

OPTIMALIZACE PROCESU VÝROBY SOUČÁSTI ULTRALEHKÉHO LETOUNU

Bc. Petr Štyks

Diplomová práce
2024



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Petr Štyks
Osobní číslo:	T22351
Studijní program:	N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní inženýrství
Forma studia:	Kombinovaná
Téma práce:	Optimalizace procesu výroby součásti ultralehkého letounu

Zásady pro vypracování

- teoretická rešerše na dané téma
- analýza současného stavu výroby součásti
- návrh optimalizace výroby součásti
- porovnání a vyhodnocení přínosů optimalizace výroby součásti

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- KIEF, Hans B., Helmut A. ROSHIWAL a Karsten SCHWARZ. *The CNC handbook*. South Norwalk, Connecticut: Industrial Press, 2022, XIII, 700 p. ISBN 978-0-8311-3636-9.
- GRZESIK, Wit. *Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications*. Oxford: Elsevier, 2008, 1 online zdroj. ISBN 9780080557496. Dostupné také z: https://proxy.k.utb.cz/login?url=http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpAMPMTM1/advanced_machining_processes_of_metallic_mat
- ZHOU, Feng, et al. Optimization of numerical control program and machining simulation based on VERICUT. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 2019, 24: 763-768.
- HOFFMAN, Peter J. a Eric S. HOPEWELL. *Precision machining technology*. Third edition. Australia: Cengage, [2020], xxi, 810 s. ISBN 978-1-337-79530-2.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ondřej Bilek, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2024**
Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2024**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 1. března 2024

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce se zaměřuje na možnosti optimalizace obráběcích procesů ve výrobní společnosti Evektor spol. s r.o., s hlavním cílem zlepšit efektivitu a snížit výrobní náklady. Úvodem se věnuje základům obrábění, frézování a počítačové podpoře a řízení ve výrobním systému. V další části práce je detailní rozbor optimalizace výrobních procesů, včetně výpočtů nákladů, určení optimální velikosti výrobní dávky a metody pro výběr optimálního výrobního postupu. Také představuje metody a softwary pro simulaci, analýzu a optimalizaci obráběcích procesů. Praktická část aplikuje tyto principy na specifický případ výroby brzdového válce, analyzuje stávající výrobní procesy a navrhuje optimalizaci NC kódů s využitím softwaru VERICUT. Speciální pozornost je pak věnována výběru optimálního výrobního postupu a určení optimální velikosti výrobní dávky brzdového válce. Závěrečná část práce poskytuje vyhodnocení přínosů navrhovaných optimalizací v porovnání se současným stavem.

Klíčová slova: optimalizace výroby, optimalizace obrábění, VERICUT, optimální velikost výrobní dávky, výrobní náklady.

ABSTRACT

The thesis focuses on the possibilities of optimizing machining processes in the manufacturing company Evektor spol. s r.o., with the main goal of improving efficiency and reducing production costs. The introduction addresses the basics of machining, milling, and computer support and control in the manufacturing system. The next part of the thesis provides a detailed analysis of the optimization of manufacturing processes, including cost calculations, determination of the optimal batch size, and methods for selecting the optimal production procedure. It also presents methods and software for the simulation, analysis, and optimization of machining processes. The practical part applies these principles to a specific case of brake cylinder production, analyzes the existing production processes, and proposes optimization of NC codes using VERICUT software. Special attention is then given to selecting the optimal production procedure and determining the optimal batch size of the brake cylinder. The final part of the thesis provides an evaluation of the benefits of the proposed optimizations compared to the current state.

Keywords: production optimization, machining optimization, VERICUT, optimal batch size, production costs.

Na tomto místě bych chtěl vyjádřit své upřímné poděkování všem, kteří mi pomohli při tvorbě této diplomové práce.

Zvláštní dík patří panu doc. Ing. Ondřeji Bílkovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, cenné rady a trpělivost, které mi byly oporou po celou dobu přípravy práce.

Dále bych rád poděkoval firmě Axiom Tech s.r.o za poskytnuté školení a možnost využívat software VERICUT pro optimalizaci, která byla klíčovou součástí mé práce.

Velké díky patří také společnosti Evekto spol s r.o., která mi umožnila psát práci na toto zajímavé téma a poskytla mi veškeré potřebné zdroje a podporu.

Na závěr bych chtěl poděkovat své rodině za jejich neustálou podporu, povzbuzení a trpělivost.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 OBRÁBĚNÍ	12
1.1 ZÁKLADNÍ TERMINOLOGIE TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ	13
1.2 POHYBY PŘI OBRÁBĚNÍ.....	14
1.3 TVORBA TRÍSKY PŘI OBRÁBĚNÍ	16
1.3.1 Realizace řezného procesu	16
1.3.2 Vznik třísky a plastické deformace při ortogonálním řezání	17
1.3.3 Klasifikace třísek.....	19
2 FRÉZOVÁNÍ	21
2.1 STROJE PRO FRÉZOVÁNÍ	21
2.2 ZÁKLADNÍ ZPŮSOBY FRÉZOVÁNÍ.....	25
2.2.1 Čelní frézování	25
2.2.2 Válcové frézování	25
2.3 SOUSLEDNÉ A NESOUSLEDNÉ FRÉZOVÁNÍ.....	26
2.3.1 Sousledné frézování	26
2.3.2 Nesousledné frézování	27
2.4 ŘEZNÉ PODMÍNKY	28
3 POČÍTAČOVÁ PODPORA A ŘÍZENÍ VE VÝROBNÍM SYSTÉMU	30
3.1 ČÍSLICOVĚ ŘÍZENÉ STROJE.....	30
3.1.1 NC (Numerical control)	31
3.1.2 CNC (Computer numerical control).....	32
3.1.3 DNC (Distributed numerical control)	32
3.2 NC PROGRAM.....	33
3.2.1 Struktura bloku a slova NC programu	33
3.2.2 Význam nepoužívanějších adres	36
3.3 POČÍTAČOVÁ PODPORA VÝROBY	36
3.3.1 Struktura výroby v CAD/CAM systémech	37
3.3.2 CAD (Computer aided design).....	38
3.3.3 CAM (Computer aided manufacturing)	39
3.3.4 Partprogram.....	39
3.3.5 Postprocesor	39
3.3.6 CIM (Computer intergrated manufacturing).....	40
3.3.7 PLM (Product lifecycle management)	40
4 OPTIMALIZACE VÝROBNÍCH PROCESŮ	43
4.1 NEJDŮLEŽITĚJŠÍ VÝPOČTY PRO URČENÍ POTŘEBNÝCH NÁKLADŮ PRO VÝROBU DÍLŮ	44
4.1.1 Náklady na výrobní prostředky vznesené na jednu součást N_{VP}	44

4.1.2	Náklady na seřízení jedné výrobní dávky N_S	46
4.1.3	Přímé náklady na výrobu jednoho kusu N_{VN}	46
4.1.4	Celkové výrobní náklady N_{CV}	46
4.1.5	Náklady na materiál N_M	47
4.1.6	Náklady na speciální nářadí N_{SP}	47
4.2	OPTIMÁLNÍ VELIKOST VÝROBNÍ DÁVKY	47
4.2.1	Celkové náklady na výrobní dávku N_{CD}	48
4.2.2	Provozní náklady na výrobní dávku N_{PD}	48
4.2.3	Náklady na seřízení N_{SD}	48
4.2.4	Výpočet optimální výrobní dávky	49
4.3	VÝBĚR OPTIMÁLNÍHO VÝROBNÍHO POSTUPU	50
4.4	METODY OPTIMALIZACE OBRÁBĚNÍ	54
4.4.1	Optimalizace parametrů obrábění (MPP – Machining process parameters)	55
4.4.2	Optimalizace trajektorií obrábění	58
4.5	SOFTWARE PRO SIMULACI, ANALÝZU A OPTIMALIZACI OBRÁBĚNÍ	60
4.5.1	ANSYS	60
4.5.2	MATLAB App Designer	62
4.5.3	VERICUT	64
5	SHRnutí TEORETICKÉ ČÁSTI PRÁCE	70
II	PRAKTICKÁ ČÁST	71
6	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	72
7	ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU VÝROBY SOUČÁSTI	73
7.1	STROJNÍ VYBAVENÍ FIRMY	74
7.1.1	FLOW M4-4020C	74
7.1.2	Frézka konzolová svislá FV 20	75
7.1.3	Frézka nástrojařská FN40	76
7.1.4	ZPS MCFV 2080	77
7.1.5	MAKINO A61nx-5E	78
7.2	SOFTWAREOVÉ VYBAVENÍ FIRMY	79
7.3	PŘÍPRAVA VÝROBNÍCH PROCESŮ VE FIRMĚ	80
7.4	SOUČASNÁ VÝROBA BRZDOVÉHO VÁLCE	81
7.5	ANALÝZA VÝROBNÍHO POSTUPU A VÝPOČET NÁKLADŮ PRO VÝROBU BRZDOVÉHO VÁLCE	86
7.5.1	Analýza výrobních časů jednotlivých operací	86
7.5.2	Výpočet nákladů pro výrobu brzdového válce	87
7.5.3	Výpočet nákladů pro výrobu brzdového válce s opravenou normou času	90
8	NÁVRH OPTIMALIZACE VÝROBY SOUČÁSTI	92
8.1	OPTIMALIZACE NC PROGRAMU POMOCÍ SOFTWARE VERICUT A JEHO MODULU FORCE	92

8.1.1	Princip analýzy a optimalizace ve Force.....	92
8.1.2	Optimalizace NC programu pro obrábění brzdového válce pomocí VERICUT Force	94
8.2	NÁVRH A VÝBĚR OPTIMÁLNÍHO VÝROBNÍHO POSTUPU	102
8.2.1	Výrobní postup I	102
8.2.2	Výrobní postup II	104
8.2.3	Výrobní postup III.....	106
8.2.4	Výběr optimálního výrobního postupu	108
9	POROVNÁNÍ A VYHODNOCENÍ PŘÍNOSŮ OPTIMALIZACE SOUČÁSTI.....	109
9.1	VYHODNOCENÍ NÁKLADŮ PRO SEŘÍZENÍ NA JEDEN KUS.....	109
9.2	VYHODNOCENÍ VÝROBNÍCH NÁKLADŮ JEDNOHO KUSU	109
9.3	PŘÍNOS OPTIMALIZACE NC KÓDU POMOCÍ VERICUT FORCE	110
9.4	VYHODNOCENÍ CELKOVÝCH ČASOVÝCH ÚSPOR	111
9.5	VYHODNOCENÍ CELKOVÝCH NÁKLADŮ PRO VÝROBU JEDNOHO KUSU	111
9.6	DISKUSE VÝSLEDKŮ OPTIMALIZACE	112
	ZÁVĚR	114
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	115
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	119
	SEZNAM OBRÁZKŮ	120
	SEZNAM TABULEK.....	122
	SEZNAM PŘÍLOH.....	123

ÚVOD

V současné době stojí průmyslová výroba před řadou významných výzev, mezi které patří zvyšování efektivity výrobních procesů, snižování nákladů a minimalizace dopadu na životní prostředí. Tyto výzvy jsou obzvláště aktuální v odvětví leteckého průmyslu, kde jsou požadavky na přesnost, spolehlivost a bezpečnost výrobků mimořádně vysoké. V kontextu ultralehkých letounů, jejichž konstrukce a výroba představují specifický segment leteckého průmyslu, je zásadní nejen výběr vhodných materiálů a technologií, ale také optimalizace procesů obrábění a výroby součástí. Tyto procesy jsou klíčové pro dosažení požadované kvality, vysoké efektivity a hospodárnosti výrobního procesu.

Významnou roli v moderní výrobní praxi hraje počítačová podpora a řízení, především díky nasazení číslicově řízených (CNC) strojů. Tyto stroje nabízejí vysokou přesnost a efektivitu obrábění s pokročilým stupněm automatizace. Integrace technologií počítačově podporovaného navrhování (CAD) a počítačově podporované výroby (CAM) přináší výrazná zlepšení v oblastech plánování, flexibility, simulace a optimalizace výrobních procesů.

Optimalizace výrobních procesů se zaměřuje na nalezení nejefektivnějších postupů výroby, které minimalizují náklady a zároveň zajišťují požadovanou kvalitu a výkonnost výrobků. Tato disciplína zahrnuje analýzu a výběr vhodných výrobních technologií, stanovení optimálních výrobních podmínek, včetně režných rychlostí a posuvů, a využívání moderních softwarových nástrojů pro simulaci a analýzu obráběcích procesů.

Tato diplomová práce se zabývá optimalizací procesu výroby a obrábění součásti ultralehkého letounu. V teoretické části je poskytnut komplexní přehled o základních pojmech a metodách obrábění, frézování, počítačové podpoře a řízení ve výrobním systému, stejně jako o metodách optimalizace výrobních procesů. Praktická část práce je zaměřena na analýzu současného stavu výroby součásti, identifikaci možností pro zlepšení a navržení konkrétních kroků pro optimalizaci výrobního procesu. Cílem práce je nejen teoretické pochopení procesů obrábění a optimalizace, ale také praktické aplikace získaných poznatků pro zlepšení efektivity, kvality a ekonomické efektivity výroby součástí ultralehkého letounu. Výsledky práce ukazují, jak lze pomocí moderních technologií a metod dosáhnout významných zlepšení v obrábění a výrobních procesech, což přináší nejen ekonomické, ale i technologické a ekologické benefity.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 OBRÁBĚNÍ

Obrábění je proces tvarování obrobku, kde se vytváří požadovaný povrch s konkrétním tvarem, velikostí a kvalitou. To se děje postupným odebíráním částí materiálu z výchozího polotovaru s využitím různých sil, jako jsou mechanické, elektrické, chemické či tepelné. [1][2]

Tab. 1: Příklady obráběcích procesů na základě energie použité k úběru materiálu [3]

Mechanické	Tepelné	Chemické a elektrochemické
Soustružení	Tepelné řezání (tavení)	Leptání
Frézování	Obrábění elektronovým paprskem	Chemické obrábění
Vrtání	Obrábění iontovým paprskem	Fotochemické obrábění
Broušení	Obrábění vodním paprskem	Elektrochemické obrábění
Řezání vodním paprskem	Laserové obrábění	
Abrazivní obrábění	Elektroerozivní obrábění	
Pískování		
Obrábění ultrazvukem		

Metody obrábění můžeme rozdělit na:

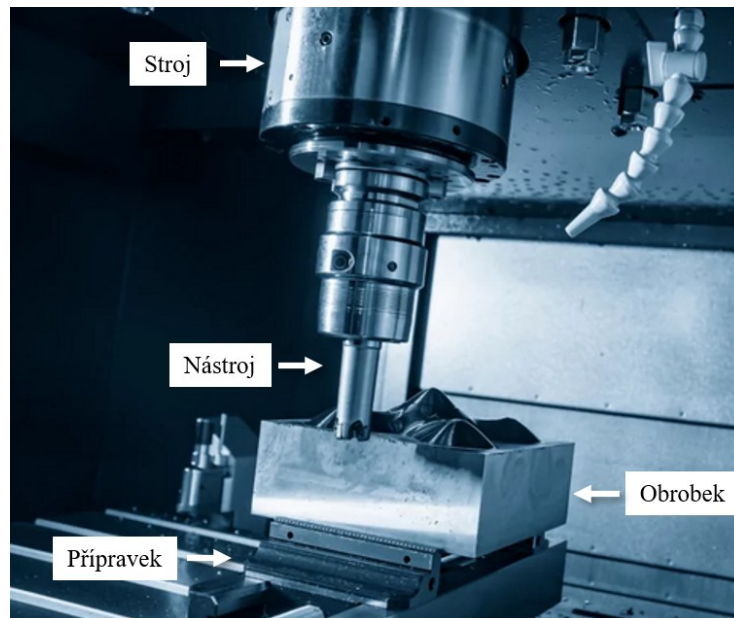
- **Konvenční obrábění** – mechanické oddělování částic materiálu pomocí břitu rezného nástroje ve formě třísky
- **Abrazivní procesy obrábění** – zde se řadí broušení a jiné abrazivní procesy
- **Nekonvenční obrábění** – odlišné oddělování materiálu než u konvenčního obrábění, a to působením mechanických, tepelných, chemických, elektrických, případně jejich kombinacemi. Tato metoda obrábění je využita především u materiálů s vysokou pevností, houževnatostí, obtížnou obrobiteľností, které nelze konvenčními metodami hospodárně obrábět. [2]

Podle povahy materiálu a způsobu, jakým je zpracováván, se rezné procesy rozdělují do několika kategorií: kontinuální (jako je soustružení, vrtání), diskontinuální (například obrázení, hoblování) a cyklické (jako frézování, broušení). Tyto kategorie reprezentují různé přístupy k manipulaci s materiálem během procesu obrábění. Při skutečném rezném procesu dochází k odebírání materiálu za specifických rezných podmínek, jež jsou nedílnou součástí celkových podmínek obrábění. [4]

1.1 Základní terminologie technologie obrábění

V problematice obrábění se lze setkat s následujícími termíny:

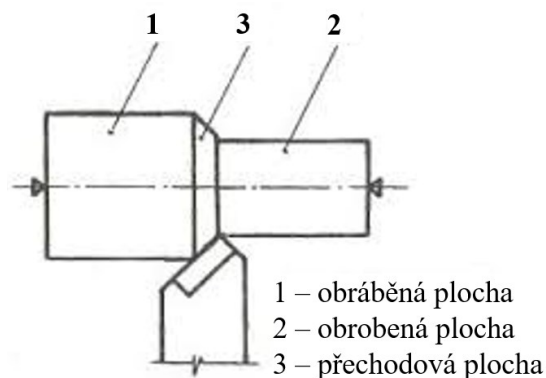
- **Řezání** – obrábění, při kterém se materiál odstraňuje ve tvaru třísky břitem řezného nástroje.
- **Tříska** – odříznutá a deformovaná vrstva materiálu.
- **Polotovár** – materiál, který se bude teprve obrábět. Může být normalizovaný (tyče, plechy, trubky) a nenormalizovaný (odlitky, výkovky, svarky).
- **Přídavek** – část materiálu obrobku, kterou je potřeba odstranit obráběním.
- **Soustava obrábění (SNOP)** – Soustava je složena ze tří nebo čtyř částí.
 - Stroj (S)
 - Nástroj (N)
 - Obrodek (O)
 - Přípravek (P) – může být vynechán



Obr. 1: Soustava obrábění (SNOP) [5]

- **Nástroj** – při interakci s obrobkem umožňuje provádění řezného procesu. Z hlediska geometrie je nástroj definován svými prvky, povrchy, ostřími a jejich rozměry.

- **Obrobek** – částečně, nebo úplně obrobená součást, která je z geometrického hlediska obráběcího procesu plochou přechodovou, obráběnou nebo obrobenou.
 - Obráběná plocha – plocha, která má být obrobena řezáním.
 - Obrobená plocha – výsledek řezného procesu, při němž byl odstraněn přebytečný materiál (přídavek) z polotovaru.
 - Přechodová plocha – přechod mezi obrobenou a obráběnou plochou, vytvořenou řeznou hranou nástroje. [1][2][4]

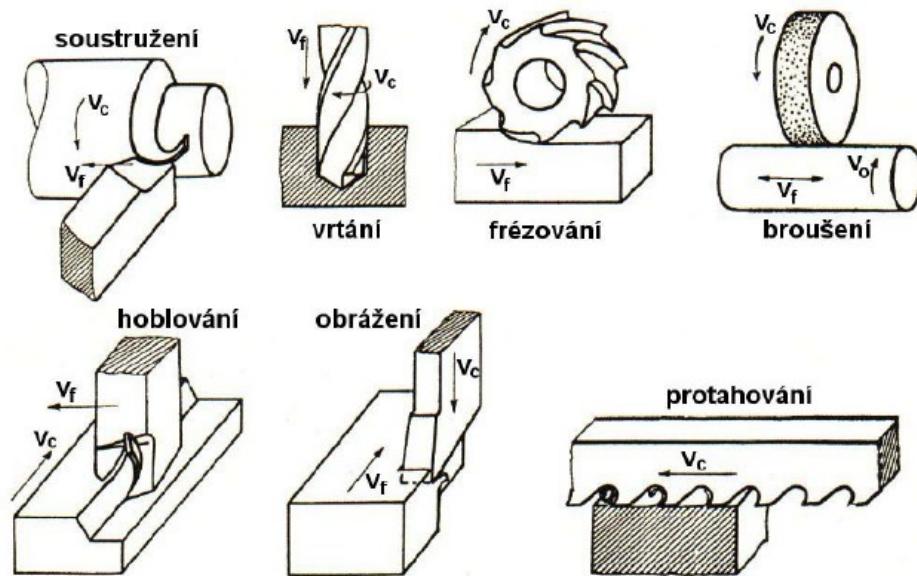


Obr. 2: Základní plochy obrobku při podélném soustružení [4]

1.2 Pohyby při obrábění

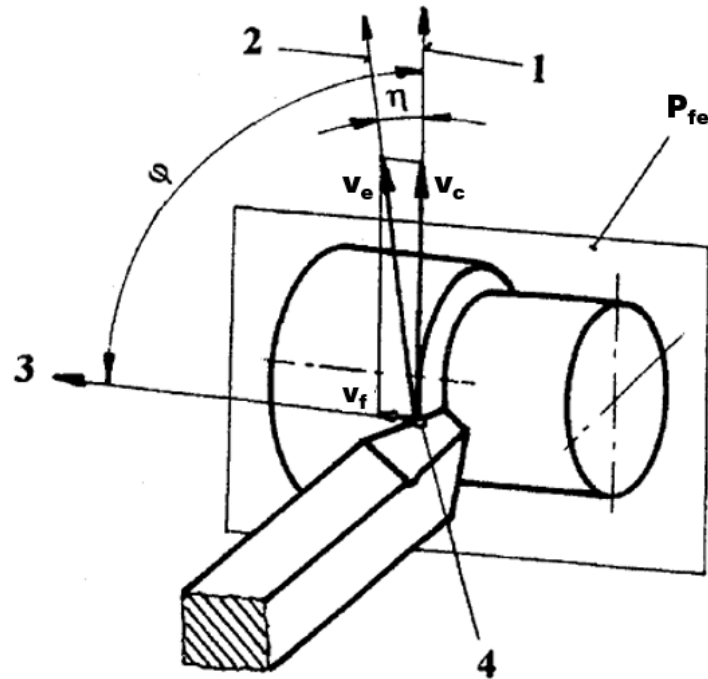
Obrábění je definováno následujícími pohyby:

- **Hlavní řezný pohyb** – vzájemný pohyb mezi nástrojem a obrobkem realizovaný obráběcím strojem. Jeho směr je definován jako směr okamžitého hlavního pohybu uvažovaného bodu ostří nástroje.
- **Řezná rychlost v_c** – vyjadřuje okamžitou rychlost hlavního řezného pohybu uvažovaného bodu ostří nástroje vzhledem k obrobku.
- **Posuvový pohyb (vedlejší řezný pohyb)** – je realizován jako další relativní pohyb mezi nástrojem a obrobkem. U některých způsobů obrábění tento pohyb není.
- **Posuvová rychlost v_f** – okamžitá rychlost posuvového pohybu v uvažovaném bodě ostří nástroje vzhledem k obrobku.



Obr. 3: Hlavní a posuvový pohyb u vybraných metod obrábění [6]

- **Výsledný řezný pohyb v_e** – vektorový součet hlavního a posuvového pohybu.
- **Rychlost výsledného řezného pohybu** – okamžitá rychlost výsledného pohybu v uvažovaném bodě ostří nástroje vzhledem k obrobku.
- **Úhel řezného pohybu η** – je úhel mezi směrem hlavního řezného pohybu a výsledného řezného pohybu v pracovní rovině boční P_{fe} .
- **Úhel posuvového pohybu φ** – úhel mezi směry současného posuvového pohybu a hlavního řezného pohybu v pracovní rovině boční P_{fe} . Pro některé obráběcí procesy není tento úhel definovaný (například protahování, nebo hoblování).
- **Přísuv** – je pohyb nástroje nebo obrobku, kterým se nastavuje nástroj do pracovní polohy na požadovanou hloubku řezu a_p . [4][6]



Obr. 4: Pohyby nástroje při podélném soustružení. 1) směr hlavního pohybu, 2) směr řezného pohybu, 3) směr posuvového pohybu, 4) uvažovaný bod ostří. [4]

1.3 Tvorba třísky při obrábění

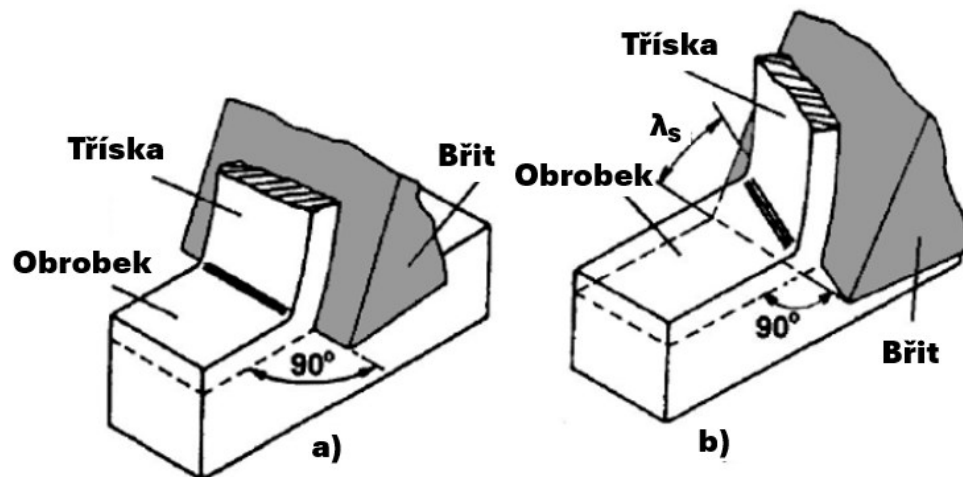
Tvorba třísek při obrábění je klíčovým aspektem procesu, kde dochází k odstraňování materiálu z obrobku pomocí řezného nástroje. Tento proces je spojen s několika důležitými faktory, které ovlivňují výkon a kvalitu obrábění. Závisí zejména na fyzikálních vlastnostech materiálu a jeho podmínkách plastické deformace.

1.3.1 Realizace řezného procesu

Samotný řezný proces lze klasifikovat jako ortogonální řezání nebo obecné řezání. (Obr. 5)

Ortogonální řezání – ostří je nastaveno tak, aby bylo kolmé k směru pohybu řezu. Problematika tohoto řezání se řeší v rovině. Příklady ortogonálního řezání zahrnují například zapichování, protahování nebo frézování nástrojem s přímými zuby.

Obecné řezání – u tohoto řezání je nutné zohlednit řezný proces v třírozměrném prostoru. Příklady tohoto přístupu zahrnují podélné soustružení, frézování nástrojem se zuby v šroubovici a vrtání.



Obr. 5: Realizace řezného procesu: a) ortogonální řezání, b) obecné řezání [6]

Proces vzniku a oddělování třísek se liší u krystalických a nekrystalických látek. Většina technických materiálů, které se běžně využívají ve strojírenské praxi, patří do kategorie krystalických materiálů. Právě studie těchto materiálů, a to jak teoretické, tak experimentální, jsou prováděny pro ortogonální řezání. [3][4][7]

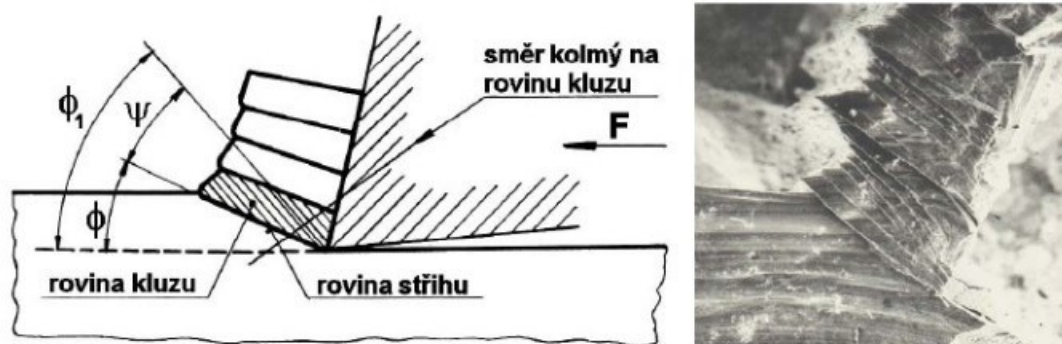
1.3.2 Vznik třísky a plastické deformace při ortogonálním řezání

Během řezného procesu vznikají pružné a následně plastické deformace, když nástroj proniká do materiálu obrobku. Břit nástroje je tlačěn do obrobku silou F . Napětové pole v zóně řezání se rozděluje mezi obrobek a nástroj. Pružné deformace jsou rozprostřeny do celého objemu obrobku, zatímco plastické deformace ovlivňují pouze zónu řezání. Rozložení napětí v této zóně může být určeno pomocí fotoelasticimetrických nebo jiných metod.

Smyková napětí rostou až do okamžiku, kdy dojde k plastické deformaci materiálu obrobku před břitem nástroje (posun vrstev v kluzných rovinách pod úhlem Φ_1). Pohyb nástroje pokračuje, plastická deformace roste, a dochází k přechování a posunu vrstev materiálu kolmo ke kluzným rovinám. Oddělením třísky se v podstatě uzavírá proces plastické deformace. Plastický lom nastává pod vlivem kluzné síly, zatímco křehký lom je způsoben silou normálovou.

Během dalšího pohybu nástroje se napětí v materiálu zvyšuje, až dosáhne hodnoty převyšující mez stříhu obráběného materiálu. To vede k oddělení segmentu třísky pod úhlem stříhu Φ . Rozdíl mezi úhly Φ_1 a Φ se pohybuje v rozmezí $\psi = 0 - 30^\circ$. Nízké hodnoty úhlu

ψ naznačují, že se jedná o tvárné materiály (např. ocel), zatímco vysoké hodnoty poukazují na křehké materiály (např. šedou litinu). [3][4][6]



Obr. 6: Vznik třísky [6]

Při vnikání břitu nástroje do obráběného materiálu dochází k vytváření pružných a následně plastických deformací v těchto oblastech (Obr. 6):

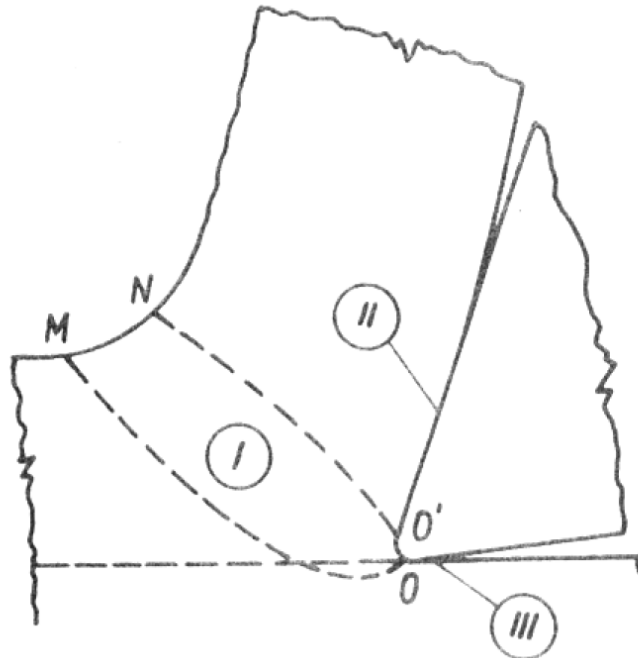
1. Před břitem nástroje vzniká oblast primární plastické deformace (označená *I*), která je vymezena body *OMNO'*.
2. V povrchových vrstvách styku třísky a čela nástroje je oblast sekundární plastické deformace (označená *II*).
3. Na povrchové vrstvě obrobenej plochy vzniká oblast terciární plastické deformace (označená *III*).

Velikost a tvar oblasti *OMNO'* a stav napjatosti jsou proměnlivé a závisí především na fyzikálních vlastnostech obráběného materiálu, zejména na jeho schopnosti deformace a zpevnování. S rostoucí řeznou rychlostí (v_c) a posuvovou rychlostí (v_f) se tato oblast výrazně zužuje, zejména při vysokorychlostním obrábění (HSC). Ovlivňuje ji také řezné prostředí (chlazení), geometrie řezného nástroje a jeho kinematika vzhledem k obrobku.

Zvětšení nástrojového úhlu čela (γ_n) snižuje odpor nástroje proti odchodu třísky, což usnadňuje odchod třísky a zmenšuje její deformaci. Zvětšení nástrojového úhlu (κ_r) zase zmenšuje šířku třísky, což se projeví snížením koeficientu pěchování třísky, ale pouze do určité hodnoty tohoto úhlu. Tyto zákonitosti je důležité vzít v úvahu při volbě optimálních řezných podmínek.

