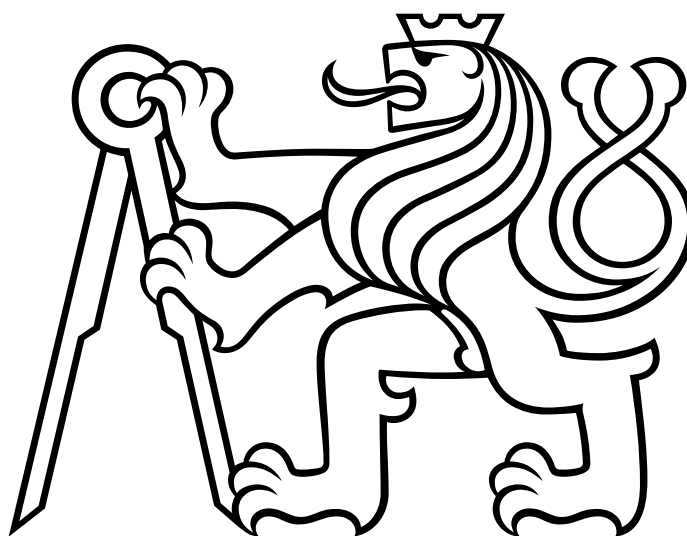


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Diplomová práce

Pracoviště obráběcího stroje pro robotem asistované obrábění

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šmaus** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **475001**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní stroje a zařízení**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Pracoviště obráběcího stroje pro robotem asistované obrábění

Název diplomové práce anglicky:

Machine tool workplace for robot-assisted machining

Pokyny pro vypracování:

Pro obrábění poddajných tenkostěnných obrobků se v praxi používají různé strategie. Jednou z nich je použití aktivního opěrného bodu realizované např. pomocným robotem. Osnova práce: 1. Přehled existujících řešení v oblasti spolupráce dvou výrobních strojů při obrábění poddajných dílců; 2. Návrh konceptu pracoviště stroje Weldprint s pomocným robotem pro definovaný typ dílce; 3. Konstrukční zpracování prostředků pro mechanickou integraci zařízení; 4. Vytvoření NC kódu pro pohyb robota a jeho ověření na virtuálním kinematickém modelu v simulaci asistovaného pohybu pro zadaný dílec. Rozsah textové části: okolo 80 stran. Rozsah grafické části: 1 výkres sestavy pracoviště, 1 výkres sestavy koncového efektoru, 3 vybrané výrobní výkresy.

Seznam doporučené literatury:

- [1] GUILLEM, Q. a JOAQUIM, C. Chatter in machining processes: A review. In: International Journal of Machine Tools and Manufacture. Elsevier Ltd. 2011, vol. 51, s. 363 - 376.
- [2] KOLÍBAL, Z. et al. Roboty a robotizované výrobní technologie. Brno: VUTIUM, 2016. 788 p. ISBN: 978-80-214-4828-5
- [3] Dokumentace komponent a robotů dostupná na internetu.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Petr Kolář, Ph.D. ústav výrobních strojů a zařízení FS

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

Ing. Tomáš Kratěna ústav výrobních strojů a zařízení FS

Datum zadání diplomové práce: **29.03.2022** Termín odevzdání diplomové práce: **25.07.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2022**

doc. Ing. Petr Kolář, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Matěj Sulitka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 19.7.2022

.....

podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Petru Kolářovi, Ph.D. za odborné a ochotné vedení mé diplomové práce. Dále pak konzultantovi Ing. Tomáši Kratěnovi za nepostradatelné rady při tvorbě simulačního modelu. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině za podporu během celého studia. Poděkování také patří mé přítelkyni za psychickou podporu při tvorbě této práce.

Anotace

| | |
|-----------------------|--|
| Autor: | Jan Šmaus |
| Název: | Pracoviště obráběcího stroje pro robotem asistované obrábění |
| Rozsah práce: | 81 str., 52 obr., 1 tab. |
| Akad. rok vyhotovení: | 2021/2022 |
| Škola: | ČVUT v Praze, Fakulta strojní |
| Ústav: | Ú12135 – Ústav výrobních strojů a zařízení |
| Vedoucí práce: | doc. Ing. Petr Kolář, Ph.D. |
| Konzultant: | Ing. Tomáš Kratěna |
| Zadavatel: | ČVUT FS, RCMT |
| Využití: | Zvýšení produktivity obrábění tenkostěnných dílců |
| Klíčová slova: | tenkostěnné dílce, robotem asistované obrábění, zvýšení produktivity, simulační model |
| Anotace: | Diplomová práce se zabývá návrhem mechanické integrace robotu Comau Racer 7-1.4. ke stroji WeldPrint 5AX, kdy robot slouží jako aktivní podpůrný prvek poddajného obrobku. Dále je naprogramována dráha robotu pro podepírání zadaného obrobku a pomocí napsaného skriptu je vygenerován NC program pro jednokanálové řízení robotu i stroje. NC program je následně ověřen na vytvořeném simulačním modelu. |

Annotation

| | |
|-------------------------|---|
| Author: | Jan Šmaus |
| Title: | Machine tool workplace for robot-assisted machining |
| Extent: | 81 p., 52 fig., 1 tab. |
| Academic year: | 2021/2022 |
| University: | CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering |
| Department: | Ú12135 – Department of Production Machines and Equipment |
| Supervisor: | doc. Ing. Petr Kolář, Ph.D. |
| Consultant: | Ing. Tomáš Kratěna |
| Submitter of the Theme: | CTU FMI, RCMT |
| Application: | Increasing the productivity of machining thin-walled parts |
| Key words: | thin-walled components, robot-assisted machining, increased productivity, simulation model |
| Annotation: | The thesis deals with the design of mechanical integration of the Comau Racer 7-1.4 robot. to the WeldPrint 5AX machine, where the robot serves as an active support element for a flexible workpiece. Furthermore, the robot path is programmed to support the specified workpiece and an NC program for single-channel control of the robot and the machine is generated using a written script. The NC program is then verified on the created simulation model. |

Seznam použitých zkratk

| | |
|------|---|
| 3D | three-dimensional / třídimenzionální |
| CAM | computer aided manufacturing / počítačová podpora výroby |
| CL | cutter location / poloha nástroje |
| CSE | common simulation engine / simulační jádro |
| DP | diplomová práce |
| MAG | metal active gas / svařování kovů v ochranné atmosféře aktivního plynu |
| MIG | metal inert gas / svařování kovů v ochranné atmosféře inertního plynu |
| MKP | metoda konečných prvků |
| MRF | magnetorheological fluid / magnetoreologická tekutina |
| NC | numerical control / numerické řízení |
| NX | Siemens NX CAD/CAM software |
| PETG | polyethylene terephthalate glycol |
| PKM | paralelní kinematický mechanismus |
| PLA | polylactic acid |
| PLC | programmable logic controller / programovatelný logický automat |
| ŘS | řídící systém |
| TRM | temperature rheological material / teplotní reologický materiál |
| WAAM | wire and arc additive manufacture / aditivní výroba pomocí elektrického oblouku |

Seznam použitých veličin, značek a symbolů

| | |
|-----------------------------|---|
| A | natočení efektoru robotu v ose X |
| A1 | označení naklápěcí osy stroje A |
| a_p | hloubka řezu |
| B | natočení efektoru robotu v ose Y |
| b_{lim} | limitní hloubka řezu |
| C | natočení efektoru robotu v ose Z |
| C1 | označení rotační osy stroje C |
| J1–6 | rotační osy robotu 1–6 |
| K_s | řezný odpor |
| Kv | parametr zesílení v polohové smyčce regulace pohonu |
| NC_Y1 | hodnota osy Y1 generovaná z CAM |
| NC_Z1 | hodnota osy Z1 generovaná z CAM |
| N_t^* | počet zubů v záběru |
| P_Y | posunutí souřadného systému v ose Y |
| P_Z | posunutí souřadného systému v ose Z |
| r_A | poloměr otáčení souřadného systému vůči ose A1 |
| Re [FRF _{orient}] | orientovaná dynamická poddajnost systému |
| X | souřadnice efektoru robotu |
| X1 | označení pohybové osy stroje X |
| Y | souřadnice efektoru robotu |
| Y1 | označení pohybové osy stroje Y |
| Y1 _{SKUT} | skutečná hodnota strojní pohybové osy Y |
| Z | souřadnice efektoru robotu |
| Z1 | označení pohybové osy stroje Z |
| Z1 _{SKUT} | skutečná hodnota strojní pohybové osy Z |
| α | úhel natočení osy stolu A1 |

| | |
|---------------------------|-----------------------------|
| ΔY_{ROBOT} | přírůstek v ose Y pro robot |
| ΔY_{STROJ} | přírůstek v ose Y pro stroj |
| ΔZ_{ROBOT} | přírůstek v ose Z pro robot |

Obsah

| | | |
|-----|---|----|
| 1. | ÚVOD | 11 |
| 2. | PŘEHLED STÁVAJÍCÍHO POZNÁNÍ A APLIKACÍ | 12 |
| 2.1 | ÚVOD DO PROBLEMATIKY OBRÁBĚNÍ TENKOSTĚNNÝCH DÍLCŮ | 12 |
| 2.2 | PASIVNÍ PODPŮRNÉ TECHNOLOGIE | 20 |
| 2.3 | AKTIVNÍ PODPŮRNÉ TECHNOLOGIE | 26 |
| 2.4 | PŘEHLED KONSTRUKCÍ OPĚRNÝCH PRVKŮ | 33 |
| 2.5 | SHRnutí REŠERŠE A DOPORUČENÍ PRO ZADANOU APLIKACI | 37 |
| 3. | KONCEPCE PRACOVIŠTĚ | 38 |
| 3.1 | SEZNÁMENÍ S AKTUÁLNÍM PRACOVIŠTĚM | 38 |
| 3.2 | PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH LAYOUTU PRACOVIŠTĚ | 39 |
| 3.3 | KONCEPTY PODPŮRNÉ HLAVICE | 40 |
| 3.4 | VOLBA OPTIMÁLNÍHO KONCEPTU | 42 |
| 4. | VLASTNÍ ZPRACOVÁNÍ ŘEŠENÍ | 44 |
| 4.1 | NÁVRH PODPŮRNÉ HLAVICE | 44 |
| 4.2 | LAYOUT PRACOVIŠTĚ | 47 |
| 4.3 | INTEGRACE ROBOTU DO ŘÍDICÍHO SYSTÉMU STROJE | 49 |
| 4.4 | KINEMATICKÝ SIMULAČNÍ MODEL PRACOVIŠTĚ | 50 |
| 4.5 | PLÁNOVÁNÍ DRAH ROBOTU S PODPŮRNOU HLAVICÍ | 58 |
| 4.6 | ÚPRAVA NC PROGRAMU PRO JEDNOKANÁLOVÉ ŘÍZENÍ ROBOTU A STROJE | 61 |
| 5. | ZÁVĚR | 69 |
| | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 72 |
| | SEZNAM OBRÁZKŮ | 78 |
| | SEZNAM TABULEK | 80 |
| | SEZNAM POUŽITÉHO SOFTWARE | 80 |
| | SEZNAM PŘÍLOH | 81 |

1. Úvod

Trendem v náročných průmyslových odvětvích, tj. leteckém, kosmickém, automobilovém i energetickém, je využívání tenkostěnných struktur. Tento trend však přináší zásadní problémy při obrábění takovýchto dílců. Dynamické řezné síly v kombinaci s nízkou tuhostí obrobku způsobují samobuzené kmitání, což je nejčastější příčina nestability obrábění, také známé jako chatter. Při vzniku chatteru nastává zhoršení povrchu obrobku a může dojít i k poškození dílce. Dále pak snižuje životnost nástroje a dalších strojních komponent. Prvním řešením, jak eliminovat chatter, je úprava řezných podmínek, která zpravidla zhoršuje produktivitu obrábění a vyžaduje složité simulační modely. Další možností je zvýšení tuhosti dílce, například pomocí přídavné opěry. Ta musí být u složitějších obrobků pohyblivá, aby se eliminovaly kolize jednotlivých částí systému a zajistil se pohyb kopírující tvar obrobku. Pro polohování aktivního opěrného bodu se jeví robot jako vhodné zařízení.

2. Přehled stávajícího poznání a aplikací

Aplikace podpěr obrobků vedoucích ke zlepšení produktivity a dosažitelných parametrů při obrábění tenkostěnných dílců jsou známe již z minulého století. Avšak moderní aplikace využívající zejména aktivních (pohyblivých) podpor jsou v průmyslových odvětvích k vidění až od konce devadesátých let minulého století a lze předpokládat jejich další vývoj v nadcházejících letech.

2.1 Úvod do problematiky obrábění tenkostěnných dílců

Během procesu obrábění tenkostěnných struktur má obrobek nižší statickou i dynamickou tuhost. Z důvodu nízké dynamické tuhosti (vysoké dynamické poddajnosti) je nutné dbát větší důraz na vliv vibrací při obrábění.

Typy kmitání při obrábění

V procesu obrábění mohou vznikat tři různé typy mechanických vibrací:

- volné kmitání
- vybuzené kmitání
- samobuzené kmitání

Volné kmitání vzniká, když je mechanický systém vychýlen ze své rovnováhy a následně vychylující síla pomine. Například při nesprávné definici dráhy nástroje, která vede ke kolizi mezi řezným nástrojem a obrobkem. Vybuzené kmitání v procesu obrábění vzniká v důsledku periodického buzení stroje a obrobku řezným procesem. Dále pak vybuzené kmitání mohou způsobovat nevyváhy rotujících soustav nebo vibrace přenášené přes podlahu od okolních strojů. Při vybuzeném kmitání je frekvence shodná s frekvencí buzení a amplituda kmitání je přiměřená amplitudě buzení. V případě samobuzeného kmitání není frekvence buzení a odezvy shodná a nastává výrazné zvýšení amplitudy vibrací oproti amplitudě buzení. Tento typ vibrací je nejvíce nežádoucí. [1] [2]

Problematika chatteru

Typickým principem vzniku samobuzeného kmitání je tzv. regenerativní princip. Ten jako první popsali výzkumníci Jiří Tlustý a Miloš Poláček z VÚOSO v Praze a sestavili rovnici (2.1) pro výpočet meze stability při frézování. [3]

$$b_{lim} = \frac{-1}{2K_s \cdot Re[FRF_{orient}]N_t^*} \quad (2.1)$$

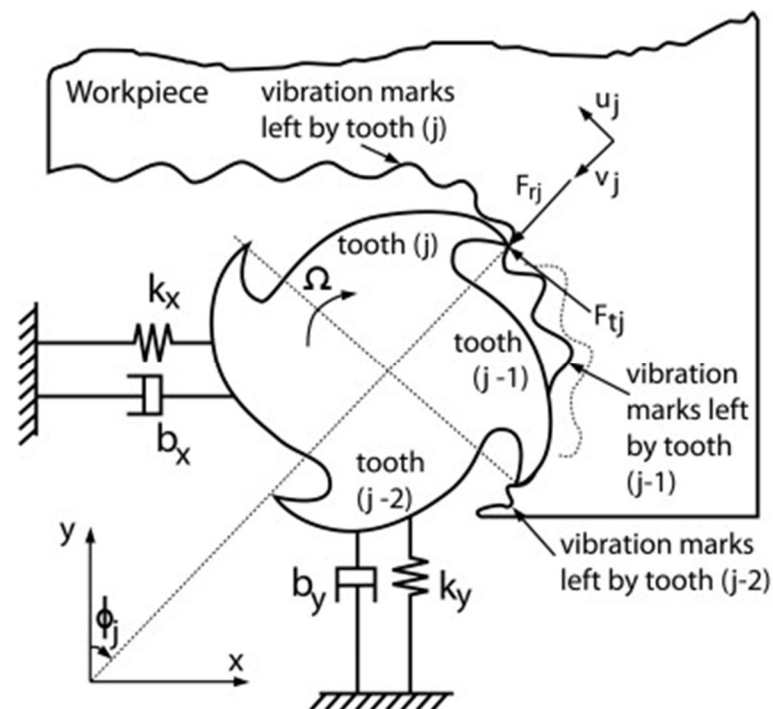
kde v rovnici je

K_s ... řezný odpor

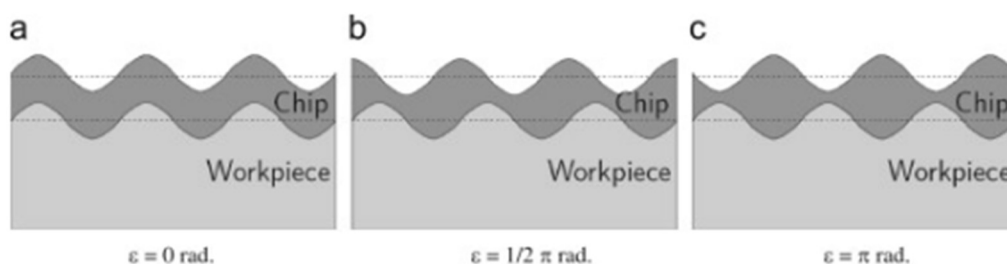
$Re[FRF_{orient}]$... orientovaná dynamická poddajnost systému

N_t^* ... počet zubů v záběru

Při běžném obrábění vytváří obráběcí nástroj na povrchu obrobku zvlněný povrch (viz Obr. 1). Při dalším přejezdu již zvlněného povrchu záleží na fázovém posunu mezi zvlněným povrchem a aktuálním kmitáním. V případě, kde je fázový posun nulový, je dynamická tloušťka třísky také nulová. Pokud fázový posun dosáhne hodnoty π , je změna dynamické tloušťky třísky maximální. Tyto případy jsou znázorněny na Obr. 2. V důsledku proměnné tloušťky třísky, a tedy i dynamické změny síly na řezný nástroj, nastávají vibrace, které mohou vést až k nekontrolovatelnému samobuzenému kmitání. [1] [4]



Obr. 1 Regenerativní princip při frézování se dvěma stupni volnosti [5]



Obr. 2 Vliv fázového posunutí na tloušťku dynamické třísky [4]

Specifická problematika obrábění tenkostěnných dílců

Chatter je závislý na mnoha faktorech. Hlavní vliv má dynamická tuhost obrobku nebo nástroje a řezné podmínky. Při obrábění tenkostěnných dílců je klíčovým faktorem pro vznik chatteru dynamické chování obrobku. Problémem při takovémto obrábění jsou proměnné dynamické vlastnosti závislé na poloze obráběcího nástroje, a tedy není možné použít běžné metody pro predikci chatteru, nebo pouze za předpokladu velkého zkreslení. Modelováním a predikcí chatteru při obrábění tenkostěnných struktur se věnuje řada odborných článků a studií, například: [6] [7] [8] [9]. Převážná část testů uvedených ve studiích byla provedena na 3-osých operacích. V průmyslové praxi je však velké množství tenkostěnných dílců, jako jsou části motoru, lopatky turbín nebo oběžná kola, obráběny na 5-osých strojích. Této pokročilé problematice se blíže věnuje publikace [10]. Obecně lze shrnout, že hlavní metodou pro predikci chatteru při tenkostěnném obrábění jsou MKP modely sloužící k určení modálních parametrů a vibračních režimů s ohledem na proměnné odebrání materiálu. Modely ovšem stále pracují pouze s odhadem tlumení, které do obrobku vnáší upnutí. [11] [12] [13]

Je důležité si uvědomit, že predikce je pouze jedna z možností, jak eliminovat chatter. Hlavní linie výzkumu eliminace chatteru lze obecně rozdělit do 4 kategorií. [1]

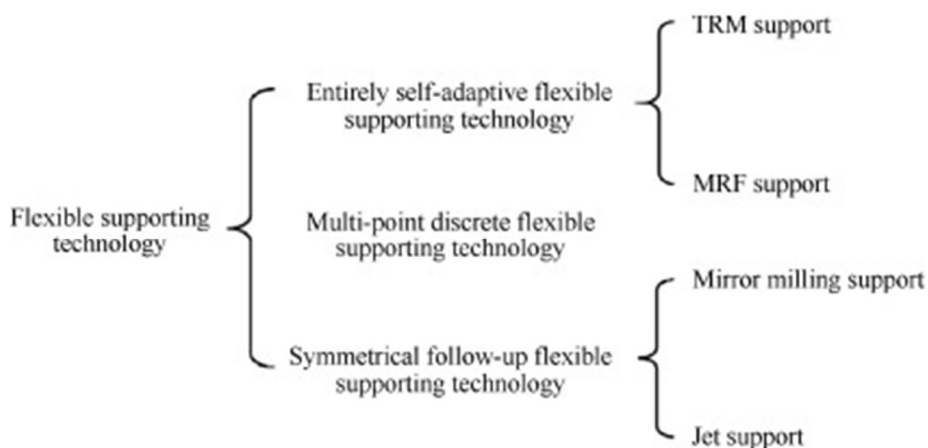
- I. Pasivní strategie (např. podepření obrobku podporou) jsou zaměřeny na použití pasivních prvků, zařízení, metodik nebo technik, které mění nebo upravují chování systému a zlepšují jeho výkon v oblasti vzniku chatteru.
- II. Aktivní strategie (např. aktivní hltič vibrací) jsou zaměřeny na používání prvků, strategií, zařízení nebo akčních členů, které aktivně upravují chování systému tak, aby potlačily chvění, jakmile k němu dojde.

- III. Mimo procesní strategie jsou zaměřeny na predikci, odhad nebo využití diagramu stability pomocí modelování procesu obrábění a analyticko-experimentálních metod.
- IV. Inprocesní strategie jsou zaměřeny na měření inprocesních parametrů obrábění a identifikaci vibrací pomocí několika senzorových technologií, monitorování procesu a zpracování signálu.

Vzhledem k výše popsaným problémům při obrábění tenkostěnných struktur se ve výzkumné i průmyslové sféře staly podpůrné technologie hlavní metodou pro zvýšení tuhosti a tlumení a snížení dynamické poddajnosti tenkostěnných obrobků. Tato diplomová práce se bude následně zabývat kategorií I. [14]

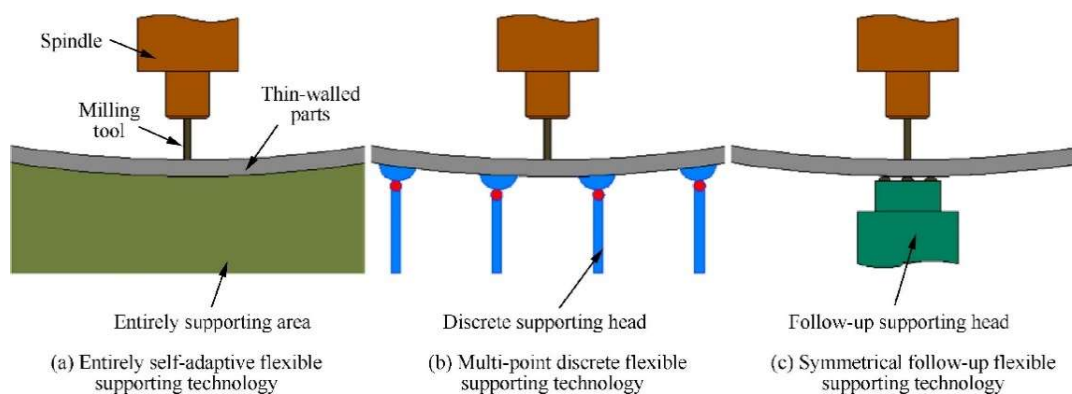
Podpůrné technologie pro tenkostěnné dílce

V počáteční fázi vývoje podpůrných technologií byly k podepření obrobků používány pevné formy. Pro každý obrobek tak bylo nutné vyrobit speciální formu. Výroba speciální formy pro každý díl znamená vysoké výrobní náklady. Aby se podpůrné technologie staly efektivnějšími a cenově výhodnějšími, byly vyvinuty tzv. flexibilní podpůrné systémy. V současnosti lze flexibilní nosné technologie rozdělit do tří kategorií, viz Obr. 3. Zcela samoadaptivní flexibilní podpůrná technologie se dále dělí dle typu média sloužícího k podepření na teplotní reologický materiál (TRM) a magnetoreologickou tekutinu (MRF). Vícebodová diskrétní flexibilní podpůrná technologie se vyznačuje použitím mnoha diskrétních opěrných hlav sloužících k podepření obrobku. Posledním typem je opěrná technologie symetricky následující dráhu řezného nástroje. Ta se dále dělí na zrcadlové obrábění podpůrnou hlavou, která se pohybuje společně s frézou a na tryskové podepření. [14]



Obr. 3 Klasifikace flexibilních podpůrných technologií [14]

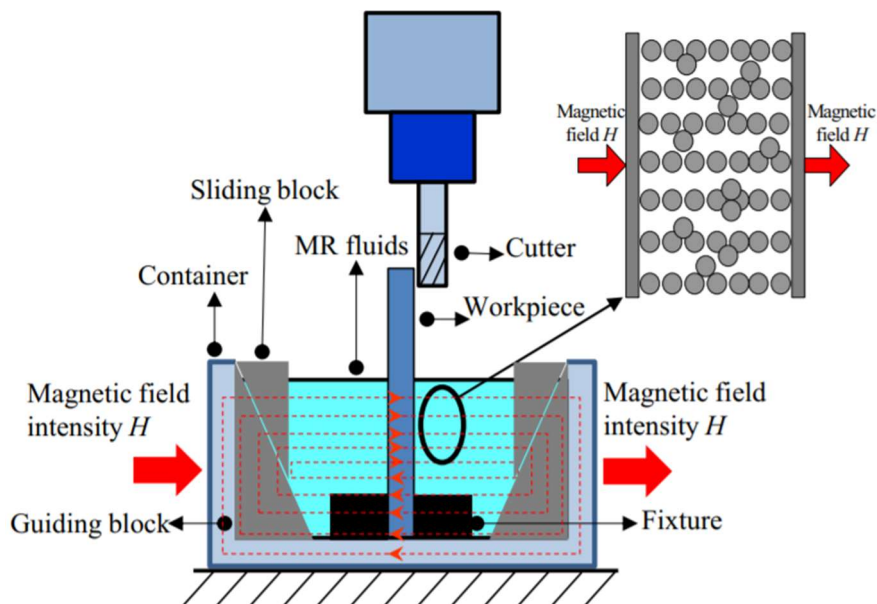
Na Obr. 4 je schematicky znázorněno výše popsané dělení podpůrných technologií.



Obr. 4 Schématický diagram nosných principů [14]

Zcela samoadaptivní flexibilní podpůrná technologie může podporovat celou kontaktní oblast tenkostěnných součástí. K podepření se využívá dvou principů: buď ztuhnutí kapalného média vlivem změny teploty nebo ztuhnutí MRF, která obsahuje malé magnetické částice a tuhne vlivem změny magnetického pole (viz Obr. 5). Jelikož je v obou případech nosný materiál kapalný, může libovolně měnit svůj tvar a přizpůsobit se tak obrobku se složitými strukturami. Obě tyto technologie mají však značné nevýhody jako jsou: znečištění povrchu obrobku, zvýšení spotřeby energie, použitelné pouze pro nižší zatížení, v případě využití MRF je složité řízení magnetického pole. Na druhou stranu obě tyto technologie prokazatelně zlepšují stabilitu obrábění a kvalitu povrchu obrobku. Jedním z praktických využití zcela samoadaptivní flexibilní podpůrné technologie je při obrábění voštinové struktury hojně využívané v sendvičových kompozitech.

