

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

12 134 - Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



Návrh a výroba šachovnice

Diplomová práce

Autor:

Bc. Dominik Andryšek

Vedoucí práce:

Ing. Pavel Novák, Ph.D.

Studijní program:

Výrobní a materiálové inženýrství

Praha, 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Andrýsek** Jméno: **Dominik** Osobní číslo: **419916**
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 šachovnice

Název diplomové práce anglicky:

Chessboard design and manufacture

Pokyny pro vypracování:

1. Návrh designu a materiálu šachovnice.
2. Výroba šachovnice 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.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Anotační záznam

Jméno autora: Dominik
Příjmení autora: Andrysek
Název práce česky: Návrh a výroba šachovnice
Název práce anglicky: Chessboard design and manufacture

Rozsah práce: počet stran 120
počet obrázků 117
počet tabulek 43
počet příloh 0

Akademický rok: 2017/2018
Jazyk práce: CZ

Ústav: 12 134 – Ústav obrábění, projektování a metrologie

Studijní program: inženýrský - Výrobní a materiálové inženýrství

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

Klíčová slova: šachy, šachovnice hliník, hliníkové slitiny, obrábění, frézování

Keywords: chess, chessboard, aluminium, aluminium alloys, working, milling

Využití: Výsledkem práce je vyrobení hrací šachovnice, která bude sloužit k reprezentativním účelům ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie a celému ČVUT. Také lze šachovnici věnovat partnerům a sponzorům školy.

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Pavlu Novákovi, Ph.D. za poskytnutí odborného vedení, za vstřícný přístup při konzultacích a cenné rady při vypracování mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Petru Mikešovi, Ph.D. za významnou pomoc při výrobě výsledné herní šachovnice.

Prohlášení o autorství

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně, bez cizí pomoci, pouze za poskytnutých konzultací. Veškeré podklady a použité zdroje jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

.....

V Praze dne

.....

Podpis

Abstrakt

Tato práce řeší problematiku týkající se výroby hrací šachovnice z hliníkové slitiny EN AW 7075. Klade si za cíl navrhnout, vyrobit, optimalizovat a ekonomicky zhodnotit šachovnicovou hrací desku.

Autor v práci seznamuje čtenáře s hliníkovými slitinami. Podrobně se zabývá jeho vlastnostmi, značením a obrobiteľnosťou. Dále popisuje teorii obrábění zaměřující se především na technologii frézování. Nakonec je rozebrána problematika drsnosti povrchu. V praktické části došlo k návrhu šachovnice spolu s vytvořením úložného prostoru pro hrací figurky. Dále se práce zabývá volbou řezných nástrojů. Testováním vhodných řezných podmínek pro dokončovací strategie a vhodnou tvorbu drážkování hracích polí. Zaměřená je také na testování vhodných dokončovacích strategií a samotnou výrobu šachovnice. Nakonec je uskutečněno technologicko-ekonomické zhodnocení výroby.

Vyrobená šachovnice je určena k reprezentativním účelům ústavu obrábění, projektování a metrologie a celého ČVUT. Dále může být věnována partnerům a sponzorům školy.

Abstract

This bachelor's thesis addresses issues regarding the producing of the chessboard from aluminium alloy EN AW 7075. It aims to design, produce, optimize and economically evaluate chessboard.

The author introduces to the reader the aluminium alloys. It deals in detail with its properties, marking and machinability. It also describes machining theory focusing on milling technology. Finally, the problem of surface roughness is discussed. In the practical part, the chessboard was designed together with the creation of a storage space for playing figures. Further, the thesis deals with the choice of cutting tools. Testing of suitable cutting conditions for finishing operations and appropriate formation of slotting of playing fields. It also focuses on testing the suitable finishing strategies and making a checkerboard itself. Finally, technological and economic evaluation of the production is carried out.

The produced chessboard is intended for representative purposes of the Institute of Machining, Design and Metrology and the whole CTU. It can also be dedicated to partners and sponsors of the university.

Obsah

1. Úvod	9
Teoretická část	10
2. Hliník	10
2.1. Čistý hliník	10
2.2. Slitiny hliníku	10
2.3. Vlastnosti hliníku	14
2.4. Značení hliníku a jeho slitin	15
2.5. Obrobitelnost	16
3. Teorie obrábění	18
3.1. Pohyby při obrábění	19
3.2. Fyzikální principy procesu řezání	20
3.3. Technologie frézování	22
3.3.1. Druhy frézování	22
3.3.2. Frézovací nástroje	23
3.3.3. Frézovací stroje	24
3.3.4. Základní vzorce pro frézování	25
4. Drsnost povrchu	27
Praktická část	29
5. Použité nástroje	29
5.1. Čelní válcová fréza S6106.0	30
5.2. Čelní kulová fréza S6296.0	31
5.3. Čelní kulová fréza S511612.040	31
5.4. Čelní válcová fréza C160402.020	32
5.5. Čelní válcová fréza 120517.180 AlTiN	33
5.6. Vrták A0025.3	34
5.7. Záhlubník G13619.0	34
6. Použité stroje	35
7. Volba řezných podmínek	36
7.1. Kvalita výsledného povrchu	36
7.2. Měření drsnosti povrchu	40
7.2.1. Měření drsností – S6296.0	40
7.2.2. Měření drsností – S511612.040	42
8. Návrh designu šachovnice	43

8.1.	Prvotní návrh šachovnice	43
8.2.	Herní pole	44
8.3.	Obrábění šachových polí	45
8.3.1.	Testování drážkování	45
8.4.	Zapuštění figurek.....	47
8.4.1.	Úprava figurek	48
8.5.	Testování dokončovacích strategií	48
8.5.1.	3D konturování	49
8.5.2.	Řádkování.....	50
8.5.3.	Hladina Z	51
8.5.4.	Optimalizovaná hladina Z.....	52
8.6.	Tvorba zapuštění	53
8.6.1.	Pěšec	53
8.6.2.	Věž.....	60
8.6.3.	Střelec	66
8.6.4.	Kůň	72
8.6.5.	Královna	79
8.6.6.	Král.....	85
8.7.	Konečný návrh šachovnice	90
9.	Výroba šachovnice	92
9.1.	Zarovnání	93
9.2.	Spodní strana.....	93
9.3.	Horní strana.....	100
10.	Technicko-ekonomické zhodnocení.....	103
10.1.	Ekonomické zhodnocení.....	103
10.2.	Technické zhodnocení.....	107
11.	Závěr	108
	Bibliografie	110
	Seznam použitých symbolů a zkratek	113
	Seznam obrázků	116
	Seznam tabulky	119