Plastická deformace materiálu v procesu řezání způsobuje několik jevů, včetně oddělení třísky od obrobku, mechanického zatížení nástroje řeznými odpory, tepelného zatížení

nástroje, opotřebení nástroje (na čele a hřbetu), změny textury materiálu v třísece i na povrchové vrstvě obrobenej plochy, vznik zbytkových napětí v povrchové vrstvě obrobenej plochy a neodpovídající průřez a délku třísky v porovnání s teoretickými hodnotami. [4][6]



Obr. 7: Oblasti plastických deformací v zóně řezání [6]

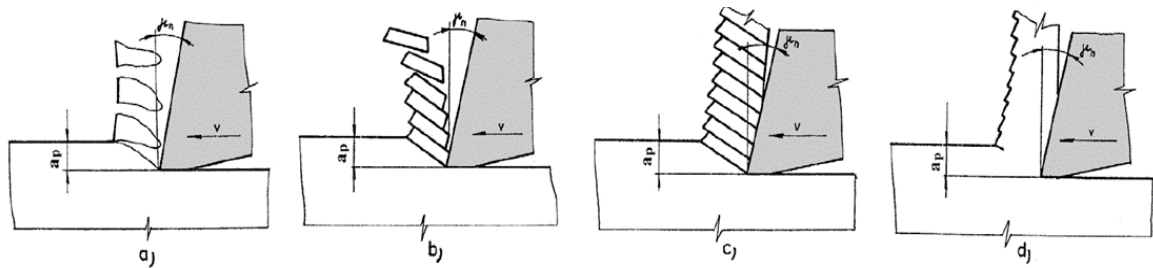
1.3.3 Klasifikace třísek

Třísky, které jsou vedlejším produktem řezání, by měly být malé a správně tvarované, aby se s nimi dobře manipulovalo při jejich odstraňování ze stroje a přepravě. Jejich tvar je klíčový pro efektivní použití nástrojů – dlouhé třísky se mohou motat kolem nástroje, což zvyšuje riziko poškození a zhoršuje kvalitu obrobenej povrchu. Proto je důležité třísky dělit. Tvar třísky ovlivňuje několik faktorů, jako jsou vlastnosti zpracovávaného materiálu, geometrie nástroje, materiál nástroje a řezné podmínky (rychlost řezání, posuv).

Klasifikace typů třísek:

- **Nespojité třísky** – tyto třísky jsou charakterizovány svou nespojitostí a nepravidelností. Vznikají při obrábění tvrdých nebo křehkých materiálů. Jsou vhodné pro aplikace, kde je důležité zabránit hromadění třísek na nástroji nebo v obráběcím prostoru.

- **Elementární třísky** – jsou jednoduché, malé třísky, které se tvoří v důsledku specifických podmínek řezání, jako je velmi vysoká rychlost nebo nízký posuv. Mohou být výsledkem obrábění materiálů s různými vlastnostmi.
- **Segmentované třísky** – se tvoří při vyšších rychlostech řezání a jsou charakterizovány střídáním oblastí s intenzivním a mírným stříhem. Tento typ třísky se často objevuje při obrábění materiálů jako titanové slitiny a nerezové oceli, a to i při středních rychlostech. Když se řezná rychlost zvyšuje, segmenty třísek se více oddělují. Pokud se vyprodukované teplo rychle neodvede, dochází k silnému stříhu, při kterém se vytvářejí úzké segmenty s malými deformovanými oblastmi mezi nimi.
- **Spojité třísky** – jsou dlouhé a nepřerušované, typicky se tvoří při obrábění dobře tvárných materiálů, jako jsou kujná železa, měkká ocel, měď a hliník. Mohou způsobovat problémy, jako je namotávání kolem nástroje a zhoršení kvality obrobeného povrchu, vyžadují efektivní metody odstranění třísek. [3][6][7]



Obr. 8: Klasifikace třísek: a) nespojitá, b) elementární, c) segmentová, d) spojitá [6]

2 FRÉZOVÁNÍ

Frézování je obráběcí proces, při kterém se k odstranění materiálu z obrobku používá rotující frézovací nástroj s definovanou geometrií. Tento proces umožňuje vytváření široké škály povrchů a tvarů, včetně rovných a křivých povrchů, drážek, zubů ozubených kol a mnoha dalších geometrických tvarů. Frézování je velmi flexibilní a přizpůsobitelný proces, který se dá použít pro jednotlivé kusy i hromadnou výrobu a je vhodný pro různé materiály, jako jsou kovy, plasty a dřevo.

Frézování se dá provádět na široké škále strojů, od malých stolních frézek až po velké CNC (počítačem řízené) frézovací centra, které umožňují komplexní a přesné obrábění. Díky moderním technologiím a pokročilému řízení je frézování nezbytnou součástí moderního výrobního průmyslu. [7][8][9]

2.1 Stroje pro frézování

Frézovací stroje – frézky, jsou stroje poháněné motorem, které se většinou používají pro tvarování kovů a dalších pevných materiálů. Frézky mají otáčející se vřeteno pro frézu s více zuby, pohybující obrobek, a pohyblivý stůl pro upevnění, pozicování a posun obrobku.

Frézky se obvykle klasifikují podle polohy vřetena a podle celkové konstrukce. Mezi běžné typy patří:

- **Svislé frézky (vertikální)** – mají vřeteno umístěné vertikálně, což znamená, že frézovací nástroj se otáčí kolem svislé osy. Tyto stroje jsou vhodné pro práci s menšími obrobky a jsou oblíbené pro detailní a precizní práce.



Obr. 9: Vertikální frézka [10]

- **Vodorovné frézky (horizontální)** – v tomto případě je vřeteno umístěné horizontálně, což umožňuje obrábění větších a těžších obrobků. Tyto stroje jsou často vybaveny nástroji pro těžké obrábění a umožňují efektivní odstraňování většího množství materiálu.



Obr. 10: Horizontální frézka [11]

- **Univerzální frézky** – kombinují vlastnosti svislých a vodorovných frézek, mají nastavitelné vřeteno, což umožňuje flexibilitu při obrábění různých typů obrobků.



Obr. 11: Různá nastavení polohy vřetene univerzální frézky [12]

- **CNC frézky** – tyto počítačem řízené frézky nabízí vysokou přesnost a efektivitu. Umožňují složité řezné operace, které jsou programovány a kontrolovány počítačem.



Obr. 12: CNC frézka [13]

- **Sloupové frézky (column and knee)** – jsou pojmenovány podle jejich konstrukčního designu, kde sloup podpírá vřeteno a stůl pro obrobek. Tyto stroje nabízí dobrý kompromis mezi velikostí a flexibilitou.



Obr. 13: Sloupová frézka [14]

- **Ložové frézky (bed type)** – mají pevnou konstrukci, kde stůl s obrobkem se pohybuje pouze v horizontální rovině, zatímco vřeteno se pohybuje vertikálně. Tyto stroje jsou vhodné pro těžké a velké obrobky.



Obr. 14: Ložová frézka [15]

- **Portálové frézky (planer type)** – jsou podobné ložovým frézám, ale jsou navrženy pro velmi velké nebo dlouhé obrobky. [9][16]



Obr. 15: Portálová frézka [17]

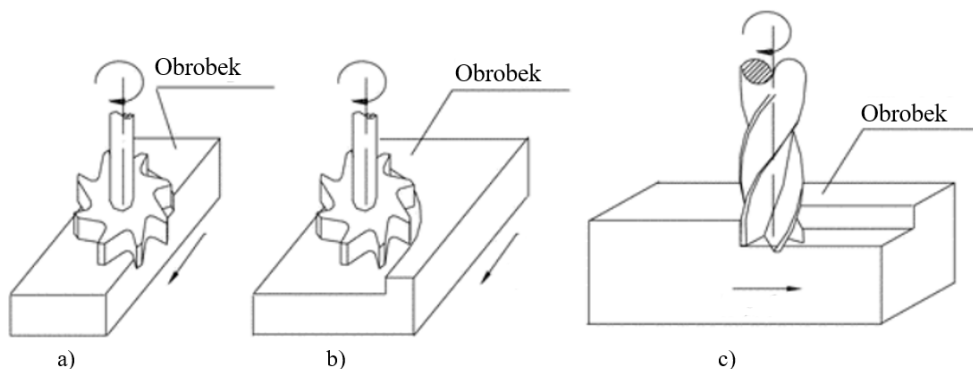
2.2 Základní způsoby frézování

Existují dva základní typy frézování: válcové a čelní, závisle na poloze osy frézovacího nástroje.

2.2.1 Čelní frézování

U tohoto typu frézování je osa otáčení frézovacího nástroje kolmá na povrch obrobku. To znamená, že hlavní řezná síla působí ve směru osy frézy, což umožňuje fríze pronikat do materiálu jak svou čelní plochou, tak i bokem, tedy obvodově.

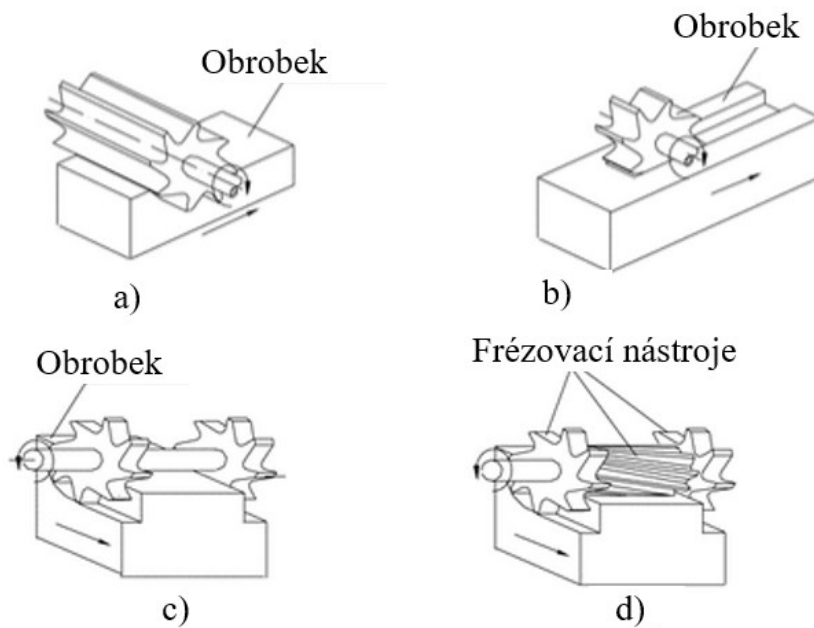
Výhodou čelního frézování je, že díky zapojení více zubů do řezu dochází k rozložení řezných sil, což přispívá k hladšímu chodu a umožňuje používat vyšší posuvové rychlosti. To vede k efektivnějšímu odstranění materiálu a často i k lepší povrchové kvalitě obrobku. Čelní frézování je vhodné pro hrubování i dokončovací operace, a lze ho použít pro širokou škálu materiálů. [7][8][16]



Obr. 16: Příklady čelního frézování: a) klasické čelní frézování, b) částečné čelní frézování, c) rohové frézování. [16]

2.2.2 Válcové frézování

Při válcovém frézování dochází k zabírání nástroje do materiálu pomocí obvodové části frézy. Osa otáčení nástroje je rovnoběžná s povrchem, který se obrábí. Tato metoda se nejčastěji používá s válcovými frézami, majícími šroubovicový tvar se specifickým počtem zubů. Kromě toho se mohou využít i tvarové frézy s různými tvary pro tento typ frézování. [7][8][16]



Obr. 17: Příklady válcového frézování: a) frézování ploch, b) drážkování, c) oboustranné frézování, d) hromadné frézování [16]

2.3 Sousledné a nesousledné frézování

Vždy, když se ostří frézovacího nástroje dostane do kontaktu s materiálem, dochází k jeho rázovému zatížení. Pro efektivní frézování je klíčové zajistit správnou interakci mezi řeznou hranou a zpracovávaným materiálem na začátku i na konci řezného procesu. Během frézování se obrobek pohybuje buď směrem shodným, nebo protisměrným k otáčení frézy. To ovlivňuje počátek a konec řezu a rozhoduje o tom, zda je použito frézování sousledné, nebo nesousledné. [7][8][18]

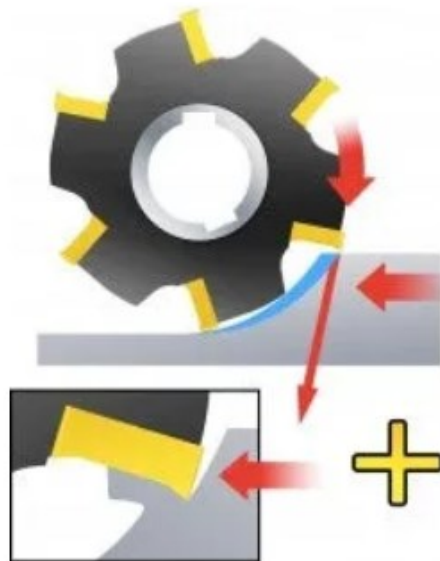
2.3.1 Sousledné frézování

Při sousledném (také známém jako sousměrném) frézování se nástroj pohybuje ve stejném směru jako směr jeho rotace. Během sousledného frézování obvodovou částí frézy se tloušťka třísky od začátku řezu postupně snižuje, až na konci řezu dosahuje nulové hodnoty. Toto pomáhá chránit řezný břit před nadměrným opotřebením a odřením při kontaktu s obrobkem před samotným začátkem řezu.

Velká tloušťka třísky je výhodná, protože řezné síly mají tendenci přitahovat obrobek směrem k fréze, čímž udržují břit v kontaktu s materiálem.

V případě, že fréza je vtahována do obrobku, je nezbytné, aby obráběcí stroj umožňoval kompenzaci vůle pohybového šroubu stolu, což pomáhá eliminovat nežádoucí pohyby zpět. Když se nástroj nechtěně vtahuje do obrobku, dochází ke zvýšení posuvu, což může vést k příliš velké tloušťce třísky a v extrémních případech i k lomu břitu. V takových případech je vhodné zvážit použití nesousledného (protisměrného) frézování.

Tato metoda by měla být upřednostňována vždy, když to umožňují vlastnosti obráběcího stroje, upínacího přípravku a obrobku. [7][8][18]



Obr. 18: Sousedné frézování [18]

2.3.2 Nesousledné frézování

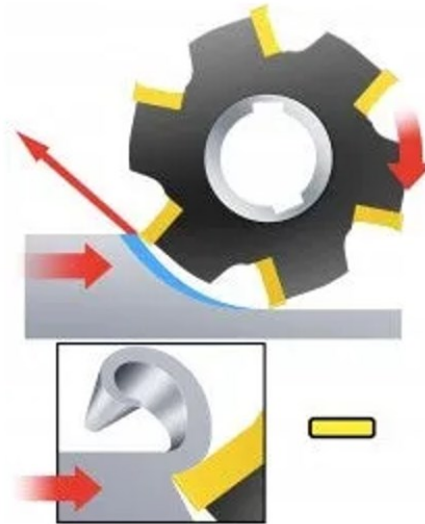
Při nesousledném (také známém jako nesousměrném nebo konvenčním) frézování je směr posuvu obráběcího nástroje opačný oproti směru jeho rotace.

Tloušťka třísky je na začátku nulová a ke konci řezu se postupně zvyšuje. Na začátku řezu působí na břit velké síly, což vede k jeho obrušování a odírání kvůli tření, prudkému zvýšení teploty a častému kontaktu s mechanicky zpevněným povrchem, který byl vytvořen předchozím břitem. Toto vše zkracuje životnost nástroje.

Vysoká tloušťka třísky a zvýšené teploty na konci řezu vedou k vytváření vysokých tahových napětí, což má za následek snížení životnosti nástroje a často rychlé poškození břitu. Mohou se také objevit třísky, které se přilepí nebo navaří na břit, jsou s ním unášeny až do dalšího řezu, nebo mohou způsobovat okamžité vylamování ostří.

Řezné síly mají tendenci tlačit frézu a obrobek od sebe, zatímco radiální síly mohou zvedat obrobek ze stolu.

Nesousledné frézování může být vhodné, pokud jsou přídatky na obrábění velmi rozdílné. Doporučuje se také při použití keramických břitových destiček pro obrábění žárovzdorných slitin, protože řezná keramika je citlivá na rázy při vstupu do řezu. [7][8][18]



Obr. 19: Nesousledné frézování [18]

Různé směry posuvu nástroje vyžadují odlišné přístupy k upnutí obrobku. Při nesousledném frézování je nutné upnutí, které odolává silám, které mohou obrobek zvedat. Naopak při sousledném frézování je důležité mít upnutí, které je schopné neutralizovat síly, jež obrobek k fréze přitahují. [18]

2.4 Řezné podmínky

Řezné podmínky ve frézování se vztahují na sadu parametrů, které ovlivňují proces odstraňování materiálu z obrobku. [7][16][19]

- **Řezná rychlost v_c** – je klíčovým parametrem v obrábění, který ovlivňuje jak kvalitu povrchu obrobku, tak životnost nástroje a efektivitu procesu. Je definována jako rychlost, s jakou se bod na obvodu řezného nástroje (například frézy nebo soustružnického nože) pohybuje při kontaktu s obrobkem. Jedná se o lineární rychlost, obvykle vyjádřenou v metrech za minutu.

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

- **Rychlost posuvu v_f** – označuje rychlost, s jakou se obráběcí nástroj pohybuje přes obrobek nebo, v případě některých obráběcích operací, rychlost, s jakou se obrobek pohybuje vůči nástroji. Tato rychlost je zásadní pro efektivitu obrábění, kvalitu vytvořeného povrchu, a také pro životnost nástroje.

$$v_f = f_z \cdot n \cdot z \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}\text{]} \quad (2)$$

- **Otáčky n** – jsou chápány jako počet otáček, které vykoná nástroj upevněný ve vřetenu stroje během jedné minuty. Tento údaj je ovlivněn specifikacemi daného stroje.

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} \text{ [ot} \cdot \text{min}^{-1}\text{]} \quad (3)$$

- **Objem odebraného materiálu V** – vyjadřuje množství materiálu, které je odstraněno během určitého časového intervalu. Tento objem je ovlivněn hloubkou řezu a_p , šířkou řezu a_e a rychlostí posuvu v_f . Hloubka řezu určuje, jak hluboko nástroj proniká do materiálu při každém průchodu, zatímco šířka řezu definuje šířku odstraněného pruhu materiálu. Rychlost posuvu ovlivňuje, jak rychle se nástroj pohybuje přes obrobek. V kombinaci tyto parametry určují celkový objem materiálu, který je schopen nástroj odstranit za daný časový úsek.

$$V = a_p \cdot a_e \cdot v_f \text{ [mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}\text{]} \quad (4)$$

- **Řezná síla F** – Řezná síla při obrábění je důležitý parametr, který ovlivňuje jak kvalitu obráběného povrchu, tak i opotřebení nástroje a energetickou náročnost procesu. Je závislá na měrném řezné síle K_s a ploše řezu A , která se vypočítá jako součin hloubky řezu a_p a posuvu na otáčku f . Řezná síla může být také ovlivněna dalšími faktory, jako je geometrie nástroje, mazání, teplota a další podmínky obrábění. Pro přesnější výpočty a optimalizaci obráběcích procesů se často využívají pokročilé simulace a softwarové nástroje. [7][16][19]

$$F = K_s \cdot A \text{ [N]} \quad (5)$$

3 POČÍTAČOVÁ PODPORA A ŘÍZENÍ VE VÝROBNÍM SYSTÉMU

V současné době se mnoho firem různých velikostí zaměřuje na začleňování počítačové podpory a řízení do svých výrobních procesů. Důvodem pro tento krok je potřeba udržet si konkurenceschopnost na trhu. Klíčovými prvky pro úspěch v podnikání jsou produktivita, efektivita, přesnost a rychlost výrobních procesů, a právě tyto aspekty jsou výrazně posíleny díky využití moderních technologií, jako jsou počítačem řízené obráběcí stroje, počítačová podpora, plánování a řízení výrobního systému. [20][21]

Vývoj systémů pro počítačovou podporu ve výrobním procesu je charakterizován několika klíčovými okamžiky, kdy došlo k významným změnám jak v technologii, tak v organizační struktuře výroby. Těmito mezníky jsou:

- **1952** – zavedení strojů s numerickým řízením.
- **1960** – začátek využití číslicových počítačů pro řízení.
- **1970** – vznik konceptu CNC (Computer numerical control) a DNC (Direct numerical control) strojů.
- **1980** – implementace prvních pružných výrobních buněk, zavedení skupinové technologie a nasazení pružných výrobních systémů.
- **1990** – rozvoj integrovaných CAD/CAM (Computer aided design/Computer aided manufacturing) systémů, systémů pro plánování a řízení výrobního procesu a plné začlenění filozofie CIM (Computer integrated manufacturing). [20]

3.1 Číslicově řízené stroje

Číslicově řízené stroje, jak NC (Numerical control) tak CNC (Computer numerical control), se vyznačují tím, že jejich všechny funkce jsou řízeny speciálním programem prostřednictvím řídicího systému stroje. Informace nutné pro obrábění dílu do požadovaného tvaru a přesnosti jsou u číslicového řízení připraveny dopředu ve formě číselných hodnot. Tyto číselné hodnoty jsou zakódovány do jazyka, který je srozumitelný pro řídicí systém stroje, a jsou uloženy na nosiči informací. Tento nosič poté aktivuje a řídí silové a ovládací části stroje, což umožňuje výrobu součástí s přesně definovanými specifikacemi.

Tyto stroje jsou adaptabilní a umožňují rychlou změnu pro různé výrobní procesy, pracují automaticky pod kontrolou číslicového řízení. Nacházejí uplatnění v širokém spektru

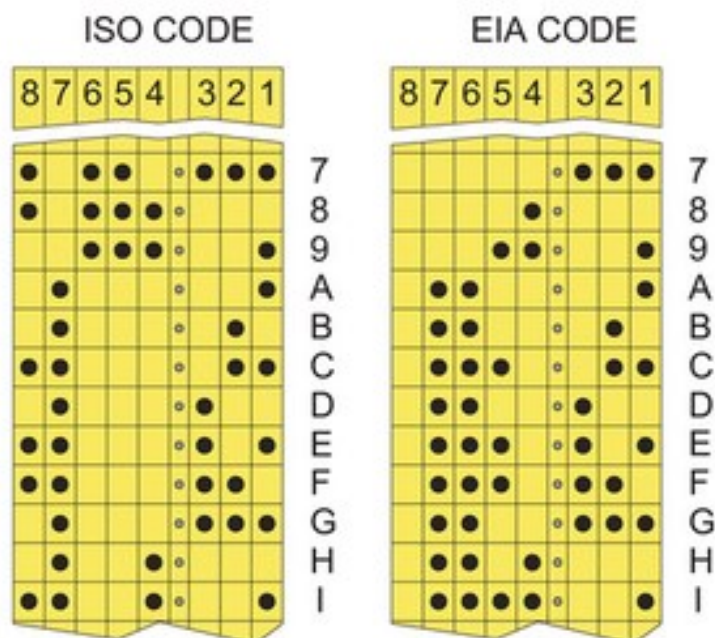
strojírenské výroby, včetně obrábění, tváření, montáže a měření, jsou však zastoupeny především soustruhy a frézky. [20][21][22]

3.1.1 NC (Numerical control)

První NC stroje byly vytvořeny v 50. letech v USA, a firma Boeing je začala používat v roce 1961. Tato technologie umožnila přejít od tradičních metod k modernějšímu a přesnějšímu způsobu výroby.

NC stroje byly řízeny číselně, což znamenalo, že jejich ovládání neprobíhalo ručně nebo pomocí fyzických šablon, ale skrze instrukce v podobě čísel a písmen. Tyto instrukce určovaly pohyb stroje a byly zadávány do systému pomocí děrných pásek. Tyto pásky obsahovaly zakódované informace, které stroj dekodoval a následně se podle nich řídil.

Zadávání programů do strojů pomocí děrných pásek představovalo značný pokrok v tehdejší době, ale také mělo svá omezení. Každá změna v programu vyžadovala vytvoření nové děrné pásky, což bylo časově náročné a méně flexibilní v porovnání s dnešními standardy. Tento proces obvykle probíhal na externím programovacím pracovišti, kde byla děrná páska vytvořena a následně vložena do stroje. Pokud došlo k nutnosti změnit program, musel být celý tento proces opakován. [20][21][22]



Obr. 20: ISO a EIA formát děrné pásky [22]

3.1.2 CNC (Computer numerical control)

CNC stroje, neboli stroje s počítačovým číslicovým řízením, které se začaly rozvíjet na počátku 70. let, představují významný technologický posun oproti starším NC strojům. Tyto moderní stroje výrazně zvýšily flexibilitu výrobních procesů a zkrátily čas potřebný k nastavení strojů, což vedlo k efektivnější práci a menšímu množství odpadu.

Rozdíl mezi CNC a jejich předchůdci, NC stroji, spočívá v integraci mikropočítačů, které jsou schopné provádět složité výpočty a řízení strojů na základě zadaných dat. Programy pro CNC stroje, které určují jejich operace a pohyby, jsou sofistikovanější a mohou být snadno modifikovány nebo aktualizovány, což umožňuje výrobcům rychle reagovat na změny ve výrobních požadavcích. V podstatě kombinace hardwaru (stroje a jeho komponenty) a softwaru (programy a operační systémy) v CNC strojích umožňuje dosáhnout vyšší úrovně automatizace a přesnosti ve výrobním procesu. [20][21][22]

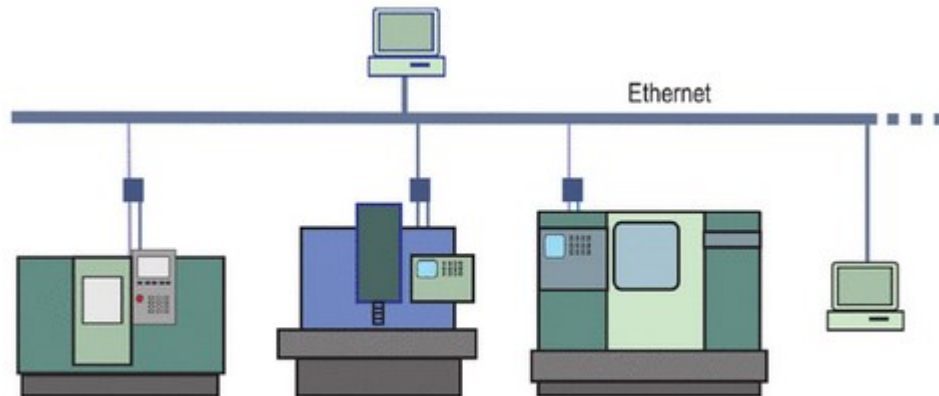
3.1.3 DNC (Distributed numerical control)

Distributed numerical control, neboli rozšířené číslicové řízení, představuje významný pokrok v automatizaci a efektivitě výrobních procesů, zejména v situacích, kde je potřeba spravovat a koordinovat mnoho CNC strojů. Tento systém umožňuje centralizované řízení a správu několika CNC strojů z jednoho hlavního počítače, což eliminuje nutnost individuálně programovat každý stroj.

DNC systémy zajišťují plynulý přenos programů, instrukcí a dat mezi centrálním počítačem a jednotlivými CNC stroji. To umožňuje rychlé nahrávání nových programů, aktualizace stávajících programů nebo odesílání specifických instrukcí strojům. Díky této centralizaci mohou výrobní zařízení efektivně reagovat na změny výrobních plánů nebo designů, rychle upravovat programy a distribuovat je mezi mnoho strojů, což významně zvyšuje efektivitu a snižuje dobu prostojů.

Kromě efektivit v programování a distribuci, DNC systémy také umožňují sledování výkonu a stavu každého stroje. To zahrnuje monitorování výrobních časů, identifikaci a diagnostiku potenciálních problémů a plánování preventivní údržby. Tyto schopnosti nejen zvyšují efektivitu výrobních procesů, ale také pomáhají předcházet nákladným výpadkům a zvyšují celkovou spolehlivost strojů.

Celkově DNC přináší značnou úsporu času a nákladů ve výrobním prostředí, poskytuje větší flexibilitu a kontrolu nad výrobními procesy a je klíčovou součástí moderních automatizovaných výrobních systémů. [21]



Obr. 21: Příklad systému DNC [21]

3.2 NC program

NC program je soubor instrukcí používaný k řízení obráběcího stroje, jako je soustruh, frézka, nebo jiný stroj využívaný ve výrobním procesu. Tyto programy řídí stroje tak, aby automaticky vykonávaly specifické obráběcí operace podle předem definovaných pokynů.

NC programy jsou typicky napsány ve speciálním programovacím jazyce, jako je G-kód (ISO kód), kterému stroje přímo rozumí. Tento kód specifikuje pohyby a operace stroje, jako jsou dráhy nástroje, rychlosti řezání, posuvy a další parametry. Programy mohou být vytvářeny ručně programátory, nebo generovány automaticky pomocí specializovaného softwaru CAD/CAM (počítačem podporovaný design/výroba).

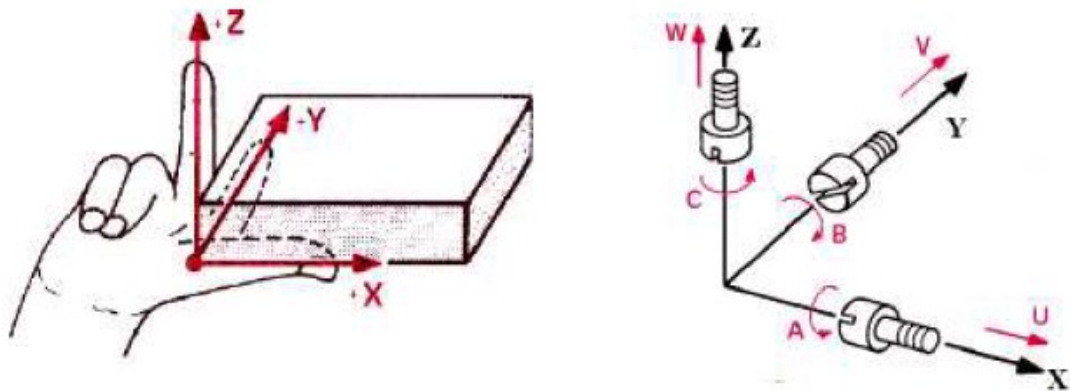
NC programy umožňují vysoce přesné a opakovatelné obrábění dílů, což je klíčové pro moderní výrobní procesy. Díky NC programování je možné vyrábět složité a přesné součásti, které by bylo obtížné nebo nemožné vyrobit ručními metodami.

3.2.1 Struktura bloku a slova NC programu

V rámci programování číslicově řízených strojů se rozlišují tři základní kategorie informací:

- **Geometrické informace** – tyto údaje specifikují rozměry a tvary, které má součást dosáhnout, a definují cestu, po které se nástroj pohybuje ve vztahu k obrobku. Tato kategorie zahrnuje například informace o velikosti, tvarech a rozměrech obrobené

součásti. Jsou definovány v kartézských souřadnicích, přičemž pro soustruhy jsou to osy X a Z, pro frézky X, Y a Z (a další osy v závislosti na konstrukci stroje).

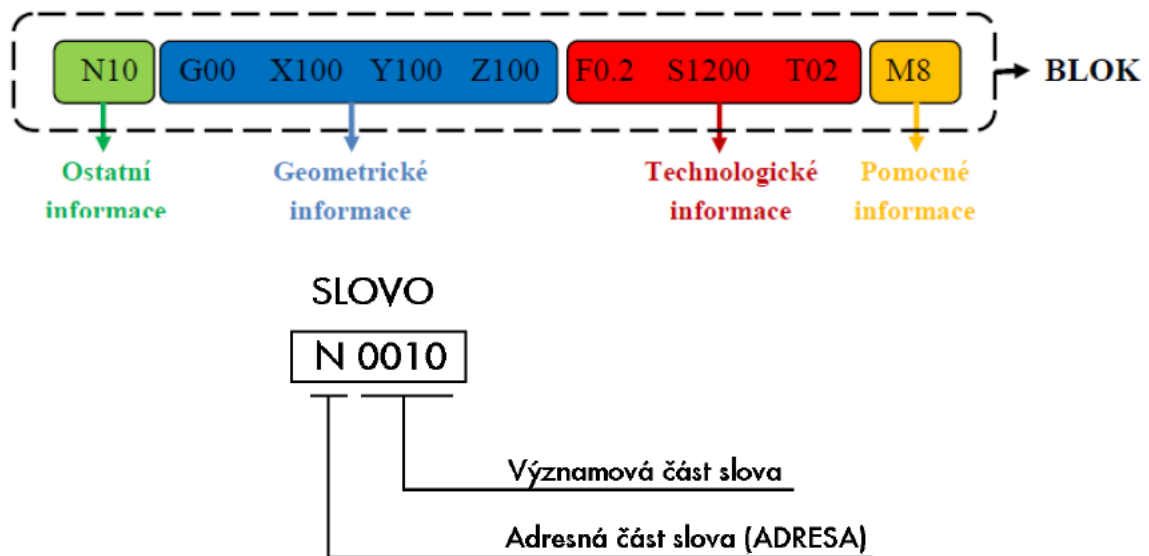


Obr. 22: Definování kartézských souřadnic – pravotočivá soustava [23]

- **Technologické informace** – tato kategorie se týká řídicích funkcí, které obráběcí stroj musí provádět během různých fází výrobního procesu. Zahrnuje instrukce jako nastavení rychlosti řezání, volbu nástroje, nebo sekvenci operací.
- **Pomocné informace** – zde spadají údaje o různých pomocných funkcích, jako je zapnutí chladicí kapaliny nebo nastavení otáček stroje. Tyto informace jsou zásadní pro správné fungování stroje a zajištění kvality výrobního procesu. [20][21][22][23]

Každá část programu, známá jako blok nebo věta, se skládá z jednotlivých slov, která reprezentují specifické příkazy. Slovo v tomto kontextu obsahuje adresu, která určuje cíl informace, a číselnou hodnotu, která definuje konkrétní parametr nebo nastavení. Tyto slova mohou být buď rozměrová nebo bezrozměrová:

- **Rozměrová slova** – tato slova obsahují fyzikální veličiny a jsou používána k určení konkrétních hodnot, jako je například poloha v určité ose, rychlost otáček vřetena nebo velikost posuvu.
- **Bezrozměrová slova** – tato slova se dělí na přípravné a pomocné funkce. Přípravné funkce specifikují, jakým způsobem bude pohyb stroje proveden, zatímco pomocné funkce aktivují určité akce stroje, jako je například zahájení otáček. [20]



Obr. 23: Struktura bloku a slova NC programu [20]

Maximální velikost bloku v NC programování, definující množství informací, které může jeden blok obsahovat, se určuje na základě formátu bloku. Tento formát může být rozdělen podle délky bloku do dvou hlavních kategorií:

- **Formát s konstantní (pevnou) délkou bloku** – v tomto formátu má každé slovo v bloku přesně určenou pozici. To platí i v případech, kdy se určitá funkce v daném bloku nevyskytuje nebo pokud je stejná jako ve předchozím bloku. Tento formát zajišťuje pevnou a předvídatelnou strukturu, ale může vést k zbytečnému opakování informací nebo zahrnutí prázdných míst pro nevyužité funkce
- **Formát s proměnnou délkou bloku** – na rozdíl od formátu s pevnou délkou umožňuje formát s proměnnou délkou vynechat slova, která se v daném bloku nevyskytují nebo pokud jsou stejná jako ve předchozím bloku. Tento přístup umožňuje kompaktnější a efektivnější zápis programu, protože neobsahuje zbytečné informace.

