

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2023

**ONDŘEJ
PEŠULA**



ČVUT
ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

**ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A
METROLOGIE**

**Využití aditivní výroby pro upínání
obrobku**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

AUTOR: Ondřej Pešula

VEDOUcí PRÁCE: Ing. Jiří Sommer

STUDIJNÍ PROGRAM: B 2343 Výroba a ekonomika ve strojírenství

STUDIJNÍ OBOR: 2303R014 Technologie, materiály a ekonomika
strojírenství

Praha 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pešula** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **501496**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Využití aditivní výroby pro upínání obrobku

Název bakalářské práce anglicky:

Use of additive manufacturing for workpiece clamping

Pokyny pro vypracování:

Problematika upínání tvarově složitých dílů.
Aditivní výroba a její využití při upínání obrobků.
Konstrukční návrh upínání s využitím aditivní výroby pro vybraný díl.
Zkouška použitelnosti navrženého upínání.

Seznam doporučené literatury:

M. Gibson, M. Rosen, B. Stucker, 'Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing', Springer, 2014.
GRZESIK, Wit. Advanced Machining Processes of Metallic Materials: Theory, Modelling, and Applications. 2nd. Amsterdam: Elsevier, 2016. ISBN 978-0444637116.
WALSH, Ronald A. a Denis R. CORMIER. McGraw-Hill machining and metalworking handbook. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, c2006. McGraw-Hill handbooks. ISBN 00-714-5787-9.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jiří Sommer ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **03.04.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Jiří Sommer
podpis vedoucí(ho) práce

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

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jiřího Sommera, a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

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

V Praze dne:

.....

Podpis autora

Poděkování

Rád bych vyjádřil své velké uznání Ing. Jiřímu Sommerovi za jeho cenné a konstruktivní návrhy při konzultacích během plánování a zpracovávání mé bakalářské práce. Jeho užitečnými doporučeními mi navedl k početnímu řešení sil při obrábění a pomohl i při programování. Velice si cením jeho ochoty věnovat tolik času při technické podpoře mé práce.

V neposlední řadě bych rád poděkoval svým rodičům za podporu a povzbuzení během mého studia.

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá tematikou využívání 3D tištěných přípravků sloužících k upínání tvarově složitých dílů v procesu frézování. V části první se práce věnuje zmapování možností upínání součástí s tvarově složitými povrchy.

V části druhé se práce zabývá nejprve návrhem a výrobou upínacího přípravku pomocí FDM technologie. Dále je prováděno měření sil působících při frézování na obrobek. Posléze následuje výroba testovacího dílu upnutého v navrhnutém přípravku. Poté je provedeno měření výrobní přesnosti a porovnání s dílem, vyrobeným pomocí alternativní metody upnutí. V závěru práce je věnován prostor pro poznatky a vylepšení upínacího přípravku, jež byly získány během provádění a vyhodnocování experimentální části.

Název diplomové práce: Využití aditivní výroby pro upínání obrobku

Autor práce: Ondřej Pešula

Vedoucí práce: Ing. Jiří Sommer

Akademický rok: 2022/ 2023

Vysoká škola: ČVUT v Praze, Fakulta strojní

Ústav: 12134 – Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Vedoucí ústavu: Ing. Libor Beránek, Ph. D.

Rozsah práce: 90 stránek, 6 tabulek, 49 obrázků

Klíčová slova: upínání, frézování, Fusion 360, programování, 3D tisk, aditivní výroba, FDM technologie, obráběcí síly

Annotation

The topic of this bachelor thesis is using 3D printed fixture for clamping shaped complicated parts in milling technique.

In the first part of the thesis there is a map of options of clamping components with different and complicated surfaces.

In the other part of the thesis deals with a design and a production of clamping fixture by FDM technology. The forces acting on the workpiece during milling are also measured. Then the production of the test part clamped in the designed fixture follows. Afterwards the manufacturing accuracy is measured and it is compared with the work produced by using an alternative clamping method.

At the end of the thesis there are findings and improvements clamping fixture acquired during the implementation and evaluation of the experimental part.

Title of the final thesis:	Use of additive manufacturing for workpiece clamping
Author:	Ondřej Pešula
Supervisor:	Ing. Jiří Sommer
Academic year:	2022/ 2023
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	12134 – Department of Machining, Process Planning and Metrology
Head of department:	Ing. Libor Beránek, Ph. D.
Extent:	90 pages, 6 tables, 49 pictures
Keywords:	clamping, milling, Fusion 360, programming, 3D printing, additive manufacturing, FDM technology, machining forces

Obsah

1	ÚVOD A CÍL PRÁCE	12
2	FRÉZOVÁNÍ	13
3	SÍLY PŘI OBRÁBĚNÍ	16
3.1	Silové účinky při frézování.....	16
3.2	Rozložení složek sil řezání při frézování	17
3.3	Primární plastické deformace při obrábění	18
3.4	Silové parametry související s řeznou silou	19
3.4.1	Výpočet silových parametrů	20
3.4.2	Energetická náročnost během řezného procesu	20
4	UPÍNÁNÍ OBROBKŮ PŘI FRÉZOVÁNÍ	21
4.1	Zásady upínání	24
4.2	Frézovací přípravky	25
4.3	Strojní svěráky	27
4.3.1	Vyměnitelné čelisti svěráků	30
4.4	Sklíčidla	34
4.4.1	Druhy sklíčidel	35
4.5	Upínací kleštiny.....	36
4.5.1	Typy kleštin a jejich použití	37
4.5.2	Speciální kleštiny.....	38
4.6	Upínky a podpěry obrobků	40
5	FDM TECHNOLOGIE.....	43
5.1	Typy FDM tiskáren	44
5.1.1	Kartézská tiskárna	44
5.1.2	Delta tiskárna	44
5.1.3	Polar tiskárna	44
5.1.4	Pásová tiskárna	44

5.2	Porovnání FDM technologie	44
5.3	Kvalita tisku	45
5.4	Využití FDM technologie	47
6	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	49
6.1	Analýza požadavků na výrobu součásti	49
6.1.1	Geometrické tolerance	50
6.1.2	Tolerance lineárních a úhlových rozměrů	50
6.1.3	Požadovaná drsnost povrchu	51
6.2	Návrh upínání	51
6.2.1	Volba upínacího přípravku	51
6.2.2	Konstrukce upínacích čelistí	52
6.2.3	Návrh variant provedení přípravku	53
	První varianta	53
	Druhá varianta	53
	Třetí varianta	53
	Volba přípravku	54
6.2.4	Tisk přípravku	54
6.3	Návrh experimentu	56
6.3.1	Využívaný software	56
6.3.2	Postup obrábění první strany	56
6.3.3	Operace 1	57
6.4	Měření upínacích sil a sil při obrábění	62
6.4.1	Výroba testovacího vzorku	62
6.4.2	Tvorba programu pro měření	63
6.4.3	Měření sil	64
6.4.4	Výpočet sil při obrábění	65
	Teoretický výpočet	65

Výpočet pomocí naměřených hodnot.....	68
Výpočet upínací síly.....	69
Závěr.....	70
6.5 Obrábění testovacích dílů a jejich měření	70
6.5.1 Operace 2	70
6.5.2 Výroba alternativní metodou.....	75
6.5.3 Přehled použitých nástrojů	77
6.5.4 Výroba	77
6.5.5 Měření.....	78
6.6 Vyhodnocení přesnosti vyrobené součásti.....	79
6.7 Poznatky a návrh na úpravy.....	80
7 ZÁVĚR.....	81
Bibliografie	82
Seznam obrázků, tabulek a příloh.....	89

Seznam použité symboliky a zkratek

6HR		šestihran
Ra		průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti
CAD		počítačem podporované navrhování
CAM		počítačem řízená výroba
CNC		počítačové číselnicové řízení
NC		číselnicové řízení
STL		nativní formát souboru stereolitografického programu
AW		hliníková slitina
EN		evropská norma
ASA		Akrylonitril – styren – akryl
PET-G		Polyethylen tereftalát glykol
M6	[mm]	metrický závit 6
D _n	[mm]	průměr nástroje
k _c	[N/ mm ²]	měrný řezný odpor
F _c	[N]	řezná síla
F _a	[N]	aktivní složka řezné síly

1 ÚVOD A CÍL PRÁCE

Výroba pomocí aditivní technologie v poslední době rapidně roste. To je způsobeno nejen dostupností, cenou, materiálových možností a rychlostí výroby, ale také neustálým vyvíjením nových metod a využití. Zároveň se také stále zvyšuje složitost obráběných dílců. Není tedy divu, že výroba aditivní technologií si našla využití i v odvětví obrábění. Zvláště pak při vytváření přípravků sloužících pro jednodušší upínání tvarově složitých dílců.

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a ověřením upínacího přípravku, vyrobeného pomocí aditivní FDM technologie, jako náhrada měkkých čelistí. Práce se skládá celkem ze dvou částí, tj. části teoretické a části praktické.

V teoretické části se nejprve práce věnuje procesu frézování jako takovému, zaměřuje se na působení sil při obrábění, které při něm vznikají. Poté se práce zabývá problematikou upínání tvarově složitých součástí na pracovní stůl frézky.

V praktické části práce je v první řadě prováděna analýza požadavků součásti. Následně uskutečnění návrhu upínacího přípravku vyrobeného pomocí FDM technologie. Následuje navržení později realizovaného experimentu, načež se měří síly, jež je nutné znát pro naplnění dalšího kroku práce, tj. síly vyskytující se při obrábění a potřebná upínací síla. Posléze se provede obrobení testovacího dílu, načež byla měřena výrobní přesnost, jež se následně tato přesnost vyhodnocuje. Na závěr jsou sepsány poznatky a návrhy na úpravy upínacího přípravku, jež byly nasbírány během provádění experimentální části.

Cílem této práce je určit, zda je možné využívat namísto klasických upínačů, upínací přípravky vyrobené pomocí FDM technologie. Dále se práce zabývá problematikou spjatou s obráběním dílů, jež jsou upínány do přípravků vyrobených 3D tiskem. Záměrem je rovněž zjistit výrobní přesnost a hlavní omezení, která jsou spojena s touto tematikou.

2 FRÉZOVÁNÍ

Frézování je jeden z nejrozšířenějších způsobů třískového obrábění. Stroj se nazývá frézka, nástroj fréza. Na rozdíl od soustružení provádí při frézování hlavní pohyb nástroj, tento pohyb je rotační. Jako posuv lze využít pohyb přímočarý, nebo kruhový. Tyto pohyby jsou na sebe vázané, přičemž výsledný řezný pohyb má tvar cykloidy. Pohyby lze realizovat plynule měnitelné, a to ve všech směrech. V dnešní době lze využít velké množství druhů fréz s rozdílnými specifikacemi, nicméně většina fréz má více zubů. Samostatný břit je v záběru pouze po krátký čas, díky čemuž se po zbytek otáčky může chladit. Tímto je docíleno větší trvanlivosti nástroje a vyšších řezných rychlostí.



Obr. 1: Frézování 3D ploch [64]

K hlavním výhodám moderních obráběcích center patří možnost vysokého výkonu obrábění, skvělá jakost obroběných ploch a vysoká rozměrová přesnost u tvarově složitějších ploch, viz. Obr. 1. Mezi základní obráběné plochy při frézování spadají rovinné plochy, drážky a tvarové plochy. Vlivem rostoucí mnohostrannosti využití obráběcích strojů, nástrojů a řídicích systémů je frézování stále vyvíjeno, to má za následek větší univerzálnost. V dnešní době lze stále používat klasické jednoúčelové frézky, především na kusovou výrobu. Naopak nejmodernější víceosá frézovací CNC centra jsou vhodná především na sériovou výrobu. Taková centra už mají zabudovaný systém přímo ve stroji, přičemž jsou ovládána pomocí G-kódu, který lze vytvářet přímo u stroje, anebo

v prostředí kanceláře (např. CAM softwaru). Při programování se vše odvíjí od výkresu s požadavky rozměrové přesnosti, drsnosti obráběných ploch atd. Musí se určit vhodná strategie obrábění, vybrat frézka (s vhodnou stabilitou, přesností a všeobecným stavem) a nakonec zvolit vhodné nástroje. Tato volba ovlivňuje možné podmínky frézování (řezná síla, posuv, úběr atd.). Cílem programátora je vytvořit takový program, který bude co nejefektivnější, nejrychlejší a tím pádem i nejlevnější. Z těchto důvodů je velmi důležité se zamyslet nad výkresem již před psáním programu. Frézovací obráběcí centra dělíme podle os na tříosá, čtyřosá a pětiosá. Počet os se liší ve složitosti pohybů, které jsou vykonávány obrobkem a frézou, relativně na sobě závislé. Zda se využije více os stroje, záleží na složitosti a typu geometrie obráběných ploch. Čím víceosé obráběcí centrum je, tím složitější je pohyb frézy a obrobku. Tím pádem je pak možné obrábět i složitější geometrie ploch dílů.

Mezi nejjednodušší typ frézování patří obrábění tříosé. Při tříosém frézování jsou vedlejší pohyby realizovány v lineárních směrech X, Y a Z. To znamená, že na jedno upnutí je možné obrábět pouze jednu stranu dílu. Nejčastěji se na tříosém stroji obrábí 2D a 2,5D geometrie. To ale neznamená, že by nebylo možné vyrábět i složitější geometrii. Záleží především na znalostech a zkušenostech obsluhy obráběcího centra. Avšak nejvhodnějšími operacemi jsou frézování rovinných ploch (kapsy, drážky), vrtání a závitování, podmínkou je nutná kolmost otvorů k ose. Také je možná výroba tvarových drážek, ovšem se speciálním tvarovým nástrojem. Někdy se však můžou vyskytnout i rovinné plochy, které nelze obrábět. V tomto případě se jedná o rovinné plochy, které jsou nakloněny o určitý úhel k jedné z os X, Y nebo Z. Hlavním rozdílem mezi tří a čtyřosím frézováním je přidání jedné osy. Tou je často osa rotace stolu tzv. osa A, která se otáčí okolo osy X. Díky tomu lze otáčet (rotovat) s obrobkem, a zároveň pohybovat vřetenem v klasických osách X, Y nebo Z. Pro čtyřosé stroje existuje několik variant uspořádání os, ale nejčastěji se využívá tzv. vertikální obrábění. To znamená, že vřetenem se stejně jako na tříosém stroji otáčí kolem osy Z. Díl je upnut v ose X a společně s upínacím přípravkem s ním lze otáčet v ose A. Díky tomu je pak možné obrábět čtyři strany dílu během jednoho upnutí. Čtyřosé obrábění může eliminovat hned několik faktorů, které hrozí při obrábění na tříosém stroji. V případě obrábění dílu na více stranách je vyloučena nutnost více

upínacích přípravků pomocí otáčení v ose A. Tím se vyvarujeme případného vzniku chyb, které vznikají při přeupínání. Díky tomu se zvýší přesnost výroby a zároveň zajistí menší tolerance mezi prvky na různých stranách dílu. V neposlední řadě čtyřosí stroj dovoluje obrábět i úhlové prvky dílu, ty jsou na tříosém stroji neproveditelné. Čtyřosé obrábění můžeme dělit na dva typy – indexový a kontinuální. Během indexového obrábění nedochází k odebírání materiálu při otáčení osou A. Jakmile je dosažena požadovaná pozice rotace osy A, zastaví se a stroj pokračuje v obrábění. Naopak u kontinuálního obrábění dochází k odebírání materiálu a zároveň k otáčení osy A. Díky tomu můžeme obrábět ve složených pohybech, například profily šroubovic nebo vačkové hřídele. Pětiosé obrábění je charakteristické tím, že využívá dvě z celkem tří eventuálních os otáčení. První možností je využít rotaci osy A a současně osy C. Druhou možností je pak použití rotace v osách B a C. Rozdíl mezi těmito dvěma typy je ten, zda bude docházet k otáčení obrobku, nebo vřetene. Nicméně hlavním kritériem pro volbu rotačních os je specifikace typu stroje.



Obr. 2: Pětiosé frézování [41]

Principem pětiosých strojů je plně kontinuální pohyb. Tím pádem není překážkou obrábět v lineárních souřadnicích nástroje a zároveň polohovat obráběným dílem. Díky tomu lze bez problémů obrábět velmi složité 3D prvky, a to nejen úhlově složené, ale i složitě zakřivené povrchy. Tudíž lze obrábět díly, které se za normálních podmínek vyráběly tvářením, odléváním nebo

vstřikováním. Z těchto důvodů poskytuje pětiosé obrábění vysokou flexibilitu při návrhu tvarově složitých dílů, viz. Obr. 2. Tyto výhody se projevují na ceně pětiosého stroje, která je značně vyšší oproti již zmíněným typům. Pokud se zvolí obrábění na pětiosém stroji, je třeba využít jeho schopnosti na maximum. Proto je nutné znát jednotlivé typy frézovacích strojů a zodpovědně na ně nahlížet již při konstrukci samotného dílu. [1] [2] [3]

3 SÍLY PŘI OBRÁBĚNÍ

3.1 Silové účinky při frézování

Mechanismem tvorby třísky je prokázáno, že při obrábění frézováním dochází během vnikání řezného břitu nástroje do materiálu polotovaru ke stavu napjatosti. Díky tomuto stavu nastává v mezní situaci dělení. Tento děj je doprovázen menší, anebo větší plastickou, ale i elastickou deformací. Deformace nejsou jediné, co nastává při vnikání řezného klínu, při tomto procesu se také prosazují poměry silové. Poznáním silových poměrů při řezání získáváme přehled o mechanickém namáhání soustavy obrábění, tím zjistíme podklady potřebné pro řešení celé technologické soustavy a to nejen z hlediska pevnosti, ale i její tuhosti s dynamickou stabilitou řezného procesu [4].

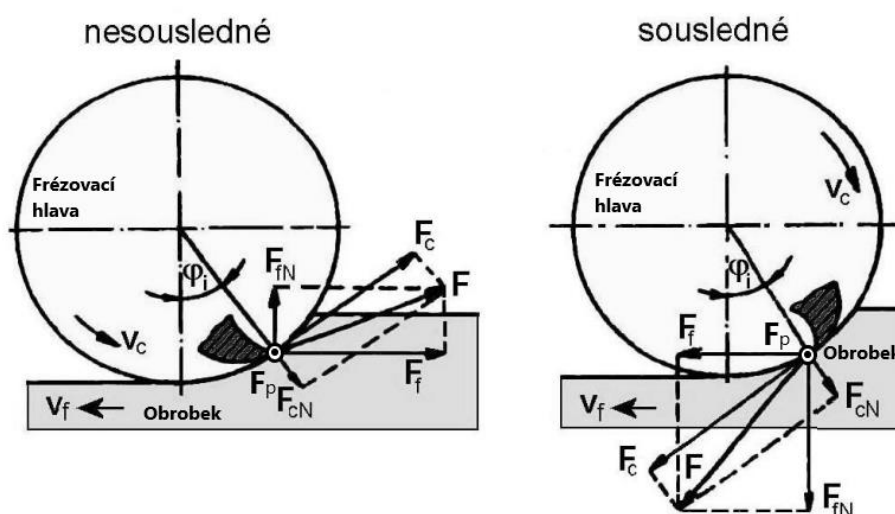
Při znalosti silových účinků lze určit tyto aspekty:

- určení příkonu, dimenzování, volba a konstrukce frézky
- zajištění energetické účinnosti řezného procesu
- hodnocení a posouzení tepelných jevů řezného procesu
- hodnocení trvanlivosti a životnosti řezného nástroje
- zajištění podmínek přesnosti a stability procesu
- bilanci celkového ekonomického třískového obrábění

Během procesu obrábění je pak zvláště významnou veličinou síla obrábění (řezání), tuto sílu je potřeba chápat jako veličinu proměnnou v čase. Vlivem stavu napjatosti v obráběném materiálu obrobku je způsoben řezný odpor R , tento odpor musí síla obrábění během řezného procesu neustále překonávat. Pro tento jev pak platí rovnováha:

$$F = -R [N], \text{ kde } F [N] \text{ je síla řezání a } R [N] \text{ je řezný odpor.}$$

3.2 Rozložení složek sil řezání při frézování



Obr. 3: Schéma rozložení složek síly při frézování [6]

Na Obr. 3 je zobrazeno sousledné i nesousledné frézování frézovací hlavou a jeho silový rozklad v aktuálním okamžiku záběru jednoho břitu.

Dle ČSN ISO 3002-4, viz reference [5], jednotlivé složky síly řezání na břitu nástroje jsou:

- F_c [N] – řezná síla
- F_{cN} [N] – kolmá řezná síla
- F_f [N] – síla posuvu
- F_{fN} [N] – kolmá síla posuvu
- F_p [N] – pasivní síla
- F_a [N] – aktivní síla
- F [N] – síla řezání

Z těchto sil je nejdůležitější řezná síla (F_c). K jejímu vypočítání lze využít mnoho různých metodik a principů. Dle Obr. 3 také dále lze pozorovat, že se síla aktivní (F_a) rozkládá na sílu řeznou (F_c) a k ní kolmou řeznou sílu (F_{cN}), přesněji řečeno na sílu posuvu (F_f) a k ní kolmou sílu posuvu (F_{fN}), viz vztah (1). [5] [6]

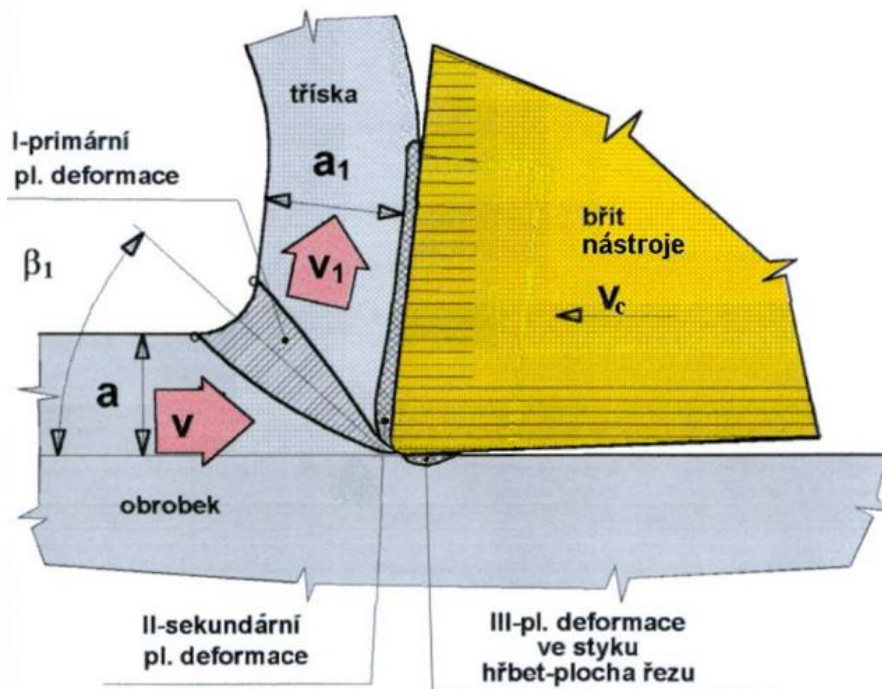
$$F_a = \sqrt{F_c^2 + F_{cN}^2} = \sqrt{F_f^2 + F_{fN}^2} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \text{ [N]} \quad (1)$$

Síla řezání (F) je významnou veličinou řezného procesu. Je nutné, aby řezná síla překonala řezný odpor, jenž má za následek kladení obráběného materiálu na břit nástroje. V momentě, kdy je řezný odpor překonán silou řezání, začíná oddělení třísky od materiálu obrobku. Z podmínky dané rovnováhou

vychází, že během stanovování síly řezání (resp. jejích složek) a řezného odporu (resp. jeho složek) stačí vytyčit pouze jednu z těchto veličin. Sílu řezání (F) působící na břit frézy je možné spočítat díky vztahu (2). [5] [7] [8]

$$F = \sqrt{F_a^2 + F_p^2} = \sqrt{F_c^2 + F_{cN}^2 + F_p^2} = \sqrt{F_f^2 + F_{fN}^2 + F_p^2} [N] \quad (2)$$

3.3 Primární plastické deformace při obrábění



Obr. 4: Oblasti plastických deformací v kořenu třísky [7]

Obrábění je procesem plastické deformace. Tento proces je ovlivňován nejen vlastnostmi materiálu, který je obráběn, ale také podmínkami, za kterých probíhá proces obrábění. Nejvýznamnějšími podmínkami jsou deformační rychlost a teplota. Velmi důležitou roli v moderním obrábění zaujalo utváření třísky. Principem efektivního utváření třísky je vznikající třísku při obrábění odvádět z řezné zóny a při tom odvést co nejvíce tepla vznikajícího při procesu. Oblast materiálu, kde dochází vlivem řezného nástroje k přetváření materiálu na třísku, se nazývá kořen třísky. Kořen třísky obsahuje zhruba tři oblasti zřetelné plastické deformace. I. oblast – primární plastická deformace, II. oblast – sekundární plastická deformace a III. oblast – terciální plastická deformace. K lepšímu vysvětlení v oblasti kořenu třísky se využívá systém pravoúhlého, tzv. ortogonálního řezání, které je na schématu, viz. Obr. 4. [1] [4] [9]

Oblast primární plastické deformace má blízkou souvislost s různými jevy během obrábění. Mezi tyto jevy patří také silové účinky při obrábění. Lze říci, že při rozšiřování primární plastické deformace vzrůstá hodnota poměrného kluzu, ale i koeficientu pěchování a měrné řezné síly. Ta způsobuje zároveň také nárůst řezné síly, dále řezného výkonu a kroutícího momentu. V opačném případě zmenšování této oblasti dochází k poklesu výše uvedených hodnot. Na druhou stranu oblast primární plastické deformace (tím pádem i velikost řezné síly) ovlivňuje řada složek, hlavní z nich jsou fyzikální a chemické vlastnosti materiálu obrobku, parametry řezných podmínek, geometrie frézy a prostředí, ve kterém fréza pracuje. Řezné podmínky, které ovlivňují velikost primární plastické deformace, jsou v první řadě posuv na zub, přesněji řečeno tloušťka odřezávané vrstvy, ale také řezná rychlost. S poklesem tloušťky odřezávané vrstvy se rozšiřuje oblast primární plastické deformace, vlivem toho je natáčena směrem do obráběného materiálu, to má za následek nárůst měrné řezné síly. Oblast primární plastické deformace je řeznou silou ovlivňována podobným způsobem jako tloušťkou odřezávané vrstvy, to znamená, že s jejím poklesem se oblast rozšiřuje, avšak vliv má podstatně menší v porovnání s tloušťkou odřezávané vrstvy. Hlavní parametry geometrie frézy, které mají za následek ovlivnění oblasti, jsou úhel nastavení hlavního ostří, dále poloměr špičky a úhel čela. Se snižujícím se úhlem nastavení hlavního ostří se tloušťka odřezávané vrstvy ztenčuje, to má za následek růst oblasti primární plastické deformace a zároveň nárůst měrné řezné síly. Se zvětšením poloměru špičky se snižuje střední úhel nastavení, což způsobí rozšíření oblasti primární plastické deformace a tedy i nárůst měrné řezné síly. Při snižujícím se úhlem čela se oblast primární plastické deformace natočí směrem do obrobku, což zapříčiní nárůst měrné řezné síly. [1] [9]

3.4 Silové parametry související s řeznou silou

Obecně silovými parametry jsou rozuměny takové, které probíhají při řezném procesu. Mezi tyto parametry se neřadí jenom silové účinky (síly vyskytující se při obrábění), ale i parametry, které lze získat z výpočtů pomocí výše uvedených silových účinků, zvláště řezné síly (F_c). Ze složky řezné síly se

spočítají tyto veličiny: výkon obráběcího stroje (P), dále kroutící moment (M_k), ale především výkon při obrábění, přesněji řečeno řezný výkon (P_c).

