ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

NÁVRH A VÝROBA ŠACHOVÝCH FIGUREK

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autor: Bc. Vladislav Martinec

Studijní obor: Výrobní a materiálové inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Pavel Novák, Ph.D.

Praha 2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Martinec** Jméno: **Vladislav** Osobní číslo: **424747**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

Studijní program: **Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh a výroba šachových figurek

Název diplomové práce anglicky:

Design and manufacture of chess pieces

Pokyny pro vypracování:

1. Návrh designu a materiálu šachových figurek
2. Výroba figurek a její optimalizace
3. Ekonomika výroby

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Pavel Novák, Ph.D., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Datum zadání diplomové práce: **09.04.2018** Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2018**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Pavel Novák, Ph.D. podpis vedoucí(ho) práce	Ing. Libor Beránek, Ph.D. podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	prof. Ing. Michael Valášek, DrSc. podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

24. 4. 2018

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze dne

Podpis

Klíčová slova:

Šachové figurky, hliník, soustružení, frézování, kvalita povrchu

Keywords:

Chess figures, aluminum, turning, milling, surface quality

Abstrakt:

Tato diplomová práce se zabývá výrobou šachových figurek pomocí CNC soustruhu s poháněnými nástroji. V této práci řeším nejenom návrh jednotlivých figurek, ale i samotnou výrobu na CNC soustruhu s následnou optimalizací výroby s ohledem na kvalitu obrobené plochy na čisto. V poslední části této diplomové práce se budu zabývat kalkulací nákladů na jednu sadu šachových figurek.

Abstract:

This diploma thesis deals with production of chess pieces using CNC lathe with powered tools. In my thesis I will try to solve not only design of each piece, but also its production – on the CNC lathe with following optimization of production regarding the quality of worked fair surface. In the final part of this diploma thesis I will consider calculations of costs for one set of chess pieces.

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat za cenné rady k obsahu i k pojetí této práce panu Ing. Pavlu Novákovi, Ph.D.

Obsah

1. Úvod 10
2. Teoretická část 11
2.1. Volba materiálu pro šachové figurky 11
2.2. Neželezné kovy 11
2.3. Titan a jeho slitiny 11
2.3.1. Dělení titanu a jeho slitin 13
2.3.2. Povrchové úpravy titanu a jeho slitin 15
2.4. Hliník a jeho slitiny 15
2.4.1. Značení hliníku a jeho slitin 15
2.4.2. Technicky čistý hliník 17
2.4.3. Slitiny hliníku 18
2.4.4. Vybrané povrchové úpravy hliníku a jeho slitin 21
2.5. Teorie obrábění 25
2.5.1. Síly při obrábění 26
2.5.2. Soustružení 28
2.5.3. Frézování 28
2.5.4. Vibrace při obrábění 30
2.5.5. Obrobitelnost materiálů 34
2.6. Zvolený materiál 37
3. Praktická část 38
3.1. Použité stroje 38
3.1.1. Okuma GENOS L200E-MY 38
3.1.2. Hrotový soustruh TOS SV 18 39
3.2. Použité nástroje 40
3.3. Hliníková slitina EN AW 7075 44
3.4. Použité softwary 44
3.4.1. Solidworks 2016 x64 edition 44
3.4.2. Autodesk Powermill modeling 2018 (Powershape) 45
3.4.3. Featurecam Ultimate 2018 45
3.5. Návrh a výroba figurek 45
3.6. Pěšec 46

3.6.1. První návrh figurky pěšce 46
3.6.2. Úprava návrhu figurky 46
3.6.3. Výroba upravené figurky pěšce 47
3.6.4. Optimalizace obráběcího procesu pěšce 53
3.7. Věž 56
3.7.1. První návrh figurky věže 56
3.7.2. Úprava návrhu figurky věže 57
3.7.3. Výroba upravené figurky věže 57
3.7.4. Optimalizace obráběcího procesu věže 62
3.8. Střelec 67
3.8.1. První návrh figurky střelce 67
3.8.2. Úprava návrhu figurky střelce 67
3.8.3. Výroba upravné figurky střelce 68
3.8.4. Optimalizace obráběcího procesu střelce 73
3.9. Královna 77
3.9.1. První návrh figurky 77
3.9.2. Úprava návrhu figurky 78
3.9.3. Výroba upravené figurky královny 78
3.9.4. Optimalizace obráběcího procesu královny 85
3.10. Král 87
3.10.1. První návrh krále 87
3.10.2. Úprava návrhu figurky 88
3.10.3. Výroba upravené figurky krále 88
3.10.4. Optimalizace obráběcího procesu krále 94
3.11. Kůň 96
3.11.1. První návrh figurky 96
3.11.2. Úprava návrhu figurky 97
3.11.3. Výroba upravené figurky koně 97
3.11.4. Optimalizace obráběcího procesu koně 107
3.12. Zvolené povrchové úpravy 109
3.12.1. Leštění figurek 109
3.12.2. Opískování figurek 111
3.13. Upichování figurek 112

4. Kalkulace 113
4.1. Náklady na pořízení nástrojů 113
4.2. Náklady na pořízení materiálu 114
4.3. Výrobní náklady 115
4.3.1. Výroba na CNC soustruhu Okuma GENOS L200E-MY 115
4.3.2. Leštění jedné sady figurek 116
4.3.3. Odstranění úpichu na figurkách 116
4.3.4. Opískování figurek 117
4.4. Celkové náklady na jednu sadu figurek 117
5. Závěr 118
6. Zdroje 120
7. Seznam obrázků 123
8. Tabulky 128
9. Seznam použitých zkratek a symbolů 129

1. Úvod

Tato diplomová práce vznikla v návaznosti na praxi na Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie.

Prvním úkolem, kterým se budu zabývat, bude volba vhodného materiálu pro výrobu šachových figurek. Pro volbu materiálu si budu muset zvolit stěžejní parametry, podle kterých budu jednotlivé materiály porovnávat.

Dalším úkolem, kterým se budu zabývat, bude návrh jednotlivých figurek pro výrobní zařízení, která jsou na Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie k dispozici (soustružení, frézování). Dále provedu volbu vhodných nástrojů (břitových destiček), které využiji při obrábění zvoleného materiálu. Mám také za úkol sjednotit nástroje a jejich pozice s výrobou hrací „kostičky“ se znakem ČVUT, který Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie vyrábí pro prezentační účely.

Dále se budu zabývat optimalizací výroby s ohledem na kvalitu povrchu. Při obrábění mohou vznikat různé problémy (nevhodné utváření třísky, vibrace). Mým úkolem bude tyto problémy eliminovat. Pokud při výrobě šachových figurek budou vznikat problémy, které nebude možné vyřešit úpravou řezných podmínek, budu muset upravit jednotlivé návrhy šachových figurek pro zvolené nástroje.

Po vyřešení problémů při obrábění zvolím povrchové úpravy vyrobených šachových figurek. Možnost povrchových úprav bude závislá na zvoleném materiálu, ze kterého budu šachové figurky vyrábět.

Po vyřešení všech úkolů, které jsou uvedeny výše, se budu zabývat kalkulací nákladů na výrobu jedné sady šachových figurek.

2. Teoretická část

2.1. Volba materiálu pro šachové figurky

Porovnávám dva materiály, které by byly pro výrobu šachových figurek vhodné. Jako možné materiály pro výrobu figurek jsou titan a hliník. Ocel se nepoužije pro výrobu šachových figurek. Hlavním důvodem, proč nevyužiji ocel, je její hustota.
Hlavními parametry pro volbu materiálu jsou:

- cena materiálu
- obrobitelnost
- hustota
- možné povrchové úpravy

2.2. Neželezné kovy

Hliník, hliníkové slitiny, titan a jeho slitiny patří do skupiny neželezných kovů. Neželezné kovy jsou charakteristické tím, že základním prvkem není železo, ale jiný kov.
Neželezné kovy se dělí na [2]:

- Lehké kovy
- Barevné kovy
- Snadno tavitelné kovy
- Nesnadno tavitelné kovy
- Drahé kovy
- Stopové a vzácné prvky

Mezi lehké kovy můžeme zařadit slitiny hliníku, hořčíku a titanu. Barevné kovy jsou například slitiny mědi a niklu. Snadno tavitelné kovy charakterizují slitiny olova, zinku a cínu. Nesnadno tavitelné kovy jsou wolfram a molybden. Mezi drahé kovy patří slitiny platiny, zlata a stříbra. Stopové a vzácné prvky jsou germanium, uran a jiné [2].

2.3. Titan a jeho slitiny

Titan a jeho slitiny patří do skupiny lehkých kovů. Jeho hustota se pohybuje kolem 4505 kg/m^3. Titan a jeho slitiny byl objeven v 18. století, ale začal se využívat až přibližně roku 1948. Jeho teplota tání je 1668 °C[2].

Titan má dvě modifikace krystalové mřížky [2]:

- α(Ti)
- β(Ti)

α(Ti) má hexagonální krystalovou mřížku. β(Ti) má kubickou prostorově středěnou mřížku. Alotropická přeměna probíhá při 882 °C [2].

Základní vlastnosti titanu [2]:

- Nízká hustota (4505 kg/m^3)
- Pevnost
- Korozní odolnost i v agresivních prostředích

Pevnost titanu je až do 500 °C srovnatelná s ocelemi. Ve vyžíhaném stavu je jeho pevnost v tahu 300 MPa. Pokud se deformačně zpevní, může dosáhnout až hodnoty 800 MPa. Při nízkých teplotách má také dobrou pevnost [2].

Nedostatky titanu a jeho slitin [2]:

- Výrobní náklady
- Špatná obrobitelnost
- Svařitelnost (nutno využít ochrannou atmosféru)
- Chemická reaktivita při vysokých teplotách
- V porovnání s ocelemi nižší modul pružnosti
- Špatné třecí vlastnosti

Vysoké výrobní náklady jsou způsobeny reaktivitou titanu při vysokých teplotách. Reaguje převážně s kyslíkem, dusíkem, vodíkem. Také reaguje při výrobě s vyzdívkou pece nebo formou. Proto je nutné při výrobě titanu a jeho slitin tyto reakce zamezit. Proto se využívá tavení a tepelné zpracování ve vakuu. Lze využít i inertní atmosféru, ale zde je požadavek na vysokou čistotu inertního plynu. Náklady na výrobu titanu a jeho slitin je přibližně osmkrát dražší než výroba hliníku a jeho slitin [2].
Titan a jeho slitiny vytváří slabou povrchovou vrstvu, která eliminuje korozi. Při vysokých teplotách (nad 600 °C), ale vzniká porézní oxid titaničitý. Jelikož je porézní, nemůže chránit povrch před korozí jako je tomu u pasivní vrstvy při nižších teplotách [2].

Díky svým vlastnostem se využívá nejenom v leteckém průmyslu, ale i v kosmickém průmyslu. Díky své chemické odolnosti se využívá v chemickém průmyslu. Jako příklad se dá uvést výroba čerpadel nebo potrubí. Díky své biokompatibilitě se využívá při výrobě implantátů.

2.3.1. Dělení titanu a jeho slitin

Titan a jeho slitiny můžeme dělit dle [2]:

- Struktury po žíhání
- Použití

Dělení dle struktury po žíhání [2]:

1. α slitiny
2. pseudo α slitiny
3. α + β slitiny
4. β slitiny
5. pseudo β slitiny
6. intermetalické fáze

Dělení dle použití [2]:

1. slitiny pro tváření
2. slitiny pro slévání

2.3.1.1. Slitiny α a pseudo α

U těchto slitin je hlavní legující prvek hliník. Obsah hliníku v těchto slitinách se pohybuje do 8 % Úkolem hliníku je stabilizace tuhého roztoku α(Ti). Dalšími legujícími prvky mohou být molybden, křemík, cín, zirkonium. Tyto slitiny jsou nevytvrditelné, svařitelnost je dobrá. S rostoucím obsahem hliníku se zhoršuje jejich tvařitelnost. Mezi nevýhody patří sklon k vodíkové křehkosti [2].

Slitiny Ti-Al-Sn

Legování cínem má zlepšit technologické vlastnosti (svařitelnost). Odolnost proti únavě je dobrá, proto se využívá na výrobu lopatek. Nejznámější je TiAl5Sn2,5. Tato slitina dosahuje R_m 860 MPa. Využívá se i v nízkých teplotách [2].

2.3.1.2. Slitiny α + β

Vedle hliníku jako legujícího prvku se využívají prvky, které stabilizují β fázi. To má za následek, že tyto slitiny obsahují oba druhy fáze. Oproti předchozím slitinám dosahují tyto slitiny vyšších pevností. Tento typ slitin je vytvrditelný. Vytvrzení spočívá v ohřevu na 850 °C až 950 °C. Poté je výdrž na teplotě s následným kalením například do vody. Umělé stárnutí je posledním krokem pro vytvrzení těchto slitin [2].

Tyto slitiny v porovnání se slitinami α a pseudo α mají horší svařitelnost [2].

Slitiny Ti-Al-V

Téměř 50 % titanu se využívá ve formě této slitiny. Po vytvrzení dosahuje R_m až 1100 MPa [2].

2.3.1.3. Slitiny β a pseudo β

Obsahují vysoké procento legujících prvků, které zajistí při chladnutí zachování β fáze. Zároveň se snižuje obsah legujících prvků, které zajišťují vznik α fáze. Nižším obsahem prvků zajišťující vznik α fáze roste pevnost těchto slitin. Například slitina TiV10Fe2Al3 po vytvrzení dosáhne meze pevnosti až 1400 MPa. Tyto slitiny jsou charakteristické vyšší hustotou než výše zmíněné slitiny. Tyto slitiny jsou také dražší než výše uvedené slitiny [2].

2.3.1.4. Intermetalické fáze

Tyto slitiny obsahují vysoký obsah legujících prvků. Obsah je natolik vysoký, že tvoří pouze intermetalické fáze. Vlastnosti nelze přímo určit, protože záleží na legujícím prvku, který tento druh slitin tvoří. Jako legující prvky se využívá nikl nebo hliník [2].

Slitiny Ti-Ni (Nitinol)

Obsah niklu v těchto slitinách může být až 55 %. Jedná se o slitinu s tvarovou pamětí. To znamená, že po deformaci slitiny za nízké teploty se po zahřátí její tvar vrací do původního stavu [2].

Slitiny Ti-Al

Obsah hliníku je přibližně 35 %. Charakteristické vlastnosti: vysoká žáruvzdornost, vysoká žárupevnost [2].

2.3.1.5. Obrobitelnost titanu a jeho slitin

V porovnání s ocelemi se při obrábění titanu a jeho slitin vyskytují větší řezné síly. Obrábějí se složitě jako nerezové oceli. Jejich vysoká houževnatost způsobuje špatnou tvorbu třísky. Velkou problematikou je vylamování břitu nástroje. Nejčastěji dochází k vylamování při nájezdu nebo výjezdu nástroje z řezu [18].

„*Používané karbidové nástroje není třeba povlakovat, protože titan na rozdíl od oceli s karbidy chemicky nereaguje. Na nástroji je tak možno zachovat ostrou řeznou hranu, což je vlastnost při obrábění titanu velmi potřebná.“* [18]

2.3.2. Povrchové úpravy titanu a jeho slitin

- **Eloxování**
  Proces eloxování uvedu níže v práci.
- **Tryskání**
  Pískování uvedu také níže v této práci.
- **Leštění**

2.4. Hliník a jeho slitiny

Hliník a jeho slitiny patří do skupiny lehkých kovů. Mezi lehké kovy patří kovy s hustotou nižší než 5000 kg/m^3. V technické praxi jsou nejpoužívanější z lehkých kovů hliník, titan a hořčík. Využití hliníku v technické praxi se každoročně zvyšuje. Velký význam má v leteckém průmyslu, kde se využívá jeho nižší hustoty, aby se snížila hmotnost konstrukce. Problematikou hliníku jsou jeho horší mechanické vlastnosti v porovnání s ocelemi.

Hliníkové suroviny se dělí na bauxitické a nebauxitické. Pro výrobu Al_2O_3 je nejběžnější surovinou právě bauxit. Nejběžnější nečistoty přítomné v bauxitu jsou kysličník křemičitý, železitý, titaničitý, vápenatý.

Kvůli velké příbuznosti hliníku ke kyslíku je jeho výroba velmi obtížná. Proto se hliník a jeho slitiny začaly využívat až v 19. století [2].

2.4.1. Značení hliníku a jeho slitin

Značení hliníku a jeho slitin určuje norma ČSN EN 573 1 až 3 pro tváření. Pro odlitky z hliníku a jeho slitin je norma ČSN EN 1706 [21].

2.4.1.1. Značení hliníku pro tváření

Norma určující značení hliníku a jeho slitin pro tváření je ČSN EN 573 1 až 3. Hliník a jeho slitiny pro tváření se značí počátečními písmeny EN AW a za nimi následují čtyři číslice. Písmeno A znamená, že se jedná o hliník. Písmeno W znamená, že se jedná o materiál pro tvářené výrobky. U značení EN AW – 1000 znamená číslo 1000 chemické složení. První číslo udává řadu slitiny [2].

Jednotlivé řady [21]:

Řada 1000	Al od 99 %
Řada 2000	AlCu
Řada 3000	AlMn
Řada 4000	AlSi
Řada 5000	AlMg
Řada 6000	AlMgSi
Řada 7000	AlZn
Řada 8000	Al slitina s jinými prvky

2.4.1.2. Značení hliníku a jeho slitin pro odlitky

Norma určující značení hliníku a jeho slitin pro odlitky je ČSN EN 1706. Hliník a jeho slitiny pro odlitky se značí počátečními písmeny EN AC a za nimi následuje pět číslic. Tyto číslice určují chemické složení odlitků. Písmeno A určuje, že se jedná o hliník nebo jeho slitinu. Písmeno C v normě určuje, že se jedná o hliník nebo jeho slitinu pro odlitky. V této normě je možné za pěticí čísel uvádět chemickým označením v závorce. Příklad normy: EN AC-21000 [$AlCu_4MgTi$] [21].

Jednotlivé řady [21]:

Řada 10 000	Al od 99 %
Řada 20 000	AlCu
Řada 30 000	AlMn
Řada 40 000	AlSi
Řada 50 000	AlMg
Řada 60 000	AlMgSi
Řada 70 000	AlZn
Řada 80 000	Al s jinými prvky

2.4.1.3. Značení hliníku a jeho slitin dle ČSN

„V ČSN normách jsou jednotlivé typy hliníku a slitin hliníku označovány vždy samostatnou normou ČSN a šestimístným číslem.“ [21]

Příklad: ČSN 42 4400 AlMg1Si1Mn

- Číslo 42 udává třídu norem
- Číslo 44 udává skupinu norem ve třídě
- Číslo 00 udává číslo ve skupině norem – určí přesný předmět normy
- AlMg1Si1Mn udává chemické složení

2.4.2. Technicky čistý hliník

O technicky čistý hliník se jedná, pokud je jeho složení je od 99 % Al, zbylé 1 % mohou být buď příměsi nebo nečistoty [2].
Základní vlastnosti hliníku [2]:

- Teplota tání 660 °C
- Mez kluzu 20 MPa ve vyžíhaném stavu
- Mez pevnosti v tahu 70 MPa ve vyžíhaném stavu
- Modul pružnosti v tahu 71 GPa
- Hustota 2,69 g/cm^3
- Tvrdost 20HB ve vyžíhaném stavu

Tento neželezný kov je tvárný a měkký. Dané to je jeho strukturou krystalické mřížky, která je kubická středně centrovaná, označována jako fcc. Z důvodu jeho nižší pevnosti je jeho využití v nosných konstrukcích značně omezené. Proto se vytvářejí speciální profily. Hliník a jeho slitiny patří mezi stabilnější materiály na vzduchu. Je to dáno tvorbou pasivní povrchové vrstvy (Al_2O_3), která zamezuje další korozi. Jeho korozivzdornost je horší v zásaditých látkách.
V hliníku a jeho slitinách se vyskytují prvky, které jsou pro nás nežádoucí. Mezi tyto prvky patří: železo, křemík, kyslík, měď, hořčík, mangan, vanad, titan, zinek [2].
Mezi hlavní výhody hliníku patří dobrá elektrická a tepelná vodivost, dobrá tvárnost za studena. Pro zlepšení mechanických vlastností se do hliníku přidávají různé prvky. Tyto prvky nazýváme legující prvky. Pokud se v hliníku objevují jiné prvky, které se tam dostaly neúmyslně, jedná se pouze o nečistoty [2].
Nečistoty se do hliníku a jeho slitin dostávají z hliníkového šrotu, při výrobě z elektrod [6].

2.4.3. Slitiny hliníku

V technické praxi je technicky čistý hliník nevhodný kvůli svým mechanickým vlastnostem. Má sice dobrou elektrickou a tepelnou vodivost, ale jeho mechanické vlastnosti jsou horší oproti jiným konstrukčním materiálům. Proto se do hliníku začaly přidávat legující prvky, které mají zajistit zlepšení určitých vlastností. Hlavními legujícími prvky jsou mangan, hořčík, měď, křemík nebo zinek [2].
Slitiny se skládají minimálně ze dvou prvků. Legující prvky mohou být v základním kovu rozpuštěny i v tuhém stavu. Některé se naopak v základním kovu nerozpouštějí nebo se rozpustí jen částečně. Tyto prvky tvoří hranice, které oddělují jednotlivé fáze [2].

Tyto roztoky se dělí na [6]:

- Substituční
- Interstitické

Substituční roztok je charakteristický tím, že v krystalické mřížce je nahrazen atom základního atomu atomem legujícího prvku nebo nečistotou. Vznik substitučního roztoku je podmíněn několika podmínkami [6]:

- Podobná krystalická mřížka
- Elektrochemická příbuznost jednotlivých kovů
- Stejné mocenství kovů
- *„Rozdíl průměrů atomů nesmí být větší než 15 %“* [6]

Pokud nebude splněna jedna z podmínek a zbylé ano, bude vzájemná rozpustnost omezena.
Interstitický roztok je charakteristický tím, že legující prvky nebo nečistoty nenahrazují atomy základního prvku, ale nacházejí se v meziatomovém prostoru krystalické mřížky. U hliníku mezi atomy, které splňují podmínky pro vznik interstitického roztoku je vodík. Atom v interstitickém tuhém roztoku musí mít menší průměr atomu než základní kov. Poměr je 1:0,6. Slitiny hliníku jsou pevnější a zároveň jsou schopné zachovat si dobrou tvárnost. Dochází ale ke zhoršení elektrické a tepelné vodivosti [6].

Slitiny hliníku můžeme dělit dle použití na [2]:

- Slitiny slévárenské
- Slitiny pro tváření

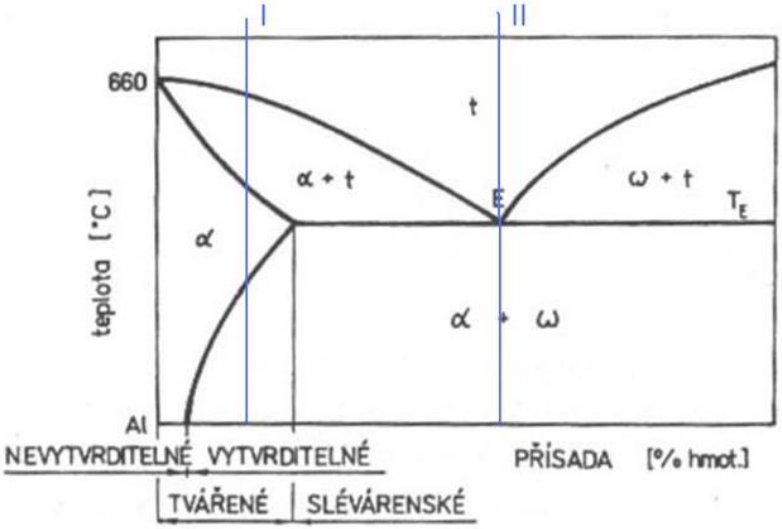
Slitiny také můžeme dělit dle metalurgického charakteru a to na [6]:

- Vytvrditelné
- Nevytvrditelné

U dělení slitin dle jejich využití nelze přesně určit hranici, protože některé slitiny jsou jak dobře tvařitelné, tak mají zároveň dobrou slévatelnost [2].
Jak je již uvedeno výše v této práci, technicky čistý hliník má špatné mechanické vlastnosti - to velmi omezuje jeho použití v technické praxi. Legování hliníku prvky zaručující zvýšení jeho pevnosti (Cu a Mg) není jedinou možností, jak zvýšit jeho mechanické vlastnosti. Můžeme také využít tyto mechanismy [6]:

- Deformačním zpevněním
- Precipitační zpevnění
- Disperzní zpevnění
- Substituční zpevnění

2.4.3.1. Rozdělení slitin hliníku



Obr. 1 Rozdělení slitin hliníku [22]

Dle výše uvedeného fázového diagramu je zřejmé, že mezi vhodné slitiny pro tváření patří ty, které mají nižší obsah legujících prvků. Naopak slitiny vhodné pro slévání jsou ty, které obsahují vyšší obsah legujících prvků. Vyšší obsah legujících prvků způsobuje vznik křehkých a tvrdých fází. Proto slitiny s vyšším obsahem legujících prvků nejsou vhodné pro tváření. Dále s vyšším obsahem legujících prvků vzniká eutektikum, které zlepšuje slévatelnost [6].

Dále dělíme hliník a jeho slitiny na vytvrditelné a nevytvrditelné. U nevytvrditelných slitin hliníku nemůžeme vytvrzováním získat lepší mechanické vlastnosti. Je to způsobeno substitučním zpevněním tuhého roztoku. Pokud je potřeba u těchto slitin zlepšit mechanické vlastnosti musí dojít k tváření za studena [6].

Vytvrditelné slitiny hliníku využívají tepelného zpracování k získání lepších mechanických vlastností. Toto tepelné zpracování se nazývá precipitační vytvrzování. Skládá se z [20]:

- Rozpouštěcí žíhání
- Rychlé ochlazení
- Umělé stárnutí

Slévárenské slitiny hliníku

Technicky čistý hliník se v technické praxi pro slévání využívá výjimečně. Je to způsobeno špatnou slévatelností. Využívá se pouze u odlitků, u kterých je požadavek na dobrou elektrickou vodivost (rotory u motorů) [17].

Mezi nejpoužívanější slévárenské slitiny patří: Al-Si, Al-Cu, Al-Mg, Al-Si-Cu, Al-Cu-Si, Al-Mg-Si [22].

Tvářené slitiny hliníku

Tyto slitiny nachází uplatnění v leteckém, ale i automobilovém průmyslu. Velkým přínosem těchto slitin je snížení váhy při zachování požadovaných mechanických vlastností. Velkou výhodou je odolnost těchto slitin proti korozi. Důvodem je tvorba slabé povrchové vrstvy Al_2O_3 [22].

Tvářené slitiny hliníku dále můžeme dělit na [6]:

- Vytvrditelné
- Nevytvrditelné

Mezi nejvýznamnější tvářené vytvrditelné slitiny hliníku patří slitiny Al-Cu, Al-Cu-Mg,Al-Mg-Si,Al-Zn-Mg,Al-Zn-Mg-Cu [6].

2.4.4. Vybrané povrchové úpravy hliníku a jeho slitin

2.4.4.1. Eloxování

„Eloxování (anglicky anodizing) patří mezi druh povrchové úpravy kovů a některých slitin. Jedná se o elektrochemický proces, kdy na povrchu kovu (hliníku, titanu, niobu), který je v elektrolytické lázni zapojen jako anoda, dochází ke tvorbě rovnoměrné kompaktní vrstvy oxidu, který je výrazně tvrdší a chemicky odolnější než kov sám a zlepšuje tak mechanické a chemické vlastnosti eloxovaných výrobků.“ [8]

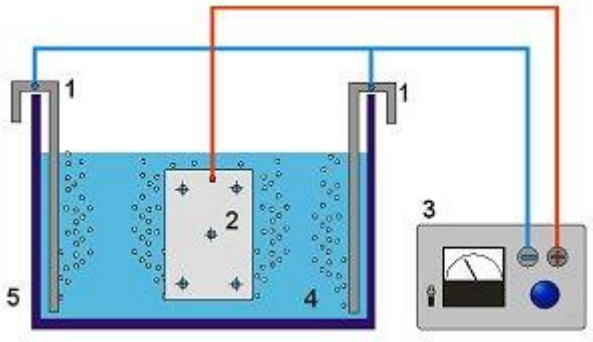
Velké oblibě se při eloxování využívá barvení povrchové vrstvy. Barvivo se může využít jak organické, tak i anorganické. Vhodnější ale jsou barviva anorganická. Při barvení nejsme limitováni žádnou barvou a jsme schopni vytvořit libovolný odstín. Problémem u organických barviv může být odlupování. Anorganická barviva jsou v povrchové vrstvě uzavřena, a proto nedochází k odlupování [8].

Při eloxování hliníku vzniká na povrchu vrstva oxidu hlinitého v tloušťce mezi 5 až 25 μm [8].

2.4.4.2. Princip procesu

Lázní vhodného složení prochází stejnosměrný proud a dochází k polarizaci. Anoda (eloxovaný výrobek) je oxidována za vzniku stabilní oxidické vrstvy. Jako katoda slouží olovo nebo titan. Průchodem elektrického proudu je vytvářeno teplo, které je nutno odvádět nejen z roztoku, ale i z eloxované vrstvy. Probíhající chemické reakce [8]:
Úprava pracovní lázně a pracovních podmínek [8]:

- vodivost zvýšit zvýšením obsahu kyseliny sírové H_2SO_4
- vyšší teplota zvýší vodivost lázně → zvýší tvorbu oxidů i rozpouštění
- vyšší proudová hustota → urychlení procesu, ale roste teplota lázně
- rozpouštění co nejméně → snížení pórovitosti
- legovaný hliník → rozpouštění legujících prvků nebo uzavřeny v povrchu



Obr. 2 Princip eloxování [8]

2.4.4.3. Technologický postup eloxování

1. Odmašťování
2. Oplach
3. Moření
4. Oplach
5. Vyjasnění
6. Oplach
7. Eloxování
8. Oplach
9. Barvení
10. Oplach
11. Utěsnění
12. Oplach
13. Sušení

Eloxování

Lázeň se skládá z destilované vody, kyseliny sírové a přípravku Rogal 3. Musíme zajistit, aby přes součástku procházel stejnosměrný proud, proto se na součást připíná hliníkový drát. Při špatném kontaktu hliníkového drátu se součástkou může mezi kontaktem vzniknout slabá vrstva Al_2O_3, která znemožní další vedení proudu. Tato vada pokazí celý eloxovací proces.

Po připnutí vodiče na součást ponoříme součástku do lázně, tak aby se nedotýkala katody (olovo, titan). Zapneme zdroj stejnosměrného proudu a zvyšujeme proud na vypočítanou hodnotu. Správný průběh eloxování poznáme tak, že v lázni se budou vyskytovat bublinky, které utíkají směrem nahoru [8].

Eloxování probíhá od 5 až 30 minut. Po ukončení eloxování provádíme oplach destilovanou vodou [8].

Potřebný proud k eloxování určím pomocí proudové hustoty a plochy součástky, která je eloxovaná. Dle zkušeností by se proudová hustota měla pohybovat rozmezí 5 až 13 mA/dm^3 a napětí v rozmezí 10 až 20 V [8].