K ověření použitelnosti toho principu byla provedena studie [15], ve které bylo prokázáno zlepšení drsnosti povrchu po obrábění. [14] [15] [16]

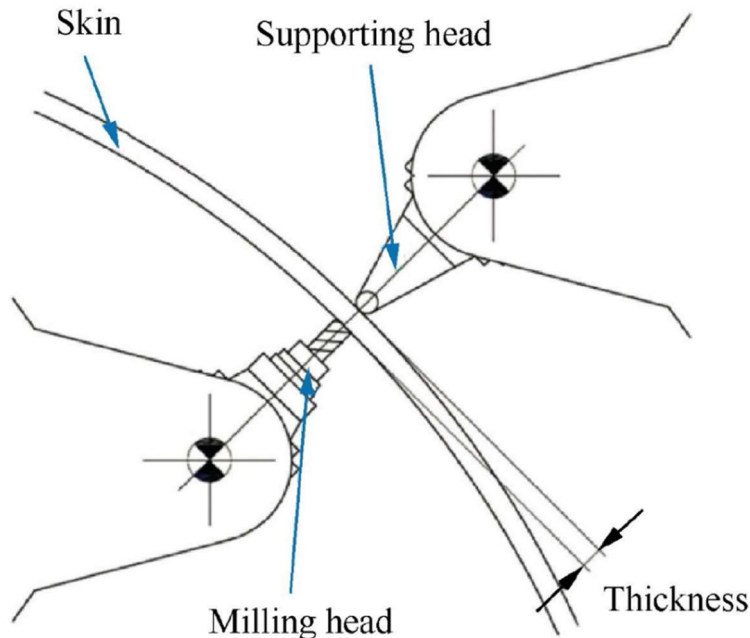


Obr. 5 Princip technologie MRF [16]

Základem vícebodové diskrétní flexibilní podpory je rozdělit nosnou plochu na několik podpůrných bodů, tak aby bylo v každém místě obrábění dosaženo dostatečné tuhosti podepření. Každý podpůrný bod je možné nezávisle řídit a nastavit ho do předem stanovené výšky. To je nejčastěji řešeno kuličkovým šroubem nebo hydraulickým válcem. Na konci podpůrného mechanismu je obvykle vakuová přísavka, která je s výsuvnou tyčí spojena kulovým kloubem, tak aby se přísavka přizpůsobila zakřivené ploše obrobku. Momentálně se výzkum technologie vícebodových diskrétních flexibilních opěr zaměřuje na využití MKP ke snížení deformace při obrábění a optimalizaci rozložení podpůrných bodů. Tato technologie je v současnosti již dobře vyvinuta a mnoho společností jí využívá v leteckém průmyslu. Tato technologie má střední účinnost a dosažitelnou přesnost. Důležité omezení této technologie je nutnost, aby podpůrný mechanismus dosedal na rovné nebo zakřivené plochy. Kromě toho je vícebodové podpůrné zařízení drahé a vhodné k obrábění pouze velkých tenkostěnných dílců. [14] [17]

Princip technologie symetrické následování dráhy řezného nástroje je znázorněn na Obr. 6. Tato technologie je také často nazývána jako zrcadlové frézování. Jak je z obrázku patrné, frézovací nástroj obrábí obrobek z jedné strany, zatímco opěrné zařízení je ze strany druhé. Opěrné zařízení se pohybuje

synchronně s frézovacím nástrojem a zlepšuje tak statickou i dynamickou tuhost obráběné oblasti. V současnosti je výzkum technologie zrcadlového obrábění zaměřen především na zdokonalení konstrukce podpůrných zařízení, kompenzaci chyb tloušťky stěny a řízení synchronního pohybu dvou spolupracujících mechanismů. Synchronizace dráhy frézovacího nástroje a podpůrného zařízení je zásadní. Pokud se obě zařízení nepohybují synchronně, může být přínos podpory minimální. Výhodami této technologie jsou: integrace měření tloušťky, zpětné vazby polohy a detekce chvění přímo do podpůrného zařízení. Lze dosáhnout vysoké účinnosti a přesnosti obrábění, jelikož je možné provádět různé technologické operace na jedno upnutí a snížit tak výrobní časy a chyby vzniklé pře upnutím obrobku. Zvýšení přesnosti může být také docíleno pokročilými strategiemi kompenzace chyby tloušťky stěny pomocí různých senzorů. Na druhou stranu jsou aktuálně průmyslově používaná podpůrná zařízení velmi drahá a obtížná na řízení synchronního pohybu dvou víceosých strojů. Jedním z možných řešení jak cenu snížit je použití standardního průmyslového robota. Robota je často možné do stroje zakomponovat bez nutnosti velkých konstrukčních úprav a díky své kinematické struktuře dokáže obsáhnout celý pracovní prostor stroje. [14] [18] [19]

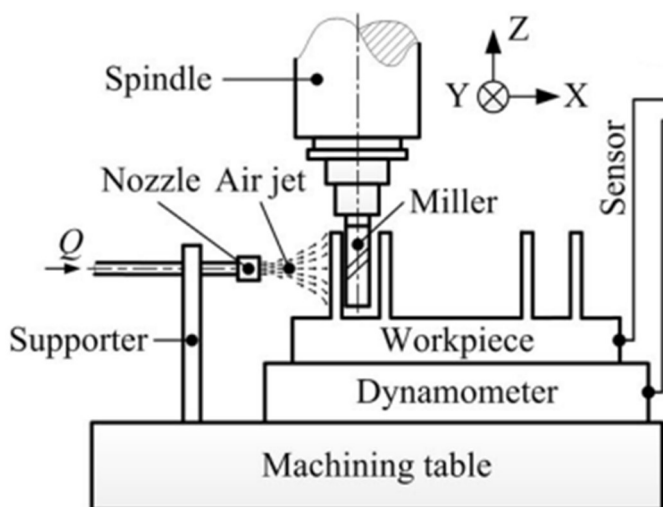


Obr. 6 Princip zrcadlového frézování [18]

Konstrukce podpůrného zařízení je jedním z klíčových prvků ovlivňující přímo přesnost obrábění a podpůrný efekt celého zařízení. Tyto podpůrná zařízení lze obecně rozdělit na kluzné, valivé a hydrostatické. Kluzné podpůrné zařízení

využívá k podepření obrobku plochou desku s dostatečnou tuhostí, ale nižší tvrdostí, než má obrobek, aby se zabránilo poškrábání. Kluzné podpůrné zařízení z důvodu svého tvaru nemůže podpírat zakřivené tvary obrobku. Valivé podpůrné zařízení je většinou opatřeno kuličkou nebo válečkem, který se po podepírané ploše odvaluje a dokáže se tak přizpůsobit křivosti dané plochy. U valivého podpůrného zařízení je důležité zajistit správnou přitlačnou sílu. Té může být dosaženo například pružinou nebo použitím tlakových válců. Síla musí být dostatečně vysoká tak, aby bylo dosaženo zvýšení tuhosti a tlumení v podepíraném místě, zároveň ale nesmí dojít k poškrábání obrobku. K zamezení poškrábání je možné použít hydrostatické podpůrné zařízení, které funguje na stejném principu jako hydrostatické vedení, tedy do mezery vzniklé mezi plochou obrobku a speciálně upravenou čelní plochou zařízení vhání pod tlakem médium, které zajišťuje dostatečnou opěrnou sílu. [14] [20] [21]

Speciálním případem technologie symetrického následování dráhy řezného nástroje je využití tzv. tryskové podpěry. Princip této technologie je znázorněn na Obr. 7. Do trysky je vháněno kapalné médium, které při kontaktu s obrobkem generuje podpěrnou sílu, která v ideálním případě vyrovnává frézovací sílu. Proveditelnost této metody byla ověřena ve studii [22], kde pro podporu tenkostěnných obrobků ze slitiny titanu byl použit proud vzduchu. Všeobecně lze říct, že tato metoda je relativně nová a stále probíhá výzkum pro její průmyslové využití. Hlavními výhodami této technologie jsou: Podpěrná síla vzniklá nárazem média do obrobku nezpůsobuje mechanické poškození povrchu. Médium paprsku má zároveň funkci chlazení, mazání a čištění. Řízením frekvence pulzů trysky lze ovlivnit vibrace obrobku. Momentálně však není možné přesné řízení podpěrné síly v závislosti na měnící se řezné síle.



Obr. 7 Princip tryskové podpěry [22]

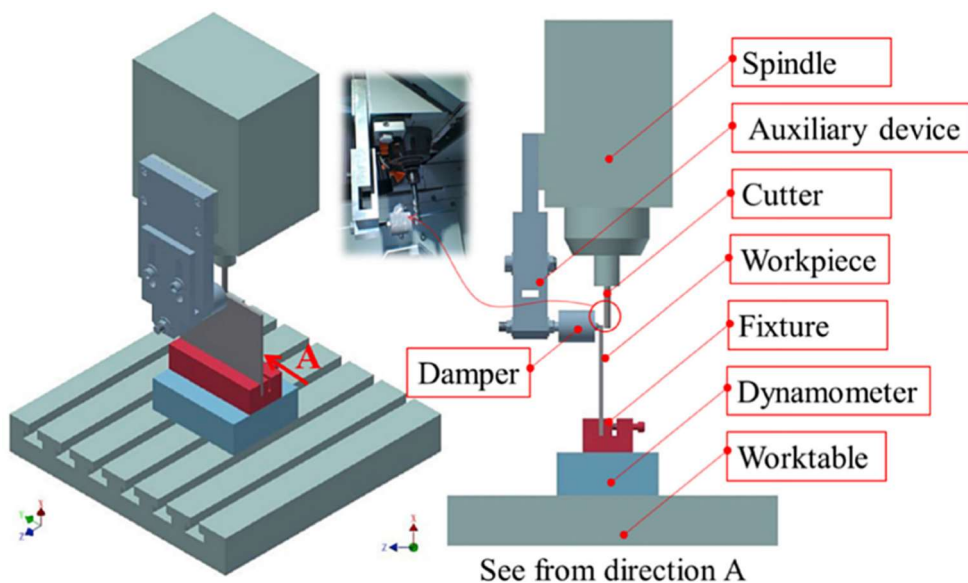
Podpůrné technologie lze dále obecně rozdělit na aktivní a pasivní. Aktivní podpůrné technologie se vyznačují aktivním zásahem během procesu obrábění buď změnou polohy, nebo vlastností podpůrného prvku. Díky tomu dokážou obrobek podepírat velmi blízko místu řezu. V případě pasivních podpůrných technologií se nastaví vlastnosti a poloha zařízení před samotným obráběním a během procesu jsou již konstantní. [23]

2.2 Pasivní podpůrné technologie

Jak už bylo zmíněno, pasivní opěrné prvky mají během procesu obrábění neměnné vlastnosti a polohu. I přes tento fakt je důležitým konstrukčním uzlem podpůrný prvek, který je v přímém kontaktu s obrobkem. Tento prvek velmi ovlivňuje vlastnosti celé technologie.

Zmírnění chvění pomocí pohyblivého tlumiče

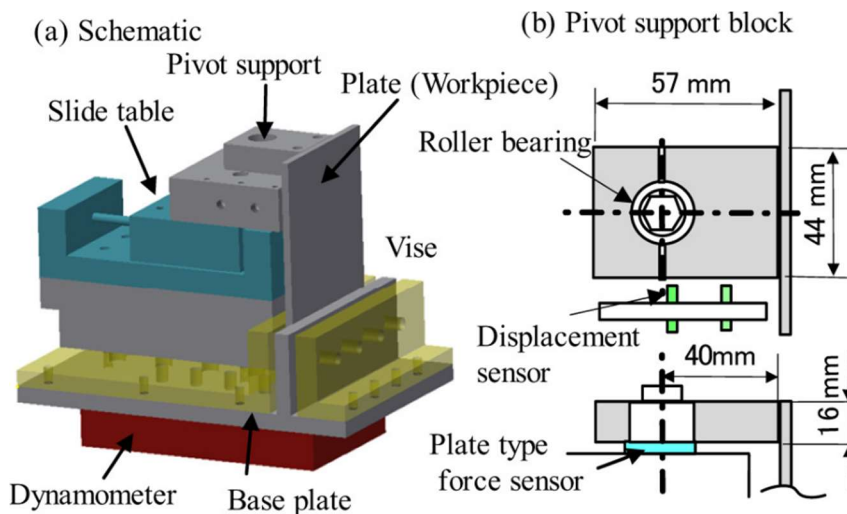
Fei a kol. [24] vyvinuli pasivní pohyblivou podporu s tlumičem (Obr. 8). Tlumič je pevně upevněn k vřeteníku obráběcího stroje a působí předem definovanou silou na druhé straně obrobku, než je nástroj. Polohu tlumiče, jež je dána tloušťkou obrobku, je nutné nastavit před samotným obráběním. Z toho důvodu není možné použít toto zařízení na součásti o proměnné tloušťce stěny bez roční změny polohy tlumiče. I když je toto zařízení velmi jednoduché, bylo experimentálně dokázáno značné zlepšení stability obrábění. Velkou výhodou tohoto zařízení je jeho snadná implementace do již existujících strojů bez nutnosti velkých konstrukčních změn.



Obr. 8 Experimentální setup vyvinutého zařízení [24]

Návrh podpůrného zařízení s otočným mechanismem pro potlačení vibrací při tenkostěnném frézování.

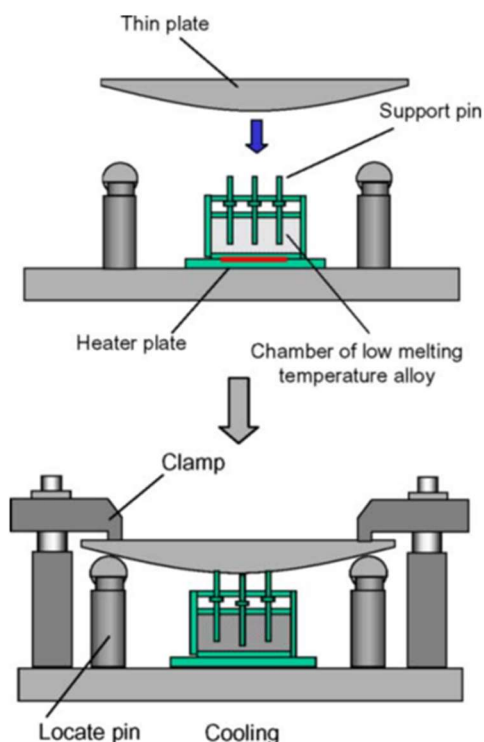
Testovací zařízení navržené ve studii [25] se skládá ze svěráku, podpůrné jednotky namontované na posuvném stole a základní desky (viz Obr. 9). Autoři studie se rozhodli pro podepření vrchní části desky zvolit jednoduchou obdélníkovou podporu. Podpůrný blok je s posuvným stolem spojen radiálním válečkovým ložiskem. Pro měření přitlačné síly podpory je mezi podpěru a posuvný stůl vložen senzor síly. Maximální délka a výška desky, kterou lze do zařízení upnout, je 100 respektive 150 mm. Celou jednotku lze instalovat na dynamometr a měřit tak řezné síly. Ve studii byly následně provedeny zkoušky obrábění rovne desky o tloušťce 5 mm s použitím pevného a rotačního opěrného bloku. Výsledky testů prokázaly, že otočná podpora dokáže zajistit lepší tlumení než podpora pevná a umožňuje zvýšit hloubku řezu a_p při zachování stability frézování přibližně o 50% v závislosti na otáčkách vřetena.



Obr. 9 Experimentální zařízení pro upevnění a podepření obrobku [25]

Vývoj upínacího zařízení pro tenké a poddajné obrobky

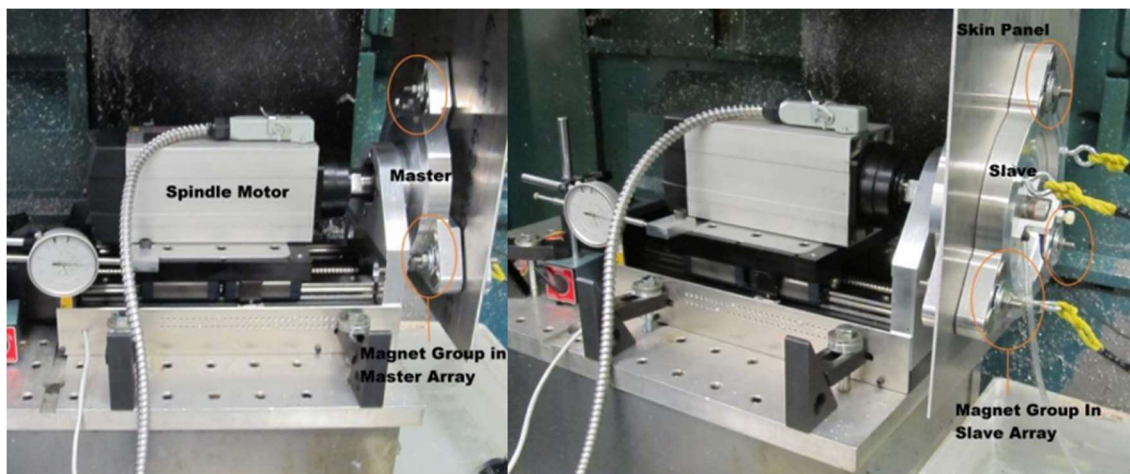
Aoyama a kol. [26] ve své studii představují upínací podpůrné zařízení, které dokáže podepírat tenké a poddajné obrobky. Základní struktura vyvinutého multipinového podpůrného zařízení je znázorněna na Obr. 10. Podpěra se skládá z podpůrných čepů uložených v komoře naplněné slitinou o nízké teplotě tavení. Pod komorou je umístěna topná deska. Po upnutí obrobku postranními upínkami je slitina zahřívána topnou deskou až do doby, než se slitina dostane do tekutého stavu. Díky vztlakové síle se podpůrné čepy pohybují vzhůru, dokud nenastane kontakt s obrobkem. Kontaktní síly mezi čepem a obrobkem závisí na vztlakové síle, která bude velmi malá. Následně je slitina v komoře ochlazená a opěrné čepy jsou pevně zaaretovány v nastavené pozici. Hlavní nevýhody použití této technologie jsou tepelné deformace způsobené zahříváním a ochlazováním slitiny a dlouhé časy upínání. Ve studii byl kladen velký důraz na eliminování tepelných deformací. Na základě MKP analýz byla tepelná komora navržena tak, aby působila proti tepelnému posunutí podpůrných čepů a eliminovala tak jejich teplotní deformaci. Na základě provedených experimentů bylo prokázáno potlačení elastické deformace obrobku při frézování. Dále bylo dosaženo zvýšení koeficientu tlumení zhruba na trojnásobek oproti nepodepřenému stavu. Díky tomu se amplituda kmitání snížila na rezonanční frekvenci přibližně o 66%.



Obr. 10 Základní struktura multi-pinového podpůrného zařízení. [26]

Přídavný master-slave efektor pro obrábění tenkostěnného hliníkového dílce

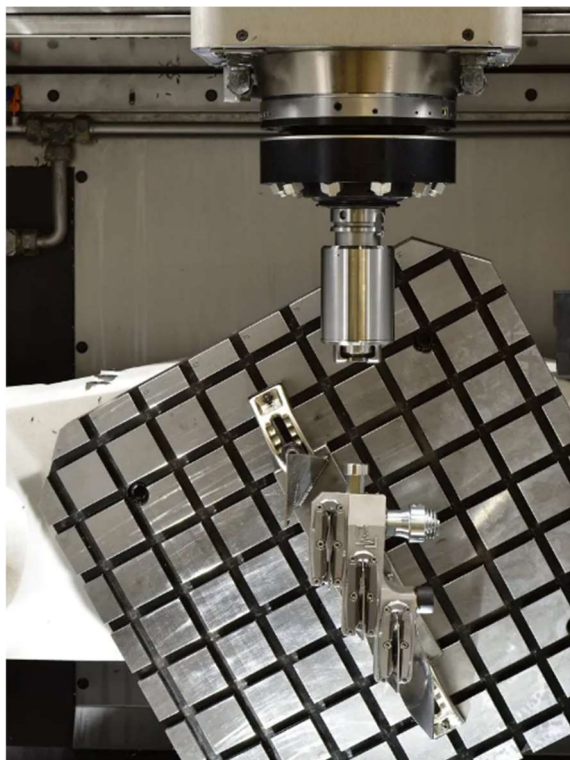
Mahmud [27] ve své studii zjednodušil podpůrné zařízení a snížil tak náklady na vybavení tím, že frézovací vřeteno osadil efektoem vybaveným třemi skupinami magnetů. Tento hlavní modul (master) řídil pohyb magnetického sklíčidla (slave) na druhé straně obrobku. Hlavní modul disponuje dvojitým kardanovým mechanismem a umožňuje relativní pohyb efektoru vůči vřetenu. Z důvodu použití magnetického sklíčidla je podpůrné zařízení možné použít pouze pro nemagnetické materiály, jako jsou například slitiny hliníku. Vstupní polotovary využívané v letectví jsou vyráběny tažením. Tažení má za následek proměnnou tloušťku obrobku, kterou je nutné kompenzovat. K tomuto účelu je efektor osazen ultrazvukovým senzorem, který měří aktuální tloušťku obrobku s přesností $\pm 0,025$ mm. Na základě zpětné vazby o tloušťce stěny je dynamicky upravena hloubka řezu pomocí servomechanismu. Experimentální zařízení na Obr. 11 se následně upevní na šestiosého angulárního robota, díky čemuž bude možné obrábět velké tenkostěnné struktury s dvojitým zakřivením. Z provedených testů bylo prokázáno zvýšení efektivity obrábění díky podpůrnému zařízení. Testy zpětnovazebního řízení však nebyly úspěšné a zařízení je tak stále ve fázi vývoje.



Obr. 11 Experimentální setup master–slave efektoru [27]

Blisker

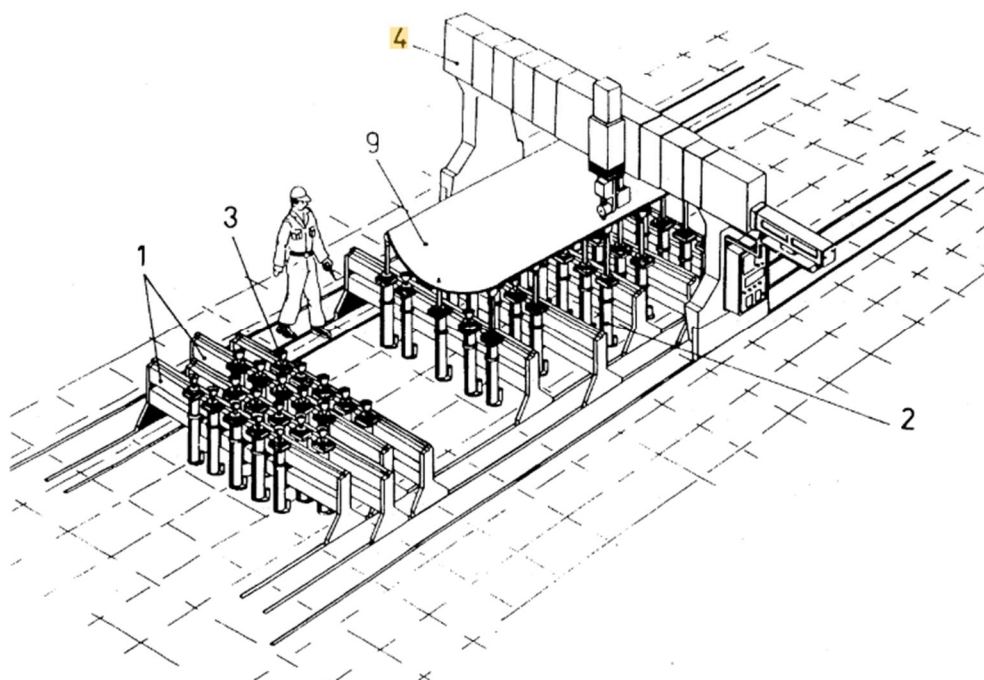
Podpurný systém Blisker od firmy Innoclamp se využívá především pro zvýšení stability obrábění při obrábění lopatkových kol. Funguje na jednoduchém principu propojení více lopatek, které tak dosáhnou vyšší statické i dynamické tuhosti. Velkou výhodou systému je jeho jednoduchá integrace do obráběcího stroje. Standardně je Blisker umístěn v zásobníku nástrojů a pomocí vřetena je přemístěn do požadované pozice na obrobku. Po umístění na požadovanou pozici jsou pomocí chladicího maziva z vřetena stlačeny flexibilní upínací prvky, které jsou navrženy tak, aby obrobek nedeformovaly. Následně se vřeteno oddělí a Blisker zůstane na obrobku, viz Obr. 12. Proces upínání a obrábění lze následně monitorovat pomocí integrovaných bezdrátových senzorů. Výrobce dále udává, že při využití systému Blisker lze zlepšit tvarovou přesnost a drsnost povrchu obrobku. [28]



Obr. 12 Podpůrný systém Blisker [28]

Torrestool

Torrestool je vícebodová diskretní flexibilní podpůrná technologie vyvinutá firmou M. Torres. Zařízení se v základu skládá z několika podpůrných tyčí, které tvoří mřížku v osách x a y. V ose z jsou výsuvné tyče přestavitelné do požadované výšky pomocí servomotoru a mechanismu s kuličkovým šroubem. Na konci každé podpůrné tyče je vakuová přísavka opatřená kulovým kloubem, tak aby se mohla přísavka naklánět dle zakřivení obráběné struktury. Firma nabízí několik konfigurací provedení. Nejpokročilejší konfigurací (viz Obr. 13) je nezávislé ovládání všech os x, y a z s pomocí servomechanismů. Při zvolení této konfigurace lze dosáhnout podepření obrobku v jakémkoliv bodu pracovního prostoru. Torrestool je vhodný pro frézování, vrtání nebo řezání laserem a je možné tyto technologie provádět na jedno upnutí a díky tomu snížit výrobní časy a zvýšit dosažitelnou přesnost. Deformace obrobku je způsobena především jeho vlastní hmotností. V případě tenkostěnného obrobku mohou být deformace nadměrné a je nutné zvýšit počet podpůrných tyčí. K určení vhodného počtu podpor a jejich polohy jsou v praxi využívány MKP simulace nebo počítačové algoritmy. [29] [30]



Obr. 13 Torrestool v konfiguraci tří přestavitelných os [29]

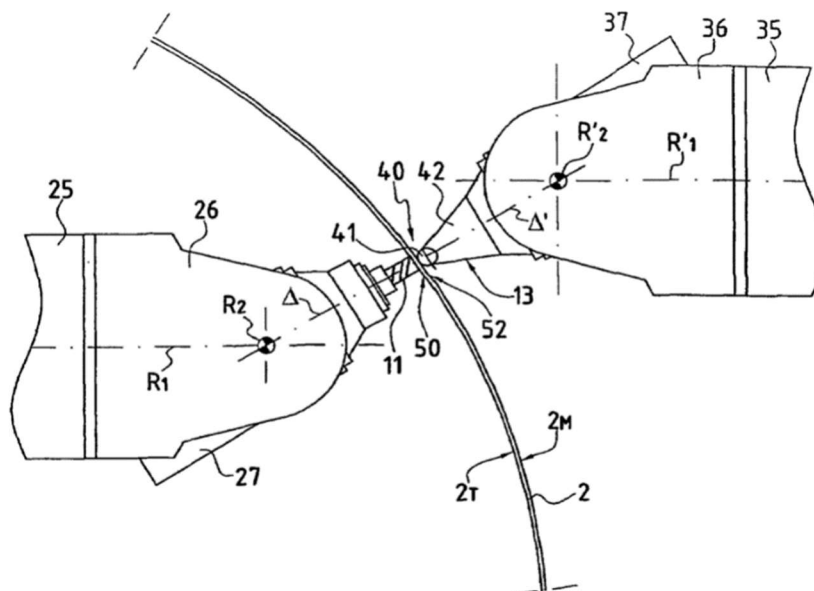
2.3 Aktivní podpůrné technologie

Jak je ze zadání práce patrné, hlavní část vlastního řešení bude věnována aktivním podpůrným technologiím. Díky možnosti změny polohy během procesu obrábění poskytují aktivní podpůrné technologie flexibilní a efektivní podporu vždy co nejbližší místu obrábění.

