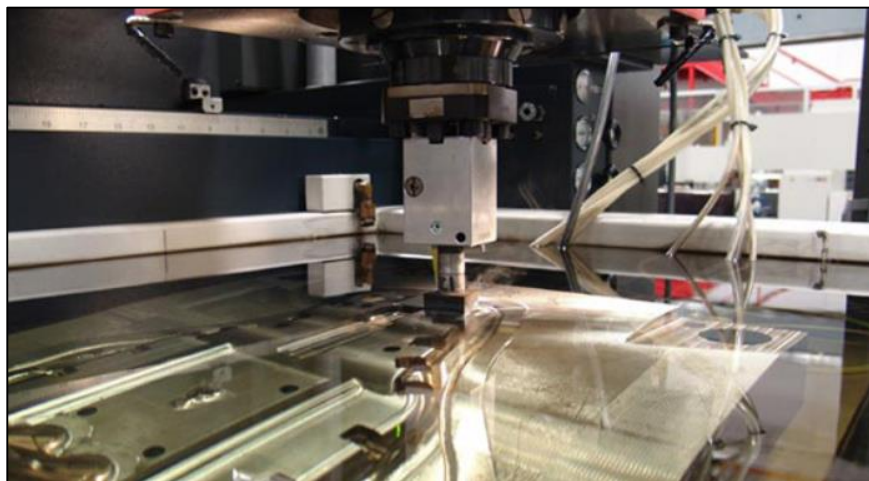
Frézování je třískové obrábění vnitřních nebo vnějších rovinných a tvarových ploch (drážek, závitů, zubů ozubených kol atd.) vícebřitým nástrojem – frézou [1].

Hlavní pohyb nástroje (frézy) je rotační (otáčivý). Obrobek upnutý na pracovním stole stroje (frézky) vykonává vedlejší pohyb – plynulý pohyb – posuv. Posuv může být přímočarý nebo kruhový. Výsledný řezný pohyb má tvar cykloidy. V konkrétním případě však robot koná všechny tyto pohyby, protože obrobek je pevně připevněn k upínacímu stolu [1].

Pro frézování jsou důležité řezné podmínky, tzn. zvolit správné otáčky, rychlosti posuvů, vhodný typ nástroje.



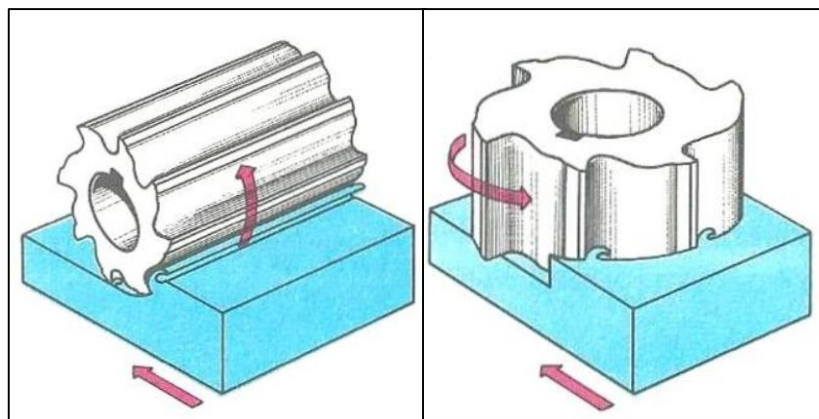
Obr. 4 Příklad konvenční technologie – frézování [16]



Obr. 5 Příklad nekonvenční technologie – elektroerozivní obrábění [17]

Řezný proces je přerušovaný, jednotlivé zuby nástroje postupně vcházejí a vycházejí z materiálu a odebírají třísku proměnného průřezu. Z hlediska chvění je výhodné, je-li v záběru s obrobkem více břitů současně. Rovinné plochy se frézují válcovými a čelními frézami, tvarové plochy zpravidla tvarovými frézami [1].

Obecně jsou používány dva základní typy frézování [1]:



Obr. 6 Frézování obvodem válcové frézy (vlevo) a frézování čelem čelní frézy (vpravo)

[15]

- a) **Frézování obvodem válcové frézy** – fréza řeže zuby na obvodu. Osa nástroje bývá obvykle rovnoběžná s obrobenou plochou. Při tomto způsobu frézování je stroj nerovnoměrně zatížen ubíráním třísky, proto dochází k nepatrnému obvodovému házení, na frézované ploše vzniká vlnitá stopa (obr. 6).
- b) **Frézování čelem čelní frézy** – fréza řeže současně zuby umístěnými na obvodu a na čele nástroje. Stroj je rovnoměrně zatížen, proto je při tomto způsobu frézování vyšší řezný výkon a frézovaná plocha má vyšší kvalitu povrchu. Tento způsob se využívá přednostně (obr. 6).

Dále dělíme frézování podle smyslu otáčení frézy vůči posuvu obrobku (u robotu frézy) na [1]:

- a) **Sousledné frézování** – fréza se otáčí ve smyslu posuvu, zuby se postupně zařezávají do maximální tloušťky, tříska se tedy postupně zmenšuje a tím klesá namáhání břitu (obr. 7).

#### **Výhody:**

- Obrobená plocha je hladší,
- Příznivé působení řezné síly,
- Vyšší trvanlivost nástroje.

#### **Nevýhody:**

- Silové rázy (odstraníme šikmými zuby),
- Vymezení vůle u posunového mechanismu,
- Požadavek na tuhost soustavy stroj - nástroj - obrobek,
- U polotovarů s tvrdou povrchovou vrstvou nevhodný.

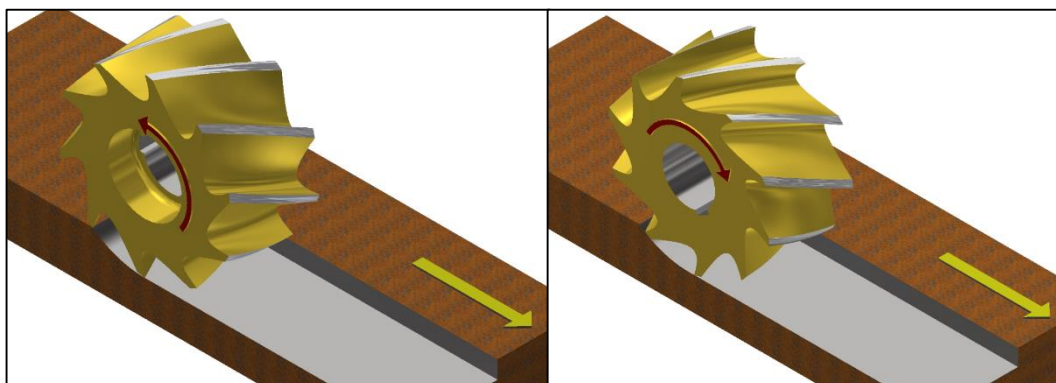
- b) **Nesousledné frézování** – fréza se otáčí proti smyslu posuvu, průřez třísky se postupně zvětšuje od nuly do maximální tloušťky (obr. 7).

#### **Výhody:**

- Nepůsobí rázy (klidný záběr),
- Nižší požadavek na tuhost soustavy stroj - nástroj - obrobek,
- vhodný pro polotovary s tvrdou povrchovou vrstvou.

#### **Nevýhody:**

- Kvalita obrobené plochy je nižší,
- Nepříznivé působení řezné síly,
- Nižší trvanlivost nástroje.



Obr. 7 Sousedné (vlevo) a nesousledné (vpravo) frézování [1]

### 1.3. Efektor

Efektor je koncovým členem každého průmyslového robotu (i manipulátoru), který slouží ke komunikaci robotu s okolím. Dle použití v průmyslových aplikacích se efektor dělí na [11]:

- Úchopné hlavice,
- Technologické hlavice,
- Kontrolní hlavice,
- Speciální hlavice.

Koncový efektor se vždy navrhuje podle konkrétní aplikace. Vzhledem k účelu této práce je robot osazen hlavicí technologickou, která je využita k technologii frézování (vřeteno).

### 1.4. Programování robotu

Robot vykonává činnost podle předem připraveného programu. Program lze definovat jako sled jednotlivých příkazů, které vedou k požadovanému cíli. Podle přístupu k tvorbě programu se programování dělí na [10]:

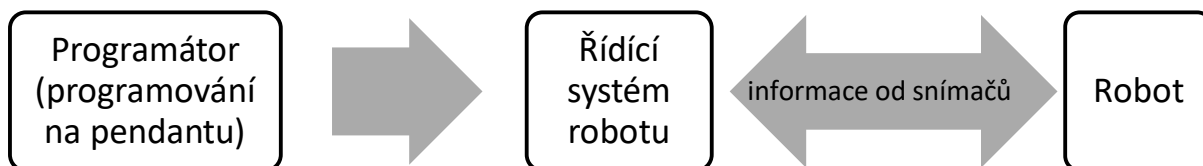
- On-line programování (programování u robotu prostřednictvím pendantu),
- Off-line programování (programování mimo robot prostřednictvím PC).

#### 1.4.1. Online programování

Online programování je vykonávání přímého navádění robotu operátorem přes požadované body. Robot je ručně řízen z ovládacího pendantu, naváděný do jednotlivých

bodů, které se zapisují do paměti řídicího systému. Následně je programováno řízení efektorů, periferních zařízení a logických částí řízení robotu (obr. 8) [10].

Výhodou tohoto programování je práce v reálném prostředí s možností testování funkčnosti. Nevýhody tohoto přístupu jsou dlouhé doby programování při složitých pohybech a dlouhých cyklech a náročnost pro obsluhu robotu [10].



Obr 8. Postup online programování robotů [10]

#### 1.4.2. Offline programování

Off-line programování se vykonává mimo robot za pomoci PC a softwaru k tomu určený (obr. 9).

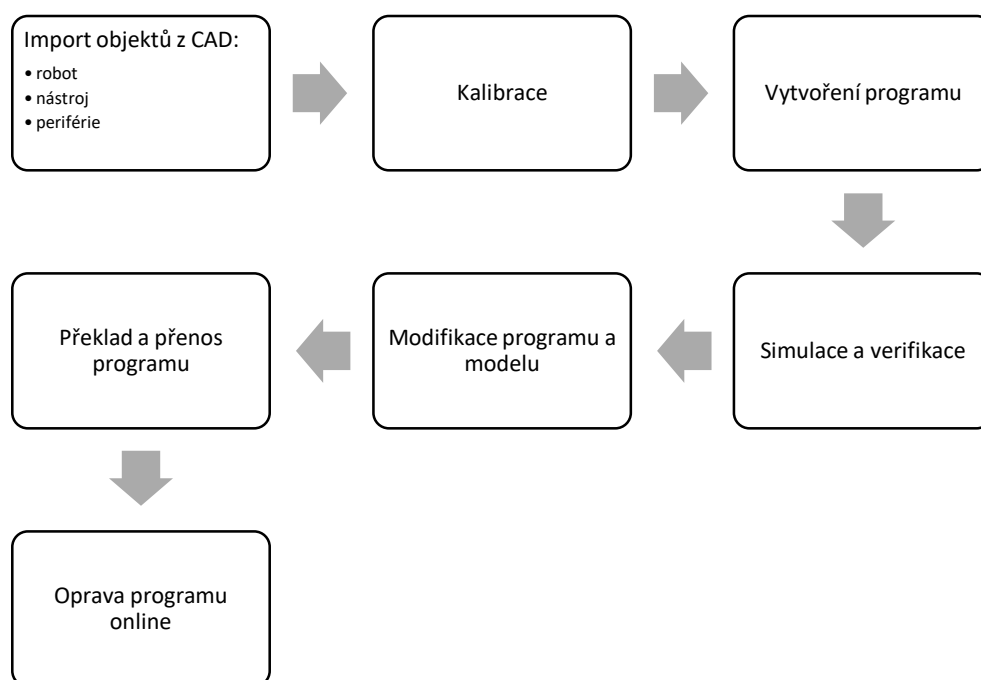
Pro CNC (Computer Numeric Control) obrábění složitějších dílů, které se nedají naprogramovat přímo ve stroji, se všeobecně používá CAD/CAM (Computer Aided Design / Computer Aided Manufacturing).

V CAD softwaru jsou připraveny objekty, které jsou následně přeneseny (např. v univerzálním formátu STEP) do prostředí off-line programování robotu (např. SprutCAM, RobotMaster, KukaSim, atd.) [10].