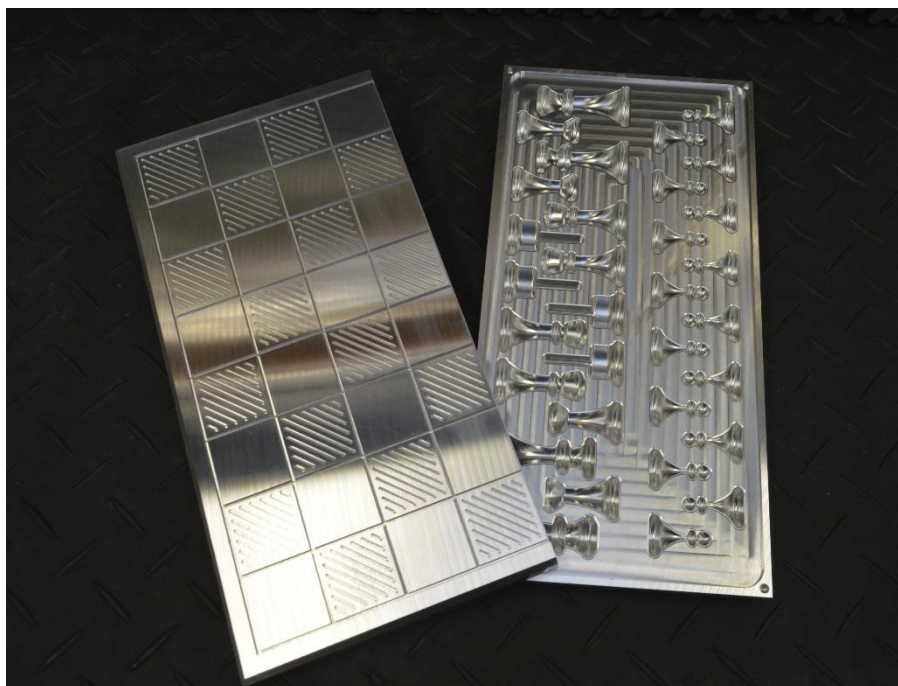
1. Úvod

V práci s názvem návrh a výroba šachovnice bude podrobně popsána problematika obrábění šachovnice ze slitiny hliníku EN AW 7075. Cílem práce bylo navrhnout, vyrobit, optimalizovat a technicko-ekonomicky zhodnotit výrobu herní desky šachovnice. Ta bude sloužit pro reprezentativní účely ústavu obrábění, projektování a metrologie.

V první stati je blíže přiblížen použitý materiál, jeho dělení, vlastnosti, značení a obrobiteľnosť. Navazující kapitola podrobně rozebírá teorii obrábění se zaměřením na technologii frézování doplněnou o určování drsnosti povrchu.

Předposlední stat' pojednává o experimentální části diplomové práce. V té je řešen samotný návrh, výrobní postupy a problémy při výrobě šachovnice. Nejprve došlo k volbě vhodných nástrojů na základě obráběného materiálu, využívaném obráběcím stroji a tvarové náročnosti výrobku. Následně proběhlo testování rezných parametrů pro docílení vyhovujícího povrchu včetně měření drsnosti. V dalším kroku došlo k vytvoření vzorků spodní a horní strany šachovnice, kde byla provedena optimalizace obráběcího procesu z hlediska celkového času obrábění a výsledné jakosti povrchu. Nakonec byly vyhotoveny partprogramy pomocí programu PowerMill Ultimate 2018, dle kterých došlo k výrobě výsledné šachovnice.

V závěrečné části je pak věnována pozornost technologicko-ekonomickému zhodnocení výroby zmíněné šachovnice. Zde byla podrobně přiblížena cenová náročnost výroby,



Obr. 1: Šachovnice

Teoretická část

2. Hliník

Chemickou značkou hliníku je Al (Aluminium). Jedná se o lehký kov šedé barvy, který je velmi dobrý vodič elektrického proudu. V přírodě je hliník jako prvek zastoupen v poměrně velkém množství (cca 7-8 %) a to nejčastěji ve formě sloučenin. Nejznámější horninou na bázi hliníku je bauxit.

V současnosti je hliník a jeho slitiny jednoznačně nepoužívanějším materiálem, který se řadí mezi neželezné kovy. Jedním z hlavních důvodů je jeho nízká hustota a podstatně nižší cena ve srovnání s ostatními neželeznými kovy, jako jsou například titan, měď nebo nikl. [1]

2.1. Čistý hliník

Čistý hliník je nepolymorfní, neušlechtilý, paramagnetický šedý kov s atomovým číslem 13. Krystalizuje v krychlově plošně středěné soustavě. Má výbornou tepelnou a elektrickou vodivost a je velmi dobře kujný.

Ačkoliv hliník patří mezi nejméně ušlechtilé kovy, je velmi stabilní ve velkém množství oxidačních prostředí. Příčinou tohoto jevu je vytvoření tenké kompaktní vrstvy oxidu hlinitého na povrchu při kontaktu s oxidačním prostředím. Tato tenká velmi tvrdá vrstva brání dalšímu pronikání kyslíku k povrchu a jeho oxidaci. [1; 2]

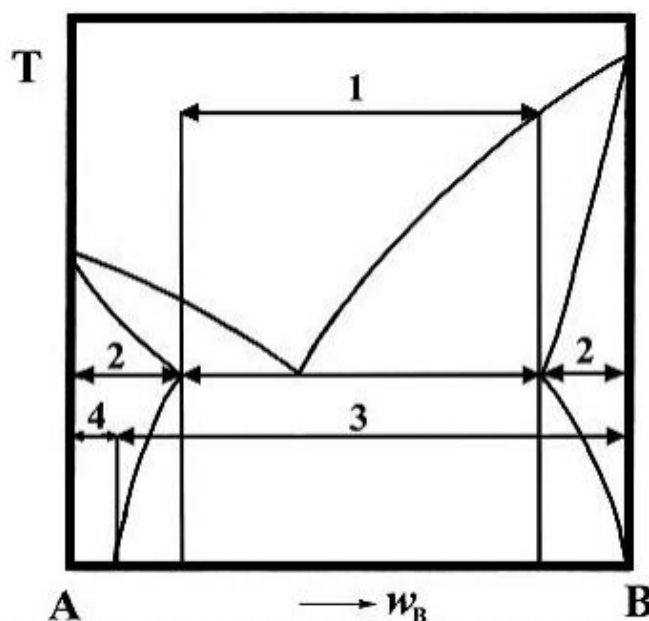
Využití tohoto materiálu je především ve výrobě elektrických vodičů a elektroinstalací. Dále se využívá díky své dobré tepelné vodivosti a korozivzdornosti v kyselém prostředí v chemickém a potravinářském průmyslu. Slouží také k plátování hliníkových slitin pro zvýšení korozivzdornosti. Jako povrchová vrstva zabraňující vzniku koroze a okujení u oceli a slitin niklu. [2; 3]

2.2. Slitiny hliníku

Jelikož jsou vlastnosti čistého hliníku pro konstrukční účely nevyhovující, používají se převážně jeho slitiny. Historie hliníkových slitin není příliš rozsáhlá, protože první slitina pro použití ve strojírenství byla vyvinuta až v roce 1906, známá pod názvem dural (AlCu4Mg). V současnosti existuje přes 120 hliníkových slitin. Zlepšení mechanických a technologických vlastností tedy lze dosáhnout legováním jedním nebo více prvků

- pevnostní vlastnosti – lze zlepšit přidáním Cu a Mg (tyto slitiny jsou známé jako duraly),
- fyzikální vlastnosti – přidáním bóru je možné zvýšit elektrickou vodivost hliníku,
- korozní odolnost - legováním stříbrem je možné u některých slitin zlepšit jejich korozivzdornost,
- technologické vlastnosti – zlepšují u hliníku jeho svařitelnost, přidáním Si se zlepšují slévárenské vlastnosti (siluminy).

Převážně se u slitin hliníku řeší jeho pevnost. Ta je relativně nízká, což značně omezuje jeho využití v praxi. Kromě chemického složení je možné dosáhnout vyšší pevnosti například pomocí deformačního zpevnění, precipitačním zpevněním (GP zóny, koherentní precipitáty), disperzním zpevněním (nekoherentní precipitáty) nebo substitučním zpevněním mřížky vytvořením tuhého roztoku. Zmíněnými metodami je možné zvýšit pevnost natolik, že se vyrovná i měkkým uhlíkovým ocelím. [2]



Obr. 2: Rozdělení hliníkových slitin: 1 – slévárenské slitiny, 2 – tvářené slitiny, 3 – vytvrditelné slitiny, 4 – nevytvrditelné slitiny [20]

Slitiny hliníku se mohou rozdělovat podle několika kritérií (Obr. 2). Z hlediska technologie zpracování, kdy je hlavním rozdílem podíl legujících prvků

- tvářené slitiny hliníku,
- slévárenské slitiny hliníku.