Zařízení pro zrcadlové obrábění tenkostěnných panelů

Patent navržený společností Dufieux industry společně s firmou Airbus řeší problém obrábění tenkostěnných panelů široce používaných v leteckém průmyslu. Tyto panely mají často zakřivení ve dvou rovinách a jsou tvarovány tažením na konvexní formu. Řešení navržené v patentu spočívá ve využití dvou pětiosých hlav, kdy jedna hlava zajišťuje frézování a druhá hlava působí silou z druhé strany obrobku za účelem tlumení vibrací a kompenzací řezné síly, viz Obr. 14. Toto řešení bylo navrženo jako alternativa k elektroerozivnímu obrábění. Pro určení skutečných rozměrů obrobku je frézovací hlava opatřena optickým senzorem. Ten zaručuje dostatečnou přesnost obrábění u obrobků, kde jsou skutečné a nominální rozměry odlišné z důvodu tvarování vstupního polotovaru tažením. Toto řešení je však velmi drahé, jelikož je nutné opatřit stroj dvěma pětiosými hlavami. To je zároveň problém

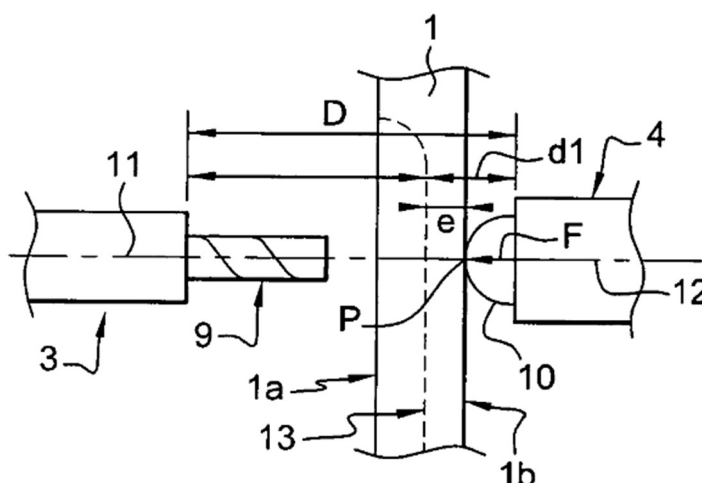
z pohledu řízení, kdy je nutné synchronizovat pohyb víceosého systému na opačných stranách obrobku. [19]



Obr. 14 Zařízení pro zrcadlové obrábění tenkostěnných panelů [19]

Zařízení pro obrábění flexibilních panelů složitých tvarů

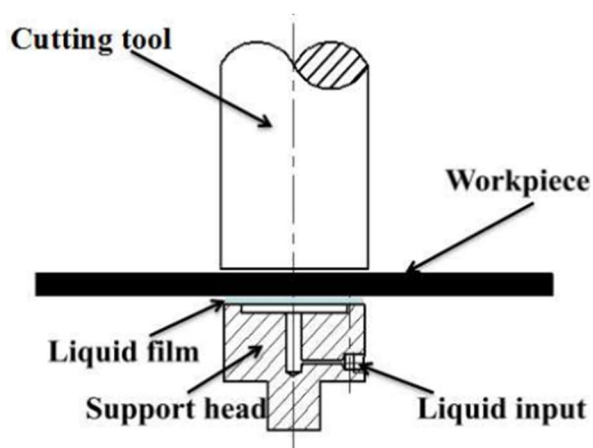
J. Hamann [31] představil vynález podpurného zařízení pro obrábění složitých zakřivených tenkostěnných panelů používaných v letectví. Při obrábění takovýchto panelů je hlavní problém proměnná tloušťka stěny obrobku především při kapsování. U kapsování je nutné dosáhnout hodnoty e (viz Obr. 15) v toleranci $\pm 0,1$ mm při obrábění panelu o ploše 10 m^2 . Tento problém je v patentu řešen použitím podpory 4, která působí proti řezné síle vyvolané frézou 9. Pohyb podpurného zařízení a frézy je svázán numerickým řízením. V průběhu obrábění je kulový konec podpory 10 neustále v kontaktu s povrchem 1b. Ze znalosti rozměru D a zadání rozměru $d1$ do numerického řízení lze relativně definovat polohu nástroje a podpěry, tak aby bylo dosaženo rozměru $d1$ nezávisle na proměnné tloušťce obrobku a lze tak dosáhnout požadované přesnosti u rozměru e .



Obr. 15 Detailní pohled na frézování kapsy [31]

Zrcadlové frézování – hydrostatické opěrné hlavice

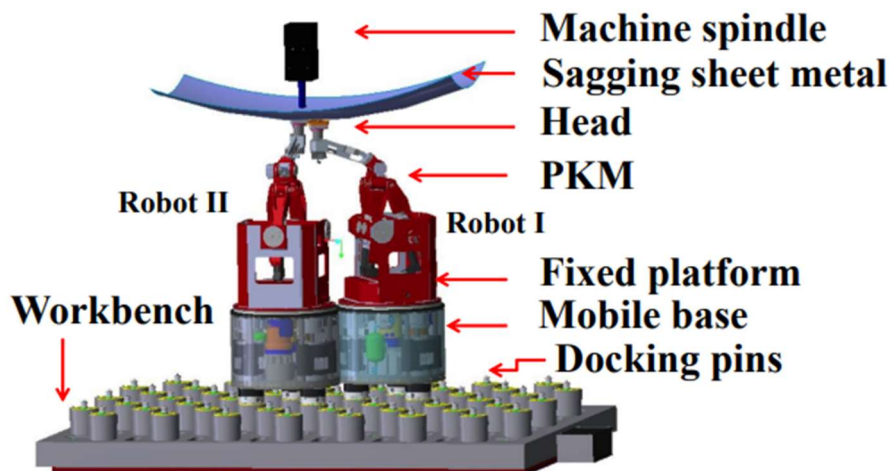
Jak je z Obr. 16 patrné, tekutý film kapaliny se tvoří mezi podpůrnou hlavou a obrobkem po dosažení určitého tlaku kapaliny. Použitím této metody se eliminuje mechanické poškození obrobku a sníží se tření mezi obrobkem a podpůrnou hlavou. Dále je dosaženo potlačení chatteru a snížení teploty řezu. Článek se dále zabývá nastavením potřebného tlaku a velikostí podpůrné hlavy. Aby bylo možné vytvořit tekutý film, je nutné, aby tlak kapaliny byl vyšší, než je tlak vyvozený na druhé straně obrobku obráběcí silou. Z provedených testů vyplynulo, že při zvyšování tlaku klesala tuhost podpěry z 5 N/ μm při 20 kPa na 0,82 N/ μm při 200 kPa. Tato změna tuhosti v průběhu obrábění má za následek proměnnou přesnost obrobeného dílce. Při správném nastavení tlaku je však možné dosáhnout relativně konstantní tuhosti a docílit tak požadované rozměrové tolerance. Díky použité podpěře byl eliminován chatter, což se projevilo především na drsnosti obrobeného povrchu. Drsnost povrchu byla snížena z 2,3 μm na 1 μm . [21]



Obr. 16 Schéma podpory s tlakovou kapalinou [21]

SwarmItFix

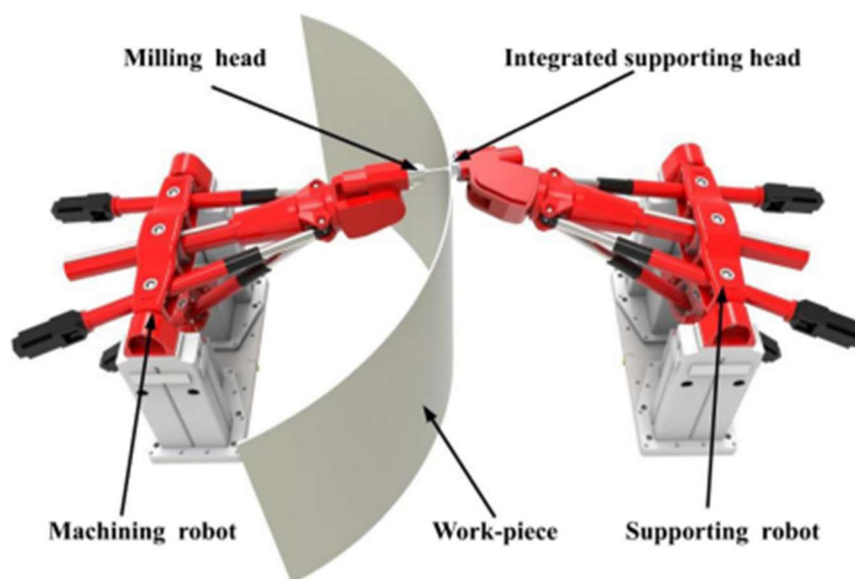
Motivací k vývoji SwarmItFix byla potřeba podpůrného zařízení v kusové výrobě, ve které se nevyplatí pro každý obrobek vyrábět speciální pevnou podporu. Zařízení se skládá z podpůrné hlavy, robota s paralelní kinematikou a pohyblivé základny (viz Obr. 17). Konstrukce podpůrné hlavy je blíže popsána v kapitole 2.4. V zařízení je použit paralelní kinematický mechanismus (PKM) Exechon PKM X 150, který byl dále modifikován pro potřeby podpůrného zařízení. Modifikovaný mechanismus má rozšířené možnosti polohování potřebné pro speciální aplikace. Hlavním důvodem použití PKM je zvýšená tuhost oproti sériové kinematické struktuře. PKM je upevněno na pohyblivé základně, která se pohybuje po pracovním stole. Po přejetí do požadované pozice je základna uzamčena pomocí speciálních dokovacích kolíků, které dokážou zařízení napozicovat s přesností 0,005 mm. Přes dokovací kolíky je do celého zařízení přiváděna elektrická energie a stlačený vzduch. Pohyb základny po pracovním stole je tak limitován pouze počtem použitých dokovacích kolíků, díky čemuž disponuje zařízení velkou pracovní oblastí. Hlavní výhodou prezentovanou v článku je nastavení podpěry u nového obrobku do 5 minut a při opakovaném upínání trvá nastavení pouze 60 sekund. Na základě testů byla změřena ortogonální tuhost, která dosahovala hodnoty 1 N/ μm , což je vyšší hodnota ve srovnání se zcela samoadaptivní flexibilní podpůrnou technologií. Dále bylo v testech provedeno obrábění leteckých panelů. V těchto testech byla dodržena předepsaná rozměrová i geometrická tolerance a prokázala se tak použitelnost SwarmItFix v leteckém průmyslu. [32] [33]



Obr. 17 Sestava prototypu SwarmItFix [32]

Zrcadlové obrábění dvou spolupracujících robotů

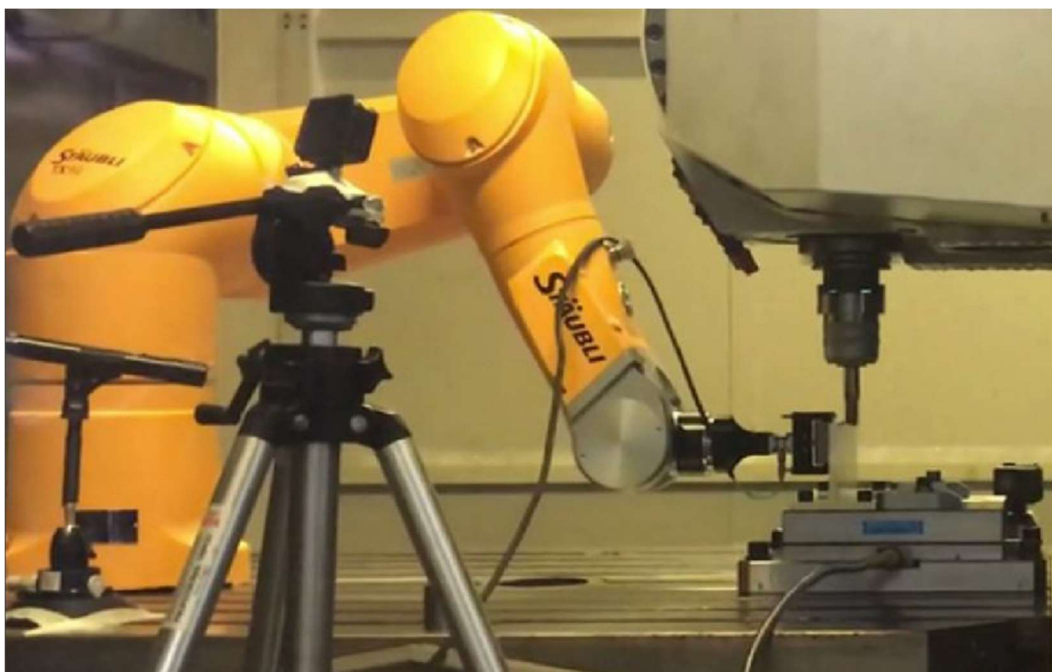
J. Xiao a kol. [34] využili k zrcadlovému obrábění dva pětiosé roboty s paralelní kinematikou – TriMule. Tito roboti disponují vyšší tuhostí a přesností než roboti se sériovou kinematikou. Oproti standardním obráběcím strojům jsou však tyto parametry horší. Na druhou stranu je při obrábění tenkostěnných struktur dosahováno pouze malé obráběcí síly a tím pádem dosahují i roboti s paralelní kinematikou uspokojivých výsledků. Ke snížení deformací a potlačení vibrací je využit druhý robot stejné konstrukce, který pomocí podpůrné hlavy podepírá obrobek, viz Obr. 18. Podpůrná hlava obsahuje několik podpůrných bodů rozmístěných tak, aby byl obrobek podepřen vždy na více místech. Bližší popis podpůrné hlavy viz kapitola 2.4. Reálná tloušťka stěny je určena pomocí snímačů geometrické pozice obou robotů a následného výpočtu blíže popsáno v článku. Experimentální výsledky prokazují, že navrženou metodu lze použít k efektivnímu obrábění. Testy byly provedeny při obrábění trojúhelníkové kapsy o rozměrech 1000 x 800 mm a při tloušťce stěny 8 mm. Obráběným polotovarem byla slitina hliníku 6061. Výsledná polohová chyba frézovací hlavy v prostoru je menší než 0,03 mm, úhlová odchylka frézovací hlavy nepřesáhla 0,002° a odchylka tloušťky stěny se pohybovala v rozmezí $\pm 0,2$ mm. V dalším výzkumu bude zdokonaleno řízení robotů za účelem zmenšení odchylky tloušťky obráběné stěny.



Obr. 18 Zrcadlové obrábění dvou spolupracujících robotů [34]

Frézování s asistencí robota pro zvýšení produktivity

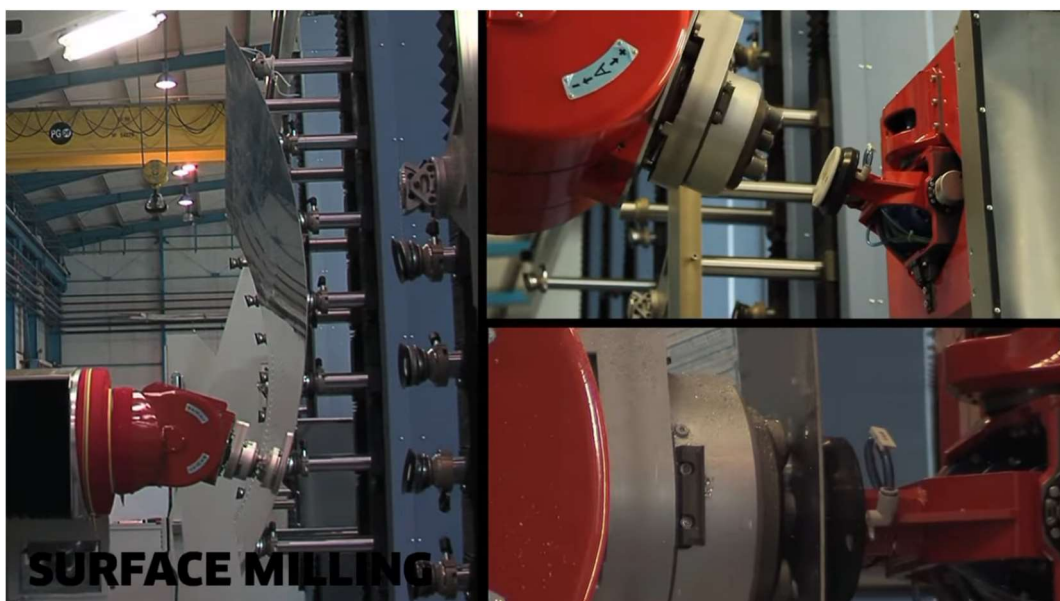
Článek [23] se zabývá využitím standardního průmyslového robota pro podepření tenkostěnného obrobku za účelem zvýšení produktivity. Autor v článku uvádí, že robot může poskytnout statickou nebo mobilní podporu. V obou případech má podpora za následek zvýšení tuhosti a tlumení. Využití robota jako mobilní podpěry však poskytuje lepší výsledky zlepšením dynamické tuhosti díky možnosti podepřít obrobek blízko oblasti řezu. Testy byly prováděny na stroji Starrag STC1250. Jako podpěra sloužil šestiosý angulární robot Staubli TX90 opatřený koncovým efektoem s valivým pryžovým válečkem. Efektor dále obsahoval senzor síly pro správné nastavení přitlačné síly podpěry. Na Obr. 19 je reálné rozložení celého pracoviště. Z provedených testů vyplynulo, že při zvyšování podpůrné síly docházelo ke zlepšení tlumení. Síla byla tedy zvolena z dosažitelných parametrů robota, tak aby nedocházelo k jeho přetížení. V prezentovaných výsledcích testu bylo dosaženo zmenšení rozměrové odchylky o 68 % při axiální hloubce řezu 5 mm respektive 37 % při axiální hloubce řezu 10 mm. Dále bylo dosaženo snížení drsnosti povrchu o 75 % díky odstranění chatteru. V závěru autor uvádí, že pro dosažení ještě lepších výsledků bude potřeba podpůrnou sílu v průběhu obrábění řídit.



Obr. 19 Robotické asistované frézování [23]

Torres surface milling

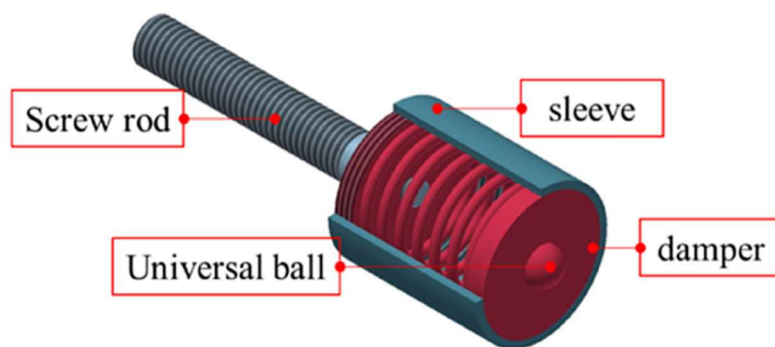
Španělská firma MTorres vyvinula technologii Torres surface milling. Jedná se stroj pro obrábění tenkostěnných struktur především pro letecký průmysl. Hlavní motivací k aplikaci tohoto stroje je vyhnout se elektroerozivnímu obrábění, které je tradiční technologií pro obrábění tenkostěnných leteckých panelů. Stroj pracuje na stejném principu jako patent navržený společností Dufieux industry, jenž je popsán výše. Stroj kombinuje 5-osou horizontální frézku TORRESMILL a 5-osou podpůrnou hlavou TORRESHOLDER, která podepírá obrobek z druhé strany. Zároveň je stroj vybaven přenastavitelným podpůrným systémem TORRESTOOL popsáným v kapitole 2.2. S rozdílem, že TORRESTOOL je ve vertikální poloze tak, aby byl obrobek přístupný z obou stran. Na Obr. 20 je vidět boční pohled na celý stroj. V pravé horní části je pak v detailu zobrazena dvouosá frézovací hlava, vůči které se polohuje podpůrná hlavice. Pro dosažení přesné tloušťky obrobené stěny je použit ultrazvukový senzor typu pulse/echo, který aktivně zasahuje do polohy frézovací hlavy. [35]



Obr. 20 Torres surface milling [36]

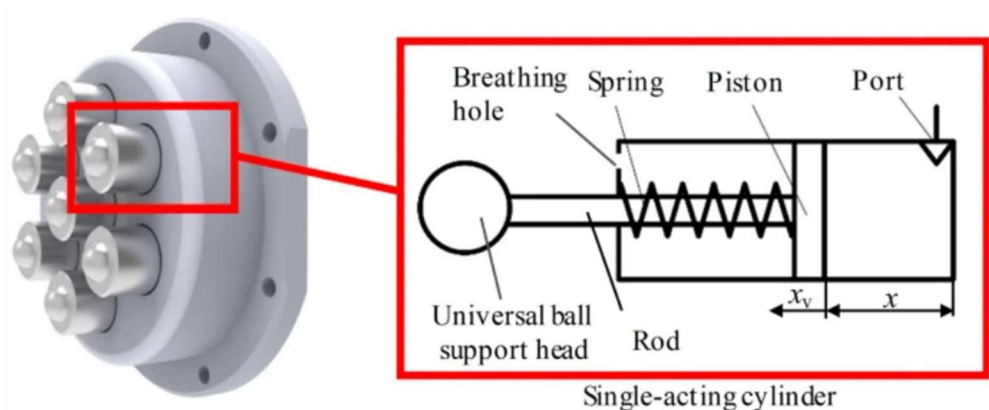
2.4 Přehled konstrukcí opěrných prvků

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.1, konstrukce koncového opěrného prvku má přímý vliv na přesnost obrábění a podpůrný efekt celého zařízení. Kluzné opěrné prvky disponují dostatečnou tuhostí, ale mohou snadno poškrábat povrch obrobku. Možností je použít měkčí materiál, než je materiál obrobku, což však snižuje dosažitelnou tuhost. Matsubara a kol. [25] ve své studii používají kluzný podpůrný prvek z materiálu PLA. Podpůrný prvek je poté rotačně uložen v kuličkovém ložisku, aby bylo možné podepřít i mírně zakřivené plochy. Všeobecně jsou kluzné opěrné prvky nevhodné k podepření zakřivených ploch a využívají se zejména u ploch rovných. Valivé opěrné prvky jsou momentálně nejrozšířenějším podpůrným prvkem. Obvykle je využito kuličky nebo válečku. Bao a kol. [37] provedli studii vlivu počtu a polohy opěrných bodů na deformaci obrobku. Výsledky prokazují, že deformace obrobku klesá se zvyšujícím se počtem použitých opěrných bodů. Dále bylo zjištěno, že rozmístění opěrných bodů na hlavici má značný vliv na konzistenci tloušťky obrobku. Na druhou stranu i jednoduchý opěrný prvek pouze s jedním bodem dotyku dokáže zlepšit řezný proces, jak prokázal Fei a kol. [24]. K podepření byl ve studii použit tlumič (viz Obr. 21) složený z pružiny, univerzální koule, objímky a šroubové tyče. Pružina umožňuje pohyb v axiálním směru a zajišťuje přitlačení kuličky k obrobku.



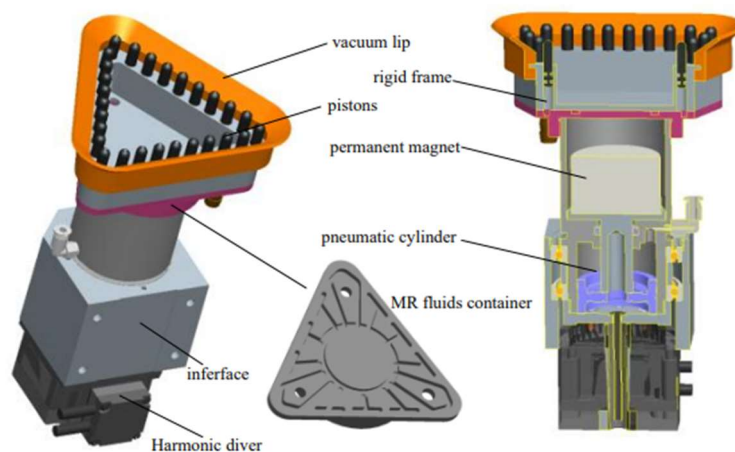
Obr. 21 Konstrukce podpůrného tlumiče [24]

Valivé opěrné prvky jsou využívány i v průmyslových aplikacích. Například patent [19] využívá valivý podpůrný prvek z elasticky deformovatelného materiálu. Elastická deformace podpůrné koule je využita k tlumení vibrací vzniklých při obrábění. Podpůrný prvek je vyměnitelně upevněn k pětiosé hlavě. Stejný typ konstrukce také využívá firma MTorres ve svém zařízení Torres surfce milling. Jelikož se však jedná o průmyslové řešení, výrobci neuvádí detailnější informace ke konstrukci podpůrných prvků. Xiao a kol. [20] navrhli vícebodovou podpůrnou hlavu složenou ze sedmi vzájemně propojených pneumatických jednočinných válců, viz Obr. 22. Nosná hlava dokáže měnit podpůrnou sílu na základě změny frézovací síly řízením tlaku ve válci pomocí elektrického servoventilu. Díky stlačitelnosti vzduchu podpůrná hlava poskytuje pružnou podporu a nastavuje vysunutí pístnice dle zakřivení povrchu obrobku. Šest válců je rozmístěno po kružnici a jeden válec je ve středu hlavy, tak aby zvyšoval místní tuhost v místě frézování. Použitím několika podpůrných bodů je dosaženo lepších výsledků obrábění než při využití pouze jednoho opěrného bodu. Na konci každého válce je opěrná koule sloužící ke snížení tření a eliminaci škrábanců na obrobku.