Oba formáty mají své výhody a nevýhody a výběr mezi nimi závisí na specifických potřebách výrobního procesu a preferencích uživatele. Formát s konstantní délkou je přehlednější a může usnadňovat čtení a analýzu programu, zatímco formát s proměnnou délkou je efektivnější v případě, že program obsahuje mnoho opakujících se nebo nepoužitých funkcí. [20]

N10 G00 X40 Y100 Z2 F50 N20 G00 X45 Y100 Z2 F150	N10 G00 X40 Y100 Z2 F50 N20 X45 F150
Formát bloku s pevnou délkou	Formát bloku s proměnnou délkou

Obr. 24: Příklad formátů bloku [20]

3.2.2 Význam nejpoužívanějších adres

V NC programování se adresy, označené velkými písmeny, používají k identifikaci různých příkazů a funkcí stroje. Ačkoliv existují obecné normy pro tyto adresy, je důležité si uvědomit, že každý výrobce řídicího systému může mít odlišné specifikace. Proto je při ručním programování CNC stroje klíčové seznámit se s manuálem daného systému, zejména s formátem a aplikací G a M funkcí, které se mohou lišit v závislosti na výrobci. [20]

Tab. 2: Označení a význam nejpoužívanějších adres [20]

Písmeno	Význam
N	Číslo bloku
X, Y, Z	Základní osy souřadného systému (souřadnice v osách X, Y, Z)
A, B, C	Rotace kolem základních os
U, V, W	Paralelní pohyb se základními osami
G	Přípravné funkce – geometrické
M	Pomocné funkce (přípravné), spouštějí činnost strojních mechanismů (zapnutí a vypnutí otáček, řezné kapaliny)
F	Rychlost posuvu (udává se v mm/ot nebo v mm/min nebo v mm/zub)
S	Otáčky vřetene nebo hodnota konstantní řezné rychlosti (záleží na systému)
T	Volba nástroje
R	Hodnota rádiusu nebo polární souřadnice

3.3 Počítačová podpora výroby

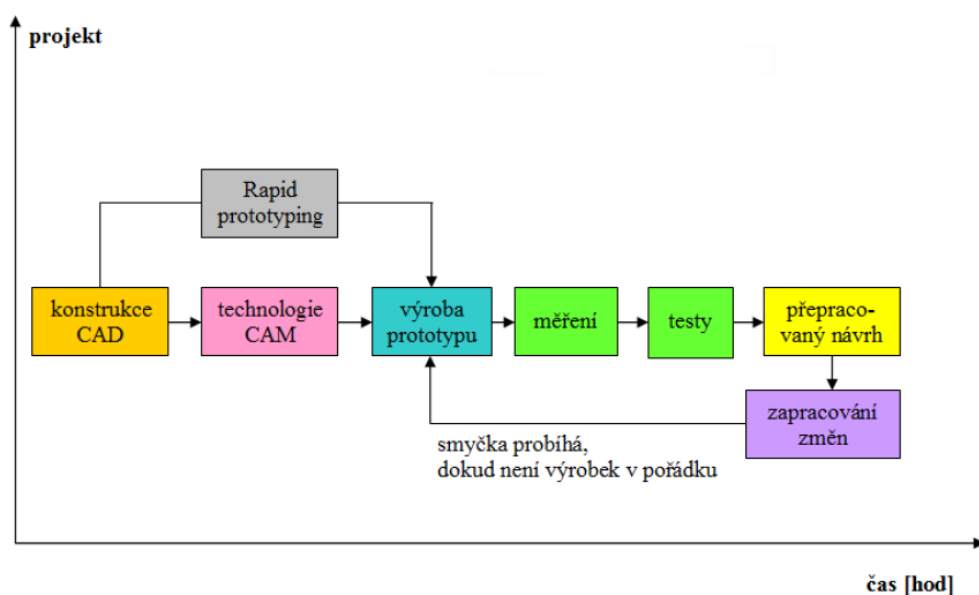
V dnešním konkurenčním prostředí jsou konstruktéři a technologové nuceni neustále vyvíjet nové řešení a čelit různým výzvám, jako jsou snižování výrobních časů, zlepšování kvality a flexibilní přizpůsobení výrobního procesu. Klíčovou roli v řešení těchto problémů hrají

integrované počítačově podporované výrobní systémy (CIM), řízení životního cyklu výrobku (PLM) a související CAD/CAM technologie. Účinné využití CNC strojů vyžaduje nejen jejich nasazení, ale také kvalifikovanou obsluhu a technologa-programátora schopného připravit efektivní programy. Při výběru CAD/CAM systému je důležité zvolit takový, který je intuitivní a uživatelsky přívětivý, což usnadňuje zaškolování zaměstnanců. CAD/CAM systémy jsou dnes široce využívány nejen v specializované, ale i v běžné strojírenské výrobě a vývojáři softwaru se snaží jejich použití maximálně zjednodušit pro široké spektrum aplikací. [20][21][24]

3.3.1 Struktura výroby v CAD/CAM systémech

Při programování s využitím CAD/CAM systémů se tyto technologie nejčastěji uplatňují ve výrobě složitých součástí, kde je ruční programování obtížné, časově náročné nebo neefektivní, zejména pokud je třeba vyrábět větší množství kusů. Rozhodnutí o využití automatického programování závisí na mnoha faktorech, včetně ekonomických a technických možností firmy, dostupnosti odborně kvalifikovaného personálu a dlouhodobých strategických cílech podniku.

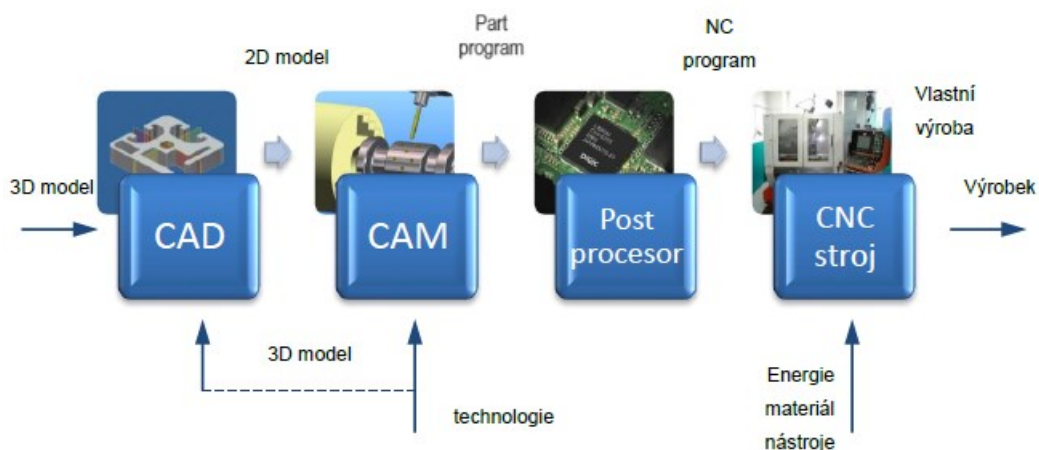
Proces vývoje výrobku s použitím CAD/CAM systémů lze zobrazit jako iterativní smyčku, která začíná výrobou prototypu a pokračuje přepracováním návrhu až do dosažení optimálního stavu produktu. Tento postup umožňuje postupné vylepšování a testování výrobku, což zajišťuje jeho kvalitu a funkčnost před spuštěním finální výroby.



Obr. 25: Proces vývoje výrobku při použití CAD/CAM systémů [24]

Produkty s charakteristikami CAD/CAM systémů umožňují efektivně simulovat celý sled technologických operací potřebných pro výrobu součástí. Díky těmto systémům lze předem vizualizovat a testovat práci jednotlivých nástrojů v různých technologiích obrábění, jako je 5osé frézování, 3osé frézování, soustružení, včetně soustružení s poháněnými nástroji, vrtání, elektroerosivní obrábění, obrábění laserem nebo vodním paprskem a další. Tato simulace umožňuje prověřit a odzkoušet bezpečný a efektivní průběh výroby před samotným zahájením, což minimalizuje riziko chyb. Na základě úspěšné simulace je pak generován program pro řízení NC a CNC strojů.

Výrobní proces součástí v rámci CAD/CAM systémů lze chápat jako soubor činností, které se odehrávají v různých fázích výrobního procesu, od počátečního návrhu až po finální výrobu hotového výrobku. [20][21][24]



Obr. 26: Hierarchie výroby součástí pomocí CAD/CAM systémů [20]

3.3.2 CAD (Computer aided design)

CAD je počítačový software pro konstrukční návrh a modelování. Umožňuje vytvářet a zobrazovat 3D modely nových součástí, přičemž všechny geometrické informace jsou uloženy v databázi. Tento proces umožňuje efektivní a přesné plánování designu výrobků, respektující rozměrové a další specifikace součástí. CAD je základem pro další fáze vývoje a inženýrství nových produktů. [20][21][24]

3.3.3 CAM (Computer aided manufacturing)

CAM je počítačem podporovaná výroba, která slouží k přípravě dat a programů pro automatizované řízení strojů jako jsou CNC a NC stroje. Tento systém využívá informace získané z CAD systému, zejména geometrické údaje součástí, pro plánování a simulaci výrobních procesů. CAM umožňuje simulovat různé technologické operace jako frézování, soustružení nebo vrtání a po úspěšném testování generuje programy pro řízení výrobních strojů. CAM také zahrnuje sběr dat o stavu výroby a podporuje integraci s dalšími automatizovanými systémy, jako jsou dopravníky nebo sklady. Výsledkem práce CAM modulu je partprogram, který řídí výrobní procesy. [20][21][24]

3.3.4 Partprogram

Partprogram je výstupní program vytvořený CAM modulem pro konkrétní výrobu součástí. Obsahuje sérii příkazů a adres, které definují geometrii a technologický postup obrábění součástí. Tyto informace jsou poté upraveny postprocesorem pro specifický obráběcí stroj. Při vytváření partprogramu se bere v úvahu několik klíčových faktorů, jako jsou:

- **Geometrie stroje** – zahrnuje souřadnicový systém, orientaci os a referenční body.
- **Geometrie polotovaru** – zahrnuje umístění a potenciální kolize obrobku.
- **Geometrie nástroje** – zahrnuje rozměry a tvar nástroje a korekce pro dráhu nástroje.
- **Geometrie finálního obrobku** – definovaná výkresem nebo modelem součástí.
- **Technologické a řezné podmínky** – jako řezná rychlost, posuv, hloubka řezu atd.
- **Další podmínky** – jako pozice nástrojů a další nutné korekce pro správnou funkci stroje. [20][21][24]

3.3.5 Postprocesor

Postprocesor upravuje data z CAM systému tak, aby odpovídala specifikacím konkrétního NC stroje a jeho řídicího systému. Tato úprava zahrnuje přizpůsobení pracovních možností stroje, nastavení polohy nástrojů a transformaci drah nástrojů do souřadného systému stroje. Také určuje otáčky vřetena a rychlosti posuvu, a vytváří výstupní řídicí program v potřebném kódu a formátu pro CNC stroj. [20][21][24]

3.3.6 CIM (Computer integrated manufacturing)

System výroby integrované počítačem představuje komplexní řízení celého výrobního procesu podniku s využitím počítačových technologií v každé fázi. Jeho úlohou je integrovat různé moduly jako například CAD (počítačem podporovaný design) a CAM (počítačem podporovaná výroba), a zajišťovat efektivní tok informací od počáteční koncepce produktu až po jeho finální dodání. Tento systém aplikuje informační technologie na všechny aspekty výroby a inženýrství, což zahrnuje procesy od návrhu produktu až po jeho distribuci. [20][24]



Obr. 27: Schéma výroby integrované počítačem [20]

3.3.7 PLM (Product lifecycle management)

Product lifecycle management (řízení životního cyklu produktu), je komplexní systém, který umožňuje efektivní správu všech aspektů životního cyklu produktu od jeho návrhu a vývoje, výrobu, provoz, až po jeho vyřazení a likvidaci. PLM slouží k centralizovanému řízení informací, procesů a zdrojů spojených s výrobou a životním cyklem produktu. V jeho jádru jsou různé komponenty a moduly, které spolupracují na zajištění integrovaného a efektivního řízení produktů. Základní schéma systému PLM je zobrazeno na Obr. 28.

K základním klíčovým aspektům PLM systému patří:

- **Návrh** (CAD – Computer aided design) – PLM začíná s návrhem produktu. CAD modul umožňuje inženýrům vytvářet 2D a 3D modely produktů, provádět simulace a optimalizace.
- **ERP** (Enterprise resource planning) – Plánování podnikových zdrojů je další klíčovou součástí PLM. Pomáhá spravovat interní procesy podniku, jako jsou finance, lidské zdroje, skladování, a další. Integrace ERP s PLM zajišťuje, že informace o vývoji produktu jsou synchronizovány s obchodními procesy a účetnictvím.
- **CRM** (Customer relationship management) – CRM modul v PLM se zaměřuje na správu vztahů se zákazníky. Zahrnuje informace o zákaznících, jejich potřebách a zpětné vazbě, což může být důležité pro další vývoj produktů.
- **HCM** (Human capital management) – Tato část PLM je zaměřena na lidské zdroje. Sleduje dovednosti, školení a zapojení zaměstnanců, aby bylo možné efektivněji řídit týmy pracující na vývoji produktů.
- **SCM** (Supply chain management) – SCM modul se stará o řízení dodavatelského řetězce. Zajišťuje efektivní a správné dodávky materiálů a komponent, což je klíčové pro bezproblémový průběh výroby.

Celkově řečeno, PLM nenahrazuje ERP, CAD, CRM, HCM ani SCM. Naopak, integruje tyto systémy do jednoho celku, což umožňuje účinnou spolupráci a sdílení informací mezi různými odděleními a funkcemi ve firmě. Tímto způsobem PLM poskytuje komplexní pohled na celý životní cyklus produktu a zvyšuje efektivitu a konkurenceschopnost strojírenské firmy. [25][26]



Obr. 28: Základní schéma PLM [27]

4 OPTIMALIZACE VÝROBNÍCH PROCESŮ

Optimalizace výrobních procesů je v dnešní době klíčová z několika důvodů, které se týkají efektivity, konkurenceschopnosti a udržitelnosti:

- **Zvyšování efektivity** – optimalizace umožňuje firmám maximalizovat využití svých zdrojů, minimalizovat odpad a snížit dobu potřebnou k výrobě. To vede k snížení nákladů a zvýšení produktivity.
- **Konkurenceschopnost** – v dnešním rychle se měnícím a vysoce konkurenčním tržním prostředí je schopnost rychle reagovat na tržní změny a přizpůsobit výrobní procesy klíčem k udržení a zlepšení pozice na trhu.
- **Kvalita a spolehlivost** – optimalizací procesů lze dosáhnout konzistentnější kvality výrobků, což vede k lepší spokojenosti zákazníků a nižší míře reklamací. To je zásadní pro udržení dobré pověsti značky.
- **Flexibilita a škálovatelnost** – schopnost rychle a efektivně přizpůsobit výrobní procesy novým produktům nebo změnám v poptávce je nezbytná pro růst podniku a využití nových příležitostí.
- **Udržitelnost a ekologická stopa** – stále více firem si uvědomuje význam snižování svého dopadu na životní prostředí. Optimalizace výrobních procesů může výrazně přispět k efektivnějšímu využití zdrojů, snižování emisí a odpadu, což podporuje udržitelný rozvoj.
- **Technologický pokrok** – integrace nových technologií, jako jsou automatizace, robotika a digitální technologie (např. Průmysl 4.0), do výrobních procesů umožňuje firmám zůstat na špičce inovací, zlepšovat procesy a snižovat chyby.
- **Dodržování předpisů** – v mnoha odvětvích jsou přísné regulace týkající se výroby, bezpečnosti a životního prostředí. Optimalizace pomáhá firmám lépe splňovat tyto normy a zároveň snižovat náklady spojené s jejich dodržováním.

Z těchto důvodů je optimalizace výrobních procesů nejen nutná, ale také přínosná pro moderní podniky, které chtějí být efektivní, inovativní, odpovědné vůči společnosti a životnímu prostředí.

Zásadní prvky při plánování výroby zahrnují kromě zvažování technologických procesů i provádění ekonomických hodnocení a kalkulací. Jejich úkolem je minimalizovat spotřebu

materiálů, práci a energii, což vede k redukci výrobních nákladů. Při vyhodnocování efektivity obráběcího procesu se jako nejvýznamnější ukazatel používá kritérium nejnižších výrobních nákladů. [28][29][30][31]

4.1 Nejdůležitější výpočty pro určení potřebných nákladů pro výrobu dílů

Pro určení potřebných nákladů pro výrobu dílů je důležité provést několik klíčových výpočtů, které pomohou lépe porozumět celkovým nákladům spojeným s výrobním procesem. Pro každý z těchto výpočtů je důležité získat co nejpresnější data a informace, aby bylo možné správně odhadnout celkové náklady na výrobu.

4.1.1 Náklady na výrobní prostředky vznesené na jednu součást N_{VP}

Klíčovým faktorem pro určení výrobních nákladů je stanovení celkové doby, která je nezbytná pro výrobu jednotlivého dílu. Tuto dobu označujeme jako čas celkový t_c .

$$t_c = t_h + t_v + \frac{t_b}{Q} \text{ [min]} \quad (6)$$

Kde:

t_h – **čas hlavní** – doba, během které pracovník nebo výrobní zařízení provádí operaci.

t_v – **čas vedlejší** – je nezbytný pro zajištění manipulačních operací spojených s hlavním časem, jako je například příjezd, odjez a výměna nástrojů, upnutí zpracovávané součásti, měření během operace atd.

t_b – **čas dávkový** – obsahuje nezbytný čas pro provedení přípravných a závěrečných úkonů při výrobním procesu, jako je vyzvednutí a vrácení speciálních nástrojů a přípravků, nastavení stroje a osazení nástroji, seřízení stroje pro konkrétní výrobní dávku, včetně nahrání NC programu a podobně.

Q – **velikost výrobní dávky** [32][33]

Příklady výpočtu hlavního času dle různých výrobních technologií ukazuje Obr. 29.

Č.ř.	Skupina	Technologie	Operace	L Délka dráhy	v_i Tlog. rychlost	t_h Čas hlavní		
1	Obrábění	Broušení	Rovinné čelem kotouče	$L = l_h + 2 \cdot D_n$	$v_c = \pi \cdot D_n \cdot n$	$t_h = \frac{2 \cdot i \cdot L}{v_f}$		
2			Rovinné obvodem kotouče	$L = l_h + 2 \cdot B_n$				
3			Válcové					
4		Frézování	Čelní	$L = \left(\frac{D_n}{2} - \sqrt{\frac{D_n^2}{4} - \frac{B^2}{4} - BC - C^2} \right) + l_h + l_v$				
5			Čelně-válcové					
6			Válcové			$L = \frac{\sqrt{D_n^2 \cdot a_p^2 - a_p^2}}{4} + l_h + l_v$		
7		Vrtání		$L = l_n + l_h + l_v$		$v_c = \pi \cdot D \cdot n$	$t_h = \frac{i \cdot L}{v_f} = \frac{i \cdot L}{n \cdot f}$	
8		Soustružení	Podélné					
9			Čelní (Příčné) / Upichování / Zapichování Konstantní otáčky	$L = l_n + \left(\frac{D}{2} - \frac{d}{2} \right) + l_v$				
10			Čelní (Příčné) / Upichování / Zapichování Konstantní rychlost	$L = \frac{\pi}{f} \cdot \left[\frac{(D + l_n)^2 - (D - l_v)^2}{4} \right]$		$v_c = konst.$	$t_h = \frac{i \cdot L}{v_c}$	
11			Hoblování a Obrážení			$v_m = 2 \cdot \frac{v_c \cdot v_v}{v_c + v_v}$	$t_h = \frac{B}{v_f} = \frac{2 \cdot L}{v_m}$	
12		Dělení	Dělení / Rezáni	Laser / Plasma / Kyslík-plyn / ...		$L = l_n + l_h + l_v$	$v_f = konst.$	$t_h = \frac{L}{v_f}$
13		Svařování	Svařování (houseskou - v podélném směru)					$t_h = \frac{i \cdot L}{v_f}$

Obr. 29: Příklady výpočtu hlavního času pro různé výrobní technologie [19]

Sečtením času hlavního a vedlejšího na čas jednicový t_a lze dosáhnout zjednodušení výpočtu:

$$t_c = t_a + \frac{t_b}{Q} \text{ [min]} \quad (7)$$

Jednicový a dávkový čas lze také stanovit pomocí moderních normovacích softwarů jako je NORTNS, PO-NOR-KA, TPV výpočty a další.

Pro vyhodnocení výrobních nákladů na jednu součást je nutné dále započíst náklady na práci stroje N_{ST} [Kč·h⁻¹] a personál N_{PE} [Kč·h⁻¹] a další nepřímé náklady N_n [Kč·h⁻¹], jako je například energie pro provoz zařízení, osvětlení, topení a jiné.

$$N_{VP} = N_{ST} \cdot \frac{t_c}{60} + N_{PE} \cdot \frac{t_c}{60} + N_n \cdot \frac{t_c}{60} \text{ [Kč]} \quad (8)$$

Běžně se náklady na stroj a personál počítají jako celkové náklady na pracoviště N_{PR} [Kč·h⁻¹], které obvykle zahrnují i další nepřímé náklady (např. amortizace stroje, náklady na energii), což umožňuje zjednodušit výpočet následovně:

$$N_{VP} = N_{PR} \cdot \frac{t_c}{60} \text{ [Kč]} \quad (9)$$

[32][33]

4.1.2 Náklady na seřízení jedné výrobní dávky N_s

Tyto náklady lze vypočíst pomocí dávkového času a nákladů na pracoviště:

$$N_s = N_{PR} \cdot \frac{t_b}{60} \text{ [Kč]} \quad (10)$$

[32][33]

4.1.3 Přímé náklady na výrobu jednoho kusu N_{VN}

Pro výpočet přímých nákladů je nutné znát jednicový čas a náklady na pracoviště:

$$N_{VN} = N_{PR} \cdot \frac{t_a}{60} \text{ [Kč]} \quad (11)$$

[32][33]

4.1.4 Celkové výrobní náklady N_{CV}

Na základě přímých nákladů, nákladů na seřízení a velikosti dávky lze pak vypočíst celkové náklady na výrobu jednoho kusu v dávce:

$$N_{CV} = N_{VN} + \frac{N_S}{Q} \text{ [Kč]} \quad (12)$$

[32][33]

4.1.5 Náklady na materiál N_M

Náklady na materiál představují cenu surovin potřebných pro výrobu polotovaru výrobku.

$$N_M = m \cdot n_m \text{ [Kč]} \quad (13)$$

kde:

m – hmotnost polotovaru [kg]

n_m – náklady na pořízení materiálu [Kč·kg⁻¹]

[32]

4.1.6 Náklady na speciální nářadí N_{SP}

Zahrnuje náklady na speciální nástroje, nářadí, přípravky, vybavení stroje a jiné, pouze pro výrobu konkrétního výrobku, vtažené na jeden vyrobený kus.

$$N_{SP} = \frac{n_s}{Q} \text{ [Kč]} \quad (14)$$

Kde:

n_s – celkové náklady na pořízení speciálního nářadí [Kč] [32]

4.2 Optimální velikost výrobní dávky

Optimální velikost výrobní dávky (také známá jako EOQ, Economic Order Quantity) je kritickým faktorem pro maximalizaci efektivity výrobních a logistických procesů. Tento koncept pomáhá najít rovnováhu mezi náklady na držení zásob a náklady na objednávku, minimalizovat celkové náklady spojené s výrobou a skladováním. Výpočet EOQ vychází z několika klíčových parametrů:

- **Roční dávka** – celkové množství jednotek produktu, které se očekává, že bude potřeba během roku.
- **Náklady na jednu objednávku** – náklady spojené na uskutečnění jedné objednávky nebo nastavení výrobní dávky, nezávisle na velikosti dávky.

- **Náklady na držení jedné jednotky zboží na skladě za rok** – náklady spojené s udržováním jedné jednotky produktu na skladě, včetně nákladů na skladování, pojištění a znehodnocení. [29][30][31]

4.2.1 Celkové náklady na výrobní dávku N_{CD}

Celkové náklady na výrobní dávku lze vypočítat jako sumu provozních nákladů a nákladů spojených se seřizováním.

$$N_{CD} = N_{PD} + N_{SD} \text{ [Kč]} \quad (15)$$

Kde:

N_{PD} – provozní náklady (přímé výrobní náklady, skladování apod.)

N_{SD} – náklady na seřízení [29][30][31][32]

4.2.2 Provozní náklady na výrobní dávku N_{PD}

Provozní náklady se vypočítávají podle následujícího postupu:

$$N_{PD} = \frac{n_{sd} \cdot N_{VN} \cdot Q}{2} \text{ [Kč]} \quad (16)$$

Kde:

n_{sd} – roční náklady na skladování z ceny nákladů na jednu součást [%]

N_{VN} – přímé výrobní náklady na součást

Q – počet součástí v dávce [29][30][31][32]

4.2.3 Náklady na seřízení N_{SD}

Pro výpočet nákladů na seřízení je možné postupovat následovně:

$$N_{SD} = N_S \cdot \frac{Q_R}{Q} \text{ [Kč]} \quad (17)$$

Kde:

N_S – náklady na seřízení jedné výrobní dávky (na přípravu a zakončení dávky)

Q_R – počet všech vyrobených součástí za rok

Q – počet součástí v dávce [29][30][31][32]

4.2.4 Výpočet optimální výrobní dávky

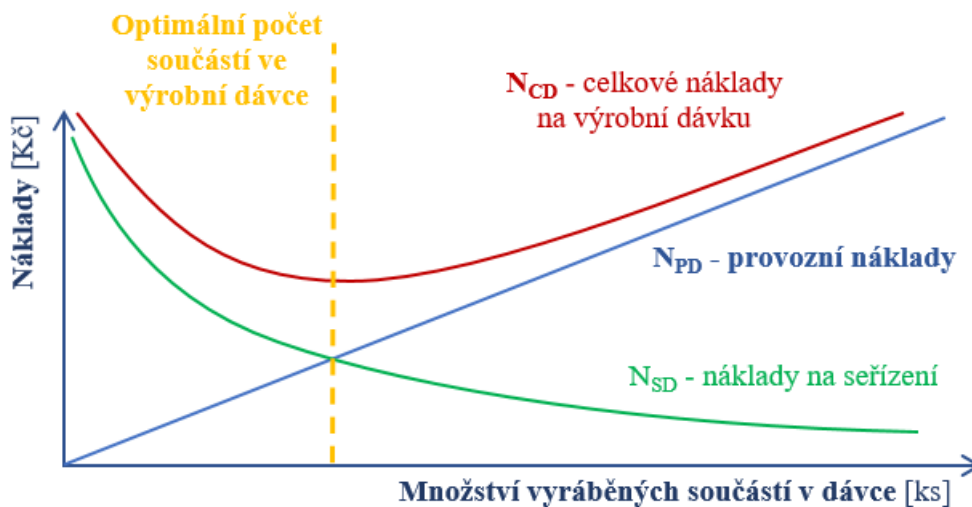
Pro výpočet optimální výrobní dávky je nutné znát celkové náklady na výrobní dávku a poté nalézt jejich minimum. Po dosazení do rovnice č. (15):

$$N_{CD} = \frac{n_{sd} \cdot N_{VN} \cdot Q}{2} + N_S \cdot \frac{Q_R}{Q} \text{ [Kč]} \quad (18)$$

Postavením derivace (podle Q) tohoto vztahu rovno nule a po úpravě dostáváme:

$$Q = \sqrt{\frac{2 \cdot Q_R \cdot N_S}{n_{sd} \cdot N_{VN}}} \text{ [ks]} \quad (19)$$

Tento vztah určuje optimální velikost výrobní dávky z ekonomického hlediska. Počet součástek Q_D je nutné zaokrouhlit na celé číslo. Toto zaokrouhlení by mělo zohledňovat i technické podmínky výroby – např. využití kapacity pece pro tepelné zpracování či vstřikovacího lisu, počet pozic na speciální paletě apod. [29][30][31][32]



Obr. 30: Grafické znázornění způsobu určení optimální výrobní dávky z ekonomického hlediska [32]

Výroba dle optimální dávky přináší s sebou i určitá rizika. Jedním z nich je zvýšené množství kapitálu vázaného ve zvýšených zásobách, což může negativně ovlivnit likviditu firmy. Dalším rizikem je potenciální zastarání nebo poškození zboží skladovaného po delší dobu, což vede k dalším nákladům. Také je třeba brát v úvahu riziko proměnlivé poptávky, která může vést k situaci, kdy firma vyrábí více, než je schopna prodat. Správné vyvážení mezi

těmito faktory je klíčové pro dosažení nejen úspor nákladů, ale i celkové efektivity a konkurenceschopnosti na trhu. [29][30][31][32]

4.3 Výběr optimálního výrobního postupu

Výběr optimálního výrobního postupu je zásadní pro zajištění efektivní, ekonomické a kvalitní výroby. Tento proces vyžaduje komplexní technicko-ekonomické zhodnocení, které zahrnuje několik klíčových kroků:

1. Návrh výroby polotovarů:

- **Analýza výrobku** – důkladné prozkoumání výkresů a specifikací pro pochopení požadovaných vlastností a funkcí finálního produktu.
- **Výběr materiálu** – určení vhodného materiálu pro polotovary na základě jejich mechanických vlastností, dostupnosti a ceny.
- **Určení typu polotovarů** – rozhodnutí, zda je výhodnější použít standardní polotovary nebo je nutné vyvinout polotovary speciálně upravené pro daný výrobek.

2. Stanovení pořadí a počtu operací:

- **Rozbor výrobních procesů** – identifikace všech nezbytných výrobních operací a jejich logické sekvence pro transformaci polotovaru na finální produkt.
- **Optimalizace počtu operací** – snaha o minimalizaci počtu operací s cílem zefektivnit výrobu a snížit náklady, aniž by byla ohrožena kvalita produktu.

3. Volba strojů a jejich vybavení:

- **Identifikace požadavků na zařízení** – určení typů strojů a vybavení potřebných pro realizaci jednotlivých výrobních operací.
- **Volba specifických strojů** – výběr strojů na základě jejich výkonu, přesnosti, spolehlivosti a kompatibility s výrobním procesem.