Z hlediska možnosti zvýšení pevnostních vlastností tepelným zpracováním (vytvrzováním) na

- hliníkové slitiny vytvrditelné,
- hliníkové slitiny nevytvrditelné.

Tvářené slitiny

V praxi nacházejí široké uplatnění jako konstrukční materiály, a to především v leteckém, automobilovém a stavebním průmyslu. Z hlediska snížení váhy součástí při zachování dostatečné pevnosti, nabízejí tvářené slitiny hliníku vhodnou alternativu ke konstrukčním ocelím.

Ke zpevňování dochází buď samotnou technologií tváření, nebo tvářením a precipitačním zpevněním. U těchto slitin je důležité, aby při tuhnutí vznikala jednofázová struktura tuhého roztoku α . Podíl jednotlivých prvků zpravidla nepřesahuje 5-7 %. V Tab. 1 je vypsán přehled používaných hliníkových slitin pro tváření. [4; 5]

Tab. 1: Přehled tvářených slitin hliníku [1]

Tvářené slitiny	
Nevytvrditelné slitiny	Vytvrditelné slitiny
Al-Cu-Mg	Al-Mg
Al-Mg-Si	Al-Mn
Al-Zn-Mg	Al-Mn-Mg
Al-Zn-Cu-Mg	

Vytvrditelné slitiny

Vytvrditelnost slitin zásadně ovlivňuje přítomnost Cu a Mg. Tyto prvky se významným způsobem podílí na vzniku vytvrzujících fází (např. Al_2CuMg nebo Mg_2Si). Jestliže chceme, aby byla slitina vytvrditelná, je třeba dosáhnout správné koncentrace přísad s vysokou změnou rozpustnosti v tuhém roztoku v závislosti na teplotě. Po provedení tepelného zpracování u těchto slitin dojde ke zvýšení pevnosti a k poklesu plasticity. [5; 6]

Nevytvrditelné slitiny

Jedná se o slitiny, které nelze precipitačně vytvrzovat. Zde se řadí slitiny jako Al-Mn a Al-Si. Občas se uvádí i slitiny Al-Mg, které se mohou precipitačně vytvrzovat, ale klesá tím odolnost proti korozi. Zvýšení pevnosti se dosahuje pomocí tváření za studena, při kterém dochází k deformaci krystalové mřížky. Vzniká napětí v mřížce, které zapříčiní snížení pohybu dislokací. [5; 6]

Slévárenské slitiny

Tyto slitiny vykazují specifické vlastnosti jako například dobrou slévatelnost, odolnost vůči vzniku trhlin za tepla, dobrou zabíhavost (tekutost). Obecně lze říci, že dobrá slévatelnost znamená takové chemické složení, které leží v blízkosti eutektického bodu v rovnovážném diagramu. Podíl legujících prvků je proto vyšší než u tvářených slitin. V Tab. 2 je přehled nejčastěji používaných slévárenských slitin hliníku. [7]

Tab. 2: Přehled slévárenských slitin hliníku [4]

Slévárenské slitiny	
Al-Si	Al-Si-Cu
Al-Si-Mg	Al-Mg-Si
Al-Cu	Al-Zn-Mg
Al-Mg	Al-Cu-Mg

K nejrozšířenějším slévárenským slitinám patří tzv. siluminy (Al-Si). Nejlepších vlastností mají siluminy s eutektickým složením, kde je podíl Si přibližně 12 %. Nejvyšší pevnost v tahu dosahuje cca 250 MPa. Hrubá struktura s nejnižší pevností vzniká při lití do písku, jemná struktura pak vzniká při lití do kovové formy nebo tlakovým litím. Tyto slitiny se v praxi využívají především v leteckém a automobilovém průmyslu.

Mezi speciální siluminy patří Al-Si-Mg a Al-Si-Cu. Přísady Cu a Mg umožňují tyto slitiny vytvrzovat. Podle obsahu křemíku a přísadových prvků je možné siluminy rozdělit na

- podeutektické (4,5 až 10 % Si),
- eutektické (10 až 13 % Si),
- nadeutektické (14 až 17 % Si). [3; 7; 8]

2.3. Vlastnosti hliníku

Fyzikální vlastnosti

Hliník je nízko tající šedý kov, který je zároveň lehký, měkký, kujný, tažný a má výbornou tepelnou a elektrickou vodivost. Značnou výhodou je i odolnost vůči korozi. Hliník a jeho slitiny mají velice dobré plastické vlastnosti. To je způsobeno kubickou plošně centrovanou mřížkou K12. Nejvýznamnější fyzikální vlastnosti jsou podrobně uvedeny v Tab. 3. [1; 9]

Tab. 3: Vybrané fyzikální vlastnosti hliníku [1; 2]

Vlastnost	Hodnota
Atomové číslo	13
Relativní atomová hmotnost	26,98
Teplota tavení	660,4 °C
Teplota varu	2494 °C
Tepelná vodivost	247 W.m ⁻¹ (při 25 °C)
Tepelná kapacita	0,9 J.g ⁻¹ .K ⁻¹
Elektrická vodivost	62 % IACS (Al 99,8) 65-66 % IACS (Al 99,999+)
Objemová změna při krystalizaci	6,5 %
Teplota supravodivosti	1,2 K
Hustota	2698 kg.m ⁻³ (při 20 °C)
Magnetické chování	Paramagnetický

Uvedené parametry se částečně liší pro různé slitiny hliníku. Tyto vlastnosti jsou využívány při zpracování v oborech, jako je např. jaderná energetika, elektrotechnika a energetický průmysl.

Mechanické vlastnosti

Volba vhodného materiálu pro určitý případ se řídí nejčastěji mechanickými pevnostními vlastnostmi. Mezi zjišťování základních mechanických vlastností se řadí zkouška tahem, tlakem, tvrdosti a rázem v ohybu. Charakteristiky a způsob provedení zkoušek je popsán v normách ČSN EN 10 002-1, ČSN EN 10 003-1, resp. ČSN EN 10 045-1.