3.4.1 Výpočet silových parametrů

Pomocí složek řezné síly (F_c) a řezné rychlosti (v_c) lze vypočítat výkon při obrábění, lépe řečeno řezný výkon (P_c), viz. vztah (3). [4]

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60} [kW] \quad (3)$$

Ze vztahu (4), je možné vypočítat pomocí účinnosti stroje (η) a řezného výkonu (P_c) celkový výkon obráběcího stroje (P). Účinnost nástroje bývá často uvedena v katalogu samotného prodejce nástrojů. [8]

$$P = \frac{P_c}{\eta} [kW] \quad (4)$$

Kroutící moment (M_k) ze vztahu (5) je řezná síla (F_c), která působí na rameni poloviny průměru frézovacího nástroje ($D/2$). [8]

$$M_k = \frac{F_c \cdot D}{2 \cdot 10^3} [Nm] \quad (5)$$

3.4.2 Energetická náročnost během řezného procesu

Z důvodů současných cen elektřiny se v ceně finálního výrobku projeví právě i cena za spotřebovanou elektrickou energii. Proto je velmi důležité sledovat také energetickou náročnost obráběcího procesu. K tomu slouží střední hodnota specifické spotřebované energie (E_p), která se získá ze vztahu (6). Vypočítá se pomocí střední hodnoty řezného výkonu (P_{cm}) a úběru materiálu za jednotku času (Q).

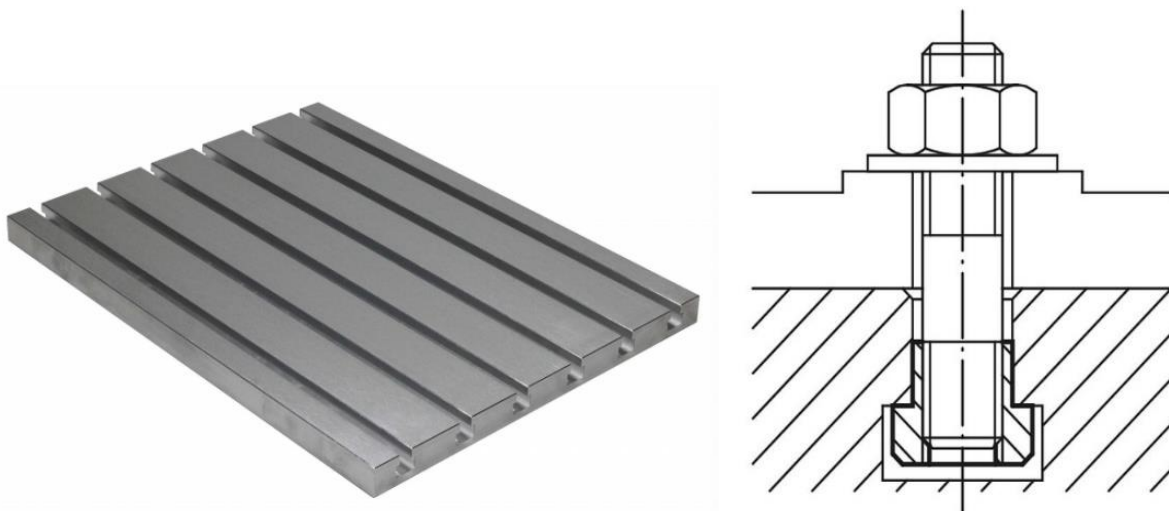
$$E_p = \frac{P_{cm}}{60 \cdot Q} [J] \quad (6)$$

Specifická spotřeba energie není brána jako silový parametr, ale při obrábění je často sledována. Zároveň její stanovení velmi ovlivňuje řezný výkon a tedy i řeznou sílu. Z toho důvodu je zde také zmíněna. Produktivitu lze stanovit pomocí úběru materiálu za jednotku času (Q), tato hodnota je důležitá nejen pro výrobce, ale i pro obsluhu strojů. Její výpočet pro frézování je dán vztahem (7), kde a_p je hloubka řezu, a_e šířka řezu a v_f rychlost posuvu. [10] [11]

$$Q = \frac{a_p \cdot v_f \cdot a_e}{10^3} [cm/min] \quad (7)$$

4 UPÍNÁNÍ OBROBKŮ PŘI FRÉZOVÁNÍ

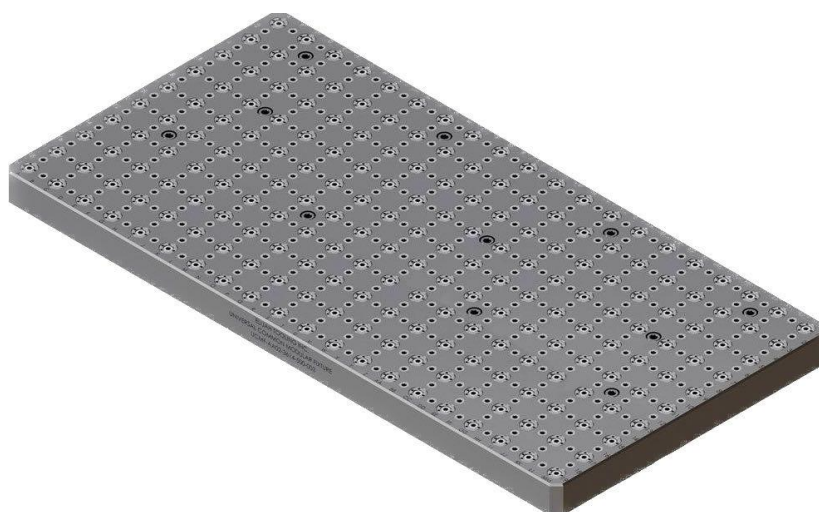
Při procesu frézování vznikají v jednom okamžiku velké řezné síly, to je způsobeno současným záběrem několika zubů frézy. Z tohoto důvodu je nutné obrobek pevně, spolehlivě a bezpečně upnout do správné polohy. Technologickou základnou je volena největší plocha obrobku. Obráběné plochy by měly být co nejbližší ploše stolu. Důležité je také, aby upínací síla nebyla příliš velká a tím nezpůsobila deformaci samotné součásti. Dále je třeba zvolit takové upínací zařízení, které zajišťuje, že řezné síly od nástroje budou působit do pevných částí upínacího prostředku. Pokud je obráběná součást vysoko nad stolem, je nutné ji podepřít, především pokud se jedná o součást s tenkou stěnou, kde by mohlo dojít k nechtěnému prohnutí, nebo vlivem chvění by hrozilo poškození nástroje. Dosedací plocha upínače musí být očištěna a nesmí zabraňovat odlétání špon během frézování.



Obr 5: Zleva upínací stůl frézky, profil drážky frézovacího stolu [42], [43]

Základní stůl frézky, viz. Obr 5, má podélně vyfrézované drážky profilu T, viz. Obr 5. Těmito drážkami jsou vedeny upínací šrouby, kterými se na pracovní stůl pomocí matic připevňují veškeré upínací prvky. Upínací prvek by měl být umístěn co nejbližší k vřetenu frézky. Alternativou upínání pomocí šroubů jsou matice, fungují na stejném principu, ale utahování je provedeno pomocí šroubů. Pokud jsou nějaké drážky během obrábění nevyužity, je vhodné je „zaslepit“ záslepkami. Tím se předejde zbytečnému zanášení a poté pracnému čištění nevyužitých drážek.

Ačkoliv stůl s T drážkami je vyhovující, v dnešní době se nahrazuje modulárními upínacími systémy, nebo rovnou paletovými systémy, které jsou mnohem efektivnější. Na první pohled by se mohlo zdát, že se jedná o přímou náhradu stolu s T drážkami, ale není tomu tak. Jednoduše jde pouze o nadstavbu, která se upevňuje na běžný stůl obráběcího centra. Může se stát, že počet upínacích drážek nebude dostačující, a tak se rozšíří možnosti upínání pomocí modulárního upínacího systému. Tyto systémy se rozdělují na systém s drážkami a systém s otvory. Systém s drážkami funguje na stejném principu jako základní stůl, tudíž upínání přes T drážky, s tím rozdílem, že nabízí o jednu tolik více upínacích drážek, které jsou na sebe kolmé. Díky tomu lze upnout i obzvláště tvarově komplikované díly. Jejich rozměry se pohybují od 400x400mm až po 800x800mm. Pořizovací cena od firmy 1mta vychází na 55 000Kč, což odpovídá i desce s otvory ve stejném rozměru. Ačkoliv i tak je možná vlastní výroba desky. Nicméně z důvodu vyšších upínacích časů je dnes systém s T drážkami již spíše na ústupu. Systém s otvory představuje něco úplně jiného od klasických T drážek. Ne nadarmo se systém s otvory označuje jako upínání budoucnosti. Jedná se o desku, která v sobě má dva typy otvorů se závitem. První je pro upínání běžných upínek, druhý je pro speciální upínky se štefty. Tyto desky se vyrábí přesně podle požadavků zákazníka. Zákazník si může nakonfigurovat nejen rozměry desky, ale i počet, typ a rozmístění otvorů, dokonce i materiál desky. Desky mohou být kombinací otvorů a T drážky. Modulární systémy s otvory nabízejí oproti klasickým T drážkám mnohem snazší, rychlejší, ale i přesnější upínání.



Obr. 6: Modulární systém s otvory [44]

To je především díky možnosti mnoha upínacích otvorů, viz. Obr. 6. Také umožňuje upnout i přípravek nadměrných rozměrů, díky kterým je maximalizována výrobní kapacita obráběcího stroje. Nevýhodou je váha desky, která je přidána ke stolu frézky. Výrobou velkých desek, které nahradí celý stůl frézky, se zabývá například firma ELIJAH TOOLING, u nichž se konkrétní cena pro frézku Haas VF-3 pohybuje v rozmezí od 230 000 až 917 000 Kč. Nicméně i tak je možné si tento typ modulárního upínacího systému vyrobit.

Dalším zástupcem moderního upínání jsou paletové systémy. Specifickou vlastností paletových systémů je nespočetné množství variant upínání a zajištění tvarového kontaktu se samosvorným spojením. Dále jsou charakterizovány především vysokým axiálním přitlakem, a tím pádem i vysokými parametry obrábění. Díky snižování času potřebného k nastavení umožňují optimální využití kapacity stroje. Tento upínací systém je vhodný především pro plně automatizovaná obráběcí centra, popřípadě celé linky. Funkce paletových systémů je taková, že jedna část (pevná) je upnuta na běžný frézovací stůl, té se říká upínač. Druhá část (vyměnitelná) je charakterizována jako paleta, ta může být různých rozměrů a tvarů. Základní paleta je pouze rovná deska, na kterou je možné upnout jakýkoliv upínací přípravek, ale lze do ní i vyfrézovat požadovaný tvar.



Obr. 7: Základní set paletového systému [45]

Záleží především na uživateli, jakou strategii upínání zvolí. Rozhoduje tvar dílu a velikost série, podle těchto aspektů se volí vhodná metoda upínání obrobků, například v případě obrábění malých dílů a velké sérii je vhodné, aby se dílů na paletu vešlo co nejvíce, proto se volí například jednoduché šroubové upínky. V případě obrábění menší série a dílů větších rozměrů lze upínat pomocí svěráků, nebo vakuovým systémem. Největší výhodou paletových systémů, je svoboda ve výběru metody upínání dílů. Další výhodou je to, že palet je možné mít více, proto si lze připravovat díly do palety a mezitím obrábět další díly na paletě. Po skončení obrábění se paleta odaretuje, vymění za jinou a spustí se znovu obrábění. To vede k vysoké produktivitě a možnosti automatické výměny palet. Rychloupínací pneumatický systém palety a upínače je zprostředkováván pomocí čepu a membrány. Pokud aretační funkci plní čep nebo membrána, záleží už jen na konkrétním výrobcí systému. Poloha palety vůči upínači je zajištěna pomocí zámků. Paletový systém lze nakonfigurovat přesně podle požadavků jednotlivých zákazníků. Základní balíček paletového systému od firmy Pierson workholding, viz. Obr. 7, který obsahuje dvě palety, vychází na 60 000Kč. [11] [12] [13] [14] [15]

4.1 Zásady upínání

Pro správné upnutí je nezbytné dodržet tyto zásady:

- Nutnost čistých upínacích ploch
- Dobrý stav upínacích přípravků a zařízení
- Umístění upínacího zařízení na stole co nejbližší k vřetenu frézky
- Vhodné upnutí přípravku nebo zařízení
- Upnutí obrobku ve správné poloze
- Upnutí obrobku pevně, spolehlivě a bezpečně
- Při upínání nesmí dojít k deformaci obrobku
- Obráběná plocha je co nejbližší k upínací ploše stolu
- Zajištění rychlého a snadného upnutí polotovaru
- Zajištění dobrého odvodu (nic nebrání v cestě) třísky
- Řezné síly by měli přitlačovat obrobek do upínacího zařízení

4.2 Frézovací přípravky

Pokud je potřeba zajistit co nejmenší vedlejší čas, to je požadováno především při sériové a hromadné výrobě, je vhodné zvolit příslušný upínací přípravek. Jedná se o jednoúčelová upínací zařízení, která se upevňují na pracovní stůl frézky. Proto je důležité myslet na celkovou váhu obrobku, která může mít vliv na pohyby stroje. Jejich výhodou je především v jednoduchém a rychlém ustavení obrobku, čímž se docílí rychlé výměny. Další výhodou jejich využití je možnost upínání více polotovarů současně a zároveň je zachována vysoká přesnost. To má za následek snížení zmetkovitosti, přičemž se snižuje potřebná kvalifikace obsluhy. Díky tomu je zajištěna vysoká produktivita a jakost výroby. Druh přípravku je volen podle výkresu obrobku a podle druhu vykonávané činnosti. Díly se upínají za plochy, které se v dané operaci nebudou obrábět a zároveň nepřekáží obráběcímu nástroji.

Přípravky se dělí podle:

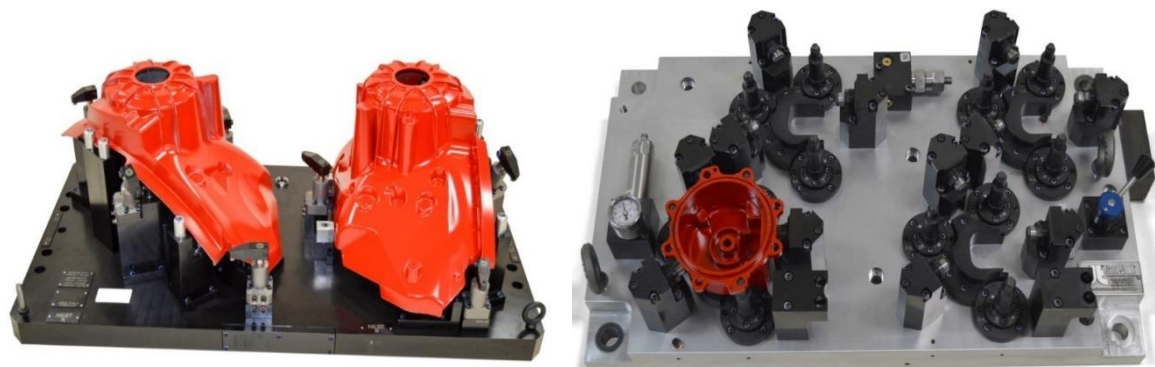
Použití na:

- Universální, které slouží k pravidelnému upínání stejného druhu polotovaru, s možností různé velikosti (strojní svěráky, kleštiny, sklíčidla). Tyto přípravky jsou vhodnější spíše pro kusovou výrobu, z důvodu nižší ceny a delšího času upnutí.
- Skupinové, běžně se jedná o přípravky, které jsou určeny pro konkrétní skupinu dílů.
- Stavebnicové, jedná se o přípravky, které se staví z typizovaných dílů.
- Speciální jsou přípravky, které se vyrábí na zakázku a jsou určeny pouze pro jednu určitou součást v konkrétní operaci.

Použitého zdroje upínání:

- Ruční upínání přípravku
- Mechanické upínání přípravku
 - Pneumatické
 - Hydraulické
 - Elektromechanické
 - Elektromagnetické
 - Kombinované

Jelikož je v dnešní době kladen velký důraz na krátký čas přeupnutí, je ruční upínání na ústupu a nahrazuje se upínáním mechanickým. Prvním zástupcem jsou elektromechanické upínací přípravky. Ty jsou specifické vysokou rychlostí upnutí, oproti ostatním systémům vyžadují podstatně nižší rozměry pro instalaci celého systému. Jsou využívány při sériové výrobě, kde se nevyskytují vysoké řezné síly. To je způsobeno nižší upínací silou. Vyznačují se minimální energetickou náročností. Dalším zástupcem je pneumatický systém, který je charakteristický svojí rychlostí a jednoduchostí. Lze zakoupit ve formě stavebnice, popřípadě zakázkově vyrobit. Přípravek vyvíjí stálou snadno regulovatelnou upínací sílu. Příkladem běžné pneumatické upínky je upínací síla 17kN a provozní tlak vzduchu 0,6 MPa. Často z důvodu přijatelných rozměrů přípravku se pneumatické prvky kombinují s elektromechanickými, například pákové upínky, upínací klíny atd. Pneumatické přípravky mohou být ve formě upínek, popřípadě desek s vakuovým systémem, který funguje na principu přisátí dílu k povrchu přípravku. Využívá se například při obrábění plastových dílů.



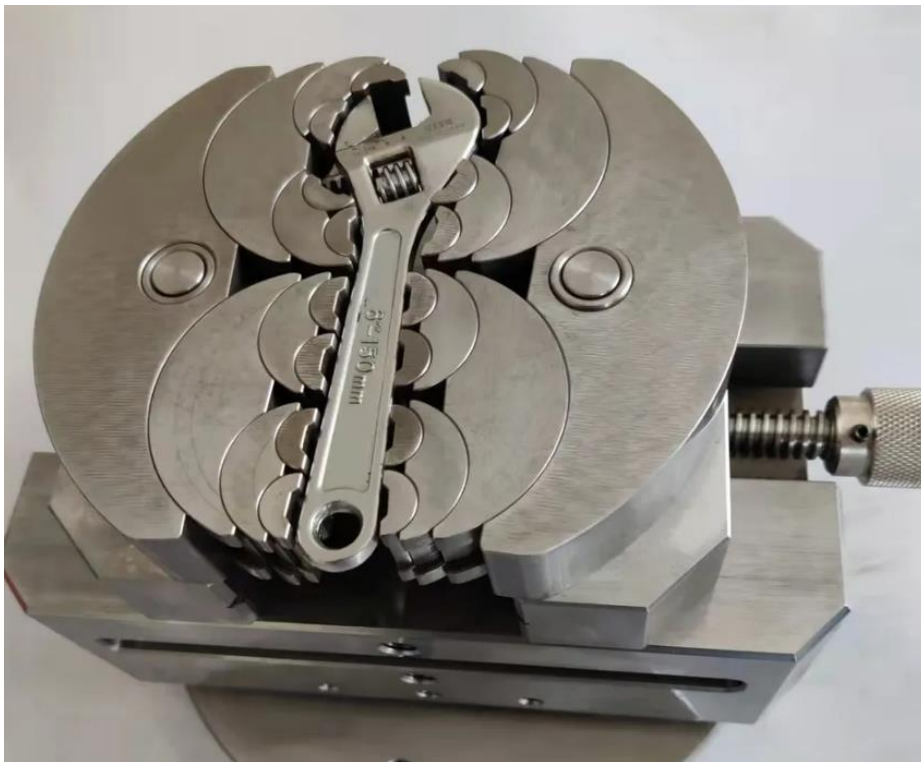
Obr. 8: Příklady použití hydraulických přípravků [46]

Zástupcem s nejužším upnutím ze skupiny mechanických přípravků je hydraulické upínání, viz. Obr. 8. Principem hydraulického upínání je stlačování tlakového oleje, který dosahuje tlaku až 10 MPa. Z tohoto důvodu jsou upínací válce menších rozměrů a upínače pracují s menšími zdvihy. U těchto přípravků vychází provozní a výrobní cena vyšší, což je způsobeno potřebou dalších zařízení, která jsou k provozu nezbytná (olejový rozvod, hydrogenerátor). Elektromagnetické upínací přípravky lze pořídit ve formě obdélníkové, kruhové, nebo sinusové desky. Charakterizují se upnutím za jednu stranu dílu a použitím pouze feromagnetických materiálů. Magnetickou sílu lze plynule regulovat. Zároveň se magnetické přípravky pyšní nízkou konstrukcí a možnou

univerzálností. Je možné takto upínat díly s hladkým i hrubým povrchem. Upínací síla magnetického systému dosahuje až 140 N/cm^2 . [16] [17] [18]

4.3 Strojní svěráky

Strojní svěráky patří k nejrozšířenějším způsobům upínání. Na spodní části mají několik otvorů, do kterých se vkládají vyměnitelné zámky, podle typu upínacího stolu. Zámky slouží pro ustavení polohy svěráku. Na pracovní stůl frézky jsou upevněny pomocí dvou šroubů, nebo pomocí upínek. V případě upínání do stolu s T drážkami je poloha zabezpečena pomocí dvou vodících per, která se ustaví do vodících drážek stolu. Při upínání na paletový stůl je poloha zabezpečena pomocí čtyř zámků. V případě užití paletového systému lze svěrák upevnit dokonce i pomocí kleštiny. Pokud je požadována přesnější poloha, je možné jí docílit pomocí číselníkového úchylkoměru, který se upevní na nepohyblivou část stroje a pohyby stolu je získána hodnota úchylky. Svěráky jsou většinou používány pro rozměrově menší součásti. Pokud by bylo třeba upnout součást větších rozměrů je možné dát více svěráků vedle sebe. Toto řešení se hojně využívá při velkosériové výrobě.



Obr. 9: Svěrák s fraktálními čelistmi [47]

Jednou z výhod strojních svěráků je dobré materiálové zpracování, díky tomu je zajištěna vysoká přesnost, tuhost a dostatečná pevnost při upnutí.

Konstrukčním materiálem je kvalitní litina, upínací plocha je zajištěna vyměnitelnými čelistmi, které mohou být broušené z indukčně kalené oceli nebo hliníkové (záleží na zvolených čelistech). Dříve se svěráky rozlišovaly podle funkce na pevné, otočné, sklopné, universální a prizmatické (samostředící), popřípadě jejich kombinace. Výhodou otočného svěráku je možnost otáčení v rozsahu 360°. Tuto funkci má i svěrák sklopný, ale disponuje zároveň i možností pootáčení součásti ke kolmé rovině až o 90°. Za zmínku stojí svěrák s fraktálními čelistmi (fractal vise), který byl patentován už okolo roku 1900. Tento svěrák se vyznačoval možností upnutí tvarově složitých součástí. Princip spočívá v celkem třiceti tvarově rotačních přizpůsobitelných čelistech, které rozloží upínací tlak celkem do třiceti dvou kontaktních bodů. Dříve se tento svěrák používal k upínání asymetrických obrobků, viz. Obr. 9. V dnešní době v důsledku širokého množství vyměnitelných čelistí se využívá především ve šperkařství.

Dnes se svěráky dělí především na samostředící a pevné, ale využívají se také duální a modulární svěráky. Samostředící svěráky mají dvě čelisti, přičemž jsou obě pohyblivé. Při upínání na samostředícím svěráku se zajišťuje automatické nastavení obrobku do středu. Tím se docílí dobré přesnosti, rychlého přeupnutí, účinnosti a opakovatelnosti. Jsou vhodné pro čtyř, ale i pětiosé frézování, a to i v seriové výrobě.

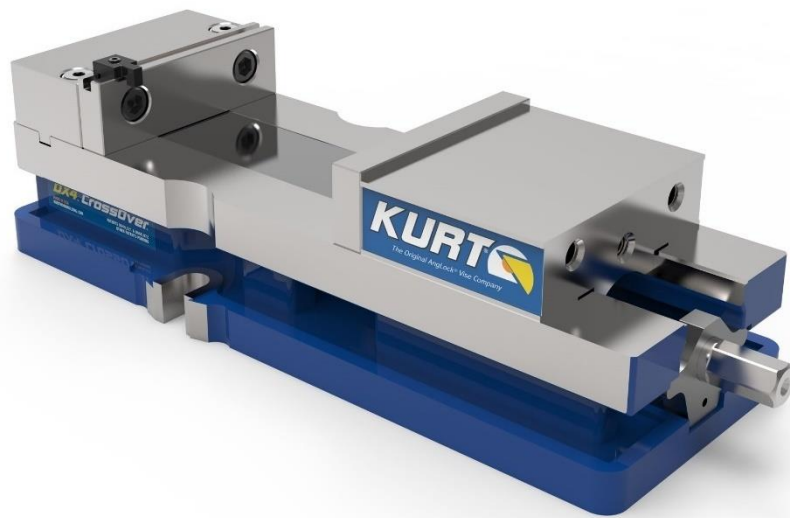


Obr. 10: Samostředící duální svěrák [48]

Díky možnosti modifikace lze udělat z jednoduchého samostředícího svěráku duální, viz. Obr. 10. Toho se docílí pomocí vložení přídavné pevné střední čelisti mezi krajní pohyblivé. To má za následek možnost upínání dvou obrobků

do jednoho svěráku najednou. Konkrétně samostředící svěrák řady čtyři od výrobce Kurt vychází v přepočtu na 42 300 Kč.

Pevné svěráky se vyznačují stejně jako samostředící dvěma čelistmi, ale s tím rozdílem, že jen jedna je pohyblivá a druhá má pevnou polohu (nemění se), viz. Obr. 11. Hlavní pohyb vykonává pohyblivá čelist, která přitlačuje obrobek k pevné čelisti a tím zajistí dostatečnou upínací sílu pro požadovanou operaci. Převážná část pevných svěráků má specifický systém přitlaku pohyblivé čelisti. To zajišťuje při utahování tlačení pohyblivé části vždy do dna svěráku a díky tomu není obrobek nadzvedáván. Pevné svěráky zajišťují oproti středícím mnohem větší upínací síly, z tohoto důvodu jsou vhodnější pro hrubovací operace. To však neznamena, že by se nemohli uplatnit i při dokončování jen je třeba zvolit vhodnou upínací sílu. Při cenovém porovnání vycházejí levněji. Konkrétně pevný svěrák řady čtyři od výrobce Kurt vychází v přepočtu na 16 150 Kč. Do pevných svěráků můžeme řadit i svěráky modulární, které jsou určeny pro upínání dlouhých předmětů. Vyznačují se velkou přesností, ta se pohybuje až okolo 0,005/100 mm.