Dále musíme určit čas potřebný k eloxování. Pokud by došlo k překročení doporučené doby eloxování, dojde k rozpouštění vytvořené vrstvy. Součin času a proudové hustoty by se měl rovnat 0,77 $A.min/cm^2$ [8].

Obr. 3 Ukázka barev pro eloxované součásti [23]

2.4.4.4. Pískování

Pískování neboli tryskání patří mezi základní povrchové předúpravy. V technické praxi se využívá pro odstraňování starých nátěrů, odstranění korozních vrstev nebo k zhrubnutí povrchové vrstvy. Dále se také využívá k odstranění otřepů. Důvodem pro využití pískování je právě možnost zhrubnutí povrchové vrstvy, díky které získáme odlišný vzhled mezi figurkami leštěnými a opískovanými [24].

Princip tohoto procesu spočívá v rychlém dopadu abrazivních částic na povrch součásti a jejich interakce. Tato technologie se dá dělit na [24]:

- pneumatické
- mechanické

2.4.4.5. Pneumatické tryskání

Pneumatické tryskání dále můžeme dělit na injektorový a tlakový systém. Rozdíl v těchto způsobech pneumatického tryskání je ve výkonu. Přibližný rozdíl je 300 %. V tlakové nádobě

je uloženo abrazivo, které je na konci hadice (tryska), zde je abrazivo ještě urychleno. Na konci dosahuje abrazivo přibližně 40 až 50 $m.s^{-1}$ [24]

Tlak vzduchu by se měl pohybovat v rozmezí 5 až 7 barů. Jako abrazivní částice se dá využít písek, proto se tryskání označovalo dříve pískování. Dále se dají využít i jiné abrazivní částice: ocelová nebo litinová drť, balotina, korund a jiné. Při tryskání figurek využijeme písek [24].

2.4.4.6. Mechanické tryskání

Mechanické tryskání využívá abraziva, které dopadá do středu metacího kola a odstředivou silou jsou unášena na okraj lopatky, kde je abrazivum urychleno. Abrazivum opouští lopatku a dopadá na součást, kterou chceme tryskat. Tento druh tryskání patří mezi nejvýkonnější způsoby [24].

Obr. 4 Ukázka opískované součásti [26]

2.4.4.7. Leštění

Leštění patří mezi dokončovací operace, ale zároveň se využívá při přípravě součástí například na chromování, niklování a jiné. Úkolem této dokončovací operace je zlepšení vzhledu povrchu součásti, dochází ke snižování drsnosti. Leštěním nejsme schopni upravovat přesnost obrobku. Nástroje pro leštění se v technické praxi využívají buď textilní kotouče, v některých případech se využívají i plstěné kotouče. K lepším výsledkům leštění se využívají lešticí pasty, které obsahují zrna o různé zrnitosti. Leštěním lze také odstraňovat nečistoty, oxidy nebo například lze odstranit ulpělou procesní kapalinu, která ulpí na obrobku při obrábění za využití chladicí kapaliny [4].

Leštění může probíhat ve třech krocích [4]:

1. Využití textilního pásku, na kterém jsou pevně držena brousící zrna
2. Jemné leštění pomocí lešticích past nebo kapalin, které obsahují brousící zrna. Kapalina nebo lešticí pasta se nanáší na textilní pás nebo kotouč
3. V posledním kroku se využije textilní pás bez lešticí pasty nebo kapaliny. Leštění se dosáhne kontaktem lešticího pásu a obrobku za vyšších rychlostí. To má za následek vlivem tření zvýšení teploty obrobku a dochází k rozleštění malých nerovností.

Obr. 5 Ukázka leštěné součásti [27]

2.5. Teorie obrábění

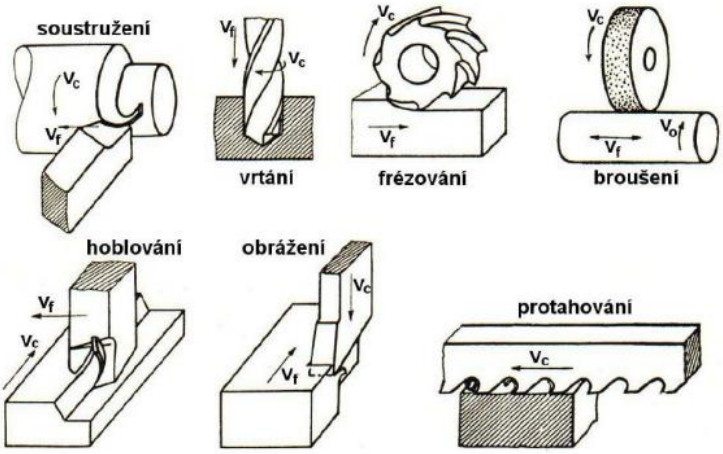
Jedná se o technologický proces, při kterém se pomocí úběru materiálu dosahuje požadovaných rozměrů a kvality. Tato technologie využívá jak mechanických pochodů, tak ale i elektrické, chemické i jiné pochody [1].

Obrábění lze dělit na [1]:

- Konvenční metody obrábění
- Nekonvenční metody obrábění

Mezi konvenční (třískové) metody obrábění patří [1]:

- Soustružení
- Vrtání
- Frézování
- Hoblování
- Broušení
- Obrážení
- Dokončovací operace: honování, lapování, superfinišování, leštění



Obr. 6 Konvenční metody obrábění **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

Mezi nekonvenční metody obrábění patří [3]:

- Elektroerozivní obrábění
- Elektrochemické obrábění
- Obrábění ultrazvukem
- Obrábění paprskem vody
- Obrábění plazmou
- Obráběním paprskem fotonů
- Obráběním paprskem elektronů

2.5.1. Síly při obrábění

Při obrábění břit působí určitou silou do obráběného materiálu. Aby mohlo obrábění proběhnout, musí řezná síla překonat řezný odpor daného obráběného materiálu. Existují dva způsoby určování sil při obrábění a to [1]:

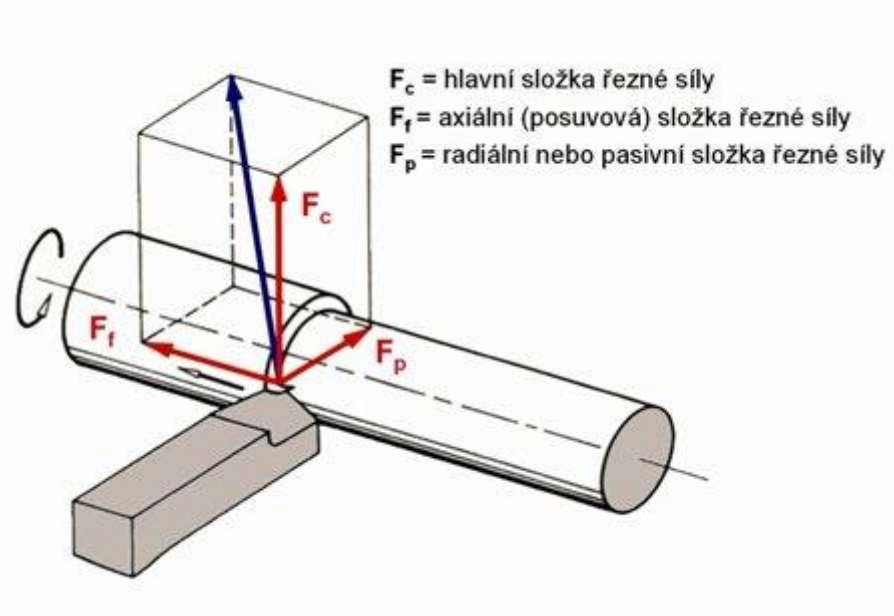
- *Ortogonální – volné řezání, při kterém je ostří kolmé na směr řezného pohybu a které se uplatňuje při zapichovacích operacích, frézování frézou s přímými zuby, hoblováním širokým nožem, protahováním apod.* [3]
- Vázané – jedná se, pokud není splněna podmínka ortogonálního obrábění. Například podélné soustružení, vrtání, frézování s frézou, která má šikmé zuby [3].

Zjednodušeně se dá říct, že při ortogonálním obrábění rozkládáme výslednou řeznou sílu do dvou složek. Při vázaném obrábění dochází k rozkladu výsledné síly do tří složek.

Složky řezné síly [4]:

- F_C – jedná se o tangenciální sílu při řezání. Tato síla působí v hlavním směru pohybu
- F_p – jedná se o radiální sílu při řezání. Tato síla působí kolmo na osu obrobku a také kolmo na tangenciální sílu F_t.
- F_f – jedná se o axiální sílu při řezání. Tato síla působí kolmo na obě výše uvedené síly: F_T a F_R

Výsledný vztah sil platí dle vzorce [4]: $F = \sqrt{F_C^2 + F_p^2 + F_f^2}$



Obr. 7 Složky řezné síly [28]

Vliv na nepřesnost obrábění mají tangenciální a radiální síly. Poměr řezných sil závisí na mnoha aspektech [3]:

- Úhel nastavení $\varkappa_r$
- Úhel čela γ_n
- Poloměr zaoblení špičky r_ε
- Hloubka řezu a_p
- Opotřebení nástroje
- Vlastnosti obráběného materiálu (pevnost, tvrdost, houževnatost, zpevnění)

Poměr mezi silami bývá ($\kappa_r = 75°$) $F_c : F_p : F_f = 1\ 0{,}4 : 0{,}25$ [14].

2.5.2. Soustružení

Pro soustružení se často volí válcový (tyčový) polotovar. Také se často využívají odlitky nebo výkovky. Dá se ale také využít i jiný druh polotovaru například krychlové nebo kvádrové polotovary. Pro upínání se využívá sklíčidlo, pro dlouhé obrobky se využívá i koník, který má za úkol zamezit vibracím obrobku. Vibrace mají za následek nedodržení požadovaných rozměrových a geometrických tolerancí. Také mají vliv na kvalitu povrchu [1].

Při soustružení obrobek rotuje kolem osy Z (osa rotace sklíčidla), následně dochází k odebírání materiálu v podobě třísky jednobřitým nástrojem. V dnešní době se využívají i CNC soustruhy, které využívají dvou revolverových hlav. To znamená, že využíváme například dva stejné nástroje, které současně mohou provádět operaci hrubování. Důvodem je urychlení výroby součástí [1].

Soustružením vyrábíme především válcové plochy, ale také je možné vyrábět různé kuželové plochy, čelní plochy, navrtávat, vrtat, řezat, jak vnitřní, tak i vnější závity. U NC a CNC soustruhů lze v dnešní době vyrábět i obecné rotační plochy. Před vznikem NC a CNC strojů bylo také možné vyrábět obecné rotační plochy pomocí šablony nebo tvarového nástroje. To se využívalo hlavně v sériové výrobě.

Pokud CNC soustruh je vybaven poháněnými nástroji lze také frézovat, brousit, vyrábět ozubení, vrtat mimo osu rotace obrobku. Lze také řezat závity mimo osu rotace.

2.5.3. Frézování

Na rozdíl od soustružení rotuje při frézování nástroj, který je vybaven zuby, které postupně odebírají přebytečný materiál. Frézování je proces, který je přerušován. Každý zub odřezává krátké třísky, jejichž rozměr je proměnlivý [15].

Frézování můžeme rozdělovat podle způsobu záběru nebo podle smyslu rotace vůči směru posuvu [1]:

Podle způsobu záběru [1]:

1. Frézování obvodem
2. Frézování čelem

Podle smyslu rotace nástroje vůči směru posuvu [1]:

1. Nesousledné frézování
2. Sousledné frézování

Při frézování obvodem mají nástroje (válcová fréza, tvarová fréza) zuby pouze na boku nástroje. Obrobená plocha je rovnoběžná s osou otáčení frézy. Hloubka řezu a_p je nastavena kolmo na osu frézy [1].

Obr. 8 Obvodové a čelní frézování rovinných ploch [29]

2.5.3.1. Frézování obvodem nesousledné

„Smysl rotace nástroje proti směru posuvu obrobku.“ [3]

Při záběru zubu do materiálu se tloušťka odřezávané vrstvy pohybuje z minimální hodnoty 0 mm na maximální hodnotu. Poté zub odchází z řezu a tento cyklus se opakuje [3]. *„Řezná síla při nesousledném frézování má složku, která působí směrem nahoru a odtahuje obrobek od stolu.“* [3]

Výhody a nevýhody [4]:

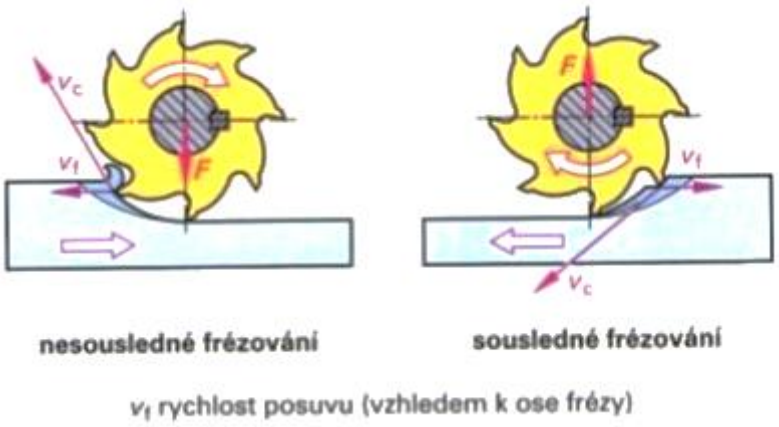
- Absence rázů
- Větší opotřebení nástrojů
- Nutnost tuhého upnutí

2.5.3.2. Frézování obvodem sousledné

Oproti nesousledněmu frézování je smysl rotace nástroje ve směru posuvu. Při záběru zubu do materiálu je hodnota hloubky řezu a_p maximální. Při konci řezu zubu je hloubka řezu nulová [3].

Výhody a nevýhody [3]:

- Není nutné tak tuhé upnutí jako u nesousledného. Síla tlačí obrobek do svěráku nebo jiného upínače
- Vyšší kvalita povrchu
- Nižší opotřebení nástroje
- Vznikají rázy při vnikání nástroje – lze kompenzovat nástroji se šikmými zuby



Obr. 9 Nesousledné a sousledné frézování [29]

2.5.4. Vibrace při obrábění

Vibrace neboli kmitání jsou nežádoucí. Žádoucí jsou pouze ve velmi speciálních případech například pro lepší utváření třísky. Vibrace jsou způsobeny změnami řezných sil při obrábění. Nikdy nedochází k úplné eliminaci vibrací, protože nejsme schopni zaručit určitou řeznou rychlost při obrábění, ale řezná síla se mění v určitém rozmezí ΔF. Je mnoho vlivů, které tyto vibrace způsobují. Jako příklad se dá uvést nestejnorodost obráběného materiálu (vměstky, nečistoty), rozdílný povrch obrobku. Rozdělujeme kmitání na dva druhy [4]:

- Vynucené
- Samobuzené

2.5.4.1. Vynucené kmitání

Vynucené kmitání neboli chvění dále můžeme rozdělovat na [4]:

- kmitání, které je způsobeno řezným procesem
- kmitání, které není způsobeno řezným procesem

Vynucené kmitání, které není způsobeno řezným procesem

Tento druh kmitání není způsoben řezným procesem, ale je způsoben okolními vlivy. Jako příklad se dají uvést nedostatečné základy stroje, díky kterým dochází k přenosu vibrací z okolí do stroje, nástroje a obrobku. Vliv mají také špatně vyrobené, smontované části stroje, které při rotaci způsobí rozkmitání soustavy stroje. Největším problémem při tomto druhu kmitání je zhoršení drsnosti obrobku [4].

„V případě, kdy frekvence budící síly se blíží některé z vlastních frekvencí soustavy, může dojít k jejímu intenzivnímu rozkmitání.“ [4]

Pro zamezení tohoto druhu kmitání je zajištění dostatečných základů, na kterých stroj bude pracovat. Tyto požadavky na zajištění kvality obrábění udává výrobce stroje. Dále je vhodné, aby při výrobě byly obráběcí stroje odděleny od výroby, kde se vyskytují velké rázy. Tyto rázy jsou charakteristické u lisů a bucharů. Také ohrozit kvalitu výroby může i chvění, které bude pocházet od vysoce frekventované silnice.

Vynucené kmitání, které je způsobeno řezným procesem

Důvody vzniku kmitání [4]:

- Nerotační polotovar
- Nesymetricky obrobený obrobek
- Frézování frézou s přímými zuby

Tento druh kmitání lze omezit buď zvýšením řezné rychlosti, nebo snížením řezné rychlosti. V praxi se tato eliminace provádí pokusem, kdy se zaznamenává velikost otáček a jejich vliv na obrábění, tím získáme frekvenční charakteristiku.

2.5.4.2. Samobuzené kmitání

Samobuzené kmitání v porovnání s vynuceným je více nebezpečné. Ve většině případů se nedá samobuzené kmitání předvídat [4].

Existuje několik mechanismů, podle kterých vzniká samobuzené kmitání [4]:

- měnící se koeficient tření při různých rychlostech pohybu
- tvorba nárůstku a jeho stabilita
- relativní pohyb nástroje vůči obrobku
- skluz materiálu na hranici oblasti primární plastické deformace

Relativní pohyb nástroje vůči obrobku

Řezná síla při obrábění kolísá. Díky tomuto jevu dochází ke změně pozice břitu vůči obrobku. Tato změna probíhá po uzavřené křivce a tento jev je právě vznikem vibrací.

Při obrábění dojde vlivem kolísání řezné síly k oddálení nástroje od obrobku, po odeznění silového impulsu se nástroj snaží vrátit do požadované polohy. Při návratu ale dojde k tomu, že nástroj zajede hlouběji do obrobku a opět dochází k nárůstu řezné síly a opět dojde k oddálení nástroje od obrobku.

Kdyby nedocházelo k tlumení toho jevu, tak by amplituda kmitání neustále rostla. Tlumení vzniká při návratu nástroje do obrobku. Nástroj jde hlouběji do obrobku, tudíž tloušťka odřezávané vrstvy je větší než původní tloušťka odřezávané vrstvy. To má za následek nárůst řezné síly a utlumení amplitudy kmitání. Tento jev se opakuje, dokud se obráběcí proces neutlumí [4].

Měnící se koeficient tření při různých rychlostí pohybu

V tomto případě je tření vznikem samobuzeného kmitání. Vznikají při nízkých rychlostech posuvu mezi suportem a ložem. Také vznikají při změně koeficientu tření mezi břitem a obráběným materiálem nebo v hydraulických mechanismech [4].

Koeficient tření, měnící se na stykových plochách obrobku a řezného nástroje, je ovlivněn [4]:

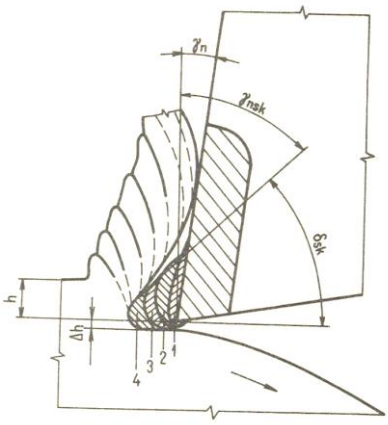
- Mechanickými vlastnostmi
- Chemickými vlastnostmi
- Řeznými podmínkami (řezná rychlost, posuv) a řezné prostředí

Tvorba nárůstku a jeho stabilita

Pro některé obráběné materiály je typický vznik nárůstku. Je to způsobeno při obrábění materiálu břitem. Vlivem adheze mezi obráběným materiálem a řezným nástrojem může docházet k „vytržení částic obráběného materiálu a jejich ulpění na břitu. Nárůstek je nežádoucí při obrábění. Důvodem je změna geometrie nástroje a zhoršení přesnosti výroby. Nárůstek vzniká při nižších řezných rychlostech, protože na rozhraní břit/obráběný materiál není tekutá vrstva, která vzniku nárůstku zabraňuje [4].

Nárůstek ovlivňuje [4]:

- ovlivňuje geometrii nástroje
- mění rozměr obrobku
- zhorší drsnost obrobku
- způsobuje kmitání



Obr. 10 Tvorba nárůstku a jeho vliv na obráběcí proces [16]

Nárůstek buď může být stabilní, nebo nestabilní. Ve většině případů se jedná o nárůstek nestabilní. To znamená, že nárůstek opakovaně na břitu vzniká a po určité době dochází k vytržení nárůstku i s částicemi břitu. Následkem tohoto jevu je zvýšené opotřebení nástroje. Naopak u stabilního nárůstku dochází k ochraně břitu nárůstkem a snížení opotřebení nástroje. U fréz může pomocí nárůstku dojít k „zalepení“ nástroje. To znamená, že nárůstek znemožní další obrábění [4].

Vliv na kmitání má nestabilní nárůstek. „*Je to způsobeno opakovanou tvorbou a zánikem nárůstku. Pokud tato frekvence je blízká některé z vlastních frekvencí systému stroj-nástroj-obrobek, může dojít k rozkmitání tohoto systému“.* [4]

Skluz materiálu na hranici oblasti primární plastické deformace

Tvorba třísky je také opakovaný jev. Pokud tvorba třísky bude dosahovat frekvence jako je vlastní frekvence systému stroj-nástroj-obrobek, bude docházet ke kmitání [4].

Zamezení vynuceného kmitání

V porovnání se zamezením vynuceného kmitání je zamezení samobuzeného kmitání složitější. V technické praxi se mění ty parametry, které neovlivňují opotřebení nástrojů, náklady na výrobu nebo kvalitu výroby nebo je ovlivňují co nejméně [4].

Existují dva způsoby, jak zmenšit kmitání [4]:

1. První způsob využívá měření amplitudy kmitání, kdy se nejdřív zvolí jednotlivé parametry tak, aby docházelo k nestabilnímu obrábění. Poté se parametr zvětšuje nebo zmenšuje a zjišťuje se, zda se amplituda kmitání zmenšuje nebo naopak zvětšuje. Vždy se ale mění pouze jeden parametr a zbylé zůstávají konstantní.
2. U druhého způsobu využíváme znalosti vlivu jednotlivých parametrů na stabilitu řezného procesu. Při měření hledáme hodnoty parametrů, které jsou na pomezí stabilního a nestabilního obráběcího procesu. Poté se provádí analýza jednotlivých parametrů.

2.5.5. Obrobitelnost materiálů

„Obrobitelnost je schopnost materiálu být obráběn konkrétním způsobem (danou technologií, určitým nástrojem, v určitém řezném prostředí apod.).“ [31]

„Řezivost je schopnost nástroje obrábět konkrétním způsobem (danou technologií, určitým nástrojem, v určitém řezném prostředí apod.).“ [31]

Obrobitelnost i řezivost dělíme na [31]:

- absolutní
- relativní

„Absolutní obrobitelnost, resp. řezivost jsou charakterizovány buď funkčním vztahem a parametry spolu souvisejícími nebo určitou velikostí dané veličiny charakterizující obrobitelnost, resp. řezivost.“ [31]

„Relativní obrobitelnost, resp. řezivost jsou charakterizovány bezrozměrnými čísly, které udávají poměr velikostí určité veličiny, a sice poměr velikosti této veličiny vztahující se k danému materiálu obrobku, resp. k nástroji a velikostí této veličiny odpovídající etalonovému (referenčnímu) materiálu obrobku, resp. nástroji.“ [31]

Obrobitelnost je dána mnoha faktory [31]:

- Mechanické vlastnosti obrobku
- Fyzikální vlastnosti obrobku
- Chemické složení obrobku
- Mikrostruktura obrobku
- Zpracování obrobku (tepelné a výroba polotovar)
- Zvolená technologie obrábění
- Geometrie nástroje
- Vlastnosti řezného materiálu
- Pracovní prostředí (využití procesní kapaliny a podobně)

Absolutní charakteristiky [31]:
Obrobitelnost je převážně hodnocena dle trvanlivosti nástroje. Dalšími parametry pro vyhodnocení mohou být teplotní, silové, technologické. Také na obrobitelnost můžeme hodnotit dle kvality obrobeného povrchu.

Relativní charakteristiky [31]:

1. Index obrobitelnosti:

   $$i = \frac{v_T}{v_{Tet}}$$

   Jedná se o poměr řezné rychlosti vůči řezné rychlosti pro určitou trvanlivost etalonového materiálu. Tento parametr je zdlouhavý, proto se snažíme tento parametr nahradit jednoduchým Taylorovým vztahem. Také využíváme v_T pro různé trvanlivosti.
2. Velikost teploty řezání:

   $$i_\theta = \frac{\theta_{et}}{\theta}$$

   Jedná se o poměr teploty obrábění etalonového materiálu vůči námi obráběného materiálu.
3. Řezná rychlost při určité teplotě řezání:

   $$i_{v\theta} = \frac{v_\theta}{v_{\theta et}}$$

   Jedná se o poměr řezné rychlosti námi obráběného materiálu při určité teplotě vůči řezné rychlosti při určité teplotě etalonového materiálu.

4. Řezná síla, hlavně se hledí na tangenciální složku:

   $i_{Fz} = \frac{F_{zet}}{F_z}$

   Jedná se o poměr silové tangenciální složky etalonového materiálu vůči silové tangenciální složce námi obráběného materiálu.

Dále jsou další různé parametry, podle kterých lze určovat obrobitelnost jako obrábění konstantní posuvovou silou, časem potřebným k obrobení určité délky. Můžeme využít i hodnocení dle vhodného utváření třísky. Podle kvalitativního parametru nás hlavně zajímá drsnost povrchu obrobku [7].

2.5.5.1. Značení obrobitelnosti

Pokud hodnotíme obrobitelnost dle relativní charakteristiky: index obrobitelnosti, tak hodnotíme obrobitelnost dle úběru materiálu (odebraný objem za jednotku času).
Rozdělujeme do několika skupin [31]:

a - litiny
b - oceli
c - těžké neželezné kovy
d - lehké neželezné kovy
e - plastické hmoty
f - přírodní nerostné hmoty
g - vrstvené hmoty
v - tvrzené litiny pro výrobu válců

2.5.5.2. Zhodnocení obrobitelnosti hliníku a jeho slitin

Technicky čistý hliník je měkký a houževnatý. Charakteristický je vznik nárůstku, který způsobuje „zalepení“ vícebřitých nástrojů a jejich zničení. Obrobitelnost s ohledem na kvalitu povrchu je špatná. Legující prvky zlepšují obrobitelnost s ohledem na kvalitu povrchu.
Opotřebení břitu zhoršuje především křemík. Naopak tyto legující prvky zlepšují obrobitelnost: měď, hořčík, železo, nikl, olovo a kobalt. Mangan na obrobitelnost má velmi malý vliv [16].

2.6. Zvolený materiál

Porovnávané parametry:

1. **Cena**

   Titanová tyč Grade 5 o průměru 25 mm a délce 1000 mm vyjde na 5663 Kč. Hliníková tyč EN-AW 7075 (letecký hliník) o průměru 25 mm a délce 1000 mm vyjde na 251 Kč. Ceny byly porovnávány na stránkách nevyko.cz a simzac.cz. Cena se samozřejmě odvíjí od typu slitiny.

2. **Obrobitelnost**

   Při porovnání obrobitelnosti daných materiálů je lépe obrobitelný hliník a jeho slitiny.

3. **Povrchové úpravy**

   Povrchové úpravy jsou pro oba druhy materiálů srovnatelné.

4. **Hustota**

   Hustoty se mírně liší přibližně o 500 kg/m^3.

Po porovnání těchto parametrů volím pro výrobu figurek hliníkovou slitinu EN AW 7075. Rozhodujícími parametry pro volbu materiálu byla cena a obrobitelnost materiálu. Zbylé parametry neměly již velký vliv na volbu materiálu (nebyl znatelný rozdíl v těchto parametrech).

3. Praktická část

Optimalizace výroby je prováděna především na jakost povrchu (drsnost) a na čas výroby. Navrhování figurek je zohledněno na technologické možnosti stroje, kterým Ústav obrábění, projektování a metrologie disponuje. Dále se využívá konvenční soustruh, který slouží k leštění povrchu a odstranění úpichu z předešlé výroby.

Pro návrh modelů využívám software Solidworks 2017. Studentská licence je dostupná zdarma pro studenty ČVUT. Po návrhu tvarů a rozměrů figurek dochází k poradě, kde se hodnotí nejenom design, ale i zda jsme schopni danou figurku vyrobit nebo ne (technologičnost konstrukce). Po odsouhlasení modelů figurek přecházím k tvorbě CAM programů.

Pro tvorbu CAM programu využívám software Autodesk FEATURECAM 2018, který je dostupný pro studenty ČVUT v plné verzi. Dále pro programování obrábění využívám dílenské programování na CNC soustruhu OKUMA GENOS L200E-MY (řídicí systém OSP-P 300L). Dílenské programování používám, protože postprocesor fungoval špatně a v NC kódu se vyskytovaly poté chyby. Během výroby figurek se postprocesor upravil a frézování figurky koně se mohlo programovat v softwaru FEATURECAM 2018.

Po vytvoření partprogramu v softwaru Autodesk FEATURECAM 2018 vygeneruji pomocí tohoto softwaru NC kód, který nahrávám do stroje OKUMA GENOS. Dále se provádí verifikace obrábění a verifikace NC kódu, aby se zamezilo „bourání“.

Po dokončení obrábění dochází k hodnocení obrobku, hlavně se hodnotí kvalita povrchu a dosažení požadovaných rozměrů. Kontrola rozměrů se provádí kvůli šachovnici, do které figurky musí „pasovat“.

Po této kontrole dochází k povrchovým úpravám jednotlivých figurek a také k odstranění úpichu.

3.1. Použité stroje

3.1.1. Okuma GENOS L200E-MY

Jedná se o CNC soustruh se čtyřmi řízenými osami X, Y, Z a C. Tento typ CNC soustruhu má i poháněné nástroje. To znamená, že na soustruhu můžeme axiálně i radiálně frézovat. Problémem u tohoto stroje je neudržení konstantní řezné rychlosti (soustružení) při rychlých změnách obráběného průměru. Vždy dochází k zastavení posuvu, roztočení vřetena na určenou řeznou rychlost a opětovnému spuštění posuvu. To má za následek vznik viditelné oblasti, ve

které se nástroj při soustružení zastavil a opět se po dosažení řezné rychlosti dal opět do pohybu. Tento problém je nevhodný u obrábění na čisto.

Dalším problémem je nízký výkon u poháněných nástrojů. Musí se dávat pozor, aby nedošlo k překročení potřebného výkonu u frézování.
U revolverové hlavy se musí dát pozor na volbu nástrojů. V některých případech by sousední nástroje, které zrovna neobrábějí, mohly mít kolizi jak s obrobkem, tak i s vřetenem. Dále jsme limitováni počtem možných nástrojů upnutých v revolverové hlavě. Maximálně se do revolverové hlavy vejde 12 nástrojů.
Parametry stroje [32]:

Maximální obráběná délka:	380 mm
Maximální obráběný průměr:	200 mm
Otáčky vřetena:	107 až 4500 ot/min
Výkon vřetena:	11 kW/7,5 KW
Počet nástrojových míst:	12
Otáčky hnaného nástroje:	50 až 6000 ot/min
Výkon hnaného nástroje:	4/1,5 kW
Hmotnost stroje:	4600 kg
Vrtání vřetena:	66 mm

3.1.2. Hrotový soustruh TOS SV 18

Tento konvenční soustruh, kterým Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie disponuje, využívám převážně k leštění jak rotačních ploch figurek, tak ale i k nerotačním plochám figurek. Dále se tento soustruh využívá pro odstraňování úpichu z předešlých operací.

