



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

APLIKACE CAD/CAM SOFTWARE POWERMILL 2020 PŘI REVERZNÍM INŽENÝRSTVÍ

APPLICATION OF CAD/CAM SOFTWARE POWERMILL 2020 FOR REVERSE ENGINEERING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Rais

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Tomáš Rais
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	Ing. Aleš Polzer, Ph.D.
Akademický rok:	2019/20

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

Aplikace CAD/CAM softwaru PowerMILL 2020 při reverzním inženýrství

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V dnešních strojírenských podnicích se velmi úspěšně prosazuje příprava programů pro CNC stroje prostřednictvím CAM softwarů. Tato závěrečná práce je proto zaměřena na návrh vlastní součástky, zpracování nezbytné výrobní dokumentace a naprogramování její výroby v CAM softwaru PowerMILL 2020. Kontrola vyrobitelnosti součásti je především formou grafické simulace v prostředí ViewMill nebo ViewTurn, poněadž popisovány budou i možnosti využití PowerMILLu při 3D tisku polotovárů.

Cíle bakalářské práce:

- návrh vlastní nerotační součásti vhodné pro CAD/CAM technologii
- zpracování nezbytné výrobní dokumentace
- návrh strojního i nástrojového vybavení pro výrobu
- stručné technicko–ekonomické zhodnocení navržené varianty

Seznam doporučené literatury:

GUPTA, Kapil, ed. Advanced manufacturing technologies: Modern Machining, Advanced Joining, Sustainable Manufacturing. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 978-3-319-56-98-4.

MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha: MM publishing, 2014. 684 s. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.

DAVIM, J. Paulo, ed. Traditional machining processes. New York: Springer, 2014. ISBN 978-36-2450-871.

DAVIM, J. Paulo, ed. Surface integrity in machining. London: Springer, 2010. 215 s. ISBN 978--84882-873-5.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá představením využití softwaru PowerMILL 2020 při reverzním inženýrství a také představení aditivních technologií v tomto softwaru. Jako vzorová součást pro tuto práci byl zvolen dílec Rubikovy kostky. V první části budou stanoveny jednotlivé rozměry, ke kterým budou přiřazeny jednotlivé výrobní tolerance pro zajištění funkčnosti součásti. V druhé části budou navrženy nástroje, vypočteny technologické podmínky a navrženy stroje pro výrobu. Tyto technologické podmínky budou použity v další kapitole, kde bude vytvořen NC program pro výrobu součásti. V poslední kapitole bude provedeno stručné technicko – ekonomické zhodnocení navržené varianty.

Klíčová slova

Reverzní inženýrství, PowerMILL 2020 , Rubikova kostka, frézování, CAD model

ABSTRACT

This thesis is dealing with usage of software PowerMILL 2020 in reverse engineering and introduction of additive technologies in this software. The part of a Rubik's cube was chosen as a model for this thesis. There will be assigned particular dimensions to ensure dimensions functionality, in the first part. In the second part, there will be designed tools, calculated technological conditions and designed machines for production. Those technological conditions will be used in next chapter, where the NC program for the production of a part will be created. In the last chapter there will be briefly executed technical – economic evaluation of designed variant.

Key words

Reverse engineering, PowerMILL 2020, Rubik's Cube, milling, CAD model

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

RAIS, Tomáš. *Aplikace CAD/CAM softwaru PowerMILL 2020 při reverzním inženýrství* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/123674>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Aleš Polzer.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Aplikace CAD/CAM softwaru PowerMILL 2020 při reverzním inženýrství** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

22.6.2020

Tomáš Rais

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Aleši Polzerovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

Také děkuji Ing. Jaroslavovi Kubíčkovy za jeho odborné postřehy v oblasti svařování.

Obsah

Abstrakt.....	3
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah	7
Úvod.....	9
1 Teoretická část	10
1.1 Popis zvolené součásti.....	10
1.2 Reverzní inženýrství.....	10
1.2.1 Využití reverzního inženýrství ve strojírenství.....	10
1.2.2 Využití reverzního inženýrství v lékařství	11
1.2.3 Zneužití reverzního inženýrství	11
1.3 Technologie použité pro výrobu	11
1.3.1 Soustružení.....	11
1.3.2 Frézování	13
1.3.3 Additivní technologie	14
2 Tvorba cad modelu a výkresové dokumentace.....	16
2.1 Stanovení rozměrů	16
2.1.1 Volba měřidla	16
2.1.2 Měření rozměrů	16
2.1.3 Naměřené hodnoty a jejich vyhodnocení.....	17
2.2 Ověření normálního rozdělení.....	19
2.3 Stanovení výrobních tolerancí.....	20
2.3.1 Plochy zajišťující funkci	20
2.3.2 Navržené tolerance a jejich ověření	20
2.4 Tvorba CAD modelu.....	22
2.4.1 Vyhodnocení CAD modelu	22
3 Technologická příprava výroby	23
3.1 Posouzení technologičnosti	23
3.2 Volba materiálu a přídavného materiálu	23
3.3 Návrh polotovaru	24
3.4 Volba výrobní technologie.....	25
3.5 Volba nástrojů	25
3.5.1 Nástroje pro soustružení	26
3.5.2 Nástroj pro navařování.....	26

3.5.3	Nástroje pro frézování	26
3.6	Volba upínače obrobku	28
3.7	Výpočet technologických podmínek	29
3.7.1	Výpočet řezných podmínek pro soustružení	29
3.7.2	Výpočet technologických podmínek pro navařování	30
3.7.3	Výpočet řezných podmínek pro frézování	32
3.8	Volba stroje	34
3.8.1	Volba stroje pro soustružení	34
3.8.2	Volba stroje pro navařování	36
3.8.3	Volba stroje pro frézování	36
4	Tvorba NC programů	39
4.1	PowerMILL 2020	39
4.2	Postup výroby	39
4.3	Ustavení obrobku	40
4.4	Parametry nástrojů v softwaru PowerMILL	40
4.5	Obráběcí soustava v softwaru PowerMILL	41
4.6	NC programy	42
4.6.1	NC program pro soustružení	42
4.6.2	NC program pro první zarovnání čelní plochy	43
4.6.3	NC program pro druhé zarovnání čelní plochy	43
4.6.4	NC program pro navaření prvku	44
4.6.5	NC program pro dokončovací frézování	45
4.6.6	NC program pro sražení hran	47
4.7	Generování NC kódu	48
4.8	Následující operace	49
5	Technicko – Ekonomické zhodnocení	51
	Závěr	53
	Seznam použitých zdrojů	55
	Seznam použitých symbolů a zkratk	58
	Seznam příloh	61

ÚVOD

V dnešní době se pro výrobu součástí používají velmi specifické výrobní stroje určené pro výrobu vysokého množství součástí v co nejkratším čase. Díky tomu jsou mají tyto stroje velmi vysoké zisky. Pro vykonání své funkce využívají vysoké množství specializovaných dílů nutných pro jejich správnou činnost. Při poruše některé ze součástí ovšem není vždy možné provést výměnu vadného dílu, a to z důvodů jeho nedostupnosti na trhu. Pro tyto stroje je ovšem nutné provést opravu v co nejkratším čase, aby bylo možné je znovu uvést do provozu, protože jejich odstavení může znamenat vysoké finanční ztráty. Protože poškozený díl není možné koupit a není k dispozici ani technická dokumentace pro jeho opětovnou výrobu je jediný způsob, jak poškozenou součást získat pomocí reverzního inženýrství. Díky tomuto procesu je možné replikovat původní součást.

Technologie, které umožňují rychlou výrobu součástí jsou zpravidla technologie třískového obrábění. Tyto technologie mají ale často nízké využití materiálu. Pokud by pro součást bylo nutné vytvořit odlitek mohla by být doba výroby značně prodloužena, z důvodů přípravy formy a chlazení taveniny. Pro některé součásti je ovšem možné vytvořit vhodnější, tvarově složitější polotovary, aby se zvýšilo využití materiálu, při použití aditivních technologií.



Obrázek 1 Zvolená vzorová součást.

1 TEORETICKÁ ČÁST

V této kapitole bude popsána zvolená součást a objasněny jednotlivé postupy použité v následujících kapitolách této práce.

1.1 Popis zvolené součásti

Pro tuto práci bude vyráběn dílec Rubikovy kostky. Jedná se o dílek, který je umístěn ve středu na každé hraně kostky. Jeho poloha je zajištěna okolními dílci a středovým dílkem umístěným ve středu každé strany u kterého je přítlak zajištěn pružinou nasazenou na šroub který zajišťuje spojení se středovou částí. Součást bude vyhotovena za použití reverzního inženýrství.



Obrázek 2 Zvolená vzorová součást.

1.2 Reverzní inženýrství

V této práci bude vytvářena součást, podle již existující součásti. Jedná se tedy o reverzní inženýrství. Reverzní inženýrství je proces využívaný nejen ve strojírenství ale i v dalších odvětvích, proto můžeme narazit na různé definice tohoto slovního spojení a je nutné brát v úvahu ve kterém odvětví se pohybujeme. V oblasti strojírenské technologie lze reverzní inženýrství popsat jako „*Proces duplikování existující části, podstavy nebo výroby bez výkresů, dokumentace nebo počítačového modelu [1]*“. Přesto že se jedná o legální činnost je tento proces často zneužíván pro okopírování technologií a jejich následnou krádež. Reverzní inženýrství je často spojováno s použitím 3D skenovacích metod a je možné narazit na definici reverzního inženýrství jako „*Proces získání geometrického CAD modelu z měření získaných kontaktním nebo bezkontaktní skenovací technikou stávajícího fyzikálního modelu [2]*“. Tuto definici lze použít pouze pro CARE.

1.2.1 Využití reverzního inženýrství ve strojírenství

Ve strojírenství je tento proces nejčastěji používán pro výrobu náhradních součástí, které nejsou již na trhu nejsou dostupné nebo není dostupná technická dokumentace pro jejich opětovnou výrobu [3].

1.2.2 Využití reverzního inženýrství v lékařství

Pro toto odvětví znamenala aplikace reverzního inženýrství velký pokrok. Díky moderním metodám zpracování dat mohly být vytvořeny tělesné implantáty, které se velmi podobaly původním částem lidského těla, a tak nepředstavovali pro člověka problémy při vykonávání libovolných činností. Tyto implantáty, jako jsou umělé klouby nebo zuby, jsou dnes nejčastěji vyráběny pomocí metod 3D tisku s následnou úpravou podle požadované funkce [4].

1.2.3 Zneužití reverzního inženýrství

Stejně jako všechny vyvinuté technologie i tento proces je často zneužíván při průmyslové špionáži. Přesto že v tomto případě se jedná o nelegální činnost, můžeme občas nalézt, že některé distribuované zboží je pouze kopií významnějších značek [5].

V historii byla tato průmyslová špionáž převážně za dob válek. V tomto případě ale nebylo možné dožadovat se autorských práv [6].



Obrázek 3 Americký bombardér B-29 [7].



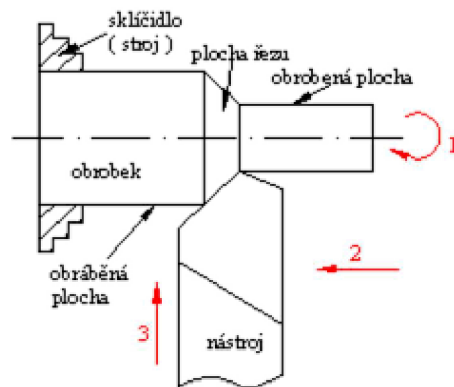
Obrázek 4 Ruský bombardér Tupolev Tu-4 [8].

1.3 Technologie použité pro výrobu

V dnešní době je možné pro výrobu volit z vysokého množství technologií používaných pro výrobu součástí od jednoduchých po velmi složité tvary. Zvolené technologie musí zajistit požadovanou tvarovou přesnost, jakost, hospodárnost a produktivitu [9]. Volbou vhodných technologií může dojít ke značnému zvýšení produktivity nebo snížení nákladů na výrobu. Často stačí pouze malé úpravy tvaru nebo požadované přesnosti vyráběné součásti a je možné získat značné snížení nákladů. Pro vyhotovení součástí budou použity technologie popsané v následujících podkapitolách.

1.3.1 Soustružení

Jedná se o jednu z nejpoužívanějších technologií třískového obrábění, při které je cílem výroba rotačních součástí zpravidla jednobřítým nástrojem [9]. Hlavní rotační pohyb vykonává obrobek a vedlejší pohyby (posuv, přísm) je vykonáván nástrojem. Pohyby obrobku a nástroje jsou zobrazeny na obrázku číslo 5.



Legenda

- 1 – Hlavní pohyb (rotace)
- 2 – Vedlejší pohyb (posuv)
- 3 – Vedlejší pohyb (přisuv)

Obrázek 5 Kinematika při soustružení [10].

Stroje pro soustružení

Pro soustružení jsou používány stroje, které nazýváme soustruhy. Podle obráběné součásti lze volit z vysokého množství těchto strojů [11]:

- hrotových – Slouží pro výrobu malých až středních součástí různých tvarů,
- čelních – Pro obrábění rozměrných přírubových součástí,
- revolverových – Pro výrobu součástí, kde je nutná častá výměna nástroje. Tyto nástroje jsou upnuty v revolverové hlavě,
- svislých – Tyto soustruhy se nazývají karusely a jsou určeny pro obrábění rozměrných součástí. Hlavním rozdílem je zde to že osa rotace zde není vodorovná, ale je svislá,
- číslicově řízené – Pro ovládání těchto soustruhů slouží NC kód. Tyto soustruhy mohou být v různých provedení.

Nástroje pro soustružení

Pro soustružnické operace se používají nástroje které nazýváme soustružnické nože. Protože se jedná o jednu z nejrozšířenějších technologií je v dnešní době k dispozici vysoké množství nástrojů pro různé materiály a druhy soustružení. Při upínání nástroje je vhodné nástroj ustavit s největší možnou dosedací plochou a nejmenším možným vyložení pro zajištění dostatečné tuhosti nástroje [10].



Obrázek 6 Soustružnický nůž Coromant Capto [12].

1.3.2 Frézování

Při této obráběcí operaci dochází k úběru materiálu za pomoci vícebřitého nástroje, který koná hlavní rotační pohyb. Vedlejší pohyby jsou zajišťovány pohybem stolu, na kterém je v upínači upnut obrobek. Kombinací těchto dvou pohybů vzniká výsledný pohyb břitu nástroje, který se pohybuje po cykloidě [13].

Frézování je využíváno k výrobě rovinných a tvarových vnitřních nebo vnějších ploch.

Operace při frézování

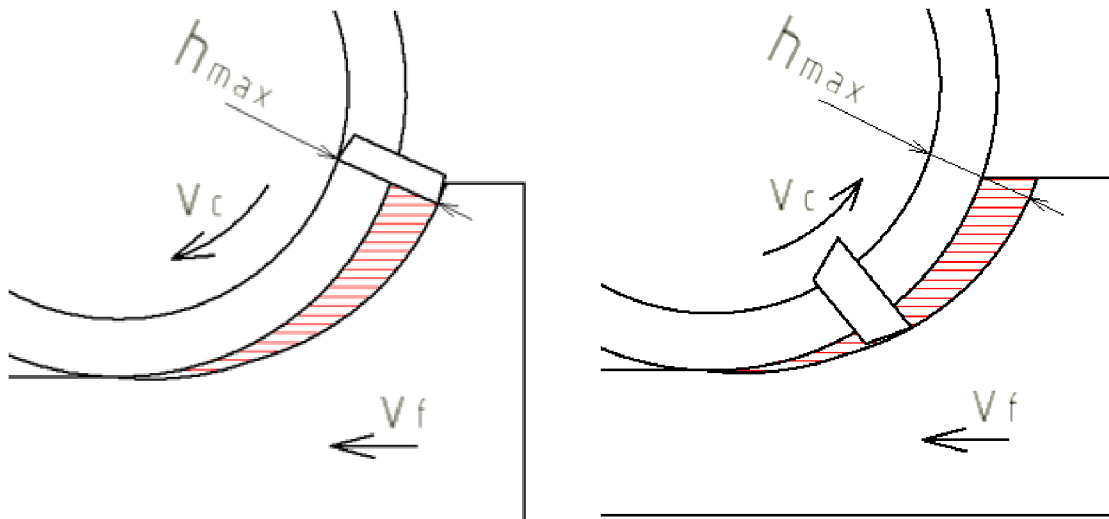
Z technologického hlediska rozlišujeme dva primární způsoby frézování, a to frézování čelem nebo obvodem nástroje. Od těchto způsobů jsou následně odvozeny další způsoby frézování jako je například planetové frézování [14].

Frézování čelem nástroje

Při tomto způsobu obrábění dochází k úběru materiálu jak břity na obvodu nástroje, tak břity na čele nástroje, které obráběnou plochu vyhlazují. Průřez třísky je proměnlivý, a to tak že od vstupu nástroje po jeho osu se zvětšuje a poté od osy po výstup nástroje se zmenšuje [15].

Frézování obvodem nástroje

U tohoto způsobu obrábění dochází k úběru materiálu břity rozmístěnými po obvodu nástroje. Podle směru otáčení nástroje můžeme rozlišovat dva způsoby frézování, a to sousledné a nesousledné.



Obrázek 7 Kinematika při frézování

Kinematika při sousledném (vlevo) a nesousledném (vpravo) frézování

Upraveno dle [13].

Sousledné frézování

Průřez třísky je proměnlivý od maximálního průřezu až do nulového průřezu. Díky tomu je oddělení plynulé a je tím dosaženo vyšší kvality povrchu než při nesousledném

frézování. Značnou nevýhodou toho způsobu frézování jsou ovšem rázy, které vznikají při vstupu břitu do záběru a značně snižují životnost nástroje. Tyto rázy lze zmírnit použitím nástrojů s šikmými nebo tangenciálními zuby. Při sousledném obrábění také není možné obrábět plným průměrem nástroje. Při takto velkém záběru by mohlo dojít k poškození břitu nástroje vlivem vtažení materiálu obrobku do zubové mezery nástroje [16]. Tento způsob obrábění je velmi často používán pro nástroje ze slinutých karbidů, z důvodů jejich vysoké houževnatosti a dobré odolnosti proti tlakovým rázům, které vznikají při vstupu nástroje do řezu [17].

Nesousledné frézování

Oproti souslednému frézování je zde průřez třísky od nejmenší hodnoty po největší. Protože při vstupu břitu nástroje do řezu má tříska velmi malý průřez dochází ke klouzání břitu po obráběné ploše a tím se jednotlivé zuby zahřívají a tupý. Výsledná plocha obrobku vlivem tlaku nástroje se zpevňuje a obrobená plocha má horší jakost. Při tomto způsobu obrábění je ovšem možné obrábět plným průměrem nástroje a tím zvýšit efektivitu obráběcího procesu [16]. Tento způsob je vhodné používat pro součásti s velmi tvrdým nebo drsným povrchem, nebo při obrábění tenkostěnných prvků [15].

1.3.3 Additivní technologie

V dnešní době se velice rozšiřují tzv. Aditivní technologie, a to hlavně v oblasti výroby prototypových součástí. Tyto technologie spočívají na principu postupného nanášení jednotlivých průřezů součásti na sebe [18].

Metody 3D tisku

Tyto metody jsou dnes velmi dominantní pro výrobu tvarově složitých prototypových součástí, a to proto že umožňují přímou cestu od CAD modelu k hotové součásti. Rozhodujícími parametry pro tyto technologie jsou dosahovaná přesnost, použitelný materiál, výsledná kvalita povrchu a rychlost tisku. Tyto technologie jsou ovšem velmi nákladné a není vhodné je používat pro sériovou výrobu nebo rozměrné kusy. Podle použitého materiálu a jeho způsobu vytvrzení můžeme rozlišovat tyto technologie [19]:

- SLS – Spékání keramického nebo plastového prášku pomocí laseru,
- DMLS – Tato technologie je stejná jako SLS ale je zde použit silnější laser čímž je umožněno také spékání kovových prášků,
- BJ – U této technologie je práškový materiál spojován použitím chemického lepidla,
- FDM – Materiál je dodáván ve formě drátu do tiskové hlavy, kde dojde k jeho natavení a následnému nanesení,
- SLA – Jedná se o nejstarší technologii 3D tisku. Princip spočívá v postupném vytvrzování tekutého polymeru za pomoci UV záření.