Obr. 11: Pevný svěrák [49]

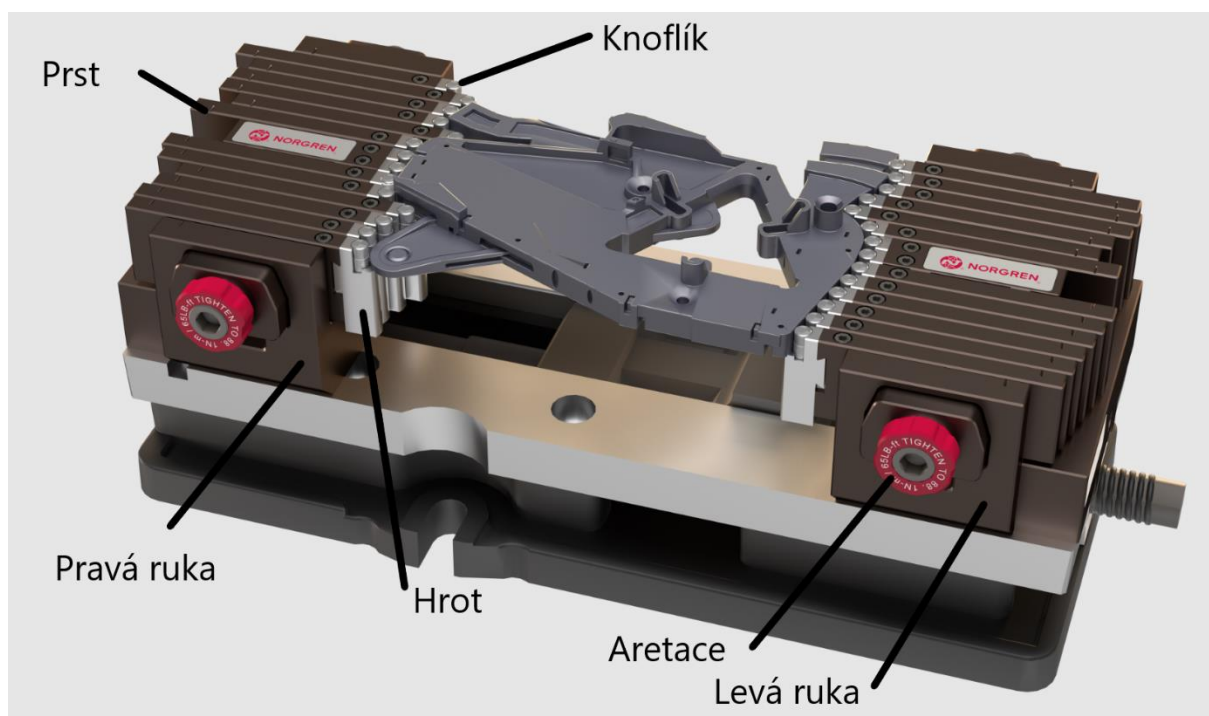
Nejrozšířenější způsob upínacího systému je mechanický, ale mohou být i elektrický, hydraulický a pneumatický, popřípadě jejich kombinace. Jednotlivé upínací systémy se odlišují především využívanou energií při upínání. Některé jsou vhodnější do automatizované linky, například pneumatické a elektronické upnutí, jiné zase pro kusovou nebo malosériovou výrobu př. mechanické

a hydraulické. Každý systém má své výhody i nevýhody (rychlost, síla upnutí, možnost programovatelnosti), ale všechny zajišťují to samé, což je upnutí součásti. Hlavní rozdíly jsou v cenách, účelu upnutí a v preferencích každého zákazníka. [19] [20] [21] [22] [23]

4.3.1 Vyměnitelné čelisti svěráků

Moderní svěráky jsou charakteristické vyměnitelnými čelistmi, z toho důvodu jsou strojní svěráky tolik oblíbené a používané. Tyto čelisti často dokážou usnadnit a urychlit práci. Obecně je důležité, aby obráběná plocha byla vždy co nejbližší čelistem, tím zabráníme chvění a vibracím. Čelisti můžeme dělit na běžné a speciální. Mezi běžné čelisti patří klasické měkké, tvrdé a prismatické čelisti. Všechny klasické čelisti jsou upínány na svěrák pomocí šroubů. Měkké čelisti jsou vyráběny z měkkých ocelí, nebo hliníkových slitin. Čelisti se dají koupit podle rozteče otvorů pro upnutí, nebo celé vyrobit. Pro porovnání cena čelistí o rozměru 150 mm x 25 mm od výrobce Haas vychází na 750 Kč. Velkou výhodou je, že měkké čelisti jsou snadno vyrobitelné. Pokud bychom si čelisti vyráběli například z dostupné automatové ocele ČSN 11 109 (11SMn30) cena vychází okolo 300 Kč, záleží na dodavateli materiálu. Měkké čelisti jsou tak oblíbené pro možnost obrobení styčných ploch. Díky tomu můžeme přizpůsobit čelisti do požadovaného tvaru. Jsou vhodnější spíše pro dokončovací operace. Tvrdé čelisti se vyrábějí z kalené a broušené oceli. Jsou k dispozici v mnoha provedeních: hladké, drážkované, osazené, zoubkované, zoubkované s osazením, vroubkované. Tvrdé čelisti se používají především pro upínání za rovinné plochy. Pro porovnání cena čelistí o rozměru 150 mm x 25 mm od výrobce Kurt se hladké provedení pohybuje okolo 1 050 Kč, provedení vroubkované 3 200 Kč. Výhodou tvrdých čelistí jsou velké upínací síly, při použití zoubkovaných čelistí dochází k vnikání čelistí do materiálu obrobku. Toto je vhodné především při hrubovacích operacích. Prismatické čelisti, stejně jako tvrdé, jsou vyráběny z kalené a poté broušené oceli. Prismatické čelisti mají jednu vertikální drážku a jednu horizontální drážku, obě ve tvaru V. Tyto drážky zajišťují upínání rotačních součástí, ale jen do určitého průměru podle použitých čelistí. Drážek se může na čelistech vyskytovat více v různých velikostech. Stejně jako tvrdé čelisti upínají nerotační součásti za rovinné plochy, avšak o úhel naklonění 45°. Prismatické čelisti svými drážkami zároveň polotovary také vystředí. Všechny výše zmíněné

čelisti lze navzájem dle potřeby kombinovat – například použití hladkých a prizmatických čelistí. Pro porovnání cena čelistí o rozměru 150 mm x 25 mm od výrobce Kemmler vychází na 3 500 Kč.



Obr. 12: Čelisti Adaptix [50]

Mezi čelisti speciální řadíme takové čelisti, které nabízí většinou pouze jeden výrobce. Jedná se o čelisti, které jsou svým způsobem upínání nějak atypické oproti běžným čelistem. První zmíněné jsou od firmy Norgren a jmenují se Adaptix. Jedná se o čelisti, které si uživatel nastaví podle požadovaného upínaného tvaru, viz. Obr. 12. Polohování čelistí je zprostředkováno pomocí tzv. pravé a levé ruky, každá ruka má tzv. prsty, kterých mají čelisti dohromady dvacet osm, z toho jsou pouze čtyři nepohyblivé. Každá ruka má svůj aretační systém, kterým se prsty uzamknou v žádané poloze. Na konci každého prstu je hrot, který má vyměnitelný knoflík. Knoflíky přicházejí do styku s obrobkem. Knoflík může být buď kulový, nebo zoubkovaný. Materiálem je kalená ocel, ale může být i tzv. měkká ocel nebo slitina hliníku, které se dají dále přizpůsobit tvaru obráběním. Postup při upínání nové součástky spočívá nejprve ve vložení součásti mezi čelisti, dále se napolohují prsty každé ruky a zaaretují. Nakonec se součást upne do čelistí. Mezi výhody čelistí Adaptix patří velké možnosti polohování čelistí za krátký čas, tím pádem není nutnost skladovat spoustu běžných čelistí. Velkou nevýhodou je cena, která vychází v přepočtu na 157 000 Kč.

Dalším zástupcem speciálních čelistí je výrobce Matrix s čelistmi X-CLAMP. Zde se o bod dotyku starají tzv. písky, které se dokonale přizpůsobí nejen jakémukoliv tvarově složitému povrchu, ale i jeho tělu. Součást, která je vložená mezi čelisti je nejprve citlivě dotažena, tím dojde ke zkopírování povrchu součásti na čelisti. Dále se čelisti zaaretují, nakonec se součást dostatečně dotáhne.

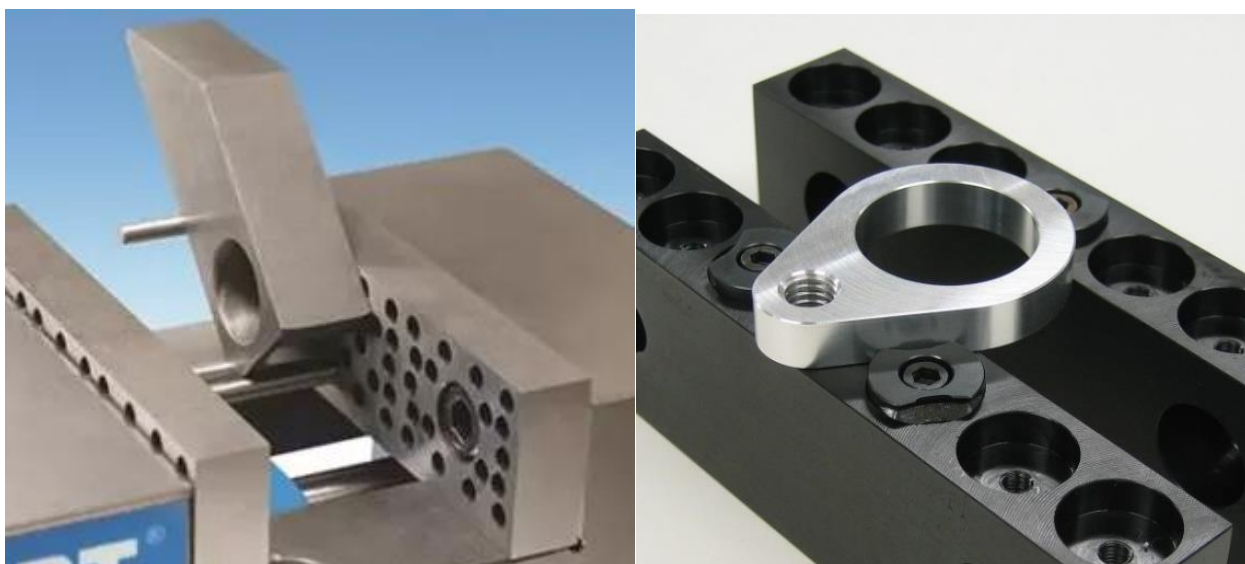
Čelisti X-CLAMP nabízejí pravděpodobně nejdokonalejší přizpůsobení k povrchu součásti. Upínání nových součástek je jednoduché, rychlé a velmi efektivní. Používá se například k obrábění upínací části lopatek turbín. Jsou k dispozici v několika rozměrech, které začínají na 21x23,8 mm a končí u 79x54 mm. Čelisti Vari-Clamp jsou od výrobce OML, jde o velmi nízkou konstrukci stacionární i pohyblivé čelisti. Pohyblivá část je vybavena otáčecím neboli vyvažovacím mechanismem. Čelist je navržena tak, aby byla schopna upnout šikmý, nebo ne příliš hladký povrch. Každá má několik zhotovených otvorů, do kterých se vkládají vyměnitelné rotační dosedací kolíky. Dosedací kolíky mohou být hladké, drážkované, odstupňované, popřípadě jejich kombinace. Tyto čelisti jsou vhodné především pro upínání tenkých obrobků nebo odlitků, viz. Obr. 13.



Obr. 13: Zleva X-CLAMP, Vari-Clamp [51], [52]

Dalším zástupcem provedení speciálních čelistí je výrobce Kurt s čelistmi 3-In-One-System. Tyto na první pohled nevypadají nijak speciálně, ale opak je pravdou. Jedná se o klasické čelisti podobné hladkým, ale s tím rozdílem, že jedna má v sobě celkem padesát tři otvorů. Funkce čelistí je taková, že se do požadovaných otvorů vloží kolíky, ty vytvoří rovinu, ve které je požádováno součást obrábět, viz. Obr. 14. Těchto rovin lze mít nadefinovaných více najednou.

Díky tomu lze provádět funkci čtyřosého obrábění i na tříosé frézce. Čelisti se vyrábí celkem v sedmi variantách odstupňování otvorů a to v 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, až po 45°. Výrobní tolerance otvorů je 0,02mm. Nevýhoda těchto čelistí je, že lze upínat součásti pouze za rovinné plochy. Pořizovací cena se pohybuje okolo 9 500 Kč. Za zmínku také určitě stojí VersaGrip a TalonGrip od výrobce MITEE-BITE. V případě VersaGrip se jedná o alternativu aplikace měkkých čelistí. Ty nabízejí vysokou všestrannost a poskytují řešení pro obtížné aplikace. Každá čelist má na horní straně předhotovených šest otvorů. Do otvorů se podle velikosti a tvaru součásti vkládají dorazy půlkruhového tvaru s vnikajícími zuby, které zabraňují bočnímu a horizontálnímu pohybu dílu, viz. Obr. 14. Díky tomu můžeme upínat i více kusů najednou. Používají se pro díly řezané plamenem, odlitky a dokonce i součásti s negativním tahem. Jedna sada čelistí vychází na 4 100 Kč.



Obr. 14: Zleva 3-In-One-System, VersaGrip [53], [54]

Čelisti TalonGrip jsou specifické hlavně velmi malou plochou upnutí, která je pouze 1,5mm. Jsou ideální pro malé díly, obtížné aplikace, nebo prototypové práce. Maximální tvrdost upínaného materiálu je až 40 Rockwell. Čelist má shora drážku, do které se vkládají zoubkaté destičky. Metoda TalonGrip je díky vysoké upínací síle vhodná pro vysokou hloubku řezu při hrubování. Dále je možné upnout až několik dílů najednou. Cena jedné sady vychází na 3 450 Kč. Mezi speciální vyměnitelné čelisti lze řadit také 3D tištěné. Jedná se o způsob výroby pomocí FDM technologie, kde tištěný materiál je termoplast. V CAD softwaru se vytvoří z modelu dílu jeho negativ, pro který se vymodelují čelisti. Ty jsou

identické s měkkými čelistmi s tím rozdílem, že jsou z plastu. Velká výhoda výroby pomocí 3D tisku je jeho nízká cena a v dnešní době dobrá dostupnost. Z těchto důvodů jsou vhodně pro kusovou výrobu. [20] [22] [24] [25] [26] [27] [28] [29]

4.4 Sklíčidla

V problematice sklíčidel pro CNC obráběcí stroje je možné se setkat také s pojmem silová sklíčidla. Jedná o automatizované upínací zařízení, které se využívá především na soustruzích a obráběcích centrech. Jednoduše lze říci, že sklíčidlo je mechanický upínací prvek, který má za úkol bezpečně držet obrobek v požadované poloze během obráběcích procesů. Toto upínací zařízení charakterizuje kruhová struktura, konstantní upínací síla a jeho čelisti disponují radiálním uspořádáním. To má za následek ideální držení symetrických součástí. Pohonem CNC sklíčidel je ve valné většině pneumatický, nebo hydraulický systém. Vlivem modernizace je možné moderní sklíčidla naprogramovat, což zajišťuje vysokou flexibilitu, rovnoměrné rozložení tlaku, rychlé a plynulé pohyby sklíčidla. Další výhodou programovatelnosti pohonů čelistí sklíčidel je automatické a přesné ovládání. Ovšem je třeba dát pozor na správné vycentrování čelistí. Hlavní části sklíčidla jsou: tělo, čelisti, klínový píst, tažná matice a pístoní matice. Do těla sklíčidla se umísťují ostatní části. Má dutý kruhový tvar a upíná se na vřeteno. Čelisti se na těle upínají do drážek a zajišťují bod dotyku s obrobkem. Vyrábí se z kalené oceli, slitin hliníku, nebo lehce obrobitelné oceli. Záleží na typu čelistí. Klínový píst převádí svůj pohyb v ose Z na pohyb čelistí v ose X. Zajišťuje tak požadovanou upínací sílu. Tažná matice zprostředkovává pohyb mechanismu sklíčidla z hydraulické nebo pneumatické energie. Pístoní matice spojuje tažnou matici s klínovým pístem. Sklíčidlo se pohybuje díky principu stlačovaného vzduchu nebo kapaliny, která vytváří požadovaný tlak. Vytvořený tlak zapříčiní pohyb klínového pístu, který pohybem vpřed tlačí čelisti v radiálním směru od osy. V opačném případě se čelisti pohybují ve směru k jejich ose. Při výběru sklíčidla se bere ohled na tři specifikace: počet čelistí, rozsah upínání a velikost sklíčidla. Volba počtu čelistí závisí na tvaru upínané součásti. Nejběžněji se využívají tří, nebo čtyřčelistová sklíčidla, ale na trhu se objevují i sklíčidla s více čelistmi. Tříčelistová sklíčidla jsou

vhodná pro válcové a šestihranné polotovary, naopak čtyřčelistová se využívají mimo válcových také pro průřezy čtvercových, obdélníkových nebo osmihranných polotovarů. Při volení počtu čelistí je třeba brát ohled na požadovanou funkci a náklady.

4.4.1 Druhy sklíčidel

Sklíčidla lze dělit podle: typu konstrukce, způsobu ovládání a velikosti obrobku. Podle typu konstrukce se dělí na tři druhy: samostředící, nezávislé a kombinované. Samostředící sklíčidla, také známá jako universální, mají spojené čelisti s rolovacím kolečkem. Díky tomu se pohybují všechny čelisti stejně. Jedná se o většinu tříčelistových sklíčidel.

V případě nezávislých sklíčidel se jedná především o čtyř, nebo šestičelistová sklíčidla. Znamená to že každou čelistí lze pohybovat zvlášť, a tím lze docílit upnutí i součástí s nepravidelnými tvary. Kombinovaná sklíčidla disponují vlastnostmi závislých i nezávislých sklíčidel. Díky tomu lze ovládat čelisti společně nebo jednotlivě. Dělení podle způsobu ovládání zahrnuje tři typy sil: hydraulickou, pneumatickou a magnetickou. Výhodou těchto sklíčidel je rychlé a plynulé upínání dílů, tohoto je využíváno především na CNC strojích.



Obr. 15: Pneumatické sklíčidlo [55]

Hydraulická sklíčidla pracují na principu tlaku, který je vytvářen stlačováním pracovní kapaliny. Podle toho, jakým směrem proudí pracovní kapalina dochází k radiálnímu pohybu čelistí ve směru utahování nebo

povolování. Jejich výhodou je rychlost a přesnost upínání bez jakéhokoliv vyosení.

Pneumatická sklíčidla, viz. Obr. 15, jsou postavena na stejném principu jako hydraulická, s tím rozdílem, že místo pracovní tekutiny se zde využívá stlačování vzduchu. Oproti hydraulickým jsou pneumatická sklíčidla levnější, disponují vyšší odolností a tím pádem jsou i jejich náklady na údržbu menší. Oba typy se využívají ve valné většině v hromadné výrobě, kde je kladen vysoký důraz na rychlost přeupnutí součástí.

Magnetická sklíčidla lze využívat pouze k upínání obrobků z feromagnetického materiálu. Jejich výhodou je možnost upínání tenkostěnných dílů, u kterých by při upnutí na čelistovém sklíčidle hrozilo jejich ohnutí nebo zkroucení. Uvnitř sklíčidla se nacházejí elektromagnety, jež při styku se součástí vytvoří magnetický obvod.

4.5 Upínací kleštiny

Upínací kleštinou rozumíme typ sklíčidla, který se používá k upevnění obrobků menších rozměrů, ale také řezných nástrojů různých tvarů. Standardní upínání je nehybné, ale lze zajistit i otáčení během procesu. Výhodou kleštin je jejich nízká váha v porovnání s klasickými sklíčidly, zároveň ale nabízejí menší flexibilitu z hlediska geometrie obrobku. Stlačením vnitřních ploch ve tvaru kužele dojde zajištění dostatečné síly pro upevnění dílu na jeho konci. Čelisti kleštiny se do sklíčidla upínají mechanicky, a to pomocí nastavitelného klíče, imbusového klíče, nebo šroubováku, v závislosti na typu používané kleštiny. U moderních strojů je upínání dílů do kleštiny zprostředkováno pneumaticky, ale může být i hydraulicky, popřípadě mechanicky, to se využívá hlavně k upínání nástrojů do kleštiny.

Důležitým faktorem při práci s kleštinami je čistota, v případě výskytu nečistot na upínacích plochách kleštiny hrozí nejen její poškození, ale i poškození upínaného obrobku. Kleštiny mohou mít odlišné konstrukce upínacích ploch, tvary a dělení. Díky vhodné volbě kleštiny docílíme konstantní upínací síly po délce obrobku a zároveň se zajistí stabilita při obráběcích operacích. Nejčastěji se využívají kleštiny dělené na tři, nebo čtyři části. Dále dělíme kleštiny na jednostranné, nebo oboustranné. Jednostranné mají drážky pouze na čele, zatímco oboustranné mají drážky spojující čelní a zadní část. Velikou výhodou upínání pomocí kleštin je možnost jejich konfigurování. Nakombinovat lze vnitřní povrch (hladký, drážkovaný), povlak vnitřních i vnějších ploch pro speciální ochranu. Dále lze konfigurovat tvar upínané součásti, ať už klasické rotační, nerotační, kuželovité, stupňovitě vrtané, nebo speciální. Výrobou speciálních kleštin, viz. Obr. 16, se zabývá firma iSWISS.



Obr. 16: Možnosti provedení kleštin [59]

Při návrhu kleštiny se volí typ dělicích drážek (S, L, W atd.), díky tomu lze minimalizovat zachycování třísek do štěrbin kleštiny. V neposlední řadě lze využívat vložky do kleštin. Ty mají za úkol ochránit materiály, které jsou náchylné na poškrábání.

4.5.1 Typy kleštin a jejich použití

Kleštiny 5C jsou dělené na tři části a jsou jednostranné. Do sklíčidla se upevňují pomocí závitu, který je vnitřní i vnější. Tato kleština má dutý kruhový

tvár, díky čemuž lze upínat delší polotovary. Mají vysoké využití v soustružnických a frézovacích kovoobráběcích operacích.

Kleštiny R8 nemají průchozí tělo, tudíž se jedná o kleštinu s dorazem. Stejně jako 5C jsou dělené na tři části a jsou jednostranné. Nejlépe poslouží pro větší díly s kratší délkou. Využívají se především na frézkách.

Kleštiny ER, jsou jedny z nejoblíbenějších kleštinových systémů. Využívají se na frézkách. Mají větší rozsah než kleštiny 5C a R8, díky tomu, že jsou oboustranné. Při utažení obrobku je docíleno rovnoměrného upnutí a zároveň je zachován válcovitý tvar. Charakteristickým znakem je kleštinová matice, která se uvnitř uzamkne a díky tomu drží kleštinu na místě. Na rozdíl od kleštin R8 nebo C5 se do pouzdra netáhne zezadu, ale je tlačena maticí do kuželového pouzdra.

Kleštiny TG se podobají kleštinám ER, jejich upínací rozsah je však menší. Stejně jako ER kleštiny disponují vysokou upínací silou a přesností. Z důvodu menších rozměrů se využívají především k upínání tvrdokovových nástrojů pro frézování, závitování atd.

Kleštiny Autolock disponují speciálním autouzamykacím systémem. Používají se pro upínání nástrojů na frézkách.

Kleštiny 355E jsou dělené na tři části a jsou jednostranné. Označují se také jako brusné nebo U2 kleštiny. Používají se především k broušení nožů, soustružení a frézování.

Kleštiny DIN 6343 jsou specifické možností upínání dlouhých součástí. Jsou standardizovány podle německé normy. Jedná se o jednostranné kleštiny dělené na tři nebo čtyři části. Výhodou je snadná a rychlá výměna kleštiny ve sklíčidle. Využívají se hlavně na soustruzích.

Kleštiny RDA/DA jsou oboustranné, což zajišťuje lepší upínání stejně jako u typu ER. Kleštiny jsou vhodné pro většinu aplikací, kromě frézování, při kterém hrozí jejich prasknutí.

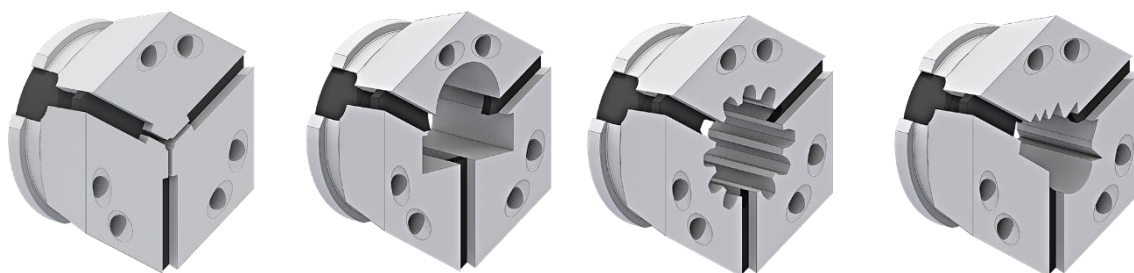
Kleštiny upínací jsou charakteristické širokým plochým čelem, přizpůsobitelným požadovanému tvaru obrábění. Díky tomu lze obrábět i součásti netypických tvarů a velkých rozměrů. [30] [31]

4.5.2 Speciální kleštiny

V případě upínání tvarově složitých součástí je nutné použít speciální kleštiny. Jedním z výrobců těchto sklíčidel je firma Hainbuch.

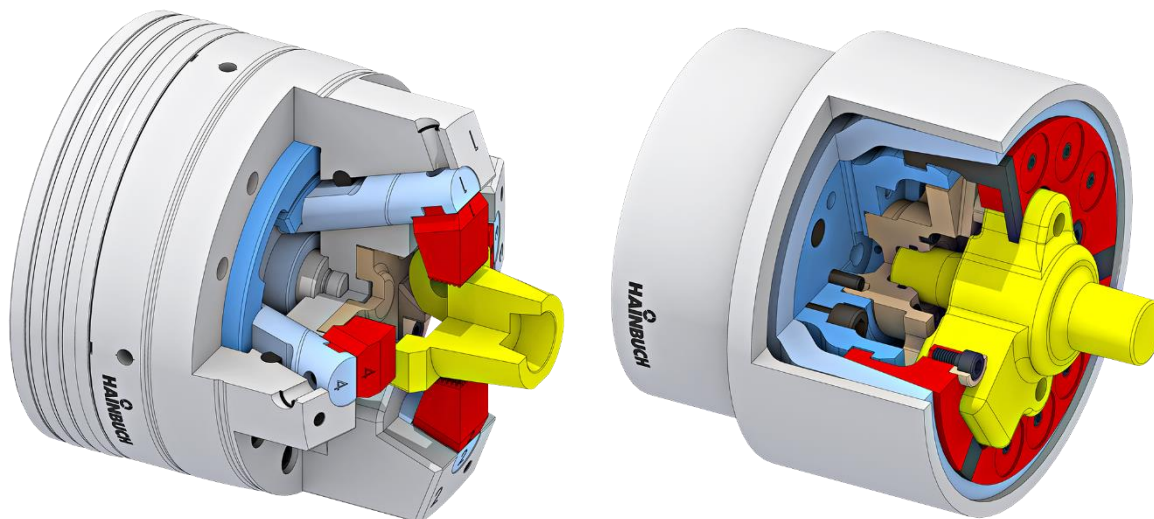
Prvním, zde zmíněným zástupcem speciálních kleštín, je kleština TOPlus/SPANNTOP, je vyrobena z uhlíkových vláken. Díky tomu disponuje až o 70 % nižší vahou oproti standartním ocelovým kleštínám. To zajišťuje menší namáhání, lepší produktivitu a dynamiku obráběcího stroje. Toho je dosaženo díky nižšímu momentu setrvačnosti.