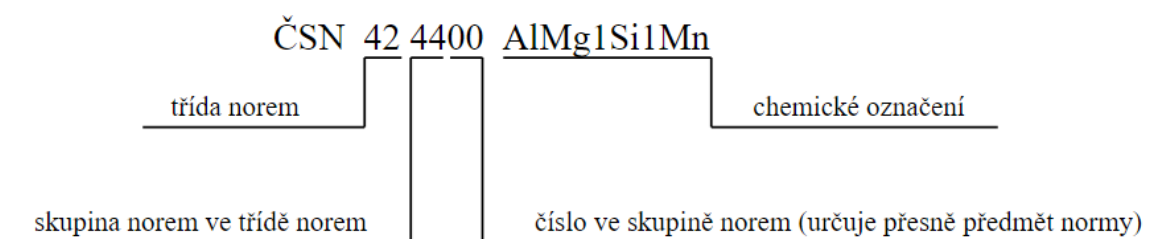
Nejčastější zkouškou pro zjištění mechanických vlastností je zkouška tahem, kde se zjišťují meze pevnosti R_m , meze $R_{p0.2}$, tažnost A a kontrakce Z. Nejvýznamnější metoda pro měření tvrdosti se nejčastěji využívá dle Brinella. Hodnoty zkoušky jsou uvedeny i ve výrobních normách. Pro výzkumné účely je využíváno měření dle Vickerse. Ostatní zkoušky nemají velký praktický význam, protože nelze zachytit existující rozdíly ve vlastnostech. [1]

Mechanické vlastnosti se zásadně liší za nízkých a vysokých teplot. U dlouhodobého namáhání hliníkových slitin při teplotách nad 100 °C začínají hrát roli deformační procesy závislé na čase, především pak tečení. [1]

2.4. Značení hliníku a jeho slitin

Značení dle ČSN

Jednotlivé typy hliníku a slitin hliníku jsou v těchto normách označovány samotnou normou ČSN a šestimístným číslem. Jako příklad třída norem 42 udává hutnictví, skupina norem 40 – 45 představuje hliník a jeho slitiny, určené pro tvářené výrobky nebo odlitky. Doplňujícím označením se někdy dále doplňuje chemické složení daného hliníkového materiálu. [1]



Obr. 3: Příklad značení hliníkových slitin dle ČSN [1]

Značení dle ČSN EN

Označování dle ČSN EN pro hliník a jeho slitiny se dále dělí podle jeho využití. Jako první je norma ČSN EN 573-1 až 3, která platí pro tvářené výrobky a ingoty určené ke tváření. Je stanovena písmeny EN AW a čtyřmi číslicemi, kde A představuje hliník, W určuje tvářené výrobky a jednotlivé číslice chemické složení.

První číslice v čtyřmístném číselném označení představuje skupinu slitin dle charakteristických slitinových prvků. [1]

- 1000 – Al minimálně 99%
- 2000 – slitina AlCu
- 3000 – slitina AlMn
- 4000 – slitina AlSi
- 5000 – slitina AlMg
- 6000 – slitina AlMgSi
- 7000 – slitina AlZn
- 8000 – slitina Al s různými prvky

Druhá norma ČSN EN 1706 platí pro odlitky. Označuje se písmeny EN AC a následujícími pěti číslicemi. Písmeno A opět představuje hliník, písmeno C určuje odlitky. Číselné označení značí chemické složení.

První z pěti číslic v pětímístném označení představuje skupinu slitin stejně jako u hliníkových slitin pro tváření. [1]

- 10000 – Al minimálně 99%
- 20000 – slitina AlCu
- 30000 – slitina AlMn
- 40000 – slitina AlSi
- 50000 – slitina AlMg
- 60000 – slitina AlMgSi
- 70000 – slitina AlZn
- 80000 – slitina Al s různými prvky

2.5. Obrobitelnost

V oblasti obrábění se považuje obrobitelnost jako jedna z nejdůležitějších charakteristik materiálu. Pojem obrobitelnost souhrnně označuje vliv mnoha faktorů, ovlivňujících kvalitativní, kvantitativní ale i ekonomické výsledky procesu obrábění. Obecně se posuzuje z hlediska vlivu materiálu obrobku na intenzitu otěru, energetické bilance procesu obrábění, vlivu na proces tvoření třísky a jakosti nově vzniklého povrchu. Zjednodušeně je možné ji definovat jako míru schopnosti daného materiálu být zpracován jednou z obráběcích technologií.

Obrobitelnost je ovlivněna mnoha faktory, z nichž jsou nejdůležitější:

- metoda obrábění,
- tepelné zpracování obráběného materiálu,
- mikrostruktura obráběného materiálu,
- chemické složení obráběného materiálu, materiál nástroje,
- fyzikální a mechanické vlastnosti obráběného materiálu,

- pracovní prostředí (chlazení),
- geometrie nástroje.

Konstrukční a technické materiály jsou dle normativů rozděleny do několika skupin. Z pohledu charakteristik se obrobiteľnost rozděluje na relativní a absolutní. V každé z níže uvedených skupin existuje jeden konkrétní materiál, který se považuje za etalon. K němu je určována relativní obrobiteľnost všech zbylých materiálů v téže skupině. Absolutní obrobiteľnost je charakterizována buď funkčním vztahem a parametry spolu souvisejícími nebo určitou velikostí dané veličiny charakterizující obrobiteľnost.

Obrobiteľnost se řeší především z hlediska intenzity opotřebení břitu, silového, teplotního, technologického a kvalitativního. K relativním charakteristikám, které vycházejí z intenzity opotřebení břitu, patří hlavně index obrobiteľnosti K_v .

$$K_v = \frac{v_{15zk}}{v_{15et}}, \text{ kde} \quad (2.1)$$

v_{15zk} představuje řeznou rychlost v_c při trvanlivosti $T_n = 15$ min pro zkoušený materiál,

v_{15et} představuje řeznou rychlost v_c při trvanlivosti $T_n = 15$ min pro etalonový (referenční) materiál. [10; 11]

Značení obrobiteľnosti materiálů

Obrobiteľnost je vyhodnocována v rámci 9 základních skupin charakteristicky podobných materiálů. Ty se označují malými písmeny abecedy

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

Skupiny se dále dělí do tříd. Třídy se značí číslem umístěným před písmenem charakterizující jednotlivé skupiny. Odstupňování střední hodnoty indexu obrobiteľnosti v jednotlivých třídách je dáno geometrickou řadou s kvocientem $q = 10^{1/10} = 1,26$. Jinými slovy hodnota řezné rychlosti v dané třídě je vždy 1,26x vyšší či nižší než hodnota řezné rychlosti

v sousední třídě. Referenční (etalonový) materiál má hodnotu kvocientu $q = 1$. Materiály s nižším číslem než etalonový materiál mají horší obrobiteľnosť a obráčeně. Z toho plyne, že vždy materiál s nejnižším číslem má vždy v dané třídě nejhorší obrobiteľnosť. [10]

Obrobiteľnosť hliníku

Obecně platí, že čím lepší tváriteľnosť, tím klesá obrobiteľnosť. Hliníkové slitiny lze v porovnání s ostatními kovovými konstrukčními materiály považovat za ty s lepší obrobiteľností. Naopak čistý hliník je velmi špatně obrobiteľný. To je zapříčiněno rozlišnou strukturou. Působením měkkých částic, precipitátů, ale i stupněm deformačního zpevnění se u hliníkových slitin obrobiteľnosť zlepšuje.

Hliník a slitiny hliníku i přes jejich relativně dobrou obrobiteľnosť, v porovnání s ostatními materiály, nejsou zcela bezproblémově obráběné materiály, a to především při obrábění za sucha. Jejich charakteristikou je vysoká tepelná vodivost. Díky tomu se vytvářené teplo při obrábění kumuluje v obrobku. Následně může docházet k deformaci obrobku vlivem velké tepelné roztažnosti.

Další problém vzniká vlivem nízké teploty tavení (cca 650 °C). Tvořící se tříška se natavuje na břit, případně na čelo destičky. Náchylnost hliníku k nalepování stoupá spolu s obsahem kobaltu, rostoucí zrnitostí karbidu wolframu a drsností řezné hrany spolu s povrchem řezného nástroje. Omezením těchto faktorů klesá nalepování slitin hliníku na nástroj. [1; 12]

3. Teorie obrábění

Obrábění představuje libovolný technologický proces, u kterého dochází ke změně původního polotovaru na požadovaný výrobek určitého tvaru, rozměru a kvality povrchu, pomocí postupného oddělování přebytečného materiálu. Ten v průběhu procesu odlétá ve formě třísek. Samotné obrábění se realizuje v systému stroj – nástroj - obrobek. Často se v systému uvádí dodatečně přípravek. Lze ho rozdělit hned z několika hledisek. [13]

Z hlediska typu práce:

- ruční,
- strojní.