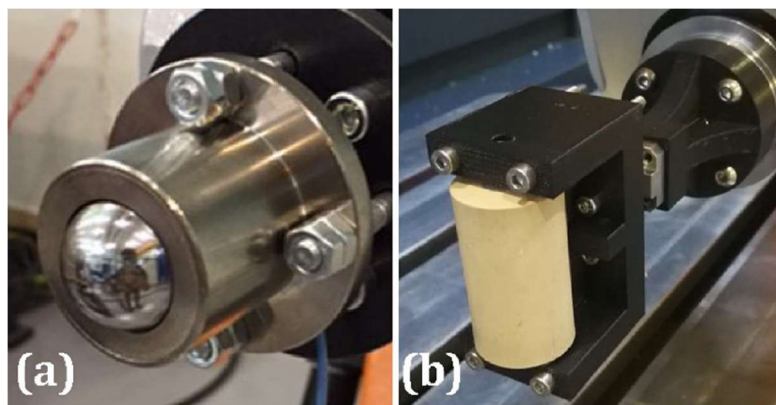
Obr. 22 Struktura podpůrné hlavy s jednočinnými pneumatickými válci [20]

Poměrně komplexní konstrukci navrhl ve své studii Gagliardi a kol. [33]. Po obvodu trojúhelníkové podpůrné hlavy jsou rozmístěny miniaturní písty ovládané magnetoreologickou kapalinou (MRF), viz Obr. 23. Prostor všech pístů je propojen s hlavní nádrží MRF. MRF má v počáteční fázi (dolní úvrať permanentního magnetu) nízkou viskozitu a rychlou dobu odezvy, což je ideální pro rychlé přizpůsobení obrysu obrobku. Přitlačení pístů k obrobku zajišťuje vakuum generované ve vnitřním prostoru hlavic utěsněného měkkým pryžovým břítem. Následně se permanentní magnet přesune do horní úvrati a pozice pístů se „uzamkne“ z důvodu zvýšení viskozity MRF. Při změně geometrie dílce se tento proces musí opakovat. Hlavice je vyrobena z nerezové oceli a hliníku, aby se zabránilo zmagnetování obrobku. Celá hlavice je umístěna na speciálním robotickém manipulátoru, který s hlavicí pohybuje v závislosti na místě obrábění. S hlavicí však nelze kontinuálně pohybovat, ale je nutné ji přestavovat v cyklech dle pozice frézy.



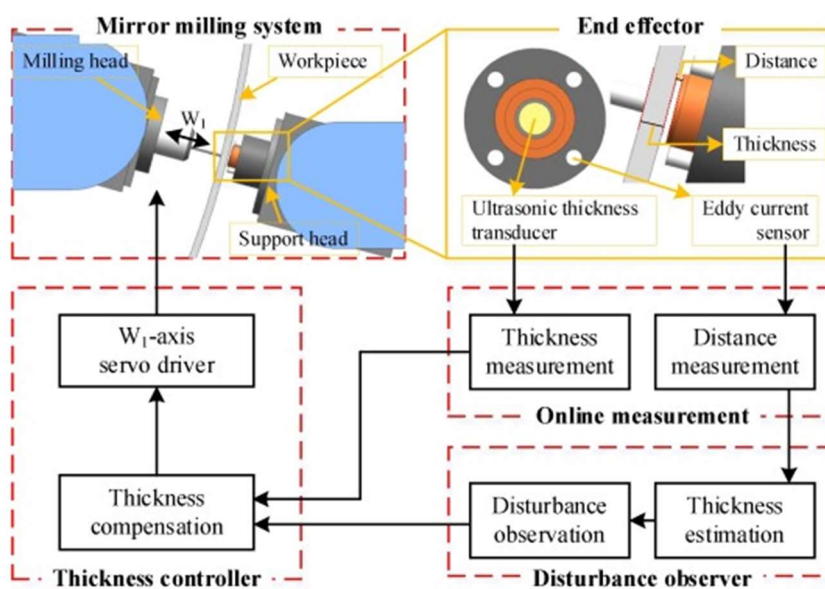
Obr. 23 Konstrukce podpůrné hlavice pro zařízení SwarmItFix [33]

Ozturk a kol. [23] navrhli podpůrný koncový efektor pro angulárního šestiosého robota. Jako podpůrný prvek byl zvolen rotačně uložený váleček z pryže znázorněný na Obr. 24 (b). Ve studii dále uvádí, že byla také jako podpůrný prvek testována kovová kulička, viz Obr. 24 (a), a i u ní nedocházelo k poškrábání obrobku. Podpůrný váleček byl ke koncové přírubě robota připevněn přes snímač síly Kistler 9317C. Pomocí snímače byla nastavena požadovaná podpůrná síla, která byla v průběhu frézování neměnná.



Obr. 24 Podpůrný prvek pro robota Staubli TX90 [23]

Při kapesování tenkostěnných dílců je značně náročné dodržet požadovanou tloušťku stěny z důvodu vnějších poruch, jako je deformace obrobku, chyby obráběcího stroje, chyby upnutí a rozměrové odchylky polotovarů. V takovýchto případech se přímo nabízí využít podpůrné hlavice zároveň k in-procesnímu měření tloušťky stěny. S. Zhang a kol. [38] v článku uvádí standartní přístup měření tloušťky stěny obrobku a na základě nevýhod těchto běžných metod navrhli novou online kompenzační strategii kombinující polohové a ultrazvukové měření tloušťky stěny. Velkým problémem při kompenzaci je zpoždění měření, které způsobuje, že systém s uzavřenou smyčkou je nestabilní a je obtížné docílit požadované tloušťky. Autoři se v článku zabývají možným řešením tohoto problému pomocí modifikovaného Smithova prediktu a poruchového pozorovatele navrženého přímo pro zrcadlové obrábění. Schéma online měření a kompenzace tloušťky stěny je znázorněno na Obr. 25.



Obr. 25 Schéma online měření a kompenzace [38]

2.5 Shrnutí rešerše a doporučení pro zadanou aplikaci

Z provedené rešerše vyplývá, že pro produktivní obrábění tenkostěnných dílců lze velmi výhodně využívat podpůrných technologií. Tyto technologie zajišťují zvýšení statické a dynamické tuhosti obrobku, jenž je v případě tenkostěnného obrábění nejpoddajnější.

V oblasti podpůrných technologií je v praxi využíváno několika principů: zcela samoadaptivní podpůrné technologie, vícebodové diskrétní podpůrné technologie a podpůrné technologie symetricky následující dráhu řezného nástroje. Dále se dají podpůrné technologie rozdělit na aktivní a pasivní. Aktivní podpůrné technologie díky možnosti změny polohy během procesu obrábění poskytují flexibilní a efektivní podporu vždy co nejbližší místu obrábění.

Velmi důležitým prvkem podpůrné technologie je podpůrná hlavička. Podpůrné hlavičky využívané v praxi nabývají rozmanité složitosti konstrukce. Složitost konstrukce ovlivňuje především požadavek na snímání in-procesních dat v reálném čase. Podpůrné hlavičky je možné využít pro měření řezné síly a následně upravit podpůrnou sílu, nebo je možné měřit reálnou tloušťku stěny obrobku a zasahovat do dráhy nástroje pro docílení přesné tloušťky stěny. Studie [20] prokázala, že při použití hlavičky s více dotykovými body je dosaženo lepších výsledků obrábění. Počet podpůrných bodů je však nutné volit na základě tvaru a rozměrů podepíraného obrobku. Z rešerše je také patrné, že konstrukci podpůrné hlavičky do značné míry ovlivňuje podpíraný dílec

S ohledem na výše uvedené se diplomová práce zabývá návrhem podpůrné technologie využívající robota s podpůrnou hlavičkou. Robot je možné využít pro podepírání rozmanitých obrobků s rychlou úpravou dráhy podpěry v případě potřeby. Volba robotu jako nositele podpůrné hlavičky sebou nese několik požadavků. Například nízká hmotnost hlavičky, malé zástavbové rozměry, řešení v případě dráhové nepřesnosti robotu atd.

3. Koncepte pracoviště

Tato diplomová práce se zabývá rozšířením již instalovaného stroje o zařízení pro podepření poddajného dílce. Při koncepčním návrhu bude nejdříve řešen layout pracoviště a následně návrh mechanických komponent potřebných k integraci podpůrné technologie ke stroji.

3.1 Seznámení s aktuálním pracovištěm

Zadaný stroj pro aplikaci podpůrné technologie je hybridní stroj WeldPrint 5AX od českého výrobce Kovosvit MAS, a. s. zobrazený na Obr. 26. Jedná se o 5-osý vertikální frézovací stroj rozšířen o aditivní technologii prostřednictvím svařovacího agregátu MIG/MAG (tzv. WAAM – wire arc AM). Díky hybridní technologii je možné využít i mezioperační obrábění při aditivní výrobě a zajistit tak přidávání materiálu na čistou a geometricky jasně definovanou plochu. Na desku stolu je možné upnout obrobek o maximální hmotnosti 400 kg a rozměru $\varnothing 520 \times 475$ mm. Stroj disponuje posuvnými osami X, Y, Z, sklopnou osou A a otočnou osou C.



Obr. 26 Hybridní stroj WeldPrint 5AX [39]

S opěrným prvkem bude manipulovat šestiosý angulární robot Comau Racer 7-1.4. Hlavní motivací pro využití robotu od firmy Comau je možnost přímého řízení pohonů jednotlivých os a díky tomu provést integraci robotu do řídicího systému Siemens Sinumerik 840D. Tato integrace výrazně zjednodušuje hardwarovou konfiguraci a umožňuje bezproblémovou synchronizaci mezi pohybovými osami obráběcího stroje a robotu. Integrace robotu do řídicího

systému stroje je podrobněji popsána v kapitole 4.3. Technické parametry robotu Comau Racer 7-1.4 jsou uvedeny v Tab. 1.

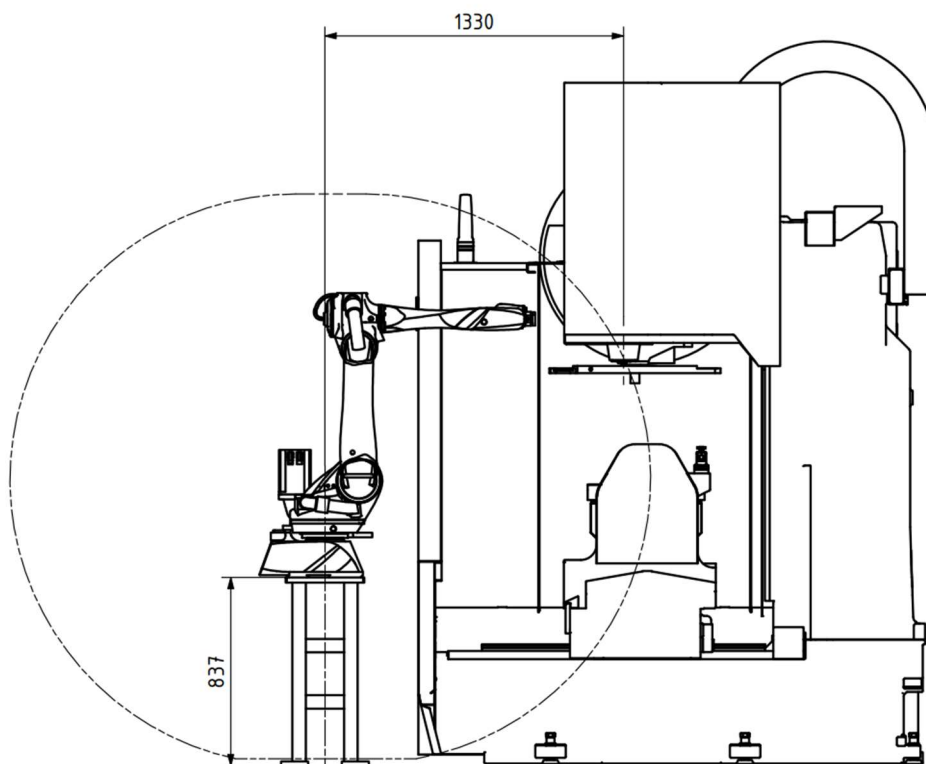
Tab. 1 Technické parametry robotu Comau Racer 7-1.4 [40]

| VERSION | | Racer7 - 1.4 |
|-------------------------------------|--------|-------------------------------------|
| Structure / n° axes | | Anthropomorphic / 6 axes |
| Wrist load | | 7 kg (15.43 lb) *1 |
| Nominal load at wrist | | 5 kg (11 lb) *1 |
| Additional maximum load | | 10 kg (22.04 lb) *1 |
| Axis 4 torque | | 13 Nm |
| Axis 5 torque | | 13 Nm |
| Axis 6 torque | | 7.5 Nm |
| Admissible inertia on axis 4 | | 0,6 kg x m ² |
| Admissible inertia on axis 5 | | 0,6 kg x m ² |
| Admissible inertia on axis 6 | | 0,3 kg x m ² |
| Stroke //(Speed) | Axis 1 | +/- 165° (250°/s) |
| | Axis 2 | - 85° / +155 ° (250 °/s) |
| | Axis 3 | 0° / -168° (300 °/s) |
| | Axis 4 | +/- 210° (600 °/s) |
| | Axis 5 | +/- 135° (600 °/s) |
| | Axis 6 | +/- 2700° (650 °/s) |
| Max horizontal reach | | 1436 mm (4.71 ft) |
| Repeatability | | +/- 0.05 mm |
| Robot weight | | 180 kg (397 lb) |
| Robot wrist features tools clamping | | ISO 9409 - 1 - A 40 |
| Motors | | AC Brushless |
| Position measurement system | | Encoder |
| Protection degree | | IP65 |
| Assembly position | | Floor / Ceiling / Sloped surface *3 |
| Operating environment temperature | | 0°C to +45°C |
| Storage temperature | | -25°C to + 55°C |

3.2 Předběžný návrh layoutu pracoviště

S ohledem na zadání práce vyplývá, že bude provedeno rozšíření již nainstalovaného stroje o podpůrnou technologii. Není tedy žádoucí zasahovat do konstrukce stroje a provádět rozsáhle konstrukční úpravy. Robot musí být vhodně umístěn mimo stroj, ale zároveň pokrýt svým pracovním prostorem co největší pracovní prostor stroje, tak aby bylo možné podepírat tvarově rozmanité obrobky. Umístění robotu vůči stroji je znázorněno na Obr. 27. Dvojitě čerchovanou čarou je vytyčen dosah osy J5 robotu. Výška podstavce je volena tak, aby robot při podepírání obrobku nekolidoval s vnějším krytváním stroje a zároveň měl co největší dosah v pracovním prostoru stroje. Vzdálenost od vřetena stroje je také dostatečná, podepírání bude probíhat na protilehlé straně obrobku, než bude

probíhat obrábění ideálně přímo proti nástroji. Tím pádem není nutné pokrýt celou upínací plochu. Detailní kontrola dostatečného pracovního rozsahu robota bude ověřena na kinematickém simulačním modelu celého pracoviště.



Obr. 27 Poloha robota vůči stroji

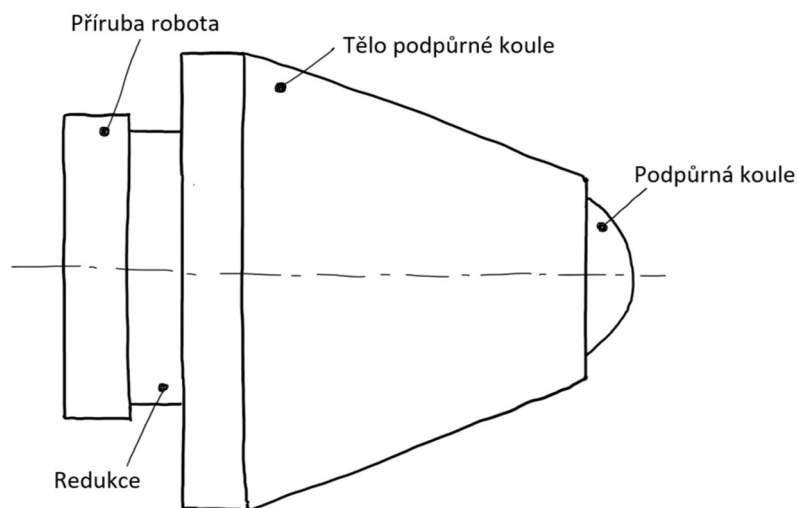
3.3 Koncepty podpůrné hlavice

Při podepírání obrobku robotem se nabízí několik konstrukčních provedení podpůrné hlavice. Důležitým parametrem, se kterým je potřeba počítat, je nosnost robota, ze které vyplývá maximální dosažitelná podpůrná síla a s tím spojené rozměry hlavice. S ohledem na zadání práce, kde není stanoven požadavek na pokročilé funkce podpůrné hlavice, jako je měření tloušťky stěny obrobku nebo online měření podpůrné síly, bude hlavice zajišťovat pouze funkci obrobkové podpory.

Jednobodová podpůrná hlavice

Prvním navrženým konceptem je podpůrná hlavice s jednou sféricky uloženou koulí, viz Obr. 28. Díky sférickému uložení podpůrné koule je možné s hlavicí provádět pohyb ve všech směrech. Tato hlavice má pouze bodový kontakt

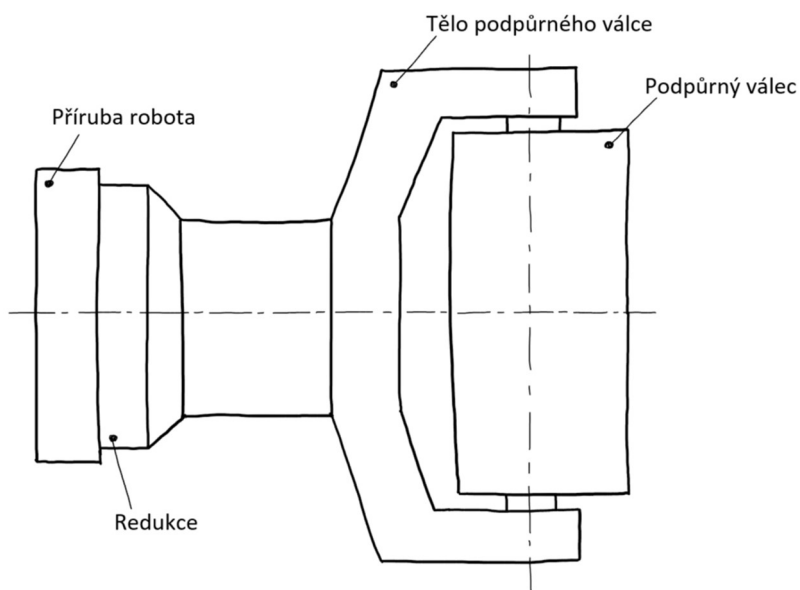
s obrobkem. Na druhou stranu je díky tomu možné hlavici využít i pro podepření tvarově komplikovaných obrobků.



Obr. 28 Jednobodová podpůrná hlavice

Hlavice s podpůrným válcem

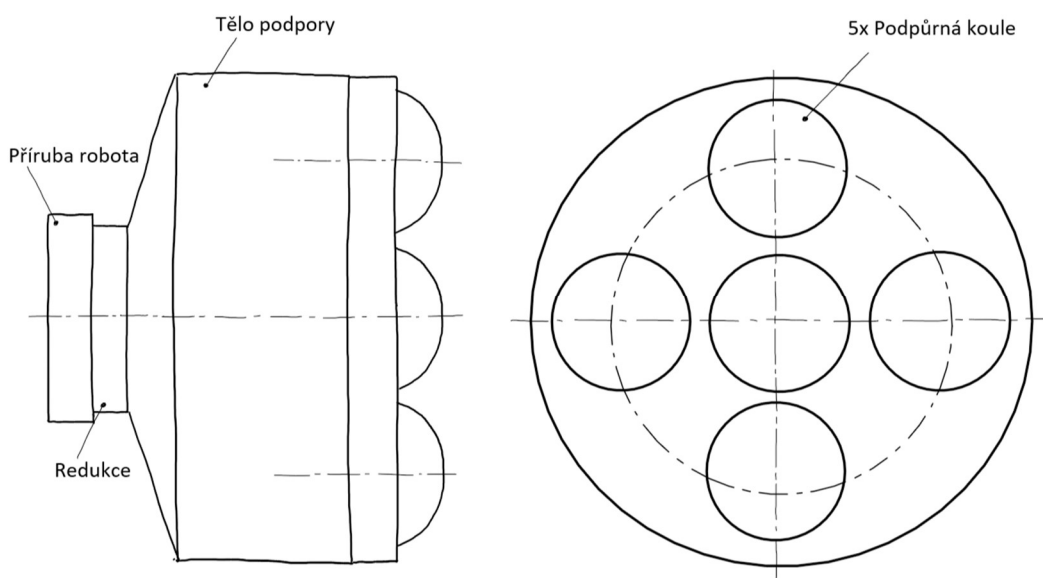
U druhého konceptu je využit podpůrný válec z pryže. Válec je uložen v radiálních ložiskách a jeho rotace je možná pouze v jedné ose. Díky geometrickému tvaru a volbě materiálu válce je možné dosáhnout téměř plošného styku s obrobkem. Tělo podpěry má jednoduchý vidlicový tvar vyobrazený na Obr. 29.



Obr. 29 Hlavice s podpůrným válcem

Vícebodová podpůrná hlavice

Poslední navržený koncept je vícebodová podpůrná hlavice využívající pět sféricky uložených koulí. Jedna podpůrná koule je uložena uprostřed podpěry a zbylé čtyři jsou rozmístěné na společné roztečné kružnici, viz Obr. 30. Díky podpoře obrobku na více místech je možné dosáhnout lepších výsledků obrábění. Pohyb je jako u prvního konceptu možný ve všech směrech. V případě, že je obrobek zakřivený, je nutné zajistit vyvození správné síly každého bodu. Toho je dosaženo využitím pružiny umístěné pod každým bodem. Místo pružiny je možné použít miniaturní pneumatický válec pro nastavení potřebné podpůrné síly.

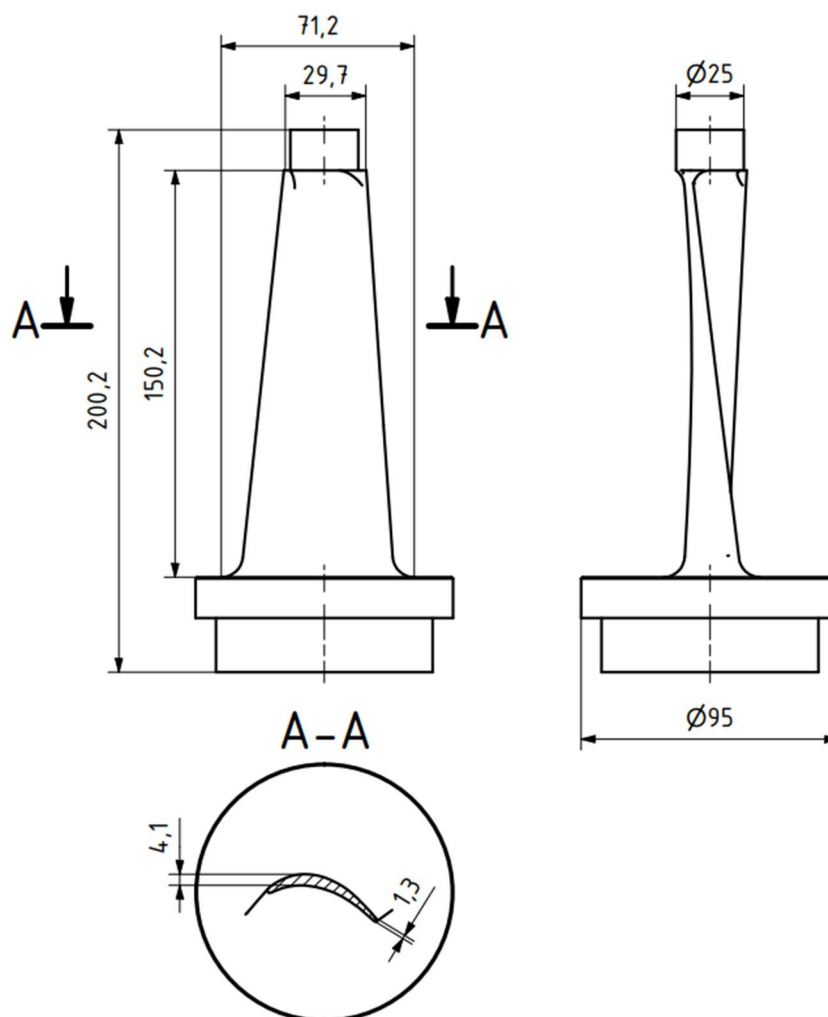


Obr. 30 Vícebodová podpůrná hlavice

3.4 Volba optimálního konceptu

Hlavním kritériem pro volbu podpůrné hlavice je tvar podepíraného obrobku. Záleží především na jeho velikosti a složitosti zakřivení povrchu. Z tohoto důvodu je nutné před samotnou volbou definovat podepíraný obrobek.

Zadaným obrobkem je tenkostěnná lopatka oběžného kola, viz Obr. 31. Lopatka je zakřivená ve dvou rovinách. Její přibližné rozměry jsou 165x55 mm a tloušťka 1,5–4 mm. Při obrábění bude upnuta ve sklíčidle za spodní válcovou část.