Alternativní metoda WAAM

Tato metoda je založena na stejném principu jako aditivní technologie. Není ovšem používána pro výrobu hotových součástí, ale slouží pro výrobu středně velkých až velkých dílů s nízkou až střední složitostí [20].

Princip metody spočívá v navařování silných svarových housenek na základní polotovar pomocí elektrického oblouku. Pro navaření kovu se používají metody navařování v ochranné atmosféře jako je MIG, MAG a TIG. Použitá metoda a ochranný plyn je nutné volit podle navařovaného materiálu [18].

Elektrický oblouk je možné použít pouze pro vytváření relativně velkých návarů s dostatečnou délkou návaru z důvodů chycení oblouku. Pro vytvoření menších svarů je možné použít laser nebo elektronový paprsek s přidávným materiálem ve formě prášku. Tyto způsoby jsou ovšem limitovány velikostí součástí a časem navařování. Pro laser a elektronový paprsek je výkon navařování 2–10 g/min [18]. Při využití elektrického oblouku je výkon navařování 50–130 g/min [18]. Při využití elektronového paprsku je také nutné zajistit, aby proces navařování probíhal ve vakuu, čímž se celý proces značně komplikuje.

Důvodem vzniku této metody bylo zvýšení využití materiálu a snížení odpadu při výrobě součástí třískovým obráběním a tím snížení nákladů na ekonomicky nákladné materiály. Díky postupnému navařování housenek a jejich následného obrobení jsou odstraněny některé nevýhody technologií, které by mohly být použity pro výrobu tvarových polotovarů. Tato technologie odstraňuje například nevýhody slévárství jako je kritická tloušťka stěny 1,5 mm a materiálová nehomogenita [18]. Díky snížení množství obráběného materiálu je zde také úspora na nástrojích, a to díky snížení doby obrábění nástrojem. Tyto úspory jsou patrné hlavně při obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Tuto technologii lze použít pro veškeré svařitelné materiály a je možné také vytvářet součásti které mají jednotlivé vrstvy z jiných materiálů.



Obrázek 8 Součást podvozku letounu ze slitiny Ti-6Al-4V [18].

Proces navařování je značně komplikovaný a je nutné jej automatizovat. Pro zajištění pohybu svařovacího hořáku jsou používány robotické systémy nebo CNC stroje. Další značnou nevýhodou je tepelné ovlivnění součástí i stroje vzniklé při navařování. Proto je nutné mít rozsáhlé znalosti chování materiálu při tepelném ovlivnění, aby se zamezilo pórovitosti, deformacím a vzniku nežádoucích napětí. Je také nutné zajistit stabilitu navařovaného prvku, a to pomocí podpor nebo podložek. Pro odstranění pórovitosti u hliníkových slitin se používá metoda tzv. studeného přenosu kovu v kombinaci s mezivrstvím válcováním [20].

2 TVORBA CAD MODELU A VÝKRESOVÉ DOKUMENTACE

Pro tvorbu NC drah je nutné vytvořit CAD model který bude následně použit v programu PowerMILL 2020. Z virtuálního modelu bude také vytvořen výrobní výkres, ve kterém budou stanoveny rozměry a tolerance jednotlivých rozměrů. Tento výkres bude následně použit při kontrole rozměrů vyrobené součásti. Vytvořený výkres je součástí přílohy 4. Pro zjednodušení bude součást vytvořena bez vnitřních odlehčujících dutin.

2.1 Stanovení rozměrů

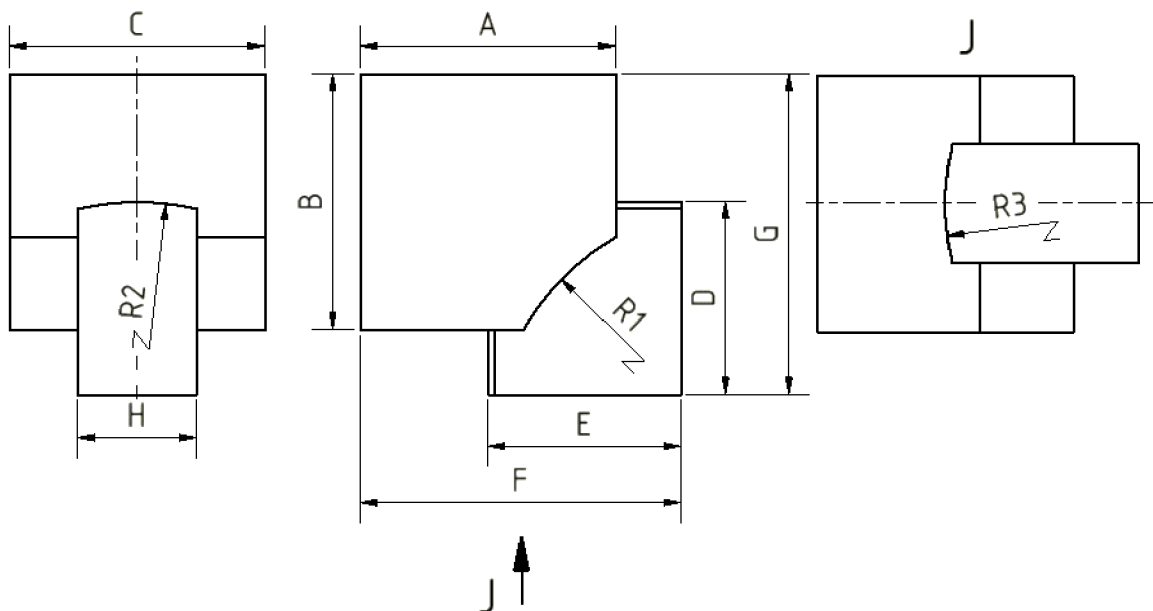
Prvním krokem pro vytvoření modelu je stanovení jednotlivých rozměrů součásti. Tolerance jednotlivých rozměrů poté budou stanoveny tak, aby vyrobená součást mohla plnit požadovanou funkci.

2.1.1 Volba měřidla

Protože pro tuto práci byla zvolena tvarově jednoduchá součást bez tvarových kvadratických ploch bude pro stanovení rozměrů použito posuvné měřítku s digitální stupnicí o rozlišení 0,01 mm značky COOLANT PROOF s rozsahem měření 0–150 mm.

2.1.2 Měřené rozměry

Na součásti jsou přímo měřitelné veškeré délkové rozměry. Velikost rádiusů R1, R2 a R3 je nutné měřit na otvoru při složení ostatních dílů. Zaoblení hran není rozměr nezbytný pro plnění požadované funkce, a proto nemusí být zjištěna jejich přesná hodnota. Na vyráběné součásti budou pro zjednodušení zaoblené hrany vytvořeny jako sražené. Měřené rozměry jsou vyobrazeny na obrázku 9.



Obrázek 9 Měřené rozměry.

2.1.3 Naměřené hodnoty a jejich vyhodnocení

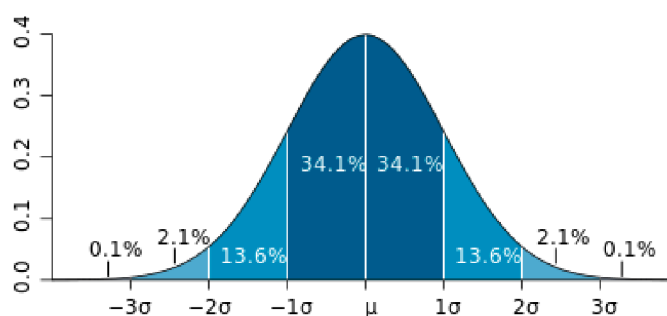
Tabulka 1 Naměřené hodnoty.

	A	D	E	F	H	R1
Naměřená hodnota	18,960	14,050	14,280	23,820	8,760	18,810
	18,940	14,040	14,270	23,830	8,790	18,840
	18,950	14,060	14,280	23,840	8,770	18,860
\bar{X}	18,950	14,050	14,277	23,830	8,773	18,837
s	0,010	0,010	0,006	0,010	0,015	0,025
U_A	0,006	0,006	0,003	0,006	0,009	0,015
U_B	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
U_C	0,021	0,006	0,003	0,006	0,009	0,015
U	0,042	0,012	0,007	0,012	0,018	0,029
Výsledná hodnota	18,95±0,042	14,05±0,042	14,28±0,041	23,83±0,042	8,77±0,044	18,84±0,049
Stanovená jmenovitá hodnota	18,9	14,1	14,3	23,8	8,8	18,8

Z důvodů rozsáhlosti tabulky jsou uvedeny pouze některé hodnoty. Kompletní tabulka je součástí přílohy 1. Veškeré hodnoty jsou uvedeny v milimetrech.

Vzorový výpočet pro rozměr A

Pro tuto práci se uvažuje rozložení hodnoty podle tzv. normálního rozdělení. Pro toto rozdělení platí že čím větší je odchylka naměřené hodnoty od skutečné hodnoty tím menší je četnost jejího výskytu.



Obrázek 10 Graf normálního rozdělení [21].

Aritmetický průměr

Protože i při neměnných podmínkách měření není možné dokonale změřit hodnotu dané veličiny je vhodné jí přiřadit specifickou hodnotu, která se nejvíce blíží skutečné hodnotě. Jako tuto přiřazenou hodnotu je nejvhodnější zvolit aritmetický průměr. Ten se určí podle vzorce 1.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n_m} \quad (1)$$

$$\bar{X} = \frac{18,960 + 18,940 + 18,950}{3} \doteq 18,950 \text{ mm}$$

Výběrová směrodatná odchylka

Výběrová směrodatná odchylka udává nakolik se od sebe liší jednotlivé hodnoty. Určí se podle vzorce 2.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n_m - 1}} \quad (2)$$

$$S = \sqrt{\frac{(18,96 - 18,950)^2 + (18,94 - 18,950)^2 + (18,95 - 18,950)^2}{3 - 1}} \doteq 0,010 \text{ mm}$$

Nejistota typu A

Tato nejistota je stanovena statisticky a je tím spolehlivější čím větší je počet provedených měření. Nejistota typu A se určí podle vzorce 3.

$$U_A = \frac{s}{\sqrt{n_m}} \quad (3)$$

$$U_A = \frac{0,010}{\sqrt{3}} \doteq 0,006 \text{ mm}$$

Nejistota typu B

„Tato nejistota vychází z kvalifikovaného úsudku založeného na všech dostupných informacích o měřené veličině a jejích možných změnách“ [22]. Pro tuto práci byla stanovena pro zvolené měřidlo na hodnotě $U_B = 0,02 \text{ mm}$.

Kombinovaná nejistota měření

Kombinovaná nejistota měření udává součet nejistoty typu A a nejistoty typu B. Určí se podle vzorce 4.

$$U_C = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (4)$$

$$U_C = \sqrt{0,006^2 + 0,02^2} \doteq 0,021 \text{ mm}$$

Rozšířená nejistota

Pro tuto práci je hodnota rozšíření volena na hodnotě $k = 2$. Pro tuto hodnotu platí že ve výsledné hodnotě je zahrnuto 99,5 % všech hodnot. Výsledná nejistota měření se pak určí podle vzorce 5.

$$U = k \cdot U_c \quad (5)$$

$$U = 2 \cdot 0,021 \doteq 0,042 \text{ mm}$$

Výsledná hodnota

Výsledná hodnota je zapsána ve tvaru:

$$x = \bar{x} \pm U$$

Pro hodnotu A je výsledná naměřená hodnota tedy:

$$x = 18,95 \pm 0,042 \text{ mm}$$

2.2 Ověření normálního rozdělení

Vzorce použité v kapitole 2.1.3 platí pouze pokud jsou naměřené hodnoty podle normálního rozdělení. Pro ověření, jestli hodnoty jsou skutečně podle normálního rozdělení slouží testy normality. Čím více je naměřených hodnot tím jsou tyto testy přesnější. Tyto testy normality mohou být grafické nebo početní.

Ověření hrubým odhadem

Pro tuto práci bude pro ověření použit pouze hrubý odhad. Jedná se o porovnání aritmetického průměru s mediánem. Tyto hodnoty by se neměly lišit o více než 10 % [23]. Ověřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 2 Ověření normálního rozdělení.

	A	D	E	F	H	R1
\bar{X}	18,950	14,050	14,277	23,830	8,773	18,837
\tilde{X}	18,950	14,050	14,280	23,830	8,770	18,840
\bar{X}/\tilde{X}	100,000	100,000	99,979	100,000	100,034	99,984

Z důvodů rozsáhlosti tabulky jsou uvedeny pouze některé hodnoty. Kompletní tabulka je součástí přílohy 2. Veškeré hodnoty jsou uvedeny v milimetrech.

Vzorový výpočet pro hodnotu A

Procentuální podíl aritmetického průměru a mediánu se určí podle vzorce 6.

$$\frac{\bar{X}}{\tilde{X}} \cdot 100 = \frac{18,950}{18,950} \cdot 100 = 100 \% \quad (6)$$

Z tabulky 2 je patrné že veškeré odchylky \bar{X}/\tilde{X} nepřesahují 10 %. Proto lze předpokládat že naměřené hodnoty jsou rozloženy podle normálního rozdělení. Pro kompletní ověření by ovšem bylo nutné provést další pokročilejší testy normality. Tyto testy ovšem vyžadují vysoké množství naměřených hodnot.

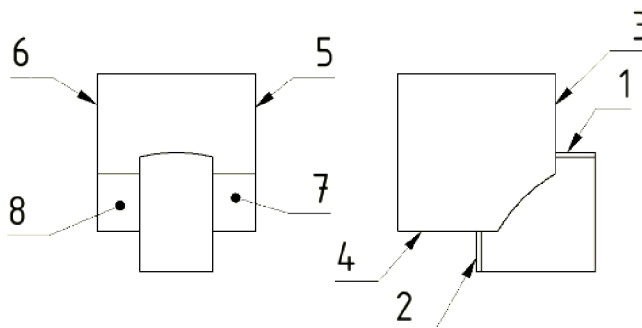
Pro tento způsob měření nebylo nezbytně nutné provádět testy normality, protože měření délky je typickým příkladem pro normální rozdělení.

2.3 Stanovení výrobních tolerancí

Protože není možné vyrábět s absolutní přesností je nutné stanovit výrobní tolerance jednotlivých rozměrů. Tyto tolerance musí zajistit, že pokud budou jednotlivé rozměry vyrobeny se splněním těchto tolerancí, bude zajištěna funkčnost součástí. Tyto tolerance musí být voleny s ohledem na možné výrobní technologie a výrobní náklady. Pokud budou tyto tolerance příliš velké může nastat, že vyrobená součást nebude schopna zajistit požadovanou funkci součásti. Pokud ovšem budou příliš přísné může dojít ke značnému zvýšení výrobních nákladů.

2.3.1 Plochy zajišťující funkci

Pro stanovení těchto tolerancí je nutné stanovit plochy které zajišťují funkčnost součástí. Výrobní tolerance pak budou stanoveny primárně na tyto plochy, aby byla zajištěna funkčnost součásti. Funkční plochy jsou označeny na obrázku 11.



Obrázek 11 Funkční plochy.

Celkem je na součásti osm ploch pro zajištění funkce součásti.

2.3.2 Navržené tolerance a jejich ověření

Tabulka 3 Navržené tolerance.

	A	D	E	F	H	R1
Aritmetický průměr \bar{X}	18,95	14,05	14,28	23,83	8,77	18,84
Uvažovaný jmenovitý rozměr JR	18,9	14,1	14,3	23,8	8,8	18,8
Horní úchylka HÚ	0,15	0,00	0,00	0,15	0,15	0,15
Dolní úchylka DÚ	- 0,15	- 0,30	- 0,30	- 0,15	- 0,15	- 0,15
Horní mezní rozměr HMR	19,05	14,10	14,30	23,95	8,95	18,95
Dolní mezní rozměr DMR	18,75	13,80	14,00	23,65	8,65	18,65
Velikost tolerančního pole Δ	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30

Z důvodů rozsáhlosti tabulky jsou uvedeny pouze některé hodnoty. Kompletní tabulka je součástí přílohy 3. Veškeré hodnoty jsou uvedeny v milimetrech.

Vzorový výpočet pro rozměr A

Vzorový výpočet pro hodnotu A byl zvolen z důvodů největší odchylky od uvažovaného rozměru.

Stanovené hodnoty

Uvažovaný jmenovitý rozměr: 18,9 mm

Navržená horní úchylka: 0,15 mm

Navržená dolní úchylka: -0,15 mm

Horní mezní rozměr

$$HMR = Jr + Hú \quad (7)$$

$$HMR = 18,9 + 0,15 = 19,050 \text{ mm}$$

Dolní mezní rozměr

$$DMR = Jr + Dú \quad (8)$$

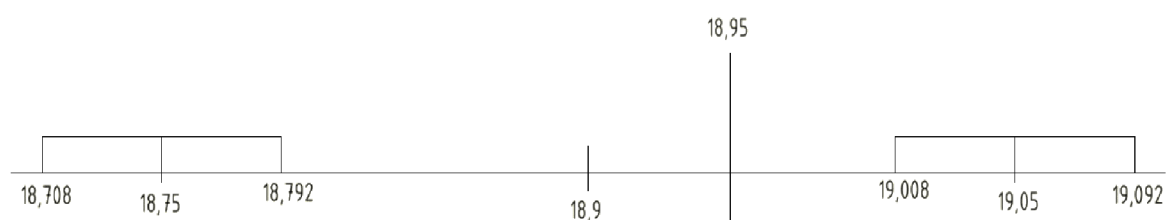
$$DMR = 18,9 + (-0,15) = 18,750 \text{ mm}$$

Velikost tolerančního pole

$$\Delta = HMR - DMR \quad (9)$$

$$\Delta = 19,05 - 18,75 = 0,300 \text{ mm}$$

Grafické vyhodnocení naměřené hodnoty



Obrázek 12 Grafické vyhodnocení.

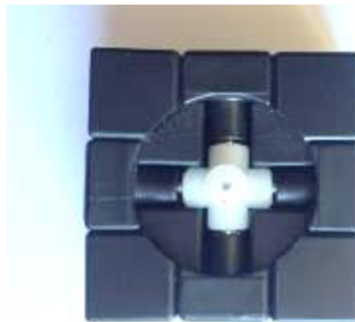
Protože existuje dostatečně velké pole shody lze použité měřidlo považovat za vhodné.

Z grafického vyhodnocení je patrné že naměřený rozměr na skutečné součásti leží v poli shody pro zvolené hodnoty tolerance. Proto tyto hodnoty tolerance lze považovat za platné.

2.4 Tvorba CAD modelu

Pro vytvoření modelu bude použit software Autodesk Inventor Professional 2020. Jedná se o CAD software umožňující tvorbu modelů, sestav a výkresové dokumentace. Jednotlivé modely je možné vytvářet pomocí objemového nebo plošného modelování.

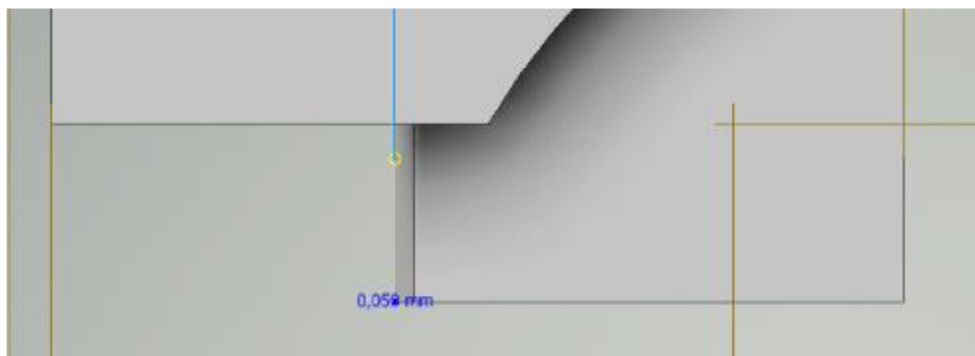
Jednotlivé rozměry modelu budou vytvořeny na jmenovitou hodnotu. Středů rádiusů R1, R2 a R3 jsou uvažovány ve středu jednotlivých vrstev Rubikovi kostky. Aby nebylo nutné vytvářet nové plochy pro obrábění bude pro tvorbu obráběcích strategií vytvořen CAD model, který má jednotlivé plochy vytvořeny na střed tolerančního pole.



Obrázek 13 Vyobrazení středu.