V CAM softwaru je vytvořen 3D model pracoviště, kde jsou nadefinovány vstupní parametry (obrobek, polotovár, řezné podmínky, způsob upnutí, nástroje) a samotný stroj, na kterém se bude obrobek vyrábět, který pak vytvoří ideální dráhy nástroje. Samotný CAM software nemůže fungovat, proto musí mít převodník mezi CAM softwarem a datovým jazykem konkrétního obráběcího stroje, který se nazývá postprocesor. Po překladu kódu pomocí postprocesoru je kód nahrán přímo do operačního systému výkonového zařízení.



Obrovskou výhodou off-line programování je možnost simulace celého procesu obrábění, kde lze detekovat kolize a ověřovat změny. Další výhodou je možnost programování složitých dílců [10].



Obr. 9 Postup v offline programování [10]

## 2. Návrh laboratorního pracoviště

V této kapitole je popsána koncepce laboratorního pracoviště a vysvětleny jednotlivé komponenty.

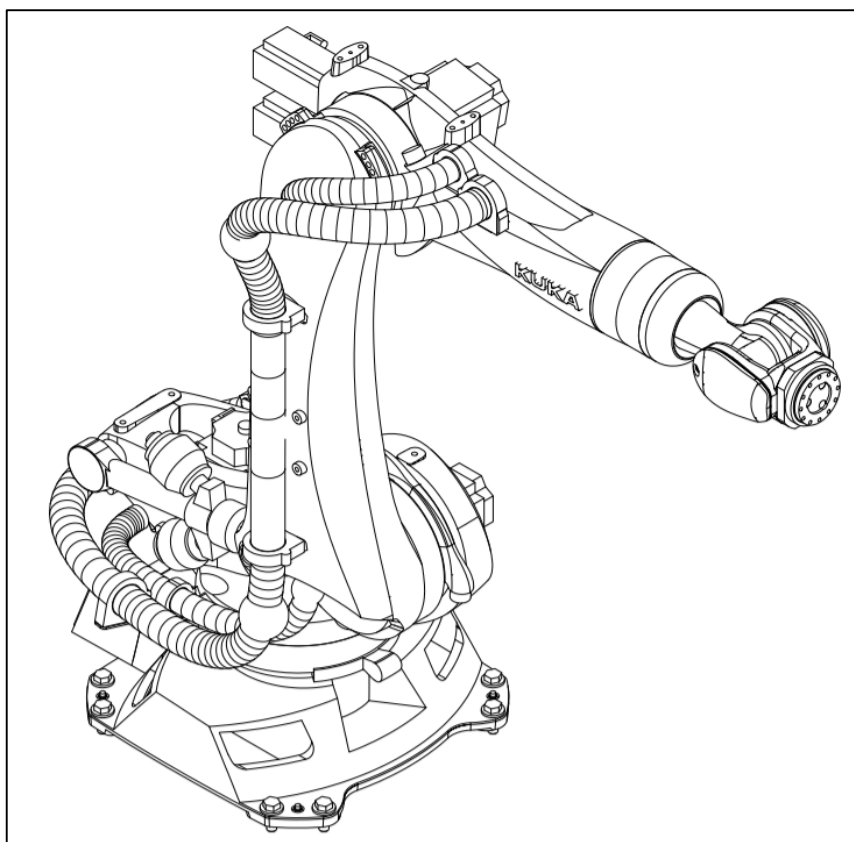
### 2.1. Robot

Pro laboratorní pracoviště byl vybrán angulární robot firmy KUKA, konkrétně model KR90 R2700 (obr. 11). Tento robot vyhovoval svými vlastnostmi pro využití v obrábění, již byl dříve používán pro broušení plochého skla. Pro dosažení optimální polohy robotu oproti upínací desce pracovního stolu byl robot nainstalován na robustní ocelový rám a byla provedena výchozí nivelace robotu v prostoru. Pro minimalizaci znečištění robotu vlivem prachových částic vznikajících během obrábění byl kinematický řetězec robotu zakrytován.

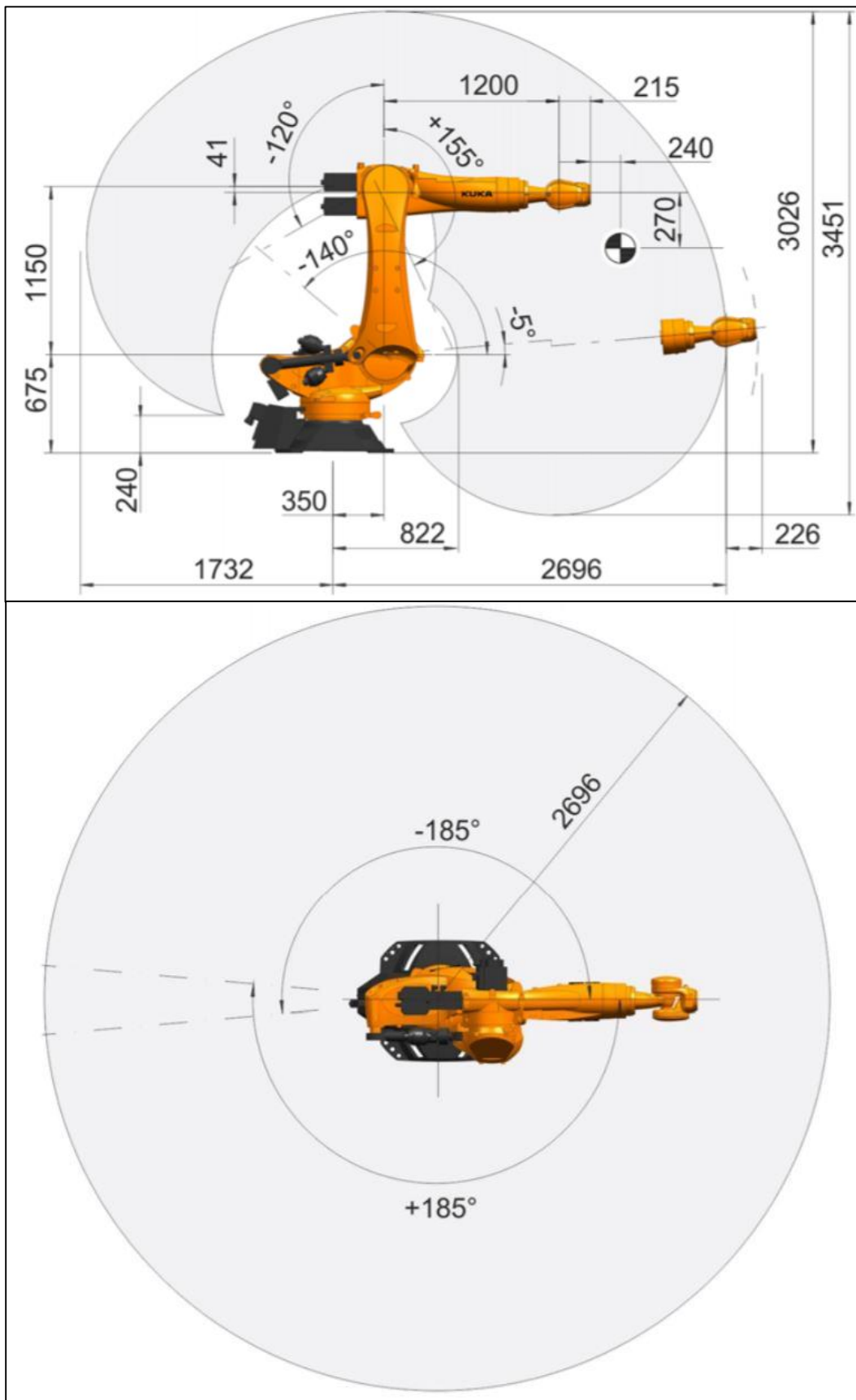
Robot KUKA KR90 R2700 má dosah 2696 mm, což je pro konkrétní aplikaci této bakalářské práce naprosto dostačující. Pracovní prostor, včetně rozměrů pracovního prostoru a rozsahu natočení os, je zobrazen na obr. 12.

Tab. 10 Vlastnosti robotu KUKA KR90 R2700 [7]

<b>Nosnost</b>	90 kg
<b>Jmenovité celkové zatížení</b>	140 kg
<b>Maximální dosah</b>	2696 mm
<b>Počet ovládatelných os</b>	6
<b>Přesnost opakovaného nastavení polohy</b>	$\pm 0,06$ mm
<b>Hmotnost</b>	1058 kg
<b>Řídicí systém</b>	KR C4
<b>Montážní poloha</b>	Podlaha



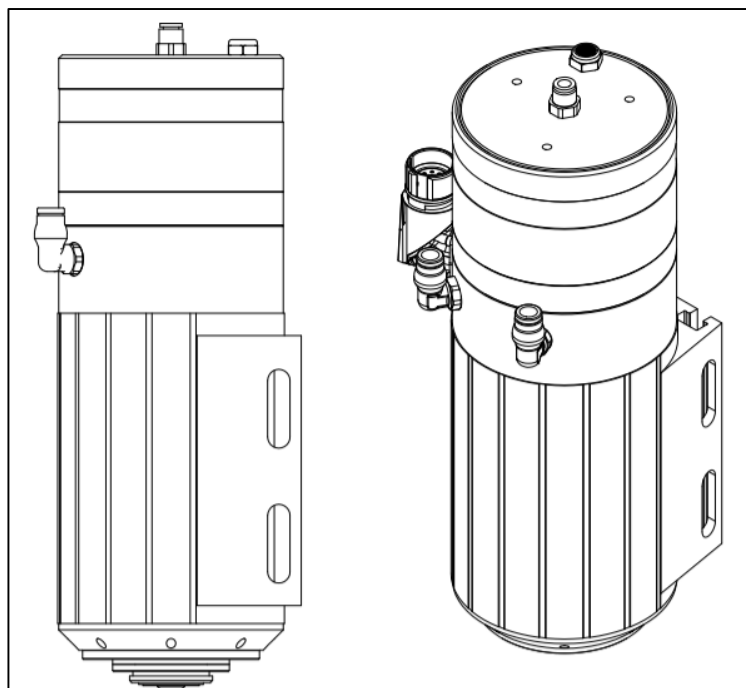
Obr. 11 Robot KUKA KR90 R2700 [7]



Obr. 12 Pracovní prostor robotu KUKA KR90 R2700 [7]

## 2.2. Vřeteno

Pro laboratorní pracoviště bylo využito vysokootáčkové vřeteno německé značky Jäger, konkrétně typ Chopper 2300-40 HSK S5 (obr. 13) s ruční výměnou nástrojů a pneumatickým upnutím, které bylo k dispozici. Využívá se pro vysokorychlostní frézování, broušení, vrtání a rytí (gravírování) různých materiálů [8].



Obr. 13 Vysokootáčkové vřeteno Jäger Chopper 2300-40 HSK S5 [8]

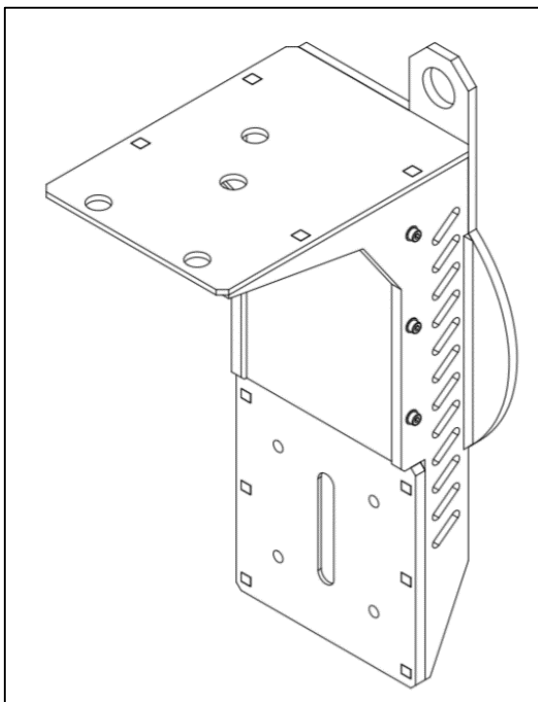
Tab. 14 Charakteristika vřetene Jäger Chopper 2300-40 HSK S5 [8]

Maximální výkon	3,5 kW
Maximální otáčky	40000 min <sup>-1</sup>
Hodnota zrychlení/ brzdění za sekundu	10000 min <sup>-1</sup>
Provozní teplota prostředí	+10° C až +45° C
Váha	Asi 7 kg
Chlazení	Chlazeno kapalinou
Maximální průměr pro upnutí	12 mm