Obr. 31 Podepíraný obrobek – tenkostěnná lopatka

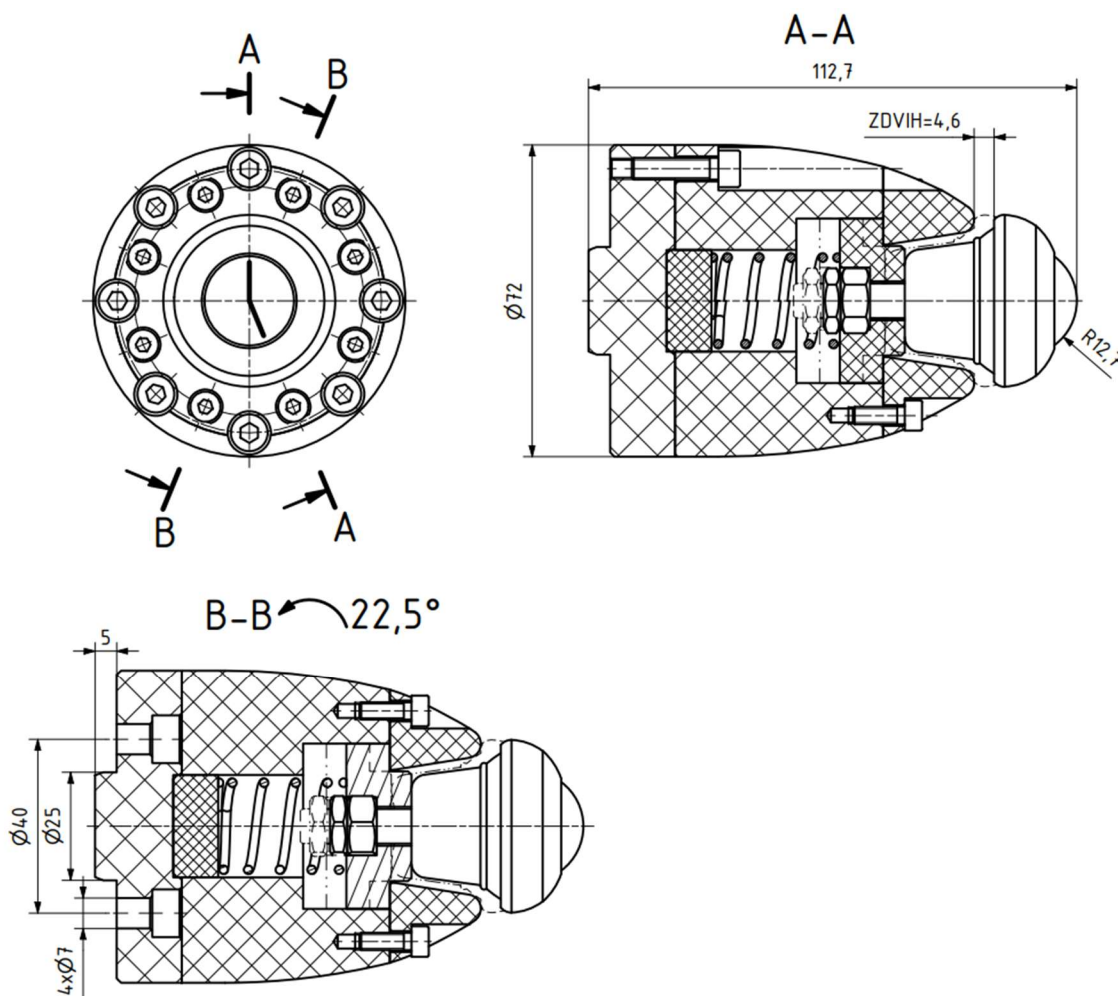
Zvolným konceptem je jednobodová podpůrná hlavice. Vzhledem k zakřivení lopatky ve dvou rovinách není možné použít podpůrný válec. Ten by správně nedosedal na povrch obrobku a také z důvodu možnosti rotace pouze kolem své osy je vhodný na podlouhlé a rovné obrobky. Vícebodová podpůrná hlavice by při správném nastavení přtlaku jednotlivých koulí zajistila lepší dosažitelné výsledky obrábění. Ovšem z důvodu malé velikosti plochy lopatky a jejího velkého zakřivení není možné vhodně umístit více podpůrných bodů, tak aby byly vždy všechny v kontaktu s povrchem. Jednobodová podpůrná hlavice naopak díky bodovému styku dokáže udržet kontakt s povrchem i v krajních pozicích lopatky. Zároveň bude jednodušší nastavit požadovanou podpůrnou sílu.

4. Vlastní zpracování řešení

V následujících kapitolách bude nejdříve popsán návrh mechanických komponent potřebných pro integraci robotu Comau Racer 7-1.4 ke stroji WeldPrint 5AX. Následně bude pozornost věnována tvorbě kinematického simulačního modelu a plánování drah robotu s následnou úpravou NC programu pro řízení robotu i stroje v jednom kanálu.

4.1 Návrh podpůrné hlavice

Na Obr. 32 je v izometrickém pohledu zobrazena navržená podpůrná hlavice. K samotnému dotyku s obrobkem slouží kuličková jednotka Alwaysse 1003–14–18. Kuličková jednotka obsahuje sféricky uloženou kouli z nylonu. Díky nylonové kouli nedojde při podepírání k poškrábání povrchu lopatky a podporu je tak možné využít i na podepírání již finálně obrobených ploch. Vzhledem ke špatné dostupnosti kuličkových jednotek s nylonovou koulí byl výběr proveden z omezené nabídky dodavatele. Konkrétní kuličková jednotka byla následně zvolena tak, aby s dostatečnou bezpečností vydržela sílu vzniklou při podepírání. Maximální zatížení zvolené kuličkové jednotky je při otáčení 250 N, což je vzhledem maximálnímu zatížení příruby robotu naprosto dostačující. Kuličková jednotka je pomocí dvou matic přichycena na posuvnou přírubu. Axiální pohyb příruby je omezen pomocí vinuté tlačné pružiny TL 2x22x40. Předpětí pružiny definuje podpírací sílu a je ho možné měnit změnou výšky podložky pod pružinou usazené v základní přírubě hlavice. Pružina také slouží jako bezpečnostní prvek, který v případě dráhové nepřesnosti robotu umožní kuličkové jednotce zajet do těla podpory. Nenakupované komponenty jsou vyrobené pomocí 3D tisku z materiálu PETG.

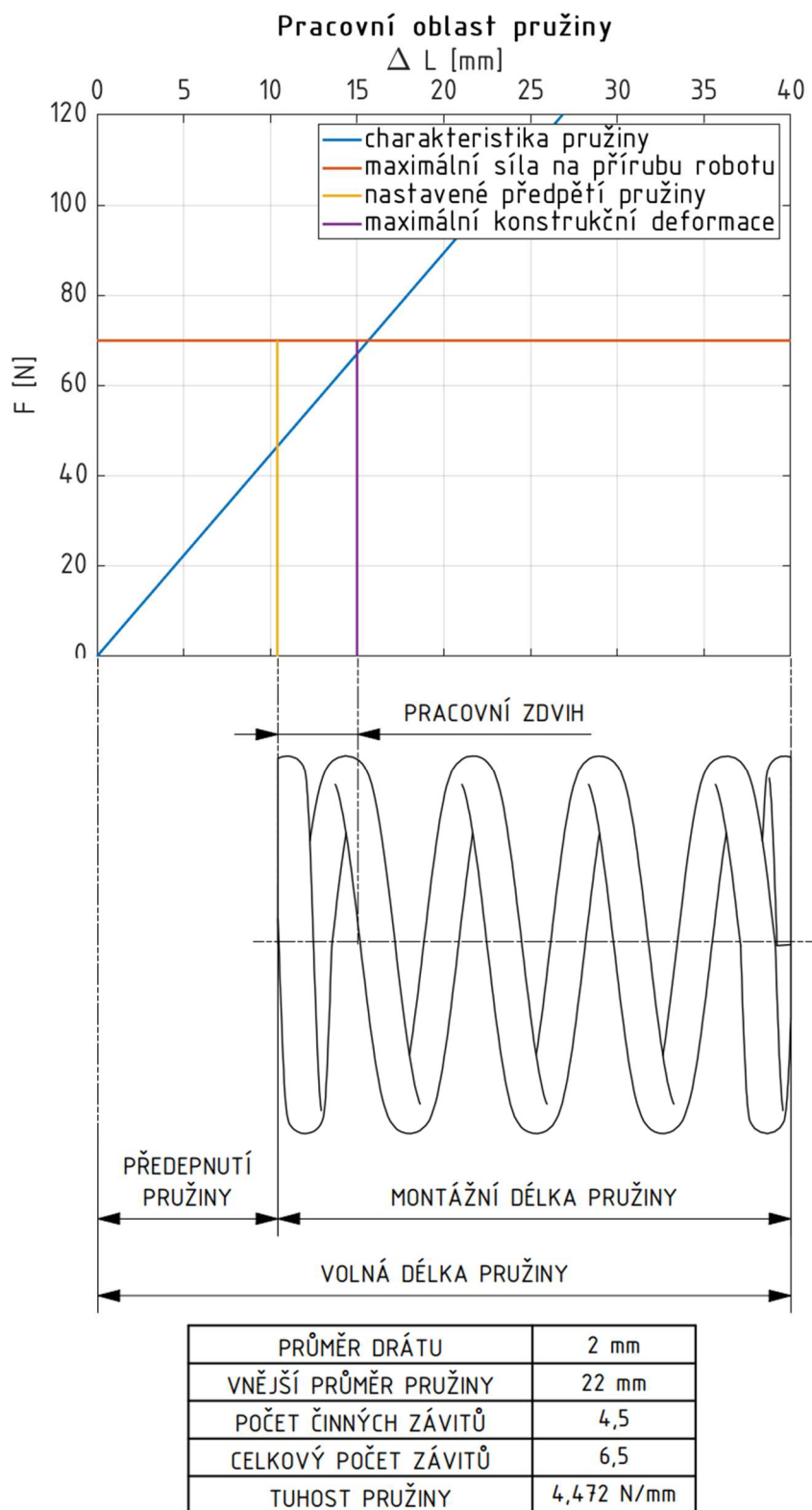


Obr. 32 Schéma navržené jednobodové podpůrné hlavice

Nastavení předpětí pružiny

Pro volbu správného předpětí pružiny byl sestaven graf viz

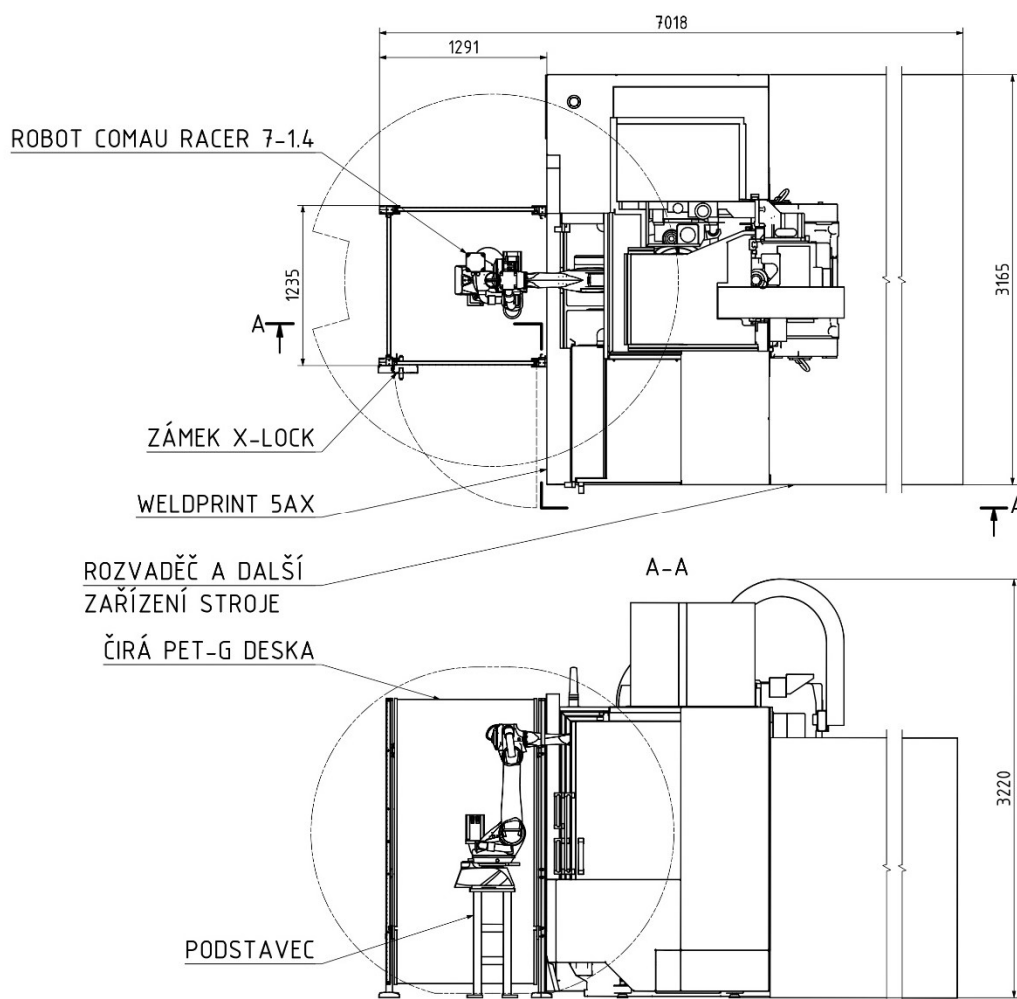
Obr. 33. Podpůrná síla vyvozená pružinou by neměla přesáhnout maximální aplikovatelnou sílu na přírubu robota. Ta je stanovena výrobcem přibližně na 70 N. Maximální síla nastane v případě, kdy je kuličková jednotka zasunutá na doraz v těle hlavice. Při tomto stavu bude síla 66,9 N. Jedná se však o stav nežádoucí, který nastane pouze v případě dráhové nepřesnosti robota. Stlačení pružiny při smontování bude 10,4 mm a vyvodí sílu 46,2 N. V průběhu standardního provozu lze počítat se změnou stlačení pružiny v řádu desetin milimetru, což díky měkké charakteristice pružiny změní podpůrnou sílu jen minimálně. Vyvozená podpůrná síla bude přibližně v rozmezí 46,2–51 N a maximální vyvozená síla stlačím pružiny nepřesáhne maximální aplikovatelnou sílu na přírubu robota.



Obr. 33 Pracovní oblast pružiny TL 2x22x40

4.2 Layout pracoviště

Layout neboli půdorys pracoviště s rozvržením zařízení slouží pro montáž pracoviště i pro hodnocení provozních poloh a rozměrů. Zjednodušený layout navrženého pracoviště je zobrazen na Obr. 34.



Obr. 34 Layout pracoviště

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.2., stroj WledPrint 5AX bude rozšířen o robotickou podpěru bez zásahu do konstrukce stroje. Robot tedy stojí mimo krytování stroje. Vzdálenost základny robotu (robot base) od vřetena stroje je 1330 mm. Robot je přišroubován na podstavec o výšce 837 mm. Podstavec vysoký 500, 750 a 1000 mm je možné koupit přímo od firmy Comau a jeho výrobní výkres je uveden v instrukční příručce [40]. Z důvodu vysoké ceny bylo zajištěno dodání podstavce od českého distributora robotů Comau, který nabídl podstavec o cca 50% levněji a zároveň s možností úpravy výšky podstavce dle potřeby. Výška 837 mm

byla zvolena tak, aby byla pokryta co největší část pracovního prostoru stroje. Dvojitě čerchovanou čarou je vytyčen dosah osy J5 robotu. Podstavec bude přišroubován osmi šrouby M16 do kotevních závitových pouzder uložených v podlaze laboratoře. Rozvaděč pro robota je integrován v rozvaděči stroje. Podrobnější popis integrace robotu do řídicího systému stroje je v kapitole 4.3.

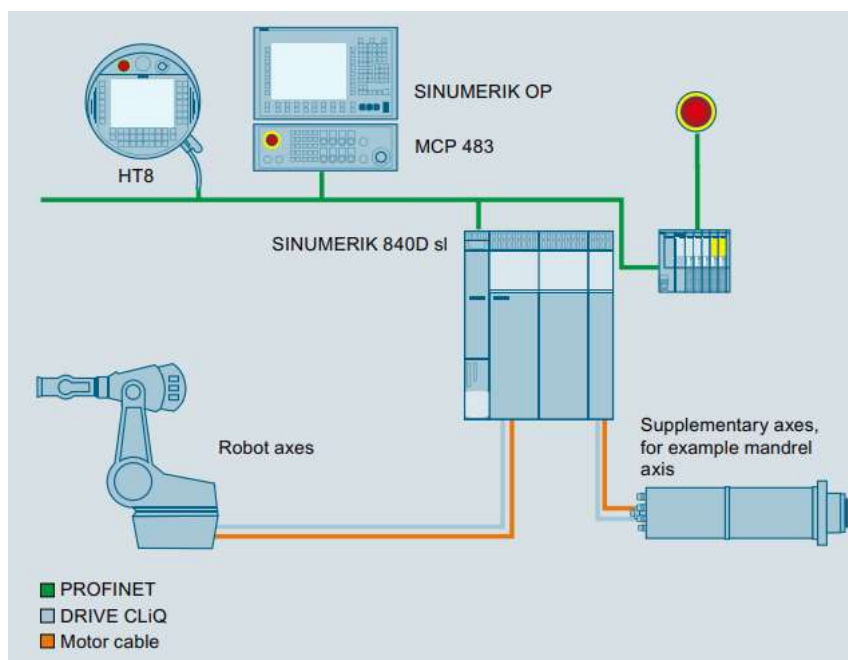
Dále je nutné zajistit bezpečný provoz pracoviště. Jak je z Obr. 34 patrné robot stojí mimo krytování stroje a při podepírání je nutné nechat otevřené dveře při frézování. Dle normy ČSN EN ISO 19060–1 je možné používat obráběcí stroje s číslicovým řízením s otevřenými ochrannými kryty při dodržení předepsaného omezení výkonu stroje. Konkrétně se jedná o omezení rychlosti jednotlivých pohybových os na 5 m/min, nebo musí být pohyb v krocích s maximálním přírůstkem 10 mm. Dále je omezena obvodová rychlost vřetena a obrobku na 15 m/min s maximální frekvencí otáčení 50 ot/min. Vřetena musí být schopna po příkazu k zastavení zastavit během dvou otáček. Jedná se tak především o opatření limitující technologické parametry obrábění. Další doplňující omezení týkající se obsluhy stroje s otevřenými ochrannými kryty jsou uvedeny v normě [41] v kapitole 5.2.4.6. Tato opatření slouží především pro případ, kdy by robot pracoval například v kusové výrobě a u stroje by byla nutná další obsluha. Pracoviště navržené v této práci je určeno pro zkušební provoz v laboratoři a nejedná se o koncepci využitelnou v automatickém výrobním provozu. Pokud by mělo být pracoviště využíváno v automatickém výrobním provozu, bylo by nutné zajistit odvod třísek a provozních kapalin i z okolí robotu. Takový to požadavek by s největší pravděpodobností vedl k úpravě krytování stroje a výměně oplocení za plechové kryty. Zároveň by se tím značně omezil přístup obsluhy do pracovního prostoru. Na druhou stranu by bylo možné využít robot pro zakládání obrobků do stroje a zvýšit tak jeho využitelnost. Robot by musel disponovat minimálně dvěma výměnnými hlavicemi pro zakládání a pro podepírání.

Jelikož robot Comau Racer 7-1.4 je standardní průmyslový robot, je z důvodu zamezení úrazu využito oplocení X-Guard, které zároveň zamezuje přístup do otevřeného pracovního prostoru stroje. Konkrétně se jedná o dva panely W322-220110 a dveře D10-220110A. Dveře jsou dále opatřeny bezpečnostním zámkem X-Lock s integrovaným senzorem náhodného spuštění stroje. Na oplocení jsou z vnitřní strany připevněny číré PET-G desky, které zachytí případné odletující třísky a úlomky z pracovního prostoru. Toto řešení bylo doporučeno přímo firmou

Haberkorn, která je zároveň dodavatelem oplocení X-Guard. Robot bude mít také softwarové omezení pracovního prostoru, tak aby nedošlo ke kolizi s oplocením nebo s krytováním stroje. Další požadavky na bezpečnost robotických systémů jsou přehledně sepsány v publikaci [42]. Kolizní kontrola bude provedena na kinematickém simulačním modelu celého pracoviště. Detailní výkres layoutu pracoviště je přílohou této práce.

4.3 Integrace robotu do řídicího systému stroje

Robot je integrován přímo do řídicího systému stroje Siemens SINUMERIK 840D sl v rámci opce Run MyRobot/Direct Control. S využitím této opce je možné provozovat robota bez jeho vlastní řídicí jednotky. Tím se výrazně zjednoduší hardwarová konfigurace a zajistí se bezproblémová synchronizace řízených os mezi robotem a strojem. Zároveň je možné programovat robota s využitím všech funkcí, které obsahuje řídicí systém SINUMERIK 840D sl. Obecné schéma integrace robotu do řídicího systému stroje je znázorněno na Obr. 35. Osy robotu jsou v této konfiguraci přímo připojeny k modulům Siemens Sinamics Double Motor. Základna robotu má dva konektory. První je určený pro signál enkodéru a na druhý je připojen signál k motorům a brzdám. Tyto konektory jsou propojeny speciálními kabely dodanými firmou Comau.



Obr. 35 Schéma integrace robotu do ŘS stroje s využitím opce Run MyRobot/Direct Control [43]

Integrace robotu Comau do řídicího systému SINUMERIK 840D sl s využitím opce Run MyRobot/Direct Control je blíže popsána ve výzkumné zprávě [44]. Řešení této problematiky není součástí diplomové práce a je zde uvedena pouze pro informaci.

4.4 Kinematický simulační model pracoviště

Kinematická simulace pracoviště je obecně velmi důležitým prvkem pro ověření správnosti funkce automatického procesu. Z důvodu složitého pohybu při kooperaci robotu a stroje je nutné NC program virtuálně ověřit před reálným spuštěním na stroji. Kinematické simulace lze rozdělit do čtyř stupňů.

Nejjednodušším stupněm simulace je zobrazení stacionárního obrobku a všechny pohyby vykonává nástroj (nemusí odpovídat kinematice stroje). Touto úrovní simulace disponují téměř všechny CAM softwary. Na druhou stranu není simulace příliš spolehlivá, a to z důvodu, že využívá pouze interní CL data z CAM prostředí. Nezahrnuje tak chyby vzniklé v postprocesoru a chyby kinematické transformace pohybů mezi nástrojem a obrobkem.

Druhým typem kinematických simulací je zahrnutí kinematiky stroje. V tomto případě je simulace prováděna na kompletním 3D modelu stroje. Simulace opět

pracuje s CL daty a nezahrnuje tak stejné chyby jako v první stupeň. Výhodou je možnost kontroly limitů jednotlivých pohybových os a základní kontroly kolizí.

Třetím stupněm je simulace založená na interpolaci reálného NC kódu. Tento stupeň simulace je také označován zkratkou CSE (Common Simulation Engine). Pro pohyb 3D modelu je využit simulační driver s komplexní podporou jazyka NC programu. Jedná se tak o simulaci již hotového NC programu před odesláním do stroje. Díky tomu je možné odhalit chyby vzniklé v postprocesoru. Zároveň lze simulovat pohyby načtené z externích NC programů. Simulační softwary většinou umožňují u těchto typů modelů provést automatickou kontrolu kolizních stavů mezi zvolenými komponenty.

Posledním a nejvyšším stupněm je kinematická simulace řízená řídicím systémem stroje. Programátor může využít originální řídicí systém stroje a dosáhnout tak vysoké shody s reálným strojem. Při simulaci je spuštěn virtualizovaný řídicí systém a je načtena sada parametrů a strojních konstant. Simulace tak respektuje nastavené zrychlení pohybových os, rozběh a doběh vřeten a atd. Správné sestavení simulace na této úrovni je velmi náročné. Hlavním přínosem takovéto simulace je výpočet přesného výrobního času. [45] [46]

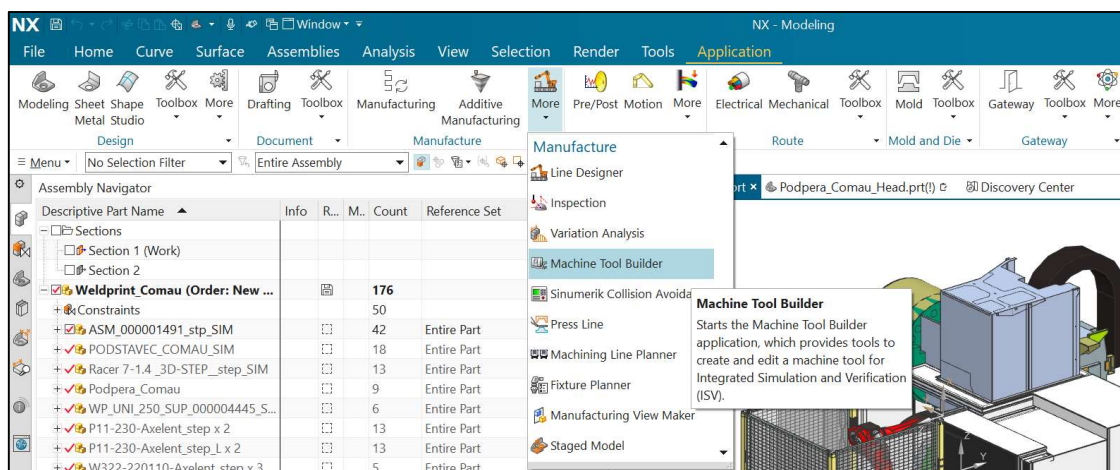
Kinematický simulační model vytvořený v rámci této diplomové práce spadá do třetího stupně, tedy simulace stroje řízená NC kódem. Kinematický simulační model byl sestaven v softwaru Siemens NX 1992 (dále jen „NX“). Model je využit pro kontrolu externě načteného NC programu, který v jednom kanále řídí robota i všechny strojní osy. Zároveň je možné provést rychlou verifikaci drah robotu již při jejich programování.

Tvorba simulačního modelu v Machine Tool Builder

Při tvorbě jakéhokoliv simulačního modelu je nutné jako první připravit 3D model. Jelikož je v rámci DP řešen layout celého pracoviště, byl model připraven již z předešlých kroků. Komplikované modely s mnoha prvky je vhodné před tvorbou simulačního modelu zjednodušit. Zjednodušení je možné provádět manuálně, nebo pomocí nástrojů obsažených v NX. Pro zjednodušení modelu stroje WeldPrint byl využit nástroj Linked Exterior. Tento nástroj z vybraných modelů odstraní kruhové díry a smaže vnitřní plochy v součásti. Vytvoří se tzv. krabicový model, který zrychlí načítání a práci s celým modelem. Nástroj byl použit na lože, stojan a vřeteník stroje.

Dalším krokem je vytvoření knihovny simulačního modelu v adresáři *\\NX1992\\MACH\\resource\\library\\machine\\installed_machines. Složka by měla mít stejný název jako simulovaný model sestavy. V této složce se následně založí podsložky *cse_driver*, *graphics*, *postprocessor*, *robots* a datový soubor. Do složky *graphics* je nutné nahrát kompletní 3D model pracoviště. Další složky obsahují soubory potřebné pro správné fungování simulačního modelu. Soubory je možné vytvořit od začátku, ale to bývá velmi složité. Proto se běžně využívá zkopírování souborů od podobných strojů z knihovny NX a provedení potřebné úpravy. Při tvorbě simulačního modelu v rámci této DP byly soubory zkopírovány ze simulačního modelu KUKA_KR60_L30_2X_POSITIONER_DKP400. Jedná se o simulační model robotu s řídicím systémem Siemens SINUMERIK Run MyRobot/Direct Control. Soubory obsažené ve složce robots a postprocessor není nutné dále upravovat. Úpravě emulátoru řídicího systému je věnována následující kapitola. V datovém souboru, který načítá simulátor NX a obsahuje informace o cestě k 3D modelu a postprocesoru, je nutné změnit pouze název simulačního modelu.