Parametry stroje [33]:

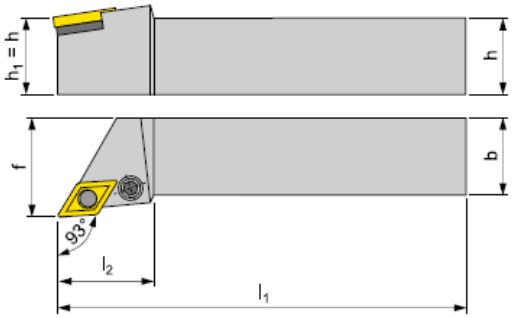
Oběžný průměr nad ložem:	380 mm
Oběžný průměr nad suportem:	215 mm
Vzdálenost hrotů:	1250 mm
Maximální hmotnost obrobku:	300 kg
Příkon:	6 kW
Hmotnost stroje:	1780 kg

3.2. Použité nástroje

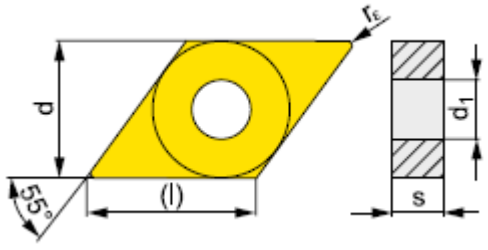
Číslování odpovídá pozici nástroje v revolverové hlavě. Při volbě nástrojů byl požadavek na sjednocení nástrojů pro výrobu hracích kostek, které Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie během této diplomové práce vyráběl.

1. PDJNL 2020 K15 + destička DNMG 150608EL-SI T8330

Vnější soustružnický nůž. Výrobcem nože a břitové destičky je Pramet tool s.r.o.



h	b	f	l_1	l_{2max}
20	20	25	125	40

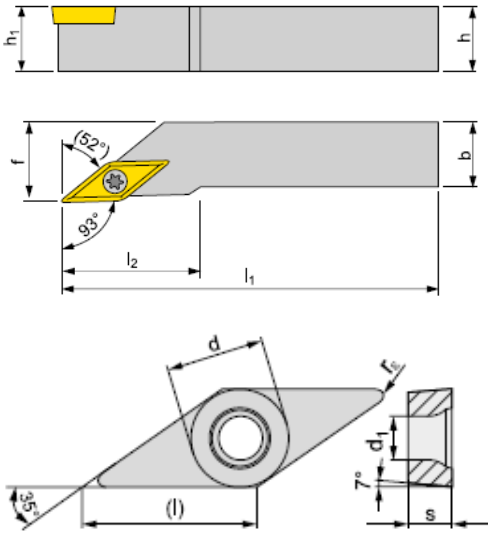


l	d	d_1	s	r_ε
15,5	12,7	5,16	6,35	0,8

Obr. 11 Vnější soustružnický nůž PDJNL 2020 K15 s vyměnitelnou břitovou destičkou DNMG 1500608EL-SI T8330 [34]

2. SVJBL 2020 K16 + destička VCGT 160408F-AL HF7

Vnější soustružnický nůž. Výrobcem je Pramet tools s.r.o



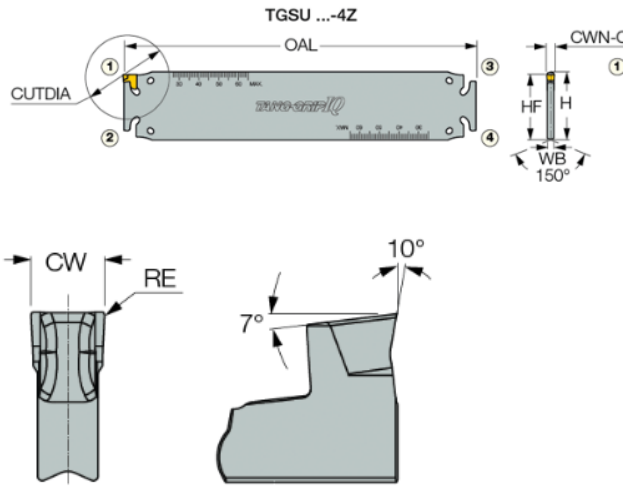
h	b	f	l_1
20	20	25	125

l	d	d_1	s	r_ε
16,6	9,525	4,4	4,76	0,8

Obr. 12 Vnější soustružnický nůž SVJBL 2020 K16 s vyměnitelnou břitovou destičkou VCGT 160408F-AL HF7 [34]

3. TGSU 35-3-IQ-4Z + destička TAG N3A IC20

Vnější upichovací nůž. Výrobce ISCAR METALWORKING.



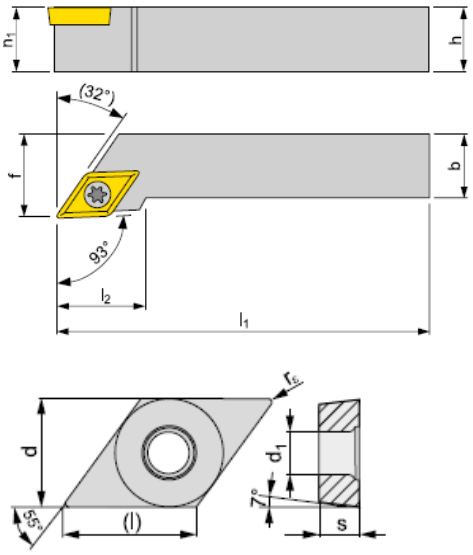
H	HF	OAL	CUTDIA
35	33,2	180	120

CW	RE
3,05	0,2

Obr. 13 Upichovací nůž TGSU 35-3-IQ-4Z s vyměnitelnou břitovou destičkou TAG N3A IC20 [35]

4. SDJCL 2020 K11-M-A + destička DCGT 11T304F-AL HF7

Vnější soustružnický nůž. Výrobcem nože a břitové destičky je Pramet tools s.r.o



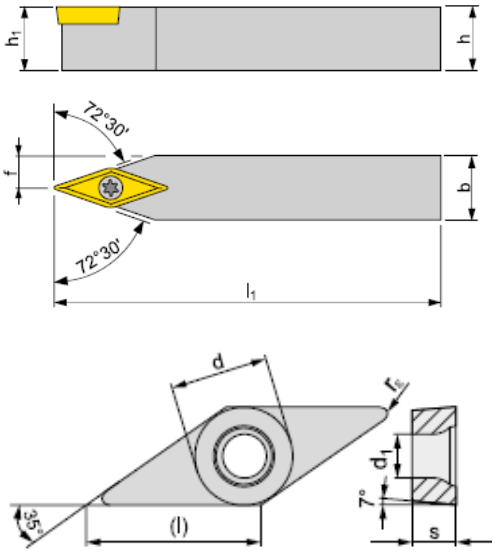
h	b	f	l_1
20	20	25	125

l	d	d_1	s	r_ε
11, 6	9,525	4,4	3,97	0,8

Obr. 14 Vnější soustružnický nůž SDJCL 2020 K11-M-A s vyměnitelnou břitovou destičkou DCGT 11T304F-AL HF7 [34]

5. SVVCN 2020 K16-M-A + destička VCGT 160408F-AL HF7

Vnější soustružnický nůž. Výrobcem nože a břitové destičky je Pramet tools s.r.o.



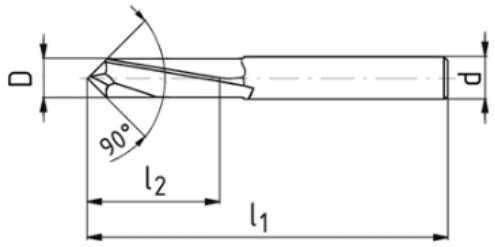
h	b	f	L
20	20	10	125

l	d	d_1	s	r_ε
16,6	9,525	4,4	4,76	0,8

Obr. 15 Vnější soustružnický nůž SVVCN 2020 K16-M-A s vyměnitelnou břitovou destičkou VCGT 160408F-AL HF7 [34]

7. Multifunkční fréza S390002.030

Fréza ze slinutého karbidu pro radiální frézování a vrtání. Výrobcem je ZPS-Frézovací nástroje a.s.

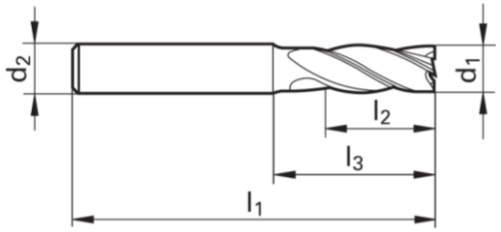


α	D h6	d	l_1	l_2	Z
90°	3	6	50	6	2

Obr. 16 Multifunkční fréza S390002.030 [36]

8. Válcová čelní fréza 3366-12,0

Fréza ze slinutého karbidu pro axiální frézování s ostřím přes střed a s vnitřním chlazením. Výrobcem je Gühring s.r.o.

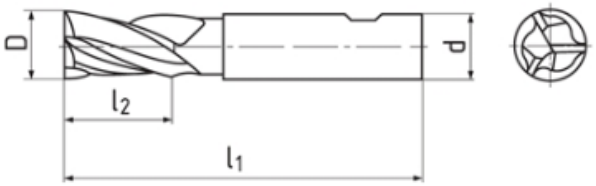


d_1	d_2	l_1	l_2	l_3	Z
12	12	83	26	36	4

Obr. 17 Válcová čelní fréza No.3366-12,0 [37]

9. Válcová čelní fréza 233418.030 TiAlN

Fréza ze slinutého karbidu a povlakovaná TiAlN pro radiální frézování s ostřím přes střed. Výrobcem je ZPS - Frézovací nástroje a.s.

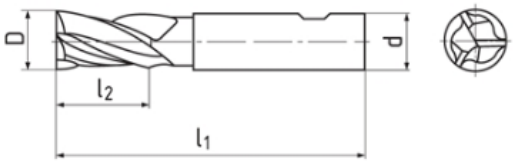


D e8	d h6	l_1	l_2	Z
3	6	56	12	3

Obr. 18 Válcová čelní fréza 233418.030 TiAlN [36]

11. Válcová čelní fréza 110418.180

Fréza ze slinutého karbidu pro radiální frézování s ostřím přes střed. Výrobcem je ZPS – Frézovací nástroje a.s.



D k10	d h6	l_1	l_2	Z
18	16	92	32	3

Obr. 19 Válcová čelní fréza 110418.180 [36]

3.3. Hliníková slitina EN AW 7075

Tato slitina se označuje i jako letecký dural. Mez pevnosti závisí na stavu slitiny viz tabulka níže. Tato slitina patří mezi vytvrditelné slitiny. Tvrdost se pohybuje v rozmezí 135 až 150 HB. Legujícími prvky jsou Si (max 0,4 %), Fe (max 0,5 %), Cu (1,2 % až 2,0 %), Mg(2,1 % až 2,9 %), Cr (až 0,28 %), Zn (5,1 % až 6,1 %), Ti (max 0,2 %).Velkou výhodou je dobrá leštitelnost této slitiny. Nevýhodou je špatné utváření třísky při hrubování, protože tento materiál je v porovnání s jinými slitinami hliníku houževnatý. Co se týče možnosti eloxování, jde tento materiál hůře eloxovat, ale eloxování není vyloučené. Odolnost proti korozi je v porovnání s jinými hliníkovými slitinami (EN AW-6082) horší [38].

Tab. 1 Vlastnosti hliníkové slitiny EN AW-7075 [38]

Slitina	Stav	Rozměry		Pevnost v tahu (R_m) MPa min	Mez kluzu ($R_{P0,2}$)MPa
		Min	Max		
EN AW-7075	T6	0	80	540	485
EN AW-7075	T651	0	80	540	485
EN AW-7075	T73	0	80	455	385
EN AW-7075	T7351	0	80	455	385

3.4. Použité softwary

3.4.1. Solidworks 2016 x64 edition

Tento software slouží k tvorbě CAD modelů, sestav, výkresů. Výrobcem a poskytovatelem služeb nejen na českém trhu je společnost Dassault Systemes Solidworks. Solidworks ovládá jak objemové, tak i plošné modelování. Také dokáže automaticky generovat výrobní výkresy. Solidworks nabízí mnoho modulů, které se dají k základní verzi přikoupit [39].

Pro modelování figurek využívám studentskou verzi Solidworks 2016 x64 edition, která je pro studenty ČVUT zdarma.

3.4.2. Autodesk Powermill modeling 2018 (Powershape)

Slouží pro analýzu, úpravu i tvorbu CAD modelů. Tento program využívám pro přípravu křivek a ploch pro tvorbu CAM programů v softwaru Featurecam Ultimate 2018. Důvodem je nekompatibilita softwarů Solidworks a Featurecam.

3.4.3. Featurecam Ultimate 2018

Jedná se o CAM software, jehož úkolem je zrychlení tvorby CAM programů. Spadá jako Powershape pod společnost Autodesk. Featurecam umí programovat nejenom soustružení, ale i frézování. Převážně tento software využívám k programování vnějšího soustružení na jednotlivých figurkách. V případě složitějšího programování pro frézování (křivky) ho též využívám. Jednoduché programy tvořím přímo na CNC soustruhu Okuma Genos L200E-MY, jehož řídící systém je OSP-P 300L [40].

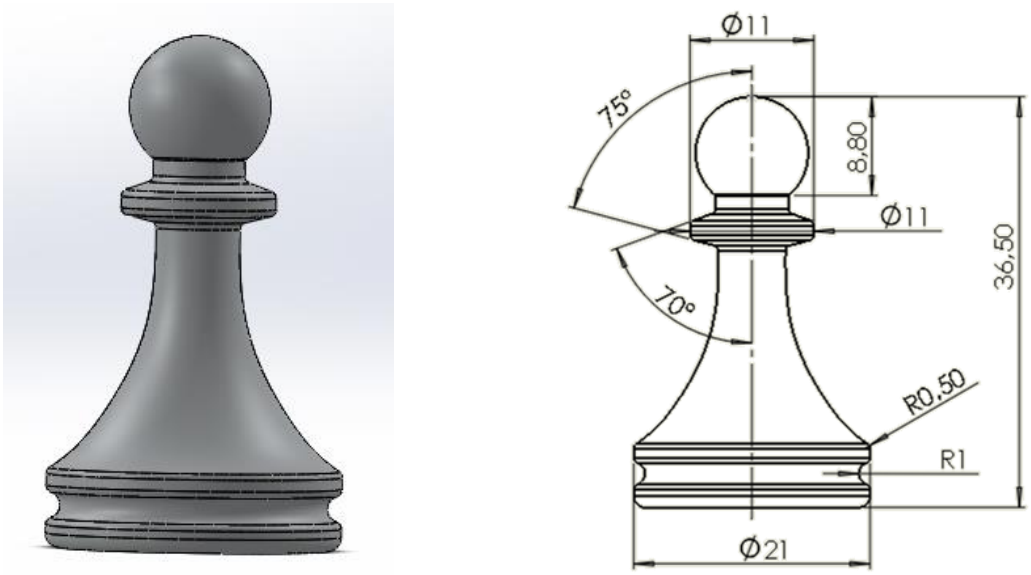
3.5. Návrh a výroba figurek

Data původních figurek byla bohužel ztracena z důvodu poškození pevného disku, na kterém byly modely a programy uloženy. Část dat byla zachráněna a v této kapitole budou porovnány modely figurek a bude vysvětleno, proč došlo k jejich úpravě.
Mezi nejdůležitější problémy, kvůli kterým se musely figurky poupravovat, bylo podřezání. To znamená, že soustružnický nástroj při obrábění měl větší úhel nastavení hlavního κ_r a vedlejšího ostří $\kappa_{r'}$, než byl úhel obráběného modelu. Dalším problémem bylo snížení pevnosti obrobku, díky kterému docházelo ke zhoršení jakosti povrchu při obrábění. Tohoto problému se ale pokusím zbavit úpravou strategií při obrábění. Úprava modelů byla i z důvodu designu, například zvětšení výšky královny, aby vedle krále nevypadala o tolik menší.

Počátek souřadnicového systému figurek je volen stejně a to na spodní část figurky. Důvodem je zamezení nepřesností při upínání a usnadnění výroby celé série figurek (nemusíme stále měnit nulový bod stroje).

3.6. Pěšec

3.6.1. První návrh figurky pěšce



Obr. 20 První návrh pěšce

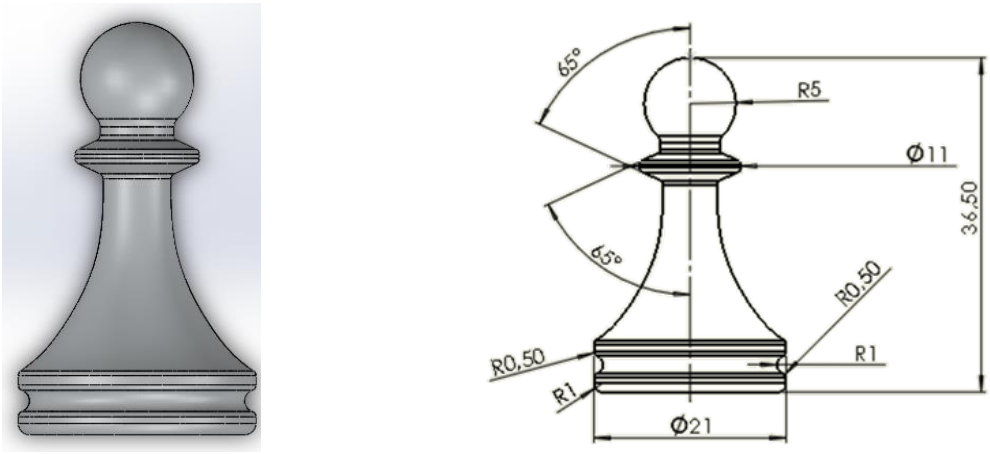
Hlavní problémy při výrobě figurky:

- Podřezání
- Nevhodné utváření třísky
- Vibrace
- Kvalita povrchu

Vibrace, nevhodné utváření třísky a kvalita povrchu se dají zlepšit pomocí volby vhodnějších řezných podmínek, které se budou hledat při výrobě upravené figurky. Podřezání se bohužel volbou jiných řezných podmínek nezbavíme. Muselo by buď dojít k volbě jiného nástroje s jinou geometrií, nebo k úpravě modelu. Pořízení nového nástroje je finančně nákladné, a proto se zvolilo řešení úpravy modelu.

3.6.2. Úprava návrhu figurky

Došlo k úpravě úhlů v oblasti „krčku“. Dále došlo k úpravě počátku souřadnicového systému, kdy osa Z je osou rotace figurky. Je to z důvodu lepšího importu modelu do programu Autodesk FEATURECAM 2018.



Obr. 21 Upravený návrh pěšce

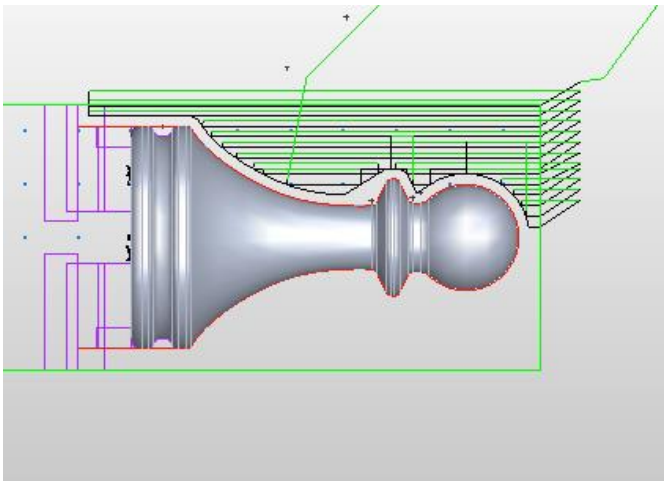
3.6.3. Výroba upravené figurky pěšce

Polotovarem pro výrobu pěšce je tyč o průměru 25 mm. Na výrobu jednoho pěšce se spotřebuje 46,6 mm.

3.6.3.1. Operační úsek 10

V tomto operačním úseku dochází k hrubování polotovaru soustružením. To znamená, že v tomto operačním úseku nám jde hlavně o rychlé odstranění přebytečného materiálu. Kvalita povrchu není natolik důležitá, zajímá mě pouze, zda dochází k vibracím, které jsou nežádoucí. Při vibracích dochází ke zhoršení kvality povrchu natolik, že bychom nebyli schopni zaručit kvalitní povrch po obrábění načisto.

V tomto operačním úseku se nástroj pohybuje od čela směrem k vřetenu. Úhel nájezdu je zvolen na hodnotu 50°. Úhel výjezdu je zvolen na 80°. Úhel výjezdu je zvolen na takovouto hodnotu, aby nedošlo ke kolizi nástroje s obrobkem.

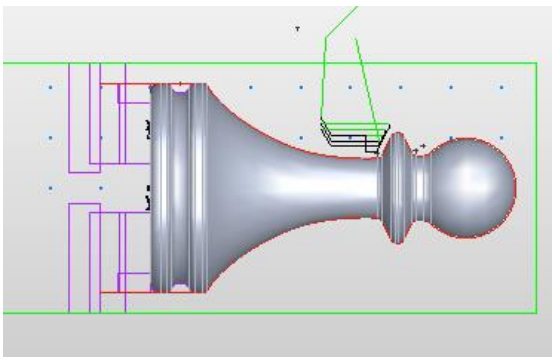


a_p	1,2 mm
f	0,2 mm/ot
v_c	150 m/min
Přídavek v X	0,2 mm
Přídavek v Z	0,2 mm
Nástroj	PDJNL

Obr. 22 Pěšec - operační úsek 10

3.6.3.2. Operační úsek 20

Z předešlého hrubování zůstává zbytkový materiál, který musí být před obráběním na čisto odstraněn. Je to způsobeno geometrií nástroje, která neumožňuje bližší přiblížení nástroje k požadovanému tvaru. Proto je zvoleno hrubování, při kterém se nástroj pohybuje od vřetena směrem k čelu obrobku. Úhel nájezdu je nastaven na 70° a úhel výjezdu je nastaven na 90°. V kombinaci s počátečním a koncovým bodem jsou nájezdy a výjezdy v pořádku - nemělo by docházet ke kolizi nástroje s obrobkem.

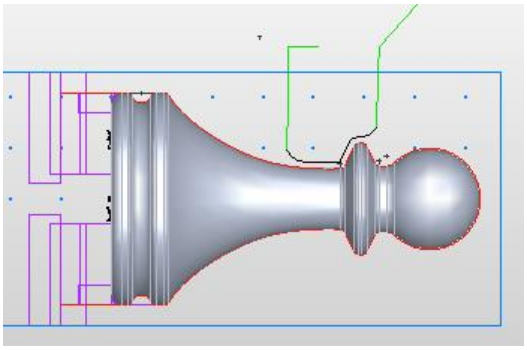


a_p	0,75 mm
f	0,2 mm/ot
v_c	150 m/min
Přídavek v X	0,2 mm
Přídavek v Z	0,2 mm
Nástroj	SDJCL

Obr. 23 Pěšec - operační úsek 20

3.6.3.3. Operační úsek 30

Tato strategie má zajistit stejný přídavek pro obrábění na čisto. Jedná se o obrábění, kdy se nástroj pohybuje po jedné dráze. Nástroj neodjíždí při předchozím operačním úseku do „bezpečí“, ale navazuje na tuto strategii. Je to z důvodu ušetření času. Zde volím tangenciální nájezd i výjezd. Úhly obou oblouků jsou 60° a rádius oblouku je 2 mm.

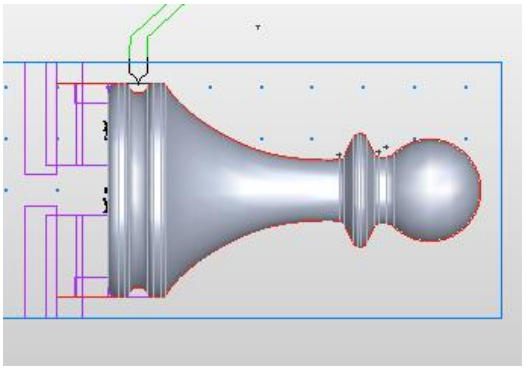


a_p	proměnlivé
f	0,2 mm/ot
v_c	150 m/min
Přídavek v X	0,2 mm
Přídavek v Z	0,2 mm
Nástroj	SDJCL

Obr. 24 Pěšec - operační úsek 30

3.6.3.4. Operační úsek 40

V této strategii dochází k hrubování „nohy“. Cílem této strategie je zajistit stejný přídavek pro obrábění na čisto. Úhel nájezdu je nastaven na 0° a úhel výjezdu na 80°. Nástroj se pohybuje od čela směrem k vřetenu.

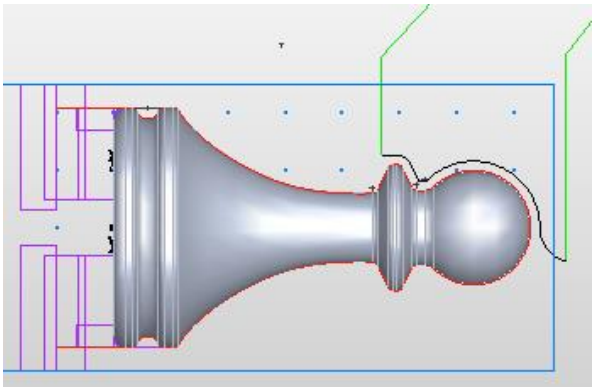


a_p	1,25 mm
f	0,2 mm/ot
v_c	150 m/min
Přídavek v X	0,2 mm
Přídavek v Z	0,2 mm
Nástroj	SVVCN

Obr. 25 Pěšec - operační úsek 40

3.6.3.5. Operační úsek 50

Jedná se o obrábění „hlavy“ pěšce na čisto. Zde se snažím získat co nejlepší povrch. Důvodem je, aby se pěšec dal rychle vyleštit. Nájezd je řešen tangenciálně, úhle oblouku je 75°, rádius oblouku je 3 mm a výjezd je řešen lineárně pod úhlem 180° a délce 1 mm. Důvodem je zamezení viditelnosti napojování nástrojů při obrábění na čisto. Kvůli limitování stroje raději volím konstantní otáčky vřetene. Mohlo by totiž dojít k zastavení posuvu nástroje, nástroj by zůstal v řezu a vřeteno by se snažilo udržet požadovanou řeznou rychlost. To by mohlo mít vliv na kvalitu povrchu.

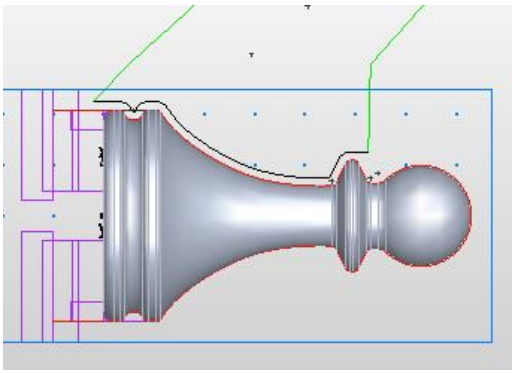


a_p	0,2 mm
f	0,1 mm/ot
n	3500 ot/min
Přídavek v X	0 mm
Přídavek v Z	0 mm
Nástroj	SVJBL

Obr. 26 Pěšec - operační úsek 50

3.6.3.6. Operační úsek 60

Při tomto operační úseku dochází k obrábění na čisto zbylé části figurky. Nástroj se pohybuje od čela směrem k vřetenu. Nájezd i výjezd je řešen lineárně, kdy délka úsečky je 2 mm. Úhel nájezdu je 0° a úhel výjezdu je 180°. Důvodem je, aby nástroj najížděl mimo obrobek a napojoval se ve „vzduchu“.

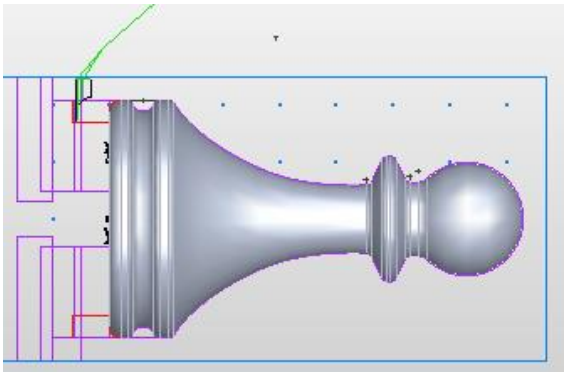


a_p	0,2 mm
f	0,1 mm/ot
n	3500 ot/min
Přídavek v X	0 mm
Přídavek v Z	0 mm
Nástroj	SVVCN

Obr. 27 Pěšec - operační úsek 60

3.6.3.7. Operační úsek 70

Při tomto operačním úseku dochází k obrábění rádiusu spodní části pěšce. Využívá se upichovací nůž. Tento operační úsek se využívá rovnou na obrábění na čisto.

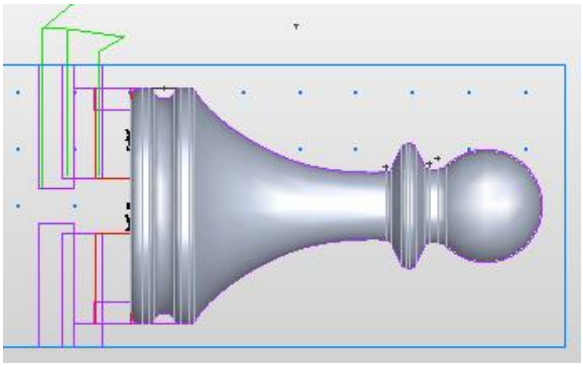


a_p	2 mm
f	0,05 mm/ot
v_c	120 m/min
Přídavek v X	0 mm
Přídavek v Z	0 mm
Nástroj	TGSU

Obr. 28 Pěšec - operační úsek 70

3.6.3.8. Operační úsek 80

Z předchozích zkušeností vytváříme větší úpich. Jedná se o technologickou pomůcku pro snadnější leštění figurek. V předchozí výrobě figurek docházelo občas k odlomení úpichu na straně figurky – tudíž jsme nebyli schopni provádět leštění těchto figurek.

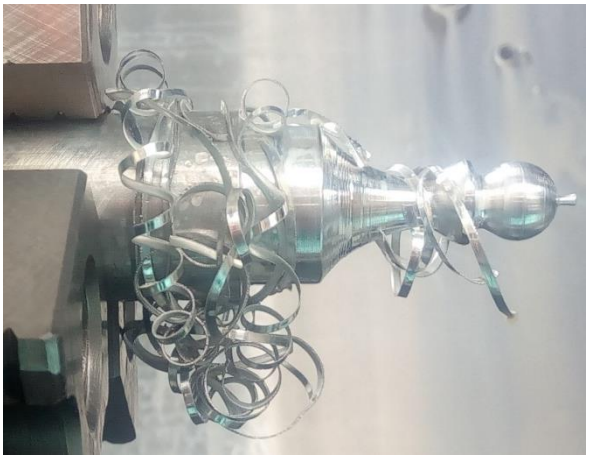


a_p	2 mm
f	0,05 mm/ot
v_c	120 m/min
Přídavek v X	0 mm
Přídavek v Z	0 mm
Nástroj	TGSU

Obr. 29 Pěšec - operační úsek 80

3.6.3.9. Shrnutí obrábění pěšce

Délka obrábění 1 minuta 56 sekund. Špatná tvorba třísky. Kvalita povrchu po obrábění na čisto není dostatečná.