Hřídelová kleština (Shaft chuck), zajišťuje extrémní upínací tuhost, která je vhodná pro hrubovací operace. Díky tomu je možné využít vyšší posuvy a rychlosti. V případě upnutí hřídele mezi hroty dosahuje házení maximálně 5 μm .



Obr. 17: Příklady tvarově složitých kleštín [58]

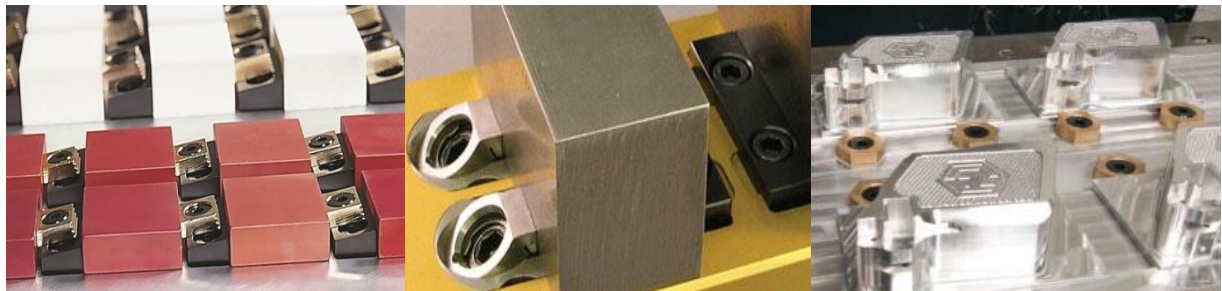
Dále do této skupiny patří kleštiny s tvarově složitými čelistmi. V případě opakovaného upínání tvarově složitých profilů, viz. Obr. 17, je výhodné si nechat vyrobit kleštinu pro požadovaný průřez. Výměna kleštiny je rychlá a jednoduchá. Tím se zvýší efektivita výroby a sníží upínací časy.



Obr. 18: Zleva šroubová kleština, segmentová kleština [56], [57]

Segmentová upínací kleština, viz. Obr. 18, zajišťuje upínání s kompenzací výrazně nevyvážených obrobků. Tato kleština nabízí velké možnosti z pohledu tvarově složitých dílů při současném využití vysoké upínací síly.

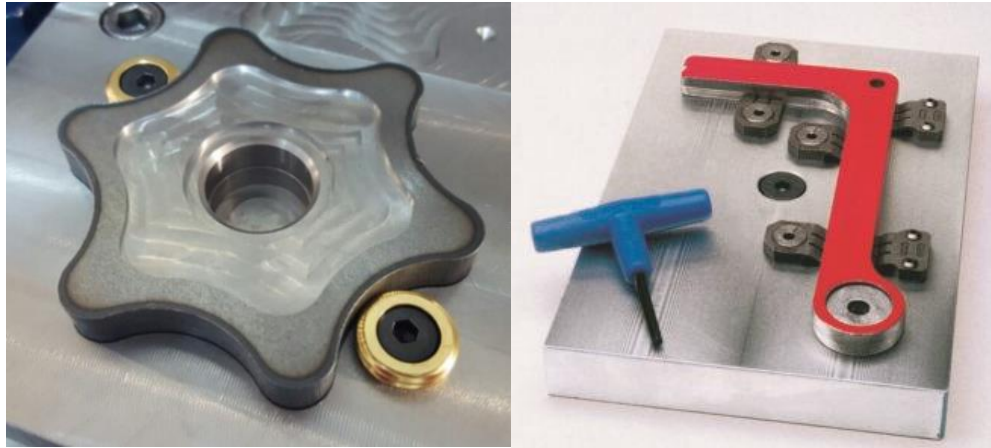
V dnešní době velkých technologických inovací se mimo klasické upínky využívají také moderní, které mají formu destiček. Tyto upínky jsou velmi oblíbené svojí uživatelskou přívětivostí, jednoduchostí a funkčností. První zde zmíněnou je Compact Toe Clamps. Jedná se o upínku, která pomocí vačkového systému zajišťuje pozitivní upínací sílu a zároveň vyžaduje velmi malý upínací prostor, viz. Obr. 20. Je vhodná pro sériové upínání, především díky její rovné zadní ploše. Upínací plocha nabízí dvě varianty, hladký a vroubkovaný povrch. Další upínkou je Dyba-Force Clamps. Její hlavní vlastností je velmi nízký profil a skvělá podpora, viz. Obr. 20. Toho je docíleno díky upevnění upínky v tzv. vložce, která se připevňuje pod povrch přípravku. Upínací čelist je pod úhlem, což má za následek vysokou upínací sílu. Povrch čelistí může být hladký nebo vroubkovaný. Fixture Clamps od MITEE-BITE je tvořena ze dvou částí, šroubem s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem a šestihrannou podložkou z mosazi, viz. Obr. 20. Vlastnosti této upínky jsou: nízký profil, rychlé a pevné upínání pomocí excentru (vačkového systému) a malé rozměry. Tato upínka je velmi oblíbená svojí jednoduchostí a zároveň vysokou účinností, která je zajištěna excentricitou (vyosením) upínacího šroubu. V praxi to znamená, že otáčením (dotahováním) šroubu se upínka zároveň přitahuje k obrobku a vytváří požadovanou upínací sílu.



Obr. 20: Zleva Compact Toe Clamps, Dyba-Force Clamps, Fixture Clamps [60]

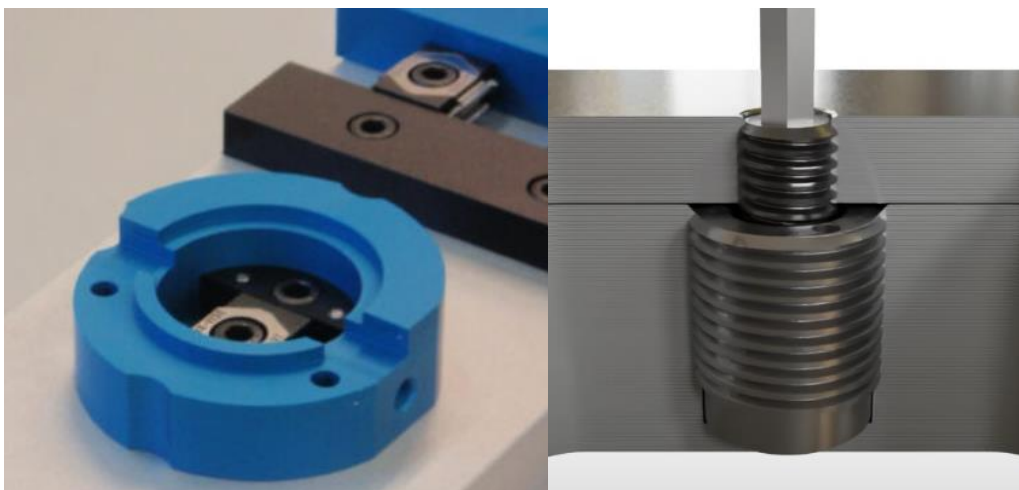
Obdobou Fixture Clamps jsou Knife Edge Clamps. Jediným rozdílem je, že místo šestihranné podložky zde najdeme podložku kruhovou s drážkováním, viz. Obr. 21. Tyto upínky jsou vhodnější pro hrubší povrchy jako jsou například odlitky, neboť využívají také vačkový systém utahování. Upínka KOPAL Mini Clamps je specifická svým velmi nízkým profilem, ale především tvarem, který připomíná prsty, viz. Obr. 21. Upínací prvek destičky je uložen excentricky a tím je zajištěno upnutí ve všech směrech. Prsty mají přídržnou sílu 3900 N, která tlačí obrobek dolů a to i na dílech, které mají negativní tah (odlitky). Upínka Series-9 je nízko profilová a utahování se zajišťuje pomocí excentrického šroubu. Zajímavostí však

je, že jako jediná nabízí šest různě vzdálených ploch, které se liší až o 5 mm od osy upínacího šroubu. Pokud chce uživatel změnit vzdálenost, jednoduše otočí upínku o 60° a má jinak vzdálenou plochu od osy. Upínka může být buď v hladkém nebo zoubkovaném provedení.



Obr. 21: Zleva Knife Edge Clamps, KOPAL Mini Clamps [61]

Upínka OK-VISE je specifická tím, že při dotahování dochází k rozpínání upínky z obou stran a tím dochází k přitlačování součásti do základny přípravku, viz. Obr. 22. Výhodou tohoto způsobu upnutí jsou vyměnitelné čelisti, mezi které patří i měkké, díky nimž lze dosáhnout požadovaného tvaru upínacích ploch. Dále je možné zvolit obrobitelné upínky, které lze dle potřeby přizpůsobit. Tyto jsou vhodné především pro součásti neobvyklých tvarů. V neposlední řadě je třeba zmínit upínky Invert-A-Bolt od výrobce ELIJAH Tooling. Lze je upínat jak do stolu s otvory, tak do T drážek. Upevnění upínky se provádí v případě zašroubování do otvoru pomocí speciálního nástrčného klíče a v případě T drážky se upínka pouze zasune do drážky. Je zde nutné, aby v polotovaru byl předhotoven otvor s vnitřním závitem. Součásti se upínají pomocí vyšroubování vnitřního šteftu z upínky, který se zároveň zašroubuje do součásti a díky tomu zajistí potřebnou upínací sílu, viz. Obr. 22. Tento způsob upínání je velmi efektivní, a jelikož je upínka schována v součásti, tak nedochází k omezení geometrie pohybu nástroje. Rozdílem mezi moderními upínkami a klasickými je jejich rozměr, ten se snaží výrobci přizpůsobit tak, aby byl co nejmenší a nepřekážel příliš při obrábění.



Obr. 22: Zleva OK-VISE, Invert-A-Bolt [62]

Moderní upínky lze mezi sebou dle potřeby kombinovat. Ovšem ne všechny jde upínat do T drážek nebo modulárních systémů. Pro některé je třeba vyrobit, případně zakoupit upínací přípravek. Příkladem toho jsou Dyno-Force Clamps. I přes tuto nepatrnou nevýhodu jsou moderní upínky v porovnání s klasickými mnohem efektivnější, uživatelsky příjemnější a díky jejich rozměru zabírají méně skladovacího místa. [6] [4] [12] [16] [27] [33]

5 FDM TECHNOLOGIE

Technologie fused deposition modeling (FDM), nebo známá také jako FFF, je metoda aditivní výroby (3D tisku), při které dochází k vytlačování nataveného materiálu přes trysku, za účelem vytváření 3D objektů. Oproti jiným technikám vytlačování materiálu je metoda FDM charakterizována výchozím materiálem, kterým jsou termoplasty, nejčastěji ve formě filamentu nebo pelet. Principem běžné FDM 3D tiskárny je, že filament protlačí tryskou předehřátou na příslušnou teplotu. Tryska termoplast roztaví a ukládá jej ve formě 2D vrstev na pracovní desku tiskárny. Na pracovní desce se postupně vytvářené vrstvy spojují a vytvářejí trojrozměrný objekt. Obecně lze o metodě FDM říct, že se na základě její dostupnosti a efektivnosti jedná o nejjednodušší z metod 3D tisku. Z těchto důvodů jí můžeme označit jako nejpoblábnější. FDM tiskárny jsou také velmi uživatelsky přívětivé, díky snadné obsluze a ceně. Proto dominují nad SLS pryskyřicovými tiskárnami.

5.1 Typy FDM tiskáren

5.1.1 Kartézská tiskárna

Nejvíce běžnou FDM tiskárnou je tiskárna s kartézským systémem. Nachází se zde tři krokové motory, které pomocí šroubů, řemenů a kladek zajišťují pohyb ve třech osách. V ose X a Z se pohybuje tisková hlava. V ose Y se pohybuje pracovní deska tiskárny.

5.1.2 Delta tiskárna

Pohyb tiskové hlavy na tiskárně Delta je zajištěn pomocí vertikálních kolejnič a tří nezávisle ovládaných ramen, přičemž jejich pohyb je spojitý. Tato tiskárna disponuje vysokými rychlostmi tisku a zároveň rozměrným prostorem v ose Z. Zároveň je však velmi náchylná na přesnost při sestavování a následné kalibraci.

5.1.3 Polar tiskárna

Jedná se o tiskárnu, využívající dva lineární rozměry, což je poloměr od počátku a výška. A dále jeden úhlový rozměr od 0°. Tudíž pracovní deska tiskárny rotuje a tisková hlava se pohybuje ve dvou osách. Polární tiskárny mohou mít různou konstrukci, avšak princip je stále stejný. Jedná se o tiskárnu, která je oproti jiným náročnější, a tak je i méně používaná.

5.1.4 Pásová tiskárna

Tato tiskárna je specifická svojí pracovní deskou, která je ve formě pásu. Tisková hlava pásové tiskárny je pod úhlem 45°. Díky tomu lze docílit tisku dílů s vysokou sériovostí nebo dílů, které jsou extrémně dlouhé. Jedná se o nejnovější typ FDM tiskárny.

5.2 Porovnání FDM technologie

Oproti ostatním metodám 3D tisku FDM nabízí jedno z nejvhodnějších řešení z pohledu její všestrannosti a široké materiálové nabídky. Mezi hlavní klady patří:

- Variabilita – FDM tiskárny lze na rozdíl od resinových tiskáren jednoduše rozměrově měnit podle požadovaných parametrů.

- Nízké náklady – Díky tomu, že jsou FDM tiskárny velmi jednoduché a v podstatě nejrozšířenější, jsou také jejich díly na trhu cenově nejdostupnější.
- Nízká cena materiálu – Materiály pro FDM tiskárny jsou ve srovnání s ostatními technologiemi tisku nejlevnější a nejdostupnější.
- Množství materiálů – Na většině FDM tiskáren lze tisknout v podstatě všechny možné druhy termoplastických materiálů. V některých případech je nutné provést pár malých změn.
- Očištění dílu – V porovnání s jinými technologiemi při FDM stačí pouze odstranit podpěry a výtisk lehce očistit. To je velmi časově a technologicky nenáročné.

FDM tiskárny ovšem nemají jen samé klady, ale i zápory:

- Seřizování a kalibrace – FDM tiskárny je nutné co nejpřesněji seřídit a zkalibrovat. Díky tomu lze pak dosáhnout spolehlivosti a požadované kvality tisku.
- Údržba – FDM tiskárny, jsou sice levné, ale je třeba se o ně starat a pravidelně udržovat například napínání řemenů, čištění extrudérů, mazání pojezdů a dokonce i výměna trysky.
- Kvalita materiálu – Finální výtisk je velmi závislý na kvalitě vstupního materiálu. Je tedy třeba dát důraz na rozměrovou přesnost filamentu. V neposlední řadě plasty absorbují vlhkost, což je pro tisk nežádoucí. Z toho důvodu je nutné materiály vhodně skladovat.

5.3 Kvalita tisku

Velmi důležitým faktorem při výběru technologie 3D tisku je poměr mezi náklady na jednotku plochy a kvalitou. FDM technologie je v tomto případě kompromisem mezi oběma faktory.

Mezi jeho klady patří:

- Mechanické namáhání – Vždy nelze hodnotit kvalitu tisku jen podle vzhladu součásti. FDM technologie dosahuje skvělých hodnot z hlediska mechanického namáhání. Proto je vhodné tisknout díly, které musí být pevné a odolné.

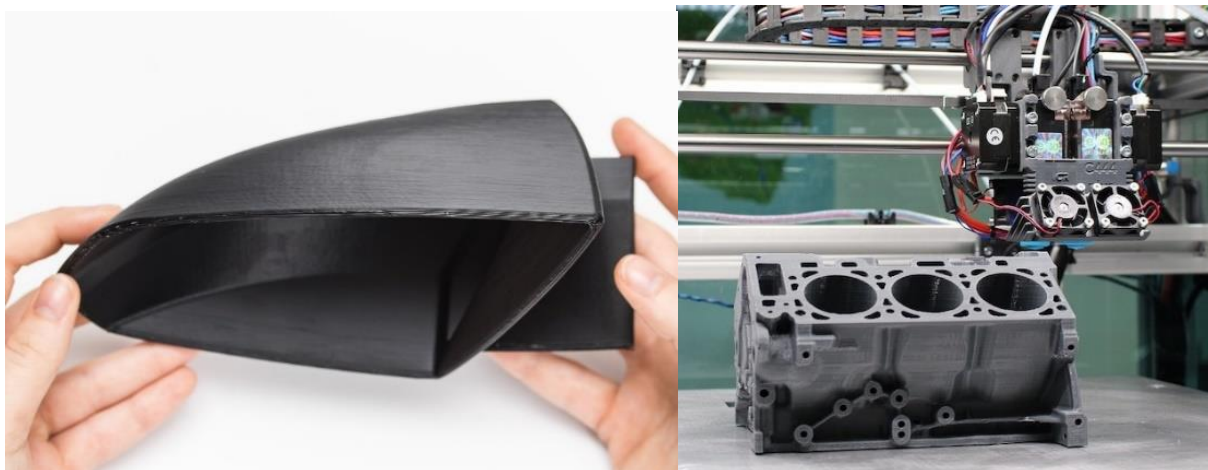
- Všestrannost – FDM tisk může vytvořit pevný, robustní, ale také estetický díl. Je třeba si na začátku zvolit funkci dílu a podle toho nastavit parametry tisku. Díky tomu lze tisknout velmi rychle, a nebo získat velmi dobrý vzhled.
- Nastavení sliceru – Každý díl musí nejprve projít programem (slicerem), kde dojde k slicování (vytvoření drah pro tisk) a teprve poté se může začít tisknout. Vhodným nastavením sliceru můžeme dosáhnout lepších kvalit a časů.
- Kvalita materiálu – Svůj vliv na finální výtisk má také volba materiálu, ovšem ne vždy platí, že dražší materiál je lepší. Ideální je materiál otestovat a podle toho pak přizpůsobit tisk.

Nevýhody spojeny s kvalitou FDM technologie:

- Povrch dílu – Pokud je kladen velký důraz na výslednou kvalitu povrchu, je třeba brát v potaz, že FDM technologie vrství materiál na sebe. Proto může být někdy problém dosáhnout detailního výtisku a je tak třeba počítat s finálními úpravami pro dosažení požadovaného vzhledu.
- Malé rozměry – Detailní díly s malými rozměry nelze tisknout na FDM tiskárně. Tisk je limitovaný nejmenší dostupnou tryskou o průměru 0,2 mm. V přesnosti a ostrosti jsou lepší SLS tiskárny.
- Slabá místa – Při vytváření vrstev dochází v místě styku k zeslabení součásti a tím klesá pevnost spojení mezi vrstvami.

5.4 Využití FDM technologie

FDM technologie díky tomu, že je levná, uživatelsky dostupná a není nijak náročná, si našla cestu do nejrůznějších odvětví: zdravotnictví, automobilový průmysl, letecký průmysl, modelářství atd. Ovšem původně se FDM technologie využívala pouze pro výrobu prototypů a návrhů. Díky svojí rychlosti, ceně a dostupnosti nahradila běžně užívané technologie. V některých případech malosériové výroby se z hlediska nákladů více vyplatí díly tisknout, než je obrábět, popřípadě lisovat. Přitom uživatel může velmi jednoduše poupravit díl a pokračovat ve výrobě bez jakéhokoliv upravování výrobní linky. Tato vlastnost je velký benefit 3D tisku.



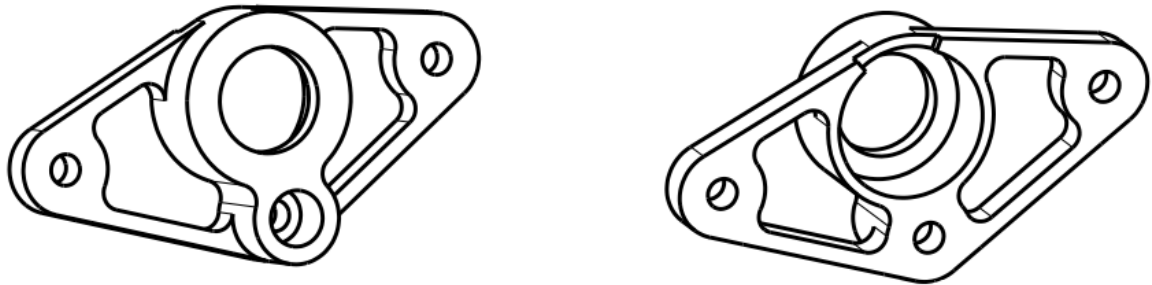
Obr. 23: Využití FDM technologie při návrhu zrcátka a prototypu nového bloku motoru [63]

V architektuře se dnes už 3D tisk využívá běžně, je to především pro velmi nízké náklady a krátké časy v porovnání s předchozími technologiemi výroby modelů. Využívá se k tištění modelů potencionálních projektů. Modely dokáží zákazníkovi mnohem lépe přiblížit a pochopit prostor objektu. Z těchto důvodů se přešlo z 2D prezentací na 3D. V automobilovém průmyslu našel 3D tisk své místo při navrhování komponentů nového modelu vozu, viz. Obr. 23. To se také využívá při testování aerodynamiky vozu ve větrném tunelu. Ve filmovém průmyslu se pomocí 3D tisku začaly vytvářet rekvizity filmových postav, což opět šetří čas i peníze. Díky tomu se zlepšují filmové efekty. V dnešní době se využívá 3D tisk také ve školství, to umožňuje lepší pochopení principů probíraných témat a zároveň studenti využívají tiskárny při práci na vlastních projektech. Ve zdravotnictví se využívá tisk například při tvorbě zubů, ale i kloubních náhrad.

Obrovské využití má v reverzním inženýrství, které se zabývá zjištěním principu dané součásti a následnou výrobou stejně nebo podobně fungujícího dílu. Díky tomu lze vyrábět díly a součástky, které dnes už nejsou k sehnání. Například dojde k poškození držáku staré lampy, bez kterého nemůže fungovat. Dříve by se lampa musela vyhodit, protože její oprava by byla nákladná a pracná. Dnes je ovšem spousta volně dostupných softwarů, kde lze držák vymodelovat a poté nechat vytisknout. Tak lze snadno opravovat a zachraňovat starší věci, popřípadě vyrábět levněji náhradní díly. Obecně lze říct, že FDM 3D tisk lze najít a využít dnes už v jakémkoliv odvětví. [34] [35] [36]

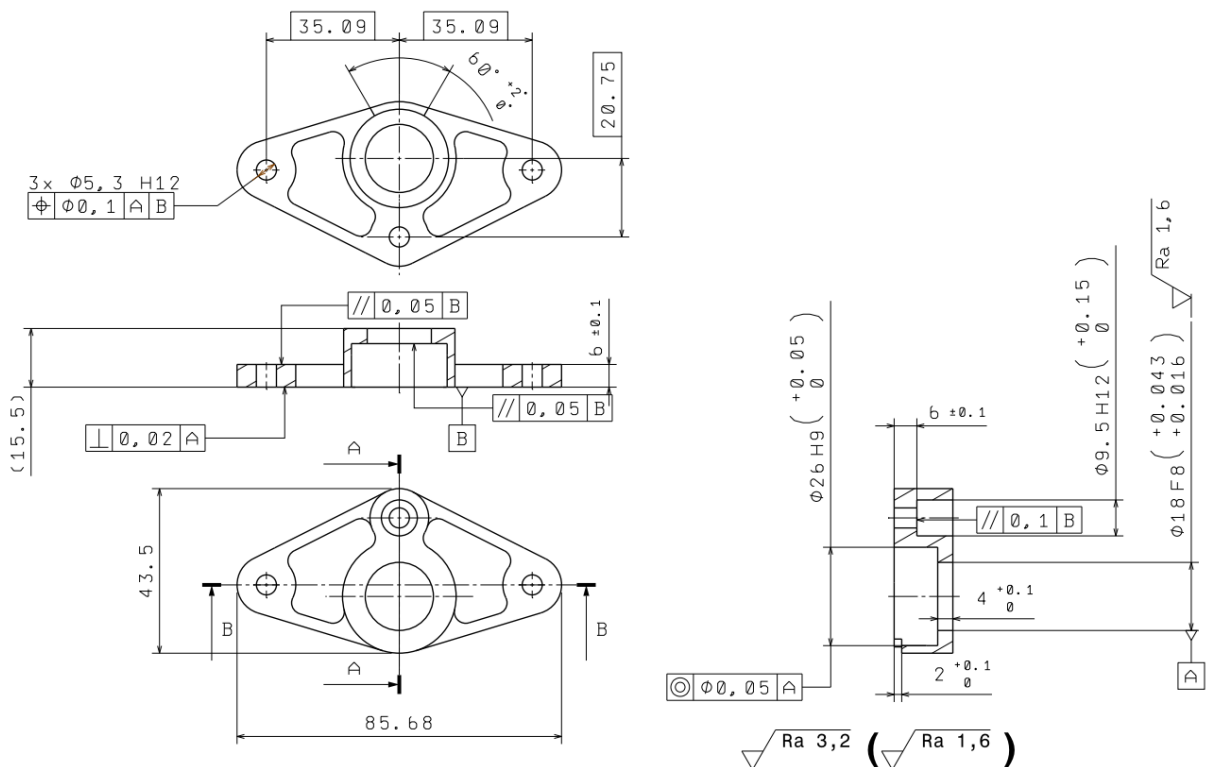
6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

6.1 Analýza požadavků na výrobu součásti



Obr. 24: Vyráběná součást

Navrhovaný upínací přípravek slouží pro výrobu držáku předních stabilizátorů Obr. 24, jež využívá školní tým studentské formule CTU cartech na svém vozu. Jedná se o symetrický díl podle vertikální osy. Díl byl vyroben pomocí technologie frézování na frézce od firmy Haas VF 2. Materiálem byla zvolena slitina hliníku EN AW 7075, která disponuje vysokou pevností v tahu, ta dosahuje až 600 MPa. Váha celé součásti odpovídá 39 g.



Obr. 25: Výřez z výkresu dílu

Na výkresu vyráběné součásti, viz. Příloha 1, je hned několik délkových, úhlových a geometrických tolerancí, viz. Obr. 25, které je při výrobě nezbytné

dodržet. Bylo třeba se zamyslet a zanalyzovat, jaké plochy budou funkční a jak docílit jejich správného vyhotovení z hlediska geometrických tolerancí.

6.1.1 Geometrické tolerance

Na výkrese se objevují tyto geometrické tolerance:

- Geometrické tolerance polohy umístění a souososti
- Geometrické tolerance směru rovnoběžnosti a kolmosti

Nejdříve je třeba stanovit ty geometrické tolerance, jichž bude problematické dosáhnout z hlediska výroby a které ne. Bylo stanoveno, že mezi geometrické tolerance, jež jsou obtížně dosažitelné patří:

- Souosost průměru 26 H9 k základně A, která by při více upnutí byla těžko dosažitelná
- Umístění třech děr o průměru 5,3 mm k základnám A a B, jež by bylo se těžko docílilo při vícenásobném upínání
- Kolmost na spodní ploše součásti k základně A, která by byla složitá pro dosažení, pokud by se vyráběla při jiném upnutí než základna A

Z těchto důvodů bylo rozhodnuto, že bude nutné vyhotovit tyto prvky při jedné operaci. Zvolila se jejich výroba během obrábění první strany dílu, kde se polotovar upne do paralelních čelistí.