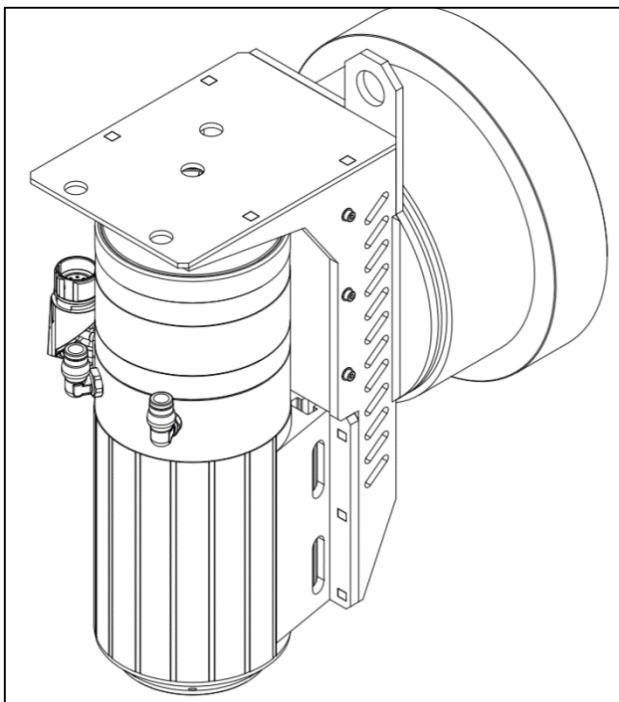
### 2.3. Mezipříruba pro vřeteno

Pro instalaci vřetene byla navržena specifická mezipříruba (obr. 15) mezi vřeteno a přírubu průmyslového robotu, resp. přírubu 6-osého senzoru sil a momentů, která bude dostatečně tuhá pro frézování (obr. 16). Na základě analýzy připojovacích rozměrů byla mezipříruba navržena jako ocelový svařenec sestávající ze sedmi hlavních dílů s hmotností cca 4 kg (výkresy přílohy).

Z pohledu technologie výroby svařence byla zvolena velmi zajímavá koncepce řešení využívající spojování jednotlivých laserem vypalovaných ocelových dílů prostřednictvím specifických zámků, ve kterých je následně konstrukce fixována bodovými svary. Uvedený postup minimalizuje vznik deformací a nároky na dodatečné obrábění. Zároveň lze realizovat velmi tuhé konstrukční celky s minimální hmotností. Výkresová dokumentace je uvedena v příloze.



Obr. 15 Mezipříruba pro vřeteno



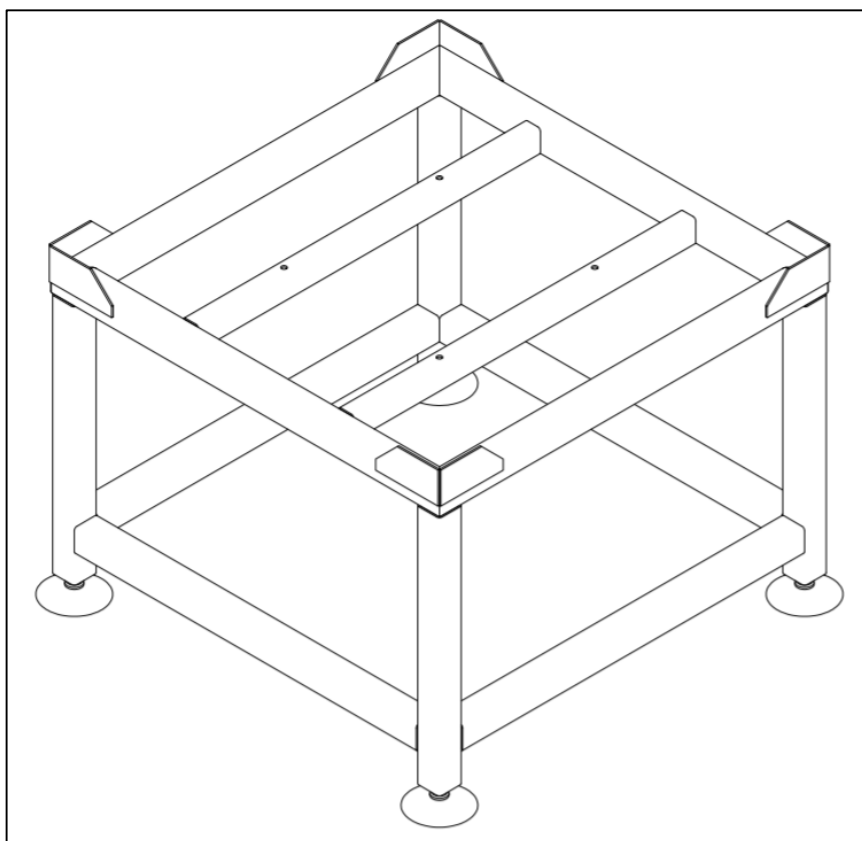
Obr. 16 Sestava mezipříruba, vřetene a 6-osého senzoru

### 2.4. Stůl s upínací deskou

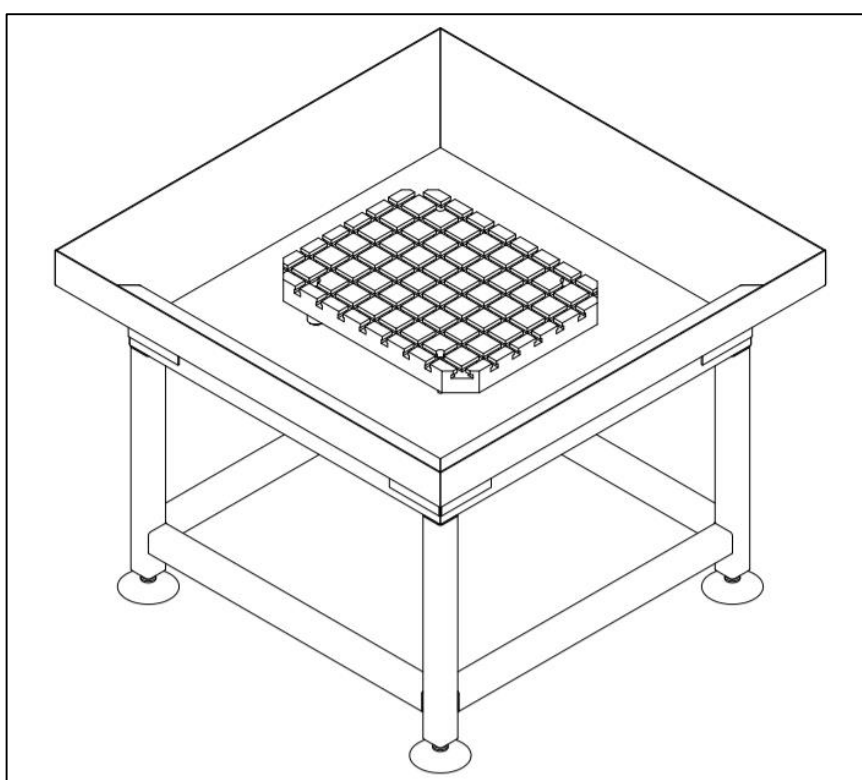
V této části se práce zabývá konstrukcí stolu a výběrem upínací desky pro obrábění prostorového dílu. Tento stůl byl zkonstruován tak, aby měl dostatečnou tuhost a přiměřený vnitřní prostor pro obrábění. Stůl disponuje pracovním prostorem 1234 x 1234 mm (obr. 19).

Upínací deska byla vybrána z katalogu firmy Erwin Halder KG, konkrétně typ V70eco 1203.500 s rozměry ocelové desky 630 x 500 x 60 mm s T-drážkami (rozměry obr. 17) [9].





Obr. 18 Rám stolu



Obr. 19 Sestava stolu s upínací deskou

## 2.5. Obrobek

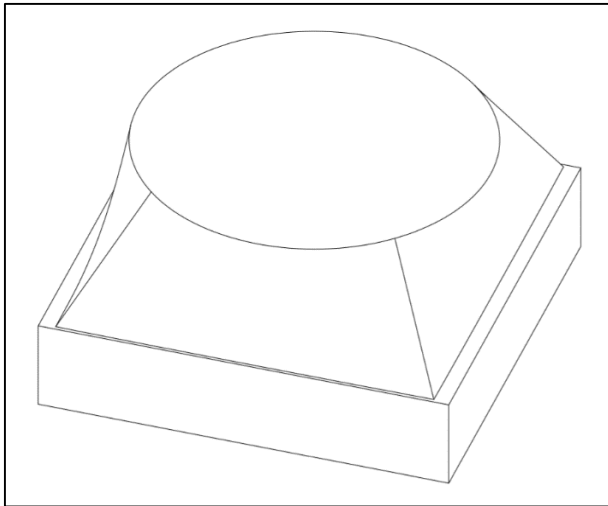
Pro laboratorní pracoviště bylo zvoleno obrábění formy pro díl, který navádí vzduch z ventilátoru na chladič studentské formule týmu FS TUL Racing (obr. 22). Díl bude vyroben z uhlíkového kompozitu a bude umístěn na nejnovějším modelu studentské formule na Technické Univerzitě v Liberci. Forma tohoto obrobku (obr. 21) je z umělého dřeva od firmy Ebalta GmbH, která je vhodná pro ruční laminaci i obrábění [12].

Z katalogu firmy Ebalta GmbH byl vybrán model Ebaboard 0700, který má velmi dobré vlastnosti při obrábění. Tento materiál má hutný povrch, dobrou stabilitu hran a nízkou tvorbu prachu při opracování. Použití tohoto materiálu je značně široké. Používá se na různé druhy modelů (mateční, slévárenské, design, architektonické), pro CNC obrábění a vakuové tváření. Vlastnosti tohoto materiálu jsou uvedeny v tab. 20. Polotovarem jsou nařezané desky o rozměrech 285 x 280 x 50 mm, které byly nakonec slepeny. Při vytváření polotovaru byl zohledněn i přírůstek pro obrábění [12].

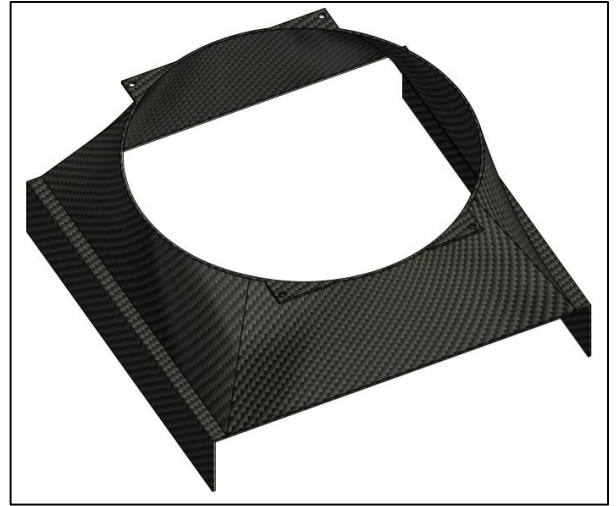
Tab. 20 Vlastnosti materiálu Ebaboard 0700 [12]

<b>Barva</b>	červeno hnědá
<b>Hustota směsi při 20° C</b>	0,70 ± 0,02 kg/dm <sup>3</sup>
<b>Pevnost v ohybu</b>	25 ± 2 MPa
<b>E – modul (zkouška ohybem)</b>	1250,0 ± 0,2 MPa
<b>Pevnost v tlaku</b>	20,0 ± 0,2 MPa
<b>Tvrdost Shore</b>	61 ± 2 D při 20°C
<b>Koeficient délkové roztažnosti</b>	cca. 49*10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>
<b>Ohyb při ohnutí</b>	4,0 ± 0,2 %