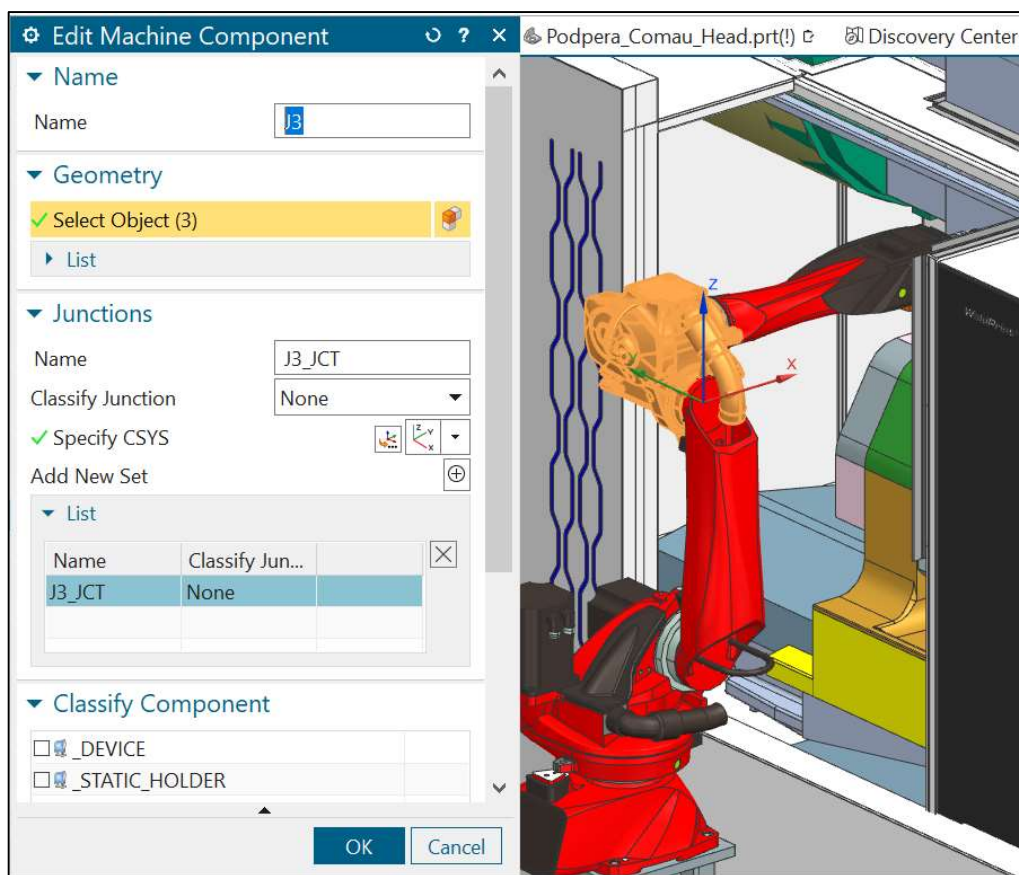
Po načtení 3D modelu sestavy ze složky graphics do NX se v horní liště na kartě *Application* v oddíle *Manufacture* pod rozbalovacím oknem *More* zvolí aplikace *Machine Tool Builder*, viz Obr. 36.



Obr. 36 Spuštění Machine Tool Builder v NX

Nyní se na levé liště záložek zobrazí ikona *Machine Tool Navigator*. V tomto menu bude následně probíhat tvorba struktury simulačního modelu. Vložení nové komponenty probíhá přes kliknutí pravým tlačítkem myši na nadřazenou komponentu kinematického řetězce a výběru možnosti *Insert* → *Machine*

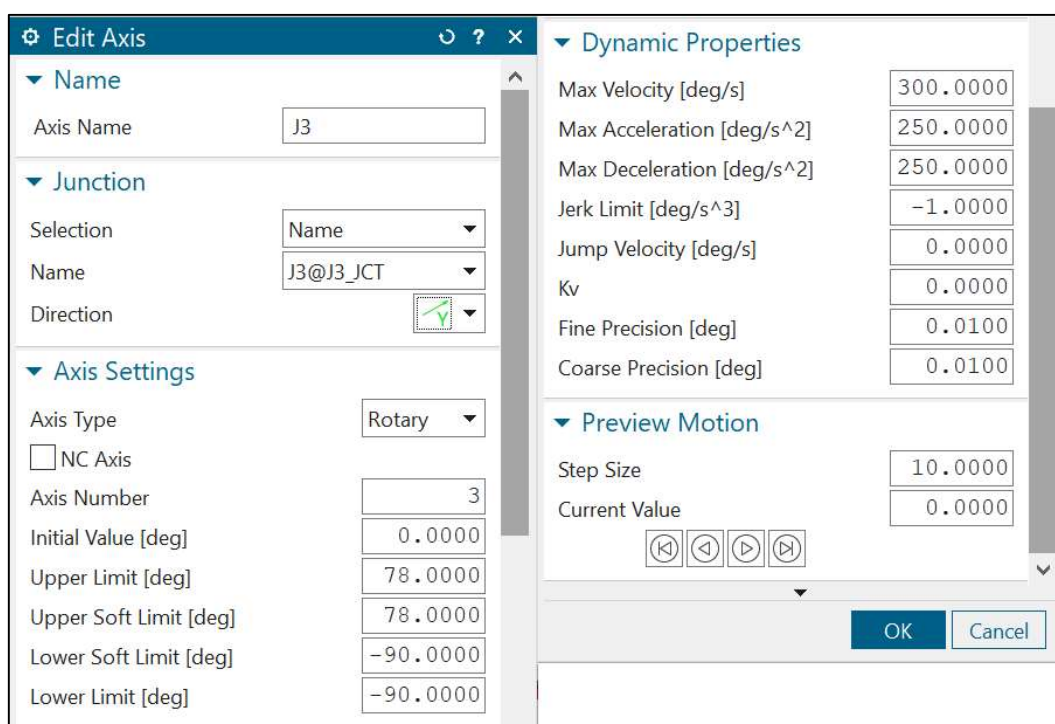
Component. Základní komponentou bývá zpravidla nosná nepohyblivá struktura stroje. Tato komponenta je klasifikována jako MACHINE_BASE a obsahuje souřadný systém MACHINE_ZERO, což je informace o nulovém bodu stroje. Jelikož simulované pracoviště obsahuje obráběcí stroj a průmyslového robota, je nutné vytvořit samostatnou základnu WELDPRINT_BASE a ROBOT_BASE obsahující počátek souřadného systému stroje a robota. Jednotlivé komponenty jsou vzájemně řazeny ve stromové struktuře. V případě, kdy jsou pohybové osy řazeny sériově, je každá další pohybová osa zařazena o úroveň níže. Takto seřazené komponenty pohybových os přejímají kinematické vazby komponenty nadřazené. Tvorba pohybových os je vždy identická a začíná přidáním *Machine Component* pod správnou mateřskou součástí. V zobrazeném okně je nutné vybrat všechny 3D modely, se kterými daná osa přímo pohybuje a specifikovat počátek a natočení souřadného systému. Souřadný systém je nutné specifikovat pouze u rotačních os kvůli následnému definování osy rotace. V případě lineárních os stačí souřadný systém nastavený v MACHINE_ZERO. Na Obr. 37 je zobrazen příklad tvorby pohybové osy J3 robota. V menu jsou vybrány 3 modely, se kterými přímo pohybuje osa J3, a je zdefinován souřadný systém.



Obr. 37 Tvorba Machine Component rotační osy J3 robotu

Přidání kinematických vlastností pohybové osy se provede kliknutím pravého tlačítka myši na vytvořenou komponentu z předchozího kroku a výběru možnosti *Insert* → *Axis*. V zobrazeném okně je nutné vyplnit několik parametrů, viz Obr. 38. Rotační osy robotu by měly mít název dle standardní konvence J1–J6 a pohybové osy stroje dle směru osy X, Y, Z případně u rotačních os A, B, C. Správné pojmenování os je důležité především kvůli úpravě emulátoru řídicího systému, která bude provedena později. V další sekci se zvolí osa rotace nebo osa směru lineárního pohybu. Následně se vyplní sekce *Axis Settings*. Zde je zvolen typ pohybové osy, její unikátní číselné označení, rozsah pohybu a v případě pohybových os obráběcího stroje se zaškrtně pole *NC Axis*. Pro správné zadání těchto parametrů je nutné být obeznámen s reálným strojem a případně zjistit potřebné parametry od výrobce daného zařízení. *Initial Value* definuje aktuální pozici pohybové osy v 3D modelu ve vztahu k reálné nulové pozici. *Soft limit* udává rozsah pohybové osy se softwarovým omezením a hodnota *Limit* rozsah omezený hardwarovým dorazem. Poslední sekce zahrnuje dynamické parametry osy jako je maximální rychlost, maximální akcelerace a decelerace, rýv, skok rychlosti, Kv a přesnost. Tyto parametry využívá

simulační model pro dopočet reálných strojních časů. Většina výrobců v dostupných podkladech uvádí pouze hodnoty rychlosti. Pokud nejsou další hodnoty dohledatelné, lze je vyčíst z řídicího systému stroje. Jelikož montáž a práce spojené s nastavením řídicího systému řešeného pracoviště teprve probíhají, není aktuálně možné tyto parametry jednoduše zjistit. Na druhou stranu vytvářený kinematický simulační model nebude momentálně sloužit pro určení výrobních časů, proto dynamické parametry pohybových os je možné doplnit později až po uvedení pracoviště do provozu. Po nastavení všech potřebných parametrů je možné otestovat správnost pohybu osy v poslední sekci *Preview Motion*.



Obr. 38 Nastavení kinematických vlastností rotační osy J3 robotu

Po definování všech pohybových os se vytvoří pozice pro vřeteno, obrobek, frézu a robotickou hlavici. Postup tvorby opět začíná vložení nové *Machine Component* stejně jako u pohybových os. Při tvorbě těchto pozic není zvolena žádná komponenta, ale zadává se pozice a orientace souřadného systému. Vřeteno je označeno názvem SPINDLE a má klasifikaci `_DEVICE`. Následně se do této komponenty přidá osa S, která definuje kinematické vlastnosti vřetena. Zobrazené menu a postup jeho vyplnění je stejný jako u pohybových os, viz Obr. 38. Pozice pro obrobek má název PART s klasifikací `_PART` a `_SETUP_ELEMENT` a je umístěna ve sklíčidle na stole stroje. Souřadný systém pozice pro frézu je umístěn na čele vřetena a musí mít název T. Označení komponenty je `POCKET_N` s klasifikací

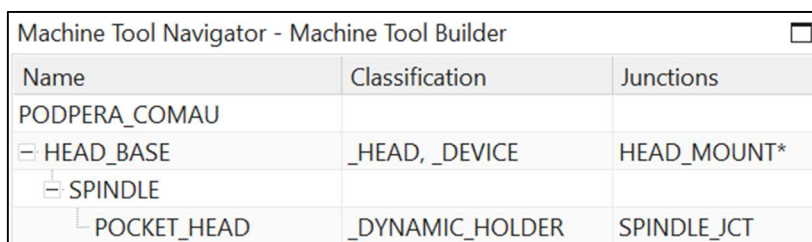
_DYNAMIC_HOLDER. Poslední komponentou je pozice pro robotickou hlavici s názvem POCKET_P s klasifikací _DYNAMIC_HOLDER. Při správném nastavení těchto komponent si simulační model načte a umístí do definovaných pozic obrobek, frézu i robotickou hlavici, které jsou zadávány při programování v CAM prostředí. Kompletní strom nastavených pohybových os a dalších komponent je zobrazen na Obr. 39. Název rotační osy stroje A a C bylo nutné zachovat stejný jako je ve výchozím simulačním modelu KUKA_KR60_L30_2X_POSITIONER_DKP400. Pokud by se název těchto os lišil, nebylo by následně možné při programování dráhy robotu nastavit konstantní hodnotu natočení osy A nebo C. Z pohledu uživatele však nemá tento krok žádný vliv na práci se simulačním modelem. Při úpravě CSE driveru lze název pohybové osy změnit, tak aby odpovídal reálnému názvu osy na stroji.

| Name | Classification | Junctions | Axis Name |
|--------------------------|-----------------------|----------------------|--------------------|
| WELDPRINT_COMAU | | | |
| [-] MACHINE_BASE | _MACHINE_BASE | MACHINE_ZERO* | |
| [-] ROBOT_BASE | | ROBOT_BASE_JCT* | |
| [-] J1 | | J1_JCT | J1 |
| [-] J2 | | J2_JCT | J2 |
| [-] J3 | | J3_JCT | J3 |
| [-] J4 | | J4_JCT | J4 |
| [-] J5 | | J5_JCT | J5 |
| [-] J6 | | J6_JCT | J6 |
| POCKET_P _DYNAMIC_HOLDER | | POCKET_JCT* | |
| [-] WELDPRINT_BASE | | POSITIONER_BASE_JCT* | |
| [-] Y1 | | | Y1 |
| [-] X1 | | | X1 |
| [-] A1 | | A1_JCT | POSITIONER_A1_AXIS |
| [-] C1 | | C1_JCT | POSITIONER_A2_AXIS |
| [-] PART | _PART, _SETUP_ELEMENT | PART_JCT | |
| [-] Z1 | | | Z1 |
| [-] SPINDLE | _DEVICE | S | S |
| POCKET_N | _DYNAMIC_HOLDER | T | |

Obr. 39 Machine Tool Navigator vytvořeného simulačního modelu

Pro správné fungování podpůrné hlavice v simulačním modelu je nutné provést následující úpravy modelu hlavice v *Machine Tool Builder*. Do první přidané *Machine Component* se navolí celý model (v případě sestavy se zvolí všechny její součásti) a nastaví se souřadný systém klasifikovaný jako *Head Mount*, tak aby odpovídal souřadnému systému pozice POCKET_P na přírubě robotu. Název komponenty je HEAD_BASE s klasifikací __HEAD a __DEVICE. O úroveň níže se vloží komponenta SPINDLE bez specifikace souřadného systému. Poslední komponentou je POCKET_HEAD s klasifikací _DYNAMIC_HOLDER a souřadným systémem

SPINDLE_JCT orientovaným stejně jako u HEAD_BASE. Nastavení robotické hlavice v *Machine Tool Builder* je zobrazeno na Obr. 40.



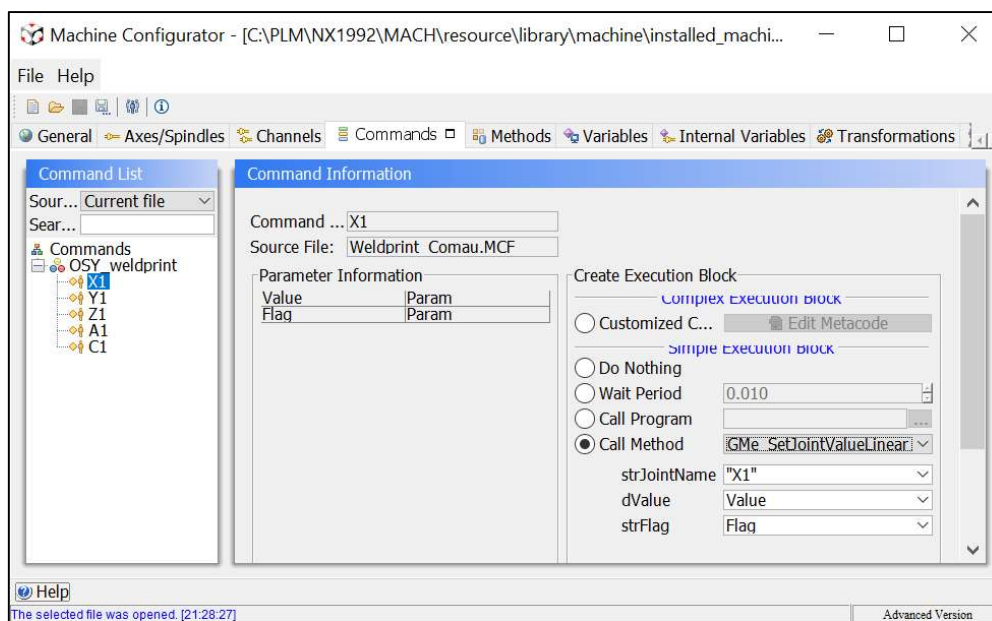
| Name | Classification | Junctions |
|-----------------|-----------------|-------------|
| PODPERA_COMAU | | |
| [-] HEAD_BASE | _HEAD, _DEVICE | HEAD_MOUNT* |
| [-] SPINDLE | | |
| [-] POCKET_HEAD | _DYNAMIC_HOLDER | SPINDLE_JCT |

Obr. 40 *Machine Tool Navigator* podpůrné hlavice

Aby bylo možné otevřít stroj z knihovny v NX, byl upraven soubor `machine_database.dat` uložený ve složce `*\NX1992\MACH\resource\library\machine\ascii`. Tento soubor je možné otevřít v textovém editoru a následně přidat nový řádek obsahující název stroje, typ řídicího systému a cesty k souborům. Stejným způsobem se provede úprava datového souboru `device_database.dat` tak, aby bylo možné podpůrnou hlavicí načíst z knihovny NX. Cesta k datovému souboru je následující: `*\NX1992\MACH\resource\library\device\ascii`.

Úprava emulátoru řídicího systému

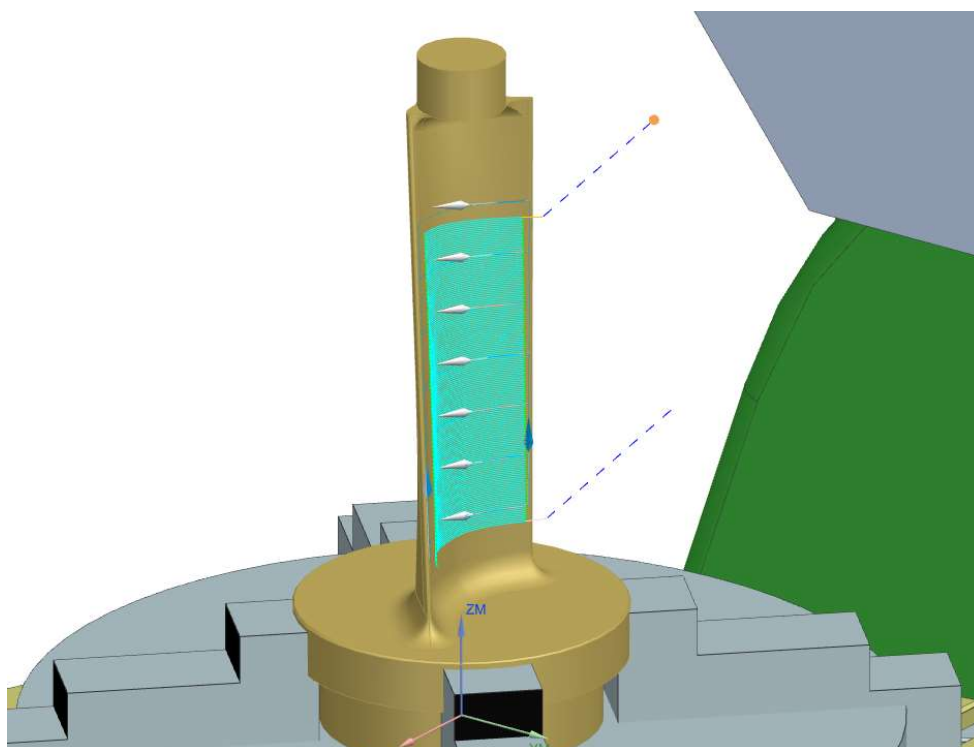
Emulátor ŘS neboli CSE driver se stará o překlad NC kódu na pokyny pro simulační model. Jak již bylo zmíněno dříve, bude provedena úprava CSE driveru ze simulačního modelu `KUKA_KR60_L30_2X_POSITIONER_DKP400`. Úprava byla provedena v softwaru *Machine Configurator*. Jelikož je pojmenování rotačních os robotu shodné s názvy ve výchozím simulačním modelu, stačí provést pouze přidání pohybových os stroje v záložce *Commands*, viz Obr. 41. V oddílu *Create Execution Block* je nutné zaškrtnout položku *Call Method* a následně vybrat správný příkaz dle typu pohybové osy. V řádku `strJointName` se vyplní název pohybové osy tak, jak je osa pojmenována v simulačním modelu. Tímto způsobem se přidají všechny pohybové osy stroje.



Obr. 41 Úprava CSE driveru v softwaru Machine Configurator

4.5 Plánování drah robotu s podpůrnou hlavicí

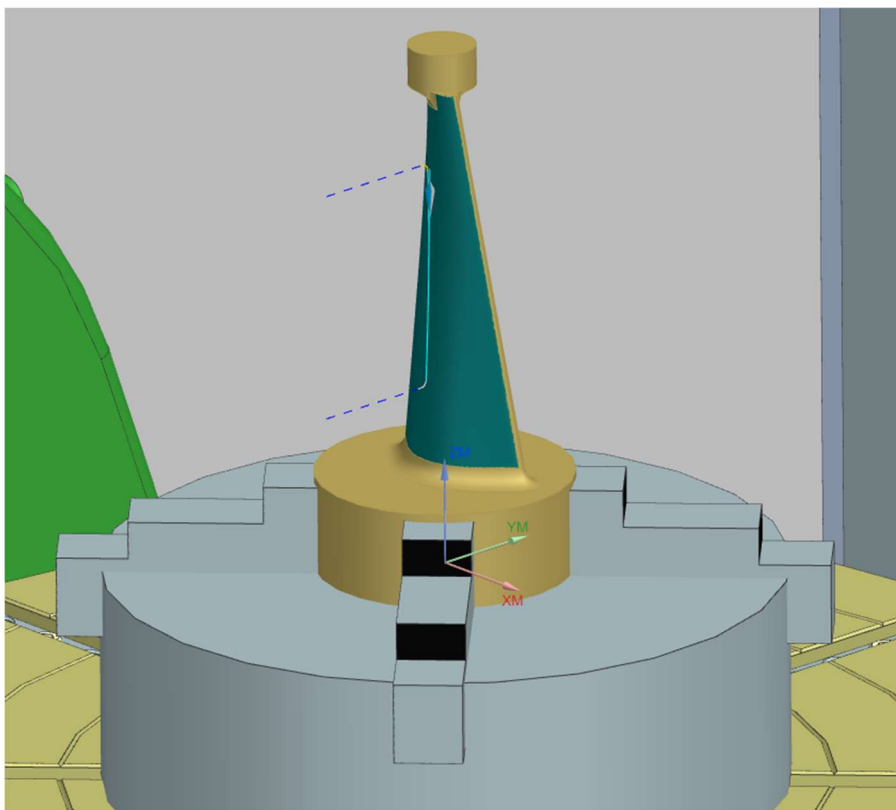
Při plánování dráhy robotu s podpěrou je nejprve nutné zadefinovat strategii obrábění. Lopatka bude nejprve obrobena nahrubo z válcového polotovaru. Při této operaci nebude využito podpěry. Následně se začne obrábět načisto první strana lopatky strategií „zig-zag“ pomocí kulové frézy o průměru 10 mm s naklopením 45°. Zadaná část dráhy frézy pro obrobění čelní plochy lopatky je zobrazena na Obr. 42. Jedná se o dráhu, na které budou prováděny reálné testy synchronizace robotu a stroje. Při finálním obrábění by fréza samozřejmě obrobila celou čelní plochu. Lopatka je při této operaci podepírána z druhé strany, než je prováděno obrábění. Jelikož fréza neobjíždí lopatku kolem dokola, ale obrobí pouze jednu její plochu, je následně nutné provést obrobění hrany lopatky. Lopatka je při této operaci ve vertikální poloze a není podepírána. Po obrobění první hrany proces pokračuje obroběním druhé strany lopatky opět s využitím podpěry. Nakonec se obrobí druhá hrana lopatky.



Obr. 42 Dráha frézy pro test synchronizace robotu a stroje

K dráze frézy zobrazené na Obr. 42 byla následně naplánována dráha robotu s podpěrou. Plánování proběhlo v CAM modulu softwaru Siemens NX. Po otevření 3D modelu lopatky je v záložce *Machine Tool View* z knihovny naimportován kinematický simulační model pracoviště. Následně se ve stejném menu otevře možnost přidání operace ke konkrétnímu `__DYNAMIC__HOLDER`, který byl nastaven v rámci tvorby simulačního modelu. V tomto případě je založena nová operace v `POCKET_P`, která je nastavena na přírubě robotu. Jako nástroj je načtena podpurná hlavice opět z knihovny NX. Prvním krokem při tvorbě nové operace pro robot je výběr strategie pohybu nástroje. Z nabízených možností je zvolena strategie *Variable Contour*. V rámci nastavení dráhy pro robot byla vybrána předem vytvořená křivka vedoucí středem lopatky a zdefinován vektor jdoucí osou podpěry tak, aby byl normálou k povrchu lopatky v každém bodě dráhy. Při programování dráhy robotu v NX je nutné před generováním CL dat aplikovat pravidla pro robot v záložce *Robot Control*. Před aplikováním pravidel se nejdříve robot napoložuje do přibližné pozice, ve které bude nastavená operace probíhat. Následně se v záložce *Tool Orientation* vybere mód *Fixed relative to Part*, díky čemuž zůstane orientace podpěry konstantní relativně k součásti v průběhu celé operace. Na záložce *Configuration* se zdefiniuje pravidlo pro konfiguraci rotačních os robotu, tak aby požadované pozice v souřadném systému XYZ bylo možné dosáhnout pouze

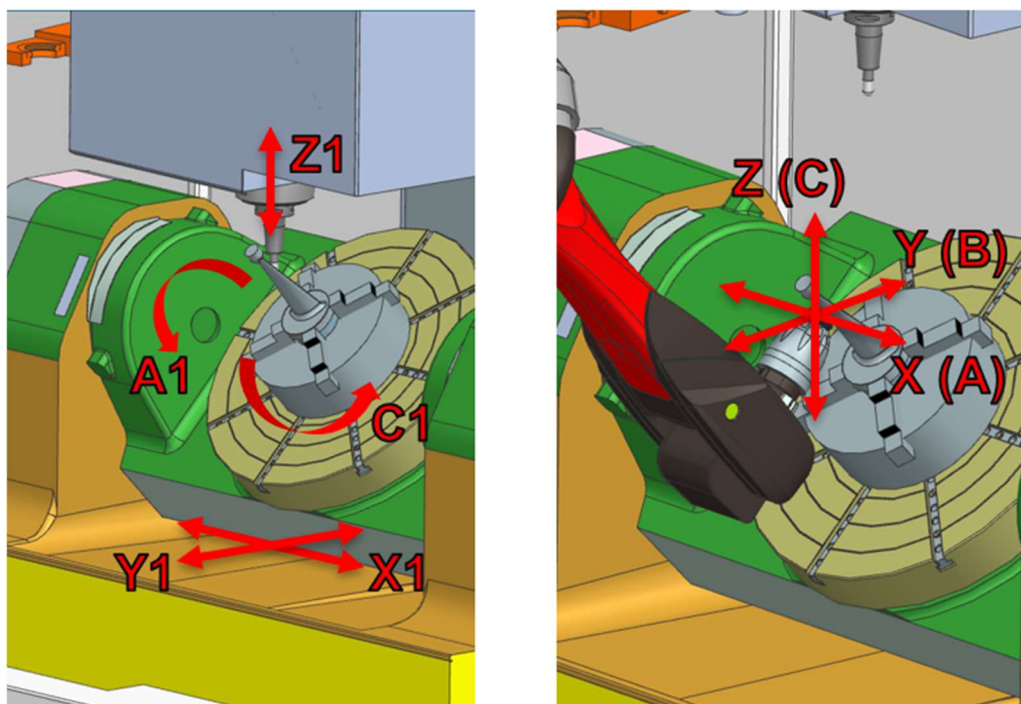
jednou kombinací natočení os robotu. Na poslední záložce *Positioner* lze zadat konstantní natočení nebo posunutí pohybových os stroje. V rámci této operace je nastaveno konstantní naklonění rotační osy stolu A o 45° , což vychází z náklonu frézy při obrábění. Nakonec byla zadefinována počáteční a koncová poloha robotu tak, aby byl robot zcela mimo krytování stroje a daly se v těchto pozicích zavřít dveře. Nastavená dráha pro robot s podpěrou je zobrazena na Obr. 43.