Obr. 30 Obrábění pěšce

3.6.4. Optimalizace obráběcího procesu pěšce

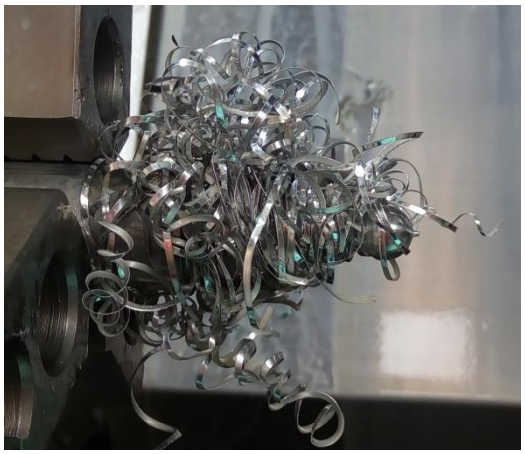
3.6.4.1. První pokus optimalizace

Po konzultaci bylo navrženo snížení posuvů u vybraných operací.

Operační úsek 10	V tomto operačním úseku došlo ke změně hodnoty posuvu na 0,1 mm/ot.
Operační úsek 20	V tomto operačním úseku došlo ke změně hodnoty posuvu na 0,1 mm/ot.
Operační úsek 30	V tomto operačním úseku došlo ke změně konstantní řezné rychlosti na konstantní otáčky vřetene na 3500 ot/min. Také došlo ke snížení posuvu na 0,05 mm/ot.
Operační úsek 40	V tomto operačním úseku došlo ke změně hodnoty posuvu na 0,1 mm/ot.
Operační úsek 50	V tomto operačním úseku došlo ke snížení posuvu na 0,05 mm/ot.
Operační úsek 60	V tomto operačním úseku došlo ke snížení posuvu na 0,05 mm/ot.
Operační úsek 80	V tomto operačním úseku došlo ke změně konstantní řezné rychlosti na konstantní otáčky.

3.6.4.2. Zhodnocení první optimalizace

Délka obrábění 2 minuty 52 sekund. Kvalita povrchu po obrobení na čisto není dostatečná. Špatná tvorba třísky.



Obr. 31 Obrábění pěšce - první pokus optimalizace

3.6.4.3. Druhý pokus optimalizace

Operační úsek 10 — V tomto operačním úseku došlo ke změně hodnoty posuvu na 0,3 mm/ot.

Operační úsek 50 — V tomto operačním úseku došlo ke snížení posuvu na 0,02 mm/ot.

Operační úsek 60 — V tomto operačním úseku došlo ke snížení posuvu na 0,02 mm/ot.

3.6.4.4. Zhodnocení druhé optimalizace:

Doba obrábění 2 minuty 34 sekund. Při operačním úseku 50 došlo k vibracím v části obrobku. Špatná tvorba třísky.

Obr. 32 Obrábění pěšce - druhý pokus optimalizace

3.6.4.5. Třetí pokus optimalizace

Operační úsek 50 V tomto operačním úseku došlo ke snížení otáček na 2000 ot/min.

Operační úsek 60 V tomto operačním úseku došlo ke snížení otáček na 2000 ot/min

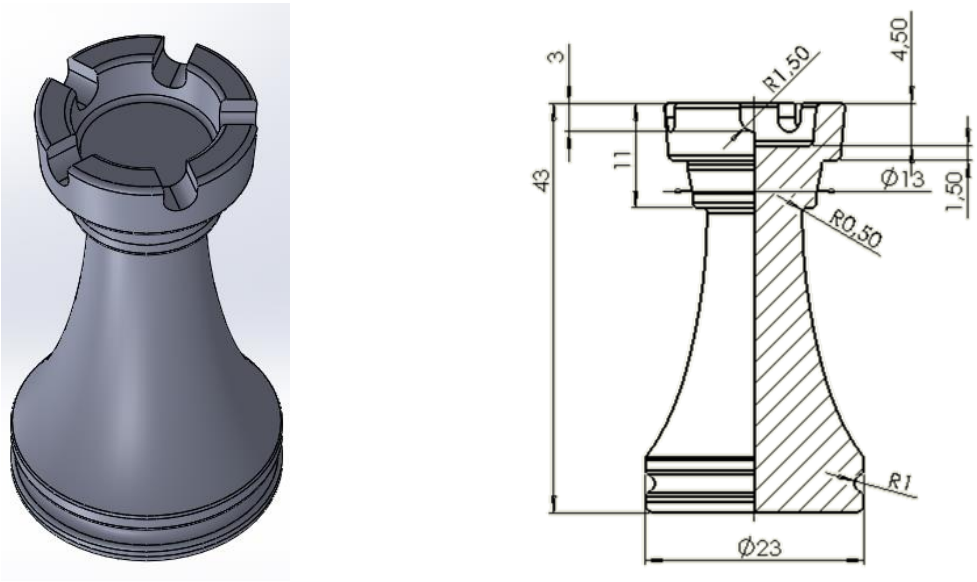
3.6.4.6. Zhodnocení třetí optimalizace:

Doba obrábění 3 minuty 6 sekund.Kvalita povrchu je přijatelná.

Obr. 33 Obrábění pěšce - třetí pokus optimalizace

3.7. Věž

3.7.1. První návrh figurky věže



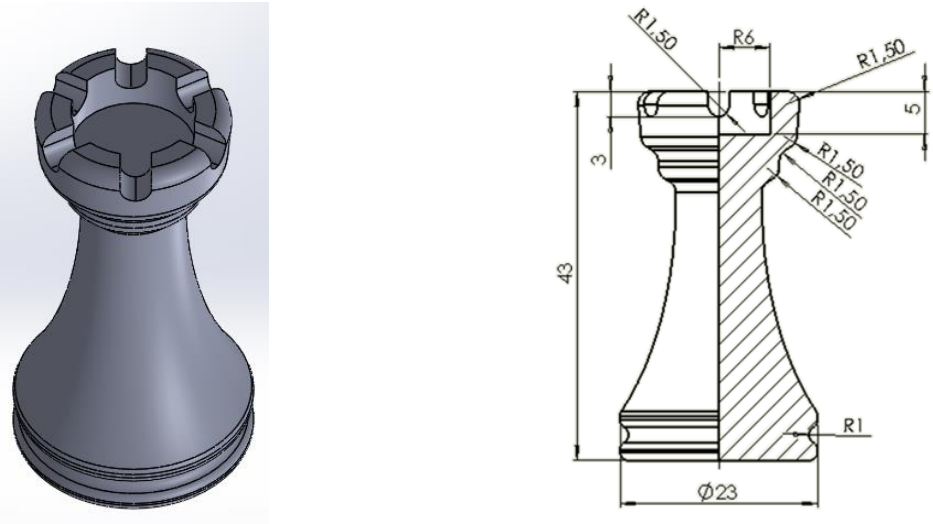
Obr. 34 První návrh věže

Hlavní problémy při výrobě figurky:

- Podřezání
- Nevhodné utváření třísky
- Vibrace
- Kvalita povrchu

Při obrábění návrhu této figurky jsem zjistil, že technologicky není možné se zvolenými nástroji tuto figurku vyrobit a muselo dojít k částečnému zjednodušení „díry“. Díra se nakonec dělala válcovou čelní frézou o průměru 12 mm. To znamená, že vnitřek ochozu nebyl kuželový, ale válcový. Dále se při obrábění v horní části vyskytovaly vibrace. Dále byla doporučena vedoucím Ústavu obrábění, projektování a metrologie úprava designu figurky.

3.7.2. Úprava návrhu figurky věže



Obr. 35 Upravený návrh věže

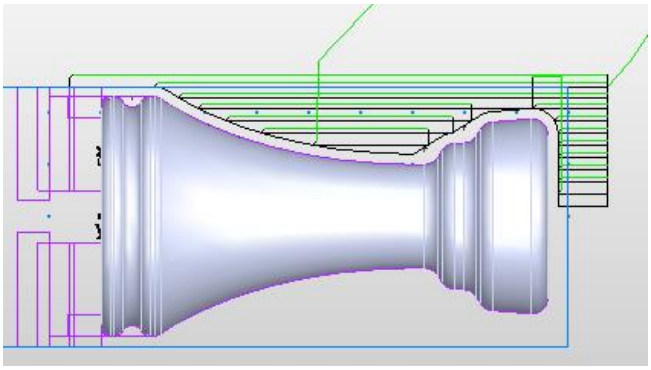
„Ochoz“ byl upraven na válcovou čelní frézu o průměru 12 mm. Dále byly udělány hladší přechody pod „ochozem“. Dále byl upraven souřadnicový systém modelu, kdy se osa Z stala osou symetrie obrobku. „Okénka“ byla rozměrově navržena tak, aby válcová čelní fréza o průměru 3 mm mohla tato okénka obrábět. Může dojít i ke zvětšení daných okének kvůli obrábění na čisto.

3.7.3. Výroba upravené figurky věže

Polotovarem pro výrobu věže je tyč o průměru 25 mm. Na výrobu jedné věže se spotřebuje 53,05 mm.

3.7.3.1. Operační úsek 10

První operační úsek je určen pro hrubování celé délky figurky. Nástroj se pohybuje od čela směrem k vřetenu. Úhel nájezdu je nastaven na 0° a úhel výjezdu je nastaven na hodnotu 45°. Po tomto operačním úseku dojde k frézování, jak axiálnímu, tak i radiálnímu.

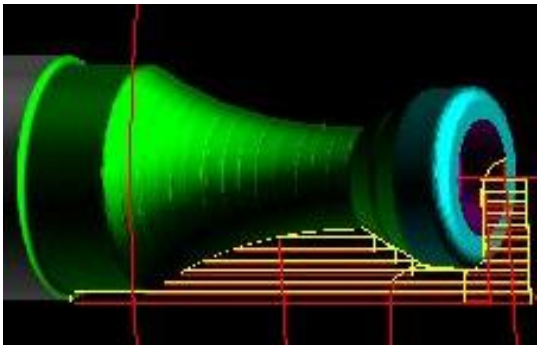


a_p	1,25 mm
f	0,2 mm/ot
v_c	150 m/min
Přídavek v X	0,2 mm
Přídavek v Z	0,2 mm
Nástroj	PDJNL

Obr. 36 Věž - operační úsek 10

3.7.3.2. Operační úsek 20

Jedná se o axiální frézování. Využívám válcovou čelní frézu o průměru 12 mm. Jeden zub je přes střed nástroje, tudíž se s tímto nástrojem dá i vrtat. Vrtáme v ose Z, kde vytvoříme vnitřek ochozu. „Vrtáme“ s výplachem po 2 mm do celkové hloubky 5,2 mm.

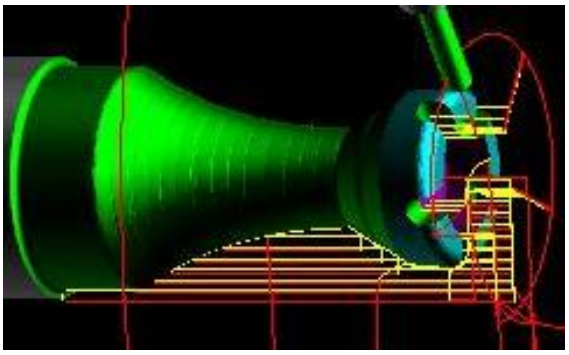


a_p	1 mm
f	0,02 mm/ot
v_c	80 m/min
Přídavek v X	0 mm
Přídavek v Z	0 mm
Nástroj	3366-12,0

Obr. 37 Věž - operační úsek 20

3.7.3.3. Operační úsek 30

Jedná se opět o frézování, které bylo programováno na stroji. Tentokrát se jedná o frézování radiální válcovou čelní frézou o průměru 3 mm. Zde dochází k výrobě „okének“ nahrubo. Jedná se o frézování sousledné. Nástroj najíždí do materiálu po úsečkách.

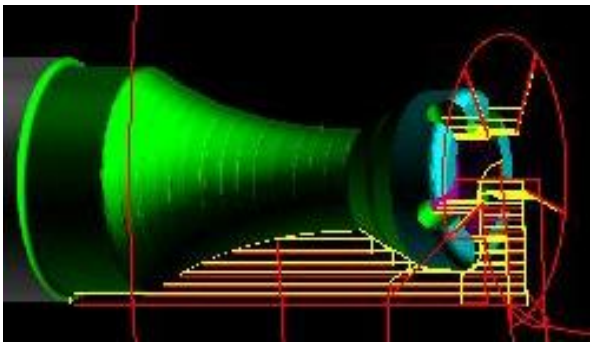


a_p	1,2 mm
f	0,006 mm/ot
v_c	50 m/min
Přídavek v X	0 mm
Přídavek v Z	0 mm
Nástroj	233418.030

Obr. 38 Věž - operační úsek 30

3.7.3.4. Operační úsek 40

Zde navazuje frézování na čisto stejným nástrojem. Nenajíždí již po úsečkách, ale opisuje rádiusovou drážku o rádiusu R1,6.

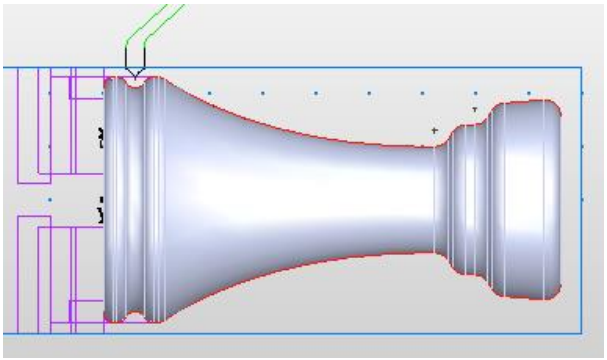


a_p	0,1 mm
f	0,001 / 0,005 mm/ot
v_c	50 m/min
Přídavek v X	0 mm
Přídavek v Z	0 mm
Nástroj	233418.030

Obr. 39 Věž - operační úsek 40

3.7.3.5. Operační úsek 50

V tomto operačním úseku dochází k hrubování „nohy“. Nástroj se pohybuje od čela směrem k vřetenu. Úhel nájezdu je nastaven na hodnotu 0° a úhel výjezdu je nastaven na hodnotu 90°.

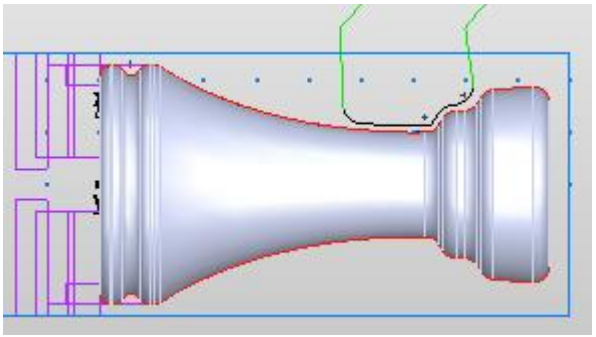


a_p	1,25 mm
f	0,2 mm/ot
v_c	150 m/min
Přídavek v X	0,2 mm
Přídavek v Z	0,2 mm
Nástroj	SVVCN

Obr. 40 Věž - operační úsek 50

3.7.3.6. Operační úsek 60

Při prvním hrubování (operační úsek 10) nástroj nezajistí všude stejný přídavek, a proto volím tuto strategii. Nástroj se pohybuje od vřetena směrem k čelu. Nájezd i výjezd je řešen tangenciálně (obloukem). Úhle oblouku nájezdu je 65°, úhel oblouku výjezdu je nastaven na 75°. Rádius obou oblouků je nastaven na hodnotu 2 mm.

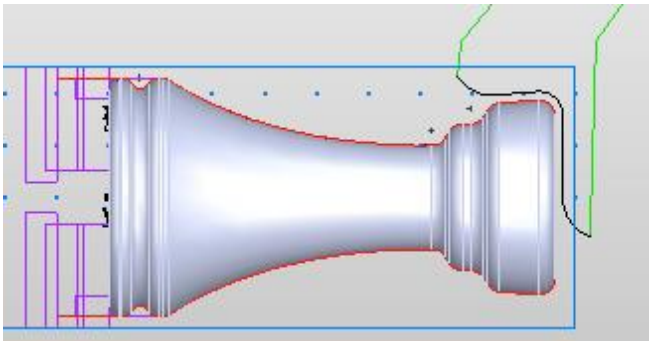


a_p	proměnlivé
f	0,2 mm/ot
v_c	150 m/min
Přídavek v X	0,2 mm
Přídavek v Z	0,2 mm
Nástroj	SDJCL

Obr. 41 Věž - operační úsek 60

3.7.3.7. Operační úsek 70

V tomto operačním úseku dochází k obrábění na čisto. Velký problém bylo hledání místa, kde by bylo vhodné napojování jiného nástroje pro obrobení na čisto zbylé části figurky. Nástroj se pohybuje od čela směrem k vřetenu. Nájezd i výjezd je řešen tangenciálně. Úhel oblouku nájezdu je 70° a úhel výjezdu je 65°. Rádius oblouku je nastaven na 4 mm.

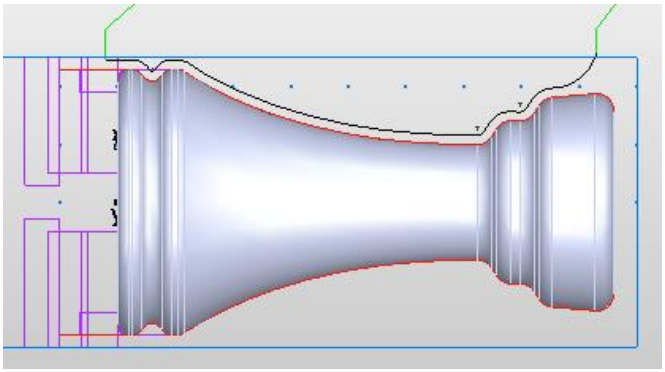


a_p	0,2 mm
f	0,1 mm/ot
n	4000 ot/min
Přídavek v X	0 mm
Přídavek v Z	0 mm
Nástroj	SVJBL

Obr. 42 Věž - operační úsek 70

3.7.3.8. Operační úsek 80

V tomto operačním úseku dochází k obrábění na čisto zbylé části figurky. Nástroj se pohybuje od čela směrem k vřetenu. Nájezd je řešen tangenciálně. Úhel nájezdu je 70° a rádius oblouku je 4 mm. Výjezd je řešen lineárně. Úhel výjezdu je nastaven na hodnotu 180° a délka je 1 mm.

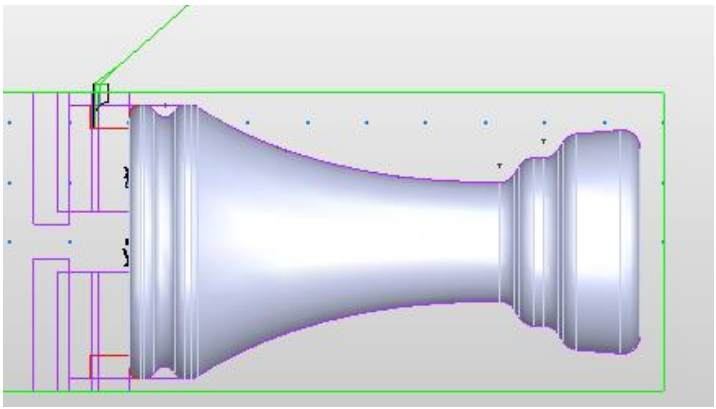


a_p	0,2 mm
f	0,1 mm/ot
n	4000 ot/min
Přídavek v X	0 mm
Přídavek v Z	0 mm
Nástroj	SVVCN

Obr. 43 Věž - operační úsek 80

3.7.3.9. Operační úsek 90

Při tomto operačním úseku dochází k obrábění rádiusu spodní části věže. Využívá se upichovací nůž. Tento operační úsek se využívá rovnou na obrábění na čisto.

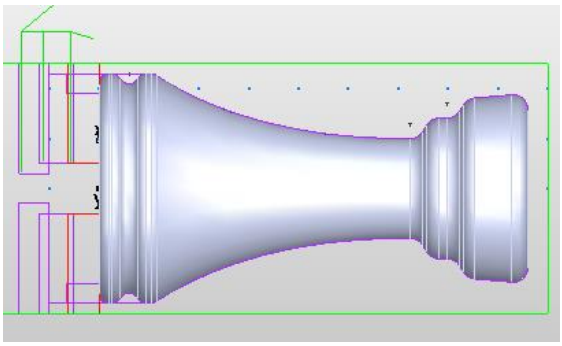


a_p	2 mm
f	0,05 mm/ot
v_c	120 m/min
Přídavek v X	0 mm
Přídavek v Z	0 mm
Nástroj	TGSU

Obr. 44 Věž - operační úsek 90

3.7.3.10. Operační úsek 100

Z předchozích zkušeností vytváříme větší úpich. Jedná se o technologickou pomůcku pro snadnější leštění figurek. V předchozí výrobě figurek docházelo občas k odlomení úpichu na straně figurky – tudíž jsme nebyli schopni provádět leštění těchto figurek.



a_p	2 mm
f	0,05 mm/ot
v_c	120 m/min
Přídavek v X	0 mm
Přídavek v Z	0 mm
Nástroj	TGSU

Obr. 45 Věž - operační úsek 100

3.7.3.11. Shrnutí obrábění věže

Doba obrábění je 5 minut 31 sekund. V oblasti „ochozu“ jsou znatelné vibrace. Špatně utvářená tříska.

Obr. 46 Obrábění věže

3.7.4. Optimalizace obráběcího procesu věže

3.7.4.1. První pokus optimalizace

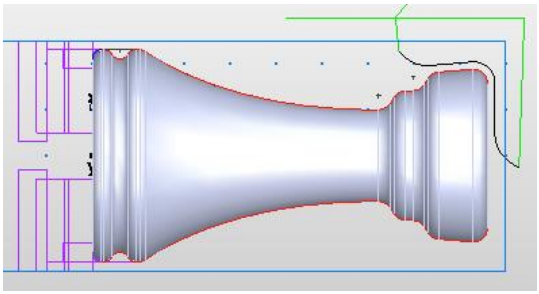
Z předešlého obrábění jsem zjistil, že dochází k vibracím v oblasti „ochozu“. Díky vibracím dochází k znehodnocení kvality povrchu. Zkusím změnit nástroj, který tuto část obrábí na čisto. Tím se pokusím zjistit, zda to je tuhostí obrobku nebo zda to je způsobeno geometrií nástroje nebo tuhostí tohoto nástroje. Dále došlo k prohození operačního úseku 60 (obrábění na čisto „ochoz“) před operačním úsekem 20 (axiální frézování). Dále došlo při obrábění na čisto ke snížení otáček na hodnotu 3500 ot/min.

Pro zrychlení výroby jsem posunul operační úsek 40 (hrubování nohy) před operační úsek 70, tak aby nástroj SVVCN nejdříve vyhruboval „nohu“ a hned navázal na obrábění na čisto zbytku figurky.

Dále byla změněna hodnota přídavku na čisto a to na hodnotu 0,1 mm.

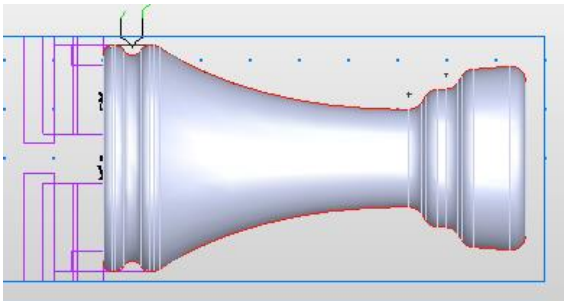
Operační úsek 10 Zůstává stejná jako v původní variantě. Pouze došlo ke snížení posuvu na hodnotu 0,1 mm/ot.

Operační úsek 20 Jedná se o operační úsek 60 z původní varianty. Zde došlo ke změně nástroje ze SVJBL na PDJNL. Otáčky byly nastaveny na hodnotu 3500 ot/min.



Obr. 47 Věž - první pokus optimalizace - operační úsek 20

Operační úsek 70 Došlo ke snížení posuvu na 0,1 mm/ot.



Obr. 48 Věž - první pokus optimalizace - operační úsek 70

Operační úsek 80 Byl snížen posuv na hodnotu 0,02 mm/ot. Také byly sníženy otáčky na hodnotu 3000 ot/min.

Operační úsek 90 Konstantní řezná rychlost byla změněna na konstantní otáčky. Otáčky jsou nastaveny na 1600 ot/min.

Zhodnocení optimalizace:

Doba obrábění 6 minut 59 sekund. V horní části figurky jsou patrné vibrace. Špatné utváření třísky.

Obr. 49 Obrábění věže - první pokus optimalizace

3.7.4.2. Druhý pokus optimalizace

Většina programu ponechána beze změny. Byla provedena pouze úprava hodnoty otáček u vybraných operačních úseků.

Operační úsek 70	Otáčky byly sníženy na hodnotu 1800 ot/min.

Zhodnocení optimalizace:

Doba obrábění 8 minut a 1 sekunda.

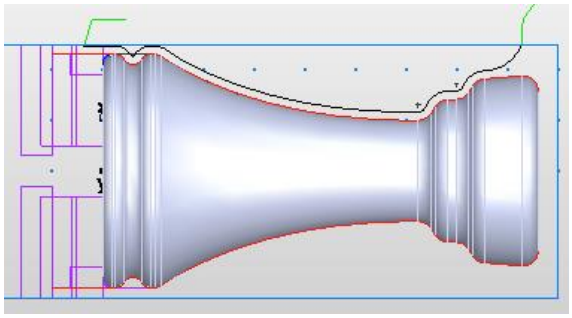
Vibrace již nebyly zaznamenány. Stále je vidět napojení různých nástrojů při obrábění na čisto.

Obr. 50 Obrábění věže - druhý pokus optimalizace

3.7.4.3. Třetí pokus optimalizace

Stále je vidět napojení nástrojů při obrábění na čisto. Proto došlo ke změně pohybu nástroje.

Operační úsek 70 Nástroj se v předchozích variantách pohyboval od čela směrem k vřetenu. V této verzi se nástroj pohybuje od vřetena směrem k čelu.



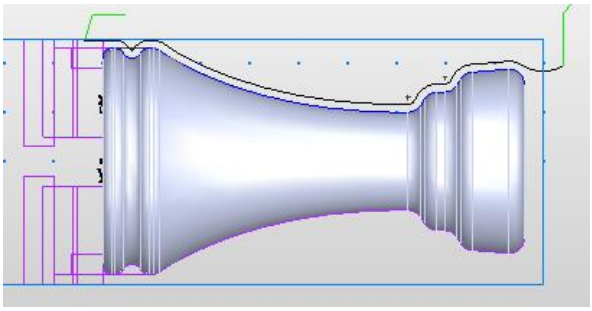
Obr. 51 Věž - třetí pokus optimalizace - operační úsek 70

Zhodnocení optimalizace:

Doba obrábění je 7 minut 29 sekund. Napojení nástrojů je stále patrné.

3.7.4.4. Čtvrtý pokus optimalizace

Operační úsek 70 Problém stále přetrvává. Opět měním místo možného napojení nástrojů. Řezné podmínky jsou s ohledem na kvalitu povrchu přijatelné. Jiné úpravy se v této verzi nedělaly.

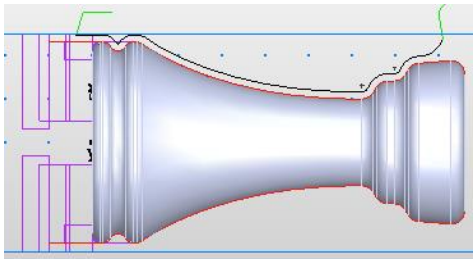


Obr. 52 Věž - čtvrtý pokus optimalizace - operační úsek 70

3.7.4.5. Pátý pokus optimalizace

Napojení je stále vidět. Po konzultaci této problematiky se vracím k třetí optimalizaci, kde zkusím změnit geometrii výjezdu.

Operační úsek 70 — Ve zmíněné verzi byl výjezd tangenciální a úhel oblouku byl 65° a rádius oblouku byl 4 mm. V této verzi měním rádius oblouku na hodnotu 3 mm.



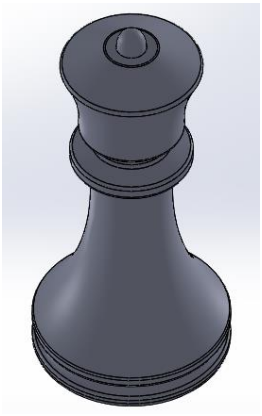
Obr. 53 Věž - pátý pokus optimalizace - operační úsek 70

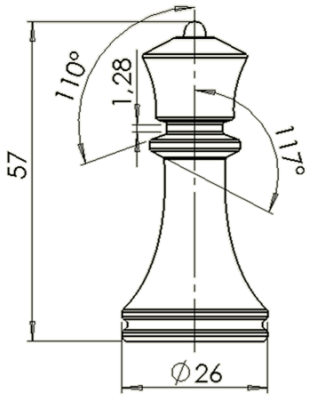
Zhodnocení optimalizace:

Napojení nástrojů je viditelné, ale při leštění jej lze odstranit. Doba obrábění 7 minut a 22 sekund.

3.8. Střelec

3.8.1. První návrh figurky střelce





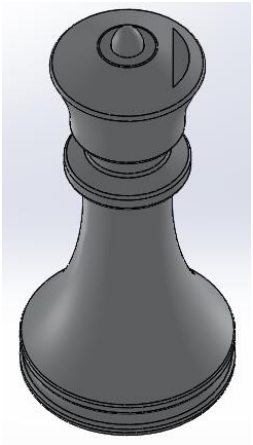
Obr. 54 První návrh střelce

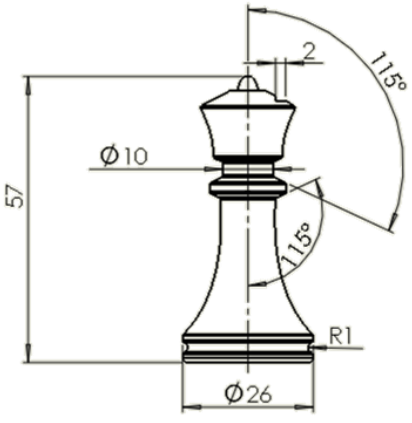
Hlavní problémy při výrobě figurky:

- Podřezání
- Nevhodné utváření třísky
- Vibrace
- Kvalita povrchu

Kvůli podřezání došlo k úpravě designu figurky v oblasti „krku“.

3.8.2. Úprava návrhu figurky střelce





Obr. 55 Upravený návrh střelce

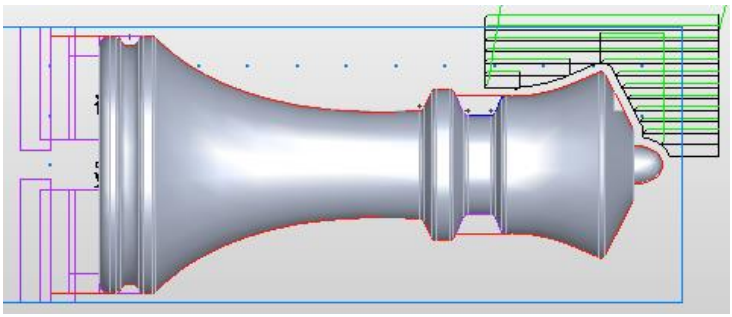
Došlo k prodloužení „krčku“. Dále se upravily úhly v oblasti „ramen“. Přibyla také drážka, která bývá pro střelce typická.