Z hlediska oddělování materiálů:

- kontinuální (soustružení, vrtání),
- diskontinuální (obrážení, hoblování),
- cyklický (frézování, broušení).

Z hlediska charakteristických znaků:

- obrábění pomocí nástrojů s definovanou geometrií (soustružení, frézování, vrtání, obrážení, hoblování),
- obrábění pomocí nástrojů s nedefinovanou geometrií (broušení, lapování, honování),
- nekonvenční metody obrábění (elektroerozivní, chemické, ultrazvukové, laserové, soustředným paprskem),
- úpravy obrobených ploch (leštění, válečkování, brokování).

3.1. Pohyby při obrábění

Aby mohlo dojít k procesu obrábění, je nutné vytvořit pohyby nástroje, respektive břitu nástroje vzhledem k obrobku. Tyto pohyby se dělí na: [13; 14]

Hlavní pohyb

Jedná se o vzájemný pohyb mezi nástrojem a obrobkem, který je uskutečněn pomocí obráběcího stroje. Při soustružení koná rotační pohyb obrobek, při vrtání a frézování tvoří rotační pohyb nástroj. U hoblování dochází k přímočarému pohybu obrobku.

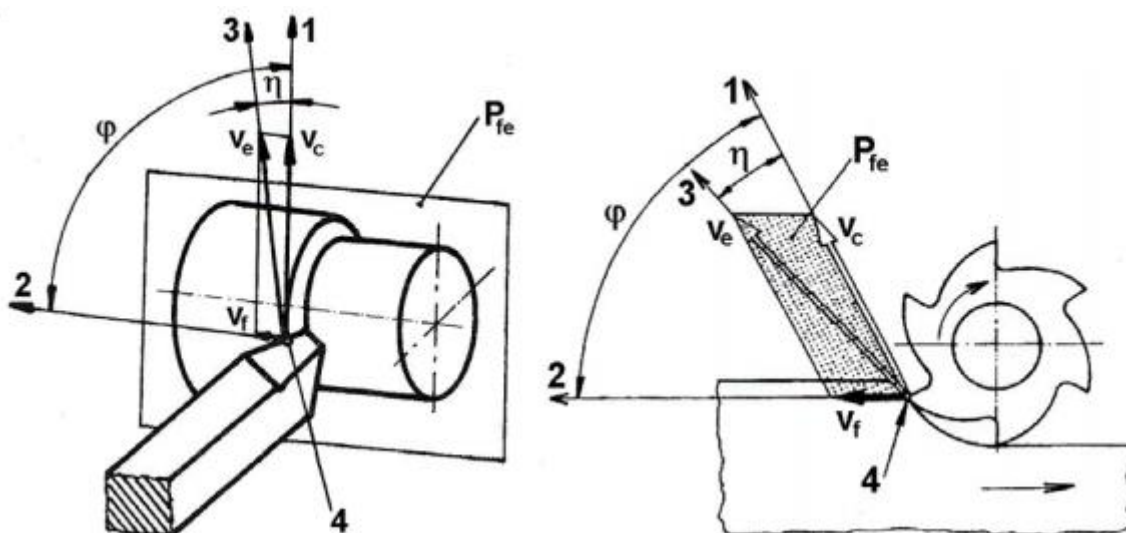
Pro hlavní pohyb je určující řezná rychlost v_c jako okamžitá rychlost mezi ostřím nástroje a obrobku. Okamžitý směr rovněž mezi ostřím nástroje a obrobkem se označuje jako směr hlavního pohybu.

Posuvový pohyb

Je realizován rovněž obráběcím strojem. Představuje relativní pohyb mezi nástrojem a obrobkem. Hlavní a posuvový pohyb tvoří systém, který umožňuje plynulé obrábění. Samotný posuvový pohyb může být pak postupný nebo plynulý. Kromě směru posuvového pohybu, který se udává analogicky, jako u hlavního pohybu se zde udává ještě úhel posuvového pohybu φ a posuvová rychlost v_f .

Řezný pohyb

Je kombinací současného hlavního a posuvového pohybu, respektive výsledný pohyb nástroje vzhledem k obrobku. Ten je tvořen součtem vektoru hlavního a posuvového pohybu. Analogicky jako u předešlých dvou pohybů se zde uvádí směr řezného pohybu, úhel řezného pohybu η a jeho rychlost v_e .

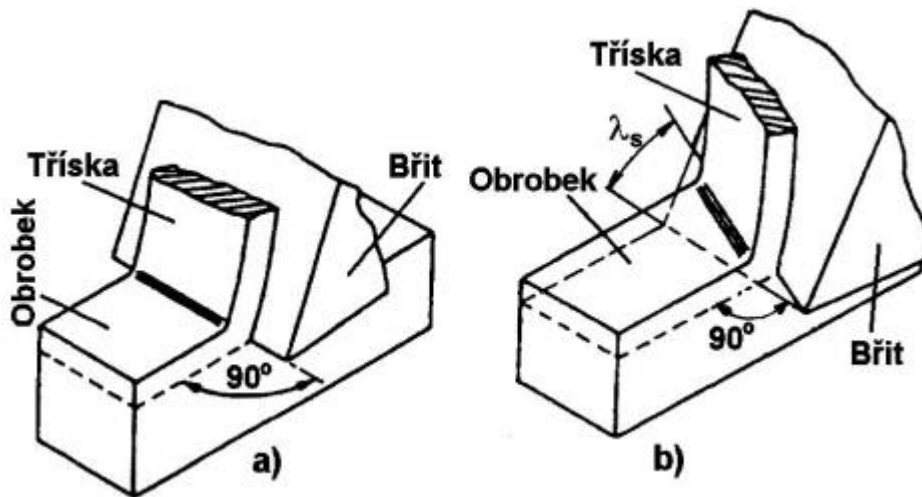


Obr. 4: Schéma pohybů u soustružení a frézování; 1) směr hlavního pohybu, 2) směr posuvového pohybu, 3) směr řezného pohybu, 4) bod ostří [13]

Posledním pohybem, který se uskutečňuje pomocí nástroje nebo obrobku se nazývá přísuv. Jedná se o pohyb, kterým se nástroj nastavuje do polohy pro požadovanou hloubku řezu a_p . Jakmile je dosaženo předepsané hodnoty, je tento pohyb ukončen a dochází k samotnému procesu obrábění.