4. Stanovení pracovních podmínek pro jednotlivé pracovní úseky:

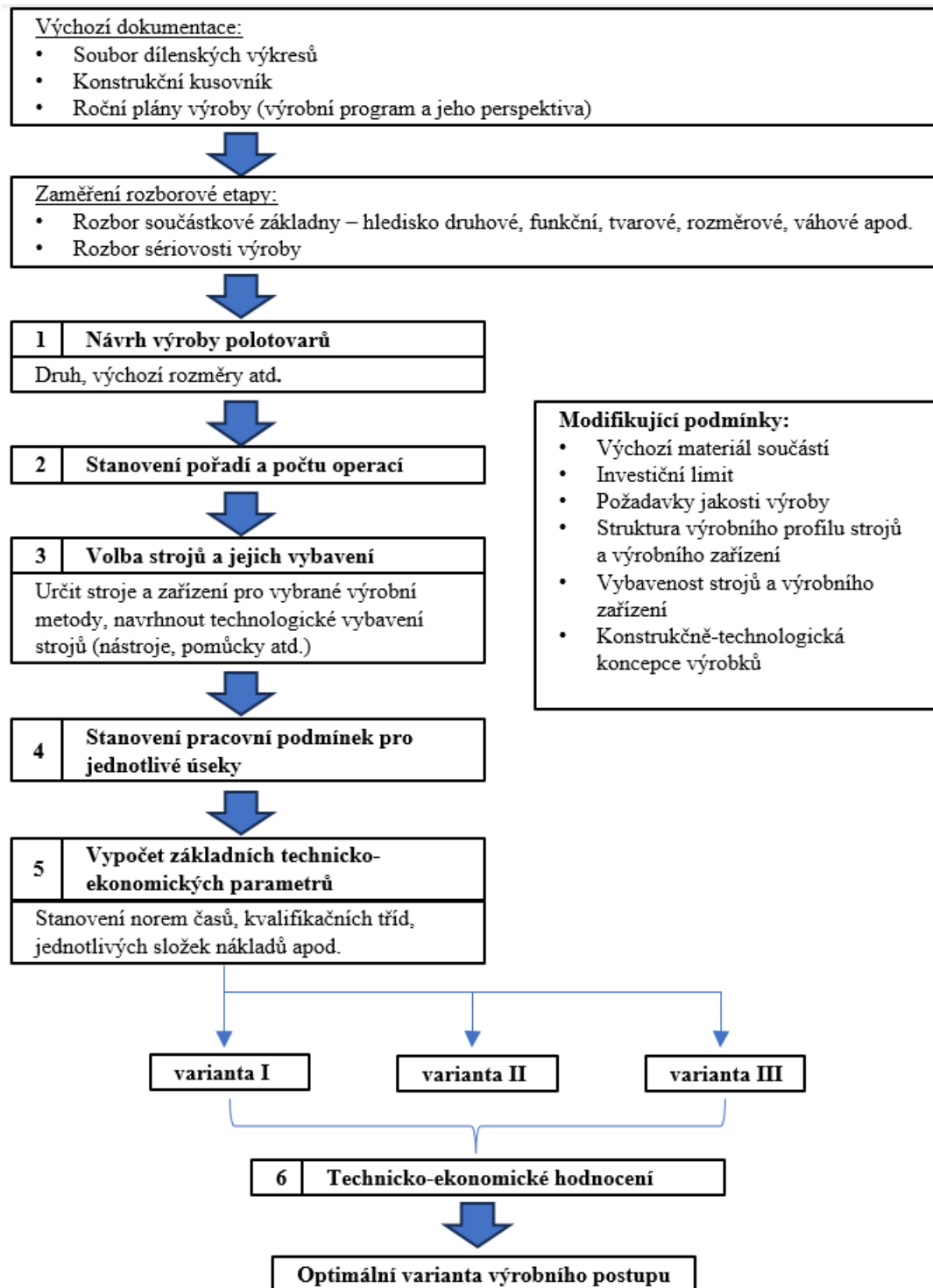
- **Určení pracovních postupů** – vypracování detailních pracovních instrukcí pro operátory, včetně nastavení strojů, požadavků na kvalitu a bezpečnostních předpisů.
- **Organizace pracovního prostředí** – zajištění ergonomických a bezpečných pracovních podmínek pro zvýšení efektivity a snížení rizika pracovních úrazů.

5. Výpočet základních technicko-ekonomických parametrů:

- **Analýza nákladů** – výpočet přímých a nepřímých výrobních nákladů, včetně materiálu, práce, amortizace zařízení a energie.
- **Výkonnostní ukazatele** – určení produkční kapacity, času cyklu, využití zařízení a efektivity práce.

6. Technicko-ekonomické zhodnocení:

- **Srovnání variant** – porovnání různých výrobních postupů na základě vypočítaných technických a ekonomických parametrů.
- **Hodnocení návratnosti investic** – analýza doby návratnosti investic do nových technologií a zařízení.
- **Výběr nejvhodnějšího výrobního postupu** – výběr výrobního postupu, který optimalizuje náklady a zároveň splňuje všechny technické a kvalitativní požadavky.
[29][30][32][33]



Obr. 31: Rámcové schéma výběru optimálního výrobního postupu [33]

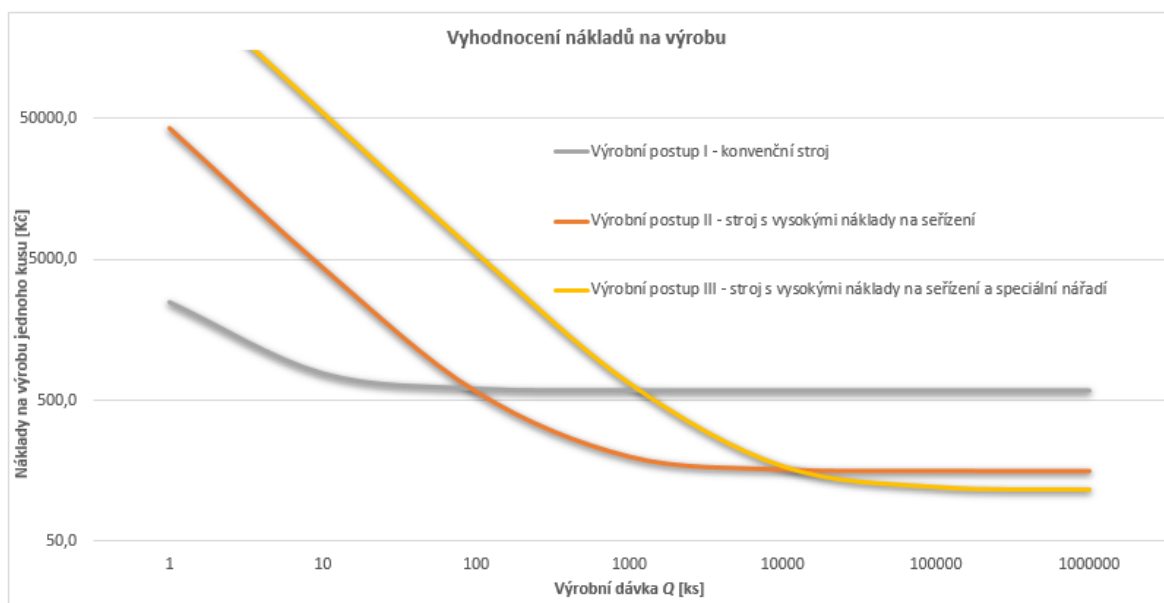
Pro adekvátní výběr nejlepšího výrobního procesu na základě technicko-ekonomického zhodnocení je klíčové určit celkové výrobní náklady na jeden vyrobený kus pro každou variantu výrobního postupu, které lze určit pomocí následujícího výpočtu:

$$N_C = N_M + N_{CV} + N_{SP} \text{ [Kč]} \quad (20)$$

Po dosažení:

$$N_C = m \cdot n_m + N_{VN} + \frac{N_S}{Q} + \frac{n_{sp}}{Q} \text{ [Kč]} \quad (21)$$

Pro správný výpočet nákladů je tedy nutné znát nejen veškeré přímé i nepřímé náklady, ale také celkovou výrobní dávku, která je pro výpočet přímo zásadní. Jak ukazuje příklad na Obr. 32, může se výběr optimálního postupu lišit při různých objemech výrobních dávek. Např. výrobní postup I s konvenčním strojem, který má nízké seřizovací časy, ale také nízkou výrobní produktivitu, je vhodný pouze pro nízké objemy výrobních dávek, v tomto případě pro 1-100 ks. U výrobního postupu II je již výkonnější stroj, ale s vysokým přípravným časem, proto je tento postup vhodný pro výrobní dávky v objemu přibližně od 100 do 10 000 ks. U třetího výrobního postupu je již vysoce výkonný stroj, který vyžaduje vysoký náklad na přípravu a speciální nářadí (například upínače pro nástroje a polotovary). Avšak při výrobní dávce vyšší než 10 000 ks vykazuje vůbec nejnižší náklady na výrobu jednoho kusu ze všech technologií. [32][33]



Obr. 32: Náklady na výrobu jednoho kusu v závislosti na objemu výrobní dávky [32]

Pro výběr optimálního výrobního postupu je tedy třeba komplexně analyzovat požadavky na produkt, posoudit dostupné technologie, spočítat výrobní náklady, prověřit kapacity a vybrat řešení s nejlepší cenovou a výkonnostní efektivitou. [32][33]

4.4 Metody optimalizace obrábění

Optimalizace obrábění je proces, při kterém se snažíme zlepšit různé aspekty obráběcích operací, jako je snížení nákladů, zkrácení času obrábění, zvýšení kvality povrchu a prodloužení životnosti nástroje. Existuje několik metod, které se používají k optimalizaci procesu obrábění. Zde jsou některé z nejčastějších:

- **Analýza řezných sil** – pozorování a měření řezných sil pomáhá určit optimální řezné podmínky, jako jsou rychlost, posuv a hloubka řezu. Tím se snižuje opotřebení nástroje a zvyšuje efektivita obrábění.
- **Simulace a modelování obrábění** – použití pokročilých software pro simulaci obráběcích procesů umožňuje předpovídat výsledky různých nastavení a strategií obrábění bez nutnosti fyzických testů. To umožňuje optimalizaci procesu ještě před samotným zahájením výroby.
- **Optimalizace parametrů obrábění** – nastavení optimálních parametrů obrábění, jako je rychlost řezání, posuv, hloubka řezu, a výběr správného nástroje, je klíčové pro maximalizaci produktivity a minimalizaci nákladů.
- **Využití pokročilých materiálů pro nástroje** – výběr správného materiálu pro řezné nástroje (např. karbid, cermet, keramika) může značně zlepšit výkonnost obrábění a prodloužit životnost nástrojů.
- **Optimalizace trajektorií obrábění** – se zaměřuje na efektivní plánování cesty nástroje, aby se minimalizovala doba obrábění, snížila opotřebení nástroje a zvýšila kvalita výrobku. Tato oblast optimalizace je klíčová při složitých obráběcích operacích, jako je 5osé frézování nebo obrábění volných povrchů.

Optimalizace obrábění je kontinuální proces, který vyžaduje neustálé monitorování, analýzu a upravování strategií obrábění za účelem dosažení nejlepších možných výsledků.

Technologie, materiály a metody se neustále vyvíjejí, což nabízí nové příležitosti pro zlepšení obráběcích operací. [34][35][36][37][38]

4.4.1 Optimalizace parametrů obrábění (MPP – Machining process parameters)

Optimalizace MPP je kritický krok v procesu plánování výroby, který se zaměřuje na nalezení nejlepších možných nastavení pro obráběcí procesy s cílem maximalizovat produktivitu a kvalitu při minimalizaci nákladů. K dosažení těchto cílů se využívá řada metod optimalizace, které se liší svým přístupem, složitostí a potřebnými zdroji. Tyto metody lze klasifikovat do čtyř hlavních kategorií – OBT, OBNS, OBEK a OBOA

4.4.1.1 Optimalizace na základě experimentů OBT (Optimization based on test)

OBT využívá experimentální testování k empirickému určení optimálních obráběcích parametrů. Zahrnuje systematické provádění řady fyzických testů, při kterých se mění obráběcí parametry, jako jsou rychlost řezu, posuv nebo hloubka řezu, a měří se jejich vliv na výkon obrábění a kvalitu výrobku.

Výhody:

- Poskytuje přesná data založená na skutečných obráběcích procesech.
- Umožňuje identifikaci praktických problémů s procesem.

Nevýhody:

- Časově náročné a nákladné kvůli potřebě fyzických testů.
- Omezené na konkrétní sestavy strojů a materiálů.

4.4.1.2 Optimalizace na základě numerické simulace OBNS (Optimization based on numerical simulation)

OBNS používá počítačové modelování a simulace pro předpověď výsledků obrábění pod různými parametry bez nutnosti fyzických experimentů. Tuto metodu využívají softwary jako Matlab-GUIDE, VERICUT nebo ANSYS pro simulaci obráběcích procesů.

Výhody:

- Rychlejší a méně nákladná než fyzické testování.
- Umožňuje snadno testovat širokou škálu parametrů a scénářů.

Nevýhody:

- Vyžaduje přesné modelování, což může být komplikované.
- Závisí na přesnosti a relevanci použitých simulačních modelů.

4.4.1.3 Optimalizace na základě expertních znalostí OBEK (Optimization based on expert knowledge)

OBEK kombinuje dlouholeté zkušenosti a znalosti expertů s analytickými metodami k výběru nejlepších obráběcích parametrů. Může zahrnovat použití heuristických pravidel, databází z minulých projektů a pokročilých rozhodovacích systémů.

Výhody:

- Využívá hluboké znalosti o materiálech, strojích a procesech.
- Rychlá a flexibilní metoda bez potřeby rozsáhlého testování nebo simulace.

Nevýhody:

- Může být subjektivní a omezená na dostupné zkušenosti.
- Méně efektivní pro nové nebo neobvyklé aplikace.

4.4.1.4 Optimalizace na základě optimalizačních algoritmů OBOA (optimization based on optimization algorithm)

OBOA využívá širokou škálu matematických a počítačových algoritmů k automatizovanému hledání optimálních kombinací obráběcích parametrů. Tyto metody mohou zahrnovat genetické algoritmy, optimalizaci rojem částic, simulované žíhání

a mnoho dalších, které jsou schopné efektivně prozkoumávat velký prostor možných řešení a identifikovat nejlepší možné nastavení.

Výhody:

- Široký rozsah aplikací – algoritmy mohou být použity pro různé typy obráběcích procesů a materiálů.
- Vysoká efektivita – schopnost rychle prozkoumávat a porovnávat velké množství možných kombinací parametrů.
- Flexibilita – algoritmy lze upravit nebo přizpůsobit pro specifické požadavky nebo cíle optimalizace.

Nevýhody:

- Složitost implementace – vyžaduje pokročilé znalosti v oblasti optimalizačních algoritmů a programování.
- Potřeba výpočetního výkonu – pro rozsáhlé simulace a výpočty může být nutný výkonný hardware.

V praxi se často používá kombinace těchto metod pro dosažení nejlepších výsledků. Například, experimentální data získaná metodou OBT mohou být použita ke kalibraci a ověření modelů vytvořených pomocí OBNS. Expertní znalosti (OBEK) mohou pomoci při interpretaci výsledků a při nastavení parametrů pro optimalizační algoritmy (OBOA). Tímto způsobem lze využít přednosti každé metody a minimalizovat jejich nevýhody.

Výběr nejvhodnější metody nebo kombinace metod závisí na řadě faktorů, včetně typu obrábění, dostupnosti zdrojů (času, financí, výpočetního výkonu), požadavků na přesnost a specifických cílů projektu. Důležité je také zvážit fázi vývojového cyklu produktu – například v raných fázích může být preferována rychlost a flexibilita OBEK, zatímco v pozdějších fázích, kdy je potřeba detailní optimalizace, mohou být vhodnější metody OBNS nebo OBOA. [35][36]

4.4.2 Optimalizace trajektorií obrábění

Optimalizace trajektorií obrábění je proces, jehož cílem je zlepšit účinnost a kvalitu obráběcích operací při současném snížení času a nákladů na výrobu. Tento proces zahrnuje výběr nejlepší cesty nástroje, kterým se materiál odstraňuje z obrobku, aby se dosáhlo požadovaného tvaru a povrchové kvality při minimalizaci opotřebení nástroje a energie potřebné pro obrábění. Optimalizace může zahrnovat různé aspekty, jako je minimalizace prázdných chodů, optimalizace řezné rychlosti, posuvu, hloubky řezu, výběr trajektorie nástroje, která zvyšuje stabilitu procesu, a další. Metody a algoritmy používané k optimalizaci trajektorií obrábění se mohou lišit v závislosti na konkrétních požadavcích výrobního procesu a dostupnosti výpočetních zdrojů. Způsoby optimalizace lze rozdělit na tři hlavní metody:

- Geometrické metody
- Experimentální metody
- Metody založené na umělé inteligenci

4.4.2.1 Geometrické metody:

- **Regulace tloušťky třísky** – tato metoda se zaměřuje na udržení konstantní tloušťky třísky, což má přímý vliv na sílu řezu a tím na životnost nástroje a kvalitu povrchu. Modeluje se zjednodušeně, přičemž se často vychází z předpokladu, že tříska má konstantní tloušťku po celou dobu obrábění.
- **Udržení konstantního objemu odřezávaného materiálu (MRR – Material removal rate)** – cílem je udržet konstantní rychlost odstraňování materiálu, což pomáhá stabilizovat zatížení nástroje a minimalizovat opotřebení. Tato metoda je účinná při obrábění s variabilními podmínkami řezání, jako jsou proměnné hloubky nebo šířky řezu.

Výhody:

- Snadná implementace, nízké náklady.

Nevýhody:

- Nedostatečná flexibilita a přesnost v komplexních obráběcích situacích.

4.4.2.2 Experimentální metody:

- **Online monitorování a kontrola** – využívá senzory pro měření řezných sil, vibrací a dalších faktorů v reálném čase. Tato data umožňují okamžitou adaptaci parametrů obrábění, jako je posuv nebo hloubka řezu, pro optimalizaci procesu.
- **Offline simulace a kontrola** – opírá se o předem definované modely řezných sil a simulace obráběcího procesu. Tyto modely mohou být založené na empirických vzorcích nebo pokročilejších simulačních technikách. Offline metody jsou flexibilní a ekonomické, umožňují předvídání a optimalizaci parametrů obrábění před samotným procesem.

Výhody:

- Poskytují přesné a konkrétní informace o obráběcím procesu, umožňují rychlou reakci na problémy a podporují kontinuální zlepšování a inovace v obrábění.

Nevýhody:

- Vyšší počáteční investice a provozní náklady (zejména u online metod), závislost na kvalitě a dostupnosti experimentálních dat a potřeba specifických technických znalostí pro interpretaci dat a implementaci zlepšení.

4.4.2.3 Metody založené na umělé inteligenci:

- **Neuronové sítě** – modelují složité vztahy mezi vstupními parametry obrábění a výstupními charakteristikami, jako jsou řezné síly, vibrace nebo kvalita povrchu. Neuronové sítě se mohou učit z velkého množství dat a predikovat optimální nastavení pro specifické obráběcí podmínky.
- **Kombinace s fuzzy logikou a optimalizačními algoritmy** – integrace umělé inteligence s fuzzy logikou a algoritmy, jako je genetický algoritmus nebo optimalizace rojem částic, umožňuje vytvářet robustní a adaptivní řídicí systémy. Tyto systémy jsou schopné kompenzovat nejistoty a dynamicky se přizpůsobit měnícím se podmínkám obrábění.

Výhody:

- Vysoká přizpůsobivost a schopnost modelovat složité vztahy.

Nevýhody:

- Vyžaduje rozsáhlé množství dat.
- Vysoká náročnost na výpočetní zdroje.

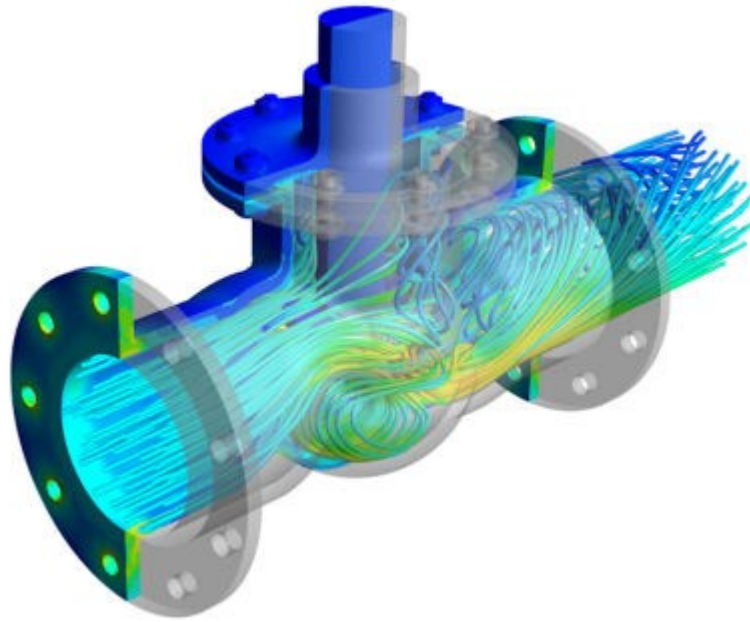
Optimalizace trajektorií obrábění v CNC frézování vyžaduje komplexní přístup, který zohledňuje různé faktory, od geometrie obráběné součásti po materiál a typ nástroje. Výběr nejvhodnější metody závisí na specifických cílech obrábění, dostupných technologiích a požadované úrovni přesnosti a efektivity. Pokročilé metody, jako jsou ty založené na umělé inteligenci, nabízejí významný potenciál pro zlepšení výkonu obrábění díky jejich schopnosti adaptace a optimalizace v reálném čase. [34][38][37]

4.5 Software pro simulaci, analýzu a optimalizaci obrábění

Pro dosažení vyšší efektivity a přesnosti v obráběcích procesech je možné využít řadu specializovaných softwarových nástrojů. Mezi klíčové patří MATLAB App Designer, ANSYS a VERICUT, které nabízejí rozsáhlé možnosti pro simulaci, analýzu a optimalizaci v oblasti obrábění. [35]

4.5.1 ANSYS

ANSYS je přední softwarový balík pro inženýrské simulace, který slouží k modelování, simulaci a analýze širokého spektra fyzikálních jevů. Tento software umožňuje přesně předvídat, jak budou produkty reagovat v různých podmínkách, a to ještě před prototypováním nebo skutečným nasazením. Díky své schopnosti integrovat simulace napříč disciplínami, jako je strukturální mechanika, dynamika tekutin, elektromagnetismus a tepelné procesy, ANSYS poskytuje ucelené řešení pro řešení komplexních inženýrských výzev v mnoha odvětvích. [39]



Obr. 33: Analýza proudění kapalin pomocí software ANSYS [39]

V oblasti strojírenství je ANSYS neocenitelným nástrojem pro návrh, analýzu a optimalizaci mechanických systémů a komponent. Software umožňuje detailně modelovat a analyzovat chování materiálů a struktur pod zatížením, včetně statických a dynamických sil, teplotních gradientů a dalších operativních vlivů. Díky těmto analýzám je možné optimalizovat konstrukci pro maximální výkon, spolehlivost a životnost, což je klíčové pro konkurenceschopnost ve strojírenském průmyslu.

V kontextu obrábění se ANSYS zaměřuje na několik klíčových oblastí:

- **Teplotní analýzy** – při obrábění dochází k významnému generování tepla, které může ovlivnit jak nástroj, tak obrobek. Simulace v ANSYS mohou pomoci identifikovat optimální řezné podmínky pro minimalizaci tepelného vlivu a prodloužení životnosti nástroje.
- **Analýza napětí a deformace** – simulace mohou předvídat napětí a deformace v obrobku a nástroji během obrábění, což umožňuje optimalizaci parametrů řezání a minimalizaci chyb obrábění.
- **Dynamická analýza obráběcích strojů a nástrojů** – ANSYS umožňuje modelovat a analyzovat dynamické chování nejen komponent obráběcích strojů, jako jsou vřetena a vodící dráhy, ale také samotných obráběcích nástrojů. Tato analýza pomáhá při návrhu strojů a nástrojů s vyšší přesností a stabilitou. U nástrojů se zaměřuje především na

predikci a minimalizaci vibrací, které mohou negativně ovlivnit kvalitu obrobku a způsobit předčasné opotřebení nástroje.

- **Optimalizace procesů** – software podporuje experimentování s různými konfiguracemi obrábění, jako jsou rychlosti, posuvy a hloubky řezu, pro nalezení nejefektivnějších a ekonomicky nejvýhodnějších podmínek.

ANSYS přináší ve strojírenství a obrábění výhody optimalizací designu a procesů, což vede k nižším nákladům a lepší kvalitě produktů. Simulace umožňují předem identifikovat a řešit problémy, zatímco inovační potenciál zrychluje rozvoj nových řešení, zvyšuje efektivitu a podporuje spolehlivost. [39]

4.5.2 MATLAB App Designer

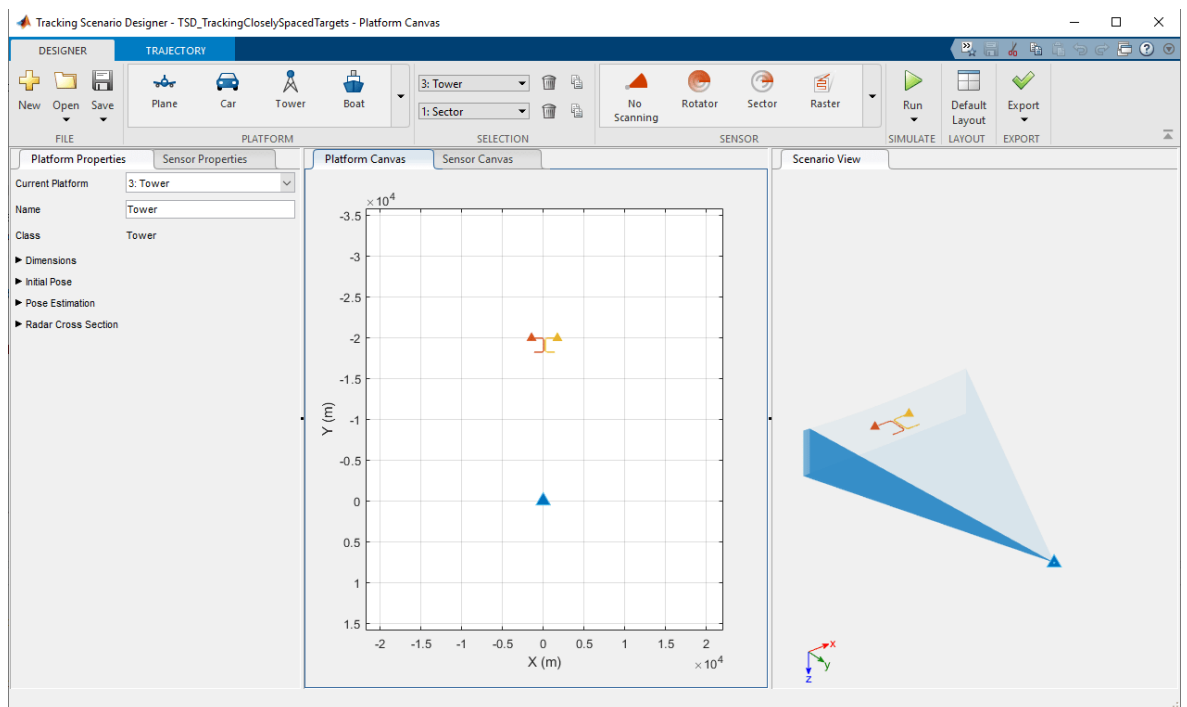
MATLAB je vysokoúrovňový programovací jazyk a interaktivní prostředí pro numerické výpočty, vizualizaci a programování. Vyvinutý firmou MathWorks, MATLAB umožňuje uživatelům snadno provádět matematické výpočty, analyzovat data, vizualizovat výsledky a vyvíjet algoritmy pro širokou škálu aplikací, od inženýrských a vědeckých výpočtů po finanční analýzu a zpracování obrazu.

MATLAB App Designer je nástroj určený pro vývoj aplikací s grafickým uživatelským rozhraním (GUI) v prostředí MATLAB. App Designer modernizuje a zjednodušuje proces vytváření aplikací oproti staršímu nástroji GUIDE, nabízející rozšířené možnosti designu a vývoje. S App Designerem mohou uživatelé snadno vytvářet profesionálně vypadající aplikace pro různé účely, od jednoduchých nástrojů pro vizualizaci dat po složité interaktivní systémy pro analýzu a simulaci.

Hlavní vlastnosti App Designeru:

- **Intuitivní drag and drop rozhraní („táhni a pusť“)** – umožňuje uživatelům přetahovat komponenty GUI, jako jsou tlačítka, textová pole, grafy a další, přímo na designovou plochu, což usnadňuje vytváření rozhraní.
- **Dvojitá zobrazení – design a kód** – nabízí integrované prostředí, kde uživatelé mohou současně pracovat na designu aplikace a na kódu, který definuje logiku a funkčnost aplikace.

- **Rozsáhlá knihovna komponent** – poskytuje širokou škálu přednastavených komponent a widgetů, které lze použít v aplikacích, včetně interaktivních prvků pro sběr a zobrazení dat.
- **Automaticky generovaný kód** – automaticky generuje čistý a strukturovaný kód za uživatele, což minimalizuje potřebu manuálního kódování a zjednodušuje údržbu a aktualizace aplikací.
- **Podpora pro pokročilou grafiku a vizualizaci** – umožňuje snadné začlenění pokročilých grafických prvků a vizualizací MATLABu do uživatelských aplikací, včetně 2D a 3D grafů.
- **Integrace s MATLAB funkcemi a toolboxy** – aplikace mohou plně využívat širokou škálu funkcí a toolboxů MATLABu, což umožňuje vývojářům vytvářet výkonné a flexibilní aplikace. [40][41]



Obr. 34: Prostředí software MATLAB App Designer [40]

V kontextu obrábění může App Designer posloužit k vytvoření aplikací, které usnadňují simulace, analýzu a optimalizaci obráběcích procesů. Aplikace mohou zahrnovat

interaktivní nástroje pro zadávání parametrů procesu, zobrazení simulovaných nebo experimentálních dat a vizualizaci výsledků.

Možnosti využití:

- **Interaktivní simulace** – vytvoření GUI, které umožňuje uživatelům nastavit parametry obrábění, jako jsou rychlost řezání, posuv, hloubka řezu, a spustit simulaci procesu. Uživatelé mohou vizualizovat výsledky simulace přímo v aplikaci, což usnadňuje iterativní proces optimalizace.
- **Analýza a vizualizace dat** – návrh aplikací pro analýzu dat získaných z obráběcích procesů, včetně měření síly, vibrací, teploty a opotřebení nástroje. Aplikace mohou poskytovat pokročilé možnosti vizualizace, jako jsou teplotní mapy, konturové grafy a 3D modely.
- **Optimalizace parametrů** – integrace optimalizačních algoritmů do aplikací pro automatické nalezení optimálních nastavení procesních parametrů, které zlepšují výkonnost a efektivitu obrábění.
- **Edukace a školení** – vývoj edukačních nástrojů a simulátorů, které pomáhají studentům a technikům lépe pochopit principy obrábění, vliv různých parametrů na kvalitu a produktivitu a metody pro řešení běžných problémů.

Použitím App Designeru pro vytvoření aplikací v oblasti obrábění lze značně zvýšit přístupnost a použitelnost složitých výpočetních modelů a analýz. Aplikace mohou sloužit jako mocný nástroj pro výzkum, vývoj a školení v oblasti moderního obrábění. [40][41]

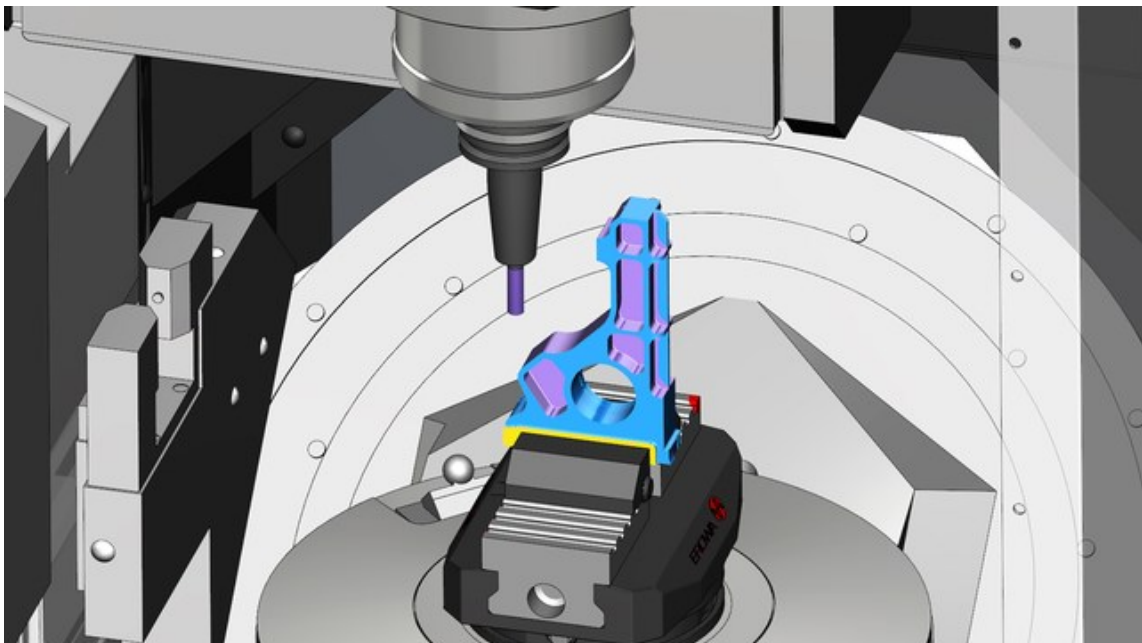
4.5.3 VERICUT

Od roku 1988 se společnost CGTech, vývojář VERICUTu, zaměřuje na vývoj simulačních, ověřovacích, optimalizačních a analytických nástrojů pro výrobní průmysl. VERICUT si vybudoval pozici průmyslového standardu v oblasti simulace procesů CNC obrábění, poskytující nástroje k odhalení případných chyb, rizik kolizí a neefektivních míst v obráběcích operacích. Tento software poskytuje platformu pro off-line programování

a umožňuje simulaci obráběcích procesů pomocí digitálních dvojčat CNC strojů, což zvyšuje bezpečnost a účinnost výroby.