2.4.1 Vyhodnocení CAD modelu

Po vytvoření CAD modelu podle naměřených hodnot a uvažovaných středů rádiusů byla nalezena chyba rozměru D. Tento rozměr se liší od navržené hodnoty o 0,05 mm. Tato chyba mohla být způsobena nepřesností měření. Její velikost je ovšem zanedbatelná, vzhledem k velikosti stanovených tolerancí, které mají velikost 0,3 mm.



Obrázek 14 Chyba modelu.

3 TECHNOLOGICKÁ PŘÍPRAVA VÝROBY

V této kapitole bude navržen materiál, polotovar a technologie výroby. Následně budou zvoleny nástroje pro jednotlivé technologie a výpočet technologických podmínek. Tyto technologie a podmínky budou následně sepsány ve výrobního postupu který bude součástí přílohy 9.

3.1 Posouzení technologičnosti

Pro návrh výrobní technologie a volby materiálu je prvním krokem posouzení technologičnosti vyráběné součásti. Pro volbu výrobních technologií jsou klíčové vlastnosti tvar součásti, požadovaná přesnost, velikost výrobní série a doba za kterou je součást nutné vyrobit.

Vyráběná součást je krychlového tvaru o velikosti hrany 18,9 mm s dvěma tvarově stejnými prvky nacházejícími se na sousedních stranách o výšce 4,7 mm a délce 14,3 mm a 14,1 mm zakončené kruhovou výsečí s poloměrem 18,8 mm a dvěma výřezy ve tvaru kruhové výseče s poloměrem 18,8 mm na protilehlých stranách o hloubce 5,05 mm. Při této práci je používáno reverzní inženýrství a je uvažována výroba náhradního dílu, proto je velikost série stanovena pouze na jeden kus. Protože je zde uvažována výroba náhradního dílu je nutné volit technologie u kterých je možné vyrobit součást v co nejkratším čase.

3.2 Volba materiálu a přídavného materiálu

Pro výrobu bude použita metoda navařování prášku pomocí laseru, proto budou použity dva druhy materiálu. Jeden materiál bude použit pro základní polotovar a druhý v podobě přídavného materiálu.

Základní materiál

Protože zde bude použita metoda navařování laserem je nutné volit materiál který je možné svařovat. Vyráběná součást není strojní součást, proto není nutné volit materiál se specifickými vlastnosti a je nutné volit materiál s ohledem na hmotnost a finanční náklady.

Protože bude vyráběn pouze jeden díl bude použita ocel. Kdyby byla vyráběna celá sestava (Rubikova kostka), bylo by nutné zvažovat použití materiálu výrazně menší měrné hustoty. Pro kompletní sestavu by bylo vhodné uvažovat slitiny titanu nebo hliníku. V této práci bude použita ocel s označením 11 373.

Jedná se o neušlechtilou konstrukční ocel obvyklé jakosti vhodné ke svařování. Tento materiál se využívá například pro jednoduché, mírně namáhané, kované, lisované, zastudena ohýbané součásti. Mostní, jeřábové a stropní konstrukce namáhané staticky a mírně dynamicky [24].

Tabulka 4 Parametry základního materiálu [24].

Chemické složení v hmotnostních procentech			
C	P	S	N
max. 0,17 %	max. 0,045 %	max. 0,045 %	max. 0,007 %
Mechanické vlastnosti			
	Tepelně nezpracovaný	Normalizačně žíhaný	
R _m [MPa]	min. 370	min. 350	
R _e [MPa]	min. 250	min. 220	
A ₁₀ [%]	min. 7	min. 20	

Přídavný materiál

Jako přídavný materiál je nutné volit takový materiál který má podobné chemické složení a mechanické vlastnosti. Protože je zde použit přídavný materiál ve formě prášku lze vytvořit přídavný materiál přesného složení jako je základní materiál. Tím budou zajištěny veškeré požadavky složení a mechanických vlastností. Při navařování je také nutné brát v úvahu propal některých prvků a podle toho také optimalizovat složení přídavného materiálu.

Při použití prášku je však možné výrazně ovlivňovat jeho složení dalšími legujícími prvky jako jsou karbidy, oxidy, polymery nebo keramika k získání specifických vlastností navařeného materiálu [25].

Značnou nevýhodou těchto přídavných materiálů je ovšem to že jsou velmi finančně nákladné a je nutné zvážit, zda je jejich použití výhodné.

Jako přídavný materiál bude použit prášek se stejným složením jako je základní materiál obohacen o 1,5 % manganu. Mangan ve svarové lázni snižuje náchylnost ke tvorbě trhlin za horka zapříčiněné vyšším obsahem síry ve svarové lázni [26].

3.3 Návrh polotovaru

Pro výrobu bude použita metoda aditivní technologie. Proto pro úsporu nákladů bude jako původní polotovar použit hutní polotovar tyč čtvercového průřezu o velikosti strany 20 mm vyráběné tažením za studena. Díky tažení zastudena je povrch vysoké kvality.

Délka použitého polotovaru se se určí součtem délek jmenovitého rozměru F, přídavků na obrábění na čele p a přídavkem na délce pro navaření x_p podle vzorce 10.

$$l_p = j_r + p + x_p \quad (10)$$

$$l_p = 23,8 + 3 + 4 = 30,8 \text{ mm}$$

Původní polotovar bude zhotoven řezáním na pile. Pro tuto technologii je přesnost velmi malá a aby byly pro původní polotovar zajištěna dostatečné přídavky na obrábění bude výsledný polotovar uříznut na rozměr:

$$l_p = 31_0^{+1} \text{ mm}$$

Hutní polotovary jsou vyráběny hromadně, a proto je vhodné je používat z důvodů jejich nízké ceny a dostupnosti.

Zápis polotovaru

4HR 20 h11 – ČSN 42 6520.12 – 11 373

Pro tuto práci je původní polotovar vypočítán a následně je sním uvažováno. V technické praxi by pro tak malou sérii byl jako polotovar zvolen zbytek materiálu, který zbyl po dělení polotovaru pro jinou součást.

3.4 Volba výrobní technologie

Pro výrobu budou použity technologie popsané v kapitole 1.3. Tyto technologie budou použity pro následující operace.

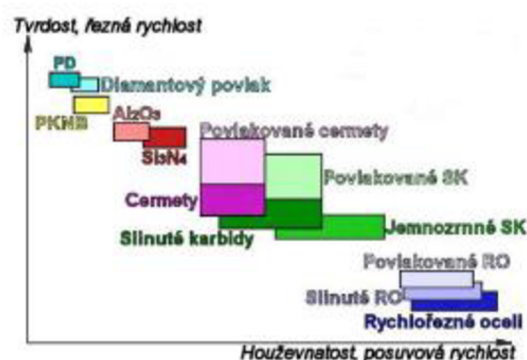
Soustružení bude použito pro zarovnání čela polotovaru odřezaného z tyče na přibližnou požadovanou délku. Díky zarovnání jednoho čela bude možné vytvořit souřadný systém na dostatečně přesných plochách. Tato technologie byla zvolena pro její jednoduchost a efektivnost.

Aditivní technologie bude použita pro navaření prvku na jedné ploše polotovaru pro úsporu materiálu, aby nebylo nutné používat velký hutní polotovar a aby bylo uspořeno obráběcích operací. Z důvodů malé oblasti navařování by bylo problematické provést navaření pomocí elektrického oblouku, proto bude použito navařování práškového materiálu laserem. Díky této technologii je možné vytvořit návary malých rozměrů a přesně stanovit počátek návary. Další výhodou je relativně malé teplo vnesené do součásti a tím je značně snížen propal jednotlivých prvků a šance na deformaci součásti. Při tomto způsobu navařování je velmi malá šance porezity v navařených vrstvách. Přídavný materiál je do ohniska laseru vnášen s příměsí inertního plynu [25].

Pro výrobu součásti výsledného tvaru bude použita technologie frézování obvodem i čelem nástroje. Technologie frézování čelem nástroje bude použita pro zarovnání rovinných ploch. Technologie frézování obvodem nástroje bude použita pro obrobení navařeného prvku. Celková drsnost je pro zvolenou součást stanovena na hodnotě Ra 6,3. Tato hodnota je dosažitelná běžnými způsoby obrábění bez speciálních podmínek.

3.5 Volba nástrojů

V dnešní době je možné vybírat z vysokého množství nástrojů a nástrojových materiálů. Pro nástrojové materiály jsou klíčové vlastnosti tvrdost a houževnatost podle kterých určíme způsob jejich použití. Používané nástrojové materiály jsou vyobrazeny na obrázku 15.



Obrázek 15 Oblast použití řezných materiálů [27].

Správná volba nástroje je jednou z nejdůležitějších činností technologické přípravy výroby. Při volbě nevhodného materiálu dojde k rychlému zničení nástroje nebo nebude dosaženo požadované kvality výroby.

Pro zvýšení účinnosti obrábění je možné nástrojové materiály opatřit povlaky které výrazně zlepšují vlastnosti nástrojů. Hlavním cílem povlaků je zvýšení povrchové tvrdosti pro ochranu nástroje proti abrazi, tvorba ochranné vrstvi proti vniku tepla do nástroje, zvýšení kluzných vlastností pro lepší odvod třísky, zamezení ulpívání materiálu na nástroj a zamezení šíření trhlin na nástroji [28]. Pro zajištění těchto vlastností je nutné volit jak správný materiál povlaku, tak správný způsob nanesení povlaku. Povlaky mohou být vytvořeny například jako monovrstva, multivrstva nebo gradientní [28].

3.5.1 Nástroje pro soustružení

Jako polotovar je použita tyč čtvercového průřezu, kvůli čemu dojde při počátku soustružení ke vzniku velkých rázů do nástroje. Je proto nutné volit materiál nižší tvrdosti a vyšší houževnatosti. Proto pro tuto operaci bude použit nástroj ze slinutého karbidu opatřený povlakem od firmy Walter s označením CNMG120412 – RP7 z materiálu WPP30S určený pro přerušovaný řez a negativní způsob obrábění. Jako tělo nástroje bude použito PCLNR/L2020K12. Popis nástroje pro soustružení je součástí přílohy 5.

3.5.2 Nástroj pro navařování

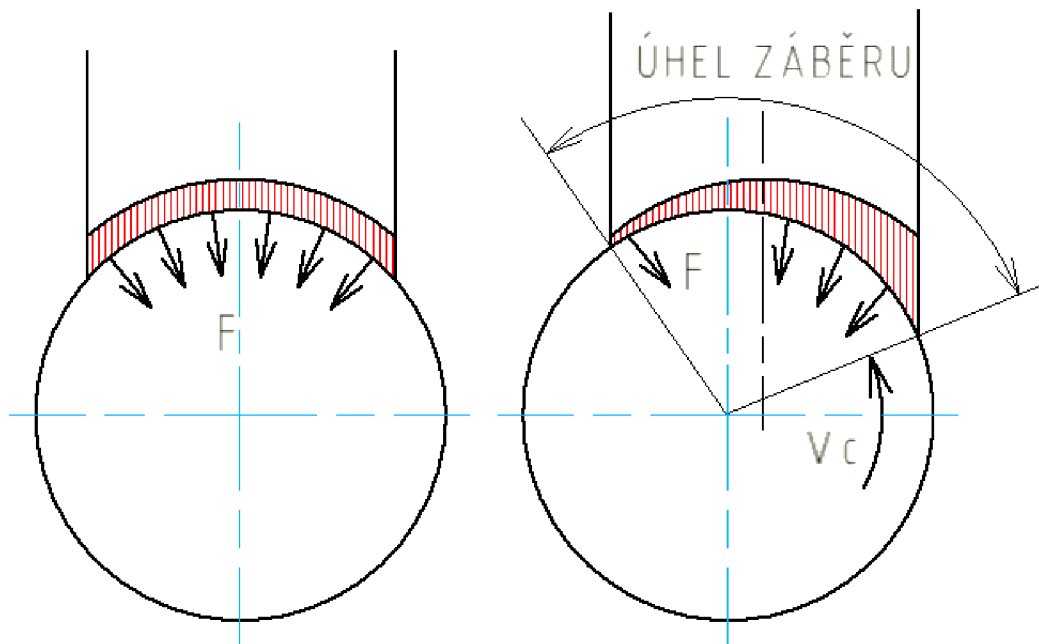
Pro navařování bude použita laserová navařovací hlava s kruhovým pracovním bodem od firmy LaserTherm. Jedná se o laserovou navařovací hlavu určenou pro navařování širokého množství materiálů pro průměr pracovního dobu 1-8 mm [29]. Popis nástroje je součástí přílohy 6.

Pro uchycení nástroje bude nutné použít robota s optickým měřením pro přesné vymezení polohy dílu.

3.5.3 Nástroje pro frézování

Na součásti se nachází místa s velkým úběrem materiálu, proto je nutné vlit nástroje pro hrubovací a dokončovací operace.

Při frézování by neměl výstupní úhel ležet v rozmezí od 30° do -30° od osy nástroje [30]. Při tomto rozmezí vznikají velké rázy na výstupu nástroje, vlivem uvolnění nástroje z tlakového zatížení, z materiálu a tím dochází ke značnému opotřebení nástroje. Pro eliminaci těchto rázů je vhodné umístit nástroj tak aby tříska při výstupu nástroje z materiálu měla co nejmenší průřez. Pro získání tenké třísky na výstupu nástroje je vhodné umístit osu rotace nástroje mimo střed obráběné plochy. Díky tomuto umístění je také dosaženo zvětšení úhlu záběru nástroje a tím zvýšení počtu břitů, které obrábí současně [30].



Obrázek 16 Výhody při rovinném frézování způsobené výstřednou polohou frézy [30].

Dalším parametrem pro volbu nástroje při frézování rovinné plochy je že průměr nástroj by měl být o 20–50 % větší než šířka obráběné plochy [30]. Na zvolené součásti je největší šířka obráběné plochy výchozí délka polotovaru, která je 20 mm proto by měl být nástroj minimálního průměru 24 mm. Jako druhá největší šířka obráběné plochy je šířka navařené oblasti. Ta bude navařena s jmenovitou hodnotou zvětšenou o přídávky 1,6 mm na obou stranách. Takto vzniklá plocha bude široká 12 mm. Hrubovací fréza by pak měla mít minimální průměr 14,4 mm.

Zvolené nástroje

Pro tuto práci budou voleny frézy s výměnnými frézovacími hlavami. Díky použití navařování práškového materiálu laserem bude navařená oblast vytvořena s minimálními přídávky díky tomu bude možné pro obrobení použít pouze jeden přejezd pro hrubování a jeden přejezd pro dokončení. Pro snížení nákladů na výrobu bude použita pouze jedna hrubovací fréza a jedna pro dokončení. Pro zarovnání čela výchozího polotovaru pak bude nutné použít více přejezdů.

Pro hrubovací a dokončovací operace budou použity monolitní karbidové hlavice pro rohové frézování a frézování drážek o průměrech 16 mm a 12 mm.

Pro srážení hran bude použita monolitní karbidová hlavice pro srážení hran s vrcholovým úhlem 90°.

Tyto nástroje budou upnuty v adaptéru s válcovou stopkou, které budou uchyceny pomocí hydraulického upínače.

Všechny nástroje jsou voleny podle katalogu firmy Walter [31]. Jednotlivé sestavy nástrojů jsou uvedeny v tabulce 5 podle označení. Kompletní popis jednotlivých prvků nástroje je součástí příloh 7 a 8.

Tabulka 5 Sestavy nástrojů.

Hlavice	Dřík	Redukce	Upínač
H3E20317-E16-16-2	AK610.Z16.E16.080C	FS2221	AK182.S40.065.20
H3E20317-E12-12-0.5	AK610.Z16.E12.090C	FS2221	AK182.S40.065.20
H3E58318-E12-12	AK610.Z16.E12.090C	FS2221	AK182.S40.065.20

Proto aby bylo možné původní polotovár zarovnat pouze jedním přejezdem, bylo by nutné použít další nástroj o větším průměru. Další nástroj by bylo vhodné volit při výrobě více než jednoho kusu ve vyráběné sérii. V této práci je velikost série stanovena pouze na jeden kus, a proto pořízení nového nástroje pro snížení výrobního času by značně zvýšilo náklady na výrobu. V této práci jsou také nástroje voleny podle katalogu řezných nástrojů. V praxi by pro výrobu takto malé série byly nástroje voleny podle dostupných nástrojů.

3.6 Volba upínače obrobku

Protože se jedná o jednoduchou součást s rovnými na sebe kolmými plochami je možné pro upnutí použít běžné upínače. Také se jedná o malou součást, proto není nutné provádět kontrolní výpočet upínacích sil.

Upínač pro soustružení

Protože je obráběna součást čtvercového průřezu je nutné použít čtyřčelistové sklíčidlo. Typ toho sklíčidla je podle použitého stroje, dodán přímo od dodavatele stroje.

Upínač pro frézování

Pro upnutí při frézování bude použit strojní svěrák s rozevřením čelistí 0–100 mm pro CNC stroje [34]. Díky hladkým upínacím plochám je možné upínat i za obrobené plochy.



Obrázek 17 Upínač pro frézování [34].

Pro simulaci bude vytvořen zjednodušený CAD model.

Upínač pro navaření

Pro tuto technologii může být použit stejný upínač jako pro frézovací operace.

3.7 Výpočet technologických podmínek

Pro zajištění správné výroby součásti je nutné dodržet technologické podmínky pro jednotlivé operace. Při obrábění je to nutné pro dosažení požadované kvality obrobku a zajištění požadované životnosti nástroje. Pro proces navařování bude vypočteno pouze množství použitého prášku.

3.7.1 Výpočet řezných podmínek pro soustružení

Soustružení bude použito pro zarovnání obou stran čela polotovaru. Hodnota přídatku na čele p je 3 mm.

U původního polotovaru je známa délka hrany čtvercového polotovaru 20 mm. Z této hodnoty je nutné určit počáteční obráběný průměr podle vzorce 11.

$$D_p = a_s \cdot \sqrt{2} \quad (11)$$

$$D_p = 20 \cdot \sqrt{2} \doteq 28,3 \text{ mm}$$

Z katalogu určíme hodnotu řezné rychlosti, velikosti záběru a hodnotu posuvu v závislosti na tvaru a materiálu nástroje a na typu obráběného materiálu. Zvolené hodnoty jsou vedeny v tabulce 6.

Tabulka 6 Řezné parametry pro soustružnický nástroj.

Parametr	Označení	Hodnoty nástroje	Zvolená hodnota
Řezná rychlost	v_c	-	$290 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
Posuv na otáčku	f	0,3–0,5 mm	0,3 mm
Hloubka řezu	a_p	1,2–5 mm	1,5 mm

Podle stanovené řezné rychlosti lze určit otáčky vřetene podle vzorce 12

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D_p} \quad (12)$$

$$n = \frac{290 \cdot 1000}{\pi \cdot 28,3} \doteq 3262 \text{ min}^{-1}$$

Posuvová rychlost se pak určí podle stanovených hodnot podle vzorce 13.

$$v_f = n \cdot f \quad (13)$$

$$v_f = 3262 \cdot 0,3 \doteq 978,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$$

Podle stanoveného posuvu lze také určit předpokládanou hodnotu drsnosti povrchu tato hodnota by měla být menší, než je požadovaná drsnost povrchu. Podle [30] se předpokládaná hodnota drsnosti určí podle vzorce 14.

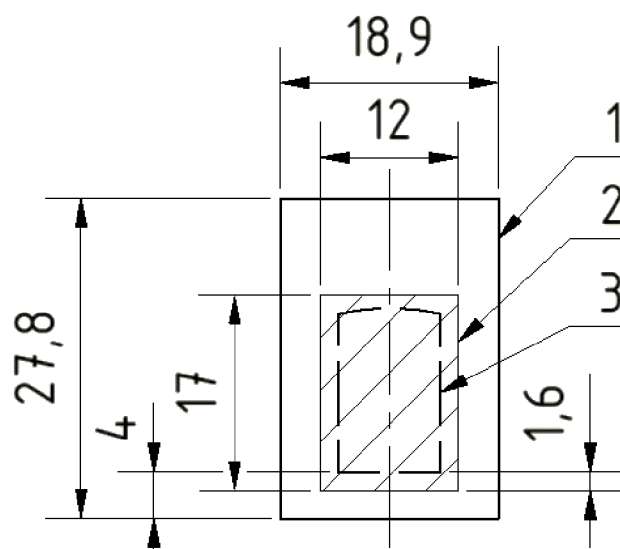
$$Ra = 43,9 \cdot \frac{f^{1,88}}{r_{\epsilon}^{0,97}} \quad (14)$$

$$Ra = 43,9 \cdot \frac{0,3^{1,88}}{1,2^{0,97}} \doteq 3,83 \mu m$$

Na součásti je stanovena požadovaná drsnost Ra 6,3. Předpokládaná teoretická drsnost je nižší, než je požadovaná proto lze tyto hodnoty posuvu se zvoleným poloměrem zaoblení špičky použít.