3.2. Fyzikální principy procesu řezání

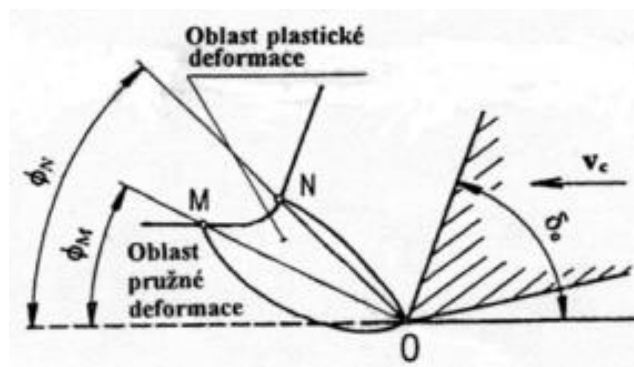
Jak již bylo zmíněno, velký důraz je kladen na výsledný charakter obrobkové plochy. Z tohoto důvodu je zvláště důležité zajistit optimální tvorbu třísky a její odvod z místa řezu. Tento mechanismus je ovlivněn samotným řezným procesem. Ten se dělí na obecné řezání a ortogonální řezání (Obr. 5). [13; 14]



Obr. 5: Realizace procesu řezání; a) ortogonální řezání, b) obecné řezání [14]

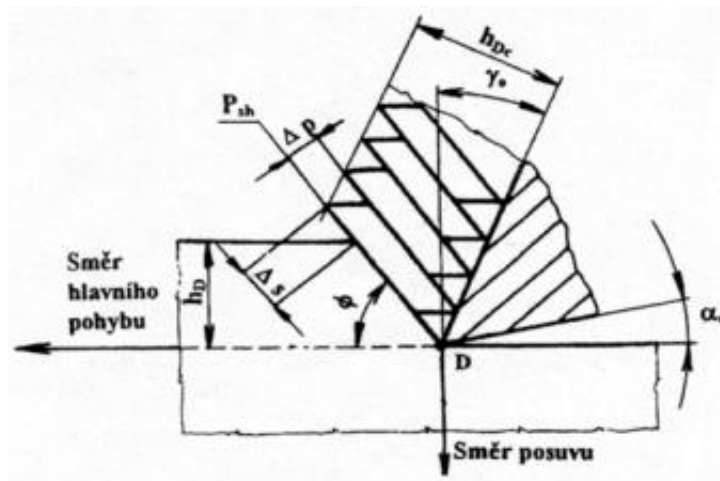
U ortogonálního řezání je typická kolmost ostří nástroje na směr řezného pohybu. Tento způsob se využívá především u frézování nástrojem s přímými zuby, protahování nebo zapichování. U řezání obecného je ostří nástroje pootočeno vzhledem ke směru řezného pohybu o úhel λ_s . Tento způsob můžeme vidět například u podélného soustružení nebo vrtání. [13; 14]

Relativní pohyb nástroje vzhledem k obrobku vytváří vnější zatížení, které působí na odebíranou vrstvu. To způsobuje vznik napětí v této oblasti. Nejprve dochází k tvorbě elastických deformací, které se následně mění na deformace plastické (Obr. 6). [15]



Obr. 6: Schéma tvorby deformací u ortogonálního řezání [15]

Pokud bychom řeznou rychlost snížili, oblast primární plastické deformace by se rozšířila, respektive úhel ϕ_M poroste pomaleji než úhel ϕ_N . Při zvýšení řezné rychlosti, by došlo k opačnému jevu. Při velmi vysokých rychlostech jsou křivky OM a ON téměř identické. V takovém případě lze po zjednodušení uvažovat vznik třísky plastickým skluzem v rovině stříhu P_{sh} , které odpovídá úhel ϕ , jak je zobrazeno na Obr. 6. [15]



Obr. 7: Model tvorby elementární třísky při ortogonálním řezání [15]

Velikost úhlu ϕ lze určit za předpokladu minimální vynaložené práce, jestliže nástroj působí na odřezávanou vrstvu nejmenší možnou silou. Za takových podmínek platí rovnice:

$$\phi = 90^\circ - \frac{\varphi_t + \delta_0}{2}, \quad (3.1)$$

kde φ_t je třecí úhel mezi odcházející třískou a čelem nástroje. Jak vyplývá z předchozí rovnice, úhel ϕ závisí na ortogonálním úhlu řezu δ_0 a třecím úhlu φ_t . [15]

Vzhledem k charakteru této práce bude v teoretické části blíže přiblížena pouze teorie a technologie frézování.

3.3. Technologie frézování

Jedná se o jednu z nejpoužívanějších metod strojního třískového obrábění, kdy je z obrobku odebírán materiál pomocí rotujícího nástroje. Velkou výhodou frézování je možnost obrábět různě složité tvarové plochy.

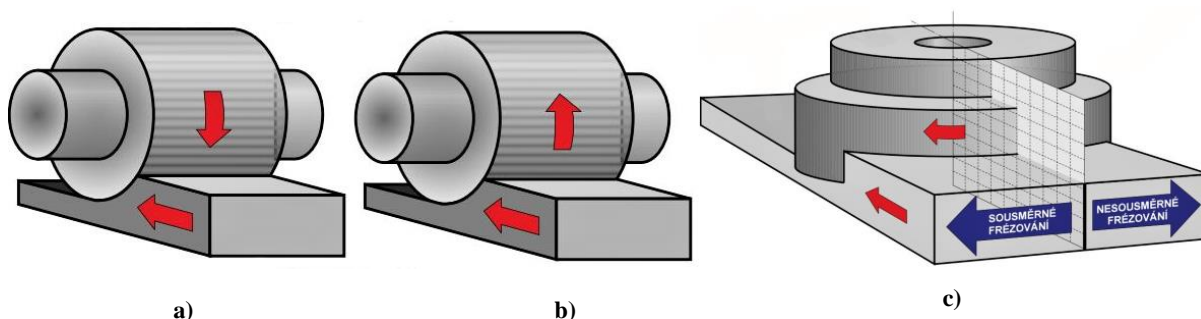
Posuv je realizován především obrobkem. Ten se pak pohybuje nejčastěji ve 3 respektive 4 osách. Vzhledem k použitému nástroji se dále rozděluje frézování na válcové a čelní. Odvozením těchto dvou hlavních pohybů vzniká frézování okružní a planetové. [13]

3.3.1. Druhy frézování

Břity na obvodu nástroje odřezávají požadovanou vrstvu obrobku. Charakteristika zařezávání jednotlivých břitů do materiálu se rozděluje na sousledné a nesousledné.

Při sousledném frézování koná nástroj, respektive obrobek posuv souhlasně se směrem otáčení frézy. Břity nástroje se při tomto způsobu zařezávají od maximální do minimální hloubky odebírané třísky. V porovnání s frézováním nesousledným je takto obrobená plocha kvalitnější. Nevýhodou je vznik rázů a to zejména u starších nebo špatně seřízených strojů. V takovém případě může dojít až k lomu a destrukci břitu nástroje.

U nesousledného frézování se obrobek nebo nástroj posouvá proti smyslu otáčení nástroje. Tento způsob je klidný, bez vzniků větších rázů. Tříska je tvořena od minimální do maximální tloušťky. Břity nástroje nejprve vlivem elastických deformací zpevňují povrchovou vrstvu obrobku. [16; 17]



Obr. 8: a) válcové sousledné frézování, b) válcové nesousledné frézování, c) druhy čelního frézování [13]

V praktické části byla použita metoda sousledného frézování. Hlavním důvodem byla především lepší kvalita povrchu. U nesousledného frézování docházelo k tvorbě jemného rýhování.

3.3.2. Frézovací nástroje

Nástroje pro technologii frézování se nazývají frézy. Frézy jsou několikabřité rotační nástroje. Jelikož je v současnosti technologie frézování velice rozšířená a má spousty uplatnění, portfolio fréz je velice rozmanité. Nejčastější tvary stále představují válec a kužel. Frézy jsou vyráběny různým způsobem v odlišných velikostech. Liší se především tvarem, počtem břitů, možností upnutí a dalšími specifikami.

Frézy můžeme rozdělit hned dle několika hledisek. Zjednodušené schéma je znázorněno na Obr. 9.