6.1.2 Tolerance lineárních a úhlových rozměrů

Z hlediska lineárních a úhlových rozměrů je na výkrese několik požadavků. Jedná se o tyto typy tolerancí lineárních a úhlových rozměrů:

- Rozměry s toleranční značkou: $\varnothing 26$ H9, $\varnothing 5,3$ H12, $\varnothing 9,5$ H12, $\varnothing 18$ F8
- Rozměry s mezními úchylkami: $2 \times 6 \pm 0,1$; $4 +0,1$; $2 +0,1$; $60^\circ +2^\circ$

V případě naší součásti patří k nejdůležitějším rozměrům ty s předepsanou tolerancí ve formě toleranční značky, a to především průměr 26 H9, který má toleranční mez pouze 0,052 mm a průměr 18 F8, který má toleranční mez pouze 0,027 mm. Díky tomu bude zajištěna správná funkčnost součásti. U ostatních rozměrů, kde není uvedena konkrétní tolerance, se rozmezí tolerance volí podle všeobecné tolerance ISO 2768. V případě naší součásti byla všeobecná tolerance ISO 2768 stanovena na střední třídu přesnosti, jež odpovídá označení mK.

Poslední typ lineárních rozměrů se na výkrese vyskytuje tzv. teoreticky přesný rozměr. Tyto rozměry nám v našem případě značí exaktní umístění třech

děr o průměru 5,3 H12, které slouží pro upevnění dílu na formuli. Jedná se tedy o vzdálenost 35,09 mm od svislé osy dílu a 20,75 mm od vodorovné osy dílu, viz. Příloha 1.

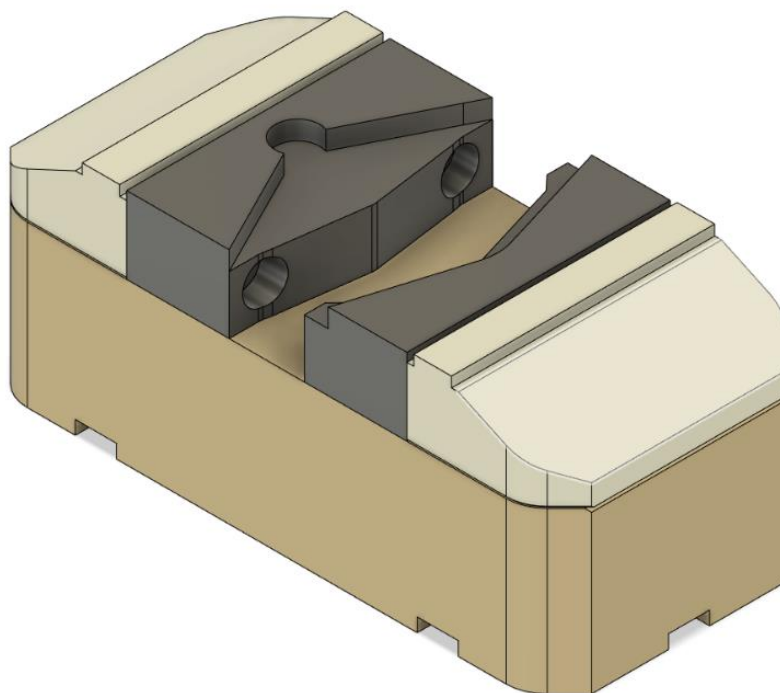
6.1.3 Požadovaná drsnost povrchu

Na výkrese jsou předepsané dohromady dva druhy drsností Ra 3,2 a Ra 1,6. Jedná se o drsnost zadanou střední aritmetickou úchylkou profilu. První drsnost Ra 3,2 je převládající drsnost a signalizuje, že všechny plochy musejí být obrobena na potřebnou drsnost 3,2 μm . Druhá drsnost má oproti první lepší jakost povrchu. Jedná se o drsnost Ra 1,6, jež je požadovaná pouze na průměr 18 F8. Žadáných drsností lze bez problému docílit pomocí běžného obrábění na frézce. V našem případě Haas VF2.

6.2 Návrh upínání

Upínací přípravek musel splňovat tyto požadavky: jednoduchost, dostatečnou pevnost, rozměrovou stálost, vhodné materiálové řešení – odolnost proti chladicí kapalině frézky, opakovatelnost, nízkou cenu, krátký výrobní čas.

6.2.1 Volba upínacího přípravku

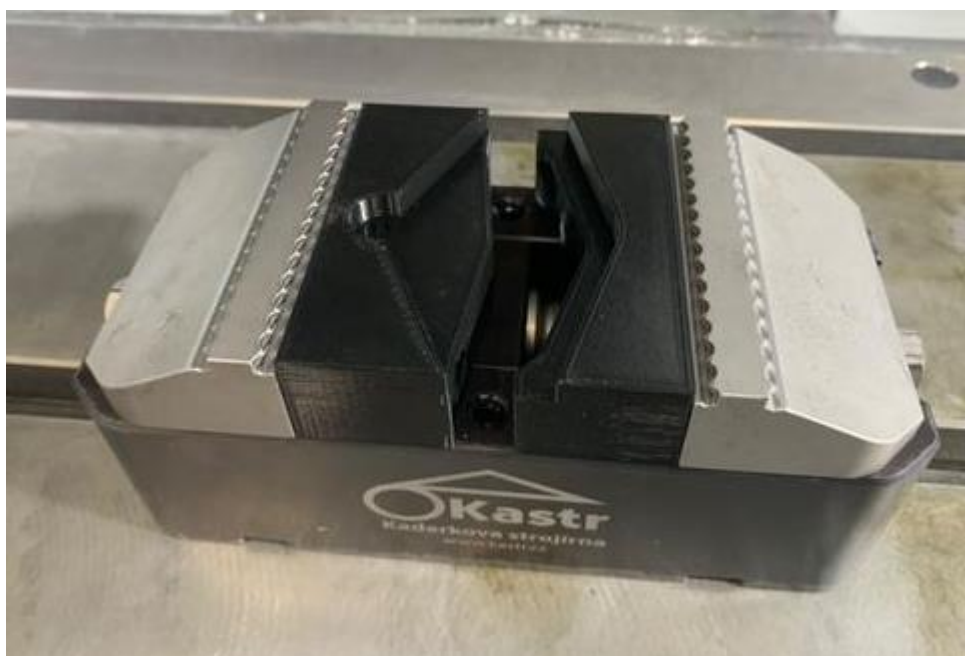


Obr. 26: Vizualizace upínače, již s navrhnutým příprvkem

Na základě požadavků zmíněných v kapitole 6.1 se rozhodlo zvolit upínací přípravek vyrobený pomocí aditivní technologie. Jedná se o 3D tištěné čelisti,

kteře budou upnuty do centřálního strojního svěřáku. Vyrobené čelisti mají již požadovaný finální tvar první strany vyráběné součásti a tak lze bez problémů součást přeupnout a následně doobrobit požadované plochy již po první operaci.

Z dostupných řešení volím výchozí strojní svěřák od společnosti KASTR s označením CU – T 77. Konkrétně variantu o délce 170 mm, jež je odpovídající velikosti dílu. Zároveň přípravek disponuje snadnou montáží měkkých čelistí. K tomuto upínacímu přípravku byla dodána i jeho virtuální verze v podobě CAD modelu, viz. Obr. 26. Model upínače byl ulehčením práce při samotném návrhu čelistí a následné vizualizaci již smontovaných čelistí s upínačem. Tento svěřák disponuje čelistmi, ve kterých jsou již vyrobeny díry se závitem M6. Těmito dírami jsou upnuty vyrobené čelisti na svěřák, viz. Obr. 27.



Obr. 27: Upínač Kastr CU – T 77, s vytištěným přípravkem

6.2.2 Konstrukce upínacích čelistí

Vyráběné čelisti se budou používat až pro druhé upnutí, kde dojde k následnému doobrobení součásti. Z těchto důvodů bylo rozhodnuto, že je nutné aby se tvar čelistí odvíjel od výsledného tvaru součásti, jež bude obroben už při prvním upnutí v rovných čelistech. Požadovaná výška součásti je podle výkresu 6 mm. Aby bylo možné na závěr obrábění zkosit ostré hrany, volí se výška upínacích ploch 5,5 mm. Tohoto rozměru se dosáhne pomocí osazení, jež bude zároveň součást podepírat, a tak se docílí zadefinování přesné polohy dílu ve všech směrech. Šířka čelistí se odvíjí od šířky použitého svěřáku, který je široký

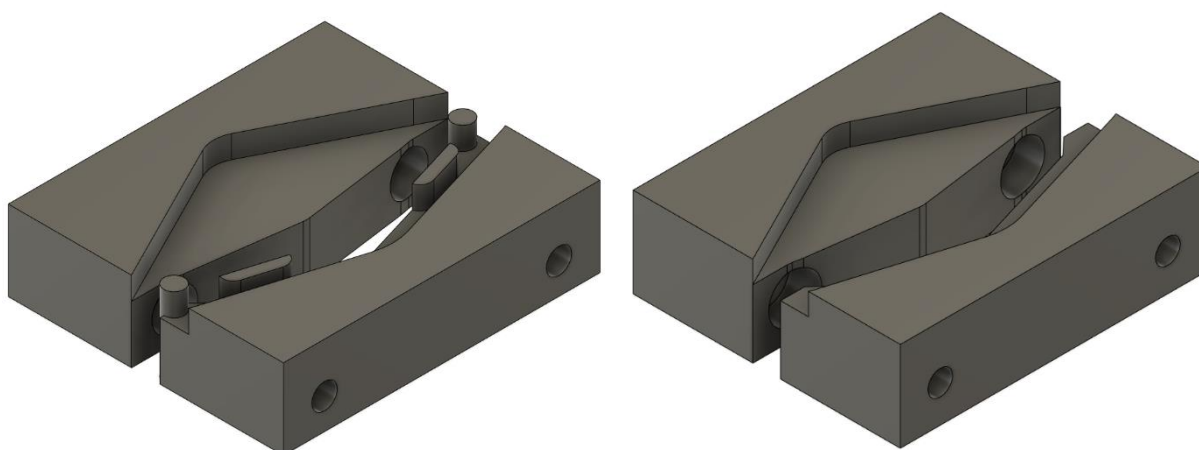
77 mm. Díky tomu je díl upnut skoro za celý svůj obvod. V neposlední řadě je nezbytné, aby se čelisti při utažení součásti nedotýkaly.

V CAD softwaru Autodesk Fusion byly vymodelovány čelisti. Disponují dírami se zahloubením pro šrouby s vnitřním 6HR M6 o délce 18 a 30 mm, díky čemuž se čelisti upevní ke svěráku. Rozteč šroubů pro upevnění je 57 mm. Upínací část je hluboká 5,5 mm a její tvar kopíruje siluetu dílu. Čelisti jsou následně vloženy do sestavy s upínačem pro lepší vizualizaci případných úprav.

6.2.3 Návrh variant provedení přípravku

První varianta

První varianta upínacího přípravku disponuje tzv. vodícími kolíčky, viz. Obr. 28, jež mají usnadnit ustavení součásti, jejich výroba je ovšem delší a náročnější na přesnost.



Obr. 28: Zleva první varianta návrhu, dále vizualizace druhé varianty

Druhá varianta

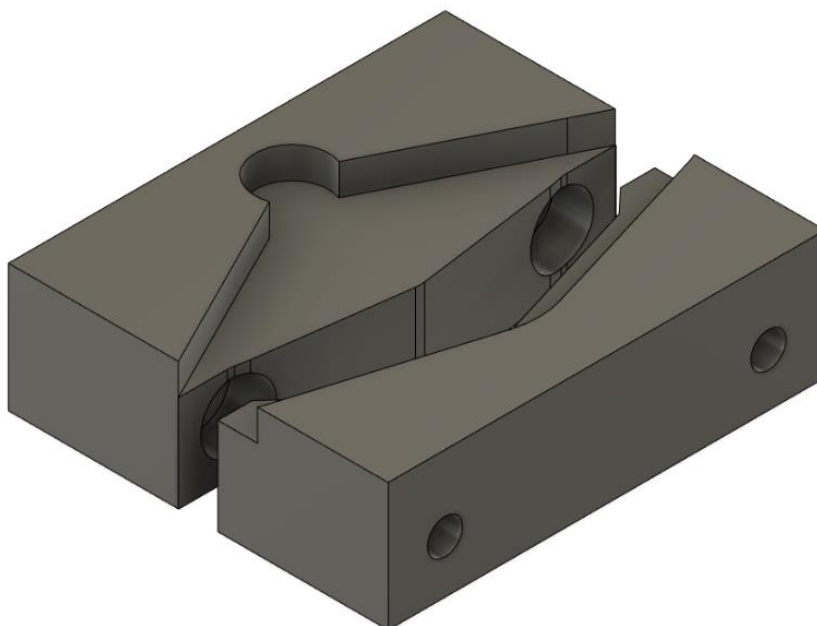
Druhá varianta disponuje jednoduchým designem, viz. Obr. 28 a rychlou vyrobiteľnosť. Její nevýhodou je ovšem špatné dosedání ploch do rádiusu osazení.

Třetí varianta

Třetí varianta je vylepšená verze druhé, viz. Obr. 29. Jedná se tedy o jednoduchý návrh, avšak velmi účinný a rychle vyrobiteľný.

Volba přípravku

Ze všech navržených variant se vybírá třetí varianta, z důvodů její funkčnosti, jednoduchosti a nízkého času výroby.

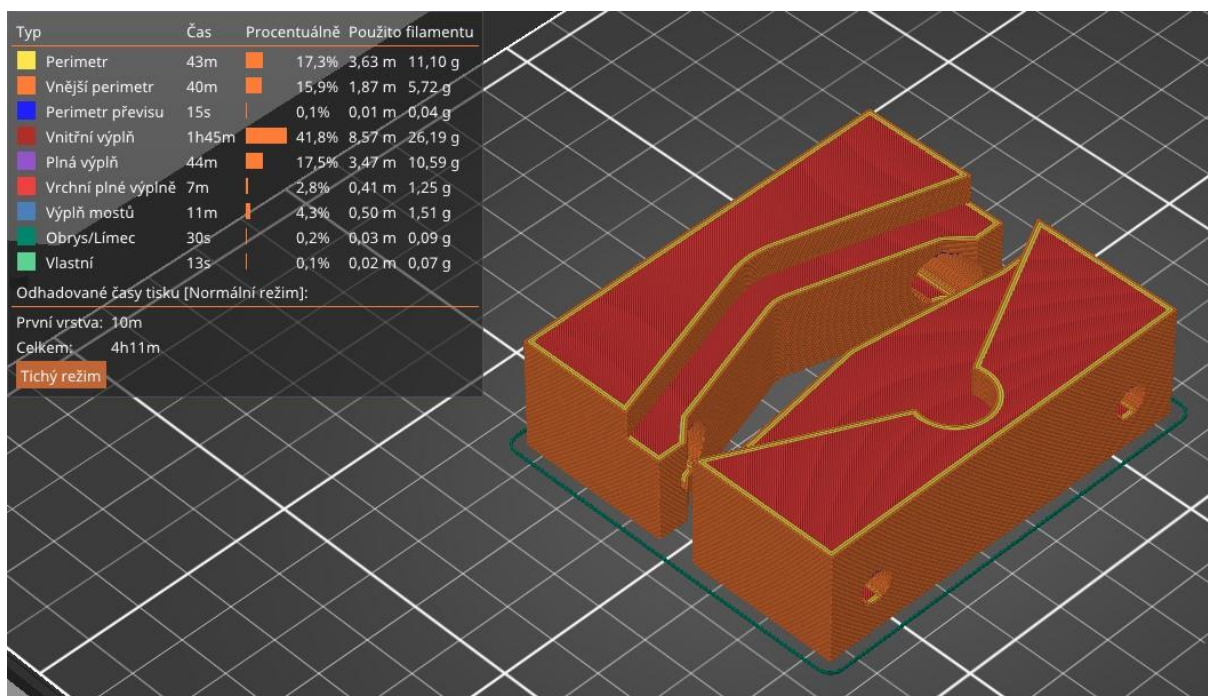


Obr. 29: Vizualizace vyrobené varianty upínacího přípravku

6.2.4 Tisk přípravku

Pro výrobu přípravku je rozhodnuto použít FDM technologii. Samotný tisk přípravku byl proveden na jedné ze školních tiskáren od společnosti Prusa, model i3 MK3S+ s tryskou o průměru 0,4 mm. Dále dojde k převedení CAD dat na G-kód pro 3D tisk. K tomu slouží program jménem Slicer. V mém případě se využije PrusaSlicer – 2.5.2, který je přímo od výrobce tiskárny Prusa i3 MK3S+, a proto je plně kompatibilní. Pro importování modelů do Sliceru je nutné, aby byly ve formátu STL. Vymodelované čelisti ze softwaru Autodesk Fusion 360 se vyexportují ve formátu STL a následně naimportují do Sliceru. Poloha tisku je vodorovná (stejně jako upnutí na svěráku), díky čemuž se dosáhne menšího času tisku. Jediné mínus je lehká deformace horních stěn děr pro šrouby. Ta však nemá žádný vliv na funkčnost.

Při nastavení Sliceru se zvolí správný model tiskárny, výšku vrstvy 0,2 mm, nastavení perimetrů u svislých stěn se zvětší z 2 na 3, hustotu výplně 50 %, vzor výplně kubický adaptivní, čímž se docílí optimálních vlastností a zároveň nízkého času tisku. Jako materiál se vybírá PET-G (polyethylen tereftalát glykol), který má stále vlastnosti v náročných prostředí jako je pracovní prostor frézky. Konkrétní filament je vybrán Prushament PET-G Prusa Galaxy Black v balení jednoho kg za 699 Kč s DPH. Pro tento materiál je teplota trysky 250 °C a teplota tiskové podložky 90 °C. Výroba zabral 4h a 11min, viz Obr. 30. Na tisk se spotřebovalo 56,56 g a 18,51 m filamentu. Přibližné výrobní náklady přípravku vycházejí na 42 Kč.



Obr. 30: Pohled do sliceru s informacemi o časech a rozložení jednotlivých vrstev při tisku

Pokud by se vyráběl přípravek běžnou metodou, tj. obráběním měkkých čelistí například ze slitiny hliníku EN AW 6082 byla by cena čelistí mnohem vyšší. Cena za 1kg materiálu je 140 Kč, ale samotné obrábění se pohybuje od 500 Kč výše za hodinu strojního času.

6.3 Návrh experimentu

Návrh experimentu byl stanoven takto:

- 1) Návrh a výroba upínacího přípravku
- 2) Vytvoření programu pro první stranu dílu
- 3) Dělení polotovarů – pomocí pásové pily
- 4) Obrábění první strany – upnutí do pevného svěráku
- 5) Stanovení sil při frézovací na dynamometru – obrábění testovacího vzorku
- 6) Výpočet sil při frézování – porovnání s naměřenými hodnotami
- 7) Výpočet požadované upínací síly vytvořeného přípravku
- 8) Tvorba programu pro druhou stranu dílu
- 9) Obrábění druhé strany, měření dílu – na upínacím přípravku
- 10) Obrábění druhé strany alternativní metodou, měření
- 11) Porovnání přesnosti výroby dvěma různými způsoby

6.3.1 Využívaný software

Pro tuto práci se využíval software od firmy Autodesk, konkrétně se jedná o program Fusion 360. Tento program je specifický oproti jiným tím, že se nejedná pouze o software, co podporuje funkce CAM (Computer Aided Manufacturing), tj. počítačem řízená výroba, ale podporuje zároveň i funkce CAD (Computer Aided Design), tj. počítačem podporované navrhování. Díky této kombinaci programu lze vymodelovat jak upínací přípravek, tak i dráhy pro obrábění importovaného dílu. V mém případě se nejprve vytvoří testovací vzorek, který poslouží pro měření sil při obrábění. Následně jednoduše z funkce návrhu se přejde do obrábění, kde dojde k vytvoření drah nástroje. Pokud by byla potřeba model vzorku nějak upravit, lze se přepnout do návrhu, provést potřebné úpravy a zpět vrátit do funkce obrábění.

6.3.2 Postup obrábění první strany

Po dohotovení upínacího přípravku následoval návrh samotného experimentu. První strana se obrobí na klasickém pevném strojním svěráku s paralelními čelistmi. Díky tomu se zajistí dostatečná upínací přesnost a docílí se požadovaných přesností dílu. Dále je potřeba vytvořit program pro první operaci.

Po vytvoření programu pro první operaci následuje samotné obrábění. Na pásové pile se nadělí polotovary ve tvaru kvádrů o rozměrech 135 x 70 x 35 mm. Každý polotvar je zarovnán na konvenční frézce. Poté se upne pevný strojní svěrák na pracovní stůl frézky. Dalším krokem je zajištění polohy strojního svěráku pomocí šroubů a matic ve tvaru T drážky. Když je svěrák dostatečně zajištěný, upne se polotovary. Dále je nutné na požadované pozice v zásobníku frézky vložit nástroje, které se využívají v 1. operaci obrábění. Každý tento nástroj je nezbytné odměřit a zkorigovat pomocí nástrojové sondy. Po úspěšné korekci nástrojů se zaměří poloha polotovaru na pracovním stole. K tomuto se použije měřící sonda, která je umístěna v zásobníku nástrojů. Když se obrobek zaměří ve všech osách, nahraje se do operačního systému frézky vygenerovaný NC program. Pak už jen následuje spuštění programu a frézka obrobí první stranu dílu dle vygenerovaných dat, viz. Obr. 31.



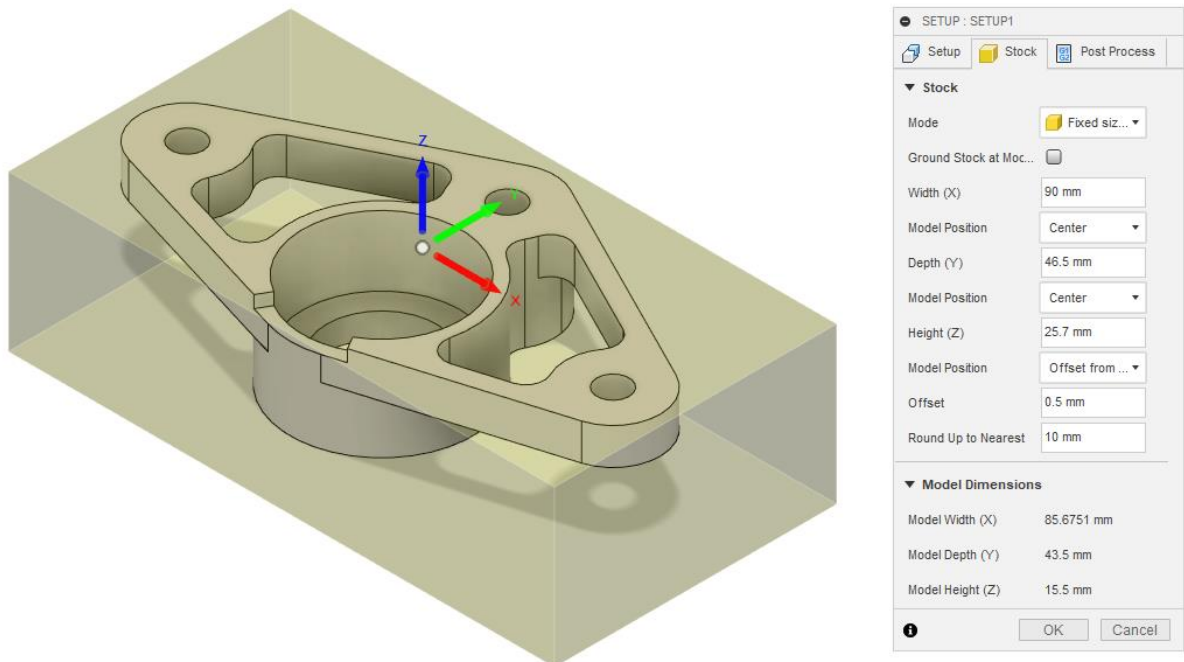
Obr. 31: Obrobení první strany, detail dílu

6.3.3 Operace 1

V pracovním prostředí manufacture dojde k vytvoření operace 1. Souřadný systém dílu se zvolí pomocí stock box point. Osy orientace se vyberou tak, aby byly kladné, viz. Obr. 32. Dále následuje volba polotovaru. Pro osy X a Y se zvolí vycentrování dílu na střed polotovaru. V ose Z se díl odsadí od horní plochy polotovaru o 0,5 mm.

V první operaci dojde k obrábění celé kontury dílu, díry $\varnothing 26$ H9, $\varnothing 18$ F8 a třech děr pro šrouby $\varnothing 5,3$ H12. Tento postup byl rozhodnut na základě analýzy geometrických tolerancí. Díky tomu je zajištěno, že chyba souososti a polohy děr

je závislá pouze na chybě polohování stroje a jeho přesnosti. Zároveň tedy nedojde k propsání chyby ze zaměřování a upínání dílu.



Obr. 32: Definování souřadného systému a polotovaru pro operaci 1

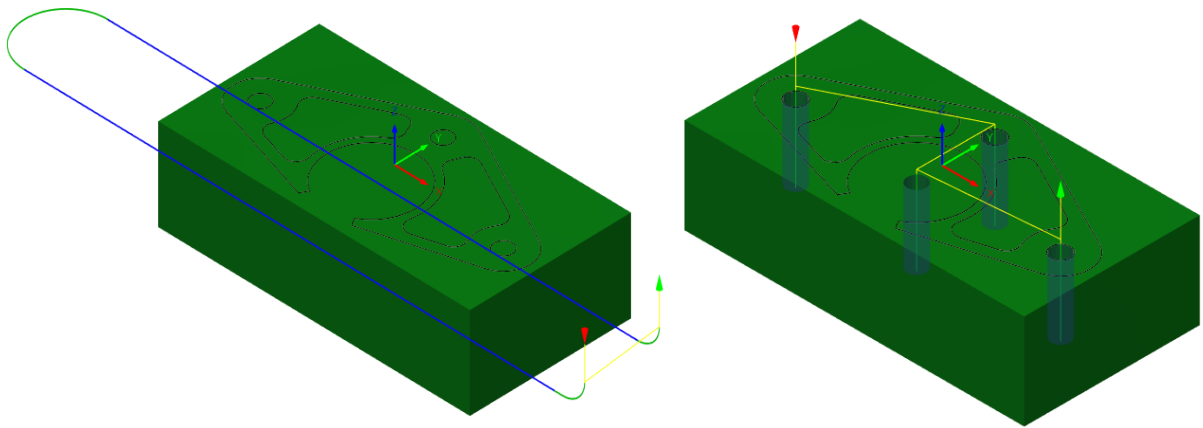
První úsek je zarovnání čela, viz. Obr. 33, pro tento úsek je použita čelní fréza.

POZICE	PRŮMĚR NÁSTROJE [mm]	POČET ZUBŮ	OZNAČENÍ	ÚSEK	ŘEZNÁ RYCHLOST [m/ min]	POSUV NA ZUB [mm]
T2	63	6	Ø63R0,8 mm	Face1	315	0,208

Druhý úsek je vyvrtání děr, viz. Obr. 33, pro tento úsek je použit vrták.