3.7.2 Výpočet technologických podmínek pro navařování

Pro úsporu materiálu na obrábění bude prvek výstupku na jedné straně navařen. Navařená oblast a její rozměry jsou na obrázku 17.



Legenda

1 – Polotovár

2 – Navařená oblast

3 – Obráběný prvek

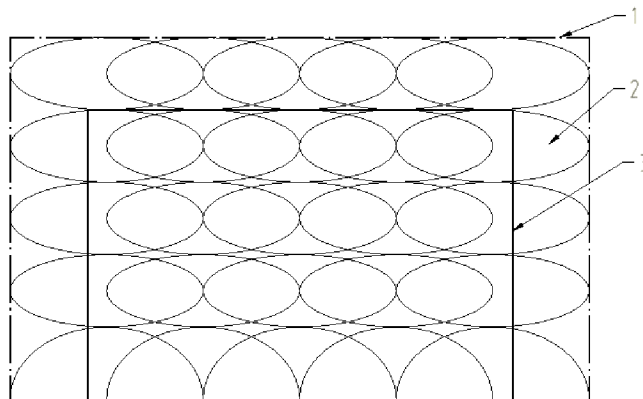
Obrázek 18 Navařená oblast.

Výška navařeného prvku je zvětšena o minimální přídavek y , který je 2 mm. Minimální výška navařeného prvku se pak určí podle vzorce 15.

$$h_p = G - B + y \quad (15)$$

$$h_p = 23,6 - 18,9 + 2 = 6,7 \text{ mm}$$

Pro navaření prvku budou použity housenky o šířce 4 mm a výšce 1,5 mm na délce 17 mm. Překrytí housenek bude polovina šířky. Pro navaření požadované šířky pak bude použito 5 housenek pro dosažení přídavku na obrábění po stranách který bude 1,6 mm. Pro zhotovení kompletního prvku pak budou potřeba 5 vrstev návaru. Celková výška pak bude 7,5 mm, která je větší než požadovaná minimální výška. Rozložení jednotlivých svarových vrstev je zobrazeno na obrázku číslo 19.



Legenda

1 – Navařená oblast

2 – Návarová housenka

3 – Výsledný obrys součásti

Obrázek 19 Rozložení svarových vrstev.

Pro kompletní navaření prvku bude nutné použít dvacet pět housenek o stanovených rozměrech. Jednotlivé housenky budou navařovány pouze jedním směrem, aby nedošlo k nadměrnému tepelnému ovlivnění součásti.

Pro zjednodušení výpočtu bude velikost housenky uvažována jako obdélník s využitím 88 %. Součinitel využití kovu bude uvažován 90 %. Délka housenky je pro výpočet uvažována jako 20 mm z důvodů přebytků na koncích. Množství prášku nutného pro výrobu jedné návarové housenky se pak určí podle vzorce 16.

$$m_{pp} = a \cdot b \cdot l \cdot \rho \cdot \mu \cdot 0,88 \quad (16)$$

$$m_{pp} = 1,5 \cdot 4 \cdot 20 \cdot 0,007850 \cdot 0,9 \cdot 0,88 \doteq 0,75 \text{ g}$$

Podle hmotnosti a výkonu navařování je možné určit rychlost posuvu laserové navařovací hlavy. Pro tuto práci je uvažován výkon navařování 5 g/min. Pro stanovení rychlosti navařovací hlavy je nutné nejprve určit dobu navařování jedné housenky při stanoveném výkonu. Doba navařování jedné návarové housenky se pak určí podle vzorce 17.

$$t_n = \frac{m_{pp}}{P_n} \quad (17)$$

$$t_n = \frac{0,75}{5} \doteq 0,15 \text{ min}$$

Podle doby navařování jedné návarové housenky je pak možné určit nutnou rychlost navařovací hlavy podle vzorce 18.

$$v_h = \frac{l}{t_n} \quad (18)$$

$$v_h = \frac{20}{0,15} \doteq 133,33 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$$

Celkové množství kovového prášku se pak určí podle vzorce 19.

$$m_{ppc} = m_{pp} \cdot n_h \quad (19)$$

$$m_{ppc} = 0,75 \cdot 25 \doteq 18,75 \text{ g}$$

Pro kompletní navaření oblasti bude nutné zajistit 18,75 g kovového prášku. Po navaření požadované oblasti bude nutné zajistit dostatečnou dobu chladnutí součásti. Pokud by byla součást ihned obráběna mohlo by dojít k nepřesné výrobě vlivem teplotní dilatace. Pokud by bylo použito nesousledné obrábění pro hrubovací operace, mohlo by také dojít k prasknutí součásti vlivem smrštění součásti v kombinaci s vysokou drsností povrchu.

3.7.3 Výpočet řezných podmínek pro frézování

Pro frézování jsou stejně jako pro soustružení hlavní parametry pro obrábění řezná rychlost a posuv nástroje.

Řezné rychlosti jsou určeny podle [31]. Pro zvolené nástroje jsou tyto hodnoty uvedeny v tabulce 7.

Tabulka 7 Teoretická řezná rychlost a počet zubů.

Nástroj	Teoretická řezná rychlost v_{ct}	Počet zubů z
Fréza Ø16	$185 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	4
Fréza Ø12	$185 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	4
Fréza na srážení hran	$320 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	6

Tyto hodnoty je nutné upravit podle korelačních součinitelů uvedených v tabulce 8.

Tabulka 8 Korelační součinitele pro frézování.

Druh součinitele	Označení	Popis	Zvolená hodnota
Pro obráběný materiál	K_{v1}	Frézování	1
Korekce pro použitý dřík	K_{vt}	Typ A; B	0,9; 0,7

Pro tuto práci jsou uvažovány pouze součinitele uvedené v tabulce 8. Ostatní součinitele jsou zanedbány. Pro korekci pro dřík jsou uvedeny dvě hodnoty. Menší hodnota 0,7 je pro frézu o průměru 12 mm a frézu na srážení hran.

Přepočítané hodnoty řezné rychlosti, posuvů a otáček jsou uvedeny v tabulce 9.

Tabulka 9 Přepočtená řezná rychlost.

Nástroj	Přepočtená řezná rychlost v_c	Otáčky n
Fréza Ø16	$166,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	3312 min^{-1}
Fréza Ø12	$129,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	3435 min^{-1}
Fréza na sražení hran	$224 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	6482 min^{-1}

Pro frézu na srážení hran bude obráběno průměrem 11 mm.

Vzorový výpočet pro frézu o průměr 12 mm

Přepočtená řezná rychlost se určí podle vzorce 20.

$$v_c = v_{ct} \cdot K_{v1} \cdot K_{vt} \quad (20)$$

$$v_c = 185 \cdot 1 \cdot 0,7 = 129,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$$

Podle řezné rychlosti lze pak určit otáčky vřetene podle vzorce 21.

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} \quad (21)$$

$$n = \frac{129,5 \cdot 1000}{\pi \cdot 12} \doteq 3435 \text{ min}^{-1}$$

Výpočet posuvové rychlosti

Pro dosažení optimálních podmínek obrábění je nutné dodržet vhodnou posuvovou rychlost pro zvolené nástroje. Posuvová rychlost je určena otáčkami, počtem zubů a velikostí posuvu na zub. Posuv na zub je pak určen podle velikosti nástroje, obráběného materiálu a šířky záběru. Hodnoty posuvové rychlosti jsou určeny v tabulce 10.

Tabulka 10 Hodnoty posuvové rychlosti.

Operace (průměr nástroje)	Šířka řezu a_e	Hodnota posuvu na zub f_z	Posuvová rychlost v_f
Zarovnání čela (16 mm)	8 mm	0,12 mm	1590 mm · min ⁻¹
Dokončení kontury navařeného prvku (12 mm)	0,5 mm	0,15 mm	2061 mm · min ⁻¹
Hrubování kruhového vybrání na boční straně (16 mm)	12 mm	0,11 mm	1457 mm · min ⁻¹
Sražení hran (fréza na srážení hran)	0,5 mm	0,15 mm	5834 mm · min ⁻¹

Vzorový výpočet pro operaci zarovnání čela pro nástroj o průměru 16 mm

Posuvová rychlost se určí podle vzorce 22.

$$v_f = n \cdot z \cdot f_z \quad (22)$$

$$v_f = 3312 \cdot 4 \cdot 0,12 \doteq 1590 \text{ mm}$$

V tabulce nejsou uvedeny veškeré obráběcí operace, ale pouze ty, které zastupují veškerou kombinaci šířky řezu a_e a použitého nástroje.

3.8 Volba stroje

Stroj je nutné volit podle funkce, výkonu, dosažitelných otáček. Pro tuto volbu je nutné provést jednotlivé výpočty pro získání nutných parametrů pro obrábění. Na základě těchto parametrů je nutné volit stroj který těchto parametrů dosahuje. Velikost příkonu stroje se volí podle požadovaného efektivního výkonu a účinnosti stroje.

Pro výrobu součásti budou použity tři stroje. Jeden typ pro soustružnické operace, druhý pro aditivní technologie a třetí pro frézovací operace.

3.8.1 Volba stroje pro soustružení

Pro tuto práci je uvažován NC soustruh. Ten bude využit pouze pro jednu operaci zarovnání čela. Díky tomu budou sníženy nutnosti nového upnutí při následných operacích.

Výpočet nutného příkonu stroje pro soustružení

Parametry nutné pro výpočet jsou uvedeny v tabulce 11. Tabulkové hodnoty jsou voleny podle [31].

Tabulka 11 Parametry pro výpočet příkonu při soustružení.

Parametr	Označení	Hodnota
Řezná rychlost	v_c	$290 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
Velikost záběrů	a_p	$1,5 \text{ mm}$
Posuv na otáčku	f	$0,3 \text{ mm}$
Obráběný průměr	D	$28,3 \text{ mm}$
Jednotková měrná řezná síla	k_{c1}	$1500 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$
Nárůst křivky	m_c	$0,21$
Úhel nastavení hlavního ostří	κ_r	95°

Objem odebraného materiálu se určí podle vzorce 23.

$$Q_s = v_c \cdot a_p \cdot f \cdot \left(1 - \frac{a_p}{D_c}\right) \quad (23)$$

$$Q_s = 290 \cdot 1,5 \cdot 0,3 \cdot \left(1 - \frac{1,5}{28,3}\right) \doteq 123,6 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$$

Šířka třísky se určí ze vzorce 24.

$$h = f \cdot \sin \kappa_r \quad (24)$$

$$h = 0,3 \cdot \sin 95^\circ \doteq 0,3 \text{ mm}$$

Měrná řezná síla se určí ze vzorce 25.

$$k_c = \frac{k_{c1}}{h^{m_c}} \quad (25)$$

$$k_c = \frac{1500}{0,3^{0,21}} \doteq 1931,5 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

Nutný efektivní výkon pro soustružení se určí ze vzorce 26.

$$P_{ef} = \frac{Q_s \cdot k_c}{60000} \quad (26)$$

$$P_{ef} = \frac{123,6 \cdot 1931,5}{60000} \doteq 3,74 \text{ kW}$$

Nutný příkon stroje se určí ze vzorce 27. Efektivnost stroje je uvažována 90 %.

$$P = \frac{P_{ef}}{\mu} \quad (27)$$

$$P = \frac{3,74}{0,9} \doteq 4,16 \text{ kW}$$

Zvolený soustruh

Pro požadované podmínky vyhovuje podle [32] stroj QT-Compact 100M od společnosti MAZAK. Jedná se o CNC soustruh s efektivním výkonem 5,5 kW a maximálními otáčkami 6000 min⁻¹. Pro soustružení jsou vypočteny maximální otáčky 3296 min⁻¹, požadovaný efektivní výkon 4,16 kW a řídicím systémem Siemens.

3.8.2 Volba stroje pro navařování

Z důvodů požadované přesnosti s navařovací hlavou bude použit manipulační robot. Pro přesné navaření je nutné na robota umístit měřící zařízení pro přesné zaznačení pozice součástí.

Pokud by nebyl použit způsob navařování kovového prášku bylo by možné použít hybridní obráběcí stroj. Jedná se o stroje kombinující jednotlivé technologie jako je například kombinace pětiosého frézování a aditivních technologií u stroje Weldprint MCW 5X.

3.8.3 Volba stroje pro frézování

Pro tuto práci je uvažováno CNC frézovací centrum. Protože je uvažováno pětiosé indexované obrábění pro výrobu součástí je nutné kromě parametrů výkonu stroje a dosahovaných otáček také zajistit, aby stroj umožňoval pětiosé indexované obrábění.

Výpočet nutného příkonu stroje pro frézování

Nejvyšší výkon je nutný pro hrubovací operace, proto pro výpočet nutného příkonu stroje pro frézování bude nutný příkon určen podle hrubovací frézy.

Parametry nutné pro výpočet jsou uvedeny v tabulce 12. Tabulkové hodnoty jsou voleny podle [31].

Tabulka 12 Parametry pro výpočet příkonu při frézování.

Parametr	Označení	Hodnota
Řezný průměr nástroje	D_c	16 mm
Posuvová rychlost	v_f	1590 mm · min ⁻¹
Posuv na zub	f_z	0,12 mm
Jednotková měrná řezná síla	K_{c1}	1500 N · mm ⁻²
Nárůst křivky	m_c	0,21
Maximální šířka řezu (Rohové frézování)	a_e	8 mm
Maximální hloubka řezu	a_p	8 mm

Maximální šířka a hloubka řezu je dána výrobcem nástroje a je stanovena jako polovina hodnoty řezného průměru nástroje pro rohové obrábění. Pro frézování drážek je možné využít celý průměr nástroje s hloubkou řezu, která se rovná polovině řezného průměru nástroje. Na vyráběné součásti ale nikdy nebude nástroj plně využit a hodnoty šířky a hloubky řezu budou menší. Pro zajištění dostatečného výkonu stroje bude výpočet požadovaného výkonu vypočten pro maximální zatížení nástroje pro hrubovací operace při rohovém obrábění.

Objem odebraného materiálu za jednotku času se určí ze vzorce 28.

$$Q_f = \frac{a_e \cdot a_p \cdot v_f}{1000} \quad (28)$$

$$Q_f = \frac{8 \cdot 8 \cdot 1590}{1000} \doteq 101,76 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$$

Pro určení řezné síly je nutné určit tloušťku třísky. Tato hodnota při frézování ovšem není konstantní a je proto pro výpočet nahrazena střední hodnotou tloušťky třísky. Přibližná střední hodnota tloušťky třísky se určí ze vzorce 29.

$$h_m \cong f_z \cdot \sqrt{\frac{a_e}{D_c}} \quad (29)$$

$$h_m = 0,12 \cdot \sqrt{\frac{8}{16}} \doteq 0,085 \text{ mm}$$

Měrná řezná síla se určí ze vzorce 30.

$$k_c = \frac{k_{c1.1}}{h_m m_c} \quad (30)$$

$$k_c = \frac{1500}{0,085^{0,21}} \doteq 2517,17 \text{ N/mm}^2$$

Nutný efektivní výkon pro frézování se určí ze vzorce 31.

$$P_{ef} = \frac{Q_f \cdot k_c}{60000} \quad (31)$$

$$P_{ef} = \frac{101,76 \cdot 2517,17}{60000} \doteq 4,27 \text{ kW}$$

Nutný příkon stroje se určí ze vzorce 32. Efektivnost stroje je uvažována 90 %.

$$P = \frac{P_{ef}}{\mu} \quad (32)$$

$$P = \frac{4,27}{0,9} \doteq 4,73 \text{ kW}$$

Zvolená frézka

Požadovaným parametrům vyhovuje podle [33] stroj CMX 50U od firmy DMG MORI. Jedná se o pětiosé frézovací centrum s efektivním výkonem 9 kW, dosahovanými otáčkami až 12 000 min⁻¹ a řídicím systémem Siemens.

Maximální otáčky použité při výrobě součásti jsou 6482 min⁻¹. Tyto otáčky jsou dosaženy při výrobě sražení na součásti. Maximální dovolené otáčky jsou dané použitým dříkem a pro tento nástroj jsou 15 000 min⁻¹. Stejný dřík je použit i pro dokončovací nástroj. Pro hrubovací nástroj jsou maximální dovolené otáčky 30 000 min⁻¹.

4 TVORBA NC PROGRAMŮ

Podle stanovených podmínek bude vytvořen NC program pro výrobu součásti. Pro tvorbu NC programů bude použit software PowerMILL 2020.

4.1 PowerMILL 2020

PowerMILL je software od společnosti Autodesk určený pro tvorbu programů pro různé strojírenské operace. Primárně je tento software určen pro tvorbu frézovacích strategií, ale je možné v něm vytvořit i programy pro jiné operace jako je programování robotů nebo aditivní technologie.

Pro obrábění PowerMILL obsahuje vysoké množství obráběcích strategií pro většinu využívaných způsobů frézování. V tomto softwaru je možné vytvářet programy pro číslicově řízené stroje od dvouosých obráběcích strategií až po kontinuální pětiosé obrábění. Software umožňuje také tvorbu programů pro soustružení.

Kromě části pro výrobu má tento software také část konstrukční. Ta je ovšem určena primárně pro úpravu a opravu modelů před obráběním nebo tvorbu prvků a křivek které slouží pro definici obráběného tvaru.

4.2 Postup výroby

Prvním krokem po uřezání tyče bude zarovnání jednoho čela pomocí soustružení. Tím bude získána dostatečná přesnost pro tvorbu základny pro následující operace.

Poté bude polotovár zarovnán na hranol čtvercového průřezu o délce strany 18,9 mm na frézovacím centru.

Na zarovnaný polotovár bude následně navařen prvek pomocí laserového navařování. Po tomto procesu bude nutné zajistit dostatečnou dobu chladnutí, aby byla zajištěna rozměrová přesnost pro frézovací operace vlivem tepelné dilatace.

Pro výsledné rozměry a tvar vyráběné součásti bude nejlepší využít pětiosé indexované frézování. Tento způsob obrábění funguje tak že součást je pomocí stroje ustavena do požadované polohy, kde následně probíhají obráběcí operace. Pro ustavení obrobku do požadované polohy slouží dva rotační pohyby. Jeden otáčí obrobek na pracovním stole kolem vertikální osy a druhý rotuje celým obráběcím stolem kolem horizontální osy. Díky těmto dvěma pohybům je možné ustavit obrobek do potřebných pozic pro obrábění.

Indexované obrábění v softwaru PowerMILL

V softwaru PowerMILL je příkaz pro otočení stolu vložen automaticky do NC programu po vytvoření libovolné obráběcí strategie v jiném souřadném systému než v tom, který je zvolen jako hlavní pro konkrétní program. Vyobrazení příkazu pro otočení stolu v NC kódu je na obrázku 19.

```
N139 S1500 M3
N140 ; =====
N141 CYCLE800(1,"STUL",0,57,0,0,0,90,0,-90,0,0,0,-1)
N142 COMPON
N143 $MA_COMPRESS_POS_TOL[X]=0.1
N144 $MA_COMPRESS_POS_TOL[Y]=0.1
```

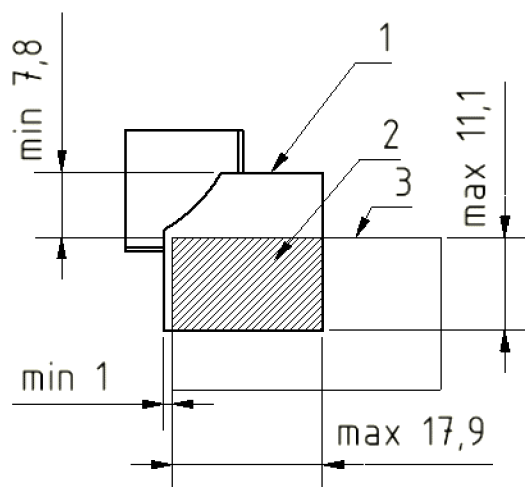
Obrázek 20 Příkaz pro otočení stolu v NC kódu.