<p>Podle umístění zubů</p>	<p>Podle počtu břitů</p>	<p>Podle počtu dílu</p>	<p>Podle materiálů břítu</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Válcové • Čelní válcové • Kotoučové • Kůželové • Úhlové 	<ul style="list-style-type: none"> • Jemnozubé • Polohrubozubé • Hrubozubé 	<ul style="list-style-type: none"> • Celistvé • Dělené • Složené 	<ul style="list-style-type: none"> • HSS • SK • ŘK • Diamanty • Ostatní materiály
<p>Podle směru otáčení</p>	<p>Podle průběhu břítu</p>	<p>Podle způsobu výroby</p>	<p>Podle způsobu upínání</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Pravořezné • Levořezné 	<ul style="list-style-type: none"> • Přímé • Pravořezné • Levořezné • Se střídavými břity 	<ul style="list-style-type: none"> • Frézované • Lité • Podsoustružené 	<ul style="list-style-type: none"> • Nástrčné • Stopkové

Obr. 9: Rozdělení frézovacích nástrojů dle různých hledisek

V současné době jsou velice oblíbené vyměnitelné břitové destičky, které mají rovněž spousty tvarů vzhledem k jejich použití. Jak je uvedeno níže, pro výrobu šachovnice byly použity převážně monolitní frézy, a proto se zde dále nebude hlouběji probírat problematika vyměnitelných břitových destiček.

3.3.3. Frézovací stroje

Stroje používané pro technologii frézování se nazývají frézky. Frézky, stejně jako frézy, jsou vyráběny v různých velikostech a provedeních. Člení se nejčastěji do čtyř základních skupin: konzolové, stolové, rovinné a speciální.

Konzolové frézky

Pro konzolové frézky je charakteristická výškově přenastavitelná konzole. Ta vykonává pohyb na stojanu. Na konzoli je připojený pohyblivý stůl. Díky tomuto nastavení je zajištěn pohyb ve třech osách vzhledem k ose nástroje. Konzolové frézky se dále dělí na:

- horizontální,
- vertikální,
- univerzální [13].

Stolové frézky

Tento typ frézovacích strojů se používá především k obrábění rozměrných obrobků. Tuhý stojan umožňuje použití vyšších výkonů. Vertikální pohyb stroje je zajištěn posuvovým vřeteníkem. Stůl je připevněn k základové desce a zaručuje tak posuv obrobku ve zbylých dvou osách. Obrábění probíhá jak ve svislém směru, tak i ve vodorovném. [16]

Rovinné frézky

Jedná se o nejvýkonnější druh frézovacích strojů. Charakteristická je mohutná konstrukce podobná frézám konzolovým. Rozdíl představuje stůl, který se pohybuje pouze v podélném směru. Zbylé osy zajišťuje vřeteník. Těch může být i více. [13]

Speciální frézky

Konstrukce speciální frézek záleží na typu práce, kterou vykonávají. Dále se zpravidla liší kombinací posuvů a otáčením obrobku během obrábění. Mezi speciální druhy frézek patří:

- CNC frézky,
- frézky na ozubení,
- frézky na závity,
- pantografické frézky,
- frézky na vačky,
- frézky na drážky [16].

Pro výrobu šachovnice byla použita CNC frézka VMC 500 s řídicím systémem Acramatic 2100. Více informací v kapitole 6.

3.3.4. Základní vzorce pro frézování

Jedním ze základních vzorců je výpočet řezné rychlosti, respektive otáček. Je určena okamžitou rychlostí na největším průměru frézy.

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}. \quad (3.2)$$

Další stěžejní veličinou je posuv na zub. Ten závisí na minutovém posuvu, otáčkách a počtu zubů, kterými daná fréza disponuje. Výsledný vzorec vypadá následovně

$$f_z = \frac{v_f}{z \cdot n}. \quad (3.3)$$

Analogicky k tomu je možné spočítat posuv na otáčku. Takový vzorec by byl v následujícím tvaru

$$f_n = \frac{v_f}{n}. \quad (3.4)$$

Jakmile jsou zadány řezné podmínky, respektive vypočítané z hlediska maximálního zatížení, utváření třísky, rozsahu posuvů nebo rozsahu otáček, je možné dopočítat objem odebíraného materiálu.

$$Q = \frac{v_f \cdot a_e \cdot a_p}{1000}. \quad (3.5)$$

Z hlediska výkonnostních charakteristik je důležitý příkon, respektive výkon stroje. Tyto veličiny jsou jedny z rozhodujících pro nákup a využití nového stroje.

$$P = P_c \cdot \eta_w, \quad (3.6)$$

$$P_c = \frac{P}{\eta_u}. \quad (3.7)$$

Velice významné co do nákladů je samotná délka obráběcího procesu. Ta je definovaná celkovou dráhou obrábění jako

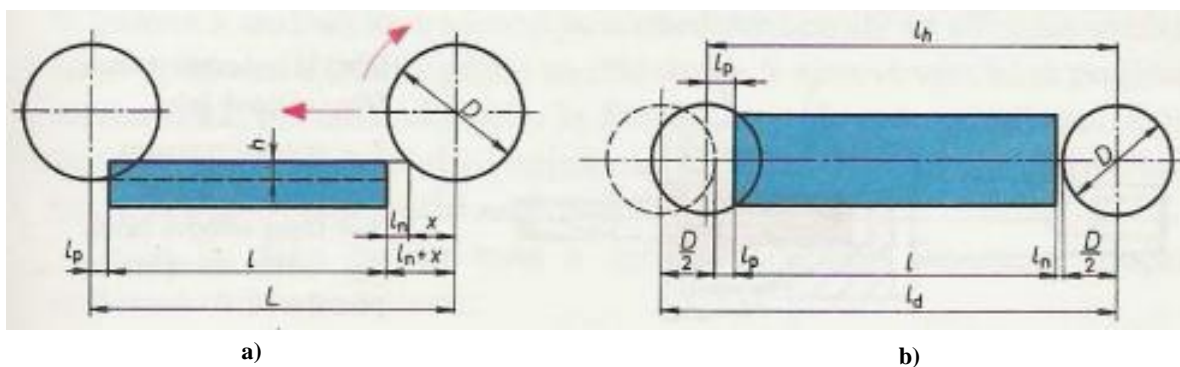
$$t_s = \frac{L \cdot i}{n \cdot z \cdot f_z}, \quad (3.8)$$

kdy celková dráha L je pro válcové a kotoučové frézy definovaná jako

$$L = x + l_n + l + l_p, \quad (3.9)$$

pro čelní frézy je celková dráha L definován jako

$$L = l_n + \frac{D}{2} + l + \frac{D}{2} + l_p. \quad [18; 19] \quad (3.10)$$



Obr. 10: Schéma pro výpočet celkové dráhy L , a) válcové a kotoučové frézování, b) čelní frézování [19]

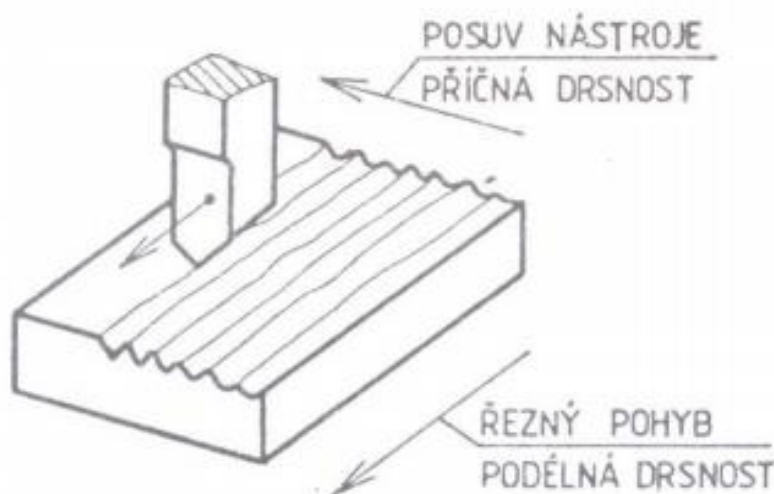
4. Drsnost povrchu

Veškerý povrch předmětů, těles či výrobků není nikdy dokonale hladký. Ve většině případů není cílem dosáhnout dokonale hladkého povrchu, ale povrchu ideálního, tj. takový povrch, který je definován v technické dokumentaci zadané součásti. Drsnost závisí jak na použitém materiálu, tak na metodě výroby povrchu. U velikosti drsnosti je vhodné zvážit skutečnou potřebu, funkčnost a účelnost využití. Vysoce kvalitní povrchy jsou nákladné na výrobu a tak zvyšují cenu produktu. Naopak méně kvalitní povrchy zase mohou ohrozit i samotné fungování zařízení.