3.8.3. Výroba upravné figurky střelce

Polotovarem pro výrobu figurky střelce je tyč o průměru 28 mm. Na výrobu jednoho střelce se spotřebuje 67,1 mm.

3.8.3.1. Operační úsek 10

V tomto operačním úseku dochází k hrubování části figurky. Hrubuje se jen část figurky kvůli zajištění dostatečné tuhosti obrobku. Tuhost mě zajímá kvůli následujícímu frézování drážky. Nájezd a výjezd je lineární. Úhel nájezdu je nastaven na hodnotu 0° a úhel výjezdu je nastaven na hodnotu 45°. Nástroj se pohybuje od čela směrem k vřetenu.

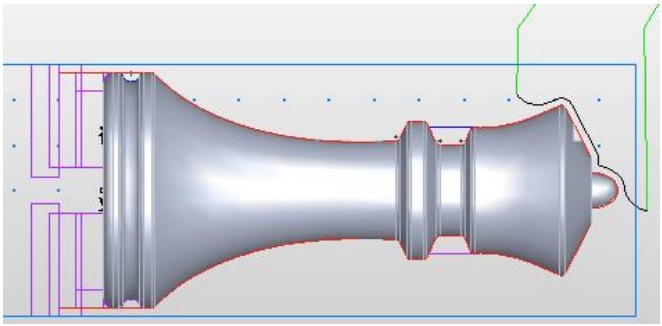


a_p	1,25 mm
f	0,1 mm/ot
v_c	150 m/min
Přídavek v X	0,1 mm
Přídavek v Z	0,1 mm
Nástroj	PDJNL

Obr. 56 Střelec - operační úsek 10

3.8.3.2. Operační úsek 20

V tomto operačním úseku dochází k obrábění na čisto. Obrábí se jen část „hlavy“ figurky. Nájezd je řešen tangenciálně. Úhel nájezdu je 75° a rádius oblouku je nastaven na 3 mm. Stejně je nastaven výjezd. Nástroj se pohybuje od čela směrem k vřetenu.

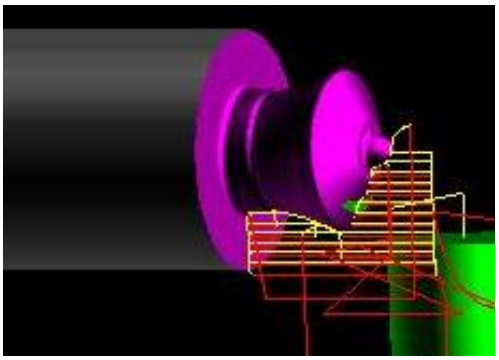


a_p	0,1 mm
f	0,05 mm/ot
n	4000 ot/min
Přídavek v X	0 mm
Přídavek v Z	0 mm
Nástroj	SVJBL

Obr. 57 Střelec - operační úsek 20

3.8.3.3. Operační úsek 30

V tomto operačním úseku dochází k frézování drážky na „hlavě“ figurky střelce. K frézování je využita válcová čelní fréza o poloměru 18 mm. Frézuje se radiálně a sousledně.

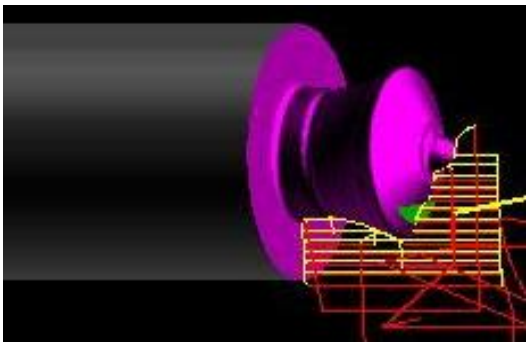


a_p	5 mm
f	0,06 mm/ot
v_c	60 m/min
Přídavek v X	0,2 mm
Přídavek v Z	0,2 mm
Nástroj	110418.18
	0

Obr. 58 Střelec - operační úsek 30

3.8.3.4. Operační úsek 40

Tento operační úsek navazuje na předchozí operační úsek. Zde obrábíme již na čisto drážku střelce. Frézuje se sousledně.

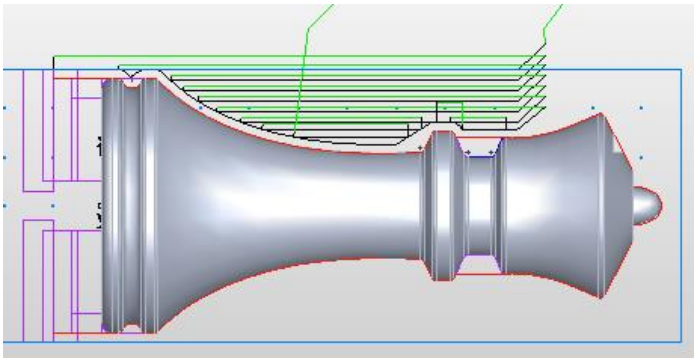


a_p	0,2 mm
f	0,02 mm/ot
v_c	70 m/min
Přídavek v X	0 mm
Přídavek v Z	0 mm
Nástroj	110418.18
	0

Obr. 59 Střelec - operační úsek 40

3.8.3.5. Operační úsek 50

V této části dochází k hrubování zbylé části figurky střelce. Nájezd i výjezd je řešen lineárně. Úhel nájezdu je nastaven na 60°. Úhel výjezdu je nastaven na 75°. Nástroj se pohybuje od čela směrem k vřetenu.



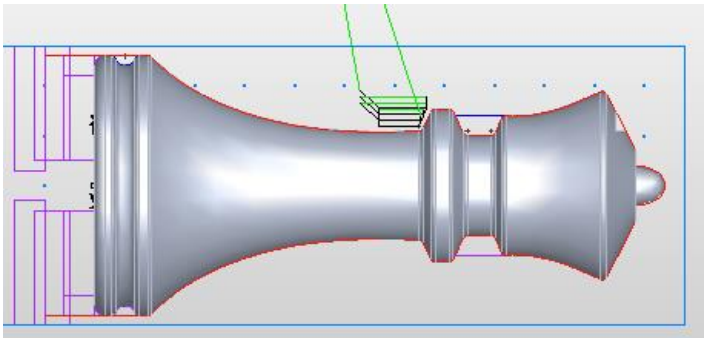
a_p	1,25 mm
f	0,1 mm/ot
v_c	150 m/min
Přídavek v X	0,1 mm
Přídavek v Z	0,1 mm
Nástroj	PDJNL

Obr. 60 Střelec - operační úsek 50

3.8.3.6. Operační úsek 60

Z předešlého operačního úseku je vidět, že zůstává větší přídavek na čisto, než je požadovaný přídavek. Proto volím tuto strategii, aby došlo k zajištění konstantního přídavku na čisto. Nástroj se pohybuje od vřetena směrem k čelu figurky. Úhel nájezdu je nastaven na hodnotu 90°. Stejně je nastaven i úhel výjezdu.

Ze simulace je vidět, že nástroj odebere přebytečný materiál a zajistí konstantní přídavek na čisto.

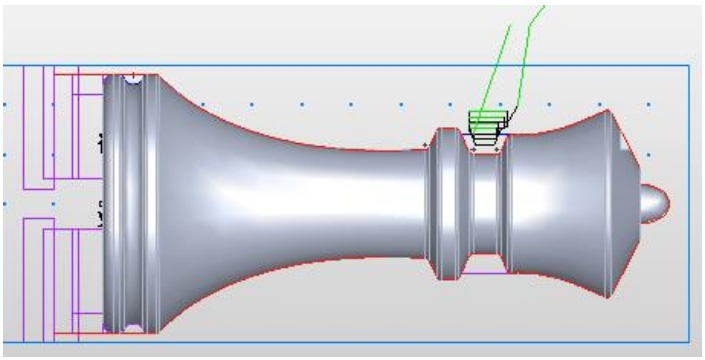


a_p	0,75 mm
f	0,1 mm/ot
v_c	150 m/min
Přídavek v X	0,1 mm
Přídavek v Z	0,1 mm
Nástroj	SDJCL

Obr. 61 Střelec - operační úsek 60

3.8.3.7. Operační úsek 70

Z předešlých operací je zřejmé, že nedochází k hrubování „krčku“ figurky střelce. Proto volím tuto strategii, která zajistí konstantní přídavek na čisto. Dochází k tomu až v tomto operačním úseku, z důvodu návaznosti nástroje SVVCN s dalšími operační úseky, které budou následovat. Nástroj se pohybuje od čela směrem k vřetenu. Nájezd i výjezd je řešen lineárně. Úhel nájezdu je nastaven na hodnotu 80° a úhel výjezdu je nastaven na hodnotu 90°. Byly zvoleny raději konstantní otáčky.

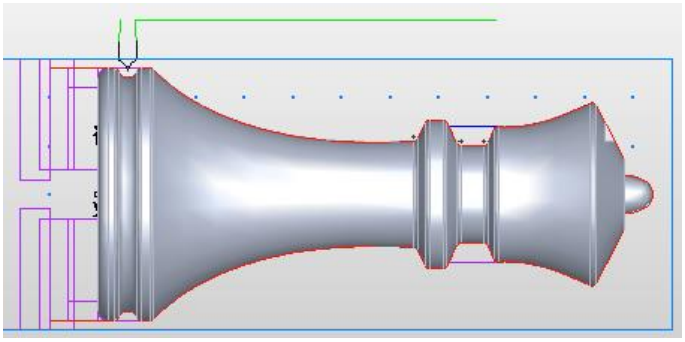


a_p	0,75 mm
f	0,1 mm/ot
n	3000 ot/min
Přídavek v X	0,1 mm
Přídavek v Z	0,1 mm
Nástroj	SVVCN

Obr. 62 Střelec - operační úsek 70

3.8.3.8. Operační úsek 80

Nástroj z předešlého operačního úseku neodjíždí do „bezpečí“, ale je využit hned v tomto operačním úseku, kdy dochází k hrubování „nohy“ figurky střelce. Nástroj se pohybuje od čela směrem k vřetenu. Nájezdy a výjezdy jsou lineární. Úhel nájezdu je nastaven na 0° a úhel výjezdu je nastaven na 90°.

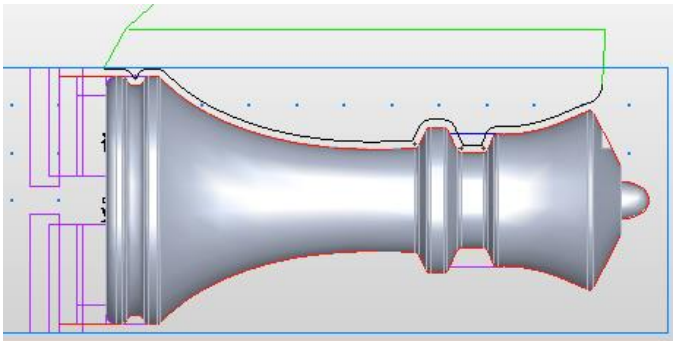


a_p	1,25 mm
f	0,1 mm/ot
v_c	150 m/min
Přídavek v X	0,1 mm
Přídavek v Z	0,1 mm
Nástroj	SVVCN

Obr. 63 Střelec - operační úsek 80

3.8.3.9. Operační úsek 90

V tomto operačním úseku dochází k obrábění na čisto zbývající části figurky střelce. Nástroj se pohybuje od čela směrem k vřetenu. Nájezd je nastaven tangenciální. Úhel nájezdu je nastaven na 75° a rádius oblouku je nastaven na 2 mm. Výjezd je lineární. Úhel výjezdu je nastaven na 180°, délka výjezdu je nastavena na 1 mm.

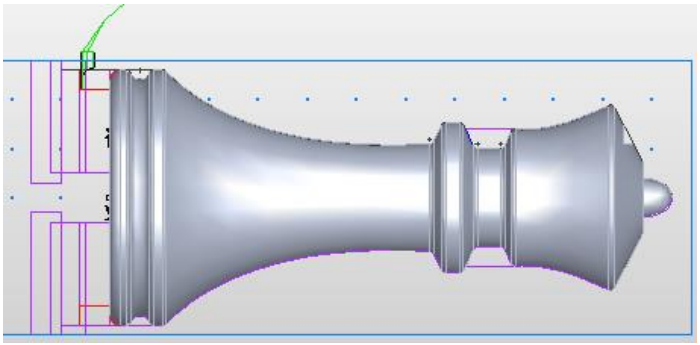


a_p	0,1 mm
f	0,05 mm/ot
n	3500 ot/min
Přídavek v X	0 mm
Přídavek v Z	0 mm
Nástroj	SVVCN

Obr. 64 Střelec - operační úsek 90

3.8.3.10. Operační úsek 100

Při tomto operačním úseku dochází k obrábění rádiusu spodní části střelce. Využívá se upichovací nůž. Tento operační úsek se využívá rovnou na obrábění na čisto. Z předešlých zkušeností volím konstantní otáčky vřetene.

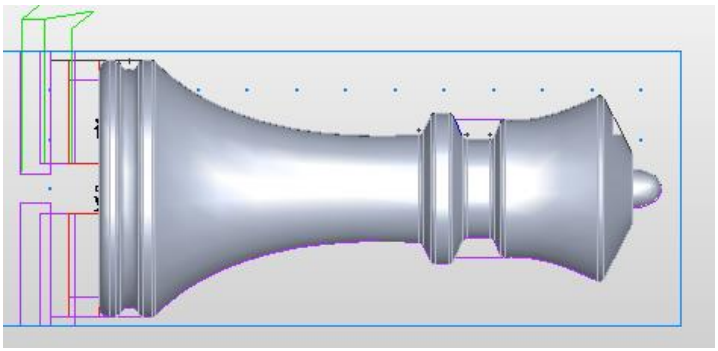


a_p	2 mm
f	0,05 mm/ot
n	1600 ot/min
Přídavek v X	0 mm
Přídavek v Z	0 mm
Nástroj	TGSU

Obr. 65 Střelec - operační úsek 100

3.8.3.11. Operační úsek 110

Z předchozích zkušeností vytváříme větší úpich. Jedná se o technologickou pomůcku pro snadnější leštění figurek. V předchozí výrobě figurek docházelo občas k odlomení úpichu na straně figurky – tudíž jsme nebyli schopni provádět leštění těchto figurek.



a_p	2 mm
f	0,05 mm/ot
n	1600 ot/min
Přídavek v X	0 mm
Přídavek v Z	0 mm
Nástroj	TGSU

Obr. 66 Střelec - operační úsek 110

3.8.3.12. Shrnutí obrábění střelce

Doba obrábění je 3 minuty a 5 sekund. Špatné utváření třísky. Vibrace znatelné téměř po celé délce figurky.

Obr. 67 Obrábění střelce

3.8.4. Optimalizace obráběcího procesu střelce

3.8.4.1. První pokus optimalizace

Operační úsek 20 — V tomto operačním úseku zkusím vyměnit dokončovací nástroj SVJBL za PDJNL, zda ovlivní kvalitu povrchu. Také jsem snížil hodnotu otáček na 3500 ot/min. Dále se upravoval počáteční a koncový bod.

Operační úsek 80 — V tomto operačním úseku oproti původní došlo ke změně hodnoty otáček. Otáčky byly změněny na hodnotu 1800 ot/min.

Zhodnocení optimalizace:

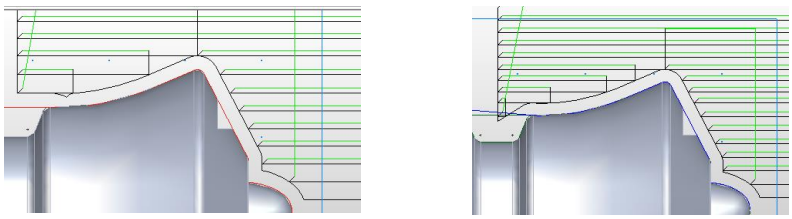
Doba obrábění je 6 minut 12 sekund. Vznik krčku (nejspíše způsobeno chybou v softwaru FEATURECAM). Nástroj není přesně v ose – zůstává ostrý výběžek. Znatelné vibrace pouze v horní části figurky.

Obr. 68 Obrábění střelce - první pokus optimalizace

3.8.4.2. Druhý pokus optimalizace

Operační úsek 10

Z předešlé optimalizace je zřejmé, že nástroj zajíždí do materiálu, kde ale nemá nic obrábět. Musí dojít ke změně křivky, která mu definuje oblast obrábění. Řezné podmínky zůstaly zachovány z předešlých variant.



Obr. 69 Střelec - druhý pokus optimalizace - operační úsek 10

Operační úsek 20

Nástroj byl změněn zpátky na SVJBL. Pro zajištění kvality povrchu byly sníženy otáčky na hodnotu 1000 ot/min a posuv byl snížen na hodnotu 0,02 mm/ot.

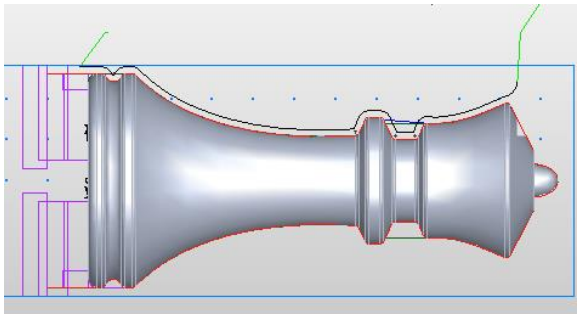
Operační úsek 60

Zde byly sníženy otáčky na hodnotu 2200 ot/min. Byly sníženy s ohledem na „špatné zvuky“ při obrábění.

Operační úsek 80

Zde byl otočen směr obrábění. Nástroj se pohybuje od vřetena směrem k čelu figurky. Nájezd je lineární. Úhel nájezdu je nastaven na 0° a délka je nastavena na 1 mm. Výjezd je nastaven na tangenciální. Úhel výjezdu je nastaven na 75° a rádius oblouku je nastaven na 2 mm. Otáčky byly sníženy na 1000 ot/min a posuv byl snížen na 0,02 mm/ot.

Dále se prodloužila oblast, kam až nástroj obrábí na čisto. Tím by mohlo dojít k odstranění viditelného napojení nástrojů.



Obr. 70 Střelec – druhý pokus optimalizace - operační úsek 80

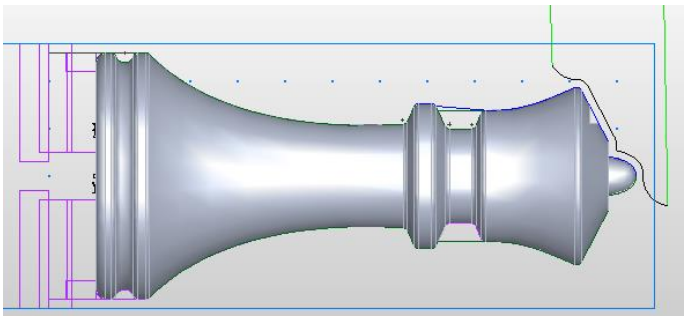
Zhodnocení optimalizace:

Doba obrábění 8 minut 22 sekund. Vibrace jsou již eliminovány. Špatná tvorba třísky. Je viditelné napojování nástrojů při obrábění na čisto.

Obr. 71 Obrábění střelce - druhý pokus optimalizace

3.8.4.3. Třetí pokus optimalizace

Operační úsek 20 Zde už jsou zachovány řezné podmínky z předešlé optimalizace, ale stále bylo vidět v předchozí optimalizaci napojení nástroje. Proto jsem v této verzi změnil oblast, kde se obrábí na čisto. Oblast je omezena na vnější zaoblení, kde by buď nebylo napojení vidět, nebo by toto napojení nebylo tolik viditelné.



Obr. 72 Střelec - třetí pokus optimalizace - operační úsek 20

Z přechozí optimalizace bylo obrábění na čisto zbylé části (operační úsek 80) již protaženo tak, aby došlo k obrobení na čisto celé figurky.

Zhodnocení optimalizace:

Doba obrábění je 8 minut a 32 sekund. Kvalita povrchu je přijatelná. Vibrace eliminovány. Špatné utváření třísky.

Obr. 73 Obrábění střelce - třetí pokus optimalizace

3.8.4.4. Čtvrtý pokus optimalizace

Operační úsek 10	Byl zvýšen posuv na 0,3 mm/ot.
Operační úsek 50	Byl zvýšen posuv na 0,3 mm/ot.

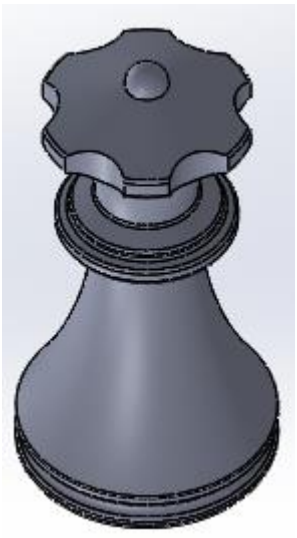
Zhodnocení optimalizace:

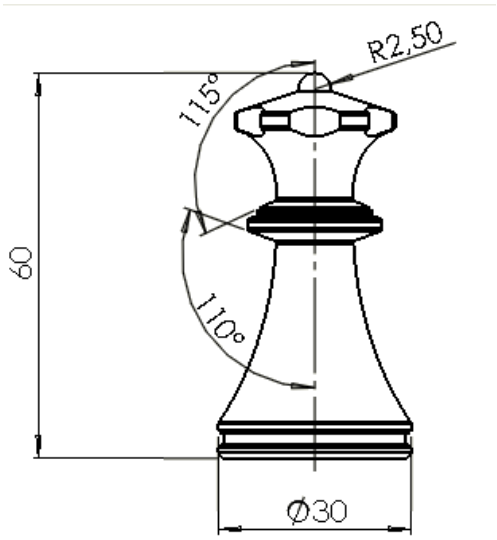
Dobré utváření třísky. Doba obrábění 7 minut 57 sekund.

Obr. 74 Obrábění střelce - čtvrtý pokus optimalizace

3.9. Královna

3.9.1. První návrh figurky



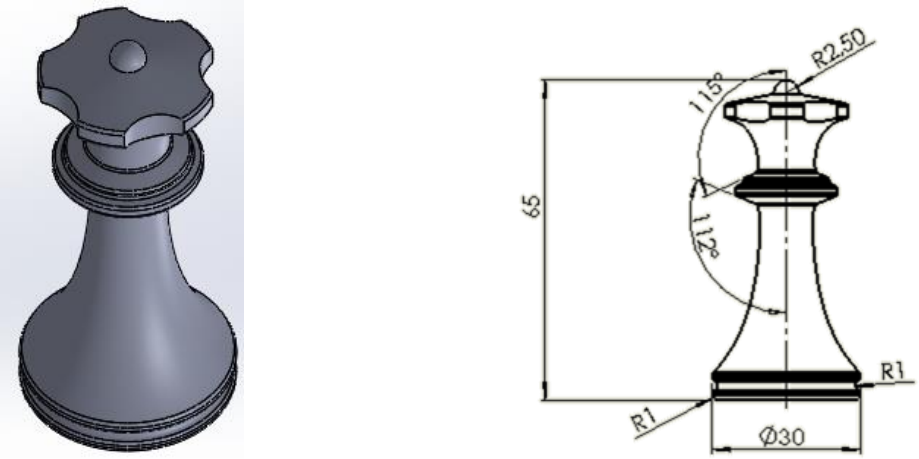


Obr. 75 První návrh královny

Hlavní problémy při výrobě figurky:

- Podřezání
- Nevhodné utváření třísky
- Vibrace
- Kvalita povrchu

3.9.2. Úprava návrhu figurky



Obr. 76 Upravený návrh královny

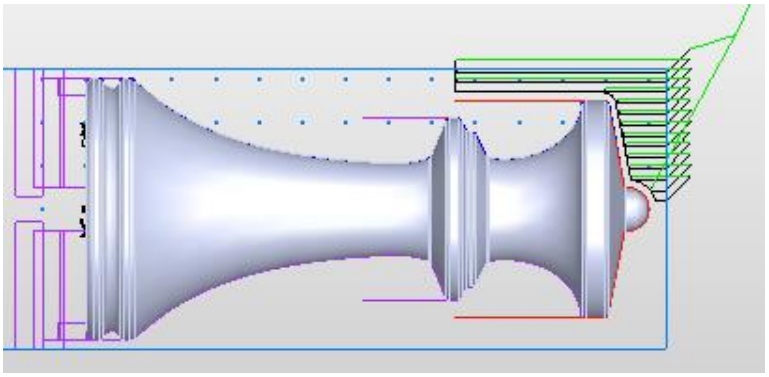
Úprava figurky se týkala hlavně úpravy výšky figurky. Dále se upravily úhly v oblasti ramen, protože v předchozí verzi docházelo k podřezání.

3.9.3. Výroba upravené figurky královny

Polotovarem pro výrobu figurky královny je tyč o průměru 32 mm. Na výrobu jedné královny se spotřebuje 75,1 mm.

3.9.3.1. Operační úsek 10

V tomto operačním úseku dochází k hrubování v oblasti „hlavy“. Nehrubuje se celá figurka, aby se zachovala dostatečná tuhost obrobku, protože po hrubování v oblasti „hlavy“ dojde k axiálnímu frézování v této oblasti. Nájezd i výjezd je řešen lineárně. Úhel nájezdu je nastaven na hodnotu 60° stejně je nastaven i úhel výjezdu. Nástroj se pohybuje od čela směrem k vřetenu.

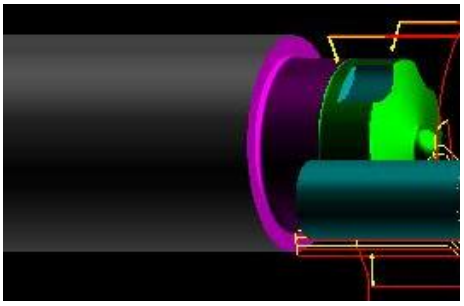


a_p	1,25 mm
f	0,1 mm/ot
v_c	150 m/min
Přídavek v X	0,1 mm
Přídavek v Z	0,1 mm
Nástroj	PDJNL

Obr. 77 Královna - operační úsek 10

3.9.3.2. Operační úsek 20

V tomto operačním úseku dochází k axiálnímu frézování válcovou čelní frézou o průměru 12 mm. Nejdříve se hrubuje po přímce. Pak následuje frézování na čisto. Fréza při frézování na čisto vytváří rádius o poloměru 6,1 mm. Důvodem je odstranění vrstvy po frézování na hrubo, aby vznikl hezký povrch.

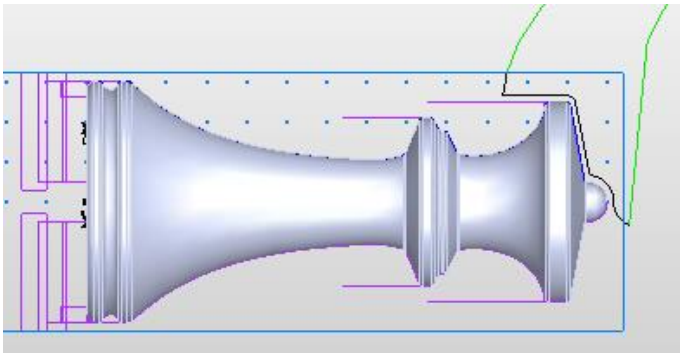


a_p	5/0,1 mm
f_{hrubo}	0,08 mm/z
$f_{čisto}$	0,002 mm/z
v_c	150 m/min
Nástroj	3366-12,0

Obr. 78 Královna - operační úsek 20

3.9.3.3. Operační úsek 30

Z předchozích zkušeností z výroby figurek je hodnota otáček již snižována při prvním pokusu výroby. V tomto operačním úseku dochází k obrábění na čisto v oblasti „hlavy“. Nástroj se pohybuje od čela směrem k vřetenu. Nájezd je řešen tangenciálně. Úhel oblouku je nastaven na 70° a rádius oblouku je nastaven na 3 mm. Výjezd je řešen lineárně. Úhel výjezdu je nastaven na 80° a délka výjezdu je 2 mm. Jsou nastaveny konstantní otáčky.



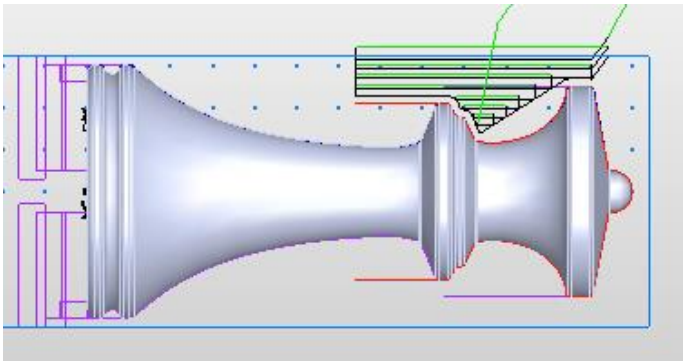
a_p	0,1 mm
f	0,02 mm/ot
n	1200 ot/min
Přídavek v X	0 mm
Přídavek v Z	0 mm
Nástroj	SVJBL

Obr. 79 Královna - operační úsek 30

3.9.3.4. Operační úsek 40

V tomto operačním úseku dochází k dalšímu hrubování části figurky. Hrubuje se opět jen část figurky, aby byla zajištěna dostatečná tuhost obrobku při následujících operacích. Nástroj se

pohybuje od čela směrem k vřetenu. Nájezd i výjezd je řešen lineárně. Úhel nájezdu i výjezdu je nastaven na 60°.

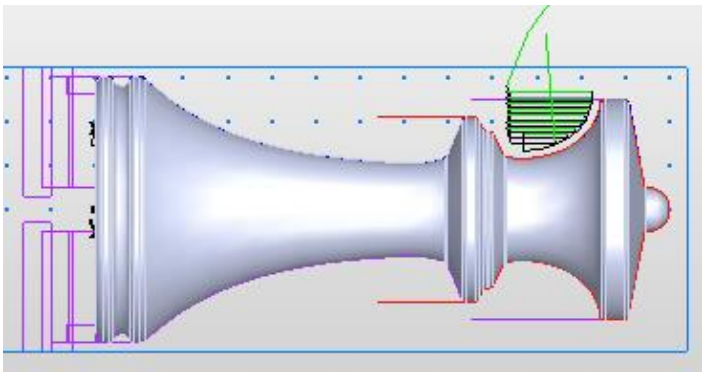


a_p	1,25 mm
f	0,1 mm/ot
v_c	150 m/min
Přídavek v X	0,1 mm
Přídavek v Z	0,1 mm
Nástroj	PDJNL

Obr. 80 Královna - operační úsek 40

3.9.3.5. Operační úsek 50

V tomto operačním úseku dochází k dalšímu hrubování v oblasti hlavy, aby se zajistil stejný přídavek na čisto. Tento operační úsek ale nezajistí v oblasti „ramen“ stejný přídavek, proto na tento operační úsek navazuje operační úsek 60, ve které dojde k zajištění stejného přídavku v této oblasti. Nájezd i výjezd je řešen lineárně. Úhel nájezdu je nastaven na 80°, stejně je nastaven i úhel výjezdu. Nástroj se pohybuje od vřetena směrem k čelu.