4.3 Ustavení obrobku

Pro upnutí součásti na soustruhu bude použito čtyřčelistové sklíčidlo. Díky polotovaru vyráběného tažením zastudena jsou upínací plochy dostatečně přesné.

Pro navaření prvku pomocí aditivních technologií je možné použít stejný upínač obrobku jako pro frézovací operace.

Pro frézovací operace před navařením bude obrobek uchycen za co největší plochu pro zajištění dostatečné tuhosti. Pro frézovací operace po navaření bude obrobek uchycen tak aby bylo možné provést veškeré frézovací operace. Vyobrazení ustavení pro koncové frézování je na obrázku 20.



Legenda

- 1 – Výsledná součást
- 2 – Upínací plocha
- 3 – Čelisti upínače

Obrázek 21 Upnutí při koncovém frézování.

Jednotlivé NC kódy budou vytvářeny pro každé upnutí obrobku.

4.4 Parametry nástrojů v softwaru PowerMILL

Pro jednotlivé nástroje je možné vytvořit virtuální databázi kam jsou přeneseny veškeré nutné údaje jak pro řeznou část nástroje, tak pro další komponenty sestavy nástroje. Tyto hodnoty je pak možné vložit do jednotlivých obráběcích strategií podle použitého nástroje. Díky zadání kompletní sestavy nástroje je také možné provést kontroly kolizí, zda nedochází k bourání nástroje nebo držáku nástroje jak do obrobku, tak do stroje.

Upravit řezná data

Typ drah: Dokončení Operace: Základní

Vlastnosti nástroje

ID Nástroje: Freza 16 Rodina nástroje:

Průměr: 16,0 Počet břitů: 4

Vlastnosti Nástroje/Materiálu

Materiál polotovaru: Maximální šířka řezu 16 mm Maximální hloubka řezu 8 mm

Axiální hloubka řezu 8,0 mm Radiální hloubka řezuš 8,0 mm

Řezná rychlost 166,5 m/min Posuv/Zub 0,12 mm

Upravit Posuv/zub a Hloubku řezu v TDU

Řezné podmínky

Otáčky vřetene 3312,0 ot/min Maximální otáčky: Stroje: 12000 Nástroje: 15000 Posuvy 1590,0 mm/min

Zavřít

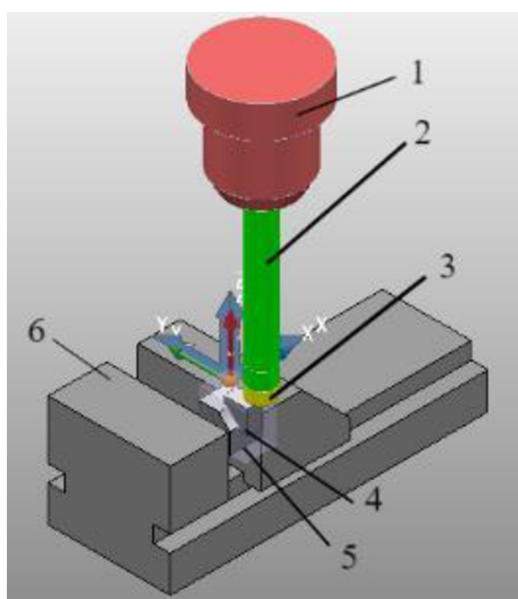
Obrázek 22 Tabulka řezných dat v softwaru PowerMILL pro frézovací nástroj.

Pro jednotlivé operace jsou však stanoveny rozdílné hodnoty posuvové rychlosti, proto je nutné hodnoty posuvové rychlosti zadat individuálně pro každou operaci.

4.5 Obráběcí soustava v softwaru PowerMILL

Do softwaru PowerMILL je možné importovat mimo obrobek také model upínače a model stroje. Tyto modely slouží pro ověření kolizí pro jednotlivé operace.

Pro tuto práci není dispozici model stroje, proto bude kontrola kolizí provedena pouze pro model a upínač. Kolize se strojem proto bude nutné zajistit intuitivně.



Legenda

- 1 – Držák nástroje
- 2 – Dřík nástroje
- 3 – Řezná část nástroje
- 4 – Obráběný model
- 5 – Polotovaz
- 6 - Svěrák

Obrázek 23 Obráběcí sestava pro dokončovací frézování.

Možné kolize

Pro soustružnické operace a aditivní technologie je velmi nepravděpodobné že by mohlo dojít ke kolizi. Pro frézovací operace jsou dvě možné kolize.

První je náraz nástrojové hlavy do upínacího stolu vlivem nízkého umístění obrobku nad upínacím stolem po otočení obrobku při indexovaném obrábění. Tento problém lze vyřešit vypodložením svěráku pro zvětšení vzdálenosti mezi upínacím stolem a obrobkem a tím získání dostatečné vzdálenosti při které nedojde ke kolizi. Velikost vypodložení by se určila podle velikosti nástrojové hlavy.

Druhá kolize je kolize upínače nástroje do svěráku z důvodů krátkého vyložení. Minimální délka, kterou je nutné zajistit je 127 mm. Délka dřívku pro frézu o průměru 12 mm a frézu na srážení hran je 150 mm. Dřív pro frézu o průměru 16 mm má délku 135 mm. Díky použití těchto dřívků je zajištěna dostatečná délka vyložení. Tato kolize by byla zjištělná i přímo v softwaru. Je ovšem nutné ji řešit ještě před započítáním tvorby NC programu, protože by bylo nutné při změně dřívku měnit řezné podmínky.

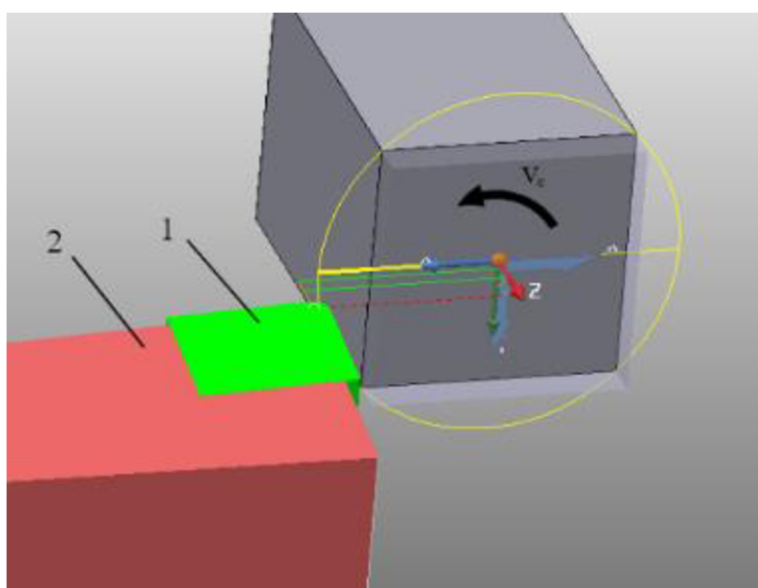
4.6 NC programy

Jednotlivé programy jsou vytvářeny pro jedno ustavení obrobku za použití zvolených nástrojů a vypočtených řezných podmínek. Celkem tak bude vytvořeno šest jednotlivých programů pro výrobu součástí.

4.6.1 NC program pro soustružení

Operace soustružení je použita pouze pro zarovnání čela. V softwaru PowerMILL pro tuto operaci bude použita obráběcí strategie hrubování čela. Tato strategie je použita proto že umožňuje tvorbu více než jednoho řezu. Smysl obrábění je volen jako negativní vzhledem k použitému nástroji. Způsob obrábění negativní znamená že směr posuvu nástroje je z největšího rozměru do nejmenšího rozměru.

Orientace obrobku je uzpůsobena tak jak je běžné pro soustružnické operace. Při tomto způsobu ustavení je osa Z osou rotace a osa X slouží pro stanovení průměru.



Legenda

Červená – Dráha rychloposuvu

Zelená -Dráha řezu

Žlutá – Obráběný průměr

1 – Řezný element

2 – Držák nástroje

Obrázek 24 Obráběcí dráha pro soustružení.

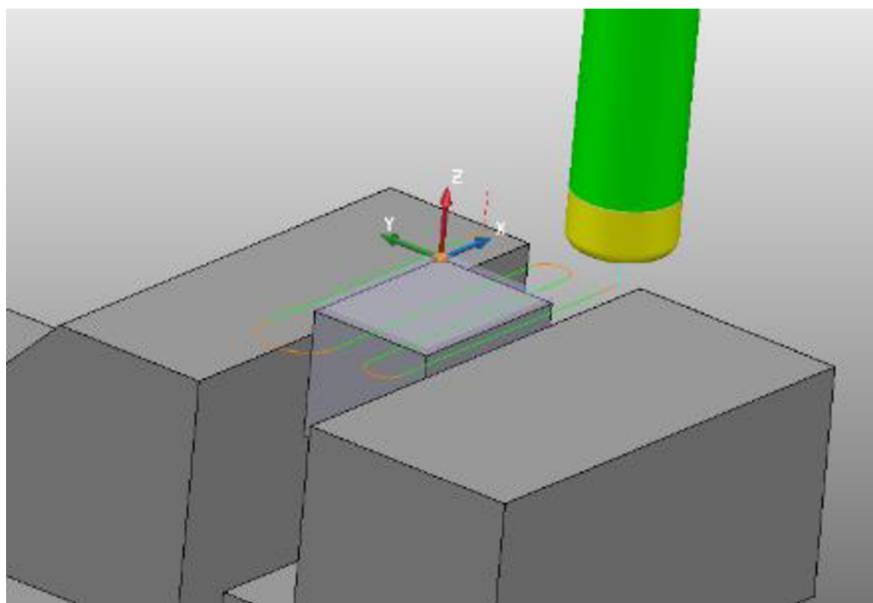
Protože tato operace je použita pro vytvoření rovny plochy pro odměřování při následném použití aditivních technologií není zde nezbytně nutné se zabývat výrobními tolerancemi součásti. Vzniklá drsnost by měla být zajištěna pomocí zvolených podmínek obrábění.

V této práci je vytvořen NC program pro zarovnání čela. V praxi by ovšem takto jednoduchá operace byla provedena zpravidla na konvekčním stroji ve skladu materiálu v rámci přípravy polotovaru.

4.6.2 NC program pro první zarovnání čelní plochy

Zarovnání čela pomocí frézování je použito pro vytvoření vnějšího tvaru obrobku. Pro tuto operaci je v softwaru PowerMILL přímo určena obráběcí strategie zarovnání čela. Protože je zde použita fréza o průměru 16 mm bude pro kompletní zarovnání nutné použít celkem čtyř přejezdů. Pro úsporu času je směr obrábění nastaven oboustranně a jednotlivé přejezdy mimo obrobek jsou pomocí kruhového napojení. Kruhové napojení zajišťuje plynulý pohyb nástroje.

Veškeré frézovací strategie mají nastaveny dráhy nájezdů tak velké, aby nedocházelo k zavrtávání nástrojů do materiálu při začátku obrábění. Dráhy přejezdů jsou nastaveny na 5 mm aby byl zajištěn dostatečný přechod přes obráběnou plochu.



Legenda

Červená –
Dráha
rychloposuvu

Zelená -
Dráha řezu

Oranžová –
Propojení
drah

Modrá –
Dráha sjezdu

Obrázek 25 Obráběcí dráha pro zarovnání čela.

4.6.3 NC program pro druhé zarovnání čelní plochy

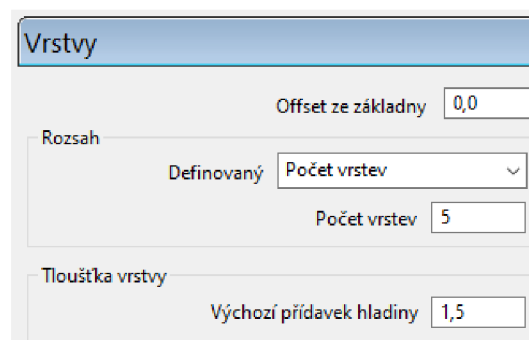
Pro druhé zarovnání čela jsou stejné podmínky jako pro první zarovnání čela. Oproti prvnímu zarovnání čela se liší v menší obráběné ploše a menším sevření čelistí. Z tohoto důvodu není nutné uvádět podrobný popis.

Jeden z těchto rozměrů ovšem již nebude obráběna a je dokončena. Z tohoto důvodu je nutné zajistit požadované výrobní tolerance alespoň na jednom z těchto rozměrů. Proto operace pro druhé zarovnání čela bude vytvořena na střed výrobní tolerance. Díky tomu že výrobní tolerance jsou stanoveny jako symetrické bude tato dráha vytvořena přímo na plochu modelu. Plochy modelu jsou vytvořeny přímo na střed tolerančního pole.

4.6.4 NC program pro navaření prvku

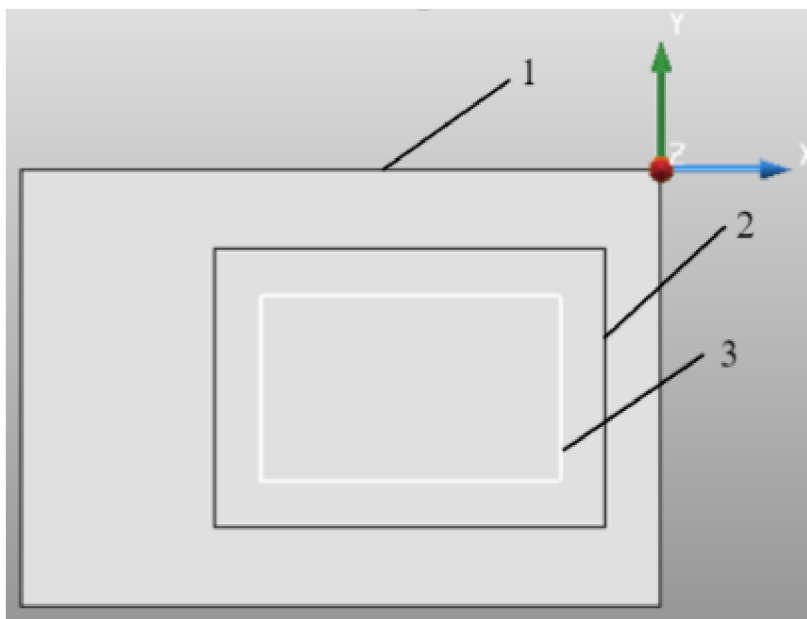
Pro tuto operace budou použity aditivní technologie. V softwaru PowerMILL jsou dostupné pod samostatným doplňkem softwaru. Jedná se o relativně novou funkci, která má stále své nedostatky.

V programu bude vytvořena operace pro navaření prvku o šířce 12 mm a délce 17 mm. Pro tuto operaci bude použita strategie označována jako tvarové nanesení. Tato strategie je určena pro tvorbu jedné nebo více vrstev. Proto aby tato strategie mohla být použita je nutné vytvořit oblast navaření a základní plochu na kterou bude navaření provedeno. Oblast navaření ovšem definuje krajní hodnoty pohybu elektrody a je proto nutné výslednou navařenou oblast zmenšit o polovinu průměru svaru, aby výsledná navařená oblast odpovídala požadovaným vzniklým rozměrům.



Obrázek 26 Parametry vrstev.

Protože se jedná o nový doplněk který neobsahuje veškeré navařovací technologie, je jej vhodné použít pouze pro ověření drah nástroje a výsledků návaru. Aby byl vytvořený NC program funkční je nutné jej přizpůsobit pro konkrétní technologii, použitý stroj a operační systém stroje.

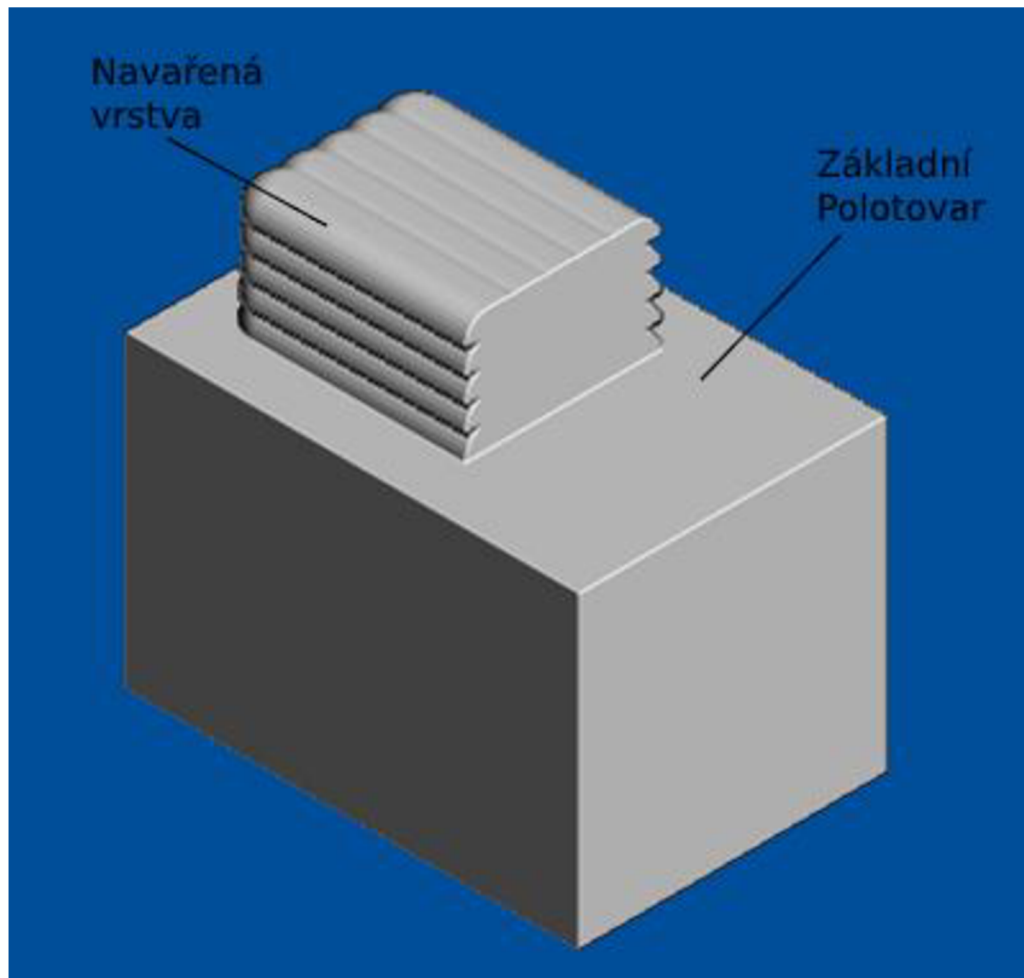


Legenda

- 1 – Hranice modelu
- 2 – Hranice navařeného prvku
- 3 – Hranice pohybu elektrody

Obrázek 27 Hranice pro navaření.

Souřadný systém by měl být při procesu navařování umístěn tak že osa x je normálou plochy vzniklé soustružením, aby byla zajištěna požadovaná přesnost ploch použitých pro tuto operaci. Protilehlá strana byla pouze uříznuta a pokud by byla použita pro odměřování mohlo by dojít k chybnému zaznačení polohy obrobku.