Obr. 43 Dráha robotu s podpěrou pro test synchronizace robotu a stroje

4.6 Úprava NC programu pro jednokanálové řízení robotu a stroje

Po vygenerování samostatného NC kódu pro stroj a robot bylo následně nutné provést jejich sloučení tak, aby se obě zařízení dala řídit v jednom kanále. To znamená, že v jednom řádku NC kódu je informace o pozici pro robot i stroj. Takovéto sloučení s sebou nese několik problémů a jejich řešení bude popsáno v následujících odstavcích. Názvy pohybových os stroje a souřadnic robotu v textu odpovídají označení v simulačním modelu. Polohu a natočení efektoru robotu definují osy X, Y, Z, A, B a C. Pohybové osy stroje jsou označeny X1, Y1, Z1, A1 a C1, viz Obr. 44.

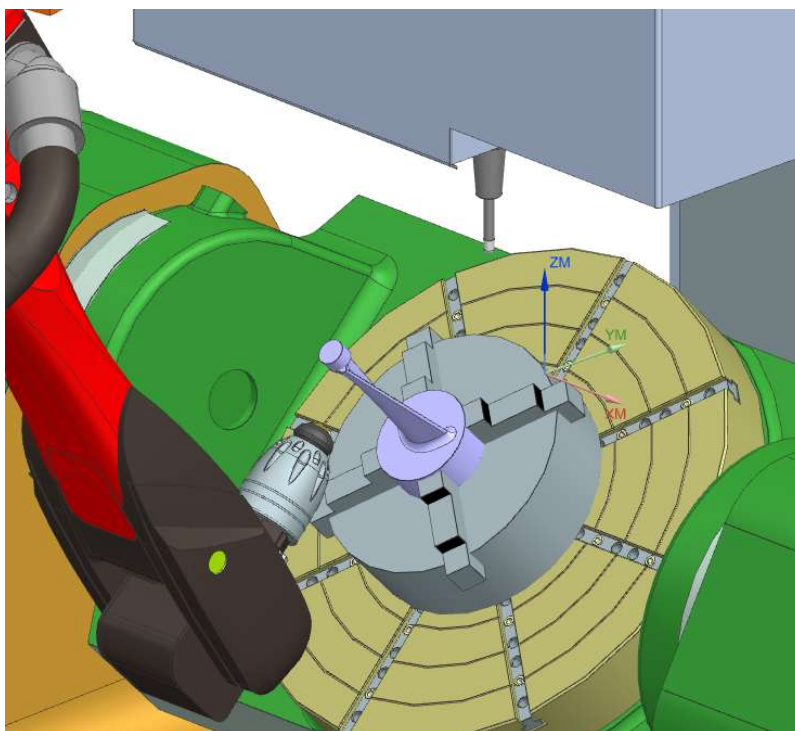


Obr. 44 Označení pohybových os a souřadnic pro stroj i robot

Jako první je nutné si uvědomit, že robot a stroj disponují rozdílnou dynamikou pohonů. Pokud by byly NC programy pro robot a stroj spuštěny nezávisle na sobě (tzv. dvoukanálové řízení) bez dalších úprav, tak i v případě, že by oba programy měly stejný počet řádků kódu, jedno ze zařízení by naplánovanou dráhu projelo rychleji než druhé a podpěra by tak obrobek podepírala nezávisle na místě obrábění. Při obrábění je nutné zajistit, aby robot s podpěrou projel svou dráhu synchronně s frézou. Této synchronizace v časové oblasti je docíleno

interpolátorem ŘS, který díky jednokanálovému řízení zajišťuje odbavení NC kódu zároveň pro robot i stroj.

Jelikož je při jednokanálovém řízení odbavován pouze jeden NC program, je nutné mít společnou hlavičku, tělo i konec programu. Hlavička programu je upravena ručně a obsahuje informace o efektoru robot, transformaci souřadného systému pro robot (nutné z důvodu natočení rotační osy stolu A1), napolohování robotu do výchozí pozice (mimo krytování stroje), posunutí počátku souřadného systému funkcí G54 a zapnutí funkce TRAORI. Následně jsou provedeny úvodní pohyby pro napolohování robotu a stroje do výchozí pozice před samotným obráběním, tak aby nedošlo ke kolizi. V rámci těchto pohybů je natočena osa A1 o 45°. Obrábění následně probíhá pouze s interpolací osy X1, Y1 a Z1. Výchozí pozice před obráběním je zobrazena na Obr. 45.

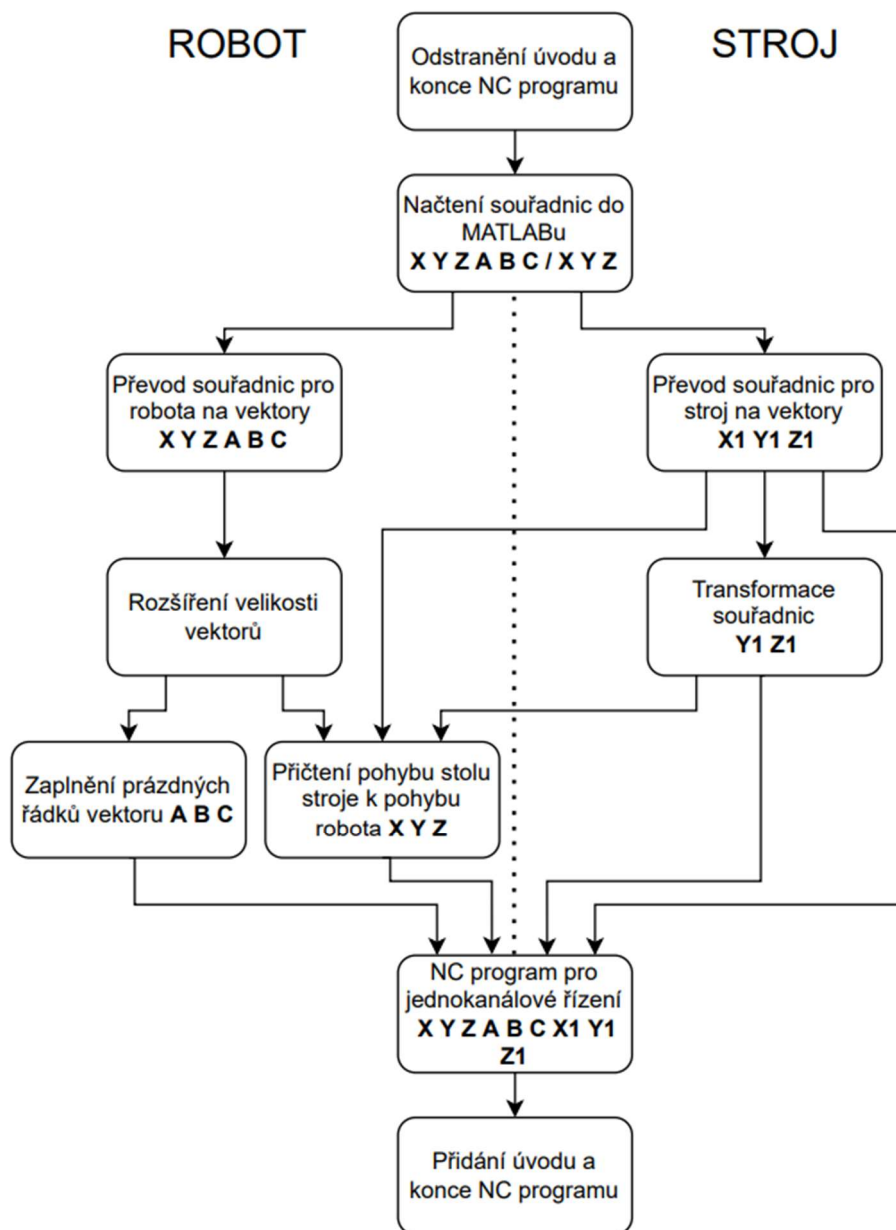


Obr. 45 Výchozí pozice robotu před obráběním

Konec programu obsahuje odjezd frézy do bezpečné vzdálenosti ve směru osy Z1, napolohování osy A1 do nulové pozice, odjetí robotu do výchozí pozice mimo krytování stroje, zastavení otáček vřetena a ukončení programu pomocí funkce M2.

Stěžejní část NC programu je tělo programu, které obsahuje souřadnice polohy pro stroj i robot. Skript sloužící pro sloučení je napsán v softwaru MATLAB

a diagram tohoto skriptu je zobrazen na Obr. 46. Vygenerované programy z CAM jsou nejprve zbaveny hlavičky programu, konce programu a písemného označení pohybových os. Takto upravený textový soubor obsahující pouze číselné hodnoty souřadnic je nahrán do prostředí MATLAB. Z načtených souborů jsou sestaveny vektory pro každou pohybovou osu. Souřadnice pro robot jsou označeny X, Y, Z, A, B a C a pro stroj X1, Y1, a Z1.



Obr. 46 Diagram programu pro sloučení NC kódů

Na straně stroje je nutné provést transformaci souřadného systému, která plyne z natočení osy stolu A1. Takováto transformace je běžně prováděna

automaticky v ŘS. V případě jednokanálového řízení je však možné využít automatickou transformaci pouze pro jedno zařízení. Automatická transformace je tedy využita pro souřadnice robotu. Na Obr. 47 je znázorněn princip transformace, která je provedena pro osy Y1 a Z1. Souřadnice frézy ve směru osy X1 jsou při natočení osy A1 neměnné. Vygenerovaný NC program má již natočený souřadný systém (Y_{-NC} a Z_{-NC}) vůči lopatce o stejný úhel, jako je následně natočena osa A1, a to díky nastavení naklopení frézy v CAM a definici kinematiky stroje v postprocesoru. Poloha frézy je v tomto souřadném systému definována pomocí souřadnic NC Y a NC Z. Transformace tedy spočívá v posunutí počátku souřadného systému do nulového bodu (na Obr. 47 označeno 0) a přepočtu souřadnic tak, aby odpovídaly přímo poloze pohybové osy stroje Y1 a Z1.

$$Y1_{SKUT} = NC_Y1 + P_Y = NC_Y1 + (\sin(\alpha) * r_A) \quad (4.1)$$

$$Z1_{SKUT} = NC_Z1 - P_Z = NC_Z1 - (r_A - (\cos(\alpha) * r_A)) \quad (4.2)$$

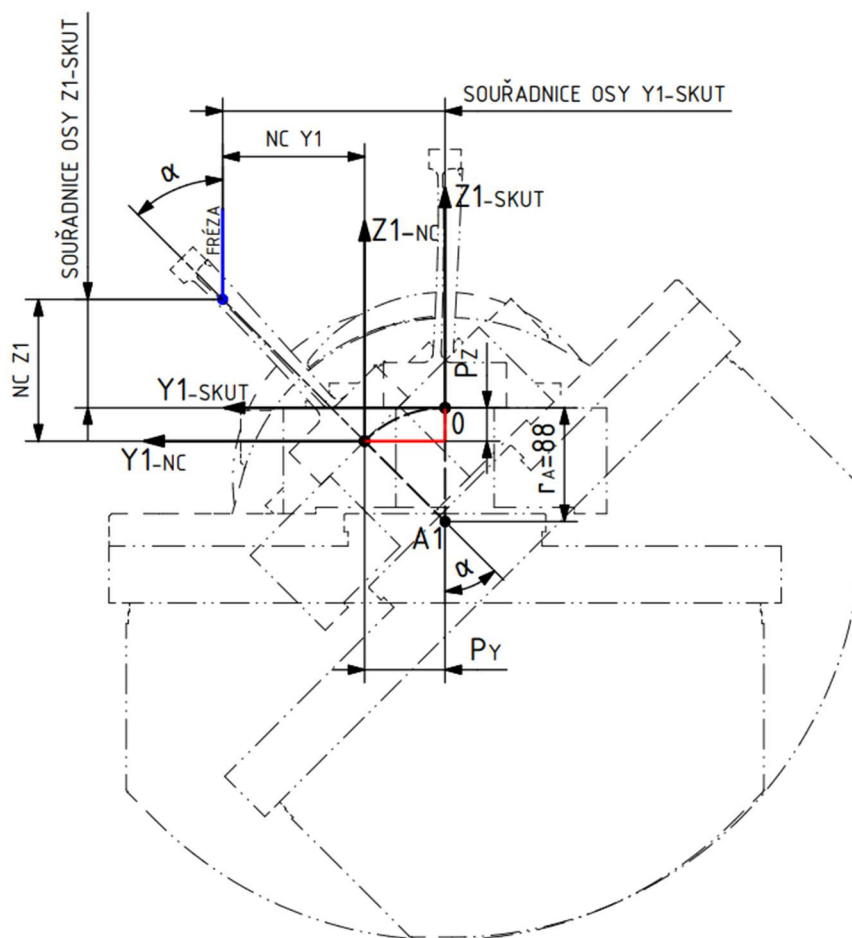
kde v rovnici je

P_Y ... posunutí souřadného systému v ose Y1

P_Z ... posunutí souřadného systému v ose Z1

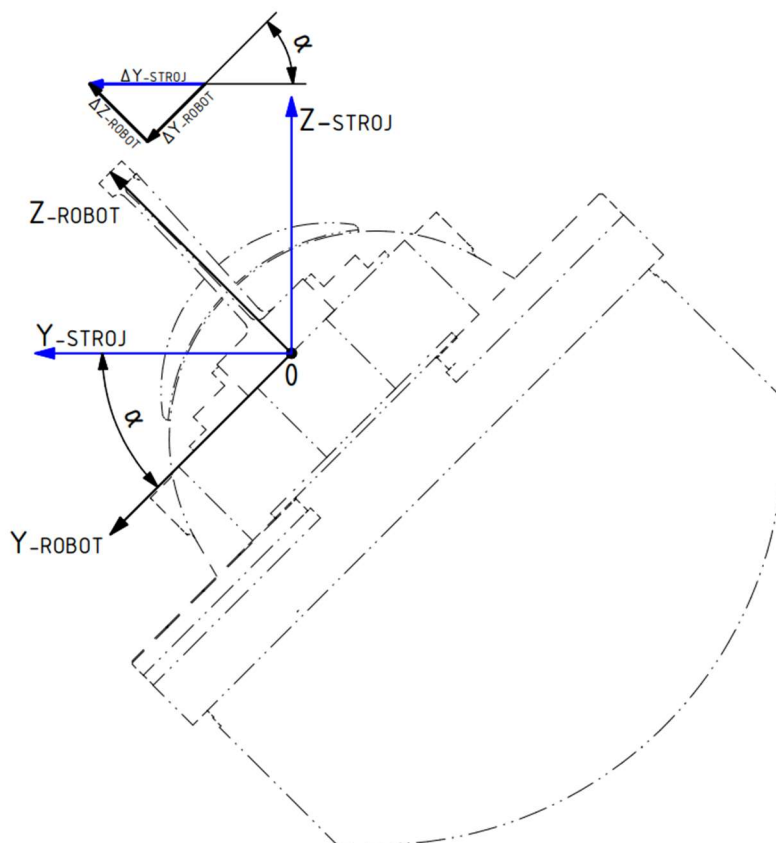
r_A ... poloměr otáčení souřadného systému vůči ose A1

α ... úhel natočení osy stolu A1



Obr. 47 Schéma transformace souřadného systému Y1 a Z1

Na straně robotu je nutné provést dvě úpravy NC kódu. Nejprve je nutné rozšířit vektory souřadnic robotu, tak aby měly stejnou délku jako vektory souřadnic pro stroj. Do rozšířeného vektoru jsou následně rovnoměrně rozmístěny souřadnice bodů dráhy robotu. Následně je nutné k vektorům souřadnic pro robot přičíst pohyb stolu frézky. Jelikož stroj disponuje kinematickou konfigurací s osou X1 a Y1 umístěnou na stole stroje, dochází při obrábění k pohybu obrobku. Tento pohyb není možné během plánování dráhy pro robot v CAM simulovat a zahrnutí pohybu stolu je provedeno až v rámci sloučení NC kódů. Pohyb stolu v ose X1 je přímo rovný pohybu robotu v ose X, proto stačí sečíst řádky vektorů souřadnic X a X1. Při pohybu stolu v ose Y1 však dochází ke změně dvou souřadnic Y a Z robotu, viz Obr. 48. Výpočet ΔY a ΔZ pro robot vychází ze základních goniometrických funkcí. Následně jsou tyto přírůstky přičteny k vektorům Y a Z robotu.



Obr. 48 Souřadný systém robotu a stroje

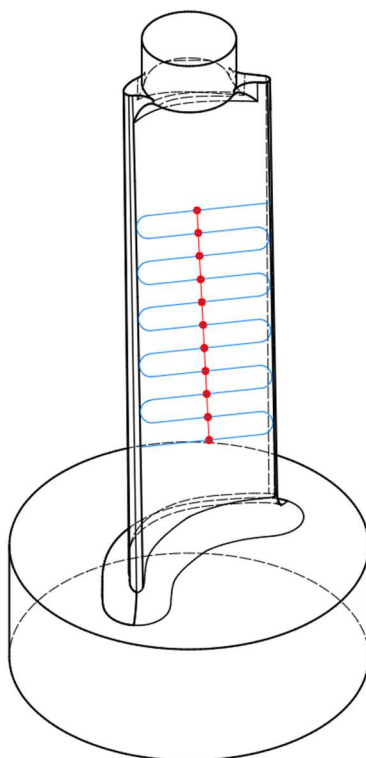
Jelikož se podpurná hlavice pohybuje synchronně s obrobkem, nedochází ke změně natočení v osách A, B ani C vzhledem k naprogramované dráze v CAM. Vektory těchto souřadnic tak pouze stačí rozšířit. Nakonec se jednotlivé vektory souřadnic sloučí do matice a pomocí příkazu *fprintf* se každému sloupci přiřadí písmenné označení a provede se export do textového souboru. Výsledný textový soubor obsahující celé tělo NC programu se vloží do předem připraveného souboru, který již obsahuje hlavičku a konec NC programu.

Ověření kooperace stroje a robotu na simulačním modelu

K ověření výsledného NC programu je využit kinematický simulační model, jehož tvorba byla popsána v kapitole 4.4. Ověření probíhá na stejném modelu lopatky, jako probíhalo plánování dráhy robotu. Po zapnutí modulu *Manufacturing* se v horní liště vybere *Simulate Machine*. Z nabízených možností simulace je zvolí *External Program Simulation*. V rámci takovéto simulace je přímo odbavován vytvořený NC program pomocí CSE driveru. Jedná se tak o třetí stupeň simulace, jak bylo blíže popsáno v kapitole 4.4. Do prostředí NX je následně načten textový

soubor obsahující kompletní NC program. Textový soubor musí mít příponu .mpf. Před spuštěním simulace je vhodné nastavit kolizní dvojice pro detekci kolize během obrábění. To se provede v záložce *Simulation Settings*. Při definici kolizních dvojic je nastavena kontrola kolize mezi robotem a všemi částmi stroje včetně krytování stroje i oplocení kolem robotu.

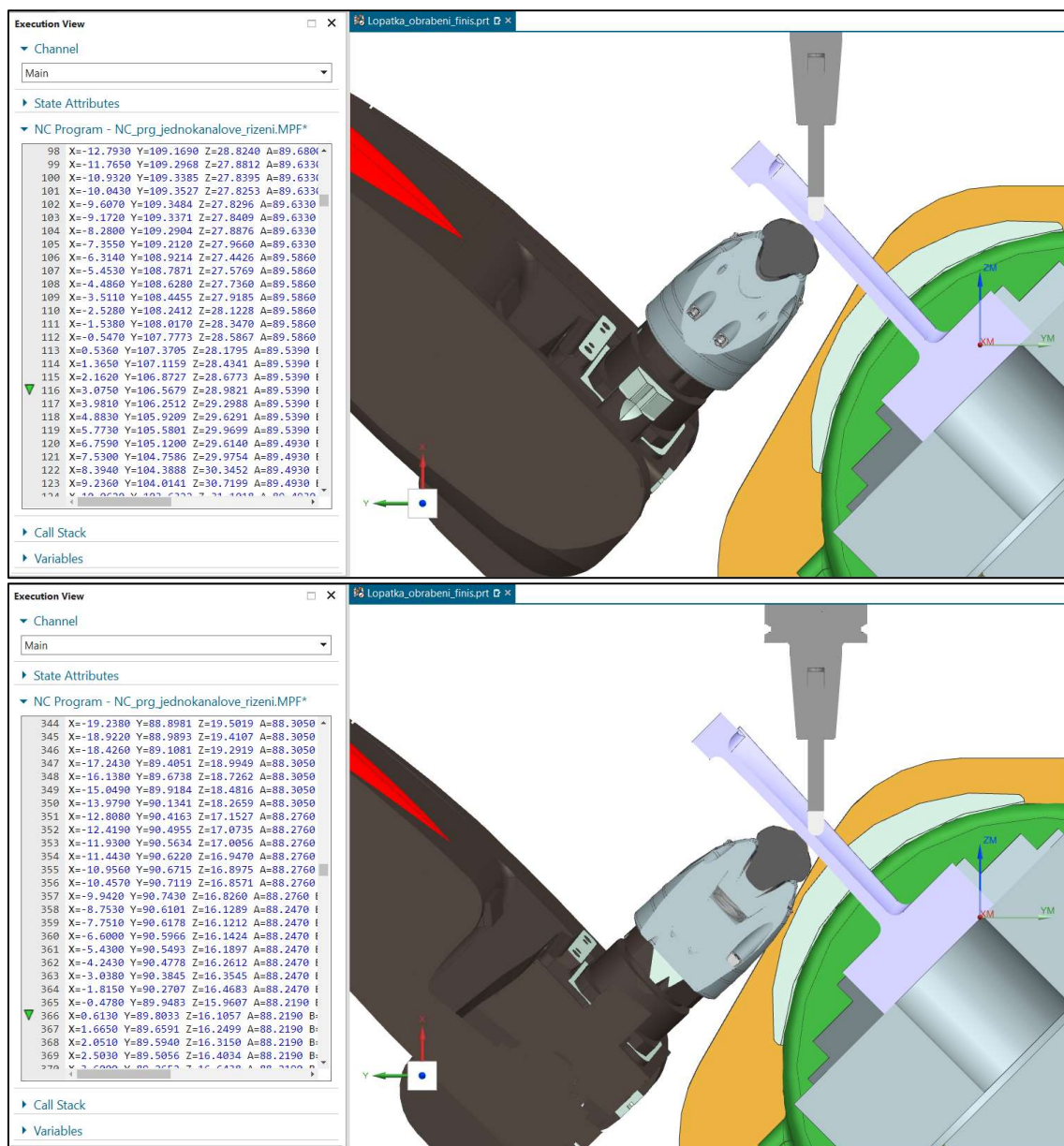
Následně je již možné spustit simulaci. Po provedení první simulace byla upravena výchozí pozice robotu před obráběním, tak aby nedošlo ke kolizi mezi stolem a robotem. Další úpravou bylo najetí rychloposuvem frézou blíže k obrobku, čímž se zkrátil výrobní čas. Při simulaci bylo také odhaleno otočení smyslu orientace osy X vůči X1. To bylo odstraněno úpravou znamének při sčítání souřadnic v prostředí MATLAB. Po těchto úpravách již nedocházelo ke kolizím mezi robotem a strojem a pohyb robotu byl synchronní se strojem, tak jak bylo plánováno. Na Obr. 49 je zobrazeno zjednodušené schéma lopatky s dráhou frézy (modrá barva) a dráhou robotu (červená barva).



Obr. 49 Schéma lopatky se zjednodušenou dráhou podpěry a frézy

Výsledný pohyb robotu spočívá v přejezdu mezi nastavenými body na lopatce a setrvání v těchto bodech tak, že podpůrné místo na lopatce je vždy proti, nebo v těsné blízkosti „řádku“, kterým projíždí fréza. Podpůrná kulička je při pohybu robotu neustále v kontaktu s lopatkou. Simulace je zachycena na videu, které je

součástí elektronické přílohy této práce. Dva snímky z průběhu simulace jsou na Obr. 50. V levé části obrázku je zobrazeno okno s odbavovaným NC kódem.