POZICE	PRŮMĚR NÁSTROJE [mm]	POČET BŘITŮ	OZNAČENÍ	ÚSEK	ŘEZNÁ RYCHLOST * [m/ min]	POSUV NA OT. [mm]
T13	5	2	Ø5mm 140°	Drill1	157,08	0,1

*Jedná se o maximální otáčky stroje



Obr. 33: Zleva zarovnání čela pomocí Face1, vyvrtání otvorů pomocí Drill1

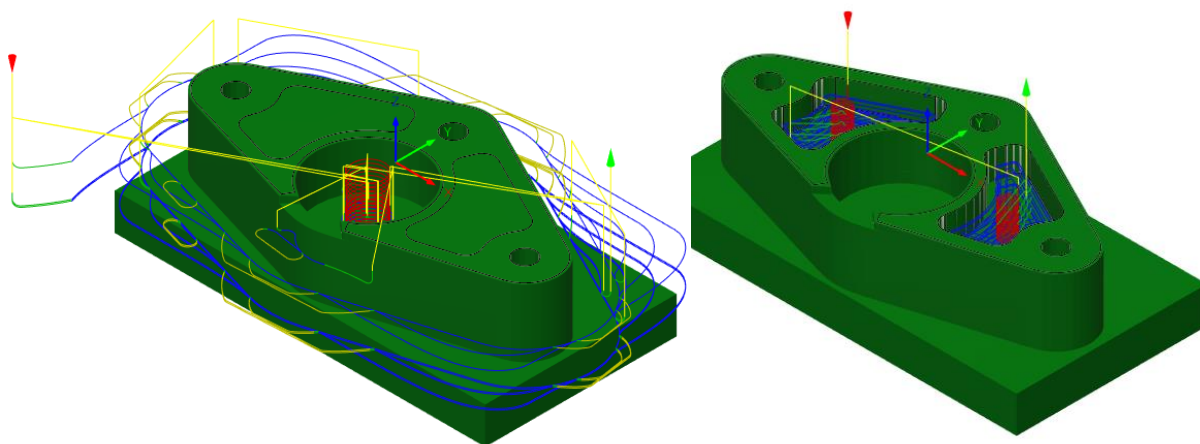
Třetím úsekem je hrubování. Je použita adaptivní strategie, která navrhuje dráhy tak, aby bylo docíleno konstantního zatížení a záběrových podmínek, viz. Obr. 34. Pro tento úsek je použita válcová fréza.

POZICE	PRŮMĚR NÁSTROJE [mm]	POČET ZUBŮ	OZNAČENÍ	ÚSEK	ŘEZNÁ RYCHLOST [m/ min]	POSUV NA ZUB [mm]
T12	16	4	S814HA16.0	Adaptive1	270	0,142

Čtvrtým úsekem je vytvoření odlehčení, viz. Obr. 34, které je obráběno v několika hladinách. Nájezd na hladinu je realizován frézováním po šroubovici. Díky tomu je docíleno konstantní zatížení nástroje. Odlehčení je frézováno o 1 mm níže, než je jeho reálná hloubka, aby po obrobení druhé strany nezůstaly na dílu otřepy. Pro tento úsek je použita válcová fréza.

POZICE	PRŮMĚR NÁSTROJE [mm]	POČET ZUBŮ	OZNAČENÍ	ÚSEK	ŘEZNÁ RYCHLOST * [m/ min]	POSUV NA ZUB [mm]
T5	4	4	S933HA4.0	2D Pocket1	125,66	0,03

*Jedná se o maximální otáčky stroje



Obr. 34: Zleva hrubování kontury Adaptive1, obrábění odlehčení 2D Pocket1

Pátý úsek je dokončení děr o průměru 5,3 mm, pro tento úsek je použita válcová fréza.

POZICE	PRŮMĚR NÁSTROJE [mm]	POČET ZUBŮ	OZNAČENÍ	ÚSEK	ŘEZNÁ RYCHLOST * [m/ min]	POSUV NA ZUB [mm]
T5	4	4	S933HA4.0	Bore1	125,66	0,06

*Jedná se o maximální otáčky stroje

Šestý úsek je dokončení díry o průměru 26 mm, viz. Obr. 35, pro tento úsek je použita válcová fréza.

POZICE	PRŮMĚR NÁSTROJE [mm]	POČET ZUBŮ	OZNAČENÍ	ÚSEK	ŘEZNÁ RYCHLOST * [m/ min]	POSUV NA ZUB [mm]
T14	8	2	S6108.0	Bore2	251,33	0,06

*Jedná se o maximální otáčky stroje

Sedmý úsek je dokončení díry o průměru 18 mm, pro tento úsek je použita válcová fréza.

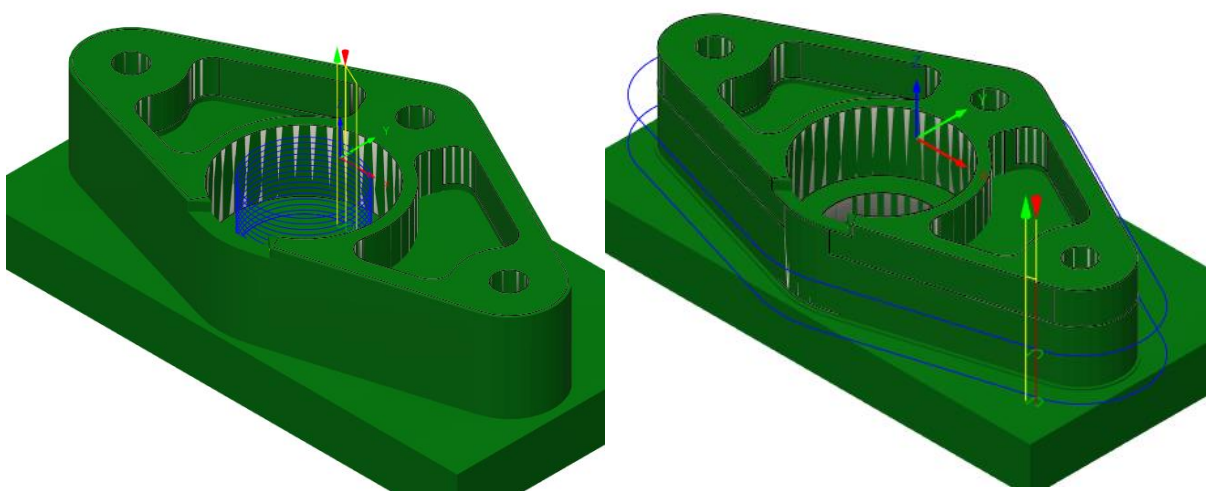
POZICE	PRŮMĚR NÁSTROJE [mm]	POČET ZUBŮ	OZNAČENÍ	ÚSEK	ŘEZNÁ RYCHLOST * [m/ min]	POSUV NA ZUB [mm]
T14	8	2	S6108.0	Bore3	251,33	0,06

*Jedná se o maximální otáčky stroje

Osmý úsek je dokončení vnější kontury, viz. Obr. 35, pro tento úsek je použita válcová fréza.

POZICE	PRŮMĚR NÁSTROJE [mm]	POČET ZUBŮ	OZNAČENÍ	ÚSEK	ŘEZNÁ RYCHLOST * [m/ min]	POSUV NA ZUB [mm]
T14	8	2	S6108.0	2D Contour1	251,33	0,06

*Jedná se o maximální otáčky stroje



Obr. 35: Zleva dokončování díry Bore2, dokončování vnější kontury 2D Contour1

Devátý úsek je dokončení vybrání u díry o průměru 26 mm, pro tento úsek je použita válcová fréza.

POZICE	PRŮMĚR NÁSTROJE [mm]	POČET ZUBŮ	OZNAČENÍ	ÚSEK	ŘEZNÁ RYCHLOST * [m/ min]	POSUV NA ZUB [mm]
T14	8	2	S6108.0	2D Contour2	251,33	0,12

*Jedná se o maximální otáčky stroje

Desátý úsek je sražení hran, pro tento úsek je použit srážeč.

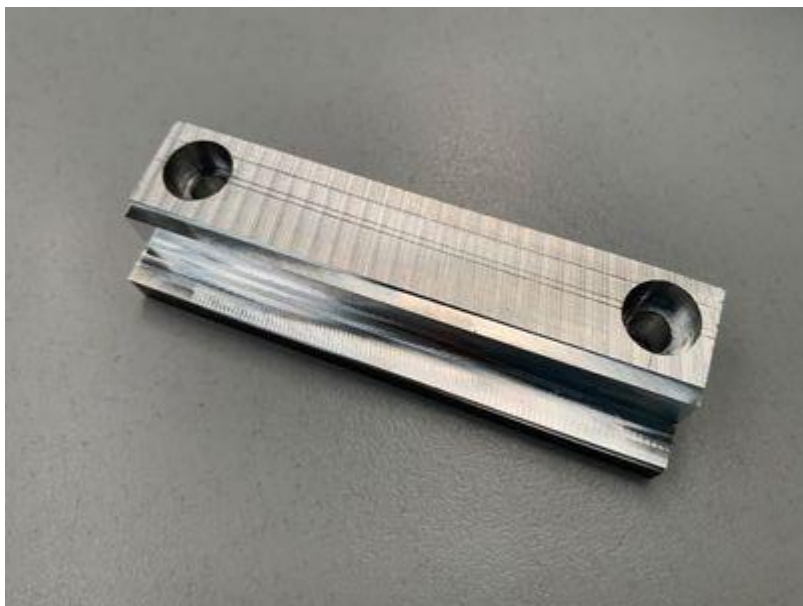
POZICE	PRŮMĚR NÁSTROJE [mm]	POČET ZUBŮ	OZNAČENÍ	ÚSEK	ŘEZNÁ RYCHLOST * [m/ min]	POSUV NA ZUB [mm]
T7	6x45°	2	S7406.0	2D Chamfer1	188,49	0,04

*Jedná se o maximální otáčky stroje

6.4 Měření upínacích sil a sil při obrábění

Po obrobení první strany dílu je nutné stanovit, jak velkou zvolit upínací sílu, aby nedošlo k deformaci vytištěného přípravku. Pro dosažení tohoto parametru se určí, při jaké operaci obrábění druhé části bude docházet k působení největších sil. To se stanoví podle toho, u jaké obráběcí operace dochází k největšímu odebírání materiálu najednou.

Jedná se tedy o obvodové frézování strategií 2D Contour3. Zde dochází k odebírání třísky o výšce 10 mm a šířce 0,5 mm. Pro měření sil se využije jednoho z dostupných měřidel. Vybírá se tenzometrický dynamometr, který primárně slouží k měření sil při soustružení, ale po úpravě lze použít také pro měření sil při frézování. Dále je nutné vyrobit vzorek, viz. Obr. 36, na kterém se bude moci působení obráběcích sil testovat.



Obr. 36: Testovací vzorek

6.4.1 Výroba testovacího vzorku

Testovacím vzorkem je kvádr o rozměrech 90 x 25,5 x 18 mm. Pro upevnění vzorku k dynamometru jsou vytvořeny díry pro šrouby s vnitřním 6HR M6. Nejprve se provede zarovnání ploch konvenční frézkou po řezání. Dále se změří rozteč děr šroubů. Když je stanovena přesná polohu děr. Provede se jejich výroba na stojanové vrtačce. Poté se do vrtacího sklíčidla upnu válcový záhlubník pro šrouby M6 a vytvoří se zahloubení pro hlavy šroubů. Oba používané nástroje (vrták i záhlubník) jsou z rychlořezné oceli. Vrtání a zahlubování se provádí za

neustálého chlazení technickým lihem a vysouvání nástroje, aby docházelo k odvodu třísek.

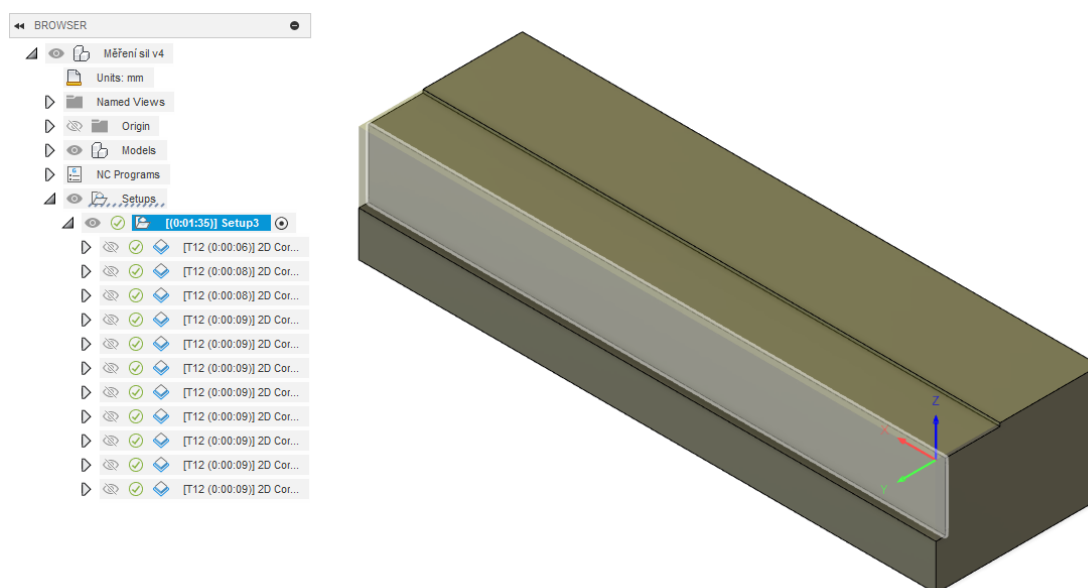
6.4.2 Tvorba programu pro měření

Měřicí vzorek byl vymodelován s využitím Autodesk Fusion. Vytvořila se nová operace pro technologii frézování, zvolí se pozitivní orientaci všech os a počátek souřadného systému pomocí levého předního bodu na horní ploše polotovaru. Rozměry polotovaru se nastaví pomocí možnosti relativní velikosti polotovaru (Relative size box). Když je polotovaz zadefinovaný, přesouvám se k tvorbě drah.

Pro obrábění celého testovacího vzorku se použije stejný nástroj, jako při simulované operaci. Jedná se o válcovou frézu.

POZICE	PRŮMĚR NÁSTROJE [mm]	POČET ZUBŮ	OZNAČENÍ	ÚSEK	ŘEZNÁ RYCHLOST [m/ min]	POSUV NA ZUB [mm]
T12	16	4	S814HA16.0	2D Contour	270	0,06

Pro celé měření se použije úsek obrábění, viz. Obr. 37, s vypnutým chlazením, aby nedošlo k poškození dynamometru.



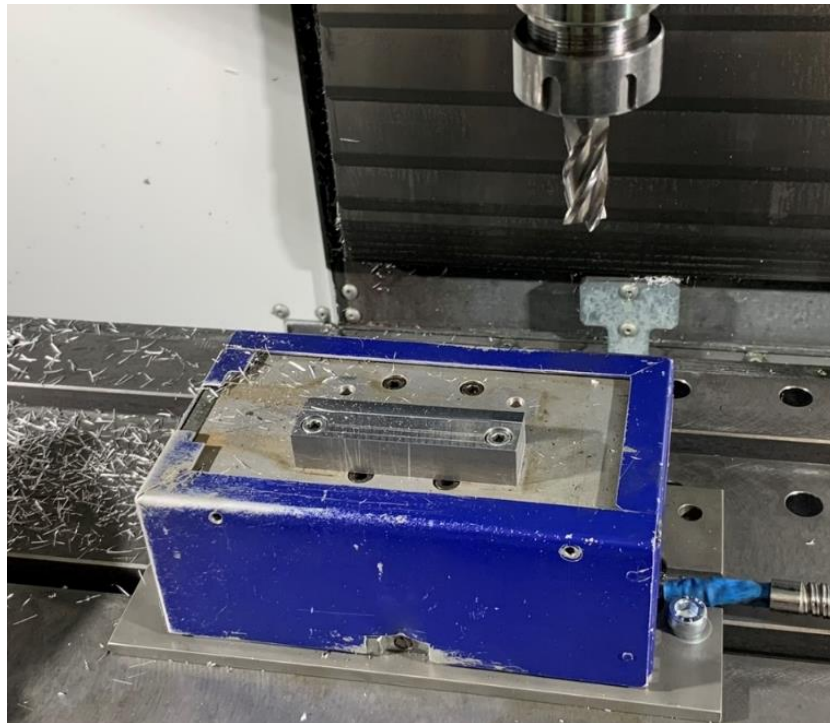
Obr. 37: Dráhy vytvořené pro měření

Provede se zarovnání horní a boční plochy o 0,5 a 0,3 mm. Dále se vytvoří celkem pět drah nástroje s řeznými podmínkami, jež odpovídají simulovanému

úseku. Všechny dráhy jsou stejné, vždy je přidán radiální přídavek o - 0,5 mm. Tím se docílí požadovaného kroku do boku (a_e), který je 0,5 mm; 1 mm; 1,5 mm a 2 mm.

6.4.3 Měření sil

Do pracovního prostoru frézky se stanoví optimální poloha dynamometru a následně se upne ke stolu frézky. Na dynamometr se připevní testovací vzorek. Pomocí bočního otvoru pracovního prostoru je veden kabel, kterým se přenáší data z měřidla do řídicí jednotky. Tato jednotka je napájena ze sítě a zároveň připojena do počítače, kde v softwaru USTREDNA jsou zaznamenávány graficky působící síly na dynamometr.



Obr. 38: Měření sil pomocí tenzometrického dynamometru

Když je vše připraveno, nahraje se do frézky NC kód, spustí se zaznamenávání v programu USTREDNA a provede se obrábění. Po dokončení obrábění, viz. Obr. 38, se z programu vyexportují naměřená data, ty se následně převedou do programu Microsoft Excel, kde se s daty dále pracuje. V těchto datech je třeba rozdělit síly působící na dynamometr během obrábění a síly působící na dynamometr během přejezdů nástroje.

Tabulka 1: Zprůměrované výsledky měření sil

	Měření	F_x [N]	F_y [N]	F_z [N]
Tloušťka odřezávané vrstvy	0.5 mm	36.52	-31.86	-5.91
	1 mm	62.28	-49.68	-3.11
	1.5 mm	84.83	-67.35	-12.69
	2 mm	105.94	-82.16	-26.09

Z těchto dat se následně stanoví reálná nula, která se odečte od zprůměrovaných hodnot z dat sil. Z důvodu velké nejistoty měření u složky F_z nejsou naměřené hodnoty v tomto směru brány jako průkazné.

6.4.4 Výpočet sil při obrábění

Jelikož během obrábění působí na obrobek nemalé obráběcí síly je nutné stanovit, zda je upínací síla dostatečná. K tomu se využije výpočet teoretický a následně výpočet z naměřených hodnot. Teoretický výpočet slouží také pro porovnání a ověření pravdivost výsledků z měření.

Teoretický výpočet

Jako první je třeba vypočítat úhel dotyku zubu (φ_i), pro výpočet se užije vztah (8), kde (a_e) je krok do boku a (D_n) průměr nástroje. [37]

$$\cos \varphi_i = 1 - \frac{2a_e}{D_n} \Rightarrow \varphi_i = \arccos \left(1 - \frac{2a_e}{D_n} \right) [^\circ] \quad (8)$$

$$\cos \varphi_i = 1 - \frac{2a_e}{D_n} \Rightarrow \varphi_i = \arccos \left(1 - \frac{2 \cdot 0,25}{16} \right) = 14,36^\circ$$

Po dosazení do vztahu (8) vyjde pro:

- $a_e = 0,25 \text{ mm}; \varphi_i = 14,36^\circ$
- $a_e = 0,5 \text{ mm}; \varphi_i = 20,36^\circ$
- $a_e = 0,75 \text{ mm}; \varphi_i = 25,01^\circ$
- $a_e = 1 \text{ mm}; \varphi_i = 28,96^\circ$

Pro výpočet měrného řezného odporu je třeba nejprve stanovit tloušťku odřezávané vrstvy (h_m). K tomu se využije vztah (9), kde (f_z) je posuv na zub a (φ_i) úhel dotyku zubu. Je dáno: $f_z = 0,06 \text{ mm}$.

$$h_m = f_z \cdot \sin \varphi_i \text{ [mm]} \quad (9)$$

$$h_m = f_z \cdot \sin \varphi_i = 0,06 \cdot \sin 14,36^\circ = 0,0149 \text{ mm} \quad (9)$$

Po dosazení do vztahu (8) vyjde pro:

- $\varphi_i = 14,36^\circ$; $h_m = 0,0149 \text{ mm}$;
- $\varphi_i = 20,36^\circ$; $h_m = 0,0209 \text{ mm}$;
- $\varphi_i = 25,01^\circ$; $h_m = 0,0254 \text{ mm}$;
- $\varphi_i = 28,96^\circ$; $h_m = 0,0291 \text{ mm}$;

Poté zbývá vypočítat měrný řezný odpor (k_c) ze vztahu (10), jež byl získán od dodavatele obráběcích nástrojů Snadvik Coromat. Vzoreček slouží primárně pro soustružení, proto v našem případě je třeba provést menší úpravu a uvažovat hodnoty (h_m) pro frézování, jež může být zdrojem nejistot. Ve vztahu (k_{c1}) je velikost měrného řezného odporu pro neutrální břitovou destičku, (h_m) je tloušťka odřezávané vrstvy, (m_c) je koeficient měrného řezného odporu, (γ_0) je úhel čela. Pro materiál AW EN 7075, který je zastoupen skupinou A7075/N1.3.C.AG jsou dány tyto hodnoty: $k_{c1} = 700 \text{ N/mm}^2$, $m_c = 0,25$. Úhel čela γ_0 pro frézu S814 je 9° . [38]

$$k_c = k_{c1} \cdot (h_m)^{-m_c} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_0}{100}\right) \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (10)$$

$$k_c = k_{c1} \cdot (h_m)^{-m_c} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_0}{100}\right) = 700 \cdot (0,0149)^{-0,25} \cdot \left(1 - \frac{9^\circ}{100}\right) = 1823,24 \text{ N/mm}^2$$

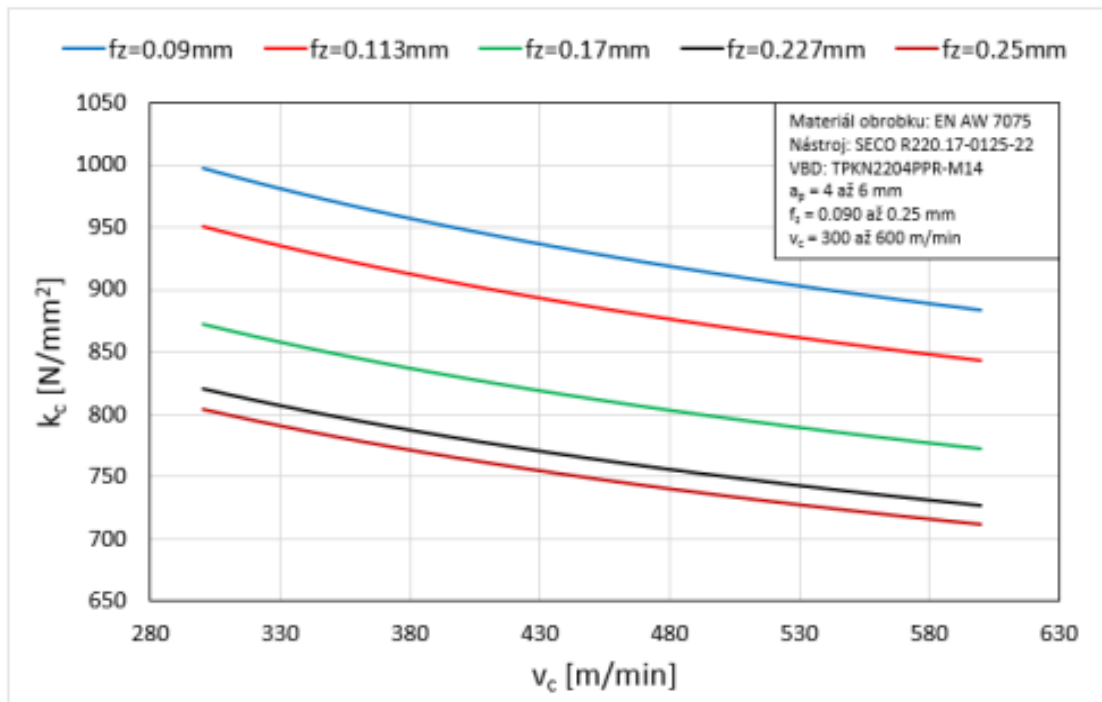
Po dosazení do vztahu (8) vyjde pro:

- $h_m = 0,0149 \text{ mm}$; $k_c = 1823,24 \text{ N/mm}^2$
- $h_m = 0,0209 \text{ mm}$; $k_c = 1675,34 \text{ N/mm}^2$
- $h_m = 0,0254 \text{ mm}$; $k_c = 1595,63 \text{ N/mm}^2$
- $h_m = 0,0291 \text{ mm}$; $k_c = 1542,29 \text{ N/mm}^2$

Pro ověření použitelnosti vzorce na výpočet k_c bylo provedeno porovnání s prací doktora Kovalčíka [39], kde je z měření počítána měrná řezná síla při frézování AW EN 7075 při různých posuvech a řezných rychlostech, viz. Obr. 39. Nástroj v práci je fréza s úhlem čela 0° a břity nejsou ve šroubovici. Vypočtená měrná řezná síla pro podmínky doktora Kovalčíka vychází v porovnání s jeho výsledky velmi podobně.

Podmínky v řezu jsou příznivější než v případě experimentálního měření v této práci, neboť řez nekončí ani nezačíná s nulovým průřezem třísky, takže střední hodnota odřezávané vrstvy bude při stejném posuvu výrazně vyšší. Proto jsou vyšší výsledné hodnoty k_c pro provedený experiment očekávatelné a z tohoto porovnání lze předpokládat, že se blíží skutečným hodnotám.

Vzorec pro výpočet k_c na základě této hypotézy považují jako vhodný pro toto použití.