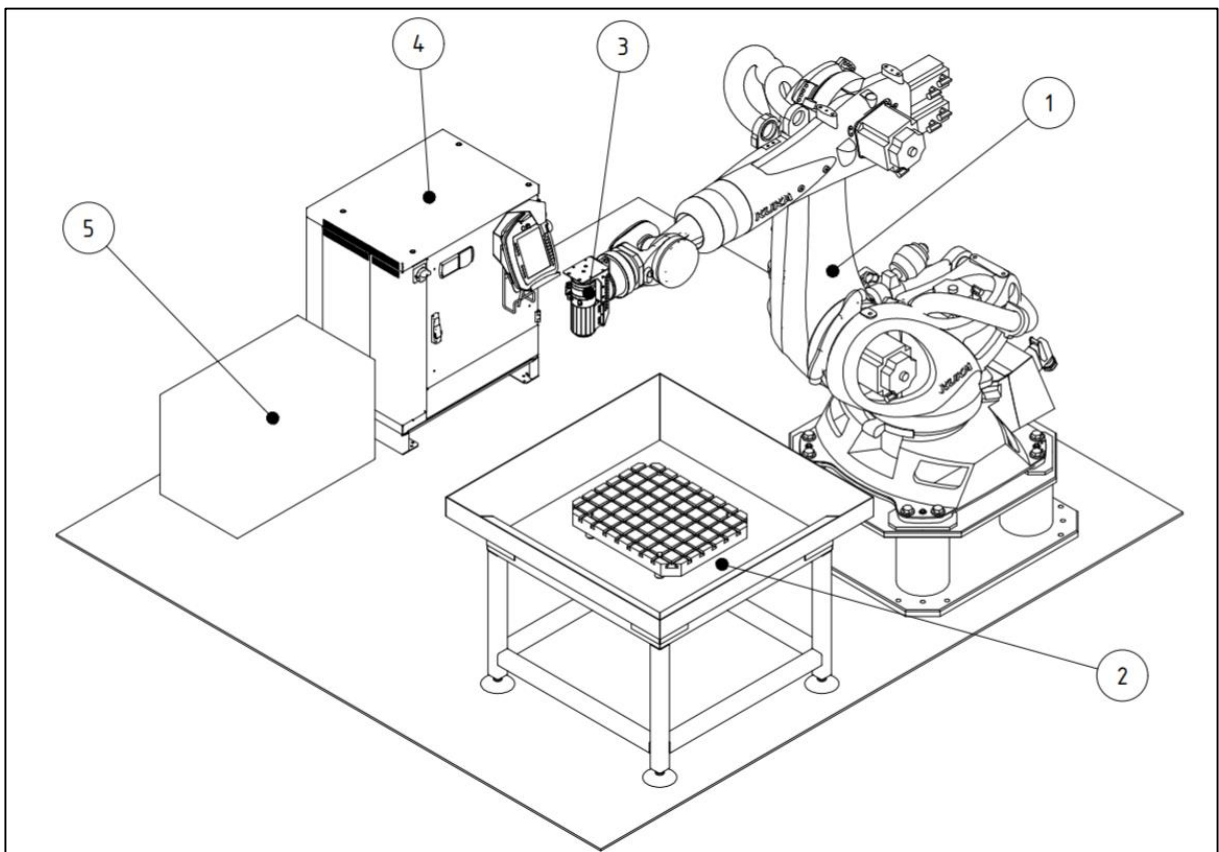
Obr. 21 Obrobek – forma



Obr. 22 Výsledný model dílu z uhlíkového kompozitu

## 2.6. Sestava laboratorního pracoviště

Po výběru a konstrukci jednotlivých komponent sestavy bylo navrženo laboratorní pracoviště pro obrábění prostorových dílců pomocí robotu (obr. 23).



Obr. 23 Sestava laboratorního pracoviště: 1 – Robot KUKA KR90 R2700, 2 – Sestava stolu s upínací deskou, 3 – Sestava vřetene s mezipřírubou a senzorem, 4 – Řídicí systém KUKA KR C4, 5 – Řídicí systém vřetene.

### 3. Realizace laboratorního pracoviště

V souladu se zpracovaným konceptem pracoviště a na základě výrobní dokumentace byla zajištěna výroba uvedených funkčních celků a sestaveno laboratorní pracoviště, jak je patrné z obr. 24.

Kromě montáže hlavních komponent laboratorního pracoviště bylo nutné realizovat elektrické propojení I/O modulů mezi řídicím systémem robotu a vřetena. Byl zapojen chladicí okruh a pneumatický obvod pro ovládání upínací kleštiny nástroje.

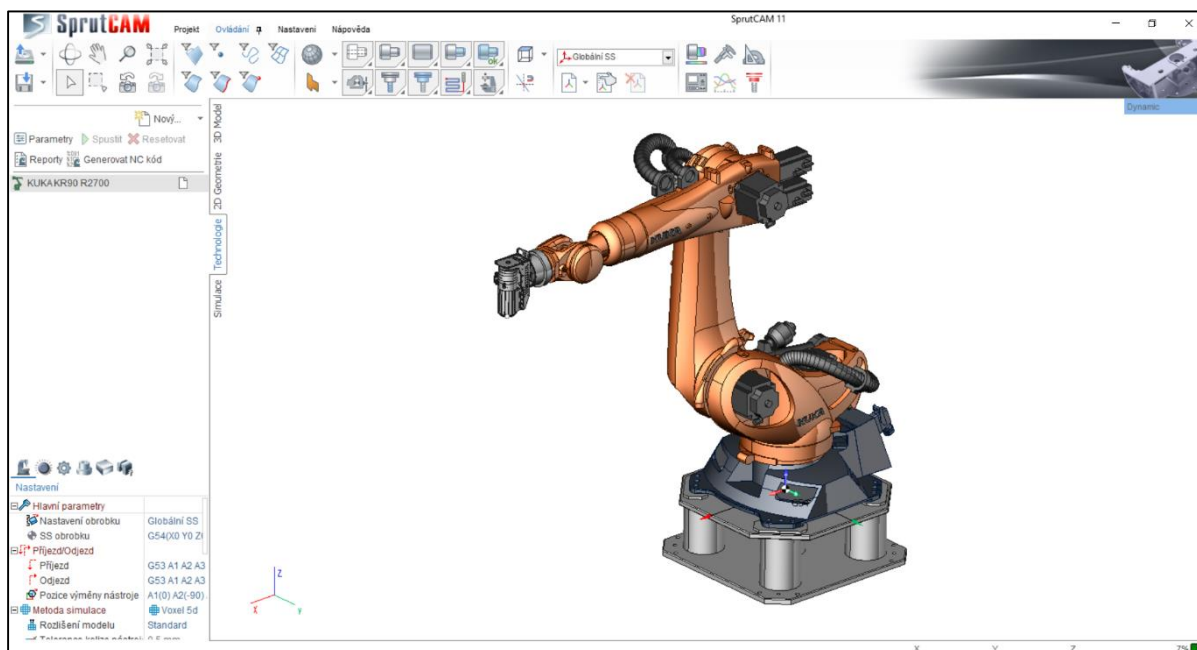


Obr. 24 Laboratorní pracoviště

## 4. SprutCAM

K programování robotů a všeobecně obráběcích center slouží mnoho CAM softwarů. Pro účely této bakalářské práce byl zvolen program SprutCAM 11, který má Katedra sklářských strojů a robotiky k dispozici. Pro práci v tomto prostředí bylo nutné vytvořit kinematické schéma robotu KUKA KR90 R2700 s vřetenem Jäger Chopper 2300-40 HSK S5.

Pracovní prostředí tohoto programu je uživatelsky velmi přívětivé (obr. 25). Nový program lze vytvořit kliknutím na *Projekt* a následně *Vytvořit nový projekt*.



Obr. 25 Pracovní prostředí programu SprutCAM s modelem robotu

### 4.1. Volba nástrojů a řezných podmínek

Pro obrábění obecných ploch a jiných prostorových dílů se používají stopkové frézy. Pro potřeby bakalářské práce byly vybrány dvě frézy a to konkrétně stopková válcová fréza pro hrubování a stopková fréza s kulovou hlavou pro dokončování.

Připravené laboratorní pracoviště neumožňuje automatickou výměnu nástrojů. Proto byl program rozdělen na dvě části, každá s jedním nástrojem. Každý nástroj má svůj vlastní upínač, čímž bude chyba při výměně nástroje minimalizována.

Vřeteno má omezené možnosti výběru nástroje. Fréza je fixována v nástrojovém upínači prostřednictvím kleštiny a převlečné matice. Vysunutí se nastavuje ručně v kleštině posuvným měřidlem.

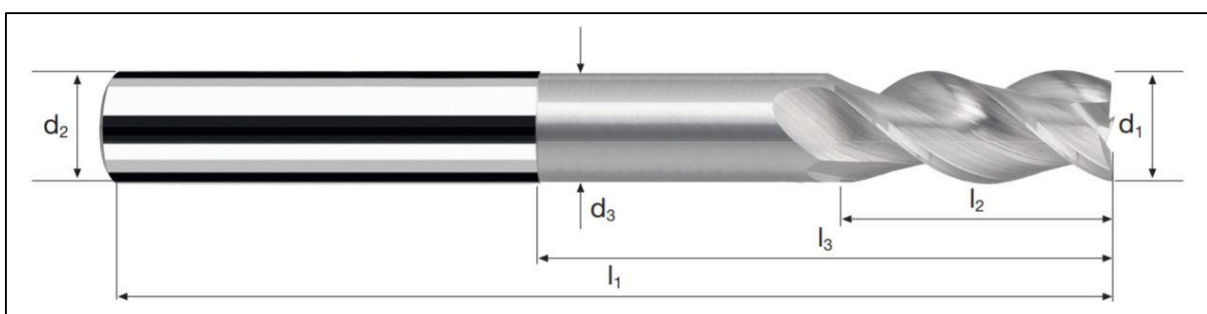
Pro obrábění byly vybrány frézy od firmy Fraisa SA. Hrubovací válcovou frézou a dokončovací kulovou frézou (tab. 26, obr. 27, obr. 28).

Tab. 26 Rozměry fréz Fraisa

Fréza	Označení	$d_1$ [mm]	$d_2$ [mm]	$d_3$ [mm]	$l_1$ [mm]	$l_2$ [mm]	$l_3$ [mm]	$z$	$r$ [mm]
Válcová	15559501	12	12	11	110	26	64	3	
Kulová	C5292391	8	8	7,4	90	16	26	2	4



Obr. 27 Rozměry kulové frézy Fraisa C5292391 [13]



Obr. 28 Rozměry válcové frézy Fraisa 15559501 [13]

Řezné podmínky pro frézování těmito frézami jsou snadno dostupné z katalogu produktů od firmy Fraisa SA. Výrobce těchto nástrojů uvádí v nástrojových listech doporučené řezné podmínky pro několik materiálů (slitiny hliníku, měď, termoplasty). Pro díl v této bakalářské práci bylo zvoleno umělé dřevo, které je vlastnostmi podobné termoplastu, proto byly řezné podmínky nastaveny jako při frézování termoplastu (tab. 29).

Tab. 29 Optimální řezné podmínky dle výrobce Fraisa pro termoplasty

Fréza	Označení	$f_z$ [mm]	$a_p$ [mm]	$a_e$ [mm]	$n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	$v_f$ [mm / min]
Válcová	15559501	0,160	18,00	3,00	26525	12730
Kulová	C5292391	0,075	0,22	0,22	39790	5970

Význam symbolů:

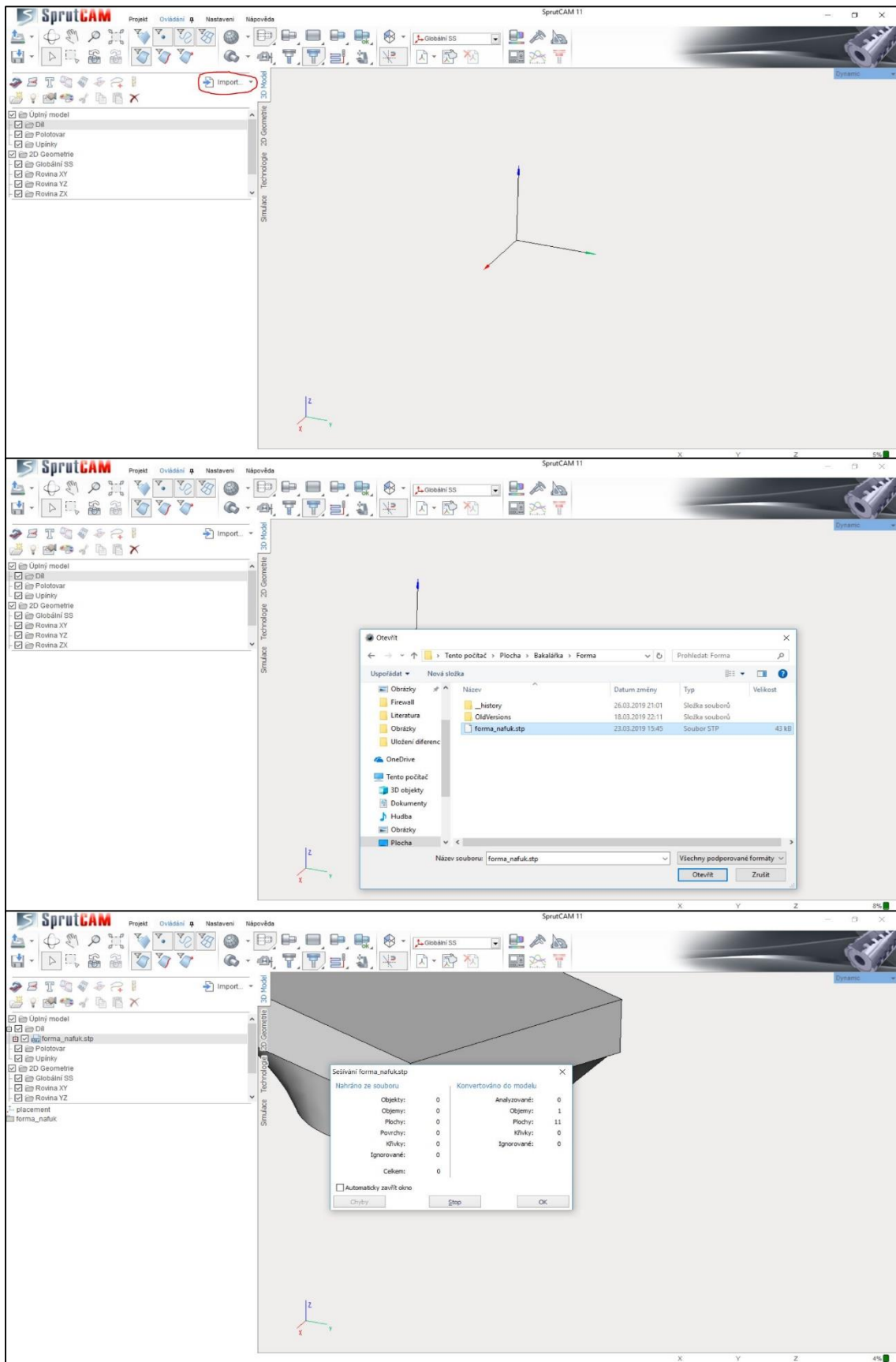
- $f_z$  – posuv na zub,
- $a_p$  – hloubka řezu,
- $a_e$  – šířka řezu,
- $n$  – otáčky vřetene,
- $v_f$  – rychlost posuvu.

#### **4.2. Kleštinový upínač**

Pro upnutí fréz slouží různé druhy upínačů. Na trhu jsou v různém provedení, např. pneumatické, hydraulické, kleštinové atd. K účelu této bakalářské práce byl použit kleštinový upínač od firmy GEWEFA JOSEF C. PFISTER GmbH & Co.KG, a to model HSK-E 25 x ER25 mini x 70. Způsob upínání nástrojů je skrze kleštinu, která musí být manuálně utažena. Maximální možný průměr upnutí frézy je limitován volbou kleštiny a maximální velikostí otvoru upínače, v tomto konkrétním případě je to 12 mm.

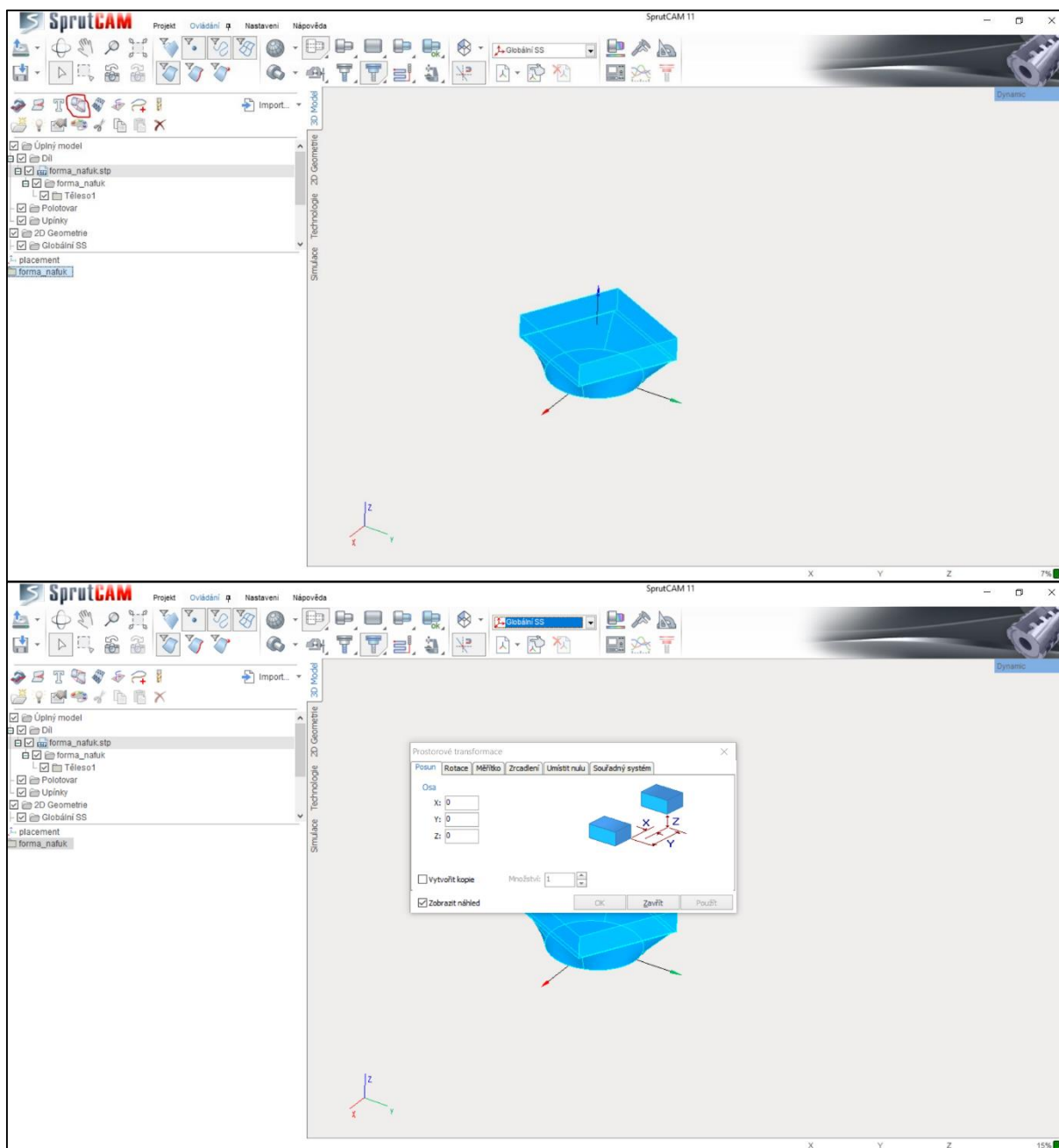
#### **4.3. Import dílce a nastavení polotovaru**

Při vytváření programu obrábění je jednou z prvních činností import obráběného dílu. K tomuto úkonu slouží funkce *Import modelu*, který je zobrazen na obr. 30. Poté následuje úprava pozice, natočení a definování souřadného systému.



Obr. 30 Postup importu modelu v prostředí SprutCAM

Jak lze vidět na obr. 30, tak se model importoval do prostředí programu SprutCAM, ale ve špatné pozici a otočený. K nastavení dílu do správné pozice, slouží funkce *Prostorové transformace* (obr. 31).

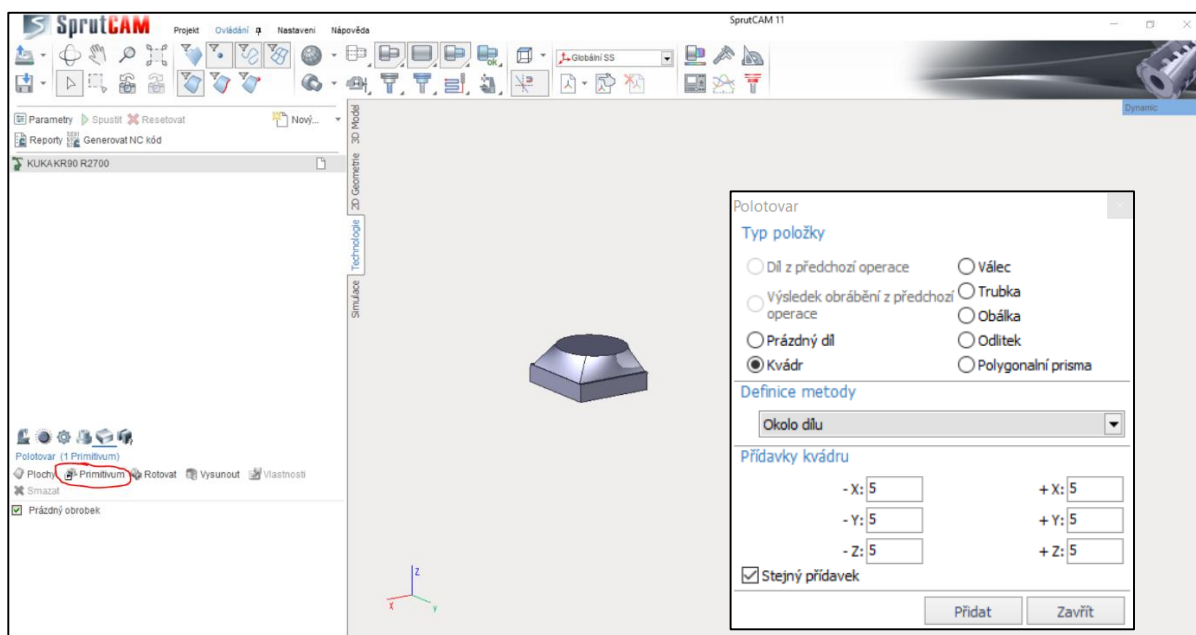


Obr. 31 Prostorová transformace dílu

V menu *Prostorové transformace* najdeme řadu možností, jako jsou např. posun, rotace, měřítko, zrcadlení, umístit nulu a souřadný systém. V tomto případě využijeme možnosti rotace a zrcadlení.

Po upravení obráběného dílu do potřebné pozice je potřeba nastavit polotovár, z kterého se bude dílec obrábět. K tomu slouží funkce *Primitivum*, kterou lze najít na kartě *Technologie* (obr. 32). Z možností nastavení polotovaru jsou parametry *Typ položky*, *Definice metody* a

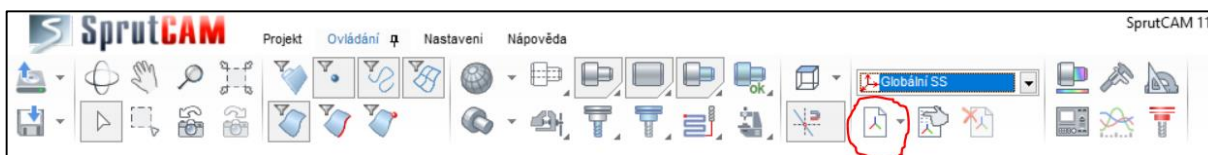
*Přidavky.* Podle výběru polotovaru je typ položky kvádr a přidavky stejné ve všech osách, a to 5 mm. Přidavky byly zvoleny z důvodu nepřesnosti řezání desek.



Obr. 32 Nastavení polotovaru

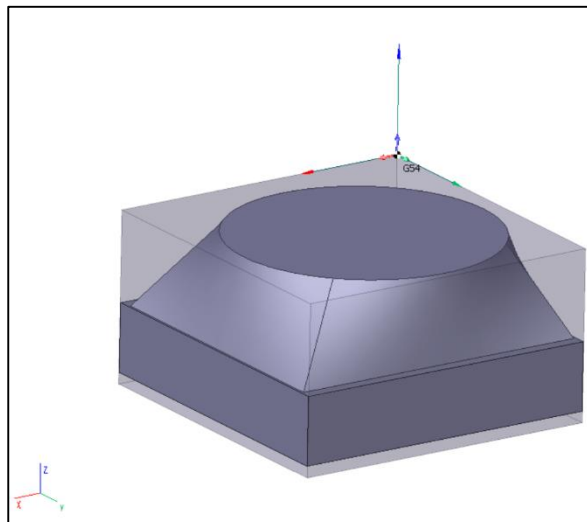
#### 4.4. Nastavení souřadného systému

Dalším krokem k vytvoření programu je nastavení souřadného systému polotovaru (obr. 33, obr. 34). Souřadný systém (dále jen SS) se dá vytvořit několika způsoby. Mezi možnosti vytvoření SS v programu SprutCAM 11 patří *Vytvoření souřadného systému pomocí dialogového okna*, *Vytvoření souřadného systému počátečním bodem a směrem os X a Y* a *Vytvoření souřadného systému počátečním bodem a aktuálním pohledem*. Pro účel práce byla zvolena možnost *Vytvoření souřadného systému počátečním bodem a směrem os X a Y*. Následně byl tento SS upraven a pojmenován na *Nulový bod polotovaru* pomocí ikony vedle. Výsledek je na obr. 34.