Díky možnosti simulace s využitím digitálního dvojčete, VERICUT rovněž nabízí funkce pro verifikaci a optimalizaci NC kódu, včetně zlepšení procesu obrábění skrze modul FORCE.

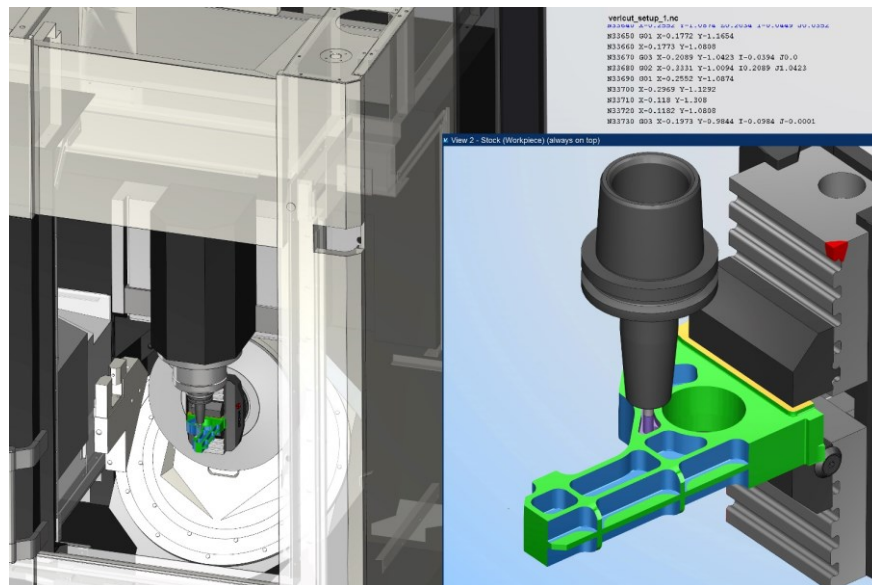
VERICUT umožňuje uživatelům efektivně testovat a optimalizovat výrobní procesy v bezpečném digitálním prostředí, což přináší významné úspory času a materiálu a zároveň snižuje riziko chyb při skutečné výrobě. Jeho integrace s CAD/CAM systémy zjednodušuje přechod od návrhu k realizaci, což činí VERICUT nenahraditelným nástrojem pro inovace ve výrobním procesu. [42][43][44]



Obr. 35: Digitální dvojče obráběcího stroje vytvořené pomocí software VERICUT [42]

VERICUT se skládá z několika klíčových modulů, které umožňují uživatelům simulovat, verifikovat, optimalizovat a analyzovat CNC obráběcí procesy s vysokou úrovní přesnosti a efektivity. Každý modul je zaměřen na specifickou sadu funkcí a potřeb ve výrobním procesu. Zde je přehled hlavních modulů, které VERICUT nabízí:

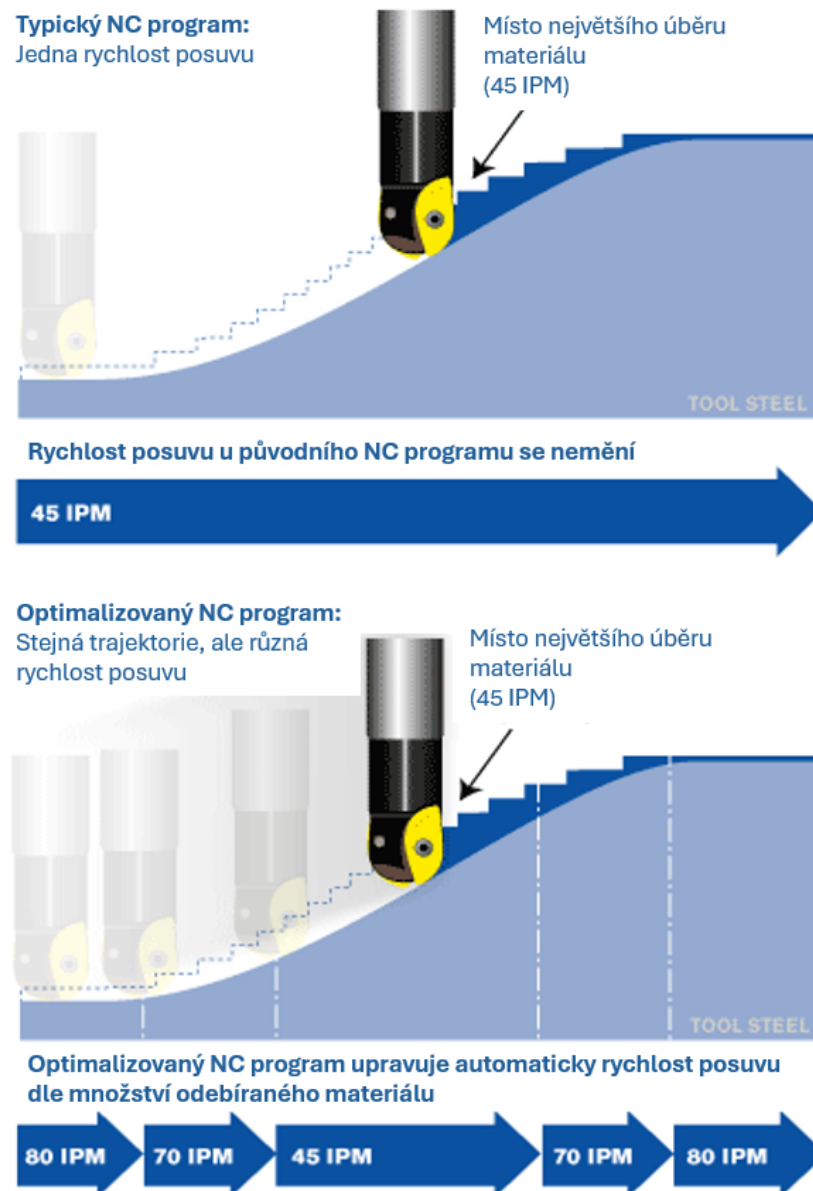
- **Simulace obrábění** – tento základní modul umožňuje uživatelům simulovat celý CNC obráběcí proces, včetně odstranění materiálu a kontroly kolizí mezi nástrojem a obrobkem nebo strojem. Pomáhá identifikovat chyby v NC kódech, potenciální kolize a oblasti neefektivního obrábění.



Obr. 36: Simulace CNC obrábění [42]

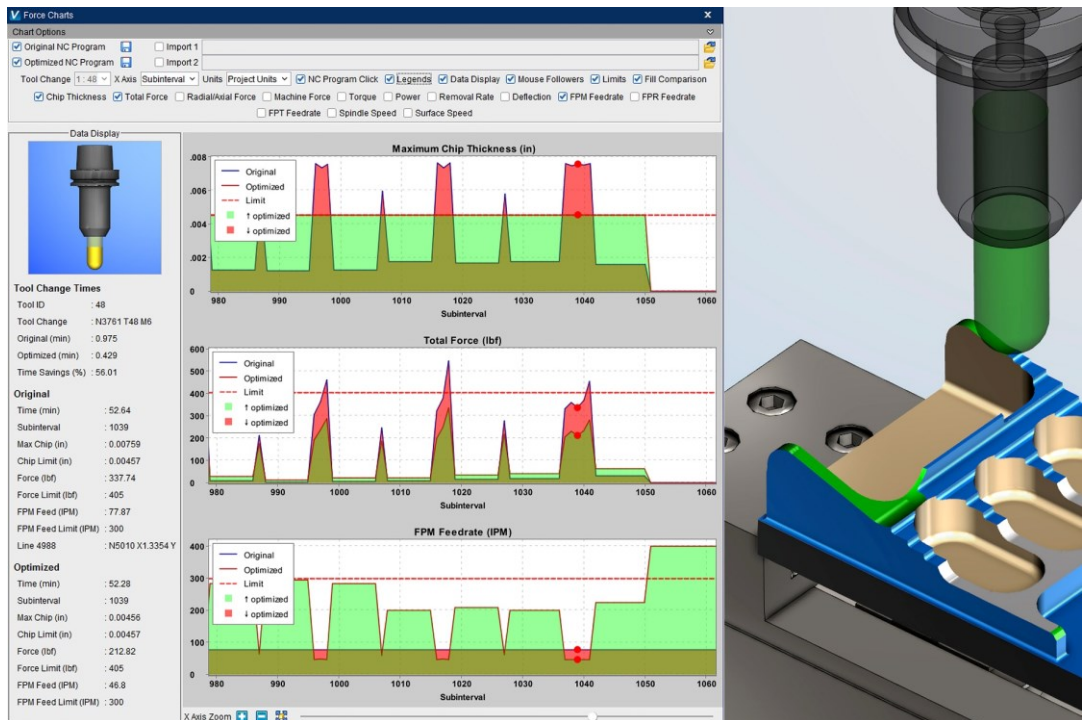
- **Verifikace NC kódu** – modul pro verifikaci NC kódu analyzuje a ověřuje přesnost NC programů tím, že srovnává plánované obrábění s výsledkem simulace. Cílem je zajistit, že NC kód bude bez chyb a připravený pro výrobu bez rizika poškození stroje nebo materiálu.
- **MULTI AXIS** – speciálně navržený pro komplexní víceosé obráběcí procesy, tento modul umožňuje uživatelům simulovat a ověřit obrábění s vysokou úrovní detailu a přesnosti.
- **OptiPath** – optimalizuje NC kódy tím, že dynamicky upravuje posuvy dle aktuálních podmínek obrábění, čímž zajistí rovnoměrné zatěžování nástroje a zvýší efektivitu a životnost nástrojů. Díky tomu dochází k lepší kvalitě obroběných povrchů a efektivnějšímu obrábění.

Jak ukazuje Obr. 37, pokud má řezný nástroj odebrat více materiálu, modul OptiPath rychlost posuvu sníží až na 45 IPM (inches per minute – palců za minutu) Pokud méně, rychlost posuvu se podle toho zvýší až na 80 IPM. Na základě informací o množství materiálu odstraněného v každém místě řezu, OptiPath automaticky vypočítá a vloží upravenou rychlost posuvu tak, jak je potřeba.



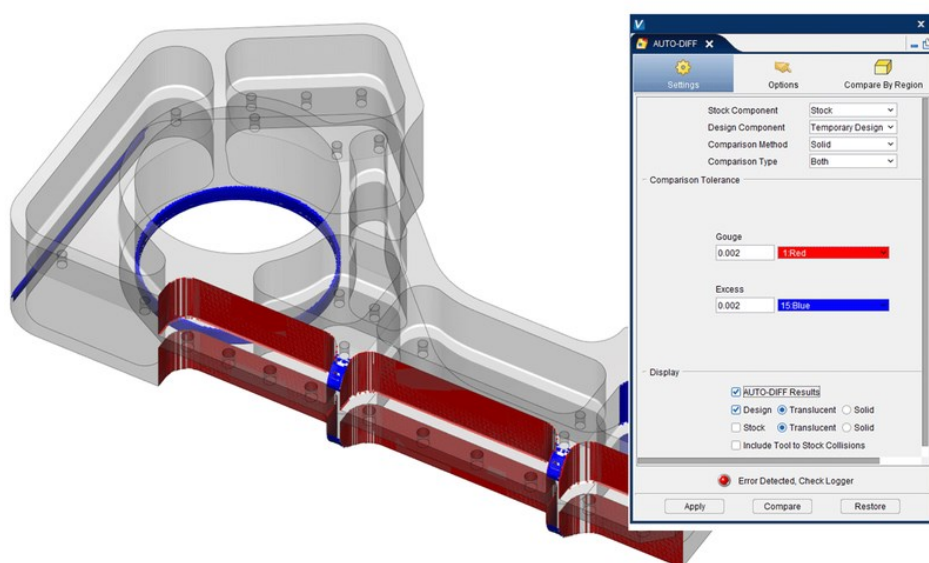
Obr. 37: Funkce modulu OptiPath [42]

- **Optimalizace obrábění – Force** – optimalizuje NC kódy tím, že snižuje extrémní zatížení nástrojů a zvyšuje efektivitu obrábění. Analýzou řezné síly mezi nástrojem a materiálem umožňuje vytvořit efektivnější NC programy, což vede k výrazným úsporám času a prodloužení životnosti nástrojů a strojů. Optimalizace může zkrátit dobu obrábění až o 25 % a zdvojnásobit životnost nástroje.



Obr. 38: Optimalizace obrábění pomocí modulu FORCE [42]

- **Auto-Diff** – modul pro porovnávání, který automaticky porovnává originální CAD model s finálním modelem po simulaci obrábění. Tím uživatelům umožňuje rychle identifikovat odchylky a zajistit, že výsledný obrobek odpovídá designovým specifikacím. [42][43][44]



Obr. 39: Kontrola pomocí modulu Auto-Diff – červené oblasti označují podřezání, modré oblasti zbylý materiál [42]

Software VERICUT od CGTech představuje excelentní nástroj v arzenálu moderních výrobních společností, kteří se specializují na CNC obrábění. Díky svým pokročilým funkcím pro simulaci, verifikaci a optimalizaci NC kódů a obráběcích procesů VERICUT umožňuje výrobcům snížit riziko chyb, zvýšit efektivitu a maximalizovat produktivitu při zachování vysoké kvality a přesnosti výrobních operací. S moduly jako FORCE a OptiPath, které nabízejí další vrstvy analýzy a optimalizace, VERICUT poskytuje komplexní řešení pro překonání výrobních výzev a dosažení konkurenceschopnosti ve stále se měnícím průmyslovém prostředí. Jeho schopnost simulovat digitální dvojčata CNC strojů a efektivně spravovat obráběcí procesy činí z VERICUTu cenný nástroj pro každou organizaci zaměřenou na inovace a excelenci ve výrobě. [42][43][44]

5 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI PRÁCE

Teoretická část práce poskytuje komplexní přehled o klíčových aspektech obrábění, technologiích a počítačové podpoře ve výrobních procesech. Na úvod jsou představeny základní pojmy a terminologie technologie obrábění, včetně klíčových pohybů při obrábění, což položí základ pro pochopení tématu.

Druhá kapitola rozšiřuje tuto základnu o specifika frézování, včetně popisu technologií, metod obrábění a typů frézovacích strojů, což umožňuje hlubší porozumění specifickým procesům a vybavení používanému v této oblasti.

Třetí kapitola přechází k moderním aspektům výroby, zaměřuje se na počítačovou podporu a řízení, včetně číslicově řízených strojů, NC programů a integrace CAD/CAM systémů, které jsou zásadní pro efektivitu a přesnost v dnešních výrobních procesech.

Poslední, čtvrtá kapitola se věnuje metodám výpočtů a optimalizace výrobních procesů, včetně výběru optimální velikosti výrobní dávky a optimálního výrobního postupu, což je klíčové pro zvýšení produktivity a snížení nákladů ve výrobním sektoru. Práce dále zkoumá metody optimalizace obrábění, včetně optimalizace parametrů obrábění a trajektorií obrábění, a představuje software pro simulaci, analýzu a optimalizaci obrábění, jako jsou ANSYS, MATLAB App Designer a VERICUT, které nabízí pokročilé možnosti pro zlepšení výrobních procesů.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem této diplomové práce je prozkoumat a navrhnout metody pro optimalizaci procesů obrábění firmě Evektor spol. s r.o., která usiluje o zefektivnění svých výrobních operací. Vzhledem k omezenému počtu a přetížení CNC programátorů ve firmě se práce zaměří na nalezení strategií, jak optimalizovat obrábění bez nutnosti intenzivního zapojení těchto specialistů. To zahrnuje prozkoumání alternativních přístupů k optimalizaci, které nevyžadují extenzivní programování nebo zásahy ze strany programátorů.

Práce se zaměří na vyzkoušení a hodnocení možností optimalizačního softwaru VERICUT a jeho modulu Force. Cílem je zjistit, jak tento software může přispět k efektivnějšímu obrábění.

Dále se práce věnuje optimalizaci velikosti výrobních dávek a výrobních postupů, kde hlavním cílem je nalézt nejefektivnější velikost dávky a výrobní postup, který minimalizuje časy obrábění a náklady na výrobu.

V závěru práce bude posouzen přínos optimalizačních opatření ve srovnání se stávajícím stavem, přičemž budou vyčísleny časové a finanční úspory, které tyto změny přinášejí.

7 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU VÝROBY SOUČÁSTI

Evektor spol. s r.o. (dále jen Evektor) je přední česká letecká a strojírenská společnost s bohatou historií a silnou pozicí na mezinárodním trhu. Specializuje se na vývoj, výrobu a prodej lehkých sportovních letadel, ale její portfolio zahrnuje také inženýrské a designové služby pro automobilový průmysl, průmyslový design a vývoj software. Evektor se pyšní řadou úspěšných projektů, mezi které patří například sportovní a tréninková letadla SportStar RTC a Harmony LSA, která jsou oblíbena jak u soukromých pilotů, tak v leteckých školách po celém světě. [45]



Obr. 40: Letoun Harmony LSA vyráběný firmou Evektor [46]

Firma byla založena v České republice a postupně si vybuodovala pověst inovátora ve svém oboru. Díky kombinaci špičkových technologií, vysoké kvality a důrazu na bezpečnost se Evektor stal důležitým hráčem na trhu s lehkými letadly. Kromě leteckého sektoru firma rozšířila své působení i do dalších oblastí inženýrství a designu, čímž diverzifikovala své služby a produkty a zároveň si udržela silnou pozici na trhu. [45]

Nicméně i přes veškeré úspěchy, které tato společnost dosáhla, se setkává s výzvami, které souvisejí s růstem a zvýšenou poptávkou zejména v oblasti obrábění součástí a dílů. S rostoucí poptávkou po produktech firmy Evektor se objevuje problém přetížení výroby. To může mít několik negativních důsledků, jako jsou zpožděné dodávky, zvýšený pracovní tlak na zaměstnance a snížená kvalita výrobků. Přetížení může také zvýšit náklady na výrobu a snížit efektivitu celého procesu.

Společnost také čelí výzvě v podobě akutního nedostatku kvalifikovaných CNC programátorů, což je problém, s nímž se potýká celé odvětví. Aby firma dokázala tuto situaci řešit, zaměřuje se mimo jiné na hledání nových cest, jak optimalizovat své výrobní operace a zvýšit produktivitu.

Optimalizace výroby je klíčem k tomu, aby firma Evektor mohla splnit rostoucí poptávku po svých produktech a zároveň udržet vysokou kvalitu a konkurenceschopnost na trhu. Je to neustálý proces, který vyžaduje investice do technologií, školení zaměstnanců a pravidelné hodnocení a zlepšování výrobních postupů.

7.1 Strojní vybavení firmy

Společnost Evektor má k dispozici rozmanitý arzenál zařízení pro obrábění dílů ultralehkých letounů. To zahrnuje nejen tradiční konvenční frézky a moderní CNC frézky s 3 i 5 osami, ale také inovativní zařízení v podobě vodního paprsku. Každý z těchto strojů má své výhody a specifické využití, což umožňuje firmě Evektor přizpůsobit se potřebám a požadavkům výroby ultralehkých letounů tím nejefektivnějším způsobem.

7.1.1 FLOW M4-4020C

Stroj FLOW M4-4020C z řady Mach4C s modulární konstrukcí s CNC systémem pro řezání tvarových dílců z rovinných polotovarů pomocí vodního paprsku. Pro pohon stroje slouží čerpadlo 50i-S s tlakem 414 MPa, a řezací hlava Dynamic XD, která umožňuje řezání pod různými úhly až do 60°, což umožňuje i řezání 3D úkosů. [47]

Tab. 3: Parametry vodního paprsku FLOW M4-4020C [47]

Maximální řezací prostor bez vyklopení hlavy	4000 × 2000 (maximální možný řez)
Maximální velikost polotovaru (velikost stolu)	4000 × 2400
Lineární přesnost polohování	0,025 mm·m ⁻¹
Maximální rychlost (posuv)	36 m·min ⁻¹
Maximální rychlost (řezná)	25 m·min ⁻¹
Zdvih v ose Z	282 mm



Obr. 41: Vodní paprsek FLOW M4-4020C [47]

7.1.2 Frézka konzolová svislá FV 20

Frézka se využívá pro základní obráběcí operace, především k předhrubování nebo úhlování polotovarů. [48]

Tab. 4: Parametry frézky FV 20 [48]

Maximální úhel naklonění vřetena	45° oboustranně
Maximální rozjezd v jednotlivých osách	X: 900 mm Y: 280 mm Z: 410 mm
Rozsah otáček vřetena	45 – 2000 ot·min ⁻¹
Maximální pracovní posuv	900 mm·min ⁻¹
Upínací kužel	ISO 40



Obr. 42: Frézka FV 20 [48]

7.1.3 Frézka nástrojařská FN40

Nástrojařská frézka disponuje digitálním odměřováním, což umožňuje přesné obrábění. Díky schopnosti výrazného naklonění vřetena může také provádět horizontální obrábění. [49]

Tab. 5: Parametry frézky FN40 [49]

Maximální úhel naklonění vřetena	120° oboustranně
Maximální rozjezd v jednotlivých osách	X: 710 mm Y: 200 mm Z: 410 mm
Rozsah otáček vřetena	40 – 2000 ot·min ⁻¹
Maximální pracovní posuv	400 mm·min ⁻¹
Upínací kužel	ISO 40



Obr. 43: Frézka FN40 [49]

7.1.4 ZPS MCFV 2080

Tříosé vertikální obráběcí centrum MCFV 2080 je produktivní stroj pro komplexní třískové obrábění forem, zápusťek a součástí plochého nebo skříňového tvaru z oceli a slitin lehkých kovů upnutých na pracovním stole. [50]

Tab. 6: Parametry obráběcího centra ZPS MCFV 2080 [50]

Počet os	3
Maximální rozjezd v jednotlivých osách	X: 2030 mm Y: 810 mm Z: 810 mm
Rozsah otáček vřetena	50 – 15000 ot·min ⁻¹
Maximální pracovní posuv	30 m·min ⁻¹
Řídící systém	Sinumerik 840D
Upínací kužel	ISO 40 s možností vnitřního chlazení nástrojů



Obr. 44: Obráběcí centrum ZPS MCFV 2080 [50]

7.1.5 MAKINO A61nx-5E

Obráběcí centrum A61nx-5E, které disponuje pěti osami, bylo zkonstruováno speciálně pro vysokou efektivitu při obrábění komplexních hliníkových komponent a monolitických leteckých dílů středních a menších rozměrů. [51]

Tab. 7: Parametry obráběcího centra A61nx-5E [51]

Počet os	5
Maximální rozjezd v jednotlivých osách	X: 2030 mm Y: 810 mm Z: 810 mm
Rozsah otáček vřetena	50 – 24000 ot·min ⁻¹
Maximální pracovní posuv	48 m·min ⁻¹
Řídící systém	FANUC s modifikací MAKINO
Upínací kužel	HSK A63 s možností vnitřního chlazení nástrojů



Obr. 45: Obráběcí centrum A61nx-5E [51]

7.2 Softwarové vybavení firmy

Firma Evektor využívá pro své výrobní procesy rozmanitou škálu specifických softwarů. Tyto nástroje jsou klíčové pro zvyšování efektivity a optimalizaci výroby, což firmě umožňuje rychleji a efektivněji produkovat nové produkty. V oblasti výroby firma využívá především na tyto softwary:

- **VyrSoft Sirius** – informační systém Vyrsoft Sirius je software určený pro správu podnikových procesů, který integruje různé oblasti podnikání do jednotného systému. Umožňuje efektivní řízení zdrojů, automatizaci operací a zlepšuje přehled o podnikových aktivitách. [52]
- **TPV výpočty** – aplikace TPV Výpočty je nástroj pro technickou přípravu výroby, zaměřený na kalkulaci a optimalizaci výrobních procesů. Umožňuje efektivní plánování nákladů, výpočet materiálové spotřeby a časování pracovních operací. [53]
- **CATIA V5** – pokročilý systém pro počítačem podporované navrhování (CAD), počítačem podporovanou výrobu (CAM) a počítačem podporované inženýrství (CAE). Umožňuje vytváření komplexních 3D modelů, simulace výrobních procesů a analýzu výkonnosti designů ve více oborech, včetně automobilového průmyslu, letectví a strojírenství. [54]
- **Vericut** – je softwarový program pro simulaci, verifikaci a optimalizaci CNC obráběcích procesů. Umožňuje výrobcům předem ověřit správnost a efektivitu svých CNC programů, snížit riziko chyb při obrábění a zvýšit produktivitu tím, že eliminuje potřebu manuálních testů na skutečných strojích. [43][42]

7.3 Příprava výrobních procesů ve firmě

Zavádění nového výrobku do výroby, případně jeho modifikace, zahrnuje několik klíčových kroků, které zajistí hladký přechod od návrhu po finální výrobu:

1. **Návrh a vývoj** – vývojový tým nejprve využije software CATIA k vytvoření detailního 3D modelu nového výrobku. CATIA umožňuje komplexní CAD modelování, což zahrnuje i simulace a analýzy, aby byl design co nejefektivnější a funkční.
2. **Technická příprava výroby** – Technická příprava výroby je klíčovým krokem pro efektivní výrobu produktu, kde se klade důraz na pečlivé plánování a optimalizaci produkčního procesu. Pomocí programu TPV Výpočty se provádějí odhady materiálových nároků a času potřebného pro výrobu. Poté se vybírají stroje a technologie, které zajistí nejvyšší efektivitu, produktivitu a kvalitu výroby. Současně, v modulu CAM softwaru CATIA V5, je vytvářen na základě 3D modelů program pro CNC stroje, což zajišťuje, že design je přesně a efektivně realizován ve výrobní praxi.
3. **Simulace obráběcích procesů** – před fyzickým zahájením výroby se provádí simulace obráběcích procesů v programu Vericut, který ověřuje správnost CNC programů a minimalizuje riziko chyb. Díky tomu lze předem identifikovat a opravit potenciální problémy s obráběním, což šetří čas a materiál.
4. **Správa dat a procesů** – informační systém Sirius se využívá pro celkovou správu a koordinaci výrobních procesů. Sirius integruje data z předchozích kroků, umožňuje plánování zdrojů, řízení kvality a sledování postupu zavádění produktu do výroby. Pomocí tohoto systému lze efektivně komunikovat mezi odděleními a zajistit, že všechny aspekty výroby jsou synchronizovány.
5. **Zahájení výroby** – po úspěšném dokončení všech předchozích kroků se zahajuje skutečná výroba nového produktu. Díky pečlivé přípravě a využití výše uvedených softwarových nástrojů je možné efektivně a bez zbytečných zpoždění začlenit nový výrobek do výrobního cyklu.

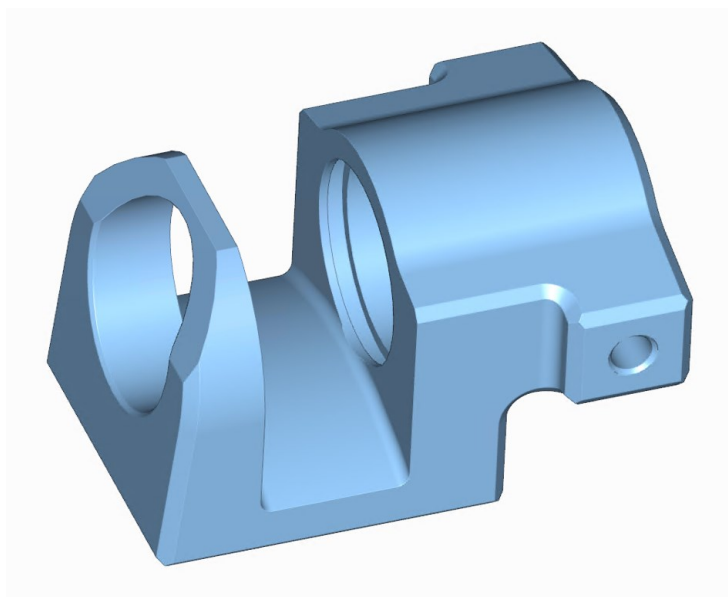
Pokud v průběhu výrobního procesu nebo po dokončení výrobku dojde k zjištění, že výsledný produkt neodpovídá očekávaným specifikacím nebo kvalitě, je nezbytné provést přepracování a změny návrhu nebo výrobních postupů. Informační systém Sirius zde hraje klíčovou roli v koordinaci těchto změn napříč odděleními a zajištění, že všechny relevantní

informace jsou aktualizované a přístupné. Tímto způsobem se proces přepracování změn návrhu výrobku nebo výrobních postupů stává integrovanou součástí kontinuálního zlepšování produktu a výrobních procesů, což vede k vyšší efektivitě, kvalitě a spokojenosti zákazníků.

7.4 Současná výroba brzdového válce

Brzdový válec je vyráběn z materiálu o tloušťce 50,8 mm, hliníkové slitiny 2024 ve stavu T351. Ročně se spotřebuje přibližně 60 kusů daného dílu, přičemž se obvykle vyrábí ve dvou výrobních dávkách po 30 kusech během roku. Tato součást představuje jednu z hlavních komponent brzdového systému letounů EuroStar EV97, SportStar RTC a Harmony LSA, hrající zásadní roli v jejich bezpečném provozu.

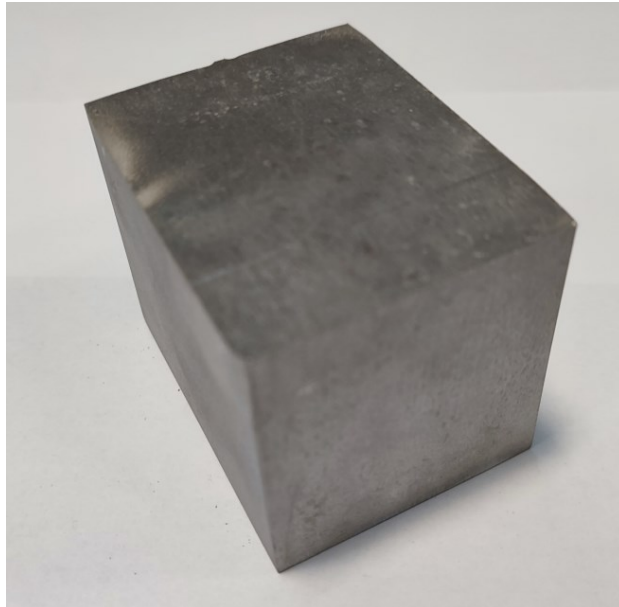
Výkres součásti je uveden v příloze I.