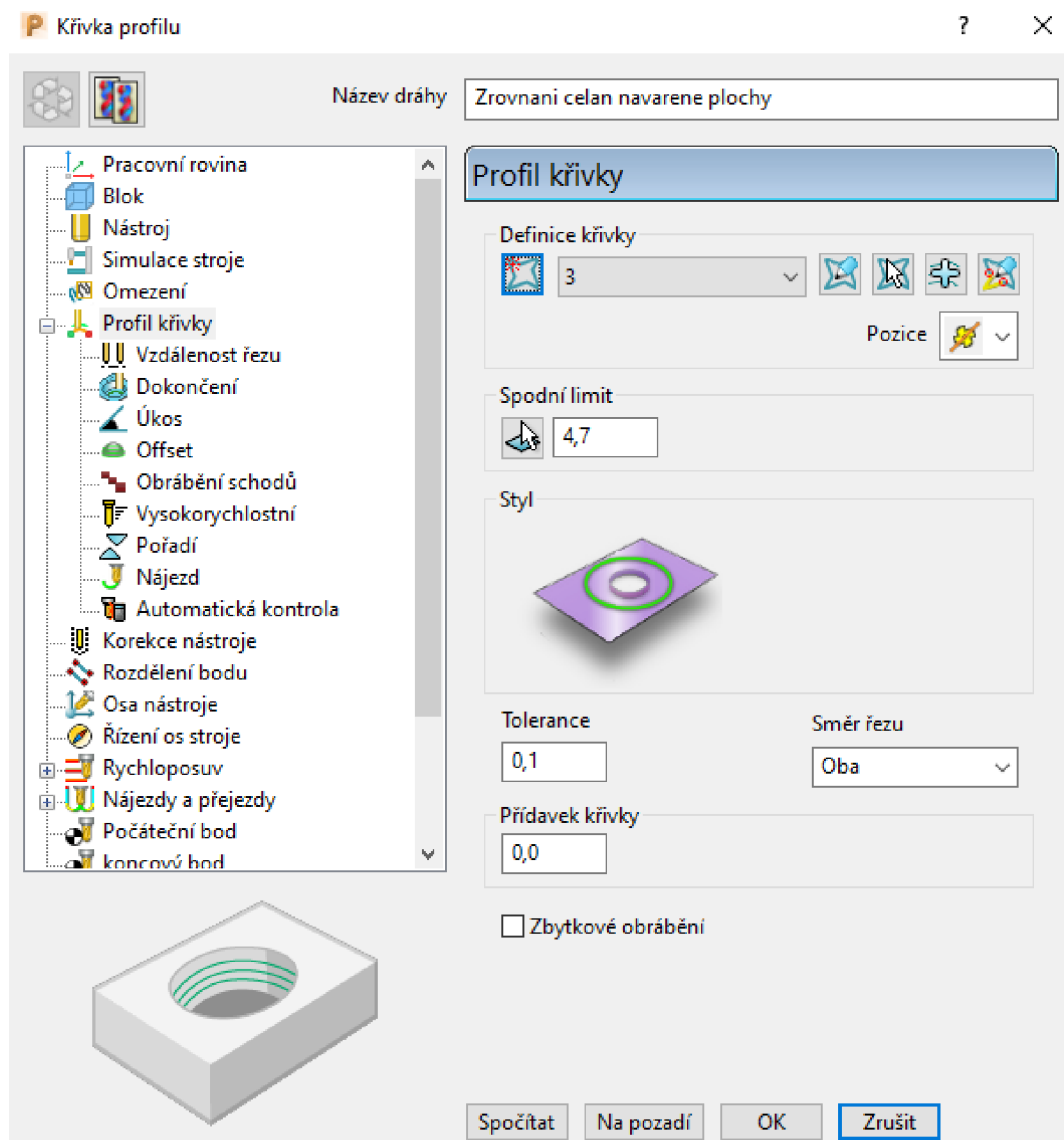
Obrázek 28 Výsledek simulace navařených vrstev.

Na obrázku 28 jsou po provedení simulace jednotlivé housenky vyobrazeny s jednou stranou rovnou, kolmou na základní plochu, na které jsou návary provedeny. V praxi není možné takový tvar vytvořit a jedná se pouze o chybu vyobrazení v softwaru.

4.6.5 NC program pro dokončovací frézování

Protože se jedná o jednoduchou součást, na které se nenachází tvarově složité prvky a veškeré sousedící plochy jsou na sebe kolmé je možné použít strategie určené k obrábění po křivce. Tyto obráběcí strategie požadují jako vstup pro obrábění křivky, které lze snadno získat z hranic jednotlivých ploch modelu. Pro zarovnání boční stěny polotovaru bude použita strategie zarovnání čela stejně jako v předchozích případech zarovnání čela.

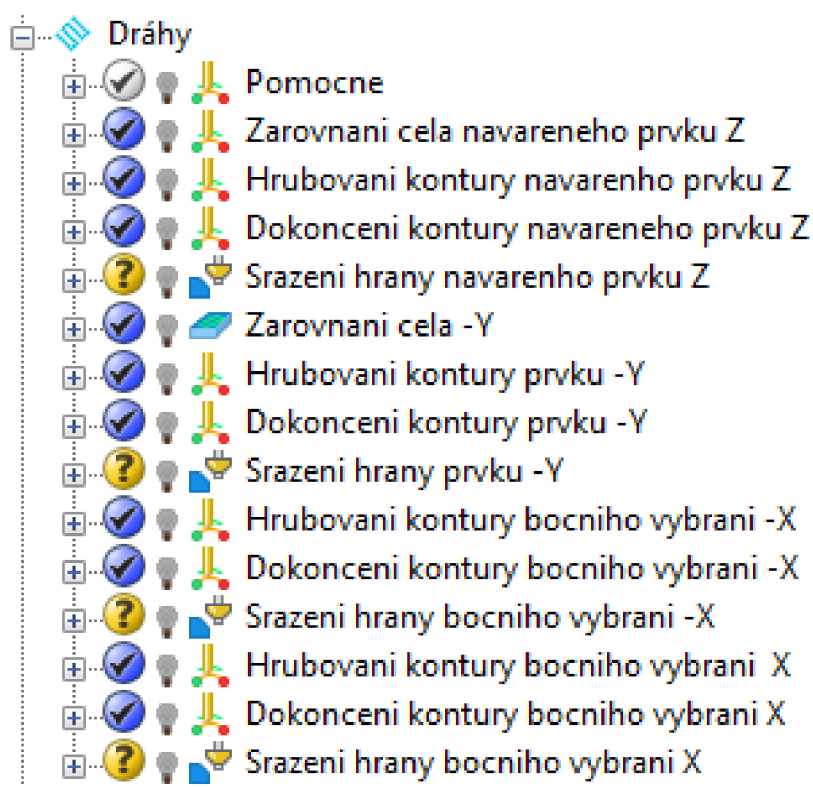
Pro zarovnání čela navařené plochy bude použita stejná strategie jako pro výrobu kontur ostatních ploch. Aby tato strategie fungovala správně je zde ovšem nutné ji upravit tak že obráběná křivka neslouží jako obráběná kontura, ale jako křivka, po které se má pohybovat střed nástroje.



Obrázek 29 Tabulka pro zadání parametrů pro strategii 2D profilování.

Na celé součásti jsou pouze dva rozměry, které nemají symetrické tolerance. Obráběný model je ovšem vytvořen na střed tolerančního pole a díky tomu je možné veškeré obráběcí operace vytvořit přímo na plochy modelu.

Součástí softwaru PowerMILL je také kontrola kolizí pro jednotlivé obráběcí strategie. Obráběcí strategie, které nejsou kolizní jsou označeny potvrzujícím symbolem. Pokud je vytvořena kompletní sestava nástroje a je pro ni ověřena kolize je pole s potvrzujícím symbolem v modrém poli. Pokud by u dráhy nastala kolize byla by označena vykřičníkem v červeném poli. Pro dráhy, které jsou označeny otazníkem ve žlutém poli není kontrola kolizí provedena. Toto označení je pro veškeré strategie sražení hrany. Pro tyto strategie není možné provést kontrolu kolizních stavů z důvodu, že na modelu nejsou vytvořeny sražení. Pokud by zde byla provedena kontrola kolizí, byla by zde hlášena kolize bourání s modelem.



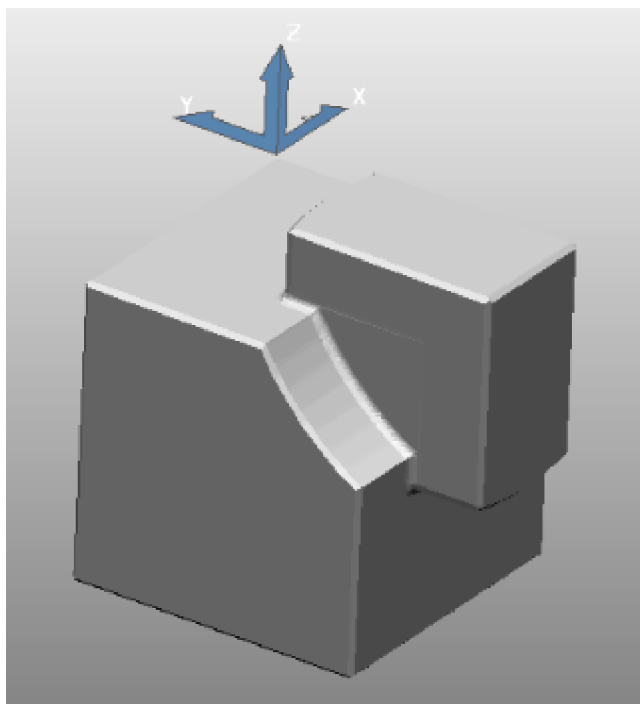
Obrázek 30 Kontrola drah na kolize pro dokončovací obrábění.

V seznamu obráběcích drah je dráha označena jako Pomocne. Tato dráha je vytvořena jako pomocná a byla vytvořena z důvodů chybového hlášení při pokusu importu polotovaru z externího souboru. Proto byla vytvořena tato dráha, aby bylo možné provést kompletní vizuální kontrolu v simulaci obrábění. Tato dráha ovšem není součástí výstupního NC programu.

4.6.6 NC program pro sražení hran

Posledním krokem pro obráběcí operace je sražení hran. Tato operace je nutná, aby při následném používání nedošlo k poranění vlivem ostrých hran a rohů. Sražení hran je také součástí programu dokončení. Pokud by při tomto upnutí nebylo provedeno sražení dostupných hran bylo by nutné součást znovu upínat.

Vytvořené sražení bude pod úhlem 45° a velikosti 0,3 mm. Úhel sražení je dán tvarem použitého nástroje. Pro tyto strategie je v softwaru PowerMILL dostupná strategie frézování sražení. Stejně jako v předchozích případech se jedná o strategii, kde je dráha nástroje definována pomocí křivky vytvořené z modelu.



Obrázek 31 Výsledná obrobená součást.

4.7 Generování NC kódu

Jednotlivé NC kódy je nutné vytvořit pro jednotlivé upnutí obrobku. Celkem tak bude pro výrobu kompletního dílu vytvořeno šest NC kódů.

Pro generování NC kódu slouží funkce postprocesoru, která převádí vytvořené obráběcí strategie do NC kódu, který je určen pro konkrétní ovládací systém stroje. V této práci není k dispozici postprocesor pro navržené obráběcí stroje a jednotlivé kódy budou proto generovány pomocí školního postprocesoru který je určen pro ovládací systém Sinumerik.

Pro operaci soustružení ale není možné vygenerovat NC kód, a to proto že není k dispozici postprocesor pro tvorbu toho programu.

```
N27 CYCLE800(1,"STUL",0,57,0.,0.,0.,0.,0.,0.,0,0,0,-1)
N28 COMPON
N29 $MA_COMPRESS_POS_TOL[X]=0.1; Tolerance stroje v ose X
N30 $MA_COMPRESS_POS_TOL[Y]=0.1; Tolerance stroje v ose Y
N31 $MA_COMPRESS_POS_TOL[Z]=0.1; Tolerance stroje v ose Z
N32 odjezd_Z ; MAKRO; Příkaz nutný pro tvorbu NC kódu
N33 M8; M-Pomocná funkce, M8-Spuštění/vypnutí chlazení
N34 G0 X-9.451 Y-34.25 F=R3; G-Hlavní funkce, G0-Přejezd po přímce rychloposuvem
N35 G0 Z12.5
N36 G0 Z7.5 F=R3
N37 G1 Z4.55 F=R1; G1-Pracovní přejezd po přímce
N38 Y-25.25 F=R2
N39 Y-8.25
N40 Y-3.25
N41 G0 Z12.5 F=R3
```

Obrázek 32 Ukázka vygenerovaného NC kódu.

4.8 Následující operace

Pro mnoho součástí je nutné provést další technologické operace. Cíle těchto operací může být vizuální nebo technologická stránka součásti.

Za technologické operace považujeme takové následující operace, které mají za cíl změnit klíčové vlastnosti součástí podle jejich specifického účelu. Může se jednat například o operace jako je povlakování, kde jsou na součást vytvořeny vrstvy ze specifických materiálů pro dosažení výrazně vhodnějších vlastností povrchové vrstvy součásti. Druhy povlaků stejně jako jejich složení a tloušťka se odvíjí od účelu a použití součásti.

Operace určené pro úpravu vizualizací součástí jsou především z důvodů propagace a prodeje předmětu nebo jako ochrana proti atmosférickým vlivům. Často je zde primárně cílem přiřadit vhodné barevné pokrytí.

Následující operace použité pro vyráběnou součást

Pro vyráběnou součást bude nutné použít jak technologické, tak vizuální operace.

Odjehlení

Jednou z navazujících operací je samotné odjehlení součástí od třísek, které ulpěli na součásti. Tato činnost by ovšem měla být provedena po každé obráběcí operaci, aby třísky, které ulpěli na součásti nezapříčinily chybné upnutí součásti nebo poranění obsluhy při manipulaci se součásti.

Povrchová vizualizace

Vyráběná součást je jak vizuální, tak je nezbytné zajistit barevné rozlišení dvou ploch pro správné fungování součásti. Proto je nutné zajistit povrchovou vizualizaci.

Prvním krokem by bylo vytvoření černého zabarvení pomocí vhodného způsobu lakování. Tato vrstva laku by měla mít jak nezbytné vlastnosti pro dostatečnou přilnavost k povrchu, tak by také bylo vhodné, aby zakryla stopy po obrábění jednotlivých ploch.

Po nanesení vrstvy laku je nutné provést barevné rozlišení dvou ploch, aby bylo možné vyráběnou součást použít. Toto barevné rozlišení by mohlo být řešeno stejně jako na původní součásti, a to pomocí nalepení barevných štítků.

Kontrolní operace

Tyto operace je nutné stejně jako odjehlení provést po všech obráběcích operacích. Protože výrobní tolerance jsou stanoveny s velikostí 0,3 mm, je možné na součásti veškeré rozměry měřit pomocí běžného posuvného měřítka.

Jako kontrolní operace pro povrchovou vizualizaci je dostačující vizuální kontrola pomocí kontrolního pracovníka bez speciálních měřidel.

5 TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Výroba součásti je uvažována jako výroba náhradního dílu. Z toho důvodu je hlavní parametr výroby výrobní čas. Ten musí být minimalizován, aby bylo možné původní součást co nejrychleji nahradit. Pro jednotlivé operační činnosti je výrobní čas uveden v tabulce 12.

Tabulka 12 Výrobní časy.

Úsek (Technologie)	Doba činnosti
Zarovnání čela (Soustružení)	3 s
Zarovnání čelní plochy (Frézování)	10 s
Zarovnání čelní plochy (Frézování)	10 s
Navaření prvku (Navařování)	64 s
Dokončení (Frézování)	64 s
Sražení hran (Frézování)	5 s
Výměna nástrojů (Frézování)	112 s
Upnutí součásti a odepnutí	720 s
Doba chladnutí po navaření	1800 s
Kontrolní operace	900 s
Povrchová úprava součásti	1500 s
Celkem	1h 26 min 28 s

Přepokládána doba pro výměnu nástrojů je 8 s, celkem bude provedeno 14 výměn nástroje. Doba nutná pro upnutí a odepnutí součásti je uvažována 3 min. Celkem bude nutné provést čtyři upnutí a odepnutí součásti.

V tabulce není stanovena doba nutná pro přesun součásti na další pracoviště a doba prodlevy před výrobou součásti. Tuto dobu není možné stanovit, protože se vyrábí pouze jeden díl a výroba součásti bude provedena až bude stroj volný.

Celkový čas pro výrobní operace se pak určí ze vzorce 33. Protože není možné uvažovat plné využití času je zde uvažován součinitel využití času 80 %.

$$t_c = \frac{\sum_{i=1}^n t_{vi}}{\mu_t} \quad (33)$$

$$t_c = \frac{3 + 10 + 10 + 64 + 64 + 5 + 112 + 720 + 1800 + 900 + 1500}{0,8} =$$
$$= 6485 \text{ s} = 1 \text{ h } 48 \text{ min } 5 \text{ s}$$

Nutný čas pro výrobu součásti je pak 1 h 48 min 5 s. Pokud uvažujeme že běžná pracovní směna je 8 hodin je možné součást vyrobít za jednu směnu.

Pro snížení výrobních časů byl využit způsob výroby pomocí indexovaného obrábění. Díky tomuto způsobu obrábění byl snížen nutný počet upnutí součásti. Pokud by součást byla vyráběna na stroji, který zvolený způsob obrábění neumožňuje bylo by pro výrobu nutné součást upnout celkem osmkrát. Tím by došlo ke značnému zvýšení výrobních časů a také je zde zvýšené riziko chybného upnutí součásti. Díky indexovanému obrábění byl ovšem tento počet snížen na polovinu. Pokud by součást byla vyráběna na běžném konvenčním stroji byl by čas nutný pro výrobu součásti navýšen o 11 %.

ZÁVĚR

Tato práce se zabývá aplikací CAD/CAM softwaru PowerMILL 2020 při reverzním inženýrství.

V první kapitole je představena součást použitá jako vzorová pro tuto práci. Dále je zde popsáno reverzní inženýrství a popsány technologie použité pro výrobu vzorové součásti.

V druhé kapitole jsou popsány kroky nutné k vytvoření modelu. V kapitole je popsáno použité měřidlo a vyhodnocení naměřených hodnot. Z těchto naměřených hodnot jsou následně navrženy jmenovité hodnoty jednotlivých rozměrů, pro které jsou navrženy výrobní tolerance podle požadované funkce součásti. Naměřené hodnoty jsou následně použity pro tvorbu grafických 3D modelů. Celkem jsou vytvořeny dva modely. Jeden pro tvorbu výkresové dokumentace, který je vytvořen na jmenovitou hodnotu, a druhý který je použit pro tvorbu obráběcích strategií, kde jsou jednotlivé tolerance vytvořeny na střed tolerančního pole. Vytvořený výkres je určen pro kontrolu součásti po výrobě.

Ve třetí kapitole je provedena technologická příprava výroby. Je zde provedeno posouzení technologičnosti, podle kterého jsou zvoleny výrobní technologie, základní polotovar a přídavný materiál. Technologie zvolené pro výrobu jsou soustružení, aditivní výroba a pětiosé indexované frézování. Jako výchozí polotovar je použitý hutní polotovar s označením 4HR 20 h11 – ČSN 42 6520.12 – 11 373. Přídavný materiál pro technologii aditivní výroby byl zvolen kovový prášek stejného složení obohacený o 2 % manganu. Délka výchozího polotovaru byla stanovena na hodnotě 31_0^{+1} mm.

Pro jednotlivé technologie a obráběný materiál jsou navrženy nástroje. Pro soustružení je použit jeden nástroj s označením CNMG120412 – RP7. Pro uchycení nástroje slouží držák s označením PCLNR/L2020K12. Pro zvolený nástroj jsou vypočteny technologické podmínky. Podle vypočtených technologických podmínek je volen zvolen stroj, který dosahuje požadovaných vypočtených požadovaných výkonů 3,74 kW a požadovaných otáček $3\ 262\ \text{min}^{-1}$. Jedná se o CNC soustruh QT-Compact 100M od společnosti MAZAK s výkonem 5,5 kW, dosahovanými otáčkami $6\ 000\ \text{min}^{-1}$ a řídicím systémem Siemens.

Pro aditivní výrobu je volena technologie navařování kovového prášku pomocí laseru za použití laserové navařovací hlavy s kruhovým pracovním bodem. Navařená oblast má délku 17 mm, šířku 12 mm a výšku 7,5 mm. Pro navaření tohoto prvku je použito pět návarových vrstev po pěti návarových housenkách o šířce 4 mm s překrytím 50 % a s přídavkem na vrstvě 1,5 mm.

Pro frézovací operace jsou voleny pouze tři nástroje pro snížení výrobních nákladů z důvodů nízké výrobní série. Práce je uvažována jako výroba náhradního dílce, a proto je zde velikost série stanovena pouze na jednom kusu. Zvolené nástroje jsou výměnné frézovací hlavice o průměru 16 mm pro hrubovací operace, o průměru 12 mm pro dokončovací operace a frézovací hlavice na srážení hran s vrcholovým úhlem 90° . Pro volbu stroje byl pro výpočet požadovaného výkonu uvažováno maximální zatížení hrubovacího nástroje. Pro tyto podmínky byl nutný požadovaný výkon 4,27 kW. Maximální otáčky pro frézovací operace jsou $6482\ \text{min}^{-1}$. Podle těchto podmínek byl zvolen vyhovující stroj CNC obráběcí centrum CMX 50U od firmy DMG MORI s řezným výkonem 9 kW, dosahovanými otáčkami $12\ 000\ \text{min}^{-1}$ a řídicím systémem Siemens

Ve čtvrté kapitole je představen použitý software PowerMILL 2020. Je zde zobrazena obráběcí sestava v prostředí softwaru PowerMILL 2020. Také jsou zde popsány řešení problémů při obrábění jako je riziko nárazu frézovací hlavy do stolu stroje, kterému je zabráněno vypodložením upínače, a nárazu upínače nástroje do upínače obrobku, kterému je zamezeno použitím dostatečně dlouhého dřívku nástroje.