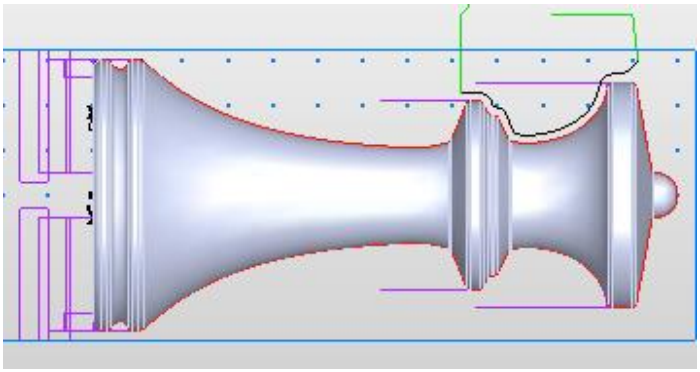


a_p	0,75 mm
f	0,1 mm/ot
v_c	150 m/min
Přídavek v X	0,1 mm
Přídavek v Z	0,1 mm
Nástroj	SVVCN

Obr. 81 Královna - operační úsek 50

3.9.3.6. Operační úsek 60

V tomto operačním úseku se využívá strategie před dokončení, díky které zajistím konstantní přídavek na čisto. Nástroj se pohybuje od čela směrem k vřetenu. Nájezd je řešen tangenciálně, úhel nájezdu je nastaven na 60°a rádius oblouku je nastaven na 3 mm. Výjezd je řešen lineárně, délka výjezdu je nastavena na 1 mm a úhel výjezdu je nastaven na 180°.

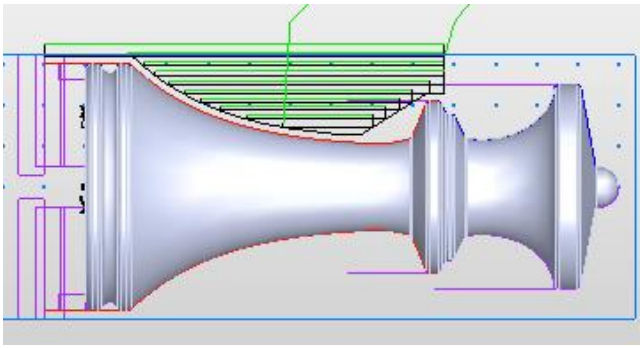


a_p	proměnlivá
f	0,05 mm/ot
n	1500 ot/min
Přídavek v X	0,1 mm
Přídavek v Z	0,1 mm
Nástroj	SVVCN

Obr. 82 Královna - operační úsek 60

3.9.3.7. Operační úsek 70

V tomto operačním úseku dochází k hrubování zbytku figurky královny. Nástroj se pohybuje od čela směrem k vřetenu. Nájezd i výjezd je nastaven lineární. Úhel nájezdu je nastaven na hodnotu 0° a úhel výjezdu je nastaven na 80°. Z dráhy nástroje je zřejmé, že nedojde k celému hrubování figurky. Proto musím přidat další operační úsek, který dohrubuje zbytek figurky a tím zajistí konstantní přídavek.

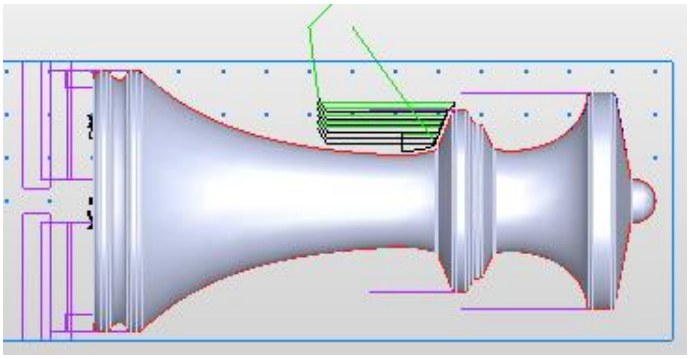


a_p	1,25 mm
f	0,1 mm/ot
v_c	150 m/min
Přídavek v X	0,1 mm
Přídavek v Z	0,1 mm
Nástroj	PDJNL

Obr. 83 Královna - operační úsek 70

3.9.3.8. Operační úsek 80

Touto operací došlo k dohrubování v části pod „rameny“. V dráze nástroje je ale vidět, že nástroj nechal ještě malou oblast. Proto volím ještě jeden operační úsek, který tuto malou oblast odstraní. Nájezd i výjezd je nastaven lineární. Úhel nájezdu je nastaven na 60°, úhel výjezdu je nastaven na 80°. Nástroj se pohybuje od vřetena směrem k čelu figurky.

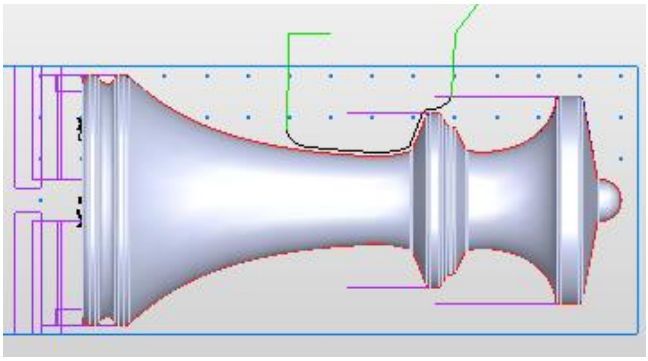


a_p	0,75 mm
f	0,1 mm/ot
v_c	150 m/min
Přídavek v X	0,1 mm
Přídavek v Z	0,1 mm
Nástroj	SDJCL

Obr. 84 Královna - operační úsek 80

3.9.3.9. Operační úsek 90

V tomto operačním úseku dojde k zajištění konstantního přídavku pod „rameny“. Nástroj z předchozího operačního úseku se nevrací do „bezpečí“, ale ihned navazuje na tento operační úsek. Nástroj se pohybuje od vřetena směrem k čelu. Nájezd i výjezd je nastaven tangenciálně. Úhel nájezdu je nastaven na 60°, stejný úhel je nastaven i u výjezdu nástroje. Rádius oblouků nájezdu i výjezdu je nastaven na 3 mm.

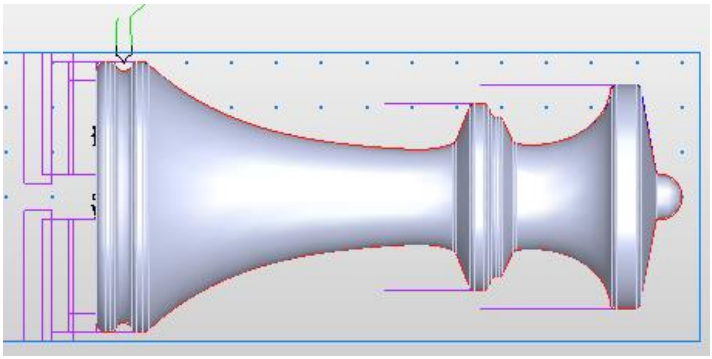


a_p	proměnlivá
f	0,1 mm/ot
n	3000 ot/min
Přídavek v X	0,1 mm
Přídavek v Z	0,1 mm
Nástroj	SDJCL

Obr. 85 Královna - operační úsek 90

3.9.3.10. Operační úsek 100

V tomto operačním úseku dochází k hrubování v oblasti „nohy“. Nástroj se pohybuje od čela směrem k vřetenu. Nájezd i výjezd je nastaven lineární. Úhel nájezdu je nastaven na 0° a úhel výjezdu je nastaven na 90°.

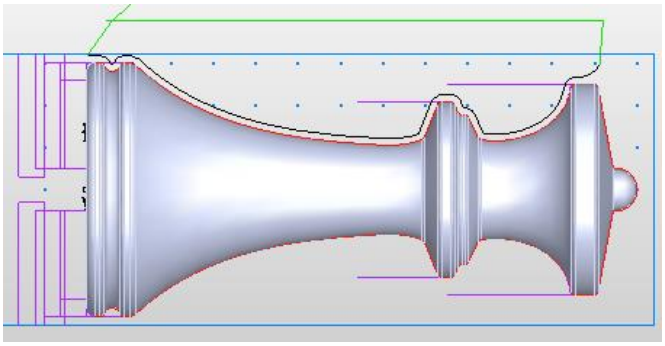


a_p	1,25
f	0,1 mm/ot
v_c	150 m/min
Přídavek v X	0,1 mm
Přídavek v Z	0,1 mm
Nástroj	SVVCN

Obr. 86 Královna - operační úsek 100

3.9.3.11. Operační úsek 110

Zde už volím obrábění zbylé části figurky na čisto. Předešlými operačními úseky jsme zajistili konstantní přídavek na čisto. Nájezd je nastaven tangenciální. Úhel nájezdu je nastaven na 60° a rádius oblouku je nastaven na 3 mm. Výjezd je řešen lineárně. Úhel výjezdu je nastaven na 180° a délka výjezdu je nastavena na 1 mm.

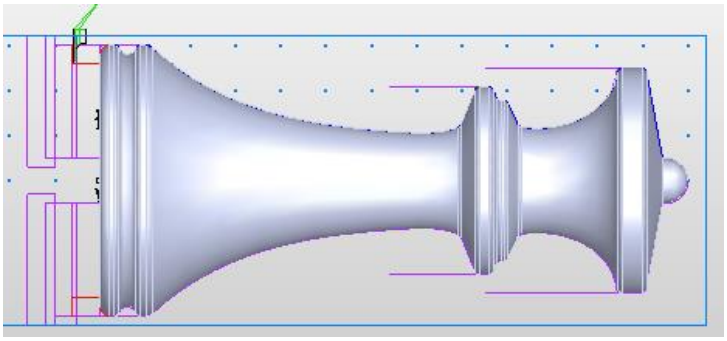


a_p	0,1
f	0,02 mm/ot
n	1300 ot/min
Přídavek v X	0 mm
Přídavek v Z	0 mm
Nástroj	SVVCN

Obr. 87 Královna - operační úsek 110

3.9.3.12. Operační úsek 120

Při tomto operačním úseku dochází k obrábění rádiusu spodní části královny. Využívá se upichovací nůž. Tento operační úsek se využívá rovnou na obrábění na čisto. Z předešlých zkušeností volím konstantní otáčky vřetene.

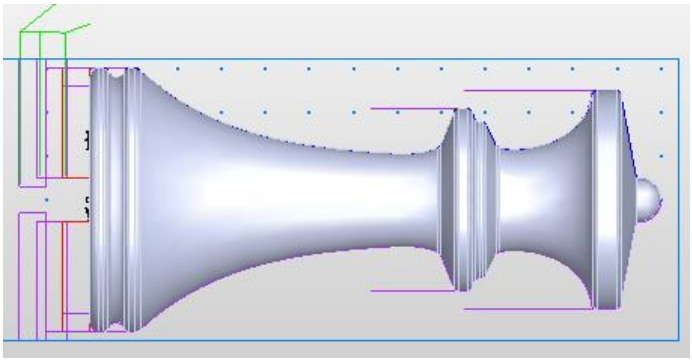


a_p	2 mm
f	0,05 mm/ot
n	1600 ot/min
Přídavek v X	0 mm
Přídavek v Z	0 mm
Nástroj	TGSU

Obr. 88 Královna - operační úsek 120

3.9.3.13. Operační úsek 130

Z předchozích zkušeností vytváříme větší úpich. Jedná se o technologickou pomůcku pro snadnější leštění figurek. V předchozí výrobě figurek docházelo občas k odlomení úpichu na straně figurky – tudíž jsme nebyli schopni provádět leštění těchto figurek.



a_p	2 mm
f	0,05 mm/ot
v_c	120 m/min
Přídavek v X	0 mm
Přídavek v Z	0 mm
Nástroj	TGSU

Obr. 89 Královna - operační úsek 130

3.9.3.14. Shrnutí obrábění královny

Doba obrábění 4 minuty a 20 sekund. Vibrace při obrábění. Jsou vidět stopy po frézování. Moc velký posuv při hrubování frézou. Špatné utváření třísky. Při tvorbě partprogramu v programu FEATURECAM 2018 bylo zjištěno podřezání, jehož rozměr byl přibližně 0,01 mm. Úprava návrhu figurky již není možná, protože na tuto diplomovou práci navazuje jiná diplomová práce, která má za úkol vyrobit hrací desku. Z druhé strany hrací desky mají být připravené „chlívky“, do kterých mají jednotlivé figurky zapadat.

Obr. 90 Obrábění královny

3.9.4. Optimalizace obráběcího procesu královny

3.9.4.1. První pokus optimalizace

Došlo k prohození operačního úseku 20 (frézování) za operační úsek 30 (obrábění na čisto „hlavy“).

Operační úsek 30	Při axiálním frézování došlo ke snížení hodnoty posuvu z 0,08 mm/zub na 0,01 mm/zub při lineárním pohybu a při obrábění na čisto z 0,002 mm/zub na 0,001 mm/zub.

K jiné úpravě již nedošlo.

Zhodnocení optimalizace:

Doba obrábění 8 minut a 11 sekund. Při soustružení nevznikají vibrace. Pouze jsou vidět stopy od axiálního frézování. Špatné utváření třísky.

Obr. 91 Obrábění královny - první pokus optimalizace

3.9.4.2. Druhý pokus optimalizace

Operační úsek 10	Zvýšení hodnoty posuvu na 0,3 mm/ot.
Operační úsek 30	Došlo opět ke snižování hodnoty posuvu u axiálního frézování. Při lineárním pohybu nástroje byl snížen posuv z 0,01 mm/zub na 0,005 mm/zub.
Operační úsek 40	Zvýšení hodnoty posuvu na 0,3 mm/ot.
Operační úsek 70	Zvýšení hodnoty posuvu na 0,3 mm/ot.

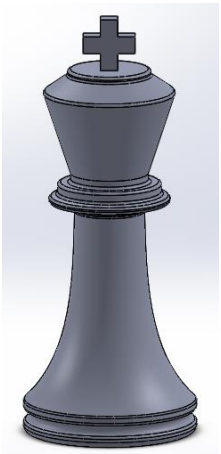
Zhodnocení optimalizace:

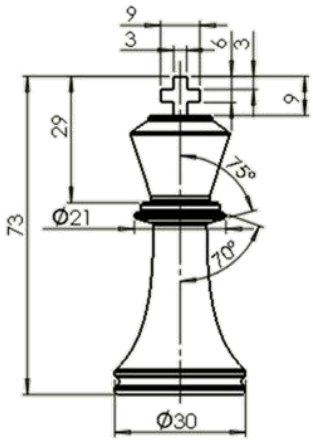
Doba obrábění je 10 minut a 12 sekund. Vibrace eliminovány. Kvalita povrchu je přijatelná.

Obr. 92 Obrábění královny - druhý pokus optimalizace

3.10. Král

3.10.1. První návrh krále



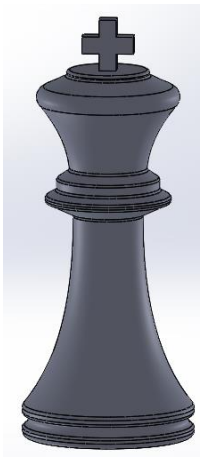


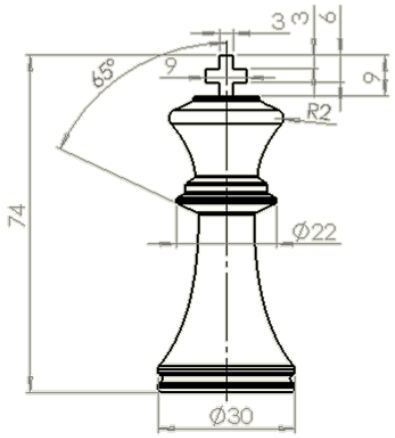
Obr. 93 První návrh krále

Hlavní problémy při výrobě figurky:

- Podřezání
- Nevhodné utváření třísky
- Vibrace
- Kvalita povrchu

3.10.2. Úprava návrhu figurky





Obr. 94 Upravený návrh krále

Úprava figurky spočívala ve změně tvaru „hlavy“ figurky. V původním návrhu byla „hlava lineární. V nové variantě je hlava tvořena pomocí křivek. Dále se změnil úhel v oblasti „ramen“, aby nedocházelo k podřezání. Dále se změnila délka figurky o 1 mm a také byl zvětšen průměr v oblasti „ramen“ z 21 mm na 22 mm.

3.10.3. Výroba upravené figurky krále

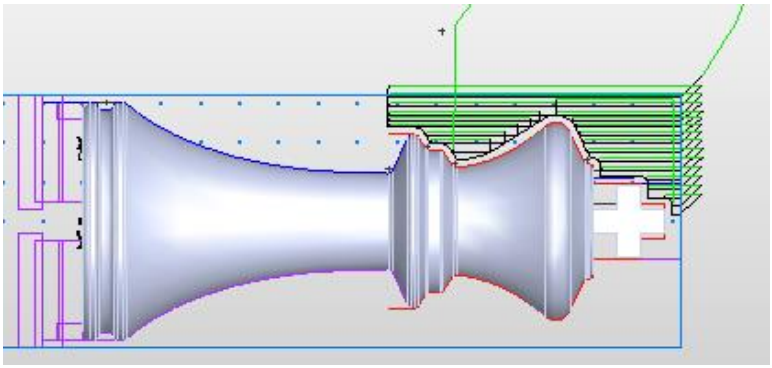
Polotovarem pro výrobu figurky krále je tyč o průměru 32 mm. Na výrobu jednoho krále se spotřebuje 84,1 mm.

Při první výrobě figurky krále docházelo k vibracím při soustružení a také docházelo k bourání radiální válcové čelní frézy o průměru 18 mm. Bourání je způsobeno špatným zapínáním korekce poloměru nástroje. Snažil jsem se nastavit počáteční bod, aby fréza nebourala do obrobku, bohužel nenašel jsem vhodné řešení. Proto jsem změnil strategii tak, abych nepotřeboval zapínat korekce poloměru nástroje. Docílil jsem toho pomocí programování dráhy nástroje na jeho střed a ne na jeho bok. Proto budu uvádět až verzi, kdy nedocházelo k bourání nástroje.

Rovnou jsem řešil i eliminaci vibrací pomocí snížení hodnoty otáček. Proto budu uvádět až verzi, kdy nedocházelo k bourání nástroje.

3.10.3.1. Operační úsek 10

V tomto operačním úseku dochází k hrubování části figurky v oblasti „hlavy“ a „ramen“. Hrubuji takto daleko, abych zajistil, že frézy, které budou vyrábět korunu, nebudou bourat do polotovaru. Nástroj se pohybuje od čela směrem k vřetenu. Nájezd i výjezd je nastaven lineární. Úhel nájezdu je 60° a úhel výjezdu je 65°.

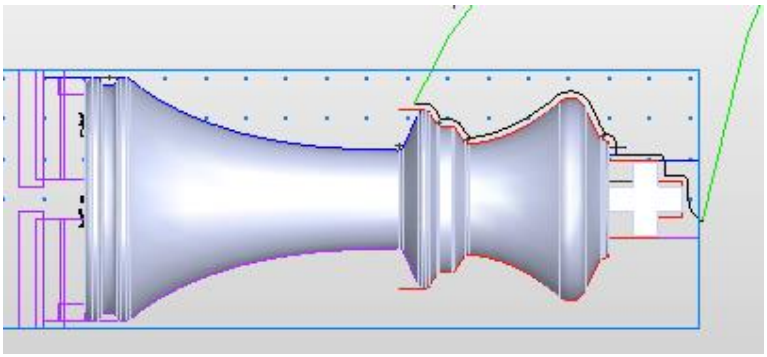


a_p	1,25 mm
f	0,1 mm/ot
v_c	150 m/min
Přídavek v X	0,1 mm
Přídavek v Z	0,1 mm
Nástroj	PDJNL

Obr. 95 Král - operační úsek 10

3.10.3.2. Operační úsek 20

Zde dochází k obrábění na čisto oblasti, kterou jsme v předešlém operačním úseku hrubovali. Nástroj se pohybuje od čela směrem k vřetenu. Nájezd je nastaven tangenciální. Úhel nájezdu je nastaven na 60° a rádius oblouku je 3 mm. Výjezd je lineární a jeho úhel je 180°. Délka výjezdu je 1 mm.

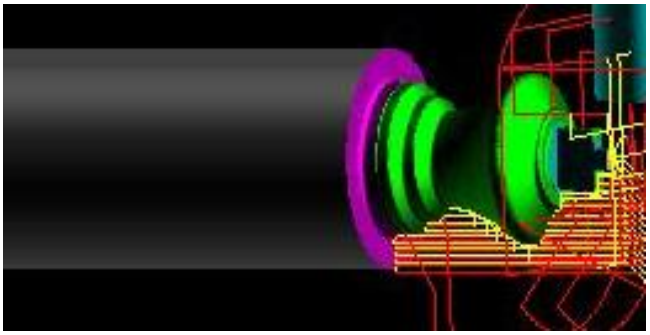


a_p	0,1 mm
f	0,05 mm/ot
n	1500 ot/min
Přídavek v X	0 mm
Přídavek v Z	0 mm
Nástroj	SVJBL

Obr. 96 Král - operační úsek 20

3.10.3.3. Operační úsek 30

V tomto operačním úseku dochází k frézování přebytečného materiálu po předešlém soustružení. Frézuje se sousledně válcovou čelní frézou o průměru 18 mm.

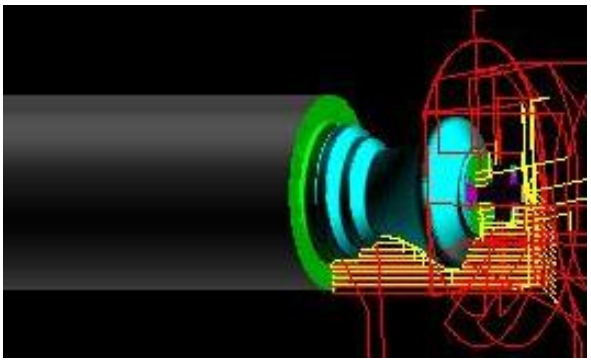


a_p	5 mm
f	0,06 mm/z
v_c	100 m/min
Přídavek v X	0,1 mm
Přídavek v Z	0 mm
Nástroj	110418.18 0

Obr. 97 Král - operační úsek 30

3.10.3.4. Operační úsek 40

V tomto operačním úseku dochází k hrubování drážky pod křížem. Využívá se válcová čelní fréza o průměru 3 mm. Dále se frézuje „drobný“ rádius na vrchu kříže.

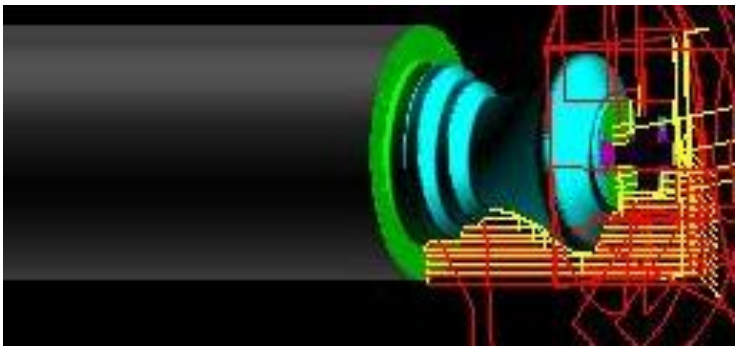


a_p	1,2 mm
f	0,01 mm/z
v_c	50 m/min
Přídavek v X	0 mm
Přídavek v Z	0 mm
Nástroj	233418.030

Obr. 98 Král - operační úsek 40

3.10.3.5. Operační úsek 50

V tomto operačním úseku dochází k obrábění na čisto kříže. Využívá se válcová čelní fréza o průměru 18 mm.

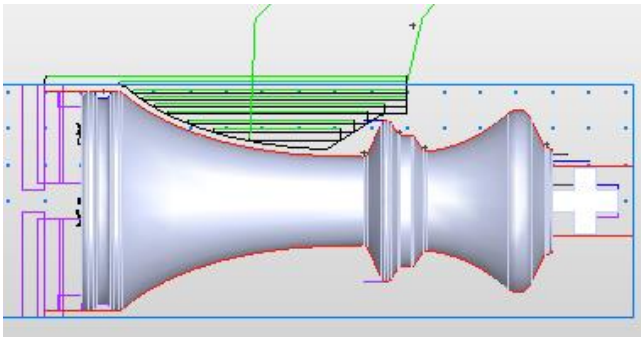


a_p	0,1 mm
f	0,06 mm/z
v_c	120 m/min
Přídavek v X	0 mm
Přídavek v Z	0 mm
Nástroj	110418.18
	0

Obr. 99 Král - operační úsek 50

3.10.3.6. Operační úsek 60

Dále dochází k hrubování zbylé části figurky. Nájezd a výjezd je lineární. Úhel nájezdu je 0° a úhel výjezdu je 65°. Ze simulace je zřejmé, že nedojde k úplnému hrubování celé figurky. Proto musím následujícími operačními úseky zbytkový materiál obrobit.

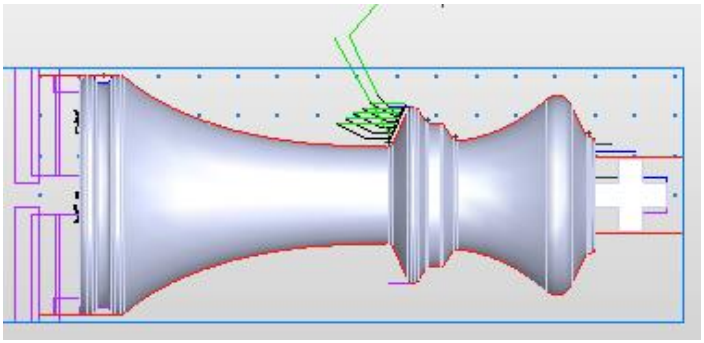


a_p	1,25 mm
f	0,1 mm/ot
v_c	150 m/min
Přídavek v X	0,1 mm
Přídavek v Z	0,1 mm
Nástroj	PDJNL

Obr. 100 Král - operační úsek 60

3.10.3.7. Operační úsek 70

V tomto operačním úseku se snažím odebrat přebytečný materiál, který jsem nemohl v předchozích operacích odebrat. Nájezd i výjezd jsou lineární. Úhel nájezdu je 65°, stejně je nastaven i úhel výjezdu. Nástroj se pohybuje od vřetena směrem k čelu.

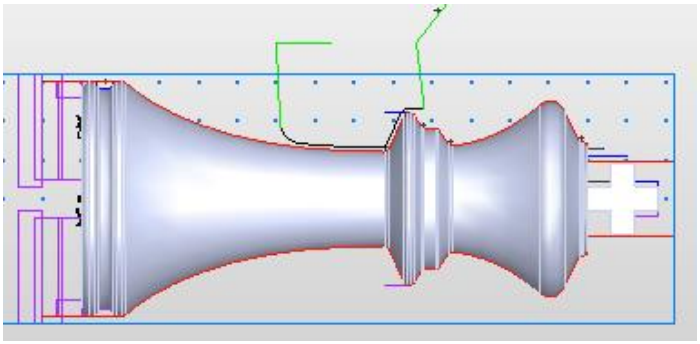


a_p	1,25 mm
f	0,1 mm/ot
v_c	150 m/min
Přídavek v X	0,1 mm
Přídavek v Z	0,1 mm
Nástroj	SDJCL

Obr. 101 Král - operační úsek 70

3.10.3.8. Operační úsek 80

Ze simulace je patrné, že stále zůstává malá oblast, kterou nástroj z předchozího operačního úseku neobrobil. Proto volím strategii před-dokončení, ve které již dojde k zajištění konstantního přídavku na čisto. Nájezd je tangenciální, rádius oblouku je 3 mm a úhel je 65°. Výjezd je lineární a úhel výjezdu je 180°. Délka výjezdu je 2mm. Nástroj se pohybuje od vřetena směrem k čelu.

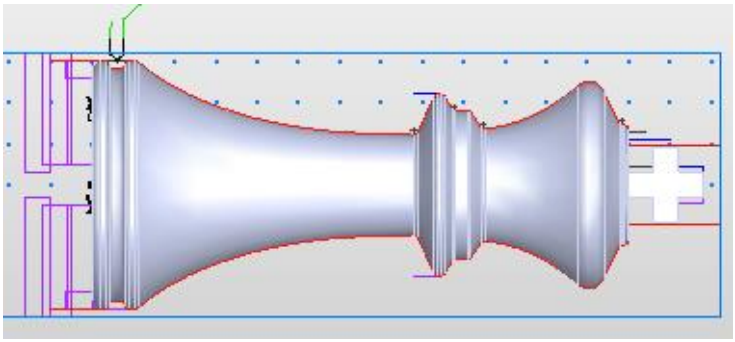


a_p	proměnlivé
f	0,1 mm/ot
n	3000 ot/min
Přídavek v X	0,1 mm
Přídavek v Z	0,1 mm
Nástroj	SDJCL

Obr. 102 Král - operační úsek 80

3.10.3.9. Operační úsek 90

V tomto operačním úseku dochází k hrubování „nohy“. Nástroj bude poté navazovat na obrábění na čisto zbylé části figurky. Nájezd i výjezd jsou lineární. Úhel nájezdu je nastaven na 0°a úhel výjezdu je nastaven na 90°. Nástroj se pohybuje od čela směrem k vřetenu.

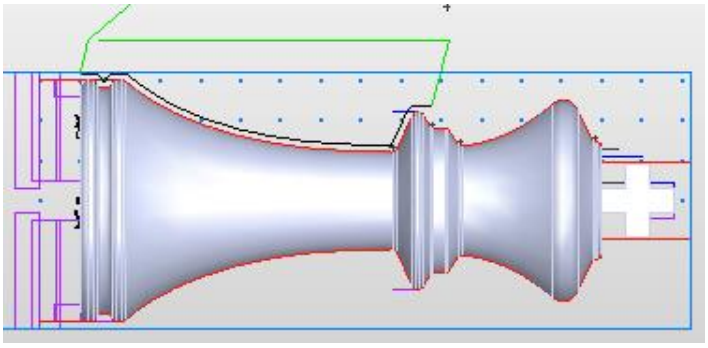


a_p	proměnlivé
f	0,1 mm/ot
v_c	150 m/min
Přídavek v X	0,1 mm
Přídavek v Z	0,1 mm
Nástroj	SVVCN

Obr. 103 Král - operační úsek 90

3.10.3.10. Operační úsek 100

Zde dochází k obrábění na čisto zbylé části figurky. Nástroj navazuje z předchozího operačního úseku. Nájezd je lineární, úhel nájezdu je nastaven na 0° a délka nájezdu je 1 mm. Výjezd je také lineární a jeho úhel je 180°. Délka výjezdu je 1 mm.

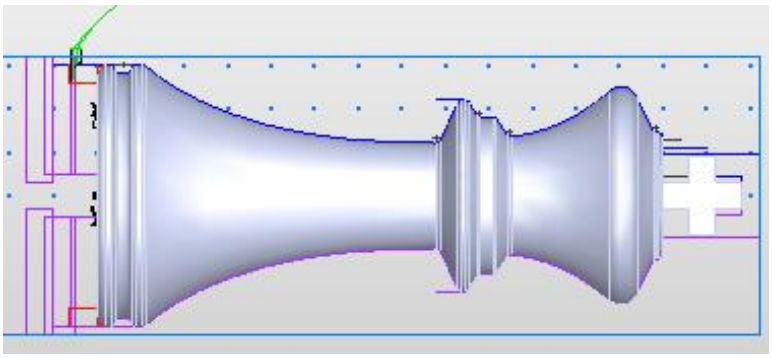


a_p	0,1
f	0,05 mm/ot
n	1500 ot/min
Přídavek v X	0 mm
Přídavek v Z	0 mm
Nástroj	SVVCN

Obr. 104 Král - operační úsek 100

3.10.3.11. Operační úsek 110

Při tomto operačním úseku dochází k obrábění rádiusu spodní části krále. Využívá se upichovací nůž. Tento operační úsek se využívá rovnou na obrábění na čisto. Z předešlých zkušeností volím konstantní otáčky vřetene.