Obr. 33 Postup při vytvoření SS





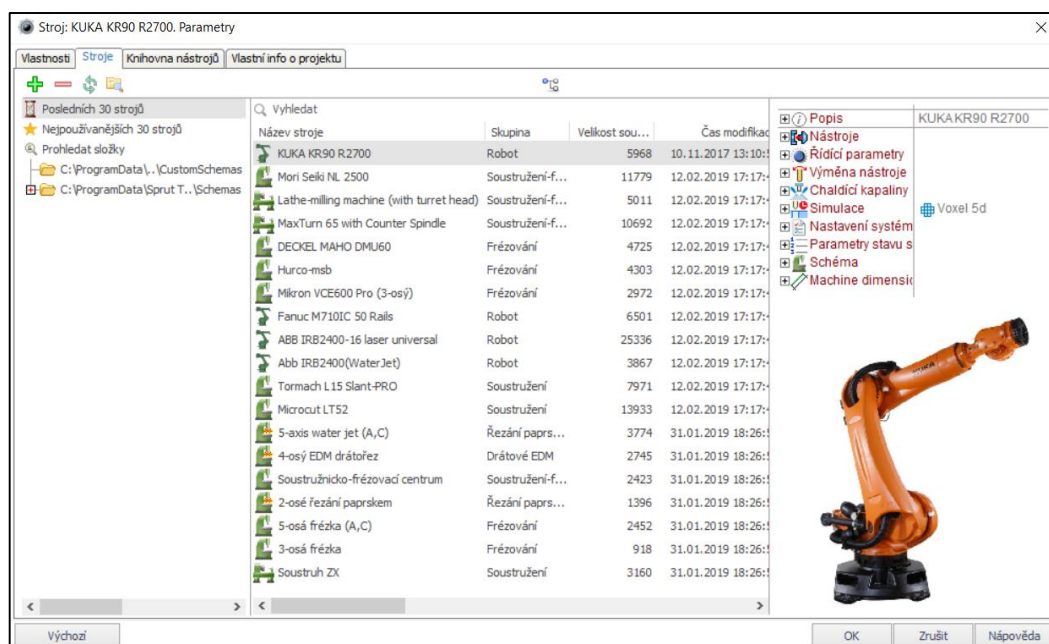
Obr. 34 Nový souřadný systém

#### 4.5. Výběr obráběcího stroje

V předchozí části bakalářské práce byl vybrán robot firmy KUKA a to model KR90 R2700. Důvod výběru tohoto robotu byl detailněji rozebrán v kap. 2.1.

Výběr robotu je velmi jednoduchý. Opět lze výběr obráběcího stroje najít na kartě *Technologie* a dvojitým kliknutím na stroj, který byl automaticky vybrán.

Pro reálnou strukturu robotu bylo nutné vytvořit virtuální kinematický model polohovacího a orientačního ústrojí v kombinaci s modelem technologické hlavy. V dialogovém okně je tedy nutné vybrat obráběcí stroj, konkrétně robot KUKA KR90 R2700 (obr. 35).



Obr. 35 Výběr obráběcího stroje

#### 4.6. Obráběcí strategie formy

Po nastavení parametrů, které jsou uvedeny v předchozích kapitolách, je dalším cílem navržení obráběcí strategie. Obráběcí strategie se skládá ze dvou částí, a to hrubovací a dokončovací.

V hrubovací proceduře je hlavním cílem obrobít plochy v co nejkratším čase, tzn. velký úběr materiálu. Pro proceduru hrubování byla zvolena válcová čelní fréza (kap. 5.1).

V dokončovací proceduře je prioritou vytvořit obráběný povrch v požadované drsnosti a v požadovaných rozměrech a tolerancích, tzn. jemné řádkování, výrazně menší posuv nástroje než při hrubování. Všeobecně dokončovací procedury pro jiné než rovné plochy se používají kulové frézy. Pro tuto konkrétní operaci byla zvolena kulová fréza (kap. 5.1).

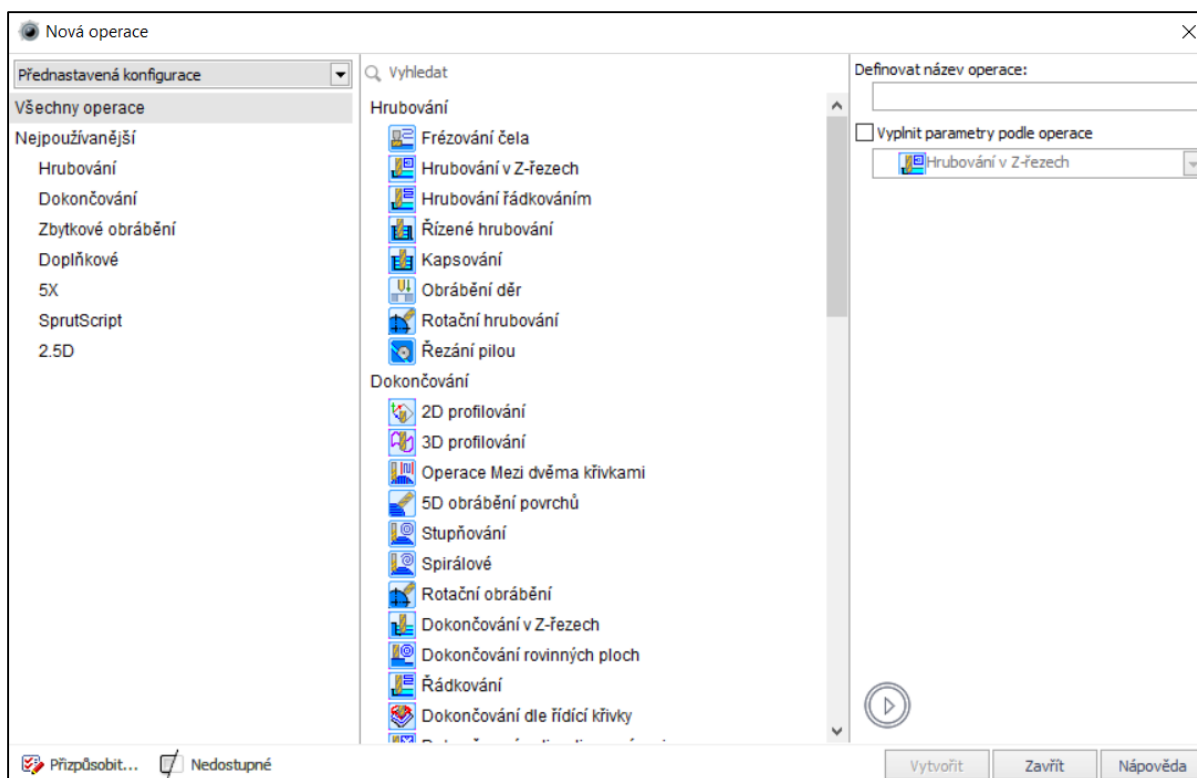
Otáčky v tomto případě nelze programovat z důvodu externího řízení vřetene, proto jsou otáčky v každé proceduře nastaveny na 0 ot/min.

Posloupnost operací:

1. Hrubování:
  - a. Frézování čela,
  - b. Hrubování v Z – řezech,
2. Dokončování:
  - a. 5D obrábění povrchů.

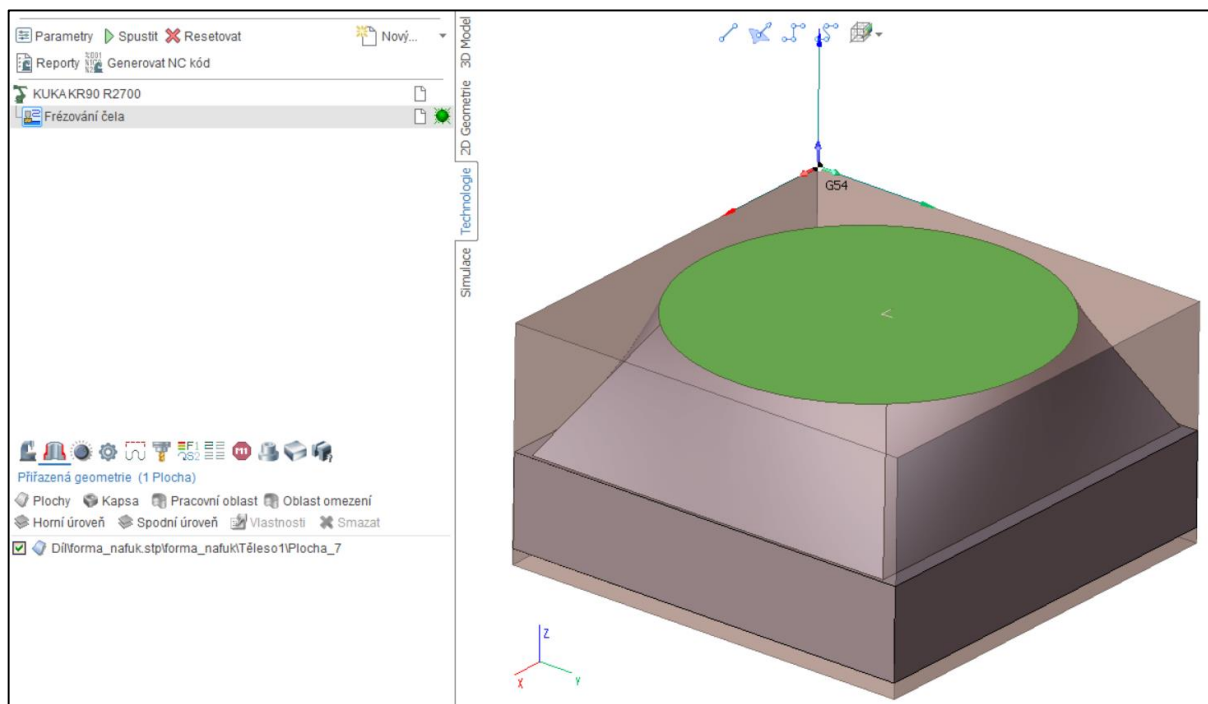
##### 4.6.1. Frézování čela

V této kapitole se práce zabývá operací frézování čela a nastavení parametrů pro danou operaci. Operaci lze jednoduše vytvořit na kartě *Technologie* a stisknutím na tlačítko *Vytvořit novou operaci*. Po kliknutí na tlačítko se zobrazí dialogové okno se všemi operacemi v programu SprutCAM 11 obr. 36.



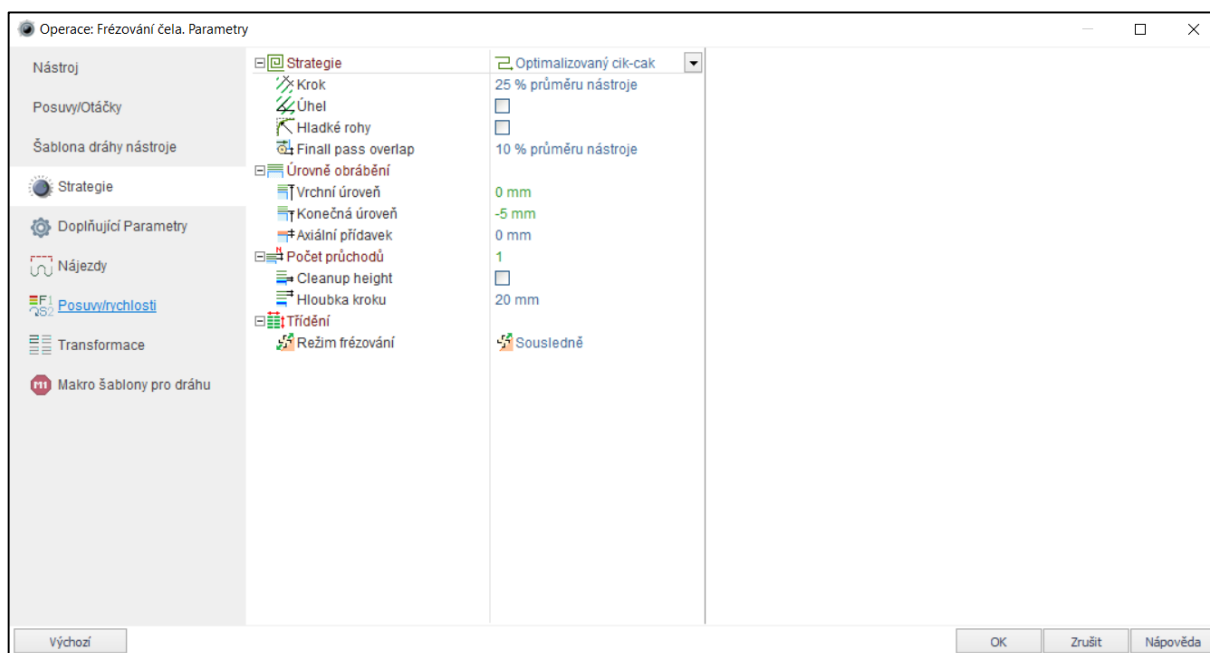
Obr. 36 Příklady operací v programu SprutCAM 11

Po vybrání příslušné operace je nutné vyplnit parametry. Mezi nejdůležitější parametry patří *Nástroj*, *Posuvy / Otáčky*, *Strategie*, *Nájezdy a Posuvy / Rychlosti*. Nejdůležitější je však výběr obráběné plochy. K výběru obráběné plochy slouží příkaz *Přiřazená geometrie* (obr. 37).