Obr. 39: Závislost vypočtené měrné řezné síly na řezné rychlosti pro 5 hodnot posuvů na zub [39]

Dále je zapotřebí vypočítat šířku odřezávané vrstvy (b), k tomu se použije vztah (11), kde (B) je šířka řezu, v našem případě $B = 10 \text{ mm}$, (ω) je úhel stoupání šroubovice nástroje, v našem případě $\omega = 34^\circ$. [37]

$$b = \frac{B}{\cos \omega} \text{ [mm]} \quad (11)$$

$$b = \frac{B}{\cos \omega} = \frac{10}{\cos 34^\circ} = 12,06 \text{ mm}$$

Nyní se lze přesunout ke stanovení řezné síly (F_c) pomocí vztahu (12), kde (k_c) je velikost měrného řezného odporu, (b) je šířka odřezávané vrstvy, (f_z) je posuv na zub v našem případě $0,06 \text{ mm}$, (a_e) je krok do boku, (D_n) je průměr nástroje, (z) je počet zubů v našem případě 4, (φ_i) je úhel dotyku zubu. [37]

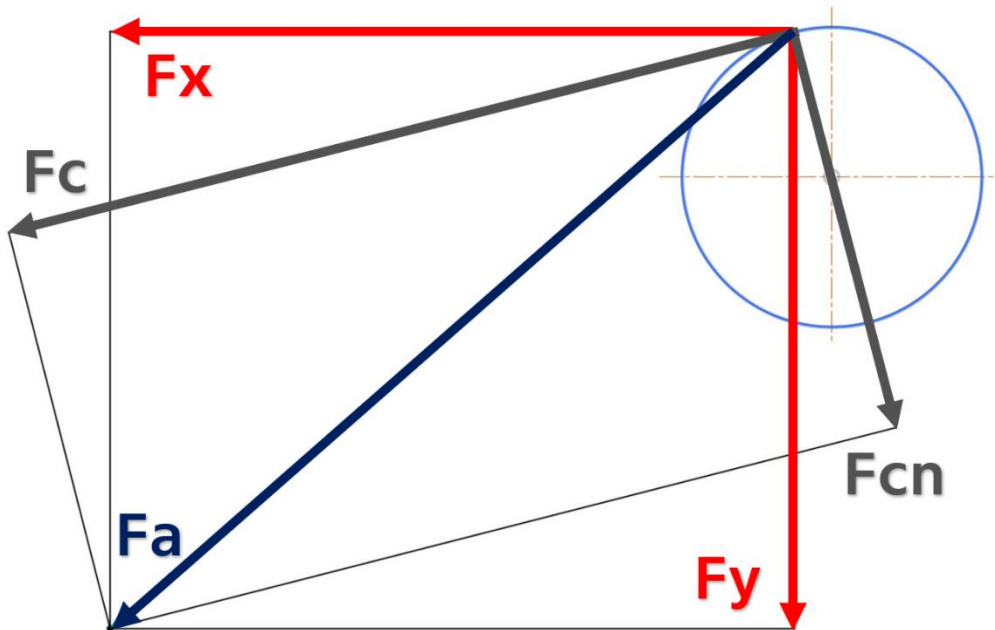
$$F_c = k_c \cdot b \cdot f_z \cdot \left[\frac{a_e}{D_n} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot z \cdot \frac{\varphi_i}{360} \text{ [N]} \quad (12)$$

$$F_c = k_c \cdot b \cdot f_z \cdot \left[\frac{a_e}{D_n} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot z \cdot \frac{\varphi_i}{360} = 1823,24 \cdot 12,06 \cdot 0,06 \cdot \left[\frac{0,25}{16} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot 4 \cdot \frac{14,36}{360} = 26,31 \text{ N}$$

Po dosazení do vztahu (11) vyjde pro:

- $a_e = 0,25 \text{ mm}; F_c = 26,31 \text{ N}$
- $a_e = 0,5 \text{ mm}; F_c = 34,19 \text{ N}$
- $a_e = 0,75 \text{ mm}; F_c = 39,89 \text{ N}$
- $a_e = 1 \text{ mm}; F_c = 44,51 \text{ N}$

Výpočet pomocí naměřených hodnot



Obr. 40: Schéma rozložení sil při frézování

Při měření dat bylo patrné, že složka síly F_z oproti složkám sil F_x a F_y byla velmi nekonstantní a její důvěryhodnost je tak zpochybnitelná. Pro získání složky síly F_z se proto vychází z naměřených dat složek F_x a F_y .

Když je teoreticky vypočítaná řezná síla (F_c), určí se řezná síla (F_c) pomocí naměřených hodnot. Jako první se spočítá aktivní síla (F_a) pomocí vztahu (1). Po dosazení do vztahu (1) vyjde pro:

- $a_e = 0,5 \text{ mm}; F_a = 48,46 \text{ N}$
- $a_e = 1 \text{ mm}; F_a = 79,66 \text{ N}$
- $a_e = 1,5 \text{ mm}; F_a = 108,32 \text{ N}$
- $a_e = 2 \text{ mm}; F_a = 134,67 \text{ N}$

Dále je třeba určit úhel, který je mezi silou (F_y) a aktivní silou (F_a). K tomu se využije vztah (13). [37]

$$\sin \delta = \frac{F_x}{F_a} \Rightarrow \delta = \arcsin\left(\frac{F_x}{F_a}\right) [^\circ] \quad (13)$$

Po dosazení do vztahu (12) vyjde pro:

- $a_e = 0,5 \text{ mm}; \delta = 48,89^\circ$
- $a_e = 1 \text{ mm}; \delta = 51,42^\circ$
- $a_e = 1,5 \text{ mm}; \delta = 51,55^\circ$
- $a_e = 2 \text{ mm}; \delta = 52,21^\circ$

Nyní už díky vztahu (14) lze dopočítat řezná síla (F_c), viz. Obr. 40.

$$\sin(\varphi_i + \delta) = \frac{F_c}{F_a} \Rightarrow F_c = \sin(\varphi_i + \delta) \cdot F_a [\text{N}] \quad (14)$$

Po dosazení do vztahu (13) vyjde pro:

- $a_e = 0,5 \text{ mm}; F_c = 43,28 \text{ N}$
- $a_e = 1 \text{ mm}; F_c = 75,68 \text{ N}$
- $a_e = 1,5 \text{ mm}; F_c = 105,35 \text{ N}$
- $a_e = 2 \text{ mm}; F_c = 132,47 \text{ N}$

Pak už zbývá dopočítat síla (F_z). Výpočet se provede pomocí vztahu (15).

[38]

$$\text{tg}(\omega) = \frac{F_z}{F_c} \Rightarrow F_z = \text{tg}(\omega) \cdot F_c [\text{N}] \quad (15)$$

Po dosazení do vztahu (14) vyjde pro:

- $a_e = 0,5 \text{ mm}; F_z = 29,19 \text{ N}$
- $a_e = 1 \text{ mm}; F_z = 51,04 \text{ N}$
- $a_e = 1,5 \text{ mm}; F_z = 71,06 \text{ N}$
- $a_e = 2 \text{ mm}; F_z = 89,34 \text{ N}$

Tabulka 2: Porovnání síly získané početně x měřením

a_e / a_i [mm]	Vypočítané F_c [N]	Měřené F_c [N]
0,25 / 0,5	26,31	43,28
0,5 / 1	34,19	75,68
0,75 / 1,5	39,89	105,35
1 / 2	44,51	132,47

Výpočet upínací síly

Velikost upínací síly (F_u) se stanoví pomocí vztahu (16), kde (M_k) je utahovací moment, v našem případě 15 Nm.

$$F_u = 200 \cdot M_k [\text{N}] \quad (16)$$

$$F_u = 200 \cdot M_k = 200 \cdot 15 = 3000 \text{ N}$$

Po dosazení nám upínací síla (F_u) vyjde 3000 N.

Na závěr se vypočítá třecí síla (F_t) pomocí vztahu (17), kde (F_u) je upínací síla a (μ) je součinitel tření, ten je v případě kombinace PET – Slitina hliníku pravděpodobně v tomto rozmezí 0,25 - 0,4. I když je uvažován koeficient tření 0,25 je výsledek vyhovující. [40]

$$F_t = F_u \cdot \mu [N] \quad (17)$$

$$F_t = F_o \cdot \mu = 3000 \cdot 0,25 = 750 N$$

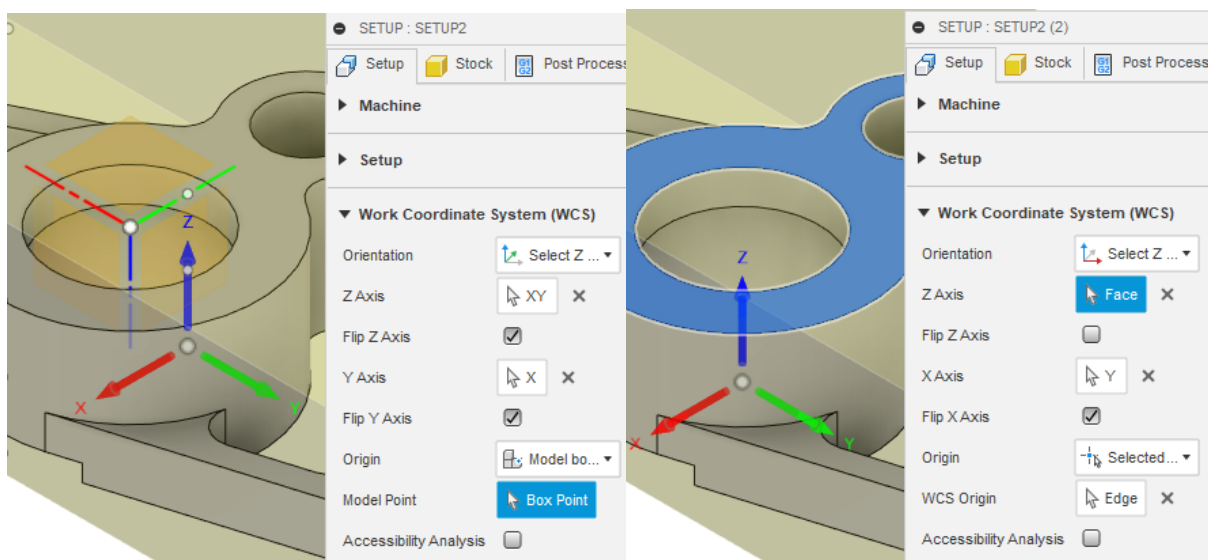
Závěr

Působící síla na obrobek byla stanovena nejprve teoreticky a následně z naměřených hodnot. V případě experimentálního měření bylo zjištěno, že při malé hloubce odřezávané vrstvy jsou výsledné hodnoty k_c vyšší. Zároveň byly také brány v potaz tyto faktory: možnost nepřesnosti dynamometru, chyba při samotném měření, při výpočtu měrného řezného odporu, popřípadě ve volbě koeficientu tření. Přes všechny tyto faktory je upínací síla výrazně vyšší. Upnutí je tedy dostatečné a plně funkční.

6.5 Obrábění testovacích dílů a jejich měření

Když je stanovena obráběcí síla a požadovaný utahovací moment při upínání, přesouvám se k vytvoření programu pro druhou stranu upnutí.

6.5.1 Operace 2



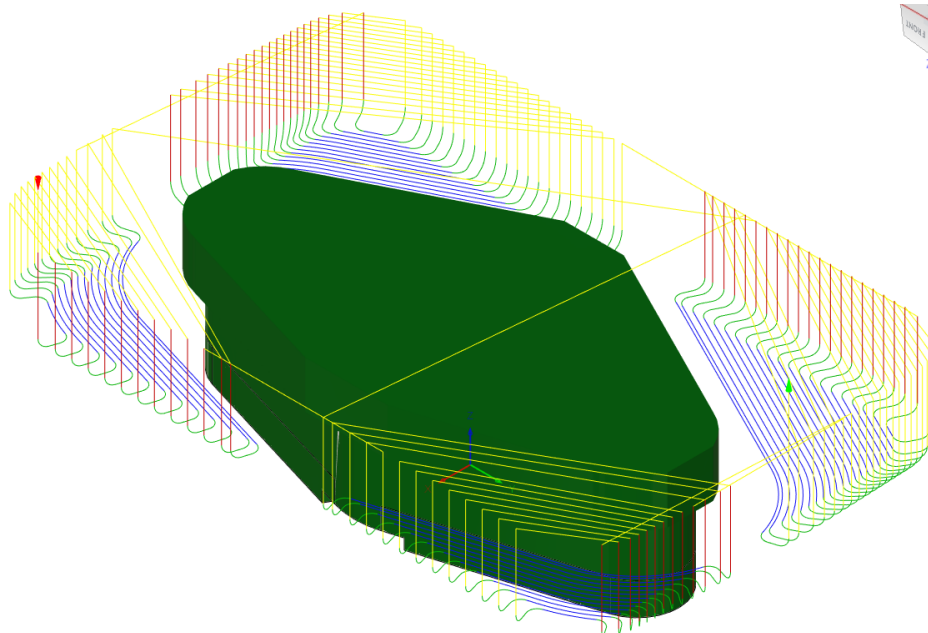
Obr. 41: Zleva nastavení operace 2 pro první část, druhá část operace 2

Operaci 2 je třeba rozdělit do dvou částí z důvodu změny souřadného systému. Při první části se nastaví kladná orientace os a jako počátek souřadného

systemu se zvolí prostřední bod spodní roviny polotovaru, viz. Obr. 41. V kolonce nastavení velikosti polotovaru se vybere možnost From preceding setup a zároveň Continue Rest Machining. Tato funkce zajistí, že polotovar bude vypadat jako po dokončení první strany.

První úsek je hrubování vnější kontury, viz. Obr. 42, pro tento úsek je použita válcová fréza.

POZICE	PRŮMĚR NÁSTROJE [mm]	POČET ZUBŮ	OZNAČENÍ	ÚSEK	ŘEZNÁ RYCHLOST [m/ min]	POSUV NA ZUB [mm]
T12	16	4	S814HA16.0	2D Contour3	270	0,06



Obr. 42: Hrubování vnější kontury pomocí 2D Contour3

Druhý úsek je hrubování čela, pro tento úsek je použita čelní fréza.

POZICE	PRŮMĚR NÁSTROJE [mm]	POČET ZUBŮ	OZNAČENÍ	ÚSEK	ŘEZNÁ RYCHLOST [m/ min]	POSUV NA ZUB [mm]
T2	63	6	Ø63R0,8 mm	Face2	315	0,208

Třetí úsek je sražení hran, pro tento úsek je použit srážeč.

POZICE	PRŮMĚR NÁSTROJE [mm]	POČET ZUBŮ	OZNAČENÍ	ÚSEK	ŘEZNÁ RYCHLOST * [m/ min]	POSUV NA ZUB [mm]
T7	6x45°	2	S7406.0	2D Chamfer2	188,49	0,04

*Jedná se o maximální otáčky stroje

Druhá část operace 2 je nastavena s počátkem souřadného systému ve středu otvoru o průměru 26 mm a zároveň na spodní ploše dílu. Polotovar je stejný jako u první části. Rozdílem je, zvolení v Post Processu WCS offset 2.

První úsek je zaměření polohy dílu, pro tento úsek je použita měřicí sonda.

POZICE	PRŮMĚR NÁSTROJE [mm]	POČET ZUBŮ	OZNAČENÍ	ÚSEK	ŘEZNÁ RYCHLOST [m/ min]	POSUV NA ZUB [mm]
T20	5	/	OMP40-2	Probe WCS1	/	/

Druhý úsek je dokončení čela, pro tento úsek je použita čelní fréza.

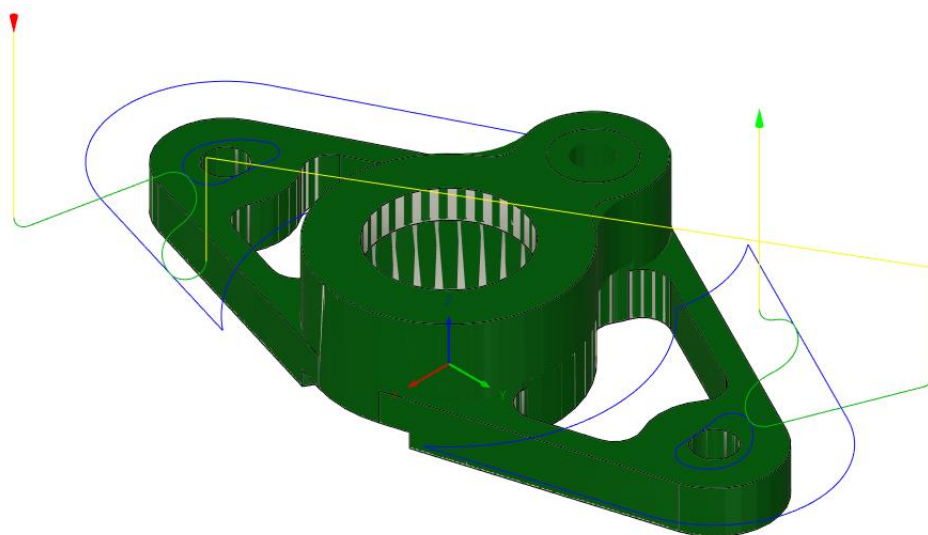
POZICE	PRŮMĚR NÁSTROJE [mm]	POČET ZUBŮ	OZNAČENÍ	ÚSEK	ŘEZNÁ RYCHLOST [m/ min]	POSUV NA ZUB [mm]
T2	63	6	Ø63R0,8 mm	Face3	315	0,208

Třetí úsek je hrubování vnější kontury, pro tento úsek je použita válcová fréza.

POZICE	PRŮMĚR NÁSTROJE [mm]	POČET ZUBŮ	OZNAČENÍ	ÚSEK	ŘEZNÁ RYCHLOST [m/ min]	POSUV NA ZUB [mm]
T12	16	4	S814HA16.0	Adaptive2	270	0,08

Čtvrtý úsek je dokončení horizontální plochy, viz. Obr. 43, pro tento úsek je použita válcová fréza.

POZICE	PRŮMĚR NÁSTROJE [mm]	POČET ZUBŮ	OZNAČENÍ	ÚSEK	ŘEZNÁ RYCHLOST [m/ min]	POSUV NA ZUB [mm]
T12	16	4	S814HA16.0	Horizontal1	270	0,06



Obr. 43: Dokončení horizontální plochy kontury dílu Horizontal1

Pátý úsek je dokončení díry o průměru 9,5 mm, pro tento úsek je použita válcová fréza.

POZICE	PRŮMĚR NÁSTROJE [mm]	POČET ZUBŮ	OZNAČENÍ	ÚSEK	ŘEZNÁ RYCHLOST * [m/ min]	POSUV NA ZUB [mm]
T14	8	2	S6108.0	Bore4	251,33	0,06

*Jedná se o maximální otáčky stroje

Šestý úsek je dohrubování vnější kontury, viz. Obr. 44, pro tento úsek je použita válcová fréza.

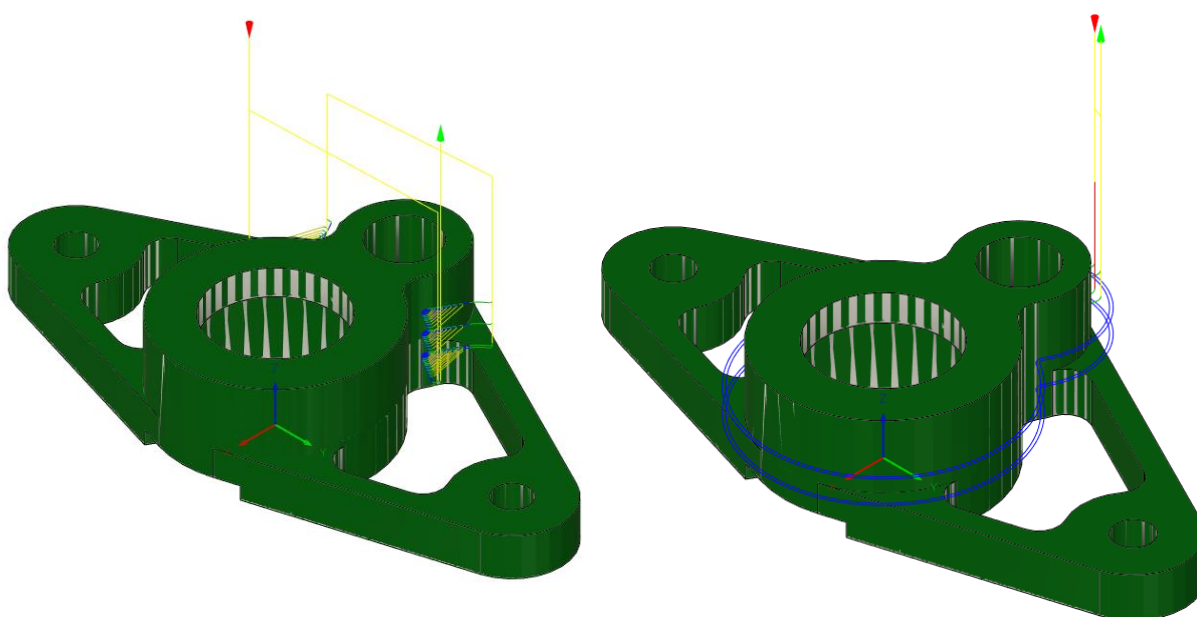
POZICE	PRŮMĚR NÁSTROJE [mm]	POČET ZUBŮ	OZNAČENÍ	ÚSEK	ŘEZNÁ RYCHLOST * [m/ min]	POSUV NA ZUB [mm]
T5	4	4	S933HA4.0	2D Adaptive2	125,66	0,036

*Jedná se o maximální otáčky stroje

Sedmý úsek je dokončení vnější kontury, viz. Obr. 44, pro tento úsek je použita válcová fréza.

POZICE	PRŮMĚR NÁSTROJE [mm]	POČET ZUBŮ	OZNAČENÍ	ÚSEK	ŘEZNÁ RYCHLOST * [m/ min]	POSUV NA ZUB [mm]
T5	4	4	S933HA4.0	2D Contour4	125,66	0,02

*Jedná se o maximální otáčky stroje



Obr. 44: Zleva dohrubování vnější kontury 2D Adaptive2, dokončení vnější kontury 2D Contour4

Osmý úsek je sražení vnitřních hran, pro tento úsek je použit srážeč.

POZICE	PRŮMĚR NÁSTROJE [mm]	POČET ZUBŮ	OZNAČENÍ	ÚSEK	ŘEZNÁ RYCHLOST * [m/ min]	POSUV NA ZUB [mm]
T7	6x45°	2	S7406.0	2D Chamfer3	188,49	0,04

*Jedná se o maximální otáčky stroje

Devátý úsek je sražení vnějších hran, pro tento úsek je použit srážeč.

POZICE	PRŮMĚR NÁSTROJE [mm]	POČET ZUBŮ	OZNAČENÍ	ÚSEK	ŘEZNÁ RYCHLOST * [m/ min]	POSUV NA ZUB [mm]
T7	6x45°	2	S7406.0	2D Chamfer4	188,49	0,04

*Jedná se o maximální otáčky stroje

Tabulka 3: Shrnutí operací použitých při výrobě dílu

OPERACE	NÁSTROJ	ÚSEK/ STRATEGIE	POPIS	STROJNÍ ČAS
1	T2	Face1	dokončení čelní plochy	49 s
	T13	Drill1	navrtání otvorů	7 s
	T12	Adaptive1	hrubování vnější kontury dílu	1 min 40 s
	T5	2D Pocket1	obrobení vnitřních kapes načisto	3 min 16 s
		Bore1		15 s
	T14	Bore2	dokončení otvorů	48 s
		Bore3		34 s
		2D Contour1		dokončení vnější kontury
		2D Contour2	dokončení osazení	3 s
T7	2D Chamfer1	zkosení hran	54 s	
Σ	6	10	/	10 min 15 s
2 (1)	T12	2D Contour3	hrubování vnějšího tvaru	5 min 16 s
	T2	Face2	hrubování čela	3 min 23 s
	T7	2D Chamfer2	zkosení hrany díry	6 s
2 (2)	T20	Probe WCS1	zaměření souřadného systému	11 s
	T2	Face3	dokončení čelní plochy	36 s
	T12	Adaptive2	hrubování vnější kontury dílu	4 min 21 s
		Horizontal1	dokončení vnější kontury dílu	20 s
	T14	Bore4	dokončení otvoru	7 s
	T5	2D Adaptive2	hrubování vnější kontury dílu	38 s
		2D Contour4	dokončení vnější kontury dílu	58 s
	T7	2D Chamfer3	zkosení hran	51 s
2D Chamfer4		20 s		
Σ	9	12	/	18 min 57 s

Pozn. v případě strojního času se jedná pouze o hodnoty vygenerované softwarem.

6.5.2 Výroba alternativní metodou

Záměrem práce je porovnávat výrobu pomocí vyrobených čelistí s výrobou běžně používanou v praxi. Proto je třeba druhou stranu dílu vyrobit také pomocí možné alternativy, jež plně reprezentuje běžné metody. Jako alternativní metoda se zvolí upnutí pomocí šroubů a vyfrézované kontury do upínací desky. Tato metoda reprezentuje upínání pomocí měkkých čelistí. Tuto desku s profilem dílu je třeba nejprve vymodelovat a následně naprogramovat její obrobení.

Upínací deska byla vymodelována a následně byly vytvořeny dráhy pro její výrobu. Jako první se vygenerovala dráha pro zarovnání čela. Dále následuje vytvoří kapsy. Poté dokončení profilu kapsy.



Obr. 45: Vyrobena upínací deska

Když je kapsa obrobena načisto, viz. Obr. 45, provede se vyvrtání děr pro šrouby. Na závěr jsou díry obrobena načisto. Potom se do pevného svěráku upne polotovar upínací desky a provedu její obrobění. Nyní je třeba odříznout přebytečný materiál, který brání při upínání obrobku, viz. Obr. 46.



Obr. 46: Výroba dílu alternativní metodou

Pro upevnění dílu k desce se využijí šrouby s vnitřním 6HR M4. Aby bylo možné díl obrábět, musí se operace 2 rozdělit do dvou částí. Nejprve se díl upne za dvě krajní díry, které jsou symetrické podle svislé osy, zaměří se poloha dílu pomocí sondy a provede se operace 2D Countour3, Face2, 2D Chamfer2, Probe

WCS1 a Bore4. Poté se díl upne pomocí jednoho šroubu za prostřední díru a provedou se zbývající operace Face3, Adaptive2, Horizontal1, 2D Adaptive2, 2D Contour4 a na závěr 2D Chamfer3, 4.

6.5.3 Přehled použitých nástrojů

Tabulka 4: Přehled použitých nástrojů a jejich podmínek při obrábění

POZICE	OZNAČENÍ	OPERACE	ŘEZNÁ RYCHLOST [m/ min]	OTÁČKY VŘETENE [ot/ min]	POSUV NA ZUB [mm]	PRACOVNÍ POSUV [mm/ min]
T2	Ø63R0,8 mm	dokončování	315	1591.55	0.208	1989.44
		hrubování				
T5	S933HA4.0	dokončování	125.66	10000	0.02	600
		hrubování			0.06	1800
T7	S7406.0	srážení	188.49	10000	0.04	800
T12	S814HA16.0	dokončování	270	5371.48	0.06	1289.16
		hrubování				
T13	Ø5mm 140°	vrtání	157.08	10000	/	1000
T14	S6108.0	dokončování	251.33	10000	0.06	1200
T20	OMP40-2	měření	/	/	/	100

6.5.4 Výroba

Po dokončení obrábění pomocí alternativní metody se musí vyměnit pevný svěrák za upínací přípravek v podobě centrálního svěráku. Je nutné dostatečně očistit celý pracovní stůl. Aby bylo možné centrální svěrák upnout ke stolu, je třeba jej rozebrat z důvodu umístění upínacích šroubů pod závitem svěráku.