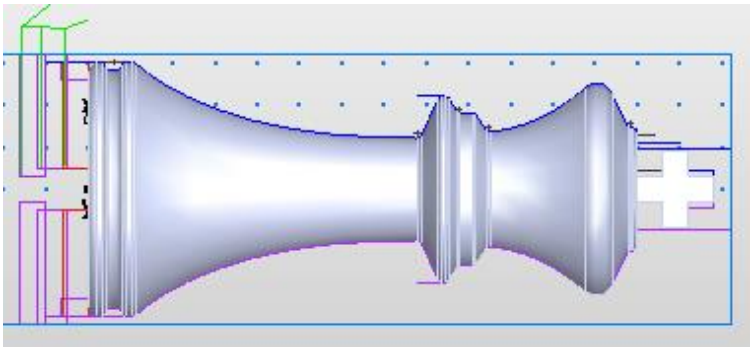


a_p	2 mm
f	0,05 mm/ot
n	1600 ot/min
Přídavek v X	0 mm
Přídavek v Z	0 mm
Nástroj	TGSU

Obr. 105 Král - operační úsek 110

3.10.3.12. Operační úsek 120

Z předchozích zkušeností vytváříme větší úpich. Jedná se o technologickou pomůcku pro snadnější leštění figurek. V předchozí výrobě figurek docházelo občas k odlomení úpichu na straně figurky – tudíž jsme nebyli schopni provádět leštění těchto figurek.



a_p	2 mm
f	0,05 mm/ot
v_c	120 m/min
Přídavek v X	0 mm
Přídavek v Z	0 mm
Nástroj	TGSU

Obr. 106 Král - operační úsek 120

3.10.3.13. Shrnutí obrábění krále

Doba obrábění je 9 minut a 22 sekund. Špatné utváření třísky. Kvalita povrchu špatná. Na kříži, který je frézován, jsou vidět stopy nástroje.

Obr. 107 Obrábění krále

3.10.4. Optimalizace obráběcího procesu krále

3.10.4.1. První pokus optimalizace

Operační úsek 10 — Pro lepší utváření třísky zvýšen posuv na 0,3 mm/ot.

Operační úsek 30 — Pro lepší kvalitu povrchu zvýšena řezná rychlost na 180 m/min a zároveň snížen posuv na 0,05. To samé bylo provedeno i u operačního úseku 50.

Shrnutí optimalizace:

Doba obrábění je 7 minut a 12 sekund. Dobré utváření třísky. Vibrace eliminovány. Kvalita povrchu je přijatelná. Na kříži stále patrné stopy nástroje.

Obr. 108 Obrábění krále - první pokus optimalizace

3.10.4.2. Druhý pokus optimalizace

Operační úsek 30 Opět došlo ke zvýšení řezné rychlosti na 220 m/min. To samé i u operačního úseku 50

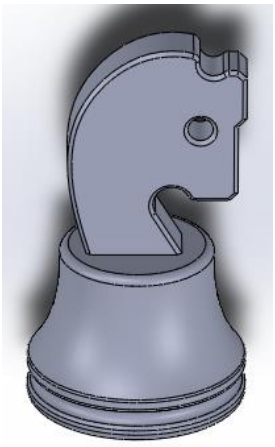
Shrnutí optimalizace:

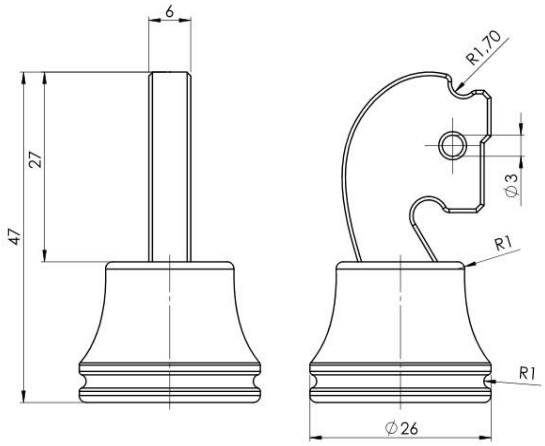
Doba obrábění je 7 minut 43 sekund. Dobře utvářená tříska. Vibrace eliminovány. Na kříži nejsou patrné stopy nástroje.

Obr. 109 Obrábění krále - druhý pokus optimalizace

3.11. Kůň

3.11.1. První návrh figurky



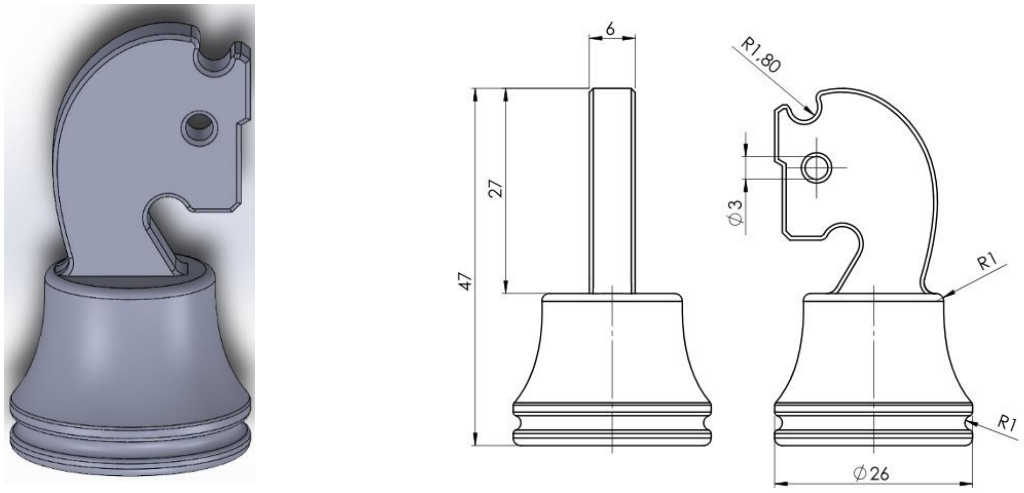


Obr. 110 První návrh koně

Hlavní problémy při obrábění figurky:

- Špatné utváření třísky
- Kvalita povrchu
- Podřezání
- Vibrace

3.11.2. Úprava návrhu figurky



Obr. 111 Upravený návrh koně

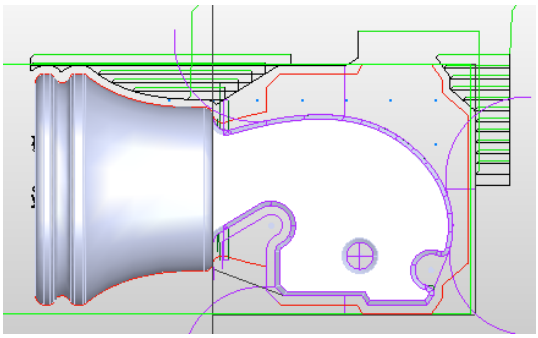
Úprava figurky se týkala úpravy v oblasti „ucha“. Tato úprava byla zvolena kvůli úpravě designu, aby „ucho“ bylo více zřetelné. Pro hrubování byla přidána na pozici 11 radiální válcová čelní fréza o průměru 18 mm s ostřím přes střed.

3.11.3. Výroba upravené figurky koně

Polotovarem pro výrobu figurky koně je tyč o průměru 28 mm. Na výrobu jednoho koně se spotřebuje 57,1 mm.

3.11.3.1. Operační úsek 10

V tomto úseku dochází k hrubování přebytečného materiálu. Pro hrubování byla vytvořena křivka, která zajistí, že bude dostatek materiálu pro další operační úseky, ale zároveň má za úkol zajistit co nejmenší přebytečný materiál pro frézovací úseky. Jedná se o soustružení, kde se nástroj pohybuje od čela směrem k vřetenu. Hrubuje se celá délka figurky (zamezení „bourání“ držáku nástroje 233418.030 TiAlN). Úhel nájezdu je nastaven na 0° a úhel výjezdu je nastaven na 45°. Nájezd i výjezd je lineární a jejich délka je 0,5 mm.

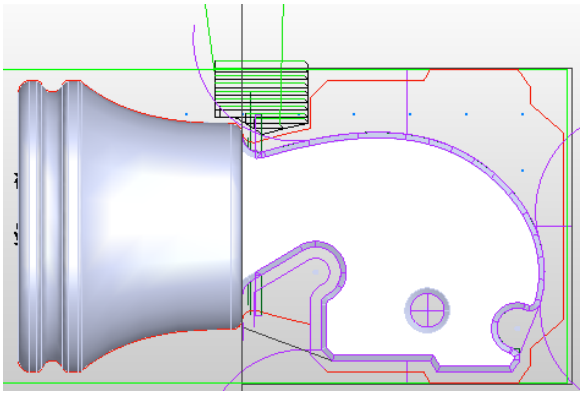


a_p	1,25 mm
f	0,3 mm/ot
v_c	150 m/min
Přídavek v X	0,1 mm
Přídavek v Z	0,1 mm
Nástroj	PDJNL

Obr. 112 Kůň - operační úsek 10

3.11.3.2. Operační úsek 20

V tomto operačním úseku dochází k dohrubování v oblasti „krku“ figurky koně. Jedná se o soustružení, kde se nástroj pohybuje od vřetena směrem k čelu. Úhel nájezdu je nastaven na 0° a úhel výjezdu je nastaven na 45°. Nájezd i výjezd je lineární a délka je 0,5 mm.

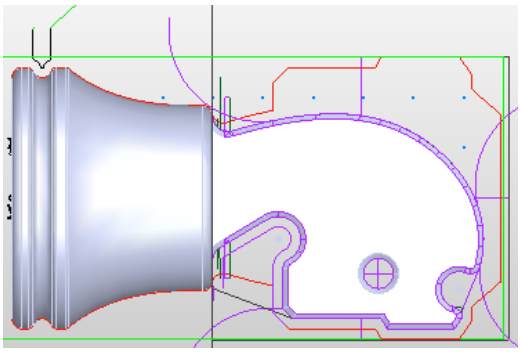


a_p	0,75 mm
f	0,1 mm/ot
n	3000 ot/min
Přídavek v X	0,1 mm
Přídavek v Z	0,1 mm
Nástroj	SDJCL

Obr. 113 Kůň - operační úsek 20

3.11.3.3. Operační úsek 30

V tomto úseku dochází k hrubování v oblasti „nohy“. Jedná se o soustružení, kde nástroj se pohybuje od čela směrem k vřetenu. Nájezd i výjezd je lineární. Úhel nájezdu je nastaven na 0° a úhel výjezdu je nastaven na 90°.

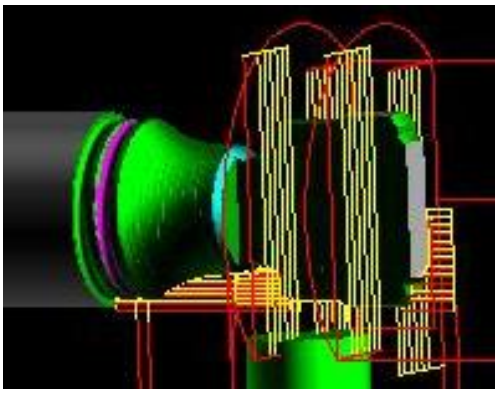


a_p	1 mm
f	0,1 mm/ot
v_c	150 m/min
Přídavek v X	0,1 mm
Přídavek v Z	0,1 mm
Nástroj	SVVCN

Obr. 114 Kůň - operační úsek 30

3.11.3.4. Operační úsek 40

V tomto operačním úseku dochází k hrubování v oblasti hlavy. Jedná se o radiální frézování válcovou čelní frézou o průměru 18 mm. Pro určení maximální hloubky řezu byla provedena technologická zkouška a po konzultaci byla zvolena limitní hloubka řezu 2 mm. Při této operaci využívám nástroj z 5/6 jeho celkového průměru. Fréza je vybavena ostřím přes střed, ale zvolil jsem nájezd mimo polotovar. Po hrubování na jedné straně dojde k odjetí nástroje do bezpečné polohy a otočí se vřeteno o 180°. Po otočení dochází opět k hrubování při stejných parametrech.

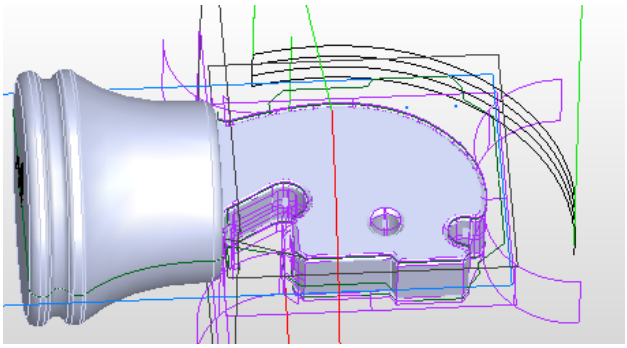


a_p	2 mm
f	0,05 mm/z
v_c	180 m/min
Přídavek v X	0,2 mm
Přídavek v Z	0,2 mm
Nástroj	110418.18
	0

Obr. 115 Kůň - operační úsek 40

3.11.3.5. Operační úsek 50

Jedná se o radiální frézování válcovou čelní frézou o průměru 18 mm. Úkolem tohoto úseku je hrubování bočních částí figurky koně. Nájezd je zvolen mimo polotovar. Z důvodu limitace pracovního prostoru stroje je hrubování rozděleno na dvě části.

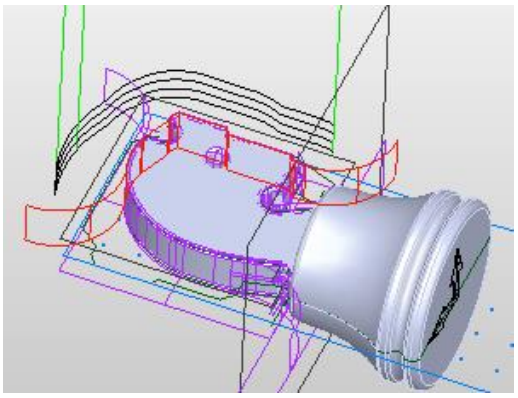


a_p	2 mm
f	0,05 mm/z
v_c	180 m/min
Přídavek v X	0,1 mm
Přídavek v Z	0,1 mm
Nástroj	110418.18 0

Obr. 116 Kůň - operační úsek 50

3.11.3.6. Operační úsek 60

Jedná se o druhou část hrubování boku koně – navazuje na operační úsek 50.

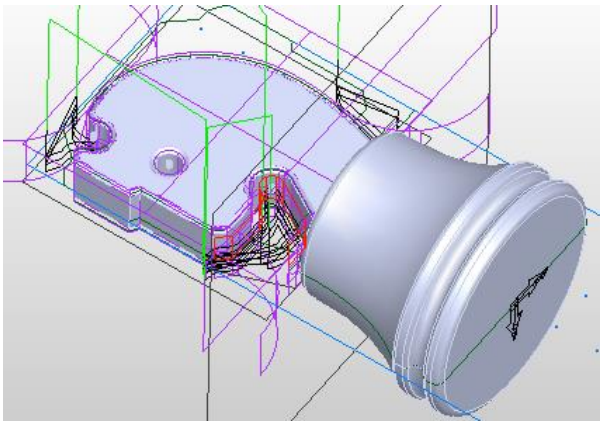


a_p	2 mm
f	0,05 mm/z
v_c	180 m/min
Přídavek v X	0,1 mm
Přídavek v Z	0,1 mm
Nástroj	110418.18 0

Obr. 117 Kůň - operační úsek 60

3.11.3.7. Operační úsek 70

V tomto operačním úseku dochází k dohrubování oblastí, kde předešlý nástroj nemohl hrubovat. Oblasti byly vybrány dle simulace drah nástrojů. Jedná se o radiální frézování válcovou čelní frézou o průměru 3 mm. Řezné podmínky jsou zvolené z předešlých zkušeností (figurka věže). Nájezdy i výjezdy jsou nastaveny mimo polotovar. Dráhy jsou nastaveny pod osu Y (Y=-0,5 mm). Důvodem je, aby vlivem nepřesnosti stroje nezůstala na figurce neobrobená plocha. V oblasti „krku“ dochází nejdřív k odhrubování drážky (oblast hrubování je větší než průměr nástroje) a poté se teprve obrábí kontura „krku“. V ostatních oblastech toto není potřeba. Po dokončení hrubování těchto oblastí dojde k otočení vřetena o 180° (nástroj odjede do bezpečné vzdálenosti) a hrubují se stejné oblasti při stejných řezných podmínkách.

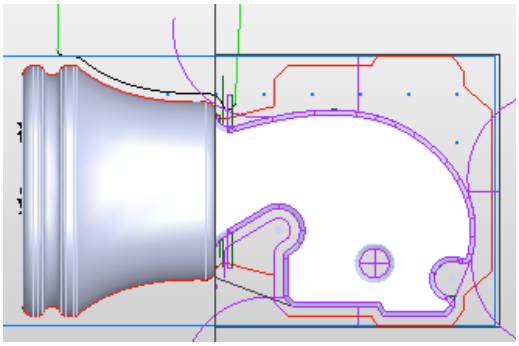


a_p	1,2 mm
f	0,006 mm/z
v_c	50 m/min
Přídavek v X	0,1 mm
Přídavek v Z	0,1 mm
Nástroj	233418.030 TiAlN

Obr. 118 Kůň - operační úsek 70

3.11.3.8. Operační úsek 80

V tomto operačním úseku dochází k před-dokončení v oblasti „nohy“ figurky. Úkolem je zajistit stejný přídavek pro soustružení na čisto. Nástroj se pohybuje od čela směrem k vřetenu. Nájezd i výjezd je obloukem o 70°. Délka oblouku je 1 mm. Jsou nastaveny konstantní otáčky.

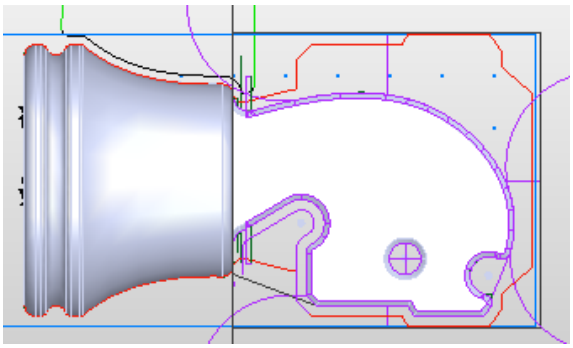


a_p	proměnlivé
f	0,07 mm/ot
n	800 ot/min
Přídavek v X	0,1 mm
Přídavek v Z	0,1 mm
Nástroj	SVJBL

Obr. 119 Kůň - operační úsek 80

3.11.3.9. Operační úsek 90

V tomto operačním úsek se obrábí oblast „nohy“ na čisto. Nájezd i výjezd je tangenciální. Úhel nájezdu je nastaven na 70°, úhel výjezdu je také nastaven na 70°. Délka nájezdu a výjezdu je 1 mm. Nástroj se pohybuje směrem od čela směrem k vřetenu. Jsou nastaveny konstantní otáčky.

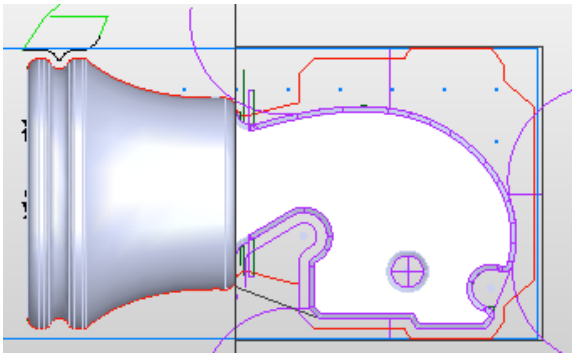


a_p	0,1 mm
f	0,04 mm/ot
n	800 ot/min
Přídavek v X	0 mm
Přídavek v Z	0 mm
Nástroj	SVJBL

Obr. 120 Kůň - operační úsek 90

3.11.3.10. Operační úsek 100

V tomto úseku se soustruží na čisto spodní část figurky. Napojení na přechozí úsek je na rovné ploše (nemělo by být vidět). Nástroj se pohybuje od čela směrem k vřetenu. Nájezd je nastaven tangenciální a výjezd lineární. Úhel nájezdu je 70° a délka 2 mm. Úhel výjezdu je 180° a délka 2 mm. Jsou nastaveny konstantní otáčky.

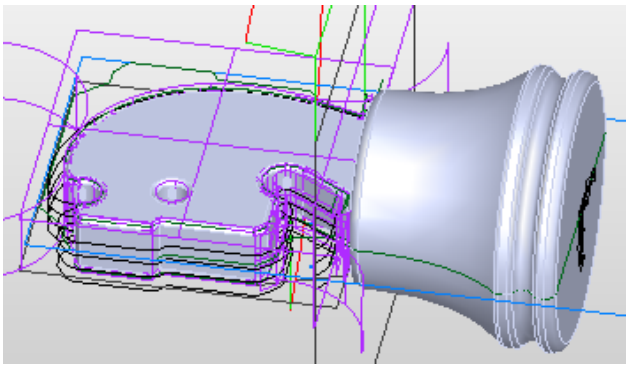


a_p	0,1 mm
f	0,04 mm/ot
n	800 ot/min
Přídavek v X	0 mm
Přídavek v Z	0 mm
Nástroj	SVVCN

Obr. 121 Kůň - operační úsek 100

3.11.3.11. Operační úsek 110

Zde dochází k radiálnímu frézování válcovou čelní frézou o průměru 3 mm. Obrábí se boční část koně na čisto. Nájezd i výjezd je nastaven mimo materiál. Nájezd i výjezd je nastaven na 30° o délce 2 mm.

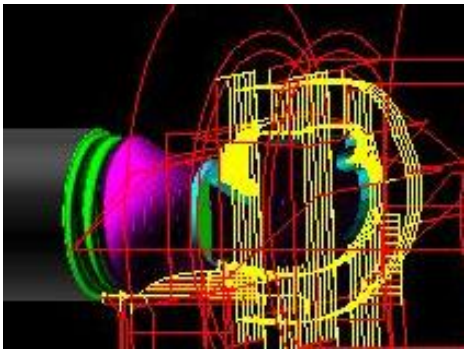


a_p	1,2 mm
f	0,006 mm/z
v_c	50 m/min
Přídavek v X	0 mm
Přídavek v Z	0 mm
Nástroj	233418.030 TiAlN

Obr. 122 Kůň - operační úsek 110

3.11.3.12. Operační úsek 120

V tomto operačním úseku dochází k radiálnímu frézování na čisto pomocí válcové čelní frézy o průměru 18 mm. Využívá se 5/6 nástroje. Nájezd i výjezd je nastaven mimo materiál (nástroj se nemusí zavrtávat).

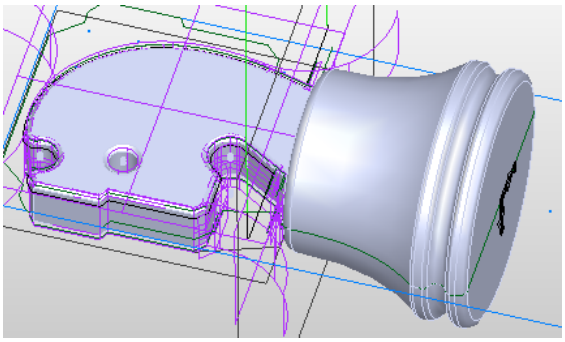


a_p	0,2 mm
f	0,04 mm/z
v_c	220 m/min
Přídavek v X	0 mm
Přídavek v Z	0 mm
Nástroj	110418.18 0

Obr. 123 Kůň - operační úsek 120

3.11.3.13. Operační úsek 130

V tomto operačním úseku dochází k radiálnímu frézování „multifunkční“ frézou o průměru 3 mm. Dochází k obrábění sražení na jedné straně figurky. Sražení v oblasti „oka“ bude provedeno na stolní vrtačce. Důvodem je nepřesnost seřízení nástrojů a CNC soustruhu, kdy v předchozí variantě nedošlo k přesnému frézování sražení „oka“ (docházelo k vyosení).

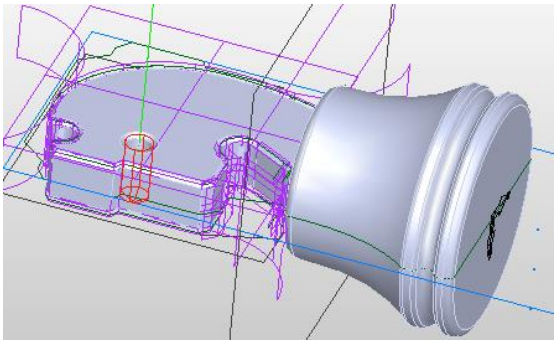


a_p	0,5 mm
f	0,006 mm/z
v_c	50 m/min
Přídavek v X	0 mm
Přídavek v Z	0 mm
Nástroj	S390002.030

Obr. 124 Kůň - operační úsek 130

3.11.3.14. Operační úsek 140

Zde dochází k radiálnímu vrtání s výplachem „oka“. Vrtá se celá hloubka „oka“, protože nepřesností stroje by nedošlo k přesnému navázání vrtání z druhé strany. Problematika se objevuji i u sražení „oka“. K přerušení vrtání dochází po 1 mm a k výplachu dochází po 2 mm vrtané délky.

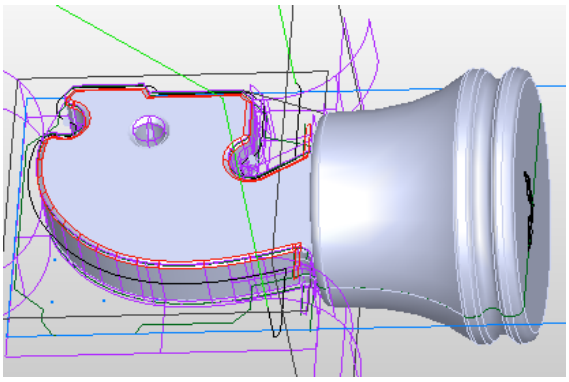


a_p	1 mm
f	0,01 mm/z
v_c	50 m/min
Přídavek v X	0 mm
Přídavek v Z	0 mm
Nástroj	S390002.030

Obr. 125 Kůň - operační úsek 140

3.11.3.15. Operační úsek 150

Jedná se o stejný operační úsek jako operační úsek 130. Dochází pouze o otočení vřetena o 180° a frézování sražení.

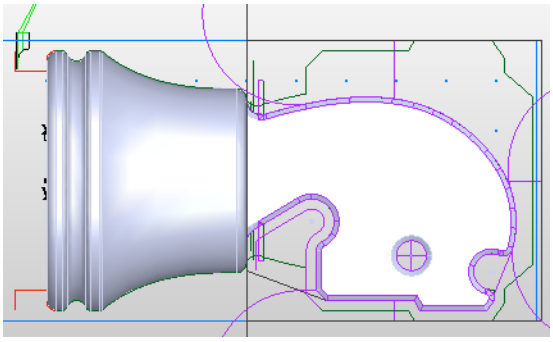


a_p	0,5 mm
f	0,006 mm/z
v_c	50 m/min
Přídavek v X	0 mm
Přídavek v Z	0 mm
Nástroj	S390002.030

Obr. 126 Kůň - operační úsek 150

3.11.3.16. Operační úsek 160

Při tomto operačním úseku dochází k obrábění rádiusu spodní části koně. Využívá se upichovací nůž. Tento operační úsek se využívá rovnou na obrábění na čisto.

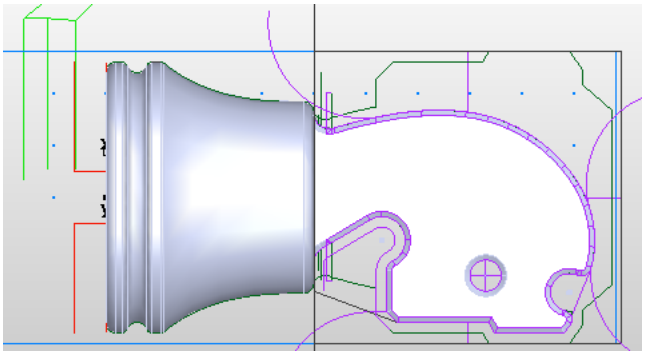


a_p	2 mm
f	0,05 mm/ot
n	1600 ot/min
Přídavek v X	0 mm
Přídavek v Z	0 mm
Nástroj	TGSU

Obr. 127 Kůň - operační úsek 160

3.11.3.17. Operační úsek 170

Zde dochází k soustružení úpichu, který zajistí snadné leštění figurek a zároveň snadné odlomení vyrobené figurky od polotovaru.



a_p	2 mm
f	0,05 mm/ot
v_c	120 m/min
Přídavek v X	0 mm
Přídavek v Z	0 mm
Nástroj	TGSU

Obr. 128 Kůň - operační úsek 170

3.11.3.18. Shrnutí obrábění koně

Doba obrábění 34 minut a 5 sekund. Při soustružení na čisto „nohy“ (operační úsek 90) dochází k tvorbě stupňů na křivce. Při radiálním frézování na čisto pomocí frézy o průměru 18 mm dochází k vibracím obrobku (viditelné stopy nástroje). Při frézování boku koně pomocí frézy o průměru 18 mm je zřejmé, že přídavek pro obrábění na čisto je nedostatečný.

Obr. 129 Obrábění koně

3.11.4. Optimalizace obráběcího procesu koně

3.11.4.1. První pokus optimalizace

Operační úsek 40 a 120	Stopy od frézy jsou nejspíše způsobeny nedostatečnou tuhostí obrobku. Proto došlo ke sjednocení těchto úseků, kdy dojde k hrubování v jedné souřadnici Z a ihned po hrubování v této souřadnici dojde ve stejné pozici k frézování na čisto. Poté dojde k otočení vřetena o 180° a proces se opakuje. Poté dochází až k hrubování a frézování na čisto v nižší hladině Z.
Operační úsek 50	V tomto operačním úseku byl zvětšen přídavek pro obrábění na čisto. Přídavek byl zvětšen na 0,3 mm
Operační úsek 80,90 a 100	Stupňovitost „nohy“ koně je nejspíše způsobena soustružením na čisto až po frézování. Proto jsou tyto úseky přesunuty před operační úsek 40. Byla vyměněna břitová destička za novou, zda to není způsobeno jejím opotřebením.

Zhodnocení optimalizace:

Doba obrábění je 33 minut 52 sekund. Úprava u operačního úseku 40 a 120 pomohla jen částečně, protože u některých figurek jsou stopy viditelné, u jiných naopak nejsou. Stupňovitost „nohy“ ale přetrvává. Po konzultaci s vedoucím práce bylo navrženo snížení tolerance křivky, která se pro výpočet dráhy používá. Přídavek pro hrubování boku pomocí frézy o průměru 18 mm pomohl, ale je potřeba ho ještě zvýšit. Při frézování na čisto frézou o průměru 18 mm zůstala drobná oblast, která byla obrobena pouze polovinou nástroje.