Obr. 46: 3D model brzdového válce

Současný výrobní postup výroby brzdového válce:

1. Polotovar pro obrábění je nejprve vyřezán na vodním paprsku na rozměr 70 x 60 x 50,8 mm



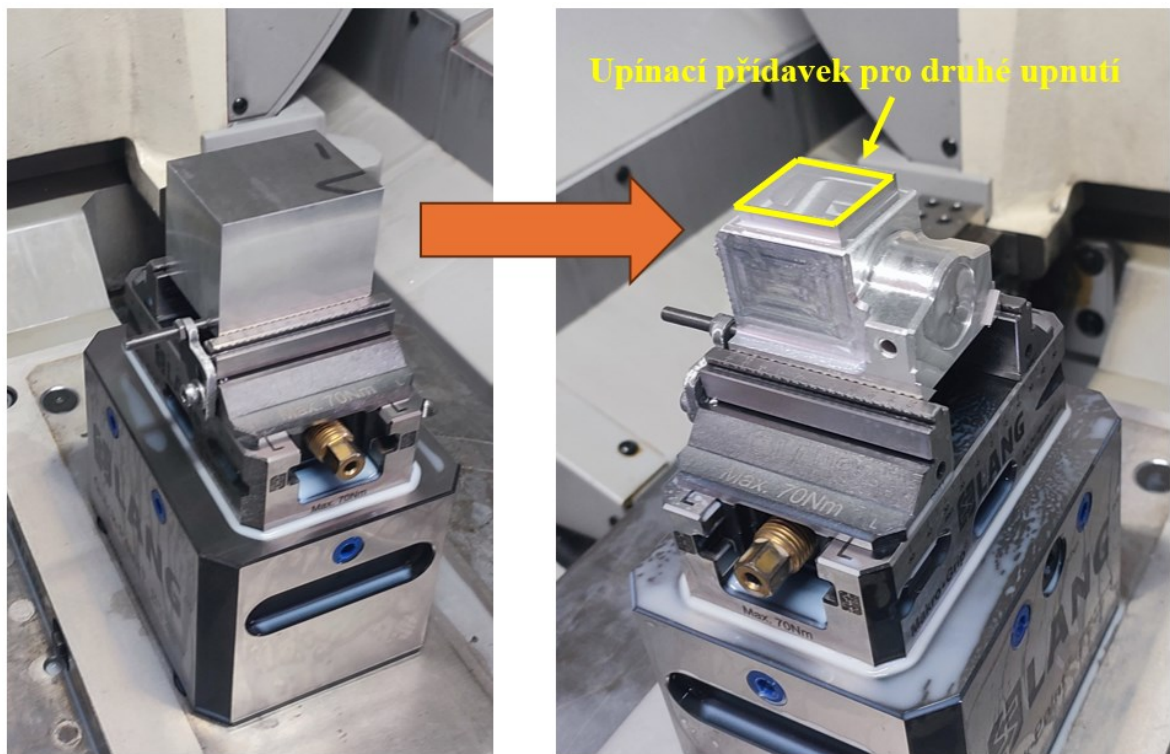
Obr. 47: Vyřezaný polotovar na vodním paprsku

2. Následuje úhlování polotovaru na rozměr 65 x 55 x 50 pomocí konzolové frézky.



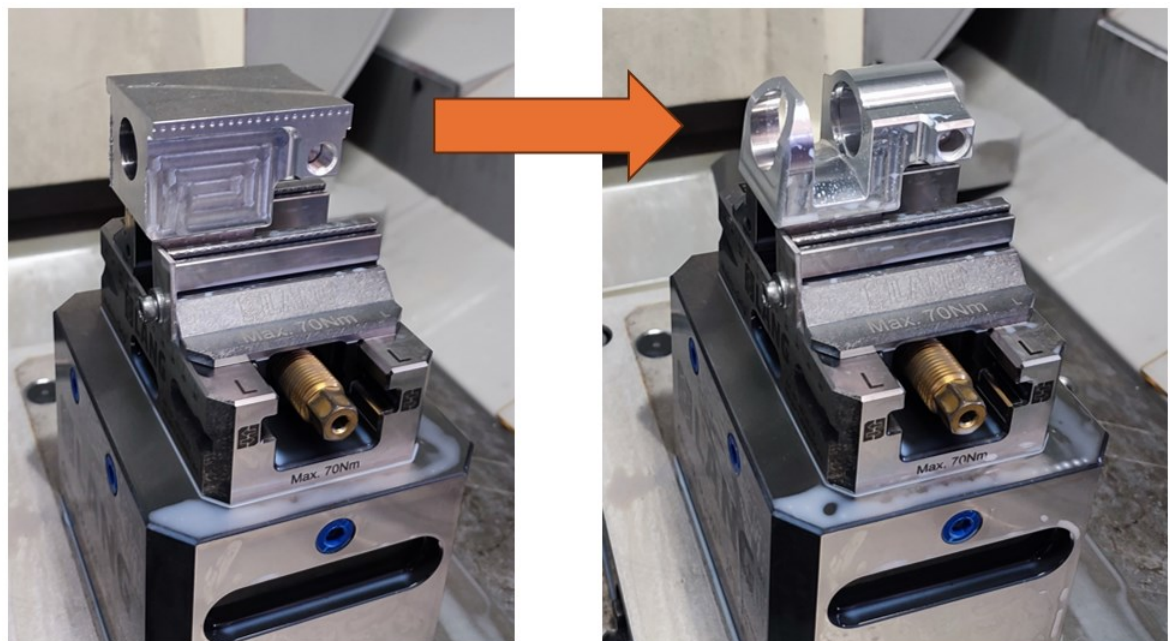
Obr. 48: Úhlování polotovaru na konzolové frézce FV20

3. Jako další krok následuje frézování prvního upnutí na CNC frézce Makino A61nx, na kusu je také zhotoven přídavek pro druhé upnutí, který bude následně odfrézován.



Obr. 49: První upnutí na CNC frézce Makino A61nx-5e

4. Druhé upnutí je také realizováno na CNC frézce Makino A61nx-5e.



Obr. 50: Druhé upnutí na CNC frézce Makino A61nx-5e

5. Poslední obráběcí operace je provedena na nástrojové frézce FN40, kdy je odfrézován zbylý upínací přídavek na kusu.
6. Po dokončení všech obráběcích operací následuje nedestruktivní testování penetrační metodou (NDT-PT), anodická oxidace v kyselině sírové s černým vybarvením, která je provedena na kooperačním pracovišti, označení výrobku a kontrola konečná.

Tab. 8: Aktuální výrobní postup brzdového válce

Op.č.	Název operace	Stroj	Popis operace	Časy [min]	
				t _a	t _b
1	Výdej materiálu		Výdej materiálu na vodní paprsek		
5	Řezání vodním paprskem	FLOW M4-4020C	Řezat na rozměr 70 x 60 mm	7,4	20
10	Frézka konzolová	FV 20	Úhlovat na rozměr 65 x 55 x 50 mm, odjehlít	20	30
15	Kontrola mezioperační		Dle kontrolního protokolu		
20	CNC frézka	Makino A61nx-5e	Obrábět první upnutí dle programu a seřizovacího listu	18	80
25	CNC frézka	Makino A61nx-5e	Obrábět druhé upnutí dle programu a seřizovacího listu	19,2	55
30	Frézka nástrojová	FV40	Odfrézovat upínací přídavek	4,5	20
35	Kontrola mezioperační		Dle kontrolního protokolu		
40	NDT-PT		Nedestruktivní testování – penetrační		
45	Anodická oxidace		V kyselině sírové – černé vybarvení, vrstva 15-20 μm		
50	Kontrola mezioperační		Dle kontrolního protokolu		
55	Označení výrobku		Značit visačkou s číslem a indexem položky		
60	Kontrola konečná		Dle kontrolního protokolu		

Poté, co je brzdový válec vyroben, je instalován do sestavy brzdového třmenu společně s pístem, brzdovými destičkami a dalšími nezbytnými součástmi pro bezchybný chod brzdového systému.



Obr. 51: Sestava brzdového třmenu

Kompletně sestavený brzdový třmen se montuje na brzdový systém podvozkových kol letounů.



Obr. 52: Instalovaný brzdový třmen na podvozkové kolo letounu Harmony LSA

7.5 Analýza výrobního postupu a výpočet nákladů pro výrobu brzdového válce

Při kalkulaci nákladů se zohlední pouze operace přímo související s výrobou. Režijní činnosti, jako jsou výdej materiálu, kontrolní procesy, značení, nebo externí kooperace (anodická oxidace) nebudou uvažovány, jelikož mají na celkovou cenu produktu pouze marginální dopad.

Tab. 9: Výrobní operace brzdového válce

Op.č.	Název operace	Stroj	Popis operace	Časy [min]	
				t _a	t _b
1	Řezání vodním paprskem	FLOW M4-4020C	Řezat na rozměr 70 x 60 mm	7,4	20
5	Frézka konzolová	FV 20	Úhlovat na rozměr 65 x 55 x 50 mm, odjehlit	20	30
10	CNC frézka	Makino A61nx-5e	Obrábět první upnutí dle programu a seřizovacího listu	18	80
20	CNC frézka	Makino A61nx-5e	Obrábět druhé upnutí dle programu a seřizovacího listu	19,2	55
30	Frézka nástrojová	FV40	Odfrézovat upínací přídavek	4,5	20

7.5.1 Analýza výrobních časů jednotlivých operací

Nejprve je provedena analýza současného výrobního postupu a provedena kontrola výrobních a přípravných časů:

- **Operace č. 1** – řezání polotovaru pomocí vodního paprsku bylo vyčísleno na 7,4 minuty pro samotné řezání a 20 minut na přípravu. Tyto hodnoty jsou v souladu jak s výsledky simulace stroje, tak i s údaji z normovacího programu.
- **Operace č. 5** – pro úhlování a odstranění otřepů z polotovaru byl původně odhadnut jednicový čas na 20 minut a přípravný čas na 30 minut. Nicméně při revizi normovací program stanovuje časy na 6,7 minuty pro jednicovou operaci a 20 minut pro přípravu. Původní odhady tedy výrazně převyšovaly skutečné potřeby, což bylo způsobeno pravděpodobně neadekvátním odhadem technologa před zavedením normovacího softwaru. Tato nesrovnalost má dopad na celkové náklady výroby a bude podrobněji analyzována v další části práce.
- **Operace č. 10 a 20** – simulace obrábění ukazuje, že pro první upnutí je potřebných 16,5 minuty a pro druhé upnutí 17,7 minuty. K těmto časům se přičítá 1,5 minuty na

upnutí a kontrolu produktu. Přípravné časy byly určeny na základě počtu potřebných nástrojů k obrábění a složitosti přípravy uchycení. Normy pro výrobní a přípravné časy těchto operací jsou adekvátní.

- **Operace č. 30** – časové normy pro odfrézování upínacího přípravku jsou v souladu s údaji z normovacího softwaru.

7.5.2 Výpočet nákladů pro výrobu brzdového válce

Pro výpočet nákladů je nezbytné znát jak čas potřebný pro jednotlivé operace a přípravu na každém pracovišti, tak i související náklady těchto pracovišť. Ve firmě Evektor je pro každé pracoviště stanovena hodinová sazba, která pokrývá veškeré náklady včetně provozu strojů, odměn zaměstnanců a všech nepřímých nákladů.

Tab. 10: Hodinová sazba výrobních pracovišť

Název operace	Stroj	Hodinová sazba N_{PR} [Kč·h ⁻¹]
Řezání vodním paprskem	FLOW M4-4020C	1420,9
CNC frézka	Makino A61nx-5e	1524,74
CNC frézka	ZPS MCFV 2080	1094,09
Frézka konzolová	FV 20	710,45
Frézka nástrojová	FV40	817,02
Zámečnick	-	609,91

Náklady na seřízení jedné výrobní dávky:

Náklady na seřízení jsou vypočteny dle vzorce č. (10)

$$N_S = N_{PR(VP)} \cdot \frac{t_b(VP)}{60} + N_{PR(FV\ 20)} \cdot \frac{t_b(FV\ 20)}{60} + N_{PR(A61)} \cdot \frac{t_b(A61)}{60} + N_{PR(FV40)} \cdot \frac{t_b(FV40)}{60}$$

$$N_S = 1420,9 \cdot \frac{20}{60} + 710,45 \cdot \frac{30}{60} + 1524,74 \cdot \frac{80 + 55}{60} + 817,02 \cdot \frac{20}{60}$$

$$N_S = 4531,86 \text{ Kč}$$

Přímé výrobní náklady na výrobu jednoho kusu:

Přímé náklady jsou vypočteny dle vzorce č. (11).

$$N_{VN} = N_{PR(VP)} \cdot \frac{t_{a(VP)}}{60} + N_{PR(FV20)} \cdot \frac{t_{a(FV20)}}{60} + N_{PR(A61)} \cdot \frac{t_{a(A61)}}{60} +$$

$$+ N_{PR(FV40)} \cdot \frac{t_{a(FV40)}}{60}$$

$$N_{VN} = 1420,9 \cdot \frac{7,4}{60} + 710,45 \cdot \frac{20}{60} + 1524,74 \cdot \frac{18 + 19,2}{60} + 817,02 \cdot \frac{4,5}{60}$$

$$N_{VN} = 1418,68 \text{ Kč}$$

Výpočet optimální dávky a nákladů výroby na jeden kus:

Optimální výrobní dávka je vypočtena dle vzorce č. (19) přičemž roční náklady na skladování tvoří 7 % z ceny výrobních nákladů na jeden kus a plánovaný roční objem výroby je stanoven na 60 kusů.

$$n_{sd} = 0,07$$

$$Q_R = 60 \text{ ks}$$

$$Q = \sqrt{\frac{2 \cdot Q_R \cdot N_S}{n_{sd} \cdot N_{VN}}}$$

$$Q = \sqrt{\frac{2 \cdot 60 \cdot 4531,86}{0,07 \cdot 1418,68}}$$

$$Q = 74,001 \gg \text{Velikost optimální výrobní dávky je 74 kusů.}$$

Aktuální výrobní série brzdových válců se obvykle realizuje v dávkách o 30 kusech, což je podstatně méně než optimální vypočtená velikost dávky. Abychom mohli provést vzájemné srovnání, je nezbytné vypočítat výrobní náklady pro každou dávku. Tyto náklady jsou vypočteny dle vzorce č. (12).

Výrobní náklady jednoho kusu při současné výrobní dávce:

$$Q = 30$$

$$N_{CV} = N_{VN} + \frac{N_S}{Q}$$

$$N_{CV} = 1418,68 + \frac{4531,86}{30}$$

$$N_{CV} = \mathbf{1569,75 \text{ Kč}}$$

Výrobní náklady jednoho kusu při optimální výrobní dávce:

$$Q = 74$$

$$N_{CV} = 1418,68 + \frac{4531,86}{74}$$

$$N_{CV} = \mathbf{1479,92 \text{ Kč}}$$

Celkové náklady pro výrobu jednoho kusu:

Pro výpočet je využit vzorec č. (21). Cena materiálu je 315 Kč za kilogram.

$$N_C = m \cdot n_m + N_{VN} + \frac{N_S}{Q}$$

$$N_C = 0,5974 \cdot 315 + 1569,75$$

$$N_C = \mathbf{1757,93 \text{ Kč}}$$

Celkové náklady pro výrobu jednoho kusu při optimální výrobní dávce:

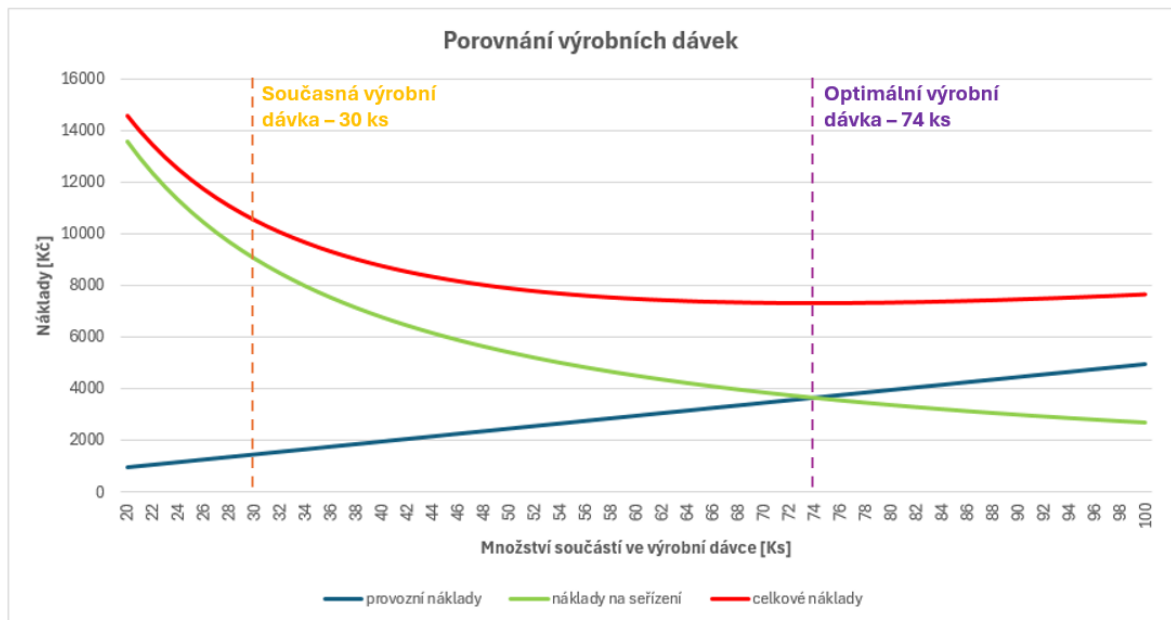
$$N_C = m \cdot n_m + N_{VN} + \frac{N_S}{Q}$$

$$N_C = 0,5974 \cdot 315 + 1479,92$$

$$N_C = \mathbf{1618,1 \text{ Kč}}$$

Zvýšení výrobní dávky na optimální úroveň by umožnilo snížit výrobní náklady o 89,8 Kč na kus, což při celkové roční potřebě 60 kusů představuje celkovou úsporu 5388 Kč. Tento efekt je hlavně způsoben významnými náklady na seřízení při menších výrobních dávkách. Avšak při dalším zvyšování velikosti výrobní dávky, ačkoliv by nadále klesaly výrobní

náklady na kus, začaly by narůstat provozní náklady, zejména kvůli zvýšeným nákladům na skladování. Tím se potvrzuje, že optimalizace velikosti výrobní dávky je důležitá pro efektivitu a ekonomickou výhodnost výrobního procesu.



Obr. 53: Porovnání současné a optimální výrobní dávky

7.5.3 Výpočet nákladů pro výrobu brzdového válce s opravenou normou času

Při revizi stávajícího výrobního postupu byla zjištěna neadekvátní norma času u stroje FV 20. Na základě tohoto zjištění je jednicový čas tohoto pracoviště snížen z 20 na 6,7 minut a přípravný čas z 30 na 20 minut.

Tab. 11: Výrobní postup s opravenou normou času

Op.č.	Název operace	Stroj	Popis operace	Časy [min]	
				t_a	t_b
1	Řezání vodním paprskem	FLOW M4-4020C	Řezat na rozměr 70 x 60 mm	7,4	20
5	Frézka konzolová	FV 20	Úhlovat na rozměr 65 x 55 x 50 mm, odjehlit	6,7	20
10	CNC frézka	Makino A61nx-5e	Obrábět první upnutí dle programu a seřizovacího listu	18	80
20	CNC frézka	Makino A61nx-5e	Obrábět druhé upnutí dle programu a seřizovacího listu	19,2	55
30	Frézka nástrojová	FV40	Odfrézovat upínací přídavek	4,5	20

Náklady na seřízení jedné výrobní dávky:

$$N_S = N_{PR(VP)} \cdot \frac{t_b(VP)}{60} + N_{PR(FV20)} \cdot \frac{t_b(FV20)}{60} + N_{PR(A61)} \cdot \frac{t_b(A61)}{60} + N_{PR(FV40)} \cdot \frac{t_b(FV40)}{60}$$

$$N_S = 1420,9 \cdot \frac{20}{60} + 710,45 \cdot \frac{20}{60} + 1524,74 \cdot \frac{80 + 55}{60} + 817,02 \cdot \frac{20}{60}$$

$$N_S = 4413,46 \text{ Kč}$$

Přímé výrobní náklady na výrobu jednoho kusu:

$$N_{VN} = N_{PR(VP)} \cdot \frac{t_a(VP)}{60} + N_{PR(FV20)} \cdot \frac{t_a(FV20)}{60} + N_{PR(A61)} \cdot \frac{t_a(A61)}{60} +$$

$$+ N_{PR(FV40)} \cdot \frac{t_a(FV40)}{60}$$

$$N_{VN} = 1420,9 \cdot \frac{7,4}{60} + 710,45 \cdot \frac{6,7}{60} + 1524,74 \cdot \frac{18 + 19,2}{60} + 817,02 \cdot \frac{4,5}{60}$$

$$N_{VN} = 1261,19 \text{ Kč}$$

Celkové náklady pro výrobu jednoho kusu:

$$N_C = m \cdot n_m + N_{VN} + \frac{N_S}{Q}$$

$$N_C = 0,5974 \cdot 315 + 1261,19 + \frac{4413,46}{30}$$

$$N_C = 1596,47 \text{ Kč}$$

Rozdíl v celkových nákladech na výrobu mezi původním výrobním postupem a postupem s aktualizovanou časovou normou dosahuje hodnoty 161,44 Kč. Tato nesprávně stanovená časová norma, která byla stanovena po dobu pěti let, mohla při roční produkci 60 kusů vést k celkové finanční ztrátě až 48 432 Kč. Tento náleží zdůrazňuje význam pravidelné revize a aktualizace výrobních postupů k zamezení podobným nesrovnalostem a minimalizaci finančních ztrát.

8 NÁVRH OPTIMALIZACE VÝROBY SOUČÁSTI

Záměrem návrhu je prozkoumat nové metody pro optimalizaci procesů obrábění firmě Evektor. První je vyzkoušení možností optimalizačního softwaru VERICUT a jeho modulu Force. Cílem je zjistit, jak tento software může přispět k efektivnějšímu využití strojového parku, snížení nákladů na výrobu a zvýšení celkové produktivity obrábění a zda je vhodné modul Force zakoupit do firmy. Dále jaký přínos by přinesla optimalizace velikosti výrobních dávek a výrobních postupů, kde hlavním cílem je nalézt nejefektivnější způsob výroby, který minimalizuje časy obrábění a náklady na výrobu.

8.1 Optimalizace NC programu pomocí software VERICUT a jeho modulu Force

VERICUT Force je modul pro optimalizaci NC programů, založený na OBNS metodě, který analyzuje, simuluje a optimalizuje podmínky řezání během operací NC programu. Cílem je vytvořit co nejefektivnější NC program pro daný materiál, řezný nástroj a podmínky obrábění. Výsledkem je významná úspora času a prodloužení životnosti řezných nástrojů a strojů.

Force umožňuje programátorům rychle a snadno vizualizovat, co se děje při každém kontaktu nástroje s materiálem. Uživatelé mohou snadno identifikovat nedostatečně využitě řezné podmínky, nadměrné síly, rychlosti odstraňování materiálu, výkon, kroutící moment a ohyb nástroje.

Modul dokáže optimalizovat jakýkoliv NC program, ať už nový či starý, s použitím jakéhokoli nástroje nebo materiálu. Optimalizace se provádí výpočtem kontaktu mezi nástrojem a materiálem pro každý úsek řezu. Force také zohledňuje geometrii řezného nástroje a materiál, aby upravil posuvy pro optimální a konstantní řezné podmínky.

Katalog materiálů ve Force obsahuje rozsáhlou databázi materiálů s kódováním ISO P M K N S H, což umožňuje aplikovat optimalizaci na širokou škálu materiálů. [43]

8.1.1 Princip analýzy a optimalizace ve Force

Force používá fyzikální metodu optimalizace k optimálnímu nastavení obráběcích posuvů v každém kroku NC programu na základě tří hlavních okrajových podmínek:

- Maximální silové zatížení
- Maximální tloušťka třísky

- Maximální povolený posuv

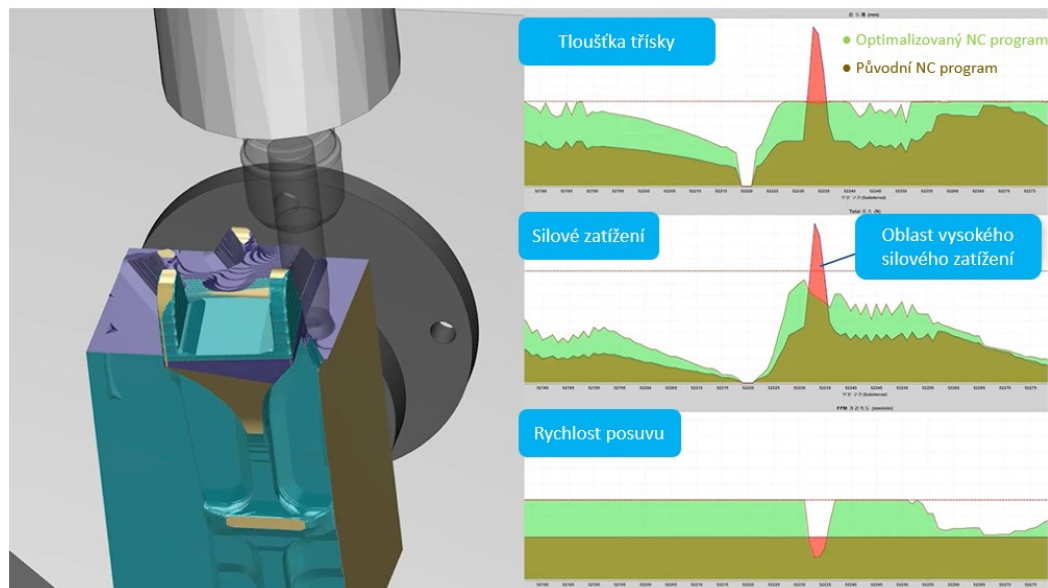
Proces analýzy a optimalizace v modulu Force lze rozdělit do několika klíčových kroků, které umožňují detailně a efektivně optimalizovat obráběcí procesy.

Prvním krokem je shromáždění a definice všech relevantních vstupních parametrů pro daný obráběcí proces. To zahrnuje charakteristiky nástroje, materiálové vlastnosti obrobku, geometrii obrobku a počáteční nastavení obráběcích podmínek, jako jsou otáčky, posuvy a hloubky řezu.

S využitím fyzikálních modelů a numerických simulací Force analyzuje dynamiku řezného procesu. Tato analýza zahrnuje hodnocení silového zatížení a tloušťky třísky.

Na základě analýzy a simulace modul identifikuje optimální řezné podmínky. Cílem je dosáhnout maximální efektivity obrábění při minimalizaci opotřebení nástroje a zachování nebo zlepšení kvality obrobeného povrchu. To může zahrnovat změnu silového zatížení a tloušťky třísky úpravou rychlosti posuvu v řezu nebo zrychlením posuvu nástroje ve vzduchu. [42][43]

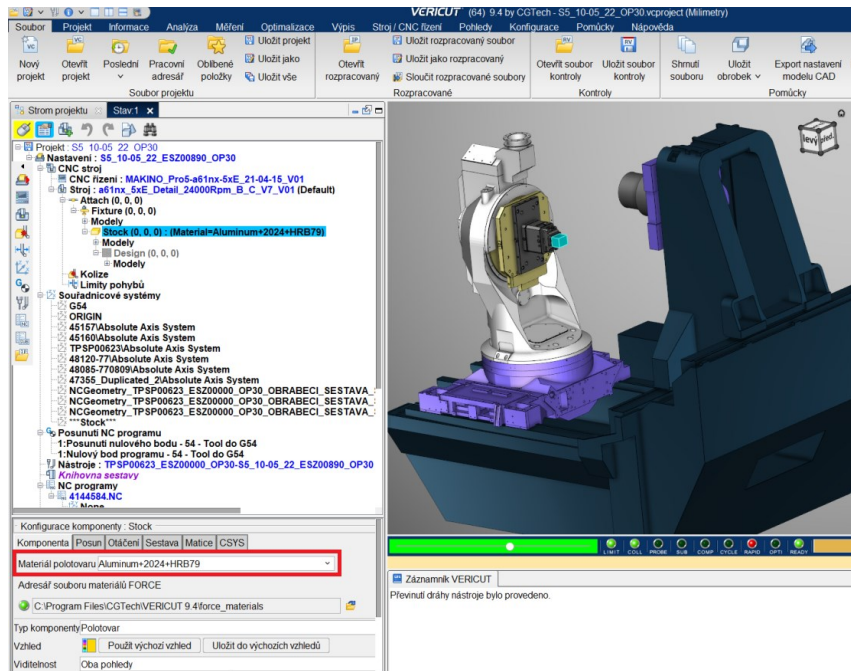
Na Obr. 54 je zobrazen příklad této analýzy a optimalizace. Nejprve je provedena analýza již existujícího NC programu, kdy je zobrazena hodnota tloušťky třísky a silové zatížení v každém kroku tohoto programu (hnědě zobrazené oblasti). Analýza identifikovala vysoké hodnoty tloušťky třísky a silové zátěže v oblasti označené červeně, což je důsledkem toho, že nástroj proniká do rohové části obrobku, jak je zobrazeno na obrázku v simulaci vlevo. Tyto vysoké hodnoty mohou způsobit otupení nástroje, nebo jeho poškození. Po nastavení vhodných okrajových podmínek a spuštění optimalizace vytvoří Force analýzu pro nový, optimalizovaný NC program (zeleně zobrazené oblasti). V kritické oblasti dochází k výraznému snížení posuvu a tím i k redukci silového zatížení a tloušťky třísky na přijatelnou úroveň, čímž se eliminuje riziko výrazného otupení nebo poškození nástroje. V ostatních částech programu dochází naopak ke zvýšení posuvu až do limitů stanovených okrajovými podmínkami, což značně zlepšuje efektivitu obrábění.



Obr. 54: Příklady analýzy a optimalizace pomocí modulu Force [42]

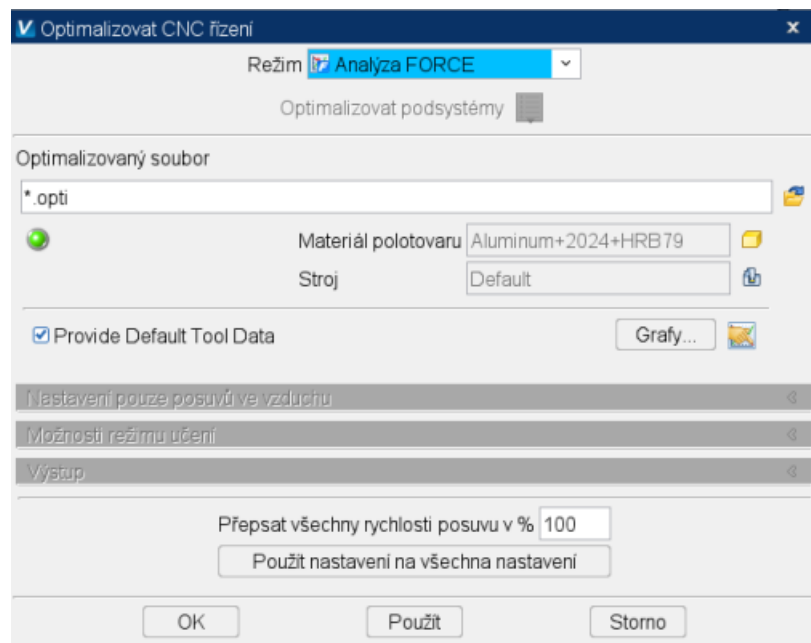
8.1.2 Optimalizace NC programu pro obrábění brzdového válce pomocí VERICUT Force

V úvodní fázi optimalizace je klíčové importovat základní vstupní informace, jako jsou 3D modely, NC programy, souřadnicové systémy nebo databáze nástrojů z CAM softwaru do VERICUTu prostřednictvím interface, což zajišťuje jejich snadný přenos. Pokud byl NC program již dříve zpracován ve VERICUTu, lze proces usnadnit nahráním tohoto uloženého projektu, čímž se eliminuje potřeba opětovného zadávání již známých dat. Následně je důležité správně specifikovat materiál, s nímž se bude pracovat, v tomto případě se jedná o hliníkovou slitinu 2024.



Obr. 55: Nastavení materiálu pro optimalizaci

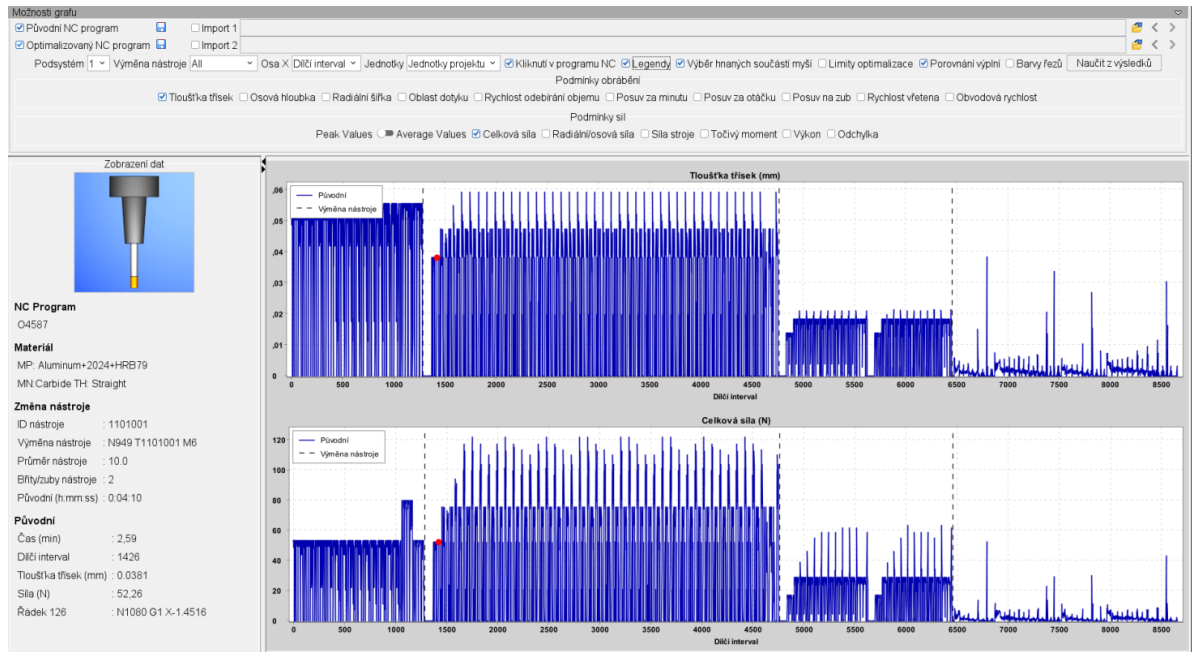
Po nastavení materiálu následuje spuštění analýzy NC programu pomocí modulu Force.



Obr. 56: Spuštění analýzy

Jakmile je analýza dokončena modul Force prezentuje výsledky, zahrnující údaje o tloušťce třísky a silovém zatížení, společně s dalšími relevantními obráběcími parametry nebo podmínkami sil, podle toho, co uživatel preferuje. Tato data mohou být vizualizována pro

kompletní NC program, specifický nástroj nebo pouze pro vybrané části programu, což umožňuje detailní přehled a umožňuje cílenou optimalizaci.