Obr. 37 Přiřazení obráběné plochy

V kartě *Nástroj* dialogového okna (obr. 38) se vyplní parametry nástroj pro danou operaci, kap. 5.1. V této kartě se také musí definovat upínač, v kterém je nástroj upnut. Dále se vyplní optimální řezné podmínky v kartě *Posuvy / Otáčky* dle kap. 5.1.

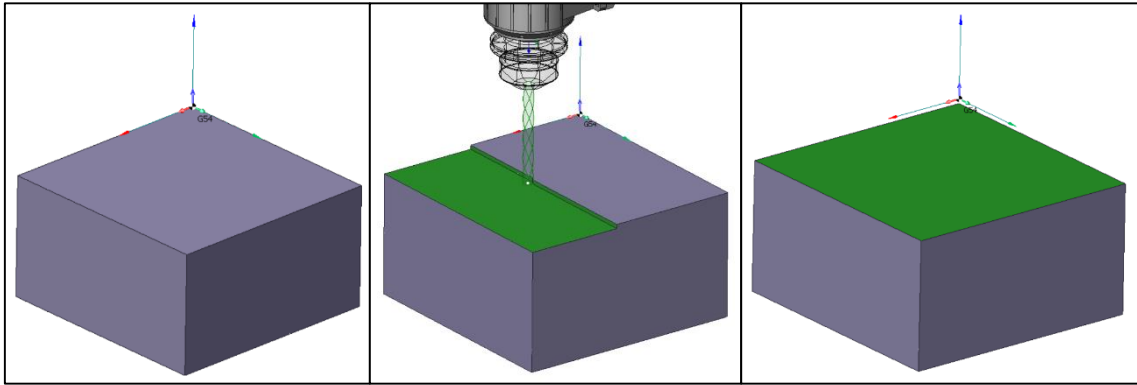


Obr. 38 Nastavení operace *Frézování čela*

V dalším kroku je nutné nastavit frézovací strategii, kterou najdeme v kartě *Strategie*. V operaci *Frézování čela* má karta *Strategie* několik parametrů, obr. 38. V tomto konkrétním případě byly nastaveny tyto parametry:

- Strategie – Optimalizovaný cik-cak,
- Krok – 25% průměru nástroje,
- Počet průchodů – 1,
- Ostatní parametry byly ponechány jako výchozí (*Default*).

Jelikož byl zvolen přídavek 5 mm a fréza může odebírat vrstvu až 18 mm, tak je možno tento povrch obrobit na jeden záběr. K ověření drah nástroje a výsledku obrábění slouží karta *Simulace*. Výsledek této operace je prezentován na obr. 39.



Obr. 39 Simulace operace

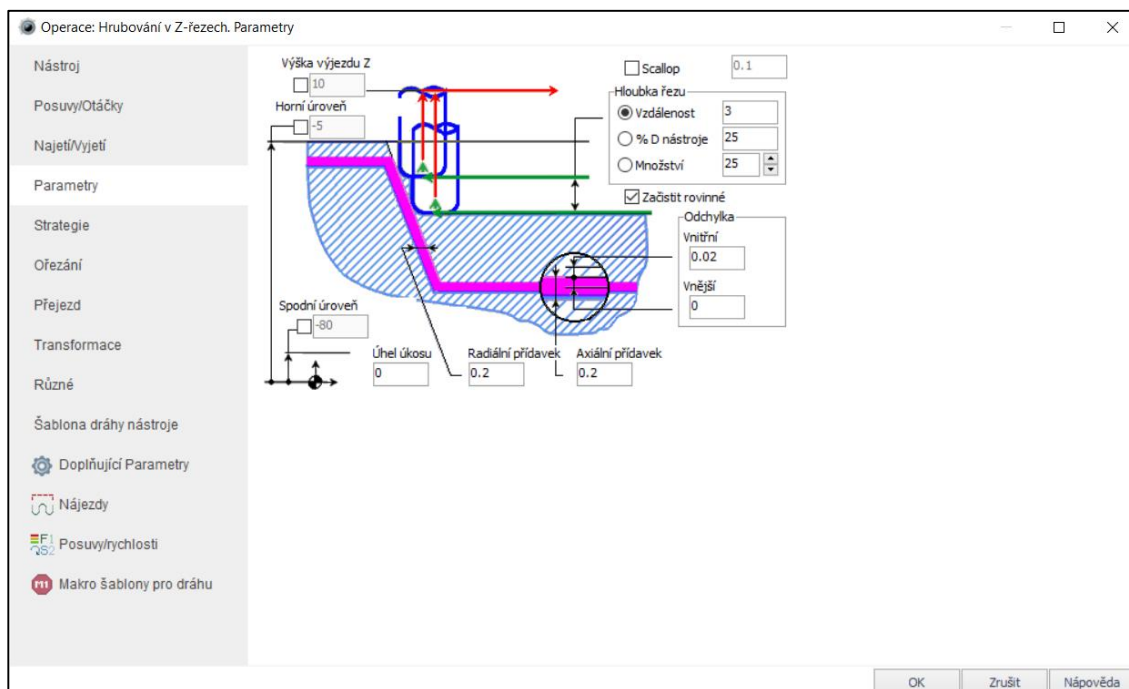
#### 4.6.2. Hrubování v Z – řezech

Hrubování v Z – řezech se nastavují parametry stejným způsobem jako v předešlé kapitole. Operaci hrubování v Z – řezech lze opět vytvořit na kartě *Technologie* a stisknutím na tlačítko *Vytvořit novou operaci*. Stejně jako v předešlé operaci se zobrazí dialogové okno.

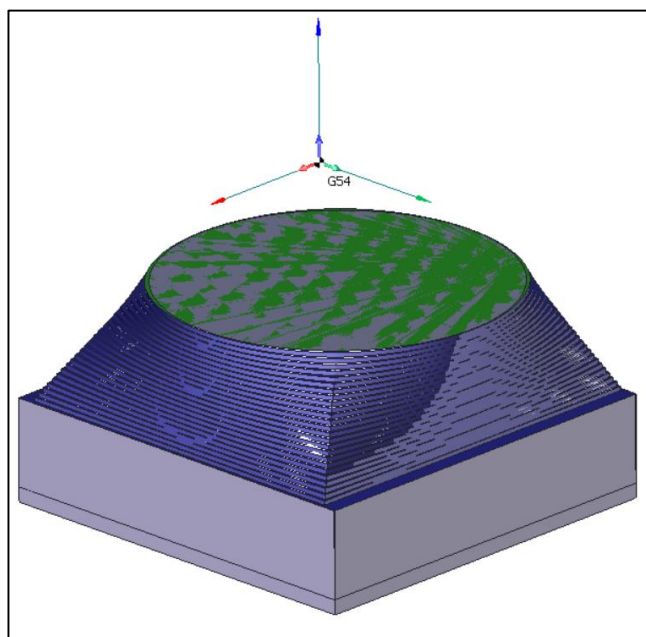
V tomto dialogovém okně jsou stejné karty jako u předchozí operace. Navíc je u této operace karta *Parametry*. V této kartě se nastavuje hloubka záběru, axiální a radiální přídávky a další. Všechny ostatní parametry byly nastaveny stejně jako v předchozí operaci (nástroj, rychlosti posuvů).

Na rozdíl od předchozí operace nebyly vybrány plochy k obrábění, nýbrž byla vybrána spodní a vrchní úroveň. Vrchní úroveň je plocha, která vznikla po operaci *Frézování čela* a spodní úroveň je plocha, kde končí přechod z kruhu na obdélník.

Pro operaci hrubování v Z – řezech byla zvolena hloubka záběru a šířka řezu 3 mm (obr. 40). Tato hloubka záběru a šířka řezu neodpovídají definici hrubování a to z důvodu, že úběr materiálu není tak velký. Z obrábění zkušební vzorku byla určena jiná strategie, tzn. jemnější řádkování, aby následující operace dokončování neodebírala najednou příliš mnoho materiálu. Zbytek parametrů byl ponechán jako výchozí. Operace byla opět simulována a její výsledek lze je zobrazen na obr. 41.



Obr. 40 Parametry pro operaci hrubování v Z – řezech



Obr. 41 Výsledek simulace hrubování v Z – řezech

#### 4.6.3. 5D Obrábění povrchů

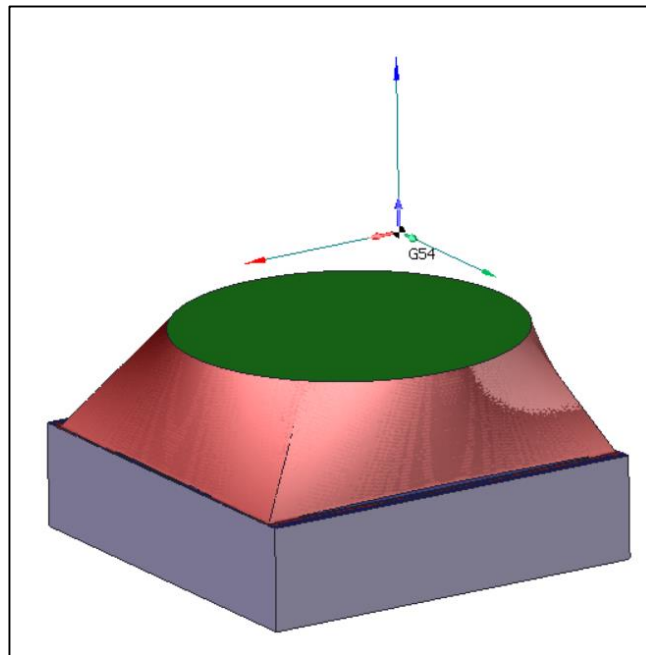
V této kapitole se práce zabývá operací dokončovací, a to 5D obrábění povrchů a nastavení parametrů této operace. Operace se opět vytváří analogicky jako předešlé. Stejně jako v předešlých operacích byly karty *Nástroj* a *Posuvy/Otáčky* vyplněny dle kap. 5.1.

Pro operaci 5D obrábění povrchů se opět musí vybrat obráběné plochy, v tomto případě jsou to boční plochy přechodu kruhu na obdélník.

V kartě *Strategie* jsou opět nejdůležitější parametry, které byly nastaveny následovně:

- Strategie – rovnoběžně k vodorovné rovině,
- Krok – 2% průměru nástroje,
- Ostatní parametry ponechány jako výchozí.

Cílem operace bylo vytvořit povrch požadované drsnosti, proto byl krok nastaven na 2% průměru nástroje. Tato hodnota byla ověřena na zkušební vzorku, kde byl povrch zhodnocen jako dostačující. Výsledek operace lze vidět na obr. 42.