Obr. 130 Obrábění koně - první pokus optimalizace

3.11.4.2. Druhý pokus optimalizace

Operační úsek 40	Dráha pro frézování na čisto frézou o průměru 18 mm byla prodloužena o 5 mm.
Operační úsek 80	Tento úsek (před-dokončení) byl zrušen. Na kvalitu obráběné plochy neměl vliv.
Operační úsek 50	Přídavek pro obrábění na čisto byl zvýšen na hodnotu 0,5 mm.
Operační úsek 90 a 100	Tolerance křivky byla změněna z 0,01 na 0,001. Řezné podmínky zůstaly nezměněny

Zhodnocení optimalizace:

Doba obrábění je 32 minut a 5 sekund. Stupňovitost se již na figurce koně neobjevuje. Viditelné stopy po frézování na čisto frézou o průměru 18 mm se objevují pouze u některých figurek.

Obr. 131 Obrábění koně - druhý pokus optimalizace

3.11.4.3. Třetí pokus optimalizace

Operační úsek 40 Po konzultaci s vedoucím práce došlo ke změně souřadnice Z při frézování na čisto první hladiny Z (oblast „oka“ koně). Souřadnice Z se posunula o 0,5 mm v kladném směru.

Zhodnocení optimalizace:

Stopy po frézování na čisto se již v operačním úseku 40 neukazují. Viditelné stopy byly způsobeny přídavkem na čisto, protože přídavek 0,2 mm na čisto byl v souřadnici X, tak ale i v souřadnici Z

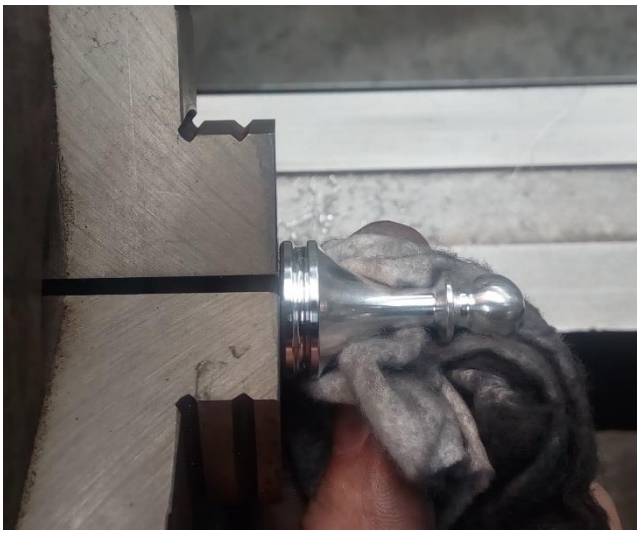
Obr. 132 Obrábění koně - třetí pokus optimalizace

3.12. Zvolené povrchové úpravy

Po konzultaci s vedoucím Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie byla zvolena varianta leštěných a opískovaných figurek.

3.12.1. Leštění figurek

Leštění probíhá na konvenčním soustruhu TOS SV 18, kdy se figurka upíná za úpich, který byl speciálně pro tyto figurky zvolen. Do sklíčidla se upne tento úpich a pomocí lešticího pásu a lešticí pasty o zrnitosti 1,5 μm dochází k leštění rotačních částí figurek viz obrázek na další straně.



Obr. 133 Způsob leštění rotačních částí figurek

Pro leštění nerotačních částí figurek je použit filcový lešticí kotouč, který je přidělán na závitovou tyč a zajištěn maticemi. Lešticí kotouč je upnut ve stejném soustruhu, jako probíhalo leštění rotačních součástí. Otáčky jsou nastaveny na 560 ot/min. Přiložením části figurky ke kotouči dochází k leštění figurek.

Obr. 134 Způsob leštění nerotačních částí figurek

Obr. 135 Odstranění úpichu na figurce

3.12.2. Opískování figurek

Při eloxování je nutné, aby figurky byly v některé části připojeny na stejnosměrný zdroj. Kvůli tomuto připojení ale nedojde v tomto spoji k tvorbě eloxované vrstvy – nejsme schopni zde změnit barvu hliníkové slitiny. Proto pískování bylo zvoleno jako druhá varianta povrchové úpravy figurek. Opískováním figurek se získá matný vzhled těchto figurek. Pískování probíhá v kooperaci, protože Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie nevlastní tryskací zařízení.

Obr. 136 Opískovaná figurka střelce

3.13. Upichování figurek

Upichování figurek se provádí po leštění figurek a před pískováním figurek (jedna část sady figurek je leštěná, druhá část je pískovaná).

Po vyleštění figurek dochází k odstranění úpichu na konvenčním soustruhu TOS SV 18. Pro odstranění úpichu využívám monolitní vnější soustružnický nůž z rychlořezné oceli. Pomocí koníka srovnám spodní plochu figurky pro správné upnutí.

Lehce se dotáhne sklíčidlo (zamezení poškrábání figurky). Nastaví se otáčky vřetena na 560 ot/min a posuv se nastaví na 0,05 mm/ot. Posuv je zvolen na tuto hodnotu, abych dosáhl pěkného povrchu na spodní části figurky. Úpich se odstraňuje ve dvou třískách. Jednotlivé čelisti jsou oblepeny elektrikářskou izolepou – nemělo by dojít k poškrábání figurky.

4. Kalkulace

Po optimalizaci výroby jednotlivých figurek, povrchových úpravách a odstranění úpichů jsem schopen zjistit náklady na výrobu jedné sady figurek.

4.1. Náklady na pořízení nástrojů

Tab. 2 Náklady na nástroje

Vyměnitelné břitové destičky a frézy	Použité množství na jednu sadu	Cena [Kč]	Cena celkem [Kč]
DNMG 150608EL - SI T8330	1	317	6104
VCGT 160408F- AL HF7	2	414	
TAG N3A IC20	1	235	
DCGT 11T304F - AL HF7	1	255	
S390002.030	1	720	
3366-12	1	2843	
233418.030	1	294	
110418.180	1	612	

Nástroje jsou brány, že vydrží výrobu jedné sady figurek a poté se musí vyměnit. Důvodem je, že neznám trvanlivost jednotlivých nástrojů při výrobě těchto figurek a také nevím, zda bude o tyto figurky zájem v budoucnu (na výrobu jedné sady jsem tyto nástroje musel pořídit). Ceny nástrojů jsou bez DPH.

4.2.Náklady na pořízení materiálu

Tab. 3 Náklady na pořízení materiálu - část první

	Materiál	Množství [m]	Odřezky [m]
D25	pěšec	0,7	0,08
	věž	0,2	
D28	střelec	0,3	0,08
	kůň	0,2	
D32	král	0,2	0,08
	královna	0,2	

Tab. 4 Náklady na pořízení materiálu - část druhá

Materiál celkem [m]	Cena tyče za 1 m [Kč]	Cena materiálu na figurky [Kč]
1,04	263	273
0,6	330	190
0,4	433	172
Doprava + balení [Kč]	218	

Tab. 5 Náklady na pořízení materiálu - část třetí

Cena materiálu na jednu sadu [Kč]	854

Pro stanovení celkových nákladů na pořízení materiálu vycházím nejenom z materiálu, který se spotřebuje při výrobě figurek, ale i z materiálu, který zůstane bez dalšího užití ve formě odřezků (polotovar musím dělit na 0,5 m tyče – zamezení vibracím při obrábění). Dále do nákladů zahrnuji i dopravu a balení polotovarů pro výrobu figurek. Cena materiálu je bez DPH.

4.3. Výrobní náklady

4.3.1. Výroba na CNC soustruhu Okuma GENOS L200E-MY

Tab. 6 Náklady výroby na Okuma GENOS L200E - MY

Okuma GENOS L200E - MY				Cena výroby rozdělená [Kč]	Cena výroby celkem [Kč]
Stroj	Cena výroby	[Kč/hod]	950	5700	8700
	Doba výroby	[hod]	6,0		
Obsluha	Cena obsluhy	[Kč/hod]	500	3000	
	Doba výroby	[hod]	6,0		

Tab. 7 Odpisy stroje Okuma GENOS L200E - MY

Odpisy Okuma GENOS L200E - MY	
Pořizovací cena	Cena [Kč]
	3000000
Odpisování	Doba [roky]
	10
Směnnost	Jednosměnný provoz [hod]
	2000
	Možnost práce na stroji [den]
	1
Odpisy [Kč/hod]	750
Náklady na provoz stroje [Kč/hod]	200

Pro výpočet odpisů stroje uvažuji jednosměnný provoz, který má roční hodinový fond 2000 hodin (o svátky se nepracuje). Dále uvažuji využití stroje na Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie na jeden den v týdnu. V pořizovací ceně stroje jsou zahrnuty i držáky jednotlivých nástrojů. V nákladech na provoz stroje uvažuji nutné doplňování jednotlivých kapalin, které stroj pro provoz potřebuje, dále uvažuji i spotřebu elektrické energie a další náklady.

V době výroby je nejenom zahrnut čas jednotkový t_A, ale i čas dávkový t_B, ve kterém je zahrnut potřebný čas na seřízení stroje (rozevření čelistí, nastavení nulového bodu stroje), tak i příprava,

kontrola a seřízení nástrojů, které se pro výrobu šachových figurek využívají. Také uvažuji i úklid pracoviště po dokončení výroby šachových figurek.

4.3.2. Leštění jedné sady figurek

Tab. 8 Náklady na leštění jedné sady figurek

TOS SV 18 - leštění				Cena leštění rozdělená [Kč]	Cena leštění celkem [Kč]
Stroj	Cena výroby	[Kč/hod]	250,0	563	1713
	Doba výroby	[hod]	2,3		
Obsluha	Cena obsluhy	[Kč/hod]	500,0	1150	
	Doba výroby	[hod]	2,3		

V době leštění figurek je zahrnuta nejenom doba leštění jednotlivých figurek, ale i příprava a úklid stroje.

4.3.3. Odstranění úpichu na figurkách

Tab. 9 Náklady na odstranění úpichů jedné sady figurek

TOS SV 18 - úpichování				Cena upichování rozdělená [Kč]	Cena upichování celkem [Kč]
Stroj	Cena výroby	[Kč/hod]	250	750	2250
	Doba výroby	[hod]	3		
Obsluha	cena	[Kč/hod]	500	1500	
	Doba výroby	[hod]	3		

V době upichování je nejenom zahrnuta doba upichování, ale i příprava a úklid stroje, dále uvažuji i čas pro nabroušení soustružnického nože, který pro odstraňování úpichu využívám. Cenu nástroje neuvažuji. Nebylo možné zjistit jeho pořizovací cenu a opotřebení nástroje je zanedbatelné při tomto obrábění.

4.3.4. Opískování figurek

Jak jsem uvedl výše v práci – Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie nedisponuje tryskacím zařízením. Proto se zvolila varianta kooperace. Jedna sada na opískování vyjde na 3000 Kč.

4.4. Celkové náklady na jednu sadu figurek

Po sečtení všech výše uvedených nákladů, vychází náklady na jednu sadu figurek na 22620 Kč. Cena je bez DPH.

5. Závěr

Pro výrobu šachových figurek jsem zvažoval mezi dvěma možnými materiály a to: hliníkové a titanové slitiny. Tyto slitiny jsem vybral kvůli jejich hustotě a možnosti povrchových úprav (eloxování).

Při porovnávání titanových a hliníkových slitin jsem zvolil pro výrobu šachových figurek hliníkovou slitinu EN – AW 7075. Jeden z parametrů volby tohoto materiálu byla pořizovací cena polotovaru. Titanové slitiny jsou mnohonásobně dražší než hliníkové slitiny. Dalším důvodem, proč jsem zvolil hliníkovou slitinu EN – AW 7075 byla její obrobitelnost. V porovnání s titanovými slitinami je EN - AW 7075 lépe obrobitelná.

Při volbě potřebných nástrojů se podařilo nástroje sjednotit s výrobou hracích kostiček, které Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie vyrábí. Sjednocení bylo docíleno hlavně díky úpravě modelů jednotlivých šachových figurek pro dané nástroje.

Při návrhu a výrobě první varianty figurek jsem narazil na několik problémů. Hlavním problémem byly vibrace a podřezání způsobené geometrií zvolených nástrojů. Dalším problémem byla nevhodná tvorba třísky, která se v některých případech namotávala na obráběnou figurku, a došlo ke znehodnocení figurky.

Pro vyřešení vibrací a vhodné utváření třísky by stačilo zjistit vhodné řezné podmínky pro daný materiál, ale pro vyřešení problému s podřezáním muselo dojít ke změně tvaru figurek. Změna figurek byla provedena i kvůli hezčímu designu.

Pro lepší utváření třísky byl zjištěn vhodný posuv 0,3 mm/ot pro hrubování. Vhodné otáčky pro obrábění na čisto se pohybují mezi 1000 a 1500 ot/min. Při vyšší hodnotě otáček již docházelo k viditelným vibracím při obrábění na čisto. Při kontrole tvaru jednotlivých upravených figurek v programu FEATURECAM 2018 bylo zjištěno podřezání pouze u figurky královny, při zjišťování rozměru podřezání se zjistilo, že hodnota podřezání je přibližně 0,01 mm. Změnu návrhu královny nebylo možné provést, protože na tuto diplomovou práci navazuje jiná diplomová práce, která má za úkol vyrobit hrací desku pro šachové figurky a z druhé strany hrací desky mají figurky zapadat do vyfrézovaných „chlívků“.

Po provedení optimalizace výroby šachových figurek, která hlavně spočívala ve volbě řezných podmínek s ohledem na kvalitu obrobené plochy při obrábění na čisto, jsem konzultacemi s vedoucím této diplomové práce a vedoucím Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie zvolil leštění a pískování šachových figurek. Leštění figurek probíhalo

v laboratořích Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie, pískování bylo provedeno v kooperaci.

Po zjištění výrobních časů na jednotlivých strojích jsem provedl kalkulaci celkových nákladů na výrobu jedné sady figurek. Kalkulace nákladů se skládala z nákladů na nástroje, na potřebný materiál výroby šachových figurek, výrobních nákladů na jednotlivých strojích a ceny pískování jedné sady šachových figurek, která probíhala v kooperaci. Po sečtení jednotlivých nákladů jsem stanovil celkové náklady na 22620 Kč bez DPH.

6. Zdroje

[1] MÁDL, Jan. Technologie obrábění. Praha: ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02-091-6.
[2] VOJTĚCH, Dalibor. Kovové materiály. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-600-1.
[3] VLACH, Bohumil. Technologie obrábění. Praha: České učení technické v Praze, 1986.
[4] MÁDL, Jan. Teorie obrábění. Praha: České vysoké učení technické, 1989.
[5] MÁDL, Jan a Ivo KVASNIČKA. Optimalizace obráběcího procesu. Praha: České vysoké učení technické, 1998.
[6] KOMÁREK, Vladimír, ed. Příručka o hliníku. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1969. Řada strojírenské literatury.
[7] Obrábění kovů: teorie v praxi. Lund: Division of Production and Materials Engineering, Lund University, 2014.
[8] astronom.cz [online]. [cit. 2018-06-12]. Dostupné z: http://www.astronom.cz/procyon/chemistry/elox.html
[9] 14220.cz [online]. [cit. 2018-06-12]. Dostupné z: http://www.14220.cz/projekty/eloxovani/
[10] Anodická oxidace hliníku a jeho slitin eloxování [online]. [cit. 2018-06-12]. Dostupné z: http://docplayer.cz/1627199-Anodicka-oxidace-hliniku-a-jeho-slitin-eloxovani.html
[11] DOKONČOVACÍ METODY OBRÁBĚNÍ [online]. [cit. 2018-06-12]. Dostupné z: https://www.spszengrova.cz/texty/texty/STT/DOKON%C4%8COVAC%C3%8D%20METODY%20OBR%C3%81B%C4%9AN%C3%8D-UT.pdf
[12] Základy obrábění [online]. [cit. 2018-06-12]. Dostupné z: http://www.sps-ko.cz/documents/STT_obeslova/Z%C3%A1klady%20obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD.pdf
[13] Přehled a rozdělení obrábění [online]. [cit. 2018-06-12]. Dostupné z: https://www.moodle-trebesin.cz/pluginfile.php/9856/mod_resource/content/0/1.%20P%C5%98EHLED%20A%20ROZD%C4%9ALEN%C3%8D%20OBR%C3%81B%C4%9AN%C3%8D.pdf
[14] Řezné síly při obrábění [online]. [cit. 2018-06-12]. Dostupné z: https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=32841&revision=-1&instance=2
[15] Princip a podstata frézování [online]. [cit. 2018-06-12]. Dostupné z: http://www.sspu-opava.cz/UserFiles/File/_sablony/Praxe_II_a_III/VY_52_INOVACE_H-02-20.pdf
[16] Tvorba nárůstku a jeho vliv na obrábění [online]. [cit. 2018-06-12]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1191
[17] Hliník a jeho slitiny [online]. [cit. 2018-06-12]. Dostupné z: http://www.alfun.cz/o-hliniku
[18] Obrábění titanu [online]. [cit. 2018-06-12]. Dostupné z: http://www.iscar.cz/Media/pdf/ObrabenTitanuProLekarskyPrumysl.pdf
[19] MÁDL, Jan. Optimalizace řezných podmínek v teorii obrábění. 3., přeprac. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1988.

[20] NĚMEC, Milan, Bohumír BEDNÁŘ a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ. Teorie slévání. 2. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-06026-1.
[21] Raketaci.cz [online]. [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: http://www.raketaci.cz/media/kunena/attachments/43/oznacovani_hliniku.pdf
[22] Neželezné kovy a jejich slitiny [online]. [cit. 2018-06-18]. Dostupné z: http://slideplayer.cz/slide/11442746/
[23] Kupkolo.cz [online]. [cit. 2018-06-18]. Dostupné z: https://www.kupkolo.cz/a2z-sroub-na-kosiky-elox_z4594/
[24] Piskovacka.cz [online]. [cit. 2018-06-18]. Dostupné z: http://www.piskovacka.cz/info-82-co-je-piskovani-cim-se-piskuje/
[25] Tryskani.kvalitne.cz [online]. [cit. 2018-06-18]. Dostupné z: http://www.tryskani.kvalitne.cz/tryskani.php
[26] Chatar-chalupar.cz [online]. [cit. 2018-06-18]. Dostupné z: http://www.chatar-chalupar.cz/piskovani/
[27] Cnczone.com [online]. [cit. 2018-06-18]. Dostupné z: https://www.cnczone.com/forums/mass-finishing-equipment-media-stratigies/67225-vibratory-finisher-polishing-aluminum-2.html
[28] MMspektrum.com [online]. [cit. 2018-06-18]. Dostupné z: hhttps://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-je-to-s-reznymi-silami.html
[29] BRYCHTA, Josef, Robert ČEP, Marek SADÍLEK, Lenka PETŘKOVSKÁ a Jana NOVÁKOVÁ. Nové směry v progresivním obrábění [online]. Ediční středisko VŠB – TUO, 2017 [cit. 2018-06-22]. Dostupné z: http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO/texty.pdf
[30] Zozei.sssebrno.cz [online]. [cit. 2018-06-18]. Dostupné z: http://zozei.sssebrno.cz/frezovani-rovinnych-ploch/
[31] Obrobitelnost materiálu [online]. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: http://docplayer.cz/12163799-6-obrobitelnost-materialu.html
[32] Misan.cz [online]. [cit. 2018-06-18]. Dostupné z: http://www.misan.cz/katalog-detail/genos-l200e-my-okuma-genos-l200e-my/
[33] Unex.cz [online]. [cit. 2018-06-18]. Dostupné z: http://www.unex.cz/storage/get/184-soustruh-40-sv-18ra-7310055.pdf
[34] Pramet katalog [online]. [cit. 2018-06-18]. Dostupné z: http://ecat.pramet.com/default.aspx
[35] ISCAR katalog [online]. [cit. 2018-06-18]. Dostupné z: http://www.iscar.com/eCatalog/item.aspx?cat=2302826&fnum=2848&mapp=TG&app=0&GFSTYP=M&isoD=1
[36] ZPS-FN katalog [online]. [cit. 2018-06-18]. Dostupné z: https://www.zps-fn.cz
[37] Guhring katalog [online]. [cit. 2018-06-18]. Dostupné z: http://guhring.com
[38] Alumeco.cz [online]. [cit. 2018-06-18]. Dostupné z: https://www.alumeco.cz/aluminium/tye/kruhove-tye/en-aw-7075/10-mm/p/383/3375
[39] Solidworks.cz [online]. [cit. 2018-06-18]. Dostupné z: https://www.solidworks.cz/produkty/3d-cad/balicky/

[40] Cadcam-systems.cz [online]. [cit. 2018-06-18]. Dostupné z:
https://www.cadcam-systems.cz/cad-cam-software/featurecam/

7. Seznam obrázků

Obr. 1 Rozdělení slitin hliníku [22] 19
Obr. 2 Princip eloxování [8] 22
Obr. 3 Ukázka barev pro eloxované součásti [23] 23
Obr. 4 Ukázka opískované součásti [26] 24
Obr. 5 Ukázka leštěné součásti [27] 25
Obr. 6 Konvenční metody obrábění [29] 26
Obr. 7 Složky řezné síly [28] 27
Obr. 8 Obvodové a čelní frézování rovinných ploch [30] 29
Obr. 9 Nesousledné a sousledné frézování [30] 30
Obr. 10 Tvorba nárůstku a jeho vliv na obráběcí proces [16] 33
Obr. 11 Vnější soustružnický nůž PDJNL 2020 K15 s vyměnitelnou břitovou destičkou DNMG 1500608EL-SI T8330 [34] 40
Obr. 12 Vnější soustružnický nůž SVJBL 2020 K16 s vyměnitelnou břitovou destičkou VCGT 160408F-AL HF7 [34] 41
Obr. 13 Upichovací nůž TGSU 35-3-IQ-4Z s vyměnitelnou břitovou destičkou TAG N3A IC20 [35] 41
Obr. 14 Vnější soustružnický nůž SDJCL 2020 K11-M-A s vyměnitelnou břitovou destičkou DCGT 11T304F-AL HF7 [34] 42
Obr. 15 Vnější soustružnický nůž SVVCN 2020 K16-M-A s vyměnitelnou břitovou destičkou VCGT 160408F-AL HF7 [34] 42
Obr. 16 Multifunkční fréza S390002.030 [36] 43
Obr. 17 Válcová čelní fréza No.3366-12,0 [37] 43
Obr. 18 Válcová čelní fréza 233418.030 TiAlN [36] 43
Obr. 19 Válcová čelní fréza 110418.180 [36] 44
Obr. 20 První návrh pěšce 46
Obr. 21 Upravený návrh pěšce 47
Obr. 22 Pěšec - operační úsek 10 48
Obr. 23 Pěšec - operační úsek 20 48
Obr. 24 Pěšec - operační úsek 30 49
Obr. 25 Pěšec - operační úsek 40 49
Obr. 26 Pěšec - operační úsek 50 50

Obr. 27 Pěšec - operační úsek 60 50
Obr. 28 Pěšec - operační úsek 70 51
Obr. 29 Pěšec - operační úsek 80 51
Obr. 30 Obrábění pěšce 52
Obr. 31 Obrábění pěšce - první pokus optimalizace 54
Obr. 32 Obrábění pěšce - druhý pokus optimalizace 54
Obr. 33 Obrábění pěšce - třetí pokus optimalizace 55
Obr. 34 První návrh věže 56
Obr. 35 Upravený návrh věže 57
Obr. 36 Věž - operační úsek 10 58
Obr. 37 Věž - operační úsek 20 58
Obr. 38 Věž - operační úsek 30 59
Obr. 39 Věž - operační úsek 40 59
Obr. 40 Věž - operační úsek 50 59
Obr. 41 Věž - operační úsek 60 60
Obr. 42 Věž - operační úsek 70 60
Obr. 43 Věž - operační úsek 80 61
Obr. 44 Věž - operační úsek 90 61
Obr. 45 Věž - operační úsek 100 62
Obr. 46 Obrábění věže 62
Obr. 47 Věž - první pokus optimalizace - operační úsek 20 63
Obr. 48 Věž - první pokus optimalizace - operační úsek 70 63
Obr. 49 Obrábění věže - první pokus optimalizace 64
Obr. 50 Obrábění věže - druhý pokus optimalizace 65
Obr. 51 Věž - třetí pokus optimalizace - operační úsek 70 65
Obr. 52 Věž - čtvrtý pokus optimalizace - operační úsek 70 66
Obr. 53 Věž - pátý pokus optimalizace - operační úsek 70 66
Obr. 54 První návrh střelce 67
Obr. 55 Upravený návrh střelce 67
Obr. 56 Střelec - operační úsek 10 68
Obr. 57 Střelec - operační úsek 20 68
Obr. 58 Střelec - operační úsek 30 69
Obr. 59 Střelec - operační úsek 40 69

Obr. 60 Střelec - operační úsek 50 70
Obr. 61 Střelec - operační úsek 60 70
Obr. 62 Střelec - operační úsek 70 71
Obr. 63 Střelec - operační úsek 80 71
Obr. 64 Střelec - operační úsek 90 71
Obr. 65 Střelec - operační úsek 100 72
Obr. 66 Střelec - operační úsek 110 72
Obr. 67 Obrábění střelce 73
Obr. 68 Obrábění střelce - první pokus optimalizace 74
Obr. 69 Střelec - druhý pokus optimalizace - operační úsek 10 74
Obr. 70 Střelec – druhý pokus optimalizace - operační úsek 80 75
Obr. 71 Obrábění střelce - druhý pokus optimalizace 75
Obr. 72 Střelec - třetí pokus optimalizace - operační úsek 20 76
Obr. 73 Obrábění střelce - třetí pokus optimalizace 76
Obr. 74 Obrábění střelce - čtvrtý pokus optimalizace 77
Obr. 75 První návrh královny 77
Obr. 76 Upravený návrh královny 78
Obr. 77 Královna - operační úsek 10 78
Obr. 78 Královna - operační úsek 20 79
Obr. 79 Královna - operační úsek 30 79
Obr. 80 Královna - operační úsek 40 80
Obr. 81 Královna - operační úsek 50 80
Obr. 82 Královna - operační úsek 60 81
Obr. 83 Královna - operační úsek 70 81
Obr. 84 Královna - operační úsek 80 82
Obr. 85 Královna - operační úsek 90 82
Obr. 86 Královna - operační úsek 100 83
Obr. 87 Královna - operační úsek 110 83
Obr. 88 Královna - operační úsek 120 84
Obr. 89 Královna - operační úsek 130 84
Obr. 90 Obrábění královny 85
Obr. 91 Obrábění královny - první pokus optimalizace 86
Obr. 92 Obrábění královny - druhý pokus optimalizace 87

Obr. 93 První návrh krále 87
Obr. 94 Upravený návrh krále 88
Obr. 95 Král - operační úsek 10 89
Obr. 96 Král - operační úsek 20 89
Obr. 97 Král - operační úsek 30 90
Obr. 98 Král - operační úsek 40 90
Obr. 99 Král - operační úsek 50 91
Obr. 100 Král - operační úsek 60 91
Obr. 101 Král - operační úsek 70 92
Obr. 102 Král - operační úsek 80 92
Obr. 103 Král - operační úsek 90 92
Obr. 104 Král - operační úsek 100 93
Obr. 105 Král - operační úsek 110 93
Obr. 106 Král - operační úsek 120 94
Obr. 107 Obrábění krále 94
Obr. 108 Obrábění krále - první pokus optimalizace 95
Obr. 109 Obrábění krále - druhý pokus optimalizace 96
Obr. 110 První návrh koně 96
Obr. 111 Upravený návrh koně 97
Obr. 112 Kůň - operační úsek 10 98
Obr. 113 Kůň - operační úsek 20 98
Obr. 114 Kůň - operační úsek 30 99
Obr. 115 Kůň - operační úsek 40 99
Obr. 116 Kůň - operační úsek 50 100
Obr. 117 Kůň - operační úsek 60 100
Obr. 118 Kůň - operační úsek 70 101
Obr. 119 Kůň - operační úsek 80 101
Obr. 120 Kůň - operační úsek 90 102
Obr. 121 Kůň - operační úsek 100 102
Obr. 122 Kůň - operační úsek 110 103
Obr. 123 Kůň - operační úsek 120 103
Obr. 124 Kůň - operační úsek 130 104
Obr. 125 Kůň - operační úsek 140 104

Obr. 126 Kůň - operační úsek 150 105
Obr. 127 Kůň - operační úsek 160 105
Obr. 128 Kůň - operační úsek 170 105
Obr. 129 Obrábění koně 106
Obr. 130 Obrábění koně - první pokus optimalizace 108
Obr. 131 Obrábění koně - druhý pokus optimalizace 108
Obr. 132 Obrábění koně - třetí pokus optimalizace 109
Obr. 133 Způsob leštění rotačních částí figurek 110
Obr. 134 Způsob leštění nerotačních částí figurek 110
Obr. 135 Odstranění úpichu na figurce 111
Obr. 136 Opískovaná figurka střelce 111

8. Tabulky

Tab. 1 Vlastnosti hliníkové slitiny EN AW-7075 [38] 44
Tab. 2 Náklady na nástroje 113
Tab. 3 Náklady na pořízení materiálu - část první 114
Tab. 4 Náklady na pořízení materiálu - část druhá 114
Tab. 5 Náklady na pořízení materiálu - část třetí 114
Tab. 6 Náklady výroby na Okuma GENOS L200E - MY 115
Tab. 7 Odpisy stroje Okuma GENOS L200E - MY 115
Tab. 8 Náklady na leštění jedné sady figurek 116
Tab. 9 Náklady na odstranění úpichů jedné sady figurek 116

9. Seznam použitých zkratek a symbolů

Symbol	Jednotka	Popis
R_m	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
F	[N]	Řezná síla
F_c	[N]	Tangenciální síla při řezání
F_f	[N]	Radiální síla při řezání
F_p	[N]	Axiální síla při řezání
κ_r	[°]	Úhel nastavení hlavního ostří
$\kappa_{r'}$	[°]	Úhel nastavení vedlejšího ostří
γ_n	[°]	Úhel čela
r_ε	[°]	Poloměr zaoblení špičky
a_p	[mm]	Axiální hloubka řezu
i	[-]	Index obrobitelnosti
v_T	[m/min]	Řezná rychlost
v_{Tet}	[m/min]	Řezná rychlost etalonu
i_θ	[-]	Velikost teploty řezání
θ_{et}	[K]	Teplota obrábění etalonového materiálu
θ	[K]	Teplota obrábění materiálu
$i_{v\theta}$	[-]	Poměr řezných rychlostí při určité teplotě řezání
v_θ	[m/min]	Řezná rychlost materiálu při určité teplotě
$v_{\theta et}$	[m/min]	Řezná rychlost etalonu při určité teplotě
i_{Fz}	[-]	Poměr tangenciálních sil
F_{Zet}	[N]	Tangenciální síla při řezání etalonu
F_Z	[N]	Tangenciální síla při řezání materiálu
$R_{p0,2}$	[MPa]	Smluvní mez kluzu
f	[mm/ot];[mm/z]	Posuv
v_C	[m/min]	Řezná rychlost
n	[ot/min]	Počet otáček
t_A	[min]	Čas jednotkový
t_B	[min]	Čas dávkový