Obr. 57: Prezentace výsledné analýzy

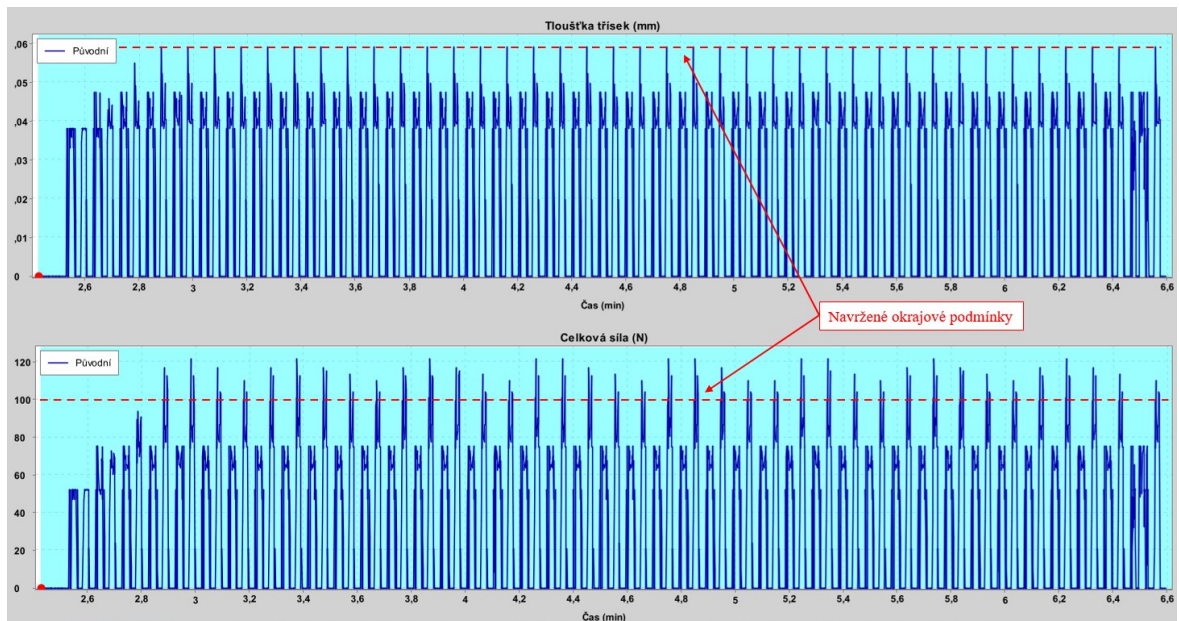
Na základě analýzy jsou poté pro každý nástroj, který má být optimalizován, určeny specifické okrajové podmínky následujícím způsobem:

- **Maximální silové zatížení** – hodnota nastavena tak, aby byly redukovány extrémní silového zatížení nástroje.
- **Maximální tloušťka třísky** – zachována maximální hodnota tloušťky třísky z původního NC programu.
- **Maximální povolený posuv** – základní hodnota posuvu navýšená o 20 %.

Příkladem je zde uvedena optimalizace pro nástroj s identifikačním číslem T11010, nicméně stejná metodika byla aplikována rovněž na všechny další nástroje zapojené do optimalizačního procesu. Nástroje, které mají velmi krátký obráběcí čas, nebo je není nutné optimalizovat, jsou z tohoto procesu vynechány.

Podrobná analýza nástroje T11010 zobrazená na Obr. 58 ukazuje, že síla působící na nástroj se obvykle pohybuje okolo 80 N, ale v některých fázích obrábění pravidelně roste až k 120 N. Pro optimalizaci je tedy vhodné nastavit limit silového zatížení na 100 N. Tímto

krokem se nejen omezí špičkové hodnoty síly, ale také se otevře možnost zvýšit rychlost obrábění u oblastí s nižším silovým zatížením, což povede k efektivnějšímu využití strojového času. Jako horní limit pro tloušťku třísky se určí nejvyšší naměřená tloušťka třísky z originálního NC programu. Tento přístup zaručuje, že při optimalizaci nedojde k jejímu překročení, což zajišťuje ochranu nástroje před potenciálním přetížením.



Obr. 58: Detailní pohled na analýzu nástroje T11010

Maximální tloušťka třísky je tedy nastavena na hodnotu 0,0592 mm, nejvyšší dovolené silové zatížení 100 N a rychlost posuvu je navýšena o 20 % z 3 500 na 4 200 mm·min⁻¹. Dále rychlost ve vzduchu bude navýšena až na 40 000 mm·min⁻¹.

Obr. 59: Nastavení podmínek pro optimalizaci nástroje T11010

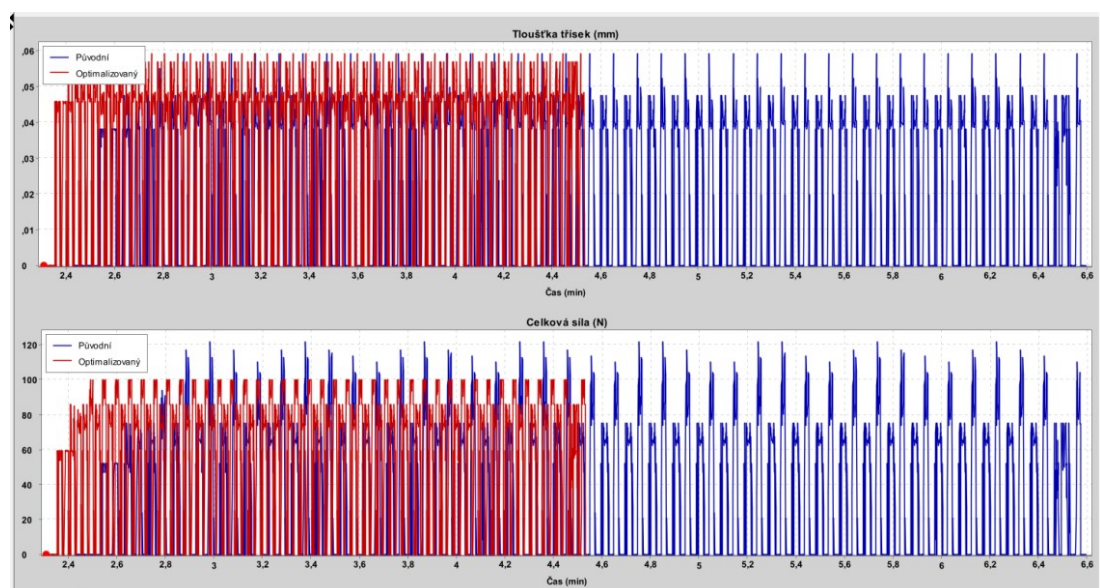
Jakmile jsou optimalizační podmínky nastaveny pro všechny nástroje, zahajuje se proces optimalizace.

Obr. 60. Zahájení optimalizace

Během optimalizace se vytváří nový NC kód na základě stanovených kritérií, následuje simulace a analýza upraveného obráběcího procesu. Po dokončení optimalizace jsou okamžitě prezentovány výsledky, včetně aktualizovaného času obrábění a celkové úspory času v porovnání s původním NC kódem.

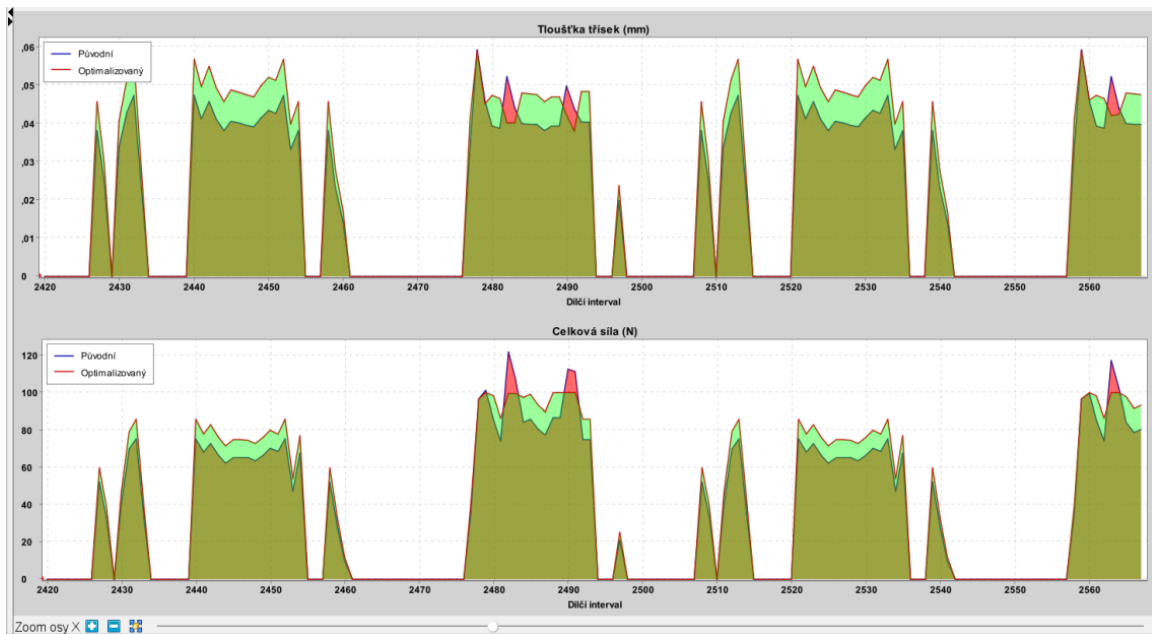
Obr. 61: Výsledek optimalizace

Výsledek lze podrobně analyzovat a porovnávat s původním NC kódem. Na obr. 60 je zobrazeno toto porovnání pro nástroj T11010, kde je jasně patrné, že došlo k výrazné časové úspoře. Původně obrábění trvalo 4,25 minuty, zatímco po optimalizaci se čas snížil na 2,3 minuty. To představuje úsporu času přibližně 46 %, což jasně ukazuje na značné zlepšení efektivity.



Obr. 62: Porovnání původního a optimalizovaného NC kódu pro nástroj T11010

Pro hlubší analýzu a srovnání NC programů je vhodnější na ose X zobrazit dílčí intervaly místo časových hodnot, aby bylo možné přesně porovnat každý krok mezi původním a optimalizovaným NC programem. Na Obr. 63 je prezentována analýza nástroje T11010, kde červené zóny ukazují pokles silového zatížení a tloušťky třísky, což je výsledek snížení rychlosti posuvu až k limitní hodnotě silového zatížení 100 N. V oblastech označených zeleně naopak dochází k nárůstu těchto hodnot v důsledku zvýšené rychlosti posuvu, což přispívá k lepší efektivitě obráběcího procesu.



Obr. 63: Analýza NC programů pro nástroj T11010

Jakým způsobem upravuje modul Force NC kód je zobrazeno na Obr. 64. Zatímco původní kód pracuje s konstantní rychlostí posuvu $3\,500\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, optimalizovaný kód díky Force dynamicky přizpůsobuje rychlost posuvu na základě momentálních hodnot silového zatížení a tloušťky třísky.

Původní NC kód	Optimalizovaný NC kód
%	%
O4587	O4587
N958 (PART NUMBER: S5_10-05_22_ESZ00890_OP30)	N958 (PART NUMBER: S5_10-05_22_ESZ00890_OP30)
N959 (PROGRAM NAME: 4587)	N959 (PROGRAM NAME: 4587)
N960 (DATE: 20.09.2023 / 12:48)	N960 (DATE: 20.09.2023 / 12:48)
N961 (PROGRAMMED BY:)	N961 (PROGRAMMED BY:)
N962 G90	N962 G90
N963 G54	N963 G54
N964 (PROG MODE TILT PLANE)	N964 (PROG MODE TILT PLANE)
N965 (Pocketing.5)	N965 (Pocketing.5)
N966 G91 G28 Z0	N966 G91 G28 Z0
N967 G90	N967 G90
N968 M11M13	N968 M11M13
N969 G0 B90. C0.	N969 G0 B90. C0.
N970 (TABLE ROTATION: B90. C0.)	N970 (TABLE ROTATION: B90. C0.)
N971 G68.2 X0. Y0. Z0. I90. J90. K0.	N971 G68.2 X0. Y0. Z0. I90. J90. K0.
N972 G53.1	N972 G53.1
N973 M12M10	N973 M12M10
N974 G0 X25. Y62.9999	N974 G0 X25. Y62.9999
N975 G0 G43 Z103.5238 H1	N975 G0 G43 Z103.5238 H1
N976 G0 Z73.5238	N976 G0 Z73.5238
N977 G1 Z63.5238 F3500	N977 G1 Z63.5238 F40000
N978 X10.2369 Y42.2228	N978 X10.2369 Y42.2228 F4200
N979 G2 X8.4304 Y42.9339 I-0.8152 J0.5792	N979 G2 X8.4304 Y42.9339 I-0.8152 J0.5792
.	.
.	.
.	.
N2436 G3 X-1.9999 Y28.5866 I1. J0.	N2436 G3 X-1.9999 Y28.5866 I1. J0. F3490
N2437 G1 X-1.4516	N2437 G1 X-1.4516 F3520
N2438 X-1.1928 Y28.6206	N2438 X-1.1928 Y28.6206 F4200
N2439 X9.4434 Y31.4706	N2439 X9.4434 Y31.4706 F2690
N2440 G3 X9.9002 Y31.7381 I-0.2588 J0.9659	N2440 G3 X9.9002 Y31.7381 I-0.2588 J0.9659 F3390
N2441 G2 X40.0998 Y31.7381 I15.0998 J-14.7381	N2441 G2 X40.0998 Y31.7381 I15.0998 J-14.7381 F4200
N2442 G3 X40.5566 Y31.4706 I0.7156 J0.6984	N2442 G3 X40.5566 Y31.4706 I0.7156 J0.6984 F9570
N2443 G1 X51.1928 Y28.6206	N2443 G1 X51.1928 Y28.6206 F4200
N2444 X51.4516 Y28.5866	N2444 X51.4516 Y28.5866
.	.
.	.
.	.

Obr. 64: Porovnání vybraných částí NC kódu pro nástroj T11010

Optimalizace byla provedena stejným postupem pro všechny zvolené nástroje jak v prvním, tak i ve druhém upnutí. Tento proces vedl k časové úspoře 19,5 % u prvního upnutí a 18,9 % u druhého.

Podrobný výpis výsledků je uveden v příloze II a III.

Tab. 12: Časové úspory po optimalizaci NC programu

	Původní čas [min]	Čas po optimalizaci [min]	Úspora času [%]
První upnutí	16,54	13,32	19,5
Druhé upnutí	17,7	14,37	18,9

8.2 Návrh a výběr optimálního výrobního postupu

Pro výrobu brzdového válce jsou navrženy tři různé výrobní postupy, přičemž v každém postupu je aplikován pro obráběcí stroj Makino A61nx-5E optimalizovaný NC program ze software VERICUT. Pro každou strategii je dále stanovena optimální velikost výrobní dávky a jsou kalkulovány výrobní náklady na jeden vyrobený kus. Na základě těchto výpočtů je pak vybrán nejefektivnější výrobní postup.

Pro výpočty je použita sazba pracovišť z Tab. 10, přičemž roční náklady na skladování jsou kalkulovány jako 7 % z celkových výrobních nákladů na jednotlivé součásti. Dále se předpokládá, že roční odbyt těchto součástí činí 60 kusů. Cena materiálu je 315 Kč za kilogram.

8.2.1 Výrobní postup I

První výrobní postup si zachovává původní strukturu, avšak dochází k opravě nesprávně nastavené časové normy pro stroj FV 20 a k aktualizaci výrobních časů na stroji Makino A61nx-5e na základě optimalizačních výsledků. K obou optimalizovaným časům je připočteno 1,5 minuty pro upnutí a kontrolu výrobku.

Tab. 13: Výrobní postup I

Op.č.	Název operace	Stroj	Popis operace	Časy [min]	
				t _a	t _b
1	Řezání vodním paprskem	FLOW M4-4020C	Řezat na rozměr 70 x 60 mm	7,4	20
5	Frézka konzolová	FV 20	Úhlovat na rozměr 65 x 55 x 50 mm, odjehlit	6,7	20
10	CNC frézka	Makino A61nx-5e	Obrábět první upnutí dle programu a seřizovacího listu	14,8	80
20	CNC frézka	Makino A61nx-5e	Obrábět druhé upnutí dle programu a seřizovacího listu	15,9	55
30	Frézka nástrojová	FV40	Odfrézovat upínací přídavek	4,5	20

Náklady na seřízení jedné výrobní dávky:

$$N_S = N_{PR(VP)} \cdot \frac{t_b(VP)}{60} + N_{PR(FV20)} \cdot \frac{t_b(FV20)}{60} + N_{PR(A61)} \cdot \frac{t_b(A61)}{60} + N_{PR(FV40)} \cdot \frac{t_b(FV40)}{60}$$

$$N_S = 1420,9 \cdot \frac{20}{60} + 710,45 \cdot \frac{20}{60} + 1524,74 \cdot \frac{80 + 55}{60} + 817,02 \cdot \frac{20}{60}$$

$$N_S = 4413,46 \text{ Kč}$$

Přímé výrobní náklady na výrobu jednoho kusu:

$$N_{VN} = N_{PR(VP)} \cdot \frac{t_{a(VP)}}{60} + N_{PR(FV20)} \cdot \frac{t_{a(FV20)}}{60} + N_{PR(A61)} \cdot \frac{t_{a(A61)}}{60} +$$

$$+ N_{PR(FV40)} \cdot \frac{t_{a(FV40)}}{60}$$

$$N_{VN} = 1420,9 \cdot \frac{7,4}{60} + 710,45 \cdot \frac{6,7}{60} + 1524,74 \cdot \frac{14,8 + 15,9}{60} + 817,02 \cdot \frac{4,5}{60}$$

$$N_{VN} = 1096,01 \text{ Kč}$$

Výpočet optimální velikosti dávky:

$$Q = \sqrt{\frac{2 \cdot Q_R \cdot N_S}{n_{sd} \cdot N_{VN}}}$$

$$Q = \sqrt{\frac{2 \cdot 60 \cdot 4413,46}{0,07 \cdot 1096,01}}$$

$$Q = 83,08 \gg \text{Velikost optimální výrobní dávky je 83 kusů.}$$

Výrobní náklady jednoho kusu při optimální výrobní dávce:

$$N_{CV} = N_{VN} + \frac{N_S}{Q}$$

$$N_{CV} = 1096,01 + \frac{4413,46}{83}$$

$$N_{CV} = 1149,18 \text{ Kč}$$

Celkové náklady pro výrobu jednoho kusu:

Pro výpočet je využit vzorec č. (21). Jelikož pro výrobní postup není nutné pořizovat žádné speciální nářadí, výpočet zahrnuje pouze náklady na materiál a výrobu. Hmotnost polotovaru je určena pomocí firemního informačního systému SIRIUS.

$$N_C = m \cdot n_m + N_{VN} + \frac{N_S}{Q}$$

$$N_C = 0,5974 \cdot 315 + 1149,18$$

$$N_C = 1337,36 \text{ Kč}$$

Při výrobě v rámci prvního výrobního postupu, kde optimální velikost dávky dosahuje 83 kusů, dosahují celkové náklady 1337,36 Kč za kus.

8.2.2 Výrobní postup II

V rámci druhého výrobního postupu dochází k úpravě přípravy polotovaru – konkrétně k vynechání operace úhlování na stroji FV 20. Nyní je polotovar řezán přímo pomocí vodního paprsku, což s sebou přináší prodloužení času této operace. Tento krok je však nezbytný pro zajištění rozměrové přesnosti a povrchové kvality, které jsou důležité pro bezpečné upnutí polotovaru na následujícím obráběcím stroji. Po vyřezání je polotovar odjehlen zámečnickem.

Tab. 14: Výrobní postup II

Op.č.	Název operace	Stroj	Popis operace	Časy [min]	
				t _a	t _b
1	Řezání vodním paprskem	FLOW M4-4020C	Řezat na rozměr 65 x 55 mm	11,2	20
5	Zámečnick	-	Odjehlit	1,2	5
10	CNC frézka	Makino A61nx-5e	Obrábět první upnutí dle programu a seřizovacího listu	14,8	80
20	CNC frézka	Makino A61nx-5e	Obrábět druhé upnutí dle programu a seřizovacího listu	15,9	55
30	Frézka nástrojová	FV40	Odfrézovat upínací přídavek	4,5	20

Náklady na seřízení jedné výrobní dávky:

$$N_S = N_{PR(VP)} \cdot \frac{t_b(VP)}{60} + N_{PR(ZAM)} \cdot \frac{t_b(ZAM)}{60} + N_{PR(A61)} \cdot \frac{t_b(A61)}{60} + N_{PR(FV40)} \cdot \frac{t_b(FV40)}{60}$$

$$N_S = 1420,9 \cdot \frac{20}{60} + 609,91 \cdot \frac{5}{60} + 1524,74 \cdot \frac{80 + 55}{60} + 817,02 \cdot \frac{20}{60}$$

$$N_S = 4227,46 \text{ Kč}$$

Přímé výrobní náklady na výrobu jednoho kusu:

$$N_{VN} = N_{PR(VP)} \cdot \frac{t_{a(VP)}}{60} + N_{PR(ZAM)} \cdot \frac{t_{a(ZAM)}}{60} + N_{PR(A61)} \cdot \frac{t_{a(A61)}}{60} +$$

$$+ N_{PR(FV40)} \cdot \frac{t_{a(FV40)}}{60}$$

$$N_{VN} = 1420,9 \cdot \frac{11,2}{60} + 609,91 \cdot \frac{1,2}{60} + 1524,74 \cdot \frac{14,8 + 15,9}{60} + 817,02 \cdot \frac{4,5}{60}$$

$$N_{VN} = 1118,87 \text{ Kč}$$

Výpočet optimální velikosti dávky:

$$Q = \sqrt{\frac{2 \cdot Q_R \cdot N_S}{n_{sd} \cdot N_{VN}}}$$

$$Q = \sqrt{\frac{2 \cdot 60 \cdot 4227,46}{0,07 \cdot 1118,87}}$$

$$Q = 80,48 \gg \text{Velikost optimální výrobní dávky je 80 kusů.}$$

Výrobní náklady jednoho kusu při optimální výrobní dávce:

$$N_{CV} = N_{VN} + \frac{N_S}{Q}$$

$$N_{CV} = 1118,87 + \frac{4227,46}{80}$$

$$N_{CV} = 1171,71 \text{ Kč}$$

Celkové náklady pro výrobu jednoho kusu:

$$N_C = m \cdot n_m + N_{CV} + \frac{N_S}{Q}$$

$$N_C = 0,5085 \cdot 315 + 1171,71$$

$$N_C = 1331,89 \text{ Kč}$$

Při výrobě v rámci druhého výrobního postupu, kde optimální velikost dávky dosahuje 80 kusů, dosahují celkové náklady 1331,89 Kč za kus.

8.2.3 Výrobní postup III

Ve třetím výrobním postupu zůstává příprava polotovaru stejná jako v postupu druhém. Jedinou změnou je přesun operace, která zajišťuje odfrézování upínacího přídatku, z frézky FV 40 na obráběcí centrum ZPS MCFV 2080.

Tab. 15: Výrobní postup III

Op.č.	Název operace	Stroj	Popis operace	Časy [min]	
				t _a	t _b
1	Řezání vodním paprskem	FLOW M4-4020C	Řezat na rozměr 65 x 55 mm	11,2	20
5	Zámečnick	-	Odjehlit	1,2	5
10	CNC frézka	Makino A61nx-5e	Obrábět první upnutí dle programu a seřizovacího listu	14,8	80
20	CNC frézka	Makino A61nx-5e	Obrábět druhé upnutí dle programu a seřizovacího listu	15,9	55
30	CNC frézka	ZPS MCFV 2080	Odfrézovat upínací přídatek	2,2	30

Náklady na seřízení jedné výrobní dávky:

$$N_S = N_{PR(VP)} \cdot \frac{t_b(VP)}{60} + N_{PR(ZAM)} \cdot \frac{t_b(ZAM)}{60} + N_{PR(A61)} \cdot \frac{t_b(A61)}{60} + N_{PR(MCFV)} \cdot \frac{t_b(MCFV)}{60}$$

$$N_S = 1420,9 \cdot \frac{20}{60} + 609,91 \cdot \frac{5}{60} + 1524,74 \cdot \frac{80 + 55}{60} + 1094,09 \cdot \frac{30}{60}$$

$$N_S = 4502,17 \text{ Kč}$$

Přímé výrobní náklady na výrobu jednoho kusu:

$$N_{VN} = N_{PR(VP)} \cdot \frac{t_a(VP)}{60} + N_{PR(ZAM)} \cdot \frac{t_a(ZAM)}{60} + N_{PR(A61)} \cdot \frac{t_a(A61)}{60} +$$

$$+ N_{PR(MCFV)} \cdot \frac{t_{a(MCFV)}}{60}$$

$$N_{VN} = 1420,9 \cdot \frac{11,2}{60} + 609,91 \cdot \frac{1,2}{60} + 1524,74 \cdot \frac{14,8 + 15,9}{60} + 1094,09 \cdot \frac{2,2}{60}$$

$$N_{VN} = 1097,71 \text{ Kč}$$

Výpočet optimální velikosti dávky:

$$Q = \sqrt{\frac{2 \cdot Q_R \cdot N_S}{n_{sd} \cdot N_{VN}}}$$

$$Q = \sqrt{\frac{2 \cdot 60 \cdot 4502,17}{0,07 \cdot 1097,71}}$$

$$Q = 83,85 \gg \text{Velikost optimální výrobní dávky je 84 kusů.}$$

Výrobní náklady jednoho kusu při optimální výrobní dávce:

$$N_{CV} = N_{VN} + \frac{N_S}{Q}$$

$$N_{CV} = 1097,71 + \frac{4502,17}{84}$$

$$N_{CV} = 1151,31 \text{ Kč}$$

Celkové náklady pro výrobu jednoho kusu:

$$N_C = m \cdot n_m + N_{VN} + \frac{N_S}{Q}$$

$$N_C = 0,5085 \cdot 315 + 1151,31$$

$$N_C = 1311,49 \text{ Kč}$$

Při výrobě v rámci třetího výrobního postupu, kde optimální velikost dávky dosahuje 84 kusů, dosahují celkové náklady 1311,49 Kč za kus.

8.2.4 Výběr optimálního výrobního postupu

V Tab. 16 jsou shrnuty a posouzeny náklady pro navrhované výrobní postupy, porovnávané s revidovaným původním postupem. Tento přístup zajišťuje, že konečné výsledky nejsou zkresleny nesprávně stanovenou normou času.

Tab. 16: Ekonomické vyhodnocení jednotlivých výrobních postupů

	Původní postup s opravenou normou	Postup I	Postup II	Postup III
Náklady na výrobu [Kč]	1596,47	1337,36	1331,89	1311,49
Úspora [Kč]	-	259,11	264,58	284,98
Úspora [%]	-	16,23	16,57	17,85

Analýza odhalila, že výrobní postup III přináší nejnižší náklady, což jej činí potenciálně optimální volbou pro výrobu brzdového válce. Přestože je tento postup nejvýhodnější z hlediska nákladů, vyžaduje vytvoření nového NC programu pro stroj ZPS MCFV 2080. To se však střetává s aktuálními omezeními firmy, která neplánuje v dohledné době zapojit do optimalizačních procesů CNC programátory kvůli jejich současné pracovní zátěži. Vzhledem k těmto okolnostem byl jako nejadekvátnější výběr pro implementaci určen výrobní postup II, který představuje nejlepší kompromis mezi nákladovou efektivitou a operativními omezeními firmy.

Při podrobnějším pohledu na výsledky nákladů jednotlivých navrhovaných výrobních postupů odhalíme, že rozdíly mezi nimi jsou minimální. Tato situace nám poskytuje flexibilitu v tom, že podle momentálních potřeb a okolností můžeme tyto postupy vzájemně zaměňovat. Například, v případě, že pracoviště pro řezání vodním paprskem čelí vysoké zátěži, ukáže se jako přínosný postup I, který zde vyžaduje podstatně méně času ve srovnání s postupem II. Dále, pokud by společnost přehodnotila svá aktuální omezení a umožnila vytváření nových NC kódů pro optimalizaci, stává se nejlepší volbou postup III. Tato flexibilita výběru mezi postupy umožňuje firmě efektivně reagovat na proměnlivé podmínky a maximalizovat výrobní efektivnost.

9 POROVNÁNÍ A VYHODNOCENÍ PŘÍNOSŮ OPTIMALIZACE SOUČÁSTI

Pro vyhodnocení je použit výrobní postup II, který je momentálně určen jako neoptimálnější varianta pro výrobu součásti. Tento postup je porovnáván s revidovaným původním postupem, kde byly aktualizovány špatně určené normy, aby se předešlo zkreslení hodnocení optimalizace. Kalkulace nákladů vychází z původního objemu výrobní dávky 30 kusů a z optimalizované dávky 80 kusů, jež byla identifikována jako optimální na základě výpočtu. Pro výpočet roční úspory je určena spotřeba brzdového válce na 60 kusů ročně.

9.1 Vyhodnocení nákladů pro seřízení na jeden kus

Náklady na seřízení jedné dávky v původním výrobním procesu dosahují 4413,46 Kč, zatímco po optimalizaci klesají na 4227,46 Kč. Tím se dosahuje úspory ve výši 186 Kč na dávku, což představuje 4,2 % snížení. Avšak po rozpočítání nákladů dle určených výrobních dávek se ukazuje, že je tato úspora 94,27 Kč na kus, tedy 64,1 %.

Tab. 17: Vyhodnocení nákladů na seřízení

	Náklady na seřízení dávky	Náklady na seřízení jednoho kusu
Původní postup (dávka 30 ks) [Kč]	4413,46	147,12
Postup II (dávka 80 ks) [Kč]	4227,46	52,84
Finanční úspory optimalizace [Kč]	186	94,27
Finanční úspory optimalizace [%]	4,2	64,1

Celková roční úspora tak činí 5893,2 Kč, přičemž zcela zásadní podíl na této úspoře má výběr optimální velikosti dávky.

9.2 Vyhodnocení výrobních nákladů jednoho kusu

Náklady na výrobu jednoho kusu u původní výroby činí 1261,19 Kč, po optimalizaci klesají na 1118,87 Kč. To představuje úsporu 142,28 Kč na kus, což je snížení o 11,3 %.

Tab. 18: Vyhodnocení výrobních nákladů na kus

	Výrobní náklady jednoho kusu
Původní postup [Kč]	1261,19
Postup II [Kč]	1118,87
Finanční úspory optimalizace [Kč]	142,28
Finanční úspory optimalizace [%]	11,3

Celková roční úspora na výrobních nákladech tak činí 8536,8 Kč, přičemž největší podíl na této úspoře má optimalizace provedená softwarem VERICUT. Tato optimalizace je v další části práce vyhodnocena podrobněji. Na druhou stranu, ve srovnání s původním postupem dochází k nárůstu nákladů na řezání vodním paprskem kvůli prodloužení výrobního času této specifické operace.

9.3 Přínos optimalizace NC kódu pomocí VERICUT Force

Celkový čas obrábění původní výroby na stroji Makino A61nx-5E je 34,24 minut. Po optimalizaci NC kódů pomocí VERICUT Force je obráběcí čas snížen o 6,55 minut, což je úspora 19,1 %.

Tab. 19: Vyhodnocení časových úspor obrábění na stroji Makino A61nx-5E

	Celkový čas obrábění
Původní postup [min]	34,24
Postup II [min]	27,69
Časové úspory optimalizace [min]	6,55
Časové úspory optimalizace [%]	19,1

Při hodinové sazbě stroje 1524,74 Kč za hodinu je finanční úspora 166,45 Kč na jeden kus. Roční přínos této optimalizace tedy je 9987 Kč.

9.4 Vyhodnocení celkových časových úspor

Po optimalizaci se celkový výrobní čas součásti snížil z 55,8 minut na 47,6 minut, což představuje úsporu času o 14,7 %. U celkových přípravných časů došlo k poklesu o 15 minut, což znamená snížení o 7,7 %.

Tab. 20: Vyhodnocení časových úspor optimalizace

	Celkové výrobní časy na kus	Celkové přípravné časy na dávku	Celkový čas na jeden kus
Původní postup (dávka 30 ks) [min]	55,8	195	62,3
Postup II (dávka 80 ks) [min]	47,6	180	49,85
Časové úspory optimalizace [min]	8,2	15	12,45
Časové úspory optimalizace [%]	14,7	7,7	20

Po přepočtu přípravných časů dle určených dávek na jeden kus a jejich sečtení s výrobními časy se celkový čas potřebný k výrobě jednoho kusu zkrátil o 12,45 minut, což představuje pokles o 20 %.

9.5 Vyhodnocení celkových nákladů pro výrobu jednoho kusu

Celkové výrobní náklady jednoho kusu u původní výroby činí 1596,47 Kč, zatím co po provedené optimalizaci klesají na 1331,89 Kč. Tím dochází k úspoře 264,58 Kč na kus, což je snížení o 16,6 %.

Tab. 21: Vyhodnocení celkových nákladů pro výrobu jednoho kusu

	Celkové náklady na výrobu jednoho kusu
Původní postup [Kč]	1596,47
Postup II [Kč]	1331,89
Finanční úspory optimalizace [Kč]	264,58
Finanční úspory optimalizace [%]	16,6

Z pohledu celkových výrobních nákladů přináší komplexní optimalizace výroby brzdového válce roční finanční úsporu 15 874,8 Kč.

9.6 Diskuse výsledků optimalizace

Analýza výsledků práce odhalila významné přínosy optimalizace výrobních procesů součástí, konkrétně brzdového válce. Srovnáním optimalizovaného výrobního postupu II s aktualizovaným původním postupem, se objevují značné úspory jak v časech výroby, tak ve finančních nákladech.