Obr. 50 Snímky z průběhu simulace jednokanálového řízení v NX

5. Závěr

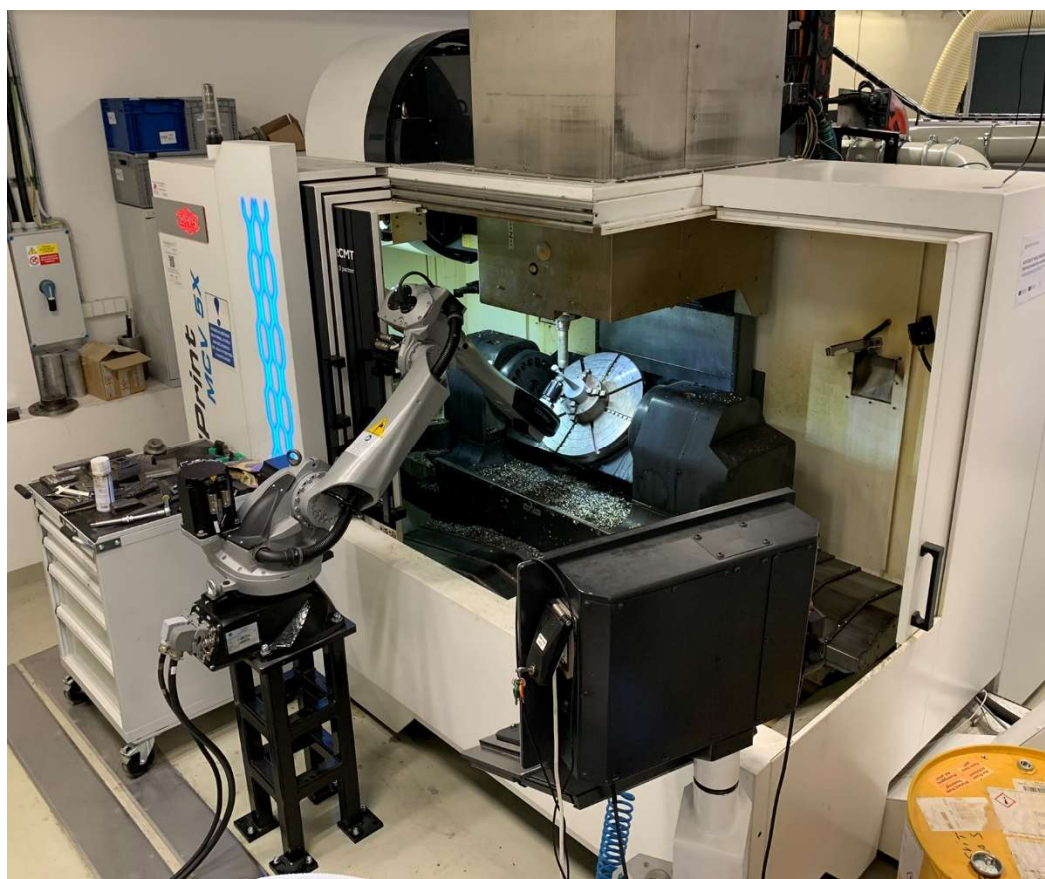
V návaznosti na zadání diplomové práce byla provedena řešerše na oblast podpůrných technologií využitelných při obrábění tenkostěnných dílců. Ze zadání plyne využití aktivní podpěry při obrábění a také proto bylo těmto podpěrám věnována větší část řešerše. V závěru řešerše jsou popsány různé druhy podpůrných hlavic, jež jsou velmi důležitým prvkem podpůrné technologie. S ohledem na zadání práce a provedené řešerše plyne, že bude využit šestiosý průmyslový robot osazen podpůrnou hlavici vlastní konstrukce.

Druhá část práce se již zabývá vlastním řešením, které spočívá v mechanickém návrhu pracoviště obráběcího stroje pro robotem asistované obrábění, tvorbě kinematického simulačního modelu a úprava NC programu pro jednokanálové řízení robotu a stroje. Nejprve je popsán zadaný stroj a robot, které bude pracoviště obsahovat. Následně jsou navrženy koncepty podpůrné hlavice a předběžný návrh pracoviště. Pro podepírání zadané tenkostěnné lopatky je zvolen koncept jednobodové podpůrné hlavice. Na základě zvoleného konceptu je proveden konstrukční návrh podpůrné hlavice, která disponuje sféricky uloženou nylonovou koulí, jež je přímo v kontaktu s lopatkou. Podpůrná koule je pohyblivá ve směru působení podpůrné síly. Odpor tomuto pohybu klade válcová tlačná pružina, která tak definuje velikost podpůrné síly a je možné díky nastavení předpětí podpůrnou sílu měnit. Zároveň je pružina využita jako bezpečnostní prvek v případě dráhové nepřesnosti robotu. Podpůrná hlavice osazená na robotu je vidět na Obr. 52. Následně je již řešeno pracoviště jako celek a je popsána volba všech komponent. Výkres layoutu celého pracoviště je přílohou této práce.

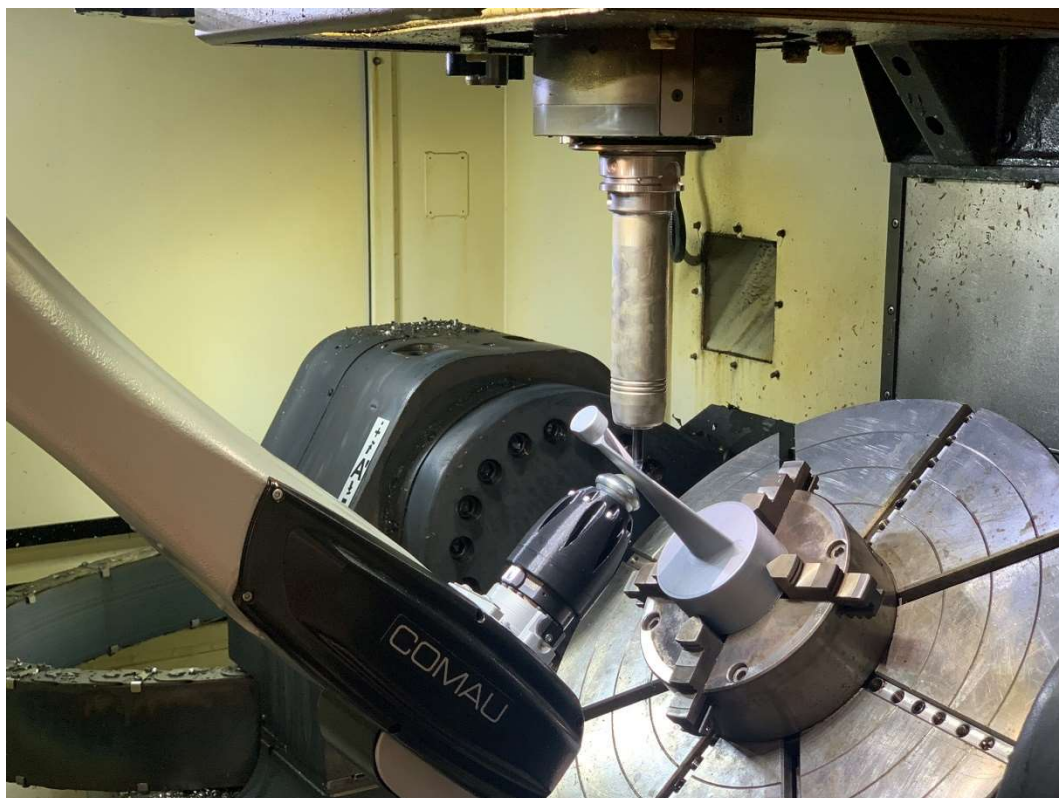
Pro potřeby programování dráhy robotu a následného ověření NC programu pro řízení robotu i stroje byl vytvořen kinematický simulační model. Kinematický simulační model je sestaven v softwaru Siemens NX 1992 a spadá do třetího stupně, tedy simulace stroje řízená NC kódem.

Poslední část práce se zabývá plánováním dráhy robotu a sloučením zadaného NC programu pro obrábění s vytvořeným NC programem pro robot, tak aby obě zařízení byla řízena v jednom kanále. Dráha robotu je naprogramována v CAM NX a následné sloučení obou NC programů je provedeno pomocí skriptu napsaného v softwaru MATLAB. V rámci sloučení NC programů bylo nutné vyřešit několik kroků, které jsou detailně popsány v textu práce.

Na výsledky této diplomové práce, jimiž byly splněny její cíle, je možné navázat dalším výzkumem. Prvním krokem je provést softwarovou integraci robotu Comau ke stroji WeldPrint. V tomto kroku je nutné provést sloučení PLC projektu pro obě zařízení a následně vyladit jejich synchronizaci pohybů. Poté je již možné provést reálné testy synchronizace robotu a stroje. Reálné testy pravděpodobně odhalí problémy, které bude nutné identifikovat a případně vyladit předchozí kroky. Například se jedná o změnu předpětí pružiny v podpůrné hlavici, změnu dráhy robotu nebo frézy a úpravu NC programu v návaznosti na reálné chování stroje. Po vyladění synchronizace bude možné přejít na testy obrábění s využitím podpěry. Při obrábění by bylo vhodné změřit dynamické chování lopatky a provést porovnání s a bez podpěry. Další důležité výsledky obrábění jsou porovnání dosažitelných řezných podmínek bez překročení meze stability a následné vyhodnocení kvality obrobenej plochy lopatky. Aktuální stav pracoviště je zobrazen na Obr. 51 a Obr. 52.



Obr. 51 Aktuální stav pracoviště



Obr. 52 Detail podpůrné hlavičky v kooperaci s frézou

Seznam použité literatury

- [1] GUILLEM, Q. a JOAQUIM, C. Chatter in machining processes: A review. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Elsevier Ltd. 2011 sv. 51, s. 363 - 376 [cit. 2021-10-08]. ISSN 0890-6955. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695511000022>
- [2] ZHU, L. a LIU, C. Recent progress of chatter prediction, detection and suppression in milling. In: *Mechanical Systems and Signal Processing*. Elsevier Ltd. 2020 sv. 143 [cit. 2021-10-07]. ISSN 0888-3270. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327020302260>
- [3] DROBÍLEK, J. *Samobuzené kmitání v obráběcích strojích*. Praha: 2017. Disertační práce (PhD.). České vysoké učení technické, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10467/79220>
- [4] FAASSEN, R. *Chatter Prediction and Control for High-Speed Milling: Modelling and Experiments*. Eindhoven: Netherlands University Press, 2007. Disertační práce (PhD.). Eindhoven University of Technology. ISBN 978-90-386-0995-9. Dostupné také z: <https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/2343451/200710650.pdf>
- [5] ALTINTAS, Y. a BUDAK, E. Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling. In: *CIRP Annals*. Elsevier Ltd. 1995 sv. 44, s. 357 - 362 [cit. 2021-10-08]. ISSN 0007-8506. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607623427>
- [6] ALTINTAS, Y. et al. Chatter Stability of Machining. In: *ASME. J. Manuf. Sci. Eng.* The American Society of Mechanical Engineers(ASME), 2020 sv. 142 [cit. 2021-09-30]. DOI 10.1115/1.4047391. Dostupné z: <https://doi.org/10.1115/1.4047391>
- [7] KLINE, W. A. DEVOR, R. E. a SHAREEF, I. A. The Prediction of Surface Accuracy in End Milling. In: *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. Korean Society of Industrial Engineering Chemistry, 1982 sv. 104, s. 272 - 278 [cit.

- 2021-09-29]. DOI 10.1115/1.3185830. Dostupné z: <https://doi.org/10.1115/1.3185830>
- [8] BUDAK, E. a ALTINTAS, Y. Modeling and avoidance of static form errors in peripheral milling of plates. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Elsevier Ltd. 1995 sv. 35, s. 459 - 476 [cit. 2021-10-03]. ISSN 0890-6955. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695594P26285>
- [9] DENKENA, B. a SCHMIDT, C. Experimental investigation and simulation of machining thin-walled workpieces. In: *Production Engineering*. Taylor and Francis Ltd. 2007 sv. 1, s. 343 - 350 [cit. 2021-10-01]. DOI 10.1007/s11740-007-0017-9. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11740-007-0017-9>
- [10] BIERMANN, D. KERSTING, P. a SURMANN, T. A general approach to simulating workpiece vibrations during five-axis milling of turbine blades. In: *CIRP Annals*. Elsevier Ltd. 2010 sv. 59, s. 125 - 128 [cit. 2021-10-05]. ISSN 0007-8506. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850610000582>
- [11] MUNOA, J. et al. Chatter suppression techniques in metal cutting. In: *CIRP Annals*. Elsevier Ltd. 2016 sv. 65, s. 785 - 808 [cit. 2021-10-06]. ISSN 0007-8506. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850616301962>
- [12] SUTHERLAND, J. W. a DEVOR, R. E. An Improved Method for Cutting Force and Surface Error Prediction in Flexible End Milling Systems. In: *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. Korean Society of Industrial Engineering Chemistry, 1986 sv. 108, s. 269 - 279 [cit. 2021-10-06]. DOI 10.1115/1.3187077. Dostupné z: <https://doi.org/10.1115/1.3187077>
- [13] KOLLURU, K. AXINTE, D. a BECKER, A. A solution for minimising vibrations in milling of thin walled casings by applying dampers to In: *CIRP Annals*. Elsevier Ltd. 2013 sv. 62, s. 415 - 418 [cit. 2021-10-08]. ISSN 0007-8506. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850613001376>

- [14] BAO, Y. et al. Recent progress in flexible supporting technology for aerospace thin-walled parts: A review. In: *Chinese Journal of Aeronautics*. Chinese Journal of Aeronautics, 2021 sv. 34 [cit. 2021-10-14]. ISSN 1000-9361. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1000936121000807#b0445>
- [15] WANG, Y. GAN, Y. a LIU, H. Surface Quality Improvement in Machining an Aluminum Honeycomb by Ice Fixation. In: *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2020 sv. 33 [cit. 2021-10-16]. DOI 10.1186/s10033-020-00439-1. Dostupné z: <https://doi.org/10.1186/s10033-020-00439-1>
- [16] MA, J. ZHANG, D. a WU, B. Stability improvement and vibration suppression of the thin-walled workpiece in milling process via In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Springer Science+Business Media, 2017 sv. 88, s. 1231 - 1242 [cit. 2021-10-22]. DOI 10.1007/s00170-016-8833-8. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00170-016-8833-8>
- [17] HU, F. a LI, D. Process Planning and Simulation Strategies for Perimeter Milling of Thin-walled Flexible Parts Held In: *2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*. IEEE, 2011, s. 922 - 926 [cit. 2021-10-16]. DOI 10.1109/ICMTMA.2011.513. Dostupné z: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5721339?casa_token=ZMXVGgJiV7cAAAAA:3w_deiCa-vTX_-a98x7kMGVbEjTz932-q1FpPZGiTyJf0UQxqdlgf_d188h0iiQ6xMxEJYrm7A
- [18] BAO, Y. et al. Optimization of support location in mirror-milling of aircraft skins. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. SAGE journals, 2018 sv. 232, s. 1569 - 1576 [cit. 2021-10-17]. DOI 10.1177/0954405416673110. Dostupné z: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0954405416673110>
- [19] PANCZUK, R. a PIERRE-YVES, F. *Process and a device for the machining of panels*. Francie, US7682112B2. 2010-03-23 [cit. 2021-12-03]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US7682112B2/en>

- [20] XIAO, J. ZHANG, Q. a LIU, H. Research on vibration suppression by a multi-point flexible following support head in thin-walled In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Springer Science+Business Media, 2020 sv. 106, s. 3335 - 3344 [cit. 2021-10-28]. DOI 10.1007/s00170-019-04728-5. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-019-04728-5>
- [21] LI, Z. et al. An advanced support method of aircraft skin mirror milling - Fluid lubricating support. In: *Materials Science Forum*. Stockholm: Trans Tech Publications Ltd, 2016 sv. 874, s. 469 - 474 [cit. 2021-11-05]. ISSN 0255-5476. Dostupné z: <https://www.scientific.net/MSF.874.469>
- [22] LIU, C. SUN, J. a LI, Y. Investigation on the milling performance of titanium alloy thin-walled part with air jet assistance. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Springer Science+Business Media, 2018 sv. 95, s. 2865 - 2874 [cit. 2021-11-14]. DOI 10.1007/s00170-017-1420-9. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-017-1420-9>
- [23] OZTURK, E. et al. Robotic assisted milling for increased productivity. In: *CIRP Annals*. Elsevier Ltd. 2018 sv. 67, s. 427 - 430 [cit. 2021-10-18]. ISSN 0007-8506. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850618300556>
- [24] FEI, J. et al. Chatter mitigation using moving damper. In: *Journal of Sound and Vibration*. Journal of Sound and Vibration, 2017 sv. 410, s. 49 - 63 [cit. 2021-10-20]. ISSN 0022-460X. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X17306363>
- [25] MATSUBARA, A. TANIYAMA, Y. WANG, J. a KONO, D. Design of a support system with a pivot mechanism for suppressing vibrations in thin-wall milling. In: *CIRP Annals*. Elsevier Ltd. 2017 sv. 66, s. 381 - 384 [cit. 2021-10-18]. ISSN 0007-8506. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.055>
- [26] AOYAMA, T. a KAKINUMA, Y. Development of Fixture Devices for Thin and Compliant Workpieces. In: *CIRP Annals*. Elsevier Ltd. 2005 sv. 54, s. 325 - 328

- [cit. 2021-11-20]. ISSN 0007-8506. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607601140>
- [27] MAHMUD, A. *MECHANICAL POCKET MILLING OF THIN ALUMINUM PANEL WITH A GRASPING*. Montréal: Université de Montréal, 2015. Disertační práce.
- [28] *Innoclump* [online]. [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: <https://www.innoclump.de/en-gb/blisker>
- [29] MARTINEZ, M. T. *Machine tool installation for supporting and machining workpieces*. Španělsko, US5163793A. 1992-11-17 [cit. 2021-11-09]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US5163793A/en>
- [30] *MTorres* [online]. [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: <https://www.mtorres.es/en/aeronautics/products/metallic/torrestool>
- [31] HAMANN, J. C. *Process and mechanical device for machining flexible panels, in particular with a complex shape*. Francie, US7507059B2. 2009-03-24 [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US7507059B2/en>
- [32] SAGAR, K. et al. The SwarmItFix Pilot. In: *Procedia Manufacturing*. Elsevier Ltd. 2017 sv. 11, s. 413 - 422 [cit. 2021-11-19]. ISSN 2351-9789. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978917303323>
- [33] GAGLIARDI, S. et al. Adaptable Fixturing Heads for Swarm Fixtures: Discussion of Two Designs. In: *Proceedings of the ASME 2012 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*. Nantes, France: ASME, 2012, s. 99 - 106 [cit. 2021-10-30]. DOI 10.1115/ESDA2012-82562. Dostupné z: <https://asmedigitalcollection.asme.org/ESDA/proceedings-abstract/ESDA2012/44878/99/231825>
- [34] XIAO, J. ZHAO, S. a GUO, H. Research on the collaborative machining method for dual-robot mirror milling. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Springer Science+Business Media, 2019 sv. 105, s.

- 4071 - 4084 [cit. 2021-10-25]. DOI 10.1007/s00170-018-2367-1. Dostupné z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00170-018-2367-1.pdf>
- [35] MTorres [online]. [cit. 2021-11-08]. Dostupné z: <https://www.mtorres.es/en/aeronautics/products/metallic/torres-surface-milling>
- [36] YouTube. *Surface Milling machine | SURFACE MILLING | MTorres* [online]. [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=gUz_qfSDoHw&ab_channel=MTorres. Kanál uživatele MTorres
- [37] BAI, Y. et al. Multipoint support technology for mirror milling of aircraft skins. In: *Materials and Manufacturing Processes*. Taylor and Francis Ltd. 2017 sv. 33, s. 996 - 1002 [cit. 2021-10-18]. DOI 10.1080/10426914.2017.1388519. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/10426914.2017.1388519>
- [38] ZHANG, S. BI, Q. JI, Y. a WANG, Y. Real-time thickness compensation in mirror milling based on modified Smith predictor and In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Elsevier Ltd. 2019 sv. 144, s. 103 - 427 [cit. 2021-11-05]. ISSN 0890-6955. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695519303773>
- [39] KOVOSVIT MAS, a. s. [online]. [cit. 2021-11-13]. Dostupné z: <https://www.kovosvit.cz/weldprint-mcv-5x-p44.html>
- [40] COMAU. *Racer7 - 1.4 V2.1 Technical Specifications*. CR00758092-en_00/2016.07. 2016.
- [41] ČSN EN ISO 16090-1. *Bezpečnost obráběcích strojů - Obráběcí centra, Frézky, Postupové stroje - Část* Praha: ÚNMZ, 2018-10. Třídící znak 200710.
- [42] KOLÍBAL, Z. et al. *Roboty a robotizované výrobní technologie*. Brno: VUTIUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.
- [43] AG, Siemens. *SINUMERIK Run MyRobot /Direct* [online]. 2018 [cit. 2022-04-05]. Dostupné z: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/245/109763245/att_971150/v1/840Dsl_Run_MyRobot_commiss_man_en-

US.pdf?fbclid=IwAR07K9RbP9UrWvRbwgwCj7mQLkJuX52fxBpqrEpoDo1bgG
 FWUo-4eEhNIE4

- [44] KUPRIN, N. *Integration of Comau robot into the Siemens Sinumerik 840D sl*. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, RCMT, 2021. Výzkumná zpráva číslo V3S-350594 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/96457>
- [45] JANDA, M. Simulace reálného NC kódu pro obrábění. In: *MM Průmyslové spektrum*. 2011 sv. 7 [cit. 2022-03-31]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/simulace-realneho-nc-kodu-pro-obrabeni>
- [46] HÁJÍČEK, Z. *Testování virtuálního NC stroje v prostředí PLM systému NX*. Plzeň: Západočeská Univerzita v Plzni – Fakulta strojní, 2013. Diplomová práce.

Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obr. 1 Regenerativní princip při frézování se dvěma stupni volnosti [5]..... | 13 |
| Obr. 2 Vliv fázového posunutí na tloušťku dynamické třísky [4] | 14 |
| Obr. 3 Klasifikace flexibilních podpůrných technologií [14]..... | 16 |
| Obr. 4 Schématický diagram nosných principů [14]..... | 16 |
| Obr. 5 Princip technologie MRF [16]..... | 17 |
| Obr. 6 Princip zrcadlového frézování [18]..... | 18 |
| Obr. 7 Princip tryskové podpěry [22]..... | 20 |
| Obr. 8 Experimentální setup vyvinutého zařízení [24] | 21 |
| Obr. 9 Experimentální zařízení pro upevnění a podepření obrobku [25] | 22 |
| Obr. 10 Základní struktura multi–pinového podpůrného zařízení. [26]..... | 23 |
| Obr. 11 Experimentální setup master–slave efektoru [27] | 24 |
| Obr. 12 Podpůrný systém Blisker [28]..... | 25 |
| Obr. 13 Torrestool v konfiguraci tří přestavitelných os [29]..... | 26 |

| | |
|---|----|
| Obr. 14 Zařízení pro zrcadlové obrábění tenkostěnných panelů [19]..... | 27 |
| Obr. 15 Detailní pohled na frézování kapsy [31]..... | 28 |
| Obr. 16 Schéma podpory s tlakovou kapalinou [21]..... | 29 |
| Obr. 17 Sestava prototypu SwarmItFix [32]..... | 30 |
| Obr. 18 Zrcadlové obrábění dvou spolupracujících robotů [34]..... | 31 |
| Obr. 19 Robotické asistované frézování [23]..... | 32 |
| Obr. 20 Torres surface milling [36]..... | 33 |
| Obr. 21 Konstrukce podpůrného tlumiče [24]..... | 34 |
| Obr. 22 Struktura podpěrné hlavy s jednočinnými pneumatickými válci [20]..... | 34 |
| Obr. 23 Konstrukce podpůrné hlavice pro zařízení SwarmItFix [33]..... | 35 |
| Obr. 24 Podpůrný prvek pro robota Staubli TX90 [23]..... | 36 |
| Obr. 25 Schéma online měření a kompenzace [38]..... | 36 |
| Obr. 26 Hybridní stroj WeldPrint 5AX [39]..... | 38 |
| Obr. 27 Poloha robotu vůči stroji..... | 40 |
| Obr. 28 Jednobodová podpůrná hlavice..... | 41 |
| Obr. 29 Hlavice s podpůrným válcem..... | 41 |
| Obr. 30 Vícebodová podpůrná hlavice..... | 42 |
| Obr. 31 Podepíraný obrobek – tenkostěnná lopatka..... | 43 |
| Obr. 32 Schéma navržené jednobodové podpůrné hlavice..... | 45 |
| Obr. 33 Pracovní oblast pružiny TL 2x22x40..... | 46 |
| Obr. 34 Layout pracoviště..... | 47 |
| Obr. 35 Schéma integrace robotu do ŘS stroje s využitím opce Run MyRobot/Direct Control [43]..... | 50 |
| Obr. 36 Spuštění Machine Tool Builder v NX..... | 52 |
| Obr. 37 Tvorba Machine Component rotační osy J3 robotu..... | 54 |
| Obr. 38 Nastavení kinematických vlastností rotační osy J3 robotu..... | 55 |
| Obr. 39 Machine Tool Navigator vytvořeného simulačního modelu..... | 56 |

| | |
|---|----|
| Obr. 40 Machine Tool Navigator podpůrné hlavice | 57 |
| Obr. 41 Úprava CSE driveru v softwaru Machine Configurator | 58 |
| Obr. 42 Dráha frézy pro test synchronizace robotu a stroje | 59 |
| Obr. 43 Dráha robotu s podpěrou pro test synchronizace robotu a stroje..... | 60 |
| Obr. 44 Označení pohybových os a souřadnic pro stroj i robot | 61 |
| Obr. 45 Výchozí pozice robotu před obráběním | 62 |
| Obr. 46 Diagram programu pro sloučení NC kódů | 63 |
| Obr. 47 Schéma transformace souřadného systému Y1 a Z1 | 65 |
| Obr. 48 Souřadný systém robotu a stroje | 66 |
| Obr. 49 Schéma lopatky se zjednodušenou dráhou podpěry a frézy..... | 67 |
| Obr. 50 Snímky z průběhu simulace jednokanálového řízení v NX | 68 |
| Obr. 51 Aktuální stav pracoviště | 70 |
| Obr. 52 Detail podpůrné hlavice v kooperaci s frézou | 71 |

Seznam tabulek

| | |
|---|----|
| Tab. 1 Technické parametry robotu Comau Racer 7-1.4 [40]..... | 39 |
|---|----|

Seznam použitého softwaru

- Office 365 ProPlus
- Siemens NX 1992
- Siemens Machine Configurator
- Autodesk Inventor Professional 2022
- MATLAB R2021b

Seznam příloh

Seznam elektronických příloh

- Text práce (.pdf)
- 3D modely:
 - Weldprint__Comau (.zip)
 - Podpera__Comau__Head (.stp)
- Výkresy:
 - LAYOUT__PRACOVIŠTĚ (.pdf)
 - PODPŮRNÁ__HLAVICE (.pdf)
 - TĚLESO__PODPĚRY (.pdf)
 - PŘÍRUBA__ROBOT__PODPĚRA (.pdf)
 - PŘEDNÍ__PŘÍRUBA (.pdf)
- Sloučení__NC__prg (.mlx)
- NC__prg__jednokanalove__řízení (.mpf)
- Záznam__ověření__NC__prg__na__simulačním__modelu (.mp4)

Seznam výkresové dokumentace

- | | |
|-------------------------|--------------|
| • LAYOUT PRACOVIŠTĚ | DP1811-00-00 |
| • PODPŮRNÁ HLAVICE | DP1811-01-00 |
| • TĚLESO PODPĚRY | DP1811-01-01 |
| • PŘÍRUBA ROBOT-PODPĚRA | DP1811-01-02 |
| • PŘEDNÍ PŘÍRUBA | DP1811-01-03 |