Dále se tato kapitola zabývá tvorbou NC programů pro zvolené technologie. Pro technologii soustružení je použita strategie hrubování čela, protože umožňuje nastavení více přejezdů. Pro aditivní technologie je použita strategie tvarového nanesení, která umožňuje tvorbu navaření prvku na plochu, která nemusí být rovinná. Pro frézovací operace jsou použity strategie pro zarovnání čela, strategie konturování a sražení hran určené pro obrábění podle křivky. Pro jednotlivé strategie je také provedena kontrola kolizí. Z vytvořených strategií jsou vytvořeny jednotlivé NC kódy, mimo operaci soustružení čela, ke které není dostupný postprocessor.

V páté kapitole je provedeno technicko-ekonomické zhodnocení, kde je proveden výpočet na dobu nutnou pro výrobu součásti. Ta je 1 h 48 min 5 s, díky tomu je možné součást vyrobit za jednu směnu a provést co nejrychlejší výměnu poškozené součásti. Díky pětiosému indexovanému obrábění je také snížen čas na upnutí součásti a je sníženo riziko chybného obrobku vlivem špatného upnutí součásti. Pokud by byla součást vyráběna na konvenčním stroji celkový čas na výrobu součásti by byl navýšen o 11 %.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] WHAT IS REVERSE ENGINEERING? *PHYSICALDIGITAL* [online]. New York, 2019, 31.1.2019 [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: <https://physicaldigital.com/what-is-reverse-engineering/>
- [2] Kumar, Atul & Jain, P. & Pathak, Pushparaj. (2013). Reverse Engineering in Product Manufacturing: An Overview. 10.2507/daaam.scibook.2013.39.
- [3] García, M.J., Boulanger, P. & Henao, M. Structural optimization of as-built parts using reverse engineering and evolution strategies. *Struct Multidisc Optim* 35, 541–550 (2008). <https://doi.org/10.1007/s00158-007-0122-6>
- [4] HNÁTŇÍK, Jan. *Reverzní inženýrství a DP*. Plzeň: SmartMotion 2012. ISBN 978-80-87539-16-3.
- [5] PROKOPEC, Petr. Nejdrzejší čínské kopie aut posledních let: vykrádá se dál vše od Audi po Rolls-Royce. *Autoforum.cz* [online]. 2017, 24.9.2017, , 1 [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: <https://www.autoforum.cz/zajimavosti/nejdrzejsi-cinske-kopie-aut-poslednich-let-vykrada-se-dal-vse-od-audi-po-rolls-royce/>
- [6] FOLPRECHT, Radek. Nechtěl, ale musel. Jak Tupolev kopíroval americký super bombardér B-29. *IDnes.cz* [online]. 2019, 5.6.2019, **2019**, 1 [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/technet/vojenstvi/tupolev-tu-4-kopie-boeing-b-29-superfortress.A190503_125043_vojenstvi_erp
- [7] Boeing B-29 Superfortress. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2020, 29. 2. 2020 [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Boeing_B-29_Superfortress
- [8] Tupolev Tu-4. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2020 [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Tupolev_Tu-4
- [9] HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. *Strojírenská technologie 1*. Ve Scientii 2., opr. vyd., dot. Praha: Scientia, 1999, **Díl 1, Nauka o materiálu**. ISBN 80-7183-150-6.
- [10] *Soustružení* [online]. Praha, 2013 [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: <https://www.spszengrova.cz/texty/texty/ZAV/ZAV2-Soustru%C5%BEen%C3%AD-UT.pdf>. Učební text. Vedoucí práce M. Geistová.
- [11] *Soustružení* [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <http://www.elitalycea.wz.cz/files/tep/tep17.pdf>. Učební text. Vedoucí práce Ing. Bohuslav Driml.

- [12] Nástroje pro vnější soustružení. *SANDVIK Coromant* [online]. Praha: SANDVIK CZ, 2020 [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/coroturn_prime/Pages/default.aspx
- [13] Frézování. *Investice do rozvoje vzdělání* [online]. Praha, 9.3.2013 [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: https://www.spszengrova.cz/texty/texty/STT/STT2-10_Frezovani_RAJ.pdf
- [14] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_001/Technologie%20obrabeni.pdf. Studijní texty. VYSOKÁ ŠKOLA BĀŇSKĀ.
- [15] VAŇÁK, Antonín. *Technologie frézování* [online]. Šumperk, 2007 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: http://www.sszs.cz/stary_web/stary_web/esf/TEC_fr.pdf. Pracovní listy. Střední odborná škola a Střední odborné učiliště.
- [16] MMspektrum: Nesousledné frézování. *Trendy* [online]. 2014, 11.06.2014, , 1 [cit. 2020-06-05]. DOI: 140628. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nesousledne-frezovani.html>
- [17] Dráha nástroje a utváření třísek při frézování. *SANDVIK Coromant* [online]. Praha: Sandvik CZ [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/pages/cutter-path-and-chip-formation.aspx>
- [18] *Robotické navařování metodou WAAM jako alternativa k 3D tisku kovových materiálů* [online]. Praha, 2016 [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: http://esab.cz.uvirt66.active24.cz/images/PDF-prednasky/14_Roboticke-navarovani-metodou-WAAM-alternativa-3D.pdf. Odborný článek. ČVUT.
- [19] Přehled technologií 3D tisku. *Dk metal prominent s.r.o* [online]. Nový Jičín, 2018, 09.01.2018 [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/Prehled-technologie-3D-tisku>
- [20] DEREKAR, Karan, Jonathan LAWRENCE, Geoff MELTON, Adrian ADDISON, Xiang ZHANG a Lei XU. Influence of Interpass Temperature on Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) of Aluminium Alloy Components. *MATEC* [online]. UK, 2019, , 6 [cit. 2020-06-05]. DOI: 05001. Dostupné z: https://www.mateconferences.org/articles/mateconf/pdf/2019/18/mateconf_iiw18_05001.pdf
- [21] Rovnoměrné a normální rozložení četnosti. *Matematika.cz* [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://matematika.cz/rovnomerne-normalni-rozlozeni>
- [22] ŠTRONER, Martin. *3D skenovací systémy*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2013. ISBN 978-80-01-05371-3.
- [23] Testy normality. *WikiSkripta* [online]. 27. 3. 2017 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Testy_normality

[24] JAN, Leinveber a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky*. Páté. Praha: Albra, 2017.

[25] MAREK, Jiří. Laser je skvělý pomocník pro kalení, navařování a svařování. *Technický týdeník* [online]. 19.8.2015, 1 [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/>

[laser-je-skvely-pomocnik-pro-kaleni-navarovani-a-svarovani_31927.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/laser-je-skvely-pomocnik-pro-kaleni-navarovani-a-svarovani_31927.html)

[26] ROSENBERG, Pavel. *Metody svařování legovaných ocelí*. Brno, 2008. Bakalářská práce. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Vlastimil Chrást, CSc.

[27] AUBRECHT, Miroslav. *Racionalizace technologie výroby vzorové součásti*. Plzeň, 2013. Bakalářská práce. Západočeská Univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Jan Hnátík, Ph.D.

[28] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. Praha: Grada Publishing, 2018. ISBN 978-80-271-0614-1.

[29] LASEROVÉ HLAVY. *LaserTherm: Lasery pro průmyslové technologie* [online]. Praha, 2019 [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <http://www.lasertherm.cz/produkty/laserove-hlavy>

[30] *Příručka obrábění: Kniha pro praktiky*. 1. Praha: Scientia, 1997. ISBN 91-97 22 99-4-6.

[31] WALTER. *Kompletní katalog*. Praha: WALTER, 2017.

[32] QT-COMPACT 100M. *Mazak* [online]. Mazak, 2015 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.mazakeu.cz/cs/machines/qt-compact-100/>

[33] CMX 50 U. *DMG Mori* [online]. Praha: DMG Mori, 2020, 2020 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/frezovani/petiose-frezovani/cm-x-u/cm-x-50-u>

[34] Precizní strojní svěrák pro strojní obrábění a CNC, typ 7, šířka čelistí 80 mm. *Prima dílna* [online]. Praha, 2020 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: https://www.primadilna.cz/Precizni-srojni-sverak-pro-strojni-obrabeni-a-CNC-typ-7-sirka-celisti-80-mm-d9096.htm?gclid=EAIaIQobChMIoqbj7oKJ6gIVgsqyCh0IAw89EAQYAyABEgLopvD_BwE

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Popis
Al ₂ O ₃	Řezná keramika
BJ	Binder Jetting
C	Uhlík
CAD	Počítačová podpora konstruování
CAM	Počítačová podpora výroby
CARE	Počítačem podporované reverzní inženýrství
CNC	Počítačem číslicově řízené
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
FDM	Fusee depositing modeling
KBN	Kubický nitrid bóru
MAG	Svařování v aktivní ochranné atmosféře tavnou elektrodou
MIG	Svařování v inertní ochranné atmosféře tavnou elektrodou
N	Dusík
NC	Číslicově řízené
P	Fosfor
PD	Polykrystalický diamant
RO	Rychlořezná ocel
S	Síra
Si ₃ N ₄	Řezná keramika
SK	Slinutý karbid
SLA	Stereo litografie
SLS	Selektivní spékání laserem
TIG	Svařování v inertní ochranné atmosféře netavnou wolframovou elektrodou
WAAM	Metoda navařování elektrickým obloukem

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotka	Popis
A ₁₀	[%]	Tažnosti pro 10 %
a	[mm]	Výška návaru
a _e	[mm]	Šířka třísky
a _p	[mm]	Hloubka třísky
a _s	[mm]	Délka strany polotovaru
b	[mm]	Šířka návaru
DMR	[mm]	Dolní mezní rozměr
D _p	[mm]	Obráběný průměr polotovaru
D _ú	[mm]	Dolní úchylka
F	[N]	Síla
f	[mm]	Posuv
f _z	[mm]	Posuv na zub

HMR	[mm]	Horní mezní rozměr
H_u	[mm]	Horní úchylka
h	[mm]	Šířka třísky
h_m	[mm]	Střední šířka třísky
h_{max}	[mm]	Maximální šířka třísky
h_p	[mm]	Výška navařeného prvku
JR	[mm]	Jmenovitý rozměr
K_{v1}	[-]	Opravný součinitel pro druh obrábění
K_{vT}	[-]	Opravný součinitel pro použitý dřík
k	[-]	Koeficient rozšíření nejistoty
k_c	[N]	Měrná řezná síla
k_{c1}	[N]	Jednotková měrná řezná síla
l	[mm]	Délka návaru
l_p	[mm]	Délka polotovaru
m_c	[-]	Nárůst křivky
m_{pp}	[g]	Množství prášku pro návarovou housenku
m_{ppc}	[g]	Celkové množství kovového prášku
n	$[\text{min}^{-1}]$	Otáčky
n_h	[ks]	Počet návarových housenek
n_m	[-]	Počet měření
P	[mm]	Příkon
P_n	$[\text{g} \cdot \text{min}^{-1}]$	Výkon navařování
p	[mm]	Přídavek na délce pro obrábění na čele
p_{ef}	[kW]	Efektivní výkon
Q_s	$[\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}]$	Objem odebraného materiálu za jednotku času
R_a	$[\mu\text{m}]$	střední aritmetická hodnota drsnosti
R_e	[MPa]	Mez kluzu
R_m	[MPa]	Mez pevnosti
r_ϵ	[mm]	Zaoblení špičky
S	[mm]	Výběrová směrodatná odchylka
t_c	[s]	Celkový čas výrobních operací
t_n	[min]	Doba navařování
U	[mm]	Rozšířená nejistota
U_a	[mm]	Chyba typu A
U_b	[mm]	Chyba typu B
v_c	$[\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$	Řezná rychlost
v_{ct}	$[\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$	Teoretická řezná rychlost
v_f	$[\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$	Posuvová rychlost
v_h	$[\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$	Navařovací rychlost
x	[mm]	Výsledná hodnota
x_p	[mm]	Přídavek na délce pro navaření
y	[mm]	Přídavek pro obrábění při navařování
z	[-]	Počet břitů na nástroji

\bar{X}	[mm]	Aritmetický průměr
x_i	[mm]	Hodnota i
Δ	[mm]	Velikost tolerančního pole
$\bar{\varnothing}$	[mm]	Průměr
μ	[%]	Součinitel využití kovu
μ_t	[%]	Součinitel využití času
ρ	[kg · m ³]	Hustota
α_r	[°]	Úhel nastavení hlavního ostří

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Tabulka 1 Naměřené hodnoty
Příloha 2	Tabulka 2 Ověření normálního rozdělení
Příloha 3	Tabulka 3 Navržené tolerance
Příloha 4	Výkres součásti
Příloha 5	Výřez z katalogu pro soustružnické nástroje
Příloha 6	Výřez z katalogu navařovacích hlav
Příloha 7	Výřez z katalogu pro frézovací nástroje
Příloha 8	Výřez z katalogu pro upínače
Příloha 9	Výrobní postup
Příloha 10	Stroj pro soustružení
Příloha 11	Stroj pro frézování
Příloha 12	Model
Příloha 13	Model pro obrábění
Příloha 14	Svěrák_18,9
Příloha 15	Svěrák_20
Příloha 16	NC program Soustruzeni
Příloha 17	NC program Zarovnai cela 18.9_20
Příloha 18	NC program Zarovnai cela 18.9_18.9
Příloha 19	NC program Navareni
Příloha 20	NC program Dokonceni
Příloha 21	NC program Srazeni hran

PŘÍLOHA 1

Tabulka 1 Naměřené hodnoty.

	A	B	C	D	E	F
Naměřená hodnota	18,960	18,840	18,850	14,050	14,280	23,820
	18,940	18,860	18,860	14,040	14,270	23,830
	18,950	18,860	18,870	14,060	14,280	23,840
\bar{X}	18,950	18,853	18,860	14,050	14,277	23,830
S	0,010	0,012	0,010	0,010	0,006	0,010
U _A	0,006	0,007	0,006	0,006	0,003	0,006
U _B	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
U _C	0,021	0,021	0,021	0,021	0,020	0,021
U	0,042	0,042	0,042	0,042	0,041	0,042
Výsledná hodnota	18,95±0,042	18,81±0,042	18,87±0,042	14,05±0,042	14,28±0,041	23,83±0,042
Uvažovaná jmenovitá hodnota	18,9	18,9	18,9	14,1	14,3	23,8

	G	H	R ₁	R ₂	R ₃
Naměřená hodnota	23,570	8,760	18,810	18,820	18,830
	23,600	8,790	18,840	18,845	18,825
	23,580	8,770	18,860	18,825	18,845
\bar{X}	23,583	8,773	18,837	18,830	18,833
S	0,015	0,015	0,025	0,013	0,010
U _A	0,009	0,009	0,015	0,008	0,006
U _B	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
U _C	0,022	0,022	0,025	0,021	0,021
U	0,044	0,044	0,049	0,043	0,042
Výsledná hodnota	23,58±0,044	8,77±0,044	18,84±0,049	18,83±0,043	18,83±0,042
Uvažovaná jmenovitá hodnota	23,6	8,8	18,8	18,8	18,8

Veškeré hodnoty jsou uvedeny v milimetrech.

PŘÍLOHA 2

Tabulka 2 Ověření normálního rozdělení.

	A	B	C	D	E	F
\bar{X}	18,950	18,853	18,860	14,050	14,277	23,830
\tilde{X}	18,950	18,860	18,860	14,050	14,280	23,830
\bar{X}/\tilde{X}	100,000%	99,963%	100,000%	100,000%	99,979%	100,000%

	G	H	R ₁	R ₂	R ₃
\bar{X}	23,583	8,773	18,837	18,830	18,883
\tilde{X}	23,580	8,770	18,840	18,825	18,830
\bar{X}/\tilde{X}	100,013%	100,034%	99,984%	100,027%	100,281%

Veškeré hodnoty jsou uvedeny v milimetrech.

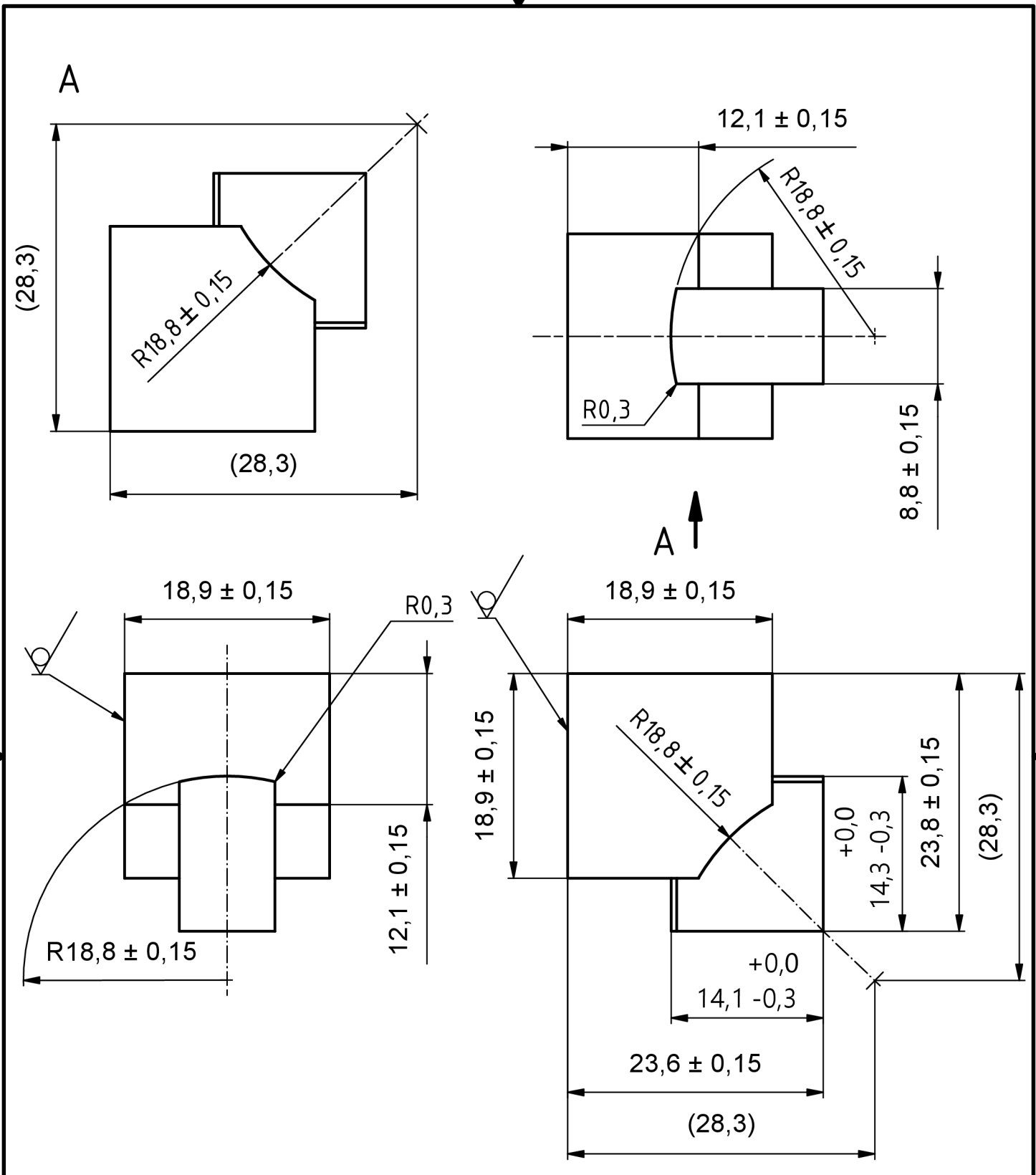
PŘÍLOHA 3

Tabulka 3 Navržené tolerance.