Celkové výrobní náklady na jeden kus byly sníženy o 264,58 Kč na hodnotu 1331,89 Kč, což představuje úsporu ve výši 16,6 %. V oblasti výrobních časů dochází ke zkrácení celkového času potřebného na výrobu jednoho kusu o 12,45 minuty na 49,85 minut, což znamená 20 % úsporu času. Tento výsledek podtrhuje efektivitu a význam navrhované optimalizace pro výrobní procesy.

Zásadní přínos pro optimalizaci přináší software VERICUT a jeho modul Force. Jeho použití k optimalizaci NC kódů vedlo k snížení obráběcího času o 19,1 %, a tím snížení nákladů na obrábění jednoho kusu o 166,45 Kč a roční úsporu až 9987 Kč. Další nejpřínosnější optimalizací je snížení seřizovacích nákladů pomocí optimalizace velikosti výrobní dávky. Díky tomu jsou sníženy náklady na seřízení o 64,1 %, což přináší úsporu 64,27 Kč na kus a 5656,8 Kč za rok. Tyto výsledky jasně ukazují, že efektivní využití softwaru VERICUT a promyšlené plánování výrobních dávek může znamenat značné finanční a časové úspory ve výrobním procesu.

Velkou výhodou optimalizace pomocí software VERICUT je možnost optimalizovat obrábění procesy, aniž by byl nutný zásah do výrobního postupu nebo NC kódu. To splňuje požadavky firmy Evektor a ukazuje cestu, jak by firma mohla efektivně optimalizovat své výrobní procesy. Přestože využití VERICUTu přináší značné výhody v podobě snížení nákladů a časů na obrábění, je důležité vzít v úvahu počáteční investici do tohoto softwaru. Výpočet návratnosti investice by měl zohlednit nejen bezprostřední úspory z optimalizace, ale i dlouhodobější přínosy, jako jsou úspory při větší životnosti nástrojů, které optimalizace umožní.

Optimalizace velikosti výrobních dávek je dalším klíčovým faktorem pro zvýšení efektivity a snížení nákladů ve výrobních procesech společnosti. Tento přístup umožňuje nejen efektivnější využití výrobních kapacit, ale také vede k významným úsporám tím, že

minimalizuje časy potřebné pro přestavby a seřízení strojů. Jednou z hlavních výzev při optimalizaci výrobních dávek je najít rovnováhu mezi snížením nákladů na seřízení a redukcí provozních nákladů, které se mohou zvýšit s rostoucími objemy výrobních dávek. Je tedy třeba pečlivě zvážit, jak velikost dávek ovlivní celkové provozní náklady, včetně skladování a manipulace s materiálem.

Na závěr je také důležité zdůraznit význam pravidelné revize výrobních postupů, což je zásadní pro zachování efektivity a konkurenceschopnosti výrobních procesů. Jak ukázal příklad nesprávně stanovených norem při analýze původní výroby brzdového válce, bez pravidelného přehodnocování a aktualizace postupů mohou vznikat nejen finanční ztráty, ale také může dojít ke ztrátě výrobní efektivity. Pravidelná kontrola a aktualizace výrobních norem a postupů pomáhá identifikovat potenciální nedostatky a umožňuje rychlou adaptaci na technologické změny a nové poznatky v oblasti výrobních technologií. Tím se nejen zajišťuje udržitelnost výrobních procesů, ale také se podporuje neustálé zlepšování a inovace.

ZÁVĚR

V této diplomové práci byly prozkoumány a aplikovány metody optimalizace výrobních procesů s cílem zvýšit efektivitu a snížit náklady na výrobu brzdového válce ve společnosti Evekto spol. s r.o. Práce odhalila nejen konkrétní příležitosti pro snížení nákladů a zvýšení produkční efektivity, ale také ukázala směr, jakým může firma dále optimalizovat své výrobní procesy.

Analýza a aplikace softwaru VERICUT, konkrétně jeho modulu Force, pro optimalizaci NC kódů odhalila významný potenciál pro snížení obráběcího času a souvisejících výrobních nákladů. Z této analýzy vyplývá, že optimalizací lze dosáhnout úspory času při obrábění brzdového válce o 19,1 % a finanční úspory ve výši až 9987 Kč ročně.

Dále byl zdůrazněn význam správného určení velikosti výrobních dávek. Optimalizace velikosti dávky vedla k výraznému snížení nákladů na seřízení pro výrobu brzdového válce o 64,1 %, což umožnilo úsporu ve výši 5656,8 Kč ročně. Tento přístup zvýšil celkovou výrobní efektivitu a přispěl k dalšímu snížení nákladů.

Celkově představuje komplexní optimalizace výrobního procesu brzdového válce roční úsporu ve výši přibližně 15 643,8 Kč. K této finanční úspoře přispěla redukce celkového výrobního času o 12,45 minut na kus, což představuje snížení o 20 %. Na úrovni jednoho kusu byly náklady sníženy o 264,58 Kč, což znamená úsporu 16,6 % oproti původnímu stavu.

Jedním z dalších klíčových zjištění je, že úspěšná implementace optimalizačních strategií vyžaduje nejen použití pokročilých technologických nástrojů, ale i pečlivou přípravu a analýzu výrobních procesů. Z toho důvodu je zásadní pravidelně revidovat a aktualizovat výrobní postupy a normy, aby se předešlo zbytečným výdajům a zajišťovala efektivita a konkurenceschopnost výroby.

Závěrem lze říci, že tato práce nejen potvrzuje význam optimalizace ve výrobních procesech, ale také ukazuje konkrétní přínosy, které mohou být z těchto optimalizací získány. Výsledky práce nabízejí směr, jak mohou být podobné metody a technologie úspěšně implementovány ve výrobních společnostech, s cílem zlepšit výrobní procesy, snížit náklady a zvýšit celkovou výrobní efektivitu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE I* [online]. VUT v Brně: Fakulta strojního inženýrství, 2003 [cit. 2024-01-09]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-1cast.pdf
- [2] BÍLEK, Ondřej a Imrich LUKOVICS. *Výrobní inženýrství a technologie*. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, 2014. ISBN 978-807-4544-712.
- [3] GRZESIK, Wit. *Advanced machining processes of metallic materials theory, modelling and applications* [online]. Oxford: Elsevier, 2008 [cit. 2024-01-09]. ISBN 978-0-08-055749-6. Dostupné z: <https://app-knovel-com.proxy.k.utb.cz/kn/resources/kpAMPMMTM1/toc>
- [4] KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-807-2047-222.
- [5] YE, Ronan. *What is a Milling Machine: Definition, History, Types & Characteristics: Definition, History, Types* [online]. 2023 [cit. 2024-01-22]. Dostupné z: <https://www.3erp.com/blog/milling-machine/>
- [6] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Úvod do teorie obrábění*. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3013-1.
- [7] STEPHENSON, David A. a John S. AGAPIOU. *Metal Cutting Theory and Practice*. Third Edition. CRC Press, 2016. ISBN 978-1-4665-8754-0.
- [8] ŠTULPA, Miloslav. *Technologie obrábění: CNC soustružení, frézování, vrtání : pro praxi*. Praha: Grada Publishing, 2022. ISBN 978-80-271-2883-9.
- [9] HOFFMAN, Peter J., Eric S. HOPEWELL a Brian JANES. *Precision machining technology*. 2nd ed. New York: Cengage Learning, 2015. ISBN 978-1-2854-4454-3.
- [10] *Vertical Mill Metal Milling Machine with 2-Axis* [online]. In: GMC MACHINE TOOLS CORP. [cit. 2024-01-25]. Dostupné z: <https://www.gmcmachinetools.com/product-page/vertical-milling-machine-GMM-1054VPKG>
- [11] *Horizontal Milling Machine Basics: Definition, Features, Construction & How Does It Work* [online]. In: JUNYING METAL MANUFACTURING CO. 2020 [cit. 2024-01-25]. Dostupné z: <https://www.cnclathing.com/guide/horizontal-milling-machine-basics-definition-features-construction-how-does-it-work-cnclathing>
- [12] *Universal Milling Machine* [online]. In: SHANDONG TSINFA CNC EQUIPMENT CO. [cit. 2024-01-25]. Dostupné z: https://www.tsinfa.com/universal-milling-machine/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQiAqsitBhDIARIsAGMR1RibzFR-8Vd1EQ5I3_7xUYySoALgR1r-2MJWI92WlCIMyhwdYyNKeQQaAj6mEALw_wcB
- [13] *DMU 50* [online]. DMG MORI. 2024 [cit. 2024-01-25]. Dostupné z: <https://en.dmgmori.com/products/machines/milling/5-axis-milling/dmu/dmu-50>
- [14] Column and Knee Type Milling Machine. In: *Engineers gallery* [online]. 2016 [cit. 2024-01-25]. Dostupné z: <https://www.engineersgallery.com/column-knee-type-milling-machine/>

- [15] *STANDARD UB-1500 Bed Type Universal Milling Machine* [online]. In: STANDARD DIRECT. 2024 [cit. 2024-01-25]. Dostupné z: <https://www.stdmt.com/products/ub-1500>
- [16] BOLJANOVIC, Vukota. *Metal Shaping Processes - Casting and Molding; Particulate Processing; Deformation Processes; and Metal Removal*. New York: Industrial Press, 2010. ISBN 978-0-8311-3380-1.
- [17] *Planer Type Milling Machine* [online]. In: . 2018 [cit. 2024-01-25]. Dostupné z: <https://shubmachinery.com/wp-content/uploads/2018/05/38301-104438@640.jpg>
- [18] Metal cutting knowledge. *Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2024-01-23]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge>
- [19] MONKA, Peter P. *Technologie II: Výpočetní vztahy*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2022.
- [20] BRYCHTA, Josef. *Progresivní technologie v obrábění a NC programování obráběcích strojů*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-802-4835-228.
- [21] KIEF, Hans B., Helmut A. ROSCHI WAL a Karsten SCHWARZ. *The CNC handbook*. South Norwalk, Connecticut: Industrial Press, 2022. ISBN 978-0-8311-3636-9.
- [22] SMID, Peter. *CNC Programming Handbook*. Third Edition. New York: Industrial Press, 2007. ISBN 0-8311-3347-3.
- [23] VITRALAB. *Příručka CNC programování* [online]. [cit. 2024-01-26]. Dostupné z: http://www.sjf.tuke.sk/vitralab/upload/CNC%20prirucka_CZ.pdf. Leonardo da Vinci Programme LLP/LDV/TOI/2009/SK/93100530. Strojírenská Fakulta TUKE.
- [24] SADÍLEK, Marek. *Počítačová podpora výroby*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2738-4.
- [25] BRYCHTA, Josef. *Progresivní technologie v obrábění a NC programování obráběcích strojů*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3522-8.
- [26] DUDA, Jan, Sylwester OLESZEK a Krzysztof SANTAREK. *Product Lifecycle Management (PLM) in the Context of Industry 4.0* [online]. Springer, Cham, 2022 [cit. 2024-03-04]. ISBN 978-3-030-99310-8. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1007/978-3-030-99310-8_14](https://doi.org/10.1007/978-3-030-99310-8_14)
- [27] PLM – integrační prvek podnikové IT infrastruktury. *CAD.cz* [online]. 2009 [cit. 2024-03-04]. Dostupné z: <https://www.cad.cz/pdmpm/86-pdmpm/1852-plm-integracni-prvek-podnikove-it-infrastruktury.html>
- [28] RAUF, Bobby S. *Finance and Accounting for Energy Engineers & Engineers in All Disciplines*. Second edition. Denmark: River Publishers, 2023. ISBN 978-8-77-022351-5.
- [29] SLACK, Nigel, Alistair BRANDON-JONES a Robert JOHNSTON. *OPERATIONS MANAGEMENT*. Seventh edition. United Kingdom: Pearson Education Limited, 2013. ISBN 978-0-273-77620-8.
- [30] KIRAN, D. R. *Production Planning and Control - A Comprehensive Approach*. United Kingdom: Butterworth-Heinemann, 2019. ISBN 978-0-1281-8364-9.
- [31] KIRAN, D. R. *Principles of Economics and Management for Manufacturing Engineering*. United Kingdom: Butterworth-Heinemann, 2022. ISBN 978-0-323-99862-8.
- [32] MONKA, Peter P. *Teorie procesů*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. 2023.

- [33] ZEMČÍK, Oskar. *Technologická příprava výroby*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. ISBN 80-214-2219-X.
- [34] JASCO, Adam a et al. *Investigation of conventional and ANN-based feed rate scheduling methods in trochoidal milling with cutting force and acceleration constraints* [online]. 2023 [cit. 2024-03-15]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/s00170-023-11506-x>
- [35] XIONG, Yao a et al. *Machining process parameters optimization for heavy-duty CNC machine tools in sustainable manufacturing* [online]. London: Springer-Verlag, 2016 [cit. 2024-03-15]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/s00170-013-4881-5>
- [36] RAO, R. Venkata a P.J. PAWAR. *Parameter optimization of a multi-pass milling process using non-traditional optimization algorithms* [online]. Elsevier, 2009 [cit. 2024-04-10]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2009.08.007>
- [37] JIEJUN XIE, Jiejun a et al. *Multi-objective feed rate optimization of three-axis rough milling based on artificial neural network* [online]. Springer-Verlag, 2021 [cit. 2024-04-10]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/s00170-021-06902-0>
- [38] YANG, Jixiang. *A feedrate scheduling algorithm to constrain tool tip position and tool orientation errors of five-axis CNC machining under cutting load disturbances* [online]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2018 [cit. 2024-04-10]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2018.08.005>
- [39] ANSYS [online]. ANSYS, INC. 2024 [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: <https://www.ansys.com/>
- [40] MATLAB [online]. THE MATHWORKS, INC. 2024 [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- [41] ATTAWAY, Stormy. *MATLAB - A Practical Introduction to Programming and Problem Solving*. 5th. Butterworth-Heinemann, 2019. ISBN 978-0-12-815479-3.
- [42] Vericut [online]. AXIOM TECH S.R.O. [cit. 2024-03-12]. Dostupné z: <https://www.axiomtech.cz/24753-vericut>
- [43] About VERICUT [online]. CGTECH. [cit. 2024-03-12]. Dostupné z: <https://cgtech.com/products/about-vericut.html>
- [44] ZENG, ZHOU a et al. *Optimization of Numerical Control Program and Machining Simulation Based on VERICUT* [online]. 2019. Shanghai Jiao Tong University, 2019 [cit. 2024-03-15]. ISBN 978-1-7281-9768-5. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/s12204-019-2109-z>
- [45] About us [online]. EVEKTOR. 2022 [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://www.evektor.com/company/about-us>
- [46] Harmony LSA [online]. EVEKTOR. 2022 [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://www.evektor.com/aircraft-products/harmony-lsa>
- [47] FLOW M4-4020C. Verze B. Evektor, 2017.
- [48] Frézka FV 20. Verze A. Evektor, 2016.
- [49] Frézka FN40. Verze A. Evektor, 2016.
- [50] ZPS MCFV 2080. Verze A. Evektor, 2016.
- [51] MAKINO A61nx. Verze D. Evektor, 2021.
- [52] SIRIUS - informačný systém pre výrobné firmy [online]. VYRSOFT S.R.O. 2007 [cit. 2024-03-12]. Dostupné z: <http://www.vyrsoft.sk/informacny-system-SIRIUS.html>
- [53] TPV výpočty [online]. JUREČEK, Radek. [cit. 2024-03-12]. Dostupné z: <https://www.rjurecek.cz/tpv-vypocty/>

- [54] *CATIA V5* [online]. DASSAULT SYSTÈMES. 2024 [cit. 2024-03-12]. Dostupné z:
<https://www.3ds.com/products/catia/catia-v5>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

NC	Numerical control
CNC	Computer numerical control
DNC	Direct numerical control
CIM	Computer integrated manufacturing
PLM	Product life management
CAD	Computer aided design
CAM	Computer aided manufacturing
CAE	Computer aided engineering
HSC	High speed cutting
a_p	hloubka řezu [mm]
a_e	šířka řezu [mm]
D	průměr nástroje [mm]
f_z	posuv na zub [$\text{mm} \cdot \text{zub}^{-1}$]
z	počet zubů
f	posuv na otáčku [$\text{mm} \cdot \text{ot}^{-1}$]
s	sekunda
min	minuta
h	hodina
ot	otáčky
K_s	měrná řezná síla [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$]
A	plocha řezu [mm^2]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Soustava obrábění (SNOP) [5]	13
Obr. 2: Základní plochy obrobku při podélném soustružení [4].....	14
Obr. 3: Hlavní a posuvový pohyb u vybraných metod obrábění [6]	15
Obr. 4: Pohyby nástroje při podélném soustružení. 1) směr hlavního pohybu, 2) směr řezného pohybu, 3) směr posuvového pohybu, 4) uvažovaný bod ostří. [4].....	16
Obr. 5: Realizace řezného procesu: a) ortogonální řezání, b) obecné řezání [6].....	17
Obr. 6: Vznik třísky [6].....	18
Obr. 7: Oblasti plastických deformací v zóně řezání [6]	19
Obr. 8: Klasifikace třísek: a) nespojitá, b) elementární, c) segmentová, d) spojitá [6]	20
Obr. 9: Vertikální frézka [10]	21
Obr. 10: Horizontální frézka [11]	22
Obr. 11: Různá nastavení polohy vřetene univerzální frézky [12]	22
Obr. 12: CNC frézka [13]	23
Obr. 13: Sloupová frézka [14]	23
Obr. 14: Ložová frézka [15]	24
Obr. 15: Portálová frézka [17]	24
Obr. 16: Příklady čelního frézování: a) klasické čelní frézování, b) částečné čelní frézování, c) rohové frézování. [16]	25
Obr. 17: Příklady válcového frézování: a) frézování ploch, b) drážkování, c) oboustranné frézování, d) hromadné frézování [16]	26
Obr. 18: Sousledné frézování [18].....	27
Obr. 19: Nesousledné frézování [18].....	28
Obr. 20: ISO a EIA formát děrné pásky [22].....	31
Obr. 21: Příklad systému DNC [21]	33
Obr. 22: Definování kartézských souřadnic – pravotočivá soustava [23]	34
Obr. 23: Struktura bloku a slova NC programu [20]	35
Obr. 24: Příklad formátů bloku [20]	36
Obr. 25: Proces vývoje výrobku při použití CAD/CAM systémů [24]	37
Obr. 26: Hierarchie výroby součásti pomocí CAD/CAM systémů [20].....	38
Obr. 27: Schéma výroby integrované počítačem [20]	40
Obr. 28: Základní schéma PLM [27]	42
Obr. 29: Příklady výpočtu hlavního času pro různé výrobní technologie [19].....	45
Obr. 30: Grafické znázornění způsobu určení optimální výrobní dávky z ekonomického hlediska [32]	49
Obr. 31: Rámcové schéma výběru optimálního výrobního postupu [33].....	52

Obr. 32: Náklady na výrobu jednoho kusu v závislosti na objemu výrobní dávky [32]	53
Obr. 33: Analýza proudění kapalin pomocí software ANSYS [39]	61
Obr. 34: Prostředí software MATLAB App Designer [40]	63
Obr. 35: Digitální dvojče obráběcího stroje vytvořené pomocí software VERICUT [42] ..	65
Obr. 36: Simulace CNC obrábění [42]	66
Obr. 37: Funkce modulu OptiPath [42]	67
Obr. 38: Optimalizace obrábění pomocí modulu FORCE [42]	68
Obr. 39: Kontrola pomocí modulu Auto-Diff – červené oblasti označují podřezání, modré oblasti zbylý materiál [42]	68
Obr. 40: Letoun Harmony LSA vyráběný firmou Evektor [46]	73
Obr. 41: Vodní paprsek FLOW M4-4020C [47]	75
Obr. 42: Frézka FV 20 [48]	76
Obr. 43: Frézka FN40 [49]	77
Obr. 44: Obráběcí centrum ZPS MCFV 2080 [50]	78
Obr. 45: Obráběcí centrum A61nx-5E [51]	79
Obr. 46: 3D model brzdového válce	81
Obr. 47: Vyřezaný polotovár na vodním paprsku	82
Obr. 48: Úhlování polotovaru na konzolové frézce FV20	82
Obr. 49: První upnutí na CNC frézce Makino A61nx-5e	83
Obr. 50: Druhé upnutí na CNC frézce Makino A61nx-5e	83
Obr. 51: Sestava brzdového třmenu	85
Obr. 52: Instalovaný brzdový třmen na podvozkové kolo letounu Harmony LSA	85
Obr. 53: Porovnání současné a optimální výrobní dávky	90
Obr. 54: Příklady analýzy a optimalizace pomocí modulu Force [42]	94
Obr. 55: Nastavení materiálu pro optimalizaci	95
Obr. 56: Spuštění analýzy	95
Obr. 57: Prezentace výsledné analýzy	96
Obr. 58: Detailní pohled na analýzu nástroje T11010	97
Obr. 59: Nastavení podmínek pro optimalizaci nástroje T11010	98
Obr. 60. Zahájení optimalizace	98
Obr. 61: Výsledek optimalizace	99
Obr. 62: Porovnání původního a optimalizovaného NC kódu pro nástroj T11010	99
Obr. 63: Analýza NC programů pro nástroj T11010	100
Obr. 64: Porovnání vybraných částí NC kódu pro nástroj T11010	101

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Příklady obráběcích procesů na základě energie použité k úběru materiálu [3]	12
Tab. 2: Označení a význam nejpoužívanějších adres [20].....	36
Tab. 3: Parametry vodního paprsku FLOW M4-4020C [47]	74
Tab. 4: Parametry frézky FV 20 [48].....	75
Tab. 5: Parametry frézky FN40 [49].....	76
Tab. 6: Parametry obráběcího centra ZPS MCFV 2080 [50]	77
Tab. 7: Parametry obráběcího centra A61nx-5E [51].....	78
Tab. 8: Aktuální výrobní postup brzdového válce.....	84
Tab. 9: Výrobní operace brzdového válce	86
Tab. 10: Hodinová sazba výrobních pracovišť	87
Tab. 11: Výrobní postup s opravenou normou času	90
Tab. 12: Časové úspory po optimalizaci NC programu.....	101
Tab. 13: Výrobní postup I.....	102
Tab. 14: Výrobní postup II	104
Tab. 15: Výrobní postup III	106
Tab. 16: Ekonomické vyhodnocení jednotlivých výrobních postupů	108
Tab. 17: Vyhodnocení nákladů na seřízení.....	109
Tab. 18: Vyhodnocení výrobních nákladů na kus	110
Tab. 19: Vyhodnocení časových úspor obrábění na stroji Makino A61nx-5E.....	110
Tab. 20: Vyhodnocení časových úspor optimalizace	111
Tab. 21: Vyhodnocení celkových nákladů pro výrobu jednoho kusu	111

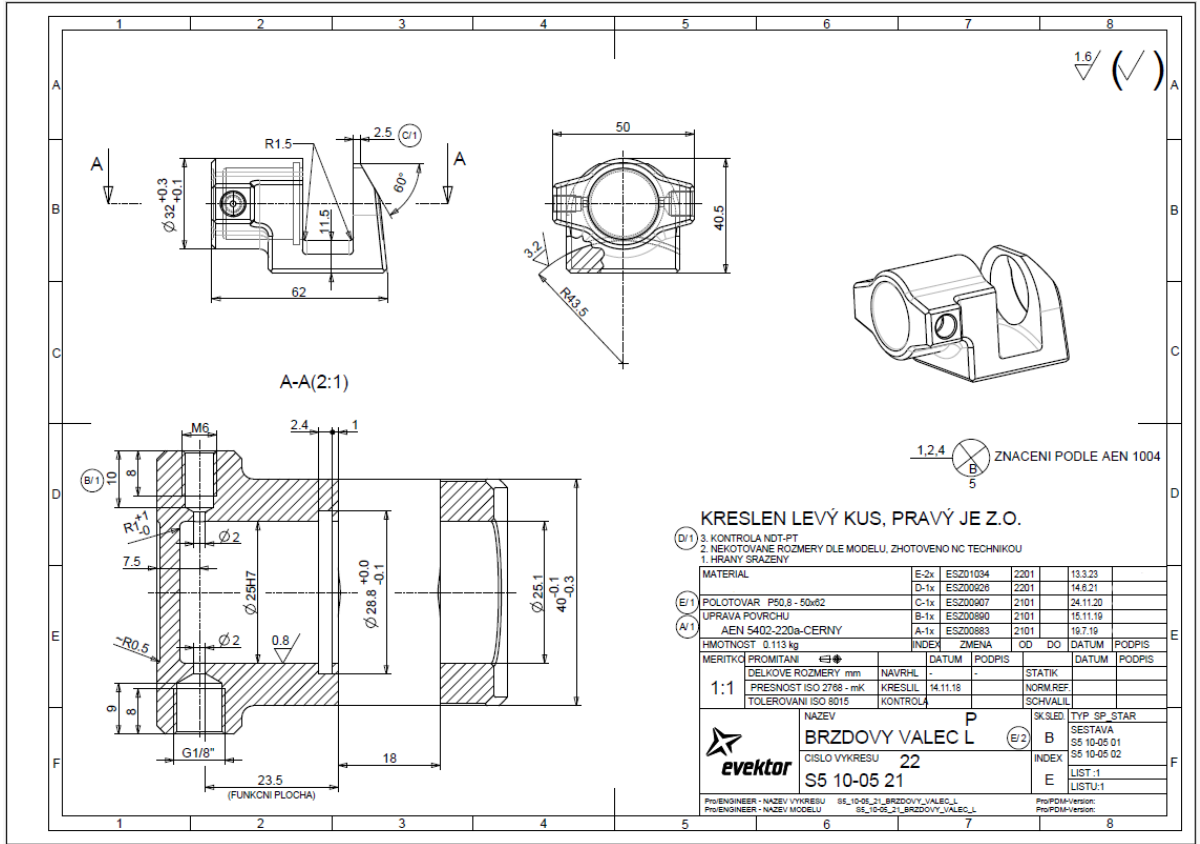
SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Výkres brzdového válce

Příloha P II: Podrobný výpis výsledků optimalizace prvního upnutí pomocí VERICUT Force

Příloha P III: Podrobný výpis výsledků optimalizace druhého upnutí pomocí VERICUT Force

PŘÍLOHA P I: VÝKRES BRZDOVÉHO VÁLCE



PŘÍLOHA P II: PODROBNÝ VÝPIS VÝSLEDKŮ OPTIMALIZACE PRVNÍHO UPNUTÍ POMOCÍ VERICUT FORCE



Programmer Name:

23. října 2023 13:34:05

Part Number	Stock Material	Setup	Machine
	Aluminum+2024+HRB79	S5_10-05_22_ESZ00890_OP30	Default









CYCLE AND PROGRAMMING INFO

Machine Time (h:mm:ss) 0:16:32 Total ERRORS: 0
 Optimized Time (h:mm:ss) 0:13:19 Total WARNINGS: 0
 Time Difference: 19%

VERICUT FILE SUMMARY




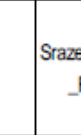
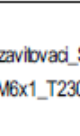
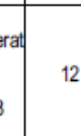
File Type	File Name
Soubor projektu	S5_10-05_22_OP30.vcproject
Soubor stroje	a61rx_5xE_Detail_24000Rpm_B_C_V7_V01.mch
Soubor základního CNC řízení	MAKINO_Pro5-a61rx-5xE_21-04-15_V01.cfl
Soubor knihovny nástrojů	TPSP00623_ESZ00000_OP30-S5_10-05_22_ESZ00890_OP30.tls
Soubor modelu součástí	TPSP00623.stl
NC program	4144584.NC
	O4585
	O4586
	O4587
	O4588
	O4589
	O4590
	O4591
	O4592
	O4593
	O4594
	O4595
	O4596
	O4597
	O4598

TOOL SUMMARY

Tool ID	Tool Thumbnail	Tool Description	CutterDia meter	CutterHei ght	FluteLeng th	Původní čas	Ča optimalizace	Časový rozdil
1000401		Monolit_Mitsubishi_D=12_Rc=0_T10004	12	75	16	0:02:17	0:02:10	4,77 %
1100102		Monolit_Seco_D=16_Rc=0,5_T11001	16	100	20	0:00:06	0:00:06	0 %
1101001		Monolit_Seco_D=10_Rc=3_T11010	10	99	15	0:04:15	0:02:18	45,84 %
1100801		Monolit_Seco_D=10_Rc=2_T11008	10	72	22	0:04:24	0:03:28	20,95 %
2100101		Srazed_Sandvik_D=12_Rc=0_T21001	12	80	6	0:01:50	0:01:50	0 %
1001403		Monolit_Seco_D=8_Rc=0_T10014	8	85	32	0:00:50	0:00:50	0 %
1300401		Kulovka_Monolit_Seco_D=5_T13004	5	57	5	0:01:19	0:01:04	19,05 %
1703201		Vrtak_Seco_D=20_J=79_T17032	20	131	80	0:00:07	0:00:07	0 %

Programmer Name:

23. října 2023 13:34:05

Tool ID	Tool Thumbnail	Tool Description	CutterDia meter	CutterHei ght	FluteLeng th	Původní čas	Ča optimalizace	Časový rozíl
1703902		Vrtak_Seco_D=8,8_J=6 1_T17039	8,8	103	45	0:00:05	0:00:05	0 %
1701402		Vrtak_Seco_D=5_J=44_ T17014	5	82	32	0:00:05	0:00:05	0 %
2000501		Vrtak_Seco_D=2_J=11_ T17003	2	41	7	0:00:07	0:00:07	0 %
2100101		Srazeći_Sandvik_D=12 _Rc=0_T21001	12	80	6	0:00:11	0:00:11	0 %
2300401		Freza_zavilovací_Seco _Min.M6x1_T23004	6	55	12,5	0:00:24	0:00:24	0 %
2300801		Freza_zavilovací_Cerat izit_G1/8- 28x0,907_T23008	12	80	20	0:00:34	0:00:34	0 %
	Celkem					0:16:32	0:13:19	19,49 %

TOOL USE GRAPH



PŘÍLOHA P III: PODROBNÝ VÝPIS VÝSLEDKŮ OPTIMALIZACE DRUHÉHO UPNUTÍ POMOCÍ VERICUT FORCE



Programmer Name:

23. října 2023 13:51:14

Part Number	Stock Material	Setup	Machine
	Aluminum+2024+HRB79	S5_10-05_22_ESZ0890_OP40	Default

CYCLE AND PROGRAMMING INFO










Machine Time (h:mm:ss) 0:17:42 Total ERRORS: 0
 Optimized Time (h:mm:ss) 0:14:22 Total WARNINGS: 0
 Time Difference: 19%

VERICUT FILE SUMMARY

File Type	File Name
Soubor projektu	S5_10-05_22_OP40.vcproject
Soubor stroje	a61rx_5xE_Detail_24000Rpm_B_C_V7_V01.mch
Soubor základního CNC řízení	MAKINO_Pro5-a61rx-5xE_21-04-15_V01.cfl
Soubor knihovny nástrojů	TPSP00623_ESZ0000_OP40-S5_10-05_22_ESZ0890_OP40.tls
Soubor modelu součástí	TPSP00623.stl
NC program	4164684.NC
	O4685
	O4686
	O4687
	O4688
	O4689
	O4690
	O4691
	O4692
	O4693

TOOL SUMMARY

Tool ID	Tool Thumbnail	Tool Description	CutterDia meter	CutterHei ght	FluteLeng th	Původní čas optimalizace	Ča časový rozdíl
---------	----------------	------------------	--------------------	------------------	-----------------	-----------------------------	------------------------

Tool ID	Tool Thumbnail	Tool Description	CutterDia meter	CutterHei ght	FluteLeng th	Původní čas	Čas optimalizace	Časový rozdíl
1000401		Monolit_Mitsubishi_D=12_Rc=0_T10004	12	75	16	0:01:29	0:01:15	15,92 %
1100102		Monolit_Seco_D=16_Rc=0,5_T11001	16	100	20	0:01:34	0:01:34	0 %
1001601		Monolit_Seco_D=10_Rc=0_T10016	10	85	22	0:03:56	0:01:45	55,38 %
1103301		Monolit_Seco_D=10_Rc=1,5_T11033	10	80	12	0:05:49	0:04:54	15,82 %
2100101		Srazeci_Sandvik_D=12_Rc=0_T21001	12	80	6	0:02:21	0:02:21	0 %
1001001		Monolit_Seco_D=3_Rc=0_T10010	3	57	6	0:01:15	0:01:15	0 %
2001001		freza korunkova pr.20,5 t2,4	20,47	60	2,4	0:00:17	0:00:17	0 %
1101401		Monolit_Seco_D=16_Rc=0,5_T11014	16	129	78	0:00:16	0:00:16	0 %
2100101		Srazeci_Sandvik_D=12_Rc=0_T21001	12	80	6	0:00:44	0:00:44	0 %

Programmer Name:

23. října 2023 13:51:14

Tool ID	Tool Thumbnail	Tool Description	CutterDia meter	CutterHei ght	FluteLeng th	Původní čas	Ča optimalizace	Časový rozdíl
	Celkem					0:17:42	0:14:22	18,83 %

TOOL USE GRAPH



VIEW CAPTURE (per Tool Change)