Obr. 42 Výsledek simulace 5D obrábění povrchů

Po simulaci všech operací a kontroly kolizí se může pokračovat v generování KRL kódu pro samotné obrábění. Z důvodu nezbytnosti výměny nástrojů manuálně byl program obrábění rozdělen na dvě části, a to hrubovací a dokončovací. Příklad KRL kódu pro robot je zobrazen a popsán na obr. 43.

```

DEF HRUBOVANI_FORMA()
GLOBAL INTERRUPT DECL 3 WHEN $STOPMESS==TRUE DO IR_STOPM ( )
INTERRUPT ON 3
BAS (#INITMOV,0)
BAS (#VEL_PTP,20)
BAS (#ACC_PTP,20)

$BASE={X 1589.112, Y -681.255, Z 625.466, A -0.298, B 0.174, C -0.113}
$TOOL={X 362.2, Y -1.432, Z 221.8, A 0, B 90, C 0}
$advance=5
$VEL.CP=0.06
PTP {A1 12.019, A2 -80.039, A3 118.347, A4 0.000, A5 -38.308, A6 0.000, E1 0, E2 0, E3 0, E4 0, E5 0, E6 0}
LIN {X 273.423, Y 284.183, Z 50, A 167.981, B 0, C -180} C_DIS
LIN {X 273.423, Y 284.183, Z 1, A 167.981, B 0, C -180} C_DIS

```

Obr. 43 Příklad KRL kódu

Význam nejdůležitějších zkratk:

- \$BASE – souřadný systém, v kterém robot pracuje,
- \$TOOL – definice nástroje v souřadném systému koncové příruby,
- \$VEL.CP – nastavení rychlosti pohybu v m/s,
- PTP – pohyb *point – to – point* (lineární pohyb),
- LIN – stejné jako u PTP,
- CIRC – kruhový pohyb s nadefinovaným středem
- Osy robotu – A1 – A6,
- Pohyby v bázi – X, Y, Z a rotace – A, B, C podle souřadnicových os.

Soubor kódu pro řízení robotu je v příloze.

## 5. Výsledek obrábění

Pro obrábění jakéhokoliv dílce je nejdůležitější správně nastavit robot. Tím je v tomto případě myšleno nadefinovat nový souřadný systém obrobku, případně upravit délku nástroje vůči programované délce. Ačkoliv je kinematické schéma vytvořeno v programu SprutCAM, bylo zjištěno, že přesně neodpovídá programovaným hodnotám.

Tento problém byl vyřešen kalibrací hrot – hrot (obr. 44). Operační systém KUKA má možnost nadefinovat nový nástroj skrze příkaz *Proměřit*. Hrot byl upnut v kleštinovém upínači pro frézu s vysunutím 40 mm z upínače. Po vybrání tohoto příkazu je nutné nastavit pozici hrotu na stejný bod ze čtyř různých směrů, tím si řídicí systém dopočítá souřadnice X, Y a Z od příruby robotu, tudíž délku nástroje (souřadnice X).

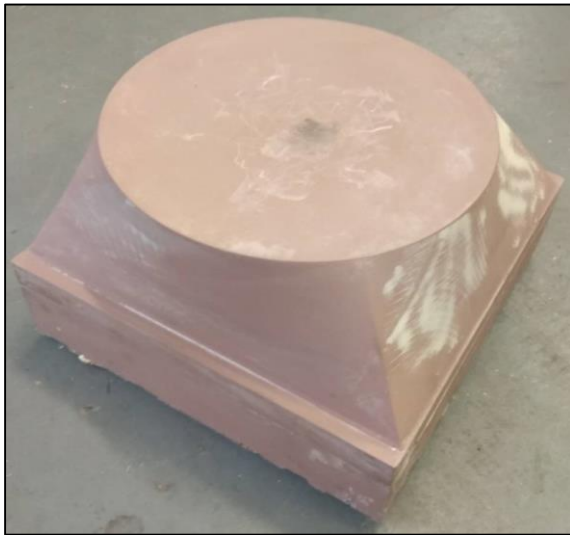




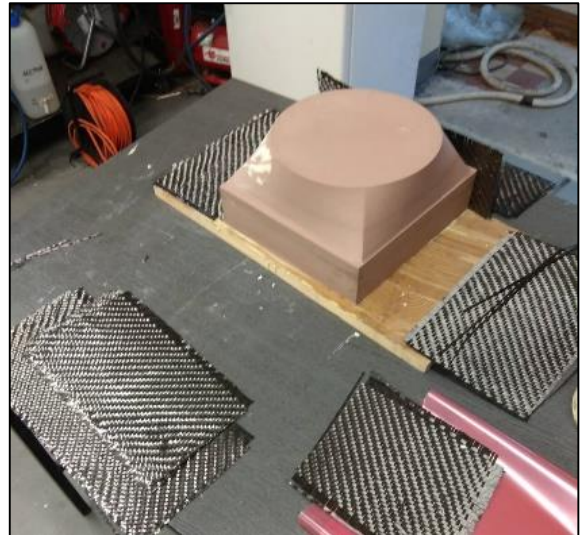
Obr. 44 Kalibrace hrot – hrot

Před samotným obráběním je nutné zavést nový souřadný systém (nulový bod polotovaru, báze). Řídicí systém KUKA má opět možnost *Proměřit*. Pomocí hrotu byl nastaven nulový bod souřadného systému a následně v kladných osách X a Y další dva body. Tímto způsobem byla vytvořena nová báze shodná s bází obrobku definované v SW SprutCAM.

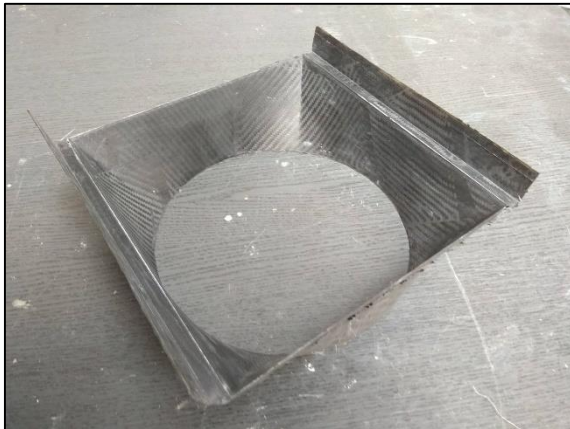
Aby byla simulace programu v SW SprutCAM co možná nejpřesnější, tak byl nejdříve ustaven polotovar, vytvořena báze a následně byly tyto hodnoty zapsány do programu. Tímto bylo zaručeno, že robot se bude schopen dostat do všech bodů a nedostane se do singularity. Po těchto krocích bylo možné přejít k obrábění. Výsledek práce je na obr. 45, 46, 47 a 48.



Obr. 45 Obráběný díl – forma



Obr. 46 – Příprava pro laminaci



Obr. 46 Díl z uhlíkových vláken



Obr. 47 Sestava difuzoru chladiče

## **Závěr a zhodnocení přínosu práce**

V úvodní části se předkládaná bakalářská práce zabývá základní analýzou možností využití robotů v obráběcích procesech. Na základě provedené analýzy bylo poté navrženo a uvedeno do provozu laboratorní pracoviště. Výkresová dokumentace je uvedena v příloze.

V další části práce je prezentován metodický postup vytváření programu v SW SprutCAM a posloupnost operací. K ověření provozuschopnosti byl vybrán konkrétně difuzor chladiče pro studentskou formuli. Před frézováním samotného dílu byl vyfrézován zkušební vzorek, na kterém byly odladěny odpovídající parametry, jako např. správnost celého postupu, řezné podmínky anebo vliv hustoty řádkování kulovou frézou na kvalitě povrchu. Během frézování dílu nebyl brán ohled na minimalizaci výrobního času, čili otáčky i pracovní posuvy byly razantně menší.

V praktické části práce bylo provedeno obrábění výše zmíněné formy. Při obrábění robotem je přesnost obrábění dána přesností samotného robotu, v případě robotu je přesnost řádu desetin milimetru, kdežto při obrábění na CNC obráběcích centrech je standardní přesnost v řádu stovek milimetru. Tato přesnost je dána stavbou kinematického řetězce a jeho tuhostí. Kinematický řetězec robotu je složen z 6 rotací, ale obráběcí centrum má 3 lineární posuvy (u 5-osých CNC center doplněny o 2 rotace). Je ovšem nutné zmínit výhodu oproti standardním CNC obráběcím centrům, tím je myšlen velký pracovní prostor. Výsledek je takový, že roboty se nemohou rovnat obráběcím centrům z hlediska přesnosti. Po připojení robotu na pojezdové ústrojí je možné získat ještě větší pracovní prostor oproti frézovacím centrům (portálové frézky) za nižší pořizovací cenu. Obecně lze velmi dobře využít robot pro dokončovací operace na složitých prostorových dílech, které se nadají upnout na standardních CNC obráběcích centrech. Výborně se hodí např. na brousicí operace a ořezávání velkoformátových dílů v leteckém a automobilovém průmyslu apod.

Práce prokazuje použitelnost průmyslových robotů při obrábění specifických dílů a může posloužit jako základ pro další aplikaci robotů v této oblasti.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] Elektronická učebnice: Frézování [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1225>
- [2] Automatizační systémy od firmy KUKA [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/odvetvi/solutions-database?filters=2C7D2354B3354288B1842A90A60E6E96D9A046D7E4BD4787A06FF9C3ABE430AD>
- [3] SVOTT a.s.: Obrázek prototypu [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <http://www.svott.cz/prototyping#>
- [4] TechPark.sk: Obrábění, frézování, vrtání a broušení průmyslovým robotem [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <http://www.techpark.sk/technika-92009/obrabeni-frezovani-vrtani-a-brouseni-prumyslovym-robotem.html>
- [5] MM Průmyslové spektrum: Robot pro pětiosé obrábění [online]. 22.6.2010 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/robot-pro-petiose-obrabeni.html>
- [6] NOVOTNÝ, František a Marcel HORÁK. Konstrukce robotů. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-216-7.
- [7] KUKA AG: Přehled robotů KR QUANTEC [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/robot-pro-petiose-obrabeni.html>
- [8] Katalog obráběcích vřeten: Chopper 2300-40 HSK S5 [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://www.alfredjaeger.de/en/chopper/11503003>
- [9] Katalog produktů Halder KG: Základová deska V70eco [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://www.halder.com/cz/Produkty/Upinaci-systemy/Upinaci-systemy-s-drazkami/Zakladove-elementy/Zakladova-deska-V70eco-vhodna-pro-paletu-DIN-55201>
- [10] Automatizační a robotická technika: VITRALAB [online]. 2009 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: [http://www.sjf.tuke.sk/vitralab/files/vystupy/prirucka\\_cz\\_final.pdf](http://www.sjf.tuke.sk/vitralab/files/vystupy/prirucka_cz_final.pdf)
- [11] NOVOTNÝ, František a Marcel HORÁK. Efektory průmyslových robotů. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-195-5.
- [12] Katalog produktů Ebalta: Umělé dřevo [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <http://www.ebalta.cz/cz/katalog-produktu/ebaboard-umele-drevo//ebaboard-0700>
- [13] Katalog produktů Fraisa: Frézovací nástroje [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <http://webshop.fraisa.ch>
- [14] Katalog produktů Erwin Halder KG: Nivelizační element [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://www.halder.com/cz/Produkty/Normovane-dily/Strojni-elementy/Strojni-nohy/Nivelizacni-element-vykyvny>
- [15] HNILICA, Jaroslav, Dobroslav NĚMEC a Jan ODEHNAL. Strojírenská technologie: Strojní obrábění. 2. vydání. Praha: SNTL, 1982. Řada strojírenské literatury.
- [16] Walter AG: Frézování [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.walter-nastroje.cz/index.php/frezovani>
- [17] Osvětlení Černocho s.r.o.: Elektroerozivní obrábění [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <http://formy-plasty.cz/elektroerozivni-obrabeni/>
- [18] PUSTKA, Zdeněk. Základy konstruování: (tvorba výkresové dokumentace). Vyd. 2. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2010. ISBN 978-80-7372-615-7.
- [19] LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření. 5., upr. vyd. Úvaly: Albra, 2011. ISBN 978-80-7361-081-4.

## Seznam příloh

### CD

Soubor s KRL kódem pro hrubování

Soubor s KRL kódem pro dokončování

### Výkresová dokumentace

Příloha 1 – 3-BP S15000071-1-0-00 – Laboratorní pracoviště

Příloha 2 – 3-BP S15000071-1-2-00 – Svařenec mezipříruby

Příloha 3 – 3-BP S15000071-1-1-0 – Upínací stůl

Příloha 4 – 3-BP S15000071-1-1-1 – Svařenec stolu

Příloha 5 – 4-BP S15000071-1-1-01 – Držák vřetene

Příloha 6 – 4-BP S15000071-1-2-05 – Středící kroužek

Příloha 7 – 4-BP S15000071-1-2-04 – Zadní deska