	A	B	C	D	E	F
\bar{X}	18,95	18,85	18,86	14,05	14,28	23,83
Uvažovaná jmenovitá hodnota	18,9	18,900	18,900	14,1	14,3	23,8
Horní úchylka	0,15	0,15	0,15	0,00	0,00	0,15
Dolní úchylka	-0,15	-0,15	-0,15	-0,30	-0,30	-0,15
Horní mezní rozměr	19,05	19,05	19,05	14,10	14,30	23,95
Dolní mezní rozměr	18,75	18,75	18,75	13,80	14,00	23,65
Velikost tolerančního pole	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30

	G	H	R ₁	R ₂	R ₃
\bar{X}	23,58	8,77	18,84	18,83	18,83
Uvažovaná jmenovitá hodnota	23,6	8,8	18,8	18,8	18,8
Horní úchylka	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Dolní úchylka	-0,15	-0,15	-0,15	-0,15	-0,15
Horní mezní rozměr	23,75	8,95	18,95	18,95	18,95
Dolní mezní rozměr	23,45	8,65	18,65	18,65	18,65
Velikost tolerančního pole	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30

Veškeré hodnoty jsou uvedeny v milimetrech.



Struktura povrchu Ra 6,3	Hrany -0,3 +0,3	Měřítko	Přesnost ISO2768-mH
		1 : 1	Promítání
Materiál ČSN 11 373		Sestava	
Polotovary 4HR20h11-ČSN426520	Hmotnost 0,057 kg	Chráněno podle ISO 16016	
	Druh dokumentu VÝKRES SOUČÁSTI	Název KOSTKA	
	Kreslil RAIS	Číslo dokumentu 201018-01	
	Schválil		
	Datum vydání 07.06.2020		
			List 1/1

VÝŘEZ Z KATALOGU FRÉZOVACÍCH NÁSTROJŮ [31]

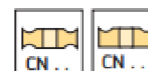
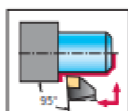



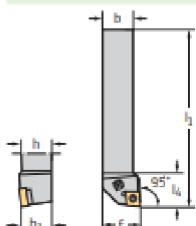
CNMG120408-RP7	0,8	0,25-0,50	0,8-5,0
CNMG120412-RP7	1,2	0,30-0,50	1,2-5,0
CNMG120416-RP7	1,6	0,35-0,50	1,5-5,0
CNMG160608-RP7	0,8	0,30-0,50	0,8-6,0
CNMG160612-RP7	1,2	0,35-0,60	1,2-6,0
CNMG160616-RP7	1,6	0,40-0,60	1,5-6,0
CNMG190612-RP7	1,2	0,35-0,60	1,2-7,0
CNMG190616-RP7	1,6	0,40-0,60	1,5-7,0
CNMG250924-RP7	2,4	0,45-1,00	3,0-9,0

Shank tool – Lever clamp

PCLN

Walter Turn

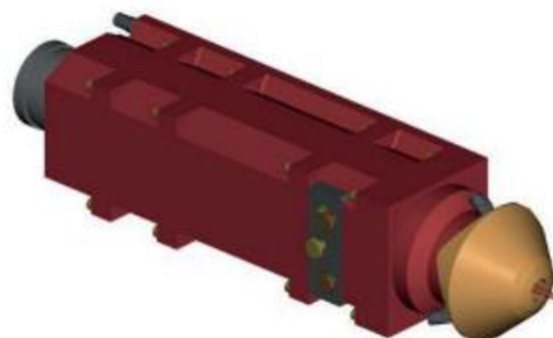


Tool	Designation		h = h ₁ mm	b mm	f mm	l ₁ mm	l ₄ mm	γ	λ _s	Type
	PCLNR/L1616H09		9	16	20	100	24,2	-6°	-6°	CN .. 0903 ..
	PCLNR/L2020K09		9	20	25	125	24,2	-6°	-6°	
	PCLNR/L2525M09		9	25	32	150	24,2	-6°	-6°	CN .. 1204 ..
	PCLNR/L1616H12		12	16	20	100	27,2	-6°	-6°	
	PCLNR/L2020K12		12	20	25	125	27,2	-6°	-6°	CN .. 1606 ..
	PCLNR/L2525M12		12	25	32	150	27,2	-6°	-6°	
	PCLNR/L3225P12		12	32	32	170	27,2	-6°	-6°	CN .. 1606 ..
	PCLNR/L2525M16		16	25	32	150	33,9	-6°	-6°	
	PCLNR/L3225P16		16	32	32	170	33,9	-6°	-6°	

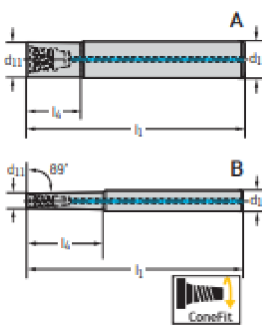
VÝŘEZ Z KATALOGU NAVAŘOVACÍCH HLAV [29]

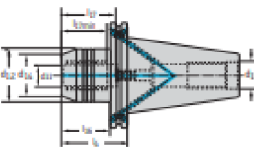
NAVAŘOVACÍ HLAVY S KRUHOVÝM PRACOVNÍM BODEM

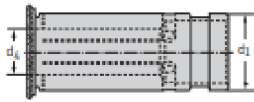
VELIKOST PRACOVNÍHO BODU:	1-8 mm
VÝKON LASERU:	1 000 - 6 000 W
POUŽITÍ:	Pro obtížně dostupná místa
POZICE HLAVY:	Navařování v různých pozicích hlavy



VÝŘEZ Z KATALOGU UPÍNAČŮ [31]

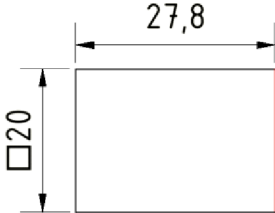
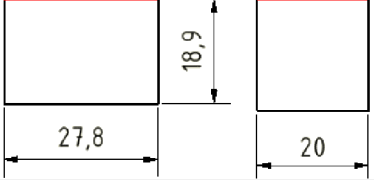
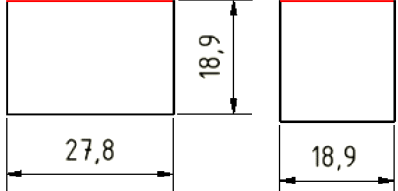
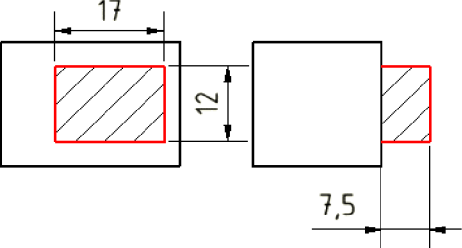
Nástroj		d_1 mm	d_{11}	l_4 mm	l_1 mm	Provedení	kg		
	Stopka DIN 6535 HA	AK610.Z10.E10.050C	10	E10	50	100	A	0,10	
		AK610.Z12.E12.048C	12	E12	48	100	A	0,14	
		AK610.Z16.E10.100C	16	E10	100	155	B	0,3	
		AK610.Z16.E12.090C	16	E12	90	150	B	0,34	
		AK610.Z16.E16.080C	16	E16	80	135	A	342,3	
		AK610.Z20.E16.118C	20	E16	118	175	B	0,62	
		AK610.Z20.E20.038C	20	E20	38	95	A	0,34	
		AK610.Z20.E20.110C	20	E20	110	180	A	0,7	
		AK610.Z25.E25.120C	25	E25	120	200	A	1,2	

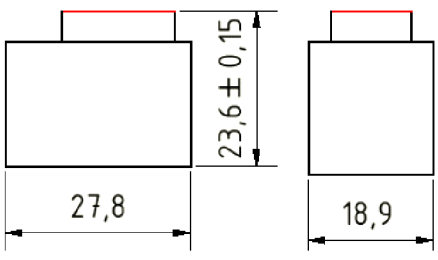
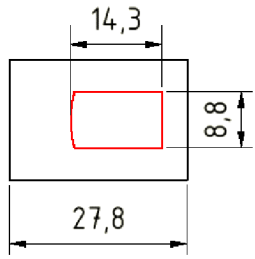
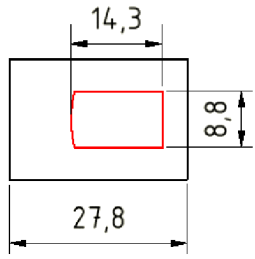
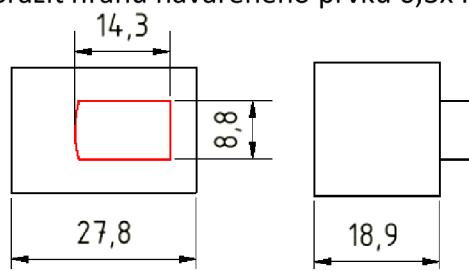
Nástroj		d_1	d_{11} mm	d_{12} mm	d_{14} mm	l_4 mm	l_{16} mm	l_{17} mm	l_{17min} mm	d_{13}	kg	
	SK DIN 69871 AD/B	AK182.S40.050.12	SK40	12	42	32	50	10	46	36	M16	1,1
		AK182.S40.065.20	SK40	20	49,25	38	65	14	51	41	M16	1,3
		AK182.S50.065.20	SK50	20	49,25	38	65	14	51	41	M24	3,1
		AK182.S50.081.32	SK50	32	72	58,5	81	18	61	51	M24	4,1

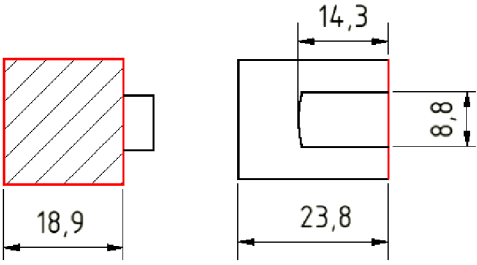
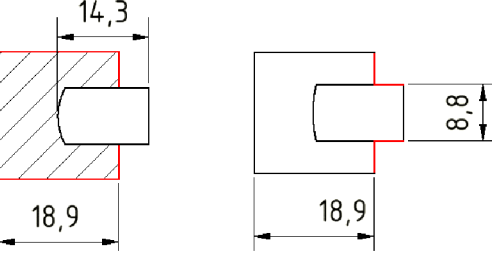
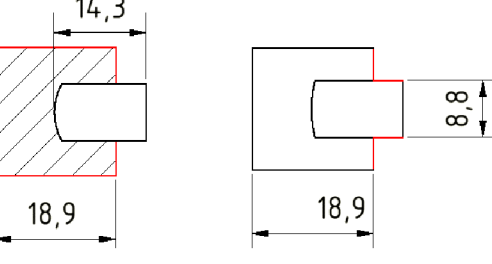
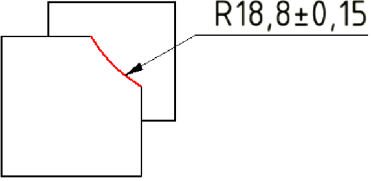
Příslušenství		d_4 mm	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Redukční pouzdra pro periferní chlazení	$d_1 = 12$ mm	FS2194	FS2195	FS2196	FS2197	-	FS2198	-	-	-
		$d_1 = 20$ mm	FS2213	FS2214	FS2215	FS2216	-	FS2217	-	FS2218	-
		$d_1 = 32$ mm	-	-	-	FS2231	-	FS2232	-	FS2233	-
Redukční pouzdra utěsněná pro vnitřní chlazení		$d_1 = 12$ mm	FS2189	FS2190	FS2191	FS2192	-	FS2193	-	-	-
		$d_1 = 20$ mm	FS2199	FS2200	FS2201	FS2202	FS2203	FS2204	FS2205	FS2206	FS2207
		$d_1 = 32$ mm	-	-	-	FS2222	-	FS2223	-	FS2224	-

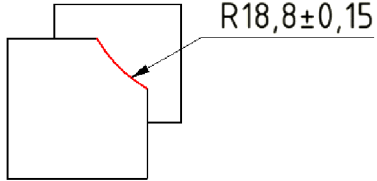
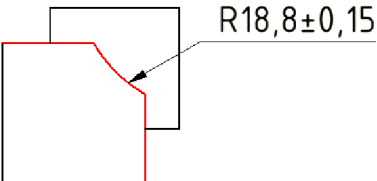
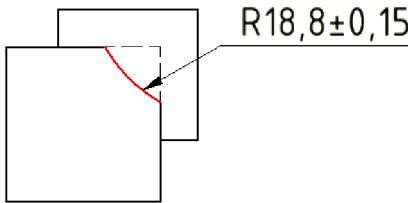
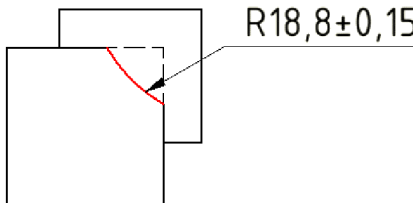
Pokračování		d_4 mm	12	13	14	15	16	18	20	25
Redukční pouzdra pro periferní chlazení	$d_1 = 12$ mm	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$d_1 = 20$ mm	FS2219	-	FS2220	-	FS2221	-	-	-	-
	$d_1 = 32$ mm	FS2234	-	FS2235	-	FS2236	FS2237	FS2238	FS2239	
Redukční pouzdra utěsněná pro vnitřní chlazení	$d_1 = 12$ mm	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$d_1 = 20$ mm	FS2208	FS2209	FS2210	FS2211	FS2212	-	-	-	-
	$d_1 = 32$ mm	FS2225	-	FS2226	-	FS2227	FS2228	FS2229	FS2230	

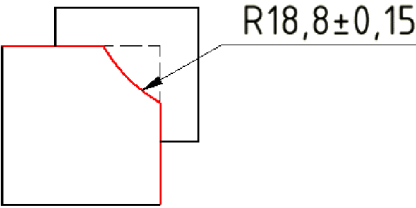
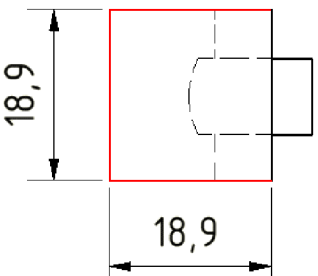
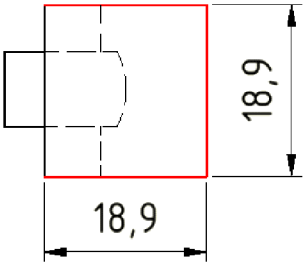
PŘÍLOHA 9

FSI VUT v Brně		VÝROBNÍ POSTUP		Název součástky:	Kostka	Číslo výkresu:
						201018-01
Dne: 10.6.2020		Vyhotožil: Rais		Polotovár:	4HR20h11 - ČSN 42 6520	
Operace	Stroj	Pracoviště	Popis práce a schématické znázornění operace		Výrobní nástroje	
1/1	QT-Compact 100M	Soustružna	Očistit dosedací plochy Upnout součást Zarovnat čelo na délku 27,8 mm  Kontrola rozměrů		CNMG120412 – RP7 PCLNR/L2020K12 ČSN 25 1238	
2/1	CMX 50U	Frézovna	Očistit dosedací plochy Upnout součást Zarovnat čela na výšku 18,9 mm 		H3E20317-E16-16-2 AK610.Z16.E16.080C FS2221 AK182.S40.065.20 ČSN 25 1238	
2/2	CMX 50U	Frézovna	Zarovnat čelo na výšku 18,9 mm  Kontrola rozměrů			
3/1		Svařovna	Navařit prvek 7,5x12x17  Kontrola rozměrů		Navařovací hlava ČSN 25 1238	

FSI VUT v Brně		VÝROBNÍ POSTUP		Název součástky:	Kostka	Číslo výkresu: 201018-01
Dne:	10.06.2020	Vyhotožil: Rais		Polotovár:	4HR20h11 - ČSN 42 6520	
Operace	Stroj	Pracoviště	Popis práce a schématické znázornění operace	Výrobní nástroje		
4/1	CMX 50U	Frézovna	<p>Očistit dosedací plochy Upnout součást Zarovnat čelo navařeného prvku</p> 	<p>H3E20317-E16-16-2 H3E20317-E12-12-0.5 H3E58318-E12-12 AK610.Z16.E16.080C FS2221 AK182.S40.065.20 ČSN 25 1238</p>		
4/2	CMX 50U	Frézovna	<p>Hrubování kontury navařeného prvku s přířávkem 0,5 mm</p> 			
4/3	CMX 50U	Frézovna	<p>Dokončení kontury navařeného prvku</p> 			
4/4	CMX 50U	Frézovna	<p>Srazit hranu navařeného prvku 0,3x45°</p> 			

FSI VUT v Brně		VÝROBNÍ POSTUP		Název součástky:	Kostka	Číslo výkresu: 201018-01
Dne: 10.06.2020		Vyhotožil: Rais		Polotovár:	4HR20h11 - ČSN 42 6520	
Operace	Stroj	Pracoviště	Popis práce a schématické znázornění operace	Výrobní nástroje		
4/5	CMX 50U	Frézovna	Zarovnat čelo 	H3E20317-E16-16-2 H3E20317-E12-12-0.5 H3E58318-E12-12 AK610.Z16.E16.080C FS2221 AK182.S40.065.20 ČSN 25 1238		
4/6	CMX 50U	Frézovna	Hrubování bočního prvku s přídávkem 0,5 mm 			
4/7	CMX 50U	Frézovna	Dokončení bočního prvku 			
4/8	CMX 50U	Frézovna	Hrubování bočního prvku s přídávkem 0,5 mm 			

FSI VUT v Brně		VÝROBNÍ POSTUP		Název součástky:	Kostka	Číslo výkresu: 201018-01
Dne: 10.06.2020		Vyhotožil: Rais		Polotovár:	4HR20h11 - ČSN 42 6520	
Operace	Stroj	Pracoviště	Popis práce a schématické znázornění operace	Výrobní nástroje		
4/9	CMX 50U	Frézovna	Dokončení bočního vybrání 	H3E20317-E16-16-2 H3E20317-E12-12-0.5 H3E58318-E12-12 AK610.Z16.E16.080C FS2221 AK182.S40.065.20 ČSN 25 1238		
4/10	CMX 50U	Frézovna	Srazit hranu bočního vybrání 0,3x45° 			
4/11	CMX 50U	Frézovna	Hrubování bočního prvku s přídávkem 0,5 mm 			
4/12	CMX 50U	Frézovna	Dokončení bočního vybrání 			

FSI VUT v Brně		VÝROBNÍ POSTUP		Název součástky:	Kostka	Číslo výkresu: 201018-01
Dne: 10.06.2020		Vyhotožil: Rais		Polotovár:	4HR20h11 - ČSN 42 6520	
Operace	Stroj	Pracoviště	Popis práce a schématické znázornění operace	Výrobní nástroje		
4/13	CMX 50U	Frézovna	Srazit hranu bočního vybrání 0,3x45°  Očistit součást Kontrola rozměrů	H3E20317-E16-16-2 H3E20317-E12-12-0.5 H3E58318-E12-12 AK610.Z16.E16.080C FS2221 AK182.S40.065.20 ČSN 25 1238		
5/1	CMX 50U	Frézovna	Očistit dosedací plochu Upnout součást Srazit hranu 0,3x45° 	H3E58318-E12-12 AK610.Z16.E16.080C FS2221 AK182.S40.065.20 ČSN 25 1238		
5/2	CMX 50U	Frézovna	Srazit hranu 0,3x45° 			
6/1		Kontrolní pracoviště	Kompletní kontrola rozměrů dle výkresu součásti	ČSN 25 1238		
7/1	Lakovací linka	Lakovna	Povrchová úprava součásti			
8/1		Kontrolní pracoviště	Kontrola povrchové úpravy součásti			

STROJ PRO SOUSTRUŽENÍ [32]



500 mm Bed (Universal)		Hodnoty
CAPACITY	Chuck size main spindle	6"
	Maximum swing	696 mm
	Maximum machining diameter	340 mm
	Bar work capacity main spindle (dependant on chuck system)	52 mm
MAIN SPINDLE	Rotating speed maximum	6,000 min ⁻¹
TURRET	Number of tools	12
	Mill spindle motor output (10 minute rating)	6.6 kW
FEED AXES	Travel (X axis)	216 mm
	Travel (Z axis)	606 mm
MACHINE DIMENSIONS	Length	2,600 mm
	Width	1,690 mm

STROJ PRO FÉZOVÁNÍ [34]



CMX 50 U

ZÁLOŽKA ☆

Vaše výkonné a flexibilní pětistranné obráběcí řešení pro vyšší efektivitu a produktivitu!

max pojezd v ose X	500 mm
max pojezd v ose Y	450 mm
max pojezd v ose Z	400 mm
Max. zatížitelnost stolu	200 kg
Průměr stolu	630 mm