Obr. 47: Zleva upnutí do vyrobeného přípravku, díl po obrobení druhé strany

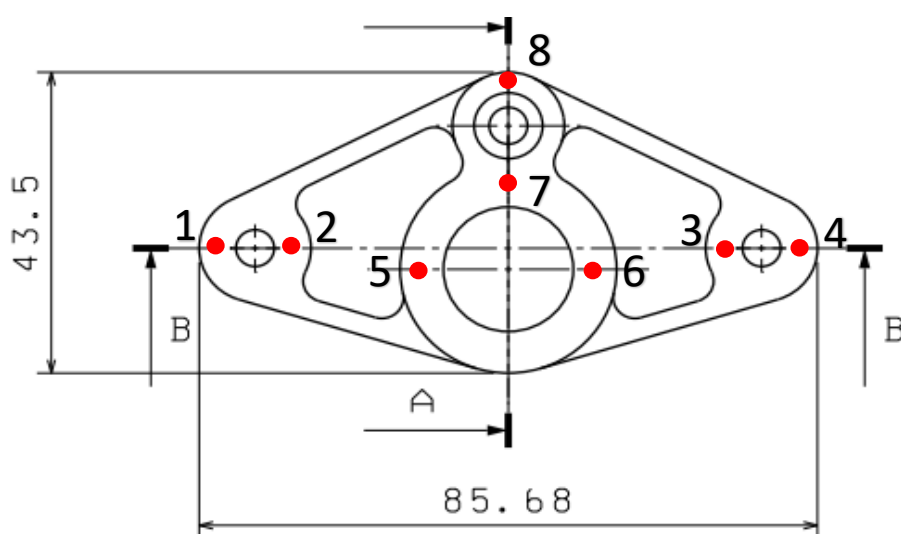
Nejprve se tedy vyšroubují obě čelisti a následně vyjmou utahovací šroub. Dále pomocí šroubů a T matic se ustaví tělo svěráku. Poté se přesně zadefinuje poloha. K tomu se využije analogový úchylkoměr, neboli tzv. měřící hodinky s přesností 0,01 mm. Po ustavení svěráku do cílené roviny se provede upnutí. Čelisti a středový šroub se namontují nazpět. Poté dojde k upnutí vytvořených 3D tištěných čelistí.

Do čelistí se vloží díl, viz. Obr. 47 a provede se utažení na moment 15 Nm. Nyní se program pro operaci 2 nahraje do systému frézky, provede se simulace, zaměření dílu a následně samotné obrobení druhé strany.

6.5.5 Měření

Po doobrobení, je třeba změřit přesnost výroby. Stanoví se tedy přesnost výroby pomocí 3D tištěných čelistí a alternativní metodou.

Na výkrese se zvolí celkem osm bodů pro provedení měření, viz. Obr. 48. U bodů 1 – 4 se jedná o nominální hodnotu měření pro oba díly 6 mm. U bodů v rozmezí 5 – 8 je brán nominální rozměr pro díl vyrobený pomocí 3D tištěných čelistí 15,5 mm a u dílu vytvořeného alternativní metodou 15,26 mm, z důvodu nepřesnosti při odřezávání přebytečného materiálu. Zvolené měřidlo je analogový třmenový mikrometr o rozsahu stupnice 0 – 25 mm a přesnosti 0,001 mm. Měření se provede na všech osmi bodech. Aby bylo docíleno co nejlepších měřených dat, měří se na každém bodě celkem 3x.



Obr. 48: Rozmístění měřících bodů

6.6 Vyhodnocení přesnosti vyrobené součásti

Po měření přichází na řadu vyhodnocení přesnosti. K tomu využijí program Microsoft Excel, kde všechny naměřené hodnoty jsou zaznamenány do tabulky. Následně jednotlivé rozměry jsou odečteny od nominální hodnoty. Takto se získá rozměrová nepřesnost od nominálních rozměrů, viz. Tabulka 5 a Tabulka 6. Z výsledků je zřejmé, že díl vyrobený pomocí 3D tištěných čelistí nespĺňuje požadavky u rozměru výšky stěny 6 mm, a to ve všech měřených bodech. Největší odchylka je v bodě 4, kde je rozměr z tolerance o $-0,13$ mm. Tyto hodnoty se zanesly do bodového grafu. Z grafu vyplívá, že díl vyrobený pomocí alternativní metody je v některých případech až o 0,18 desetin mm přesnější než díl vyrobený pomocí navrhovaného přípravku. Je tedy třeba zvolit vhodné úpravy přípravku, které povedou k vyšší přesnosti výroby.

Tabulka 5: Odchylky měření výroby pomocí navrhnutého přípravku

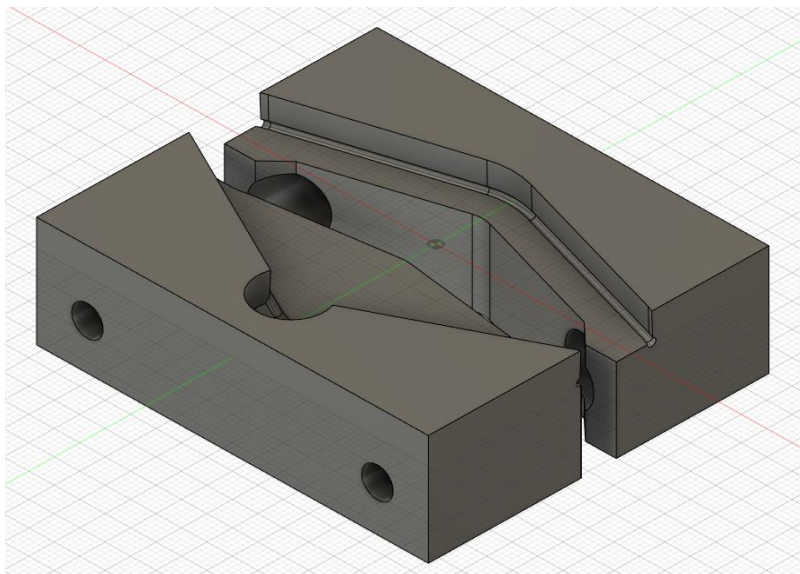
Nom. hod. 6 mm					Nom. hod. 15.5 mm				
	1	2	3	Ø		1	2	3	Ø
1	-0.138	-0.14	-0.142	-0.14	5	-0.152	-0.152	-0.153	-0.152
2	-0.158	-0.16	-0.157	-0.158	6	-0.181	-0.181	-0.182	-0.181
3	-0.225	-0.226	-0.227	-0.226	7	-0.15	-0.151	-0.144	-0.148
4	-0.232	-0.229	-0.23	-0.23	8	-0.129	-0.127	-0.138	-0.131

Tabulka 6: Odchylky měření výroby pomocí upínací desky

Nom. hod. 6 mm					Nom. hod. 15.26 mm				
	1	2	3	Ø		1	2	3	Ø
1	-0.023	-0.022	-0.021	-0.022	5	0.003	-0.003	-0.002	-7E-04
2	-0.031	-0.03	-0.031	-0.031	6	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002
3	-0.029	-0.029	-0.03	-0.029	7	0	0	0	0
4	-0.02	-0.022	-0.022	-0.021	8	0.003	0.006	0.003	0.004

6.7 Poznátky a návrh na úpravy

Na základě nevyhovujících parametrů je třeba pro další využití testovaného experimentu provést několik úprav, které povedou ke zlepšení vlastností upínacího přípravku a zároveň k vyšší přesnosti výroby dílu.



Obr. 49: Vizualizace úprav upínacího přípravku

Ke zvýšení přesnosti při upínání je navržena úprava v podobě zkosení upínacích ploch o 2° , viz. Obr. 49. Tím by nemělo docházet k nadzvedávání dílu při jeho utahování. Dále v rozích dosedacích ploch se provede odebrání materiálu, viz. Obr. 49, čímž se zajistí perfektní poloha při upnutí. Poté se zvětší průměr pro hlavu šroubů na 12,2 mm. Díky tomu půjde pod šroub vložit podložku a tlak tvořen při utahování se lépe rozloží. Pro lepší tření mezi obrobkem a čelistmi by měl být tiskový materiál ASA (Akrylonitril – styren – akryl). V případě požadované vyšší řezné síly je doporučena vyšší výplň tisku, popřípadě jiný typ výplně např. kubický. Vhodnější by byla svislá poloha tisku, která je sice časově náročnější, ale v našem případě by vlákna tištěná v ose Z dovolila použití vyšších upínacích sil.

7 ZÁVĚR

Záměrem této práce bylo určit zda je možné využívat aditivní technologii výroby, popřípadě jaké dosahuje přesnosti, při upínání obrobků. Předně bylo třeba důkladně nastudovat a zanalyzovat požadavky, které byly kladeny na výrobu zadané součásti od CTU CarTech. Jednalo se především o dodržení geometrických tolerancí, lineárních a úhlových rozměrů a v neposlední řadě požadované drsnosti povrchu. Po analýze součásti byl na řadě návrh možného provedení upínacího přípravku, jež byl proveden v programu Autodesk Fusion 360. Zde byl vymodelován a následně upraven dle průběžných poznatků. Když byl upínací přípravek zkonstruovaný, byl proveden návrh experimentu. Jako první se vytvořil postup pro obrábění první strany, která byla výchozí pro porovnávání a zkoumání výrobní přesnosti. Následovalo obrábění první strany, kde polotovar byl upínán do pevného svěráku. Obrábění bylo provedeno na školní frézce Haas VF2. Když byla první strana dílu vyhotovena, provedlo se měření sil při obrábění a síly potřebné k upnutí. Zde bylo třeba nejprve stanovit, při jaké operaci bude docházet k největšímu působení sil. Poté bylo provedeno samotné měření. Měření bylo uskutečněno pomocí měřicího vzorku, jež simuloval obráběný díl a tenzometrického dynamometru, na kterém byl vzorek upevněn. Z naměřených hodnot se v programu Microsoft Excel vyexportovaly síly, jež působily na polotovar. Poté byl proveden výpočet teoretický, po kterém následoval výpočet z naměřených hodnot. Dále byl vytvořen výrobní postup a následně program pro obrábění druhé strany. Následoval návrh a výroba alternativní metody upínání, jež simulovala upínání složitých součástí v praxi. Pomocí této metody bylo provedeno obrobení druhé strany. Poté bylo uskutečněno obrobení druhé strany dílu pomocí navrženého upínacího přípravku. Finální verze přípravku byla vyrobena pomocí FDM technologie na tiskárně Prusa i3 MK3S+. Jako upínač byl použit samostředící svěrák, na který se upevnil vyrobený přípravek. Následovalo samotné obrobení. Když byl díl vyroben oběma způsoby, provedlo se měření celkem na 8 bodech. Z měření vyplívá, že díl vyrobený pomocí FDM technologie v bodech 1 – 4 nespĺňuje požadovanou přesnost. Z tohoto důvodu bylo navrženo několik úprav čelistí, které by vedly k vyšší přesnosti výroby a upínání součástí.

8 Bibliografie

- [1] Příručka obrábění: kniha pro praktiky. 1. Praha: Scientia, 1997. ISBN 91-972-2994-6.
- [2] BARTOŠ, Libor. Frézování. In: ELUC [online]. Olomouc: ELUC, 2015 [cit. 2022-11-20]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1824>
- [3] WHAT'S THE DIFFERENCE BETWEEN 3-AXIS, 4-AXIS & 5-AXIS MILLING?. In: CloudNC [online]. CloudNC: CloudNC, 2022 [cit. 2023-02-28]. Dostupné z: <https://cloudnc.com/cnc-best-practices-3-whats-the-difference-between-3-axis-4-axis-5-axis-milling/>
- [4] HUMÁR, Doc. Ing. Anton. TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 1. část [online]. 1. Brno: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2003 [cit. 2022-11-24]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-1cast.pdf
- [5] ČSN ISO 3002-4. Rezné nástroje. Základné veličiny pri rezaní a brúsení. Část 4: Sily, práca a výkon. Nové Zámky: Český normalizační institut, 1994.
- [6] BRYCHTA, Josef. Nové směry v progresivním obrábění [online]. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008 [cit. 2022-12-29]. ISBN 978-80-248-1505-3. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO/texty.pdf>
- [7] Druhy a utváření třísek. In: Technická univerzita v Liberci [online]. 2013 [cit. 2022-11-24]. Dostupné z: http://educom.tul.cz/educom/inovace/TOB/VY_03_33-druhy%20a%20utv%C3%A1%20en%C3%AD%20t%C5%99%C3%ADsek_MZ_6.pdf
- [8] Řezné podmínky při frézování. In: Elektronická učebnice [online]. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1238>
- [9] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. Experimentální metody v obrábění: učební text [online]. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2012 [cit. 2022-11-24]. ISBN 978-80-248-2533-5.
- [10] TSCHÄTSCH, Heinz. Applied machining technology [online]. Dordrecht: Springer, 2009 [cit. 2022-11-24]. ISBN 978-3-642-01006-4.

- [11] ŘASA, Jaroslav a *Vladimír GABRIEL*. Strojírenská technologie 3 [online]. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005 [cit. 2023-02-28]. ISBN 80-718-3337-1.
- [12] All Elijah Tooling Workholding Products. In: *ELIJAH TOOLING* [online]. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://elijahtooling.com/collections/elijah-tooling-cnc-workholding-products>
- [13] The Pro Pallet System. In: *PIERSON WORKHOLDING* [online]. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://piersonworkholding.com/pro-pallet-system/>
- [14] T-Slot Base Plate. In: *1st Machine Tool Accessories* [online]. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://www.1mta.com/product/t-slot-base-plate-2/>
- [15] Paletový systém pro rychlou výměnu. In: *SCHUNK* [online]. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: https://schunk.com/cz/cs/technika-upinani-obrobku/paletove-systemy-pro-rychlou-vymenu/paletovy-system-pro-rychlou-vymenu-pro-obecne-frezovaci-aplikace-a-vysoce-vykonne-rezani/c/PUB_8448
- [16] PŘÍPRAVKY A NÁSTROJE [online]. 1. Brno: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2018 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/fpn_pripavky_a_nastroje_novotny_zemcik.pdf?fbclid=IwAROMUdZom789D39eSfsy2B2q1tGpSYEK0krkCgo7ed7InxVltY4d0lrEzoA
- [17] *UPÍNACÍ PŘÍPRAVKY*. In: *STROJÍRENSTVÍ - FRÉZOVÁNÍ* [online]. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: https://strojirenstvi-frezovani.blogspot.com/2011/03/81-upinaci-pripavky.html?fbclid=IwAR20yfdhm8syw7eBmHujEi1pfoJSr_1NgSDmjGmmPfp5sH978qOfLYsY9wc
- [18] MAGNETIC CHUCK. In: *Walmag* [online]. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://eshop.walmagmagnetics.com/NextCategory/en-US/P123/magnetic-chuck>
- [19] Vises Information. In: *GlobalSpec* [online]. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: https://www.globalspec.com/learnmore/manufacturing_process_equipment/machine_tool_components_accessories/vises

- [20] Strojní svěráky. In: *Vebex* [online]. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://www.shop.strojniveraky.cz/produkty/strojni-sveraky>
- [21] CENTRE-CLAMPING VISES. In: *Spreitzer* [online]. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://www.spreitzer.de/en/clamping-technology/centering-vise-centering-vise/>
- [22] Kurt 4" Single Station Vises. In: Kurt [online]. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://www.kurtworkholding.com/product-category/workholding/single-station-vises/4-single-station-vises/>
- [23] P. K. Kunze's Contribution To The World – A Vise With Oscillatable Cheeks. In: Tacky raccoons [online]. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://tackyraccoons.com/2021/11/08/p-k-kunzes-contribution-to-the-world-a-vise-with-oscillatable-cheeks/>
- [24] Adaptix. In: Adaptix by NORGREN [online]. [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://www.norgrenworkholding.com/en/products/configure>
- [25] X-CLAMP. In: *MATRIX* [online]. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://www.matrix-innovations.com/produkt-kategorie/x-clamp-en/>
- [26] VISE POWER - *VARI* CLAMP. In: OML AUTOBLOK [online]. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <http://www.omlspa.it/index.php/en/products/9-1-vari-clamp>
- [27] Mitee-bite [online]. Center Ossipee: Mitee-bite, 2023 [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: <https://www.miteebite.com/>
- [28] *VERTICAL* MILLS. In: Haas F1 team [online]. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: https://www.haascnc.com/shop/category/pricelist.html#tab__machines__0
- [29] Jaws. In: Kemmler [online]. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://www.kemmler-shop.de/en/precision-vices/jaws/>
- [30] MellowPine [online]. Dallas: MellowPine, 2023 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://mellowpine.com/>
- [31] DEAD LENGTH COLLETS. In: ISwiss Tools [online]. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://iswisstools.com/products/dead-length-collets-3/>

- [32] *Finden Sie Ihre passende Spannlösung.* In: Hainbuch Spannende Technik [online]. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://www.hainbuch.com/produkte/>
- [33] *Design of Jigs, Fixtures and Press Tools* [online]. 2. Chennai: Springer, 2022 [cit. 2023-03-13]. ISBN 978-3-030-76533-0. Dostupné z: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-76533-0>
- [34] *3D PRINTING.* In: *3D Insider* [online]. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://3dinsider.com/category/3d-printing/>
- [35] ALL3DP [online]. ALL3DP: *ALL3DP*, 2023 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://all3dp.com/>
- [36] *STŘÍTESKÝ, Ondřej, Josef PRŮŠA a Martin BACH. Basics of 3D printing with Josef Prusa* [online]. Prague: Prusa research, 2020 [cit. 2023-03-13]. ISBN 978-809-0779-815.
- [37] MÁDL, doc. ing. Jan. *Teorie obrábění: Ediční středisko ČVUT, Praha 6, Zikova 4.* 1. Ediční středisko ČVUT, Praha 6, Zikova 4: České vysoké učení technické v Praze, 1990.
- [38] *Sandvik-TechnicalGuide-MaterialsISO.* In: *SANDVIK Coromant* [online]. [cit. 2023-07-04]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/knowledge/materials/workpiece-materials>
- [39] *Predikce silových parametrů řezného procesu při frézování.* Praha, 2020. Disertační. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Prof. Dr. Ing. František Holešovský.
- [40] *Hypertextbook.* In: *The Physics Factbook* [online]. 2005 [cit. 2023-07-30]. Dostupné z: <https://hypertextbook.com/>
- [41] *Pětiosé frézování.* In: *Mazak* [online]. Praha, 2022 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: https://mazakfiles.blob.core.windows.net/website/image/47752251e3dd46fe8a5652890996d244/DSC01073_1.jpg
- [42] *Profil drážky frézovacího stolu.* In: *KIPP* [online]. 2022 [cit. 2022-12-02]. Dostupné z: https://www.kipp.cz/xs_db/BILD_DB/Z/Anwendungsbeispiele/www/750/Z07060Anwb1.jpg

- [43] Upínací stůl frézky. In: CNCshop.cz [online]. 2010 [cit. 2022-12-02]. Dostupné z: <http://www.cncshop.cz/upinaci-stul-s-t-drazkami>
- [44] *Modulární systém s otvory*. In: Elijah Tooling [online]. 2023 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: https://cdn.shopify.com/s/files/1/2208/5191/products/M-O-100_2000x.jpg?v=1659628876
- [45] *Základní set paletového systému*. In: Pierson Workholding [online]. 2023 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://piersonworkholding.com/wp-content/uploads/2021/06/PPS-Starter.jpg>
- [46] *Příklady použití hydraulických přípravků*. In: JamesTool [online]. Morganton, 2021 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: https://www.jamestool.com/wp-content/uploads/2021/01/DSC_0047highkey-1030x685.jpg;
https://www.jamestool.com/wp-content/uploads/2021/02/DSC_0256-1030x685.jpg
- [47] *Svěrák s fraktálními čelistmi*. In: Alibaba [online]. 2022 [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: https://s.alicdn.com/@sc04/kf/Hda9b7bb786e848a7808a29fba5225d508.jpg_960x960.jpg
- [48] *Samostředící duální svěrák*. In: Kurt [online]. 2023 [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: https://www.kurtworkholding.com/wp-content/uploads/2020/01/Kurt-Workholding-HDL4J_B.jpg
- [49] *Pevný svěrák*. In: Kurt Workholding [online]. 2023 [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://kurtworkhold.wpenginepowered.com/wp-content/uploads/2020/05/DX4.651.jpg>
- [50] *Čelisti Adaptix*. In: Norgrenworkholding [online]. 2023 [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: https://i0.wp.com/leaderchuck.com/wp-content/uploads/2022/08/AdaptixNewRendering_April2022.png?resize=2048%2C1205&ssl=1
- [51] *X-Clamp*. In: Direct INDUSTRY [online]. 2023 [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: https://img.directindustry.com/images__di/photo-g/222252-15770502.webp

- [52] VariClamp. In: OMLSpa [online]. Trivolzio, 2022 [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: http://www.omlspa.it/images/vise__vari/vari__img.jpg
- [53] Kurt 3-In-One System. In: Kurt Workholding [online]. 2023 [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: https://kurtworkhold.wpenginepowered.com/wp-content/uploads/2020/01/Kurt-KSJ6__3-in-1__Jaw__Plates-600x600.jpg
- [54] VersaGrip. In: WTS [online]. 2022 [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: <https://wtsolutions.co.za/wp-content/uploads/2021/06/VersaGrip-Vise-Jaws-5-1024x768-1.jpg>
- [55] *Pneumatické sklíčidlo*. In: MellowPine [online]. Dallas, 2023 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://mellowpine.com/wp-content/uploads/2022/11/Pneumatic-chuck.jpg>
- [56] *Šroubové sklíčidlo 2x2*. In: HAINBUCH [online]. 2023 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: https://www.hainbuch.com/fileadmin/Mediendatenbank/__processed__/5/8/csm__Solution-2x2-bolt-chuck-centric-clamping__068b23e06f.png
- [57] *Segmentové sklíčidlo*. In: HAINBUCH [online]. 2023 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://www.hainbuch.com/fileadmin/Mediendatenbank/English/Products/Special-solutions/Special-chucks/Solution-segmented-clamping-bushing-chuck.png>
- [58] *Příklady tvarově složitých čelistí*. In: HAINBUCH [online]. 2023 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: https://www.hainbuch.com/fileadmin/Mediendatenbank/English/Products/Special-solutions/Special-clamping-elements/Solution-special-clamping-heads__2.png
- [59] *Možnosti provedení kleštin*. In: ISwiss Tools [online]. Manchester, 2023 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://iswisstools.com/wp-content/uploads/2020/07/Profile-Collets.png>
- [60] Zleva Compact Toe Clamps, Dyva-Force Clamps, Fixtur Clamps. In: Miteebite [online]. 2023 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: [87](https://www.miteebite.com/wp-content/uploads/2020/04/Compact-</p></div><div data-bbox=)

Toe-Clamp.jpg; https://www.miteebite.com/wp-content/uploads/2014/01/dynaforce__clamp__thumb.jpg;
<https://www.miteebite.com/products/fixture-clamps/>

- [61] Zleva Knife Edge Clamps, KOPAL Mini Clamps. In: Mitee-bite [online]. 2023 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://www.miteebite.com/products/knife-edge-clamps/>;
https://www.miteebite.com/wp-content/uploads/2022/04/KOPALMINICLAMP__application1-e1649435088398.jpg
- [62] Zleva OK-VISE, Invert-A-Bolt. In: Mitee-bite; ELIJAH TOOLING [online]. 2023 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://www.miteebite.com/wp-content/uploads/2014/02/OK-Vise-Clamp-17-150x150.jpg>;
https://youtu.be/zUI5FDPq0KY?list=PLwubw1ewa1Z-ShELs_1NGur1RkoiSODkn&t=15
- [63] Využití FDM technologie při *návrhu* zrcátka a prototypu nového bloku motoru. In: Hubs; 3DINSIDER [online]. 2018 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/automotive-applications/photo2.jpg>;
<https://3dinsider.com/wp-content/uploads/2018/10/what-is-fdm-3d-printing.jpg?x20265>
- [64] Frézování 3D ploch. In: SANDVIK Coromant [online]. [cit. 2022-11-20]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/pages/profile-milling.aspx>

Seznam obrázků, tabulek a příloh

Obr. 1: Frézování 3D ploch [64].....	13
Obr. 2: Pětiosé frézování [41]	15
Obr. 3: Schéma rozložení složek síly při frézování [6]	17
Obr. 4: Oblasti plastických deformací v kořenu třísky [7].....	18
Obr 5: Zleva upínací stůl frézky, profil drážky frézovacího stolu [42], [43].....	21
Obr. 6: Modulární systém s otvory [44].....	22
Obr. 7: Základní set paletového systému [45]	23
Obr. 8: Příklady použití hydraulických přípravků [46].....	26
Obr. 9: Svěrák s fraktálními čelistmi [47]	27
Obr. 10: Samostředící duální svěrák [48].....	28
Obr. 11: Pevný svěrák [49].....	29
Obr. 12: Čelisti Adaptix [50]	31
Obr. 13: Zleva X-CLAMP, Vari-Clamp [51], [52]	32
Obr. 14: Zleva 3-In-One-Systém, VersaGrip [53], [54]	33
Obr. 15: Pneumatické sklíčidlo [55].....	35
Obr. 16: Možnosti provedení kleštin [59].....	37
Obr. 17: Příklady tvarově složitých kleštin [58]	39
Obr. 18: Zleva šroubová kleština, segmentová kleština [56], [57]	39
Obr. 19: Základní upínky a podpěry obrobků [4]	40
Obr. 20: Zleva Compact Toe Clamps, Dyva-Force Clamps, Fixtur Clamps [60]	41
Obr. 21: Zleva Knife Edge Clamps, KOPAL Mini Clamps [61]	42
Obr. 22: Zleva OK-VISE, Invert-A-Bolt [62].....	43
Obr. 23: Využití FDM technologie při návrhu zrcátka a	47
Obr. 24: Vyráběná součást.....	49
Obr. 25: Výřez z výkresu dílu	49
Obr. 26: Vizualizace upínače, již s navrhnutým přípravkem	51
Obr. 27: Upínač Kastr CU – T 77, s vytištěným přípravkem.....	52
Obr. 28: Zleva první varianta návrhu, dále vizualizace druhé varianty	53
Obr. 29: Vizualizace vyrobené varianty upínacího přípravku	54
Obr. 30: Pohled do sliceru s informacemi o časech a rozložení jednotlivých vrstev při tisku	55

Obr. 31: Obrobení první strany, detail dílu.....	57
Obr. 32: Definování souřadného systému a polotovaru pro operaci 1	58
Obr. 33: Zleva zarovnání čela pomocí Face1, vyvrtání otvorů pomocí Drill1	59
Obr. 34: Zleva hrubování kontury Adaptive1, obrábění odlehčení 2D Pocket1 ...	60
Obr. 35: Zleva dokončování díry Bore2, dokončování vnější kontury 2D Contour1	61
Obr. 36: Testovací vzorek	62
Obr. 37: Dráhy vytvořené pro měření.....	63
Obr. 38: Měření sil pomocí tenzometrického dynamometru.....	64
Obr. 39: Závislost vypočtené měrné řezné síly na řezné rychlosti pro 5 hodnot posuvů na zub [39]	67
Obr. 40: Schéma rozložení sil při frézování	68
Obr. 41: Zleva nastavení operace 2 pro první část, druhá část operace 2	70
Obr. 42: Hrubování vnější kontury pomocí 2D Contour3	71
Obr. 43: Dokončení horizontální plochy kontury dílu Horizontal1	73
Obr. 44: Zleva dohrubování vnější kontury 2D Adpative2, dokončení vnější kontury 2D Contour4	74
Obr. 45: Vyrobená upínací deska	76
Obr. 46: Výroba dílu alternativní metodou.....	76
Obr. 47: Zleva upnutí do vyrobeného přípravku, díl po obrobení druhé strany ..	77
Obr. 48: Rozmístění měřících bodů.....	78
Obr. 49: Vizualizace úprav upínacího přípravku	80
Tabulka 1: Zprůměrované výsledky měření sil.....	65
Tabulka 2: Porovnání síly získané početně x měřením.....	69
Tabulka 3: Shrnutí operací použitých při výrobě dílu	75
Tabulka 4: Přehled použitých nástrojů a jejich podmínek při obrábění	77
Tabulka 5: Odchytky měření výroby pomocí navrhnutého přípravku.....	79
Tabulka 6: Odchytky měření výroby pomocí upínací desky.....	79

Příloha 1: Výkres součásti