Drsnost má podstatný vliv na správný chod součásti jako je například hlučnost, ztráty třením, přestup tepla nebo odolnost proti opotřebení. Tyto vlivy jsou úzce spjaty s životností součásti. Z těchto důvodů je důležité výslednou drsnost vyhodnocovat a následně optimalizovat. Drsnost je tedy souhrnem nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností, které vznikají při výrobě nebo jejím vlivem. Do drsnosti se nepočítají vady povrchu, tj. náhodné nepravidelné nerovnosti, které se vyskytují jen ojediněle (rysky, trhlinky, důlky apod.) a které vznikají vadami materiálu a jejím poškozením.

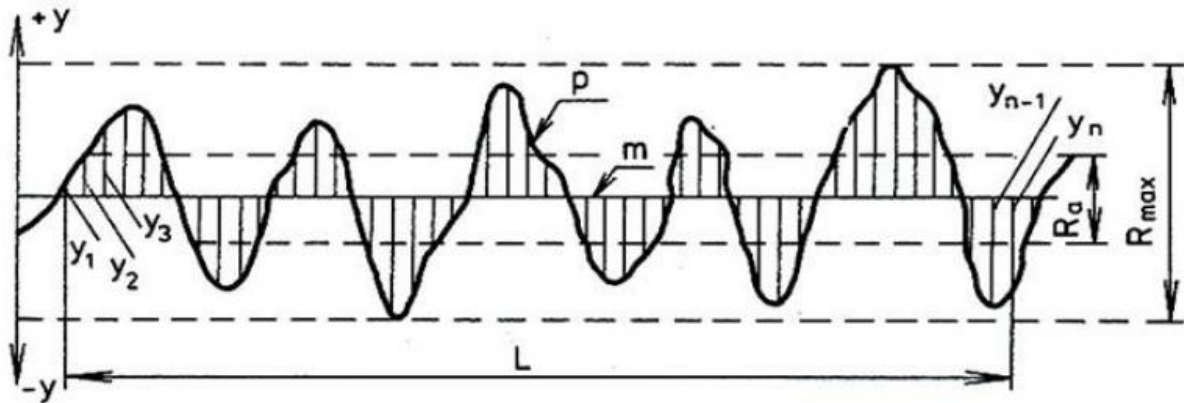
Skutečný povrch má nerovnosti přibližně pravidelně rozložené po celé ploše. V odlišném případě se mohou nerovnosti lišit v jednotlivých směrech. Podle převládajícího směru nerovností se drsnost posuzuje v podélném nebo příčném směru.

- Podélné rozložení nerovností – ve směru řezu,
- Příčné rozložení nerovností – ve směru nástroje.



Obr. 11: Rozdělení drsnosti dle orientace [21]

Norma ČSN ISO 4287 stanovuje dohromady sedm způsobů měření drsnosti povrchu. V České republice se využívá především průměrná aritmetická úchylka od střední čáry profilu m , která se značí R_a . [22]



Obr. 12: Příklad charakteristiky drsnosti povrchu [22]

Ve výrobě se používá tzv. praktická řada drsností. Obsahuje 14 hodnot a každá následující drsnost představuje zhruba dvojnásobek předcházející drsnosti. Na Obr. 13 jsou podrobně popsány obráběcí operace a jejich dosahované drsnosti povrchu.

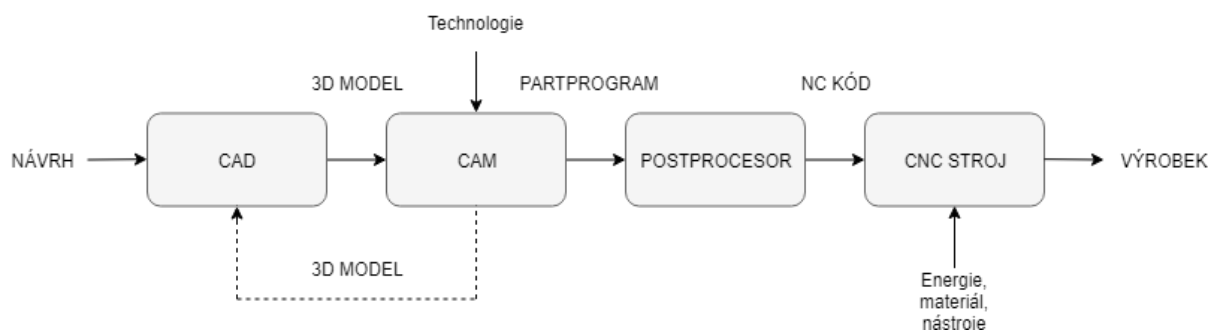
Způsob obrábění	Dosažitelná drsnost R_a [μm]													
	0,012	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25		
Soustružení					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Vyrtávání					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Broušení na kulato v hrotech		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Broušení bezhroté					■	■								
Broušení vnitřní		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Broušení naplocho obvodové		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Broušení naplocho čelní		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Broušení naplocho - křížový výbrus			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Hoblovaní a obrážení								■	■	■	■	■	■	■
Protahování					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Vrtání šroubovým vrtákem									■	■	■	■	■	■
Vrtání speciálním vrtákem						■	■	■	■	■	■	■	■	■
Vystružování						■	■	■	■	■	■	■	■	■
Frézování čelní							■	■	■	■	■	■	■	■
Frézování válcovou frézou								■	■	■	■	■	■	■

■ obtížně dosažitelné ■ běžně dosažitelné ■ hrubování

Obr. 13: Dosažitelná drsnost pro různé způsoby obrábění [22]

Praktická část

Cílem této části práce je návrh, výroba a optimalizace šachovnice. Návrh je omezen technologickými možnostmi stroje, na kterém bude výroba probíhat. Optimalizace představuje především kompromis mezi náklady a jakostí výsledného výrobku. Deska má na vrchní části obsahovat klasické rozložení hracích polí. Ze spodní části je zadáno vytvoření úložného prostoru pro figurky. Šachovnice se musí dát složit a opětovně rozložit.



Obr. 14: Schéma výroby šachovnice

Celkový design byl vytvořen pomocí softwaru Autodesk Inventor 2017. Jednotlivé návrhy byly před výrobou předkládány k posouzení. Pro schválené návrhy byly vytvořeny partprogramy pomocí CAM softwaru PowerMill Ultimate 2018. Vygenerovaný NC kód byl nahrán do systému používané frézky VMC 500. Na stroji byla provedena simulace obrábění, díky které bylo možné eliminovat kolizi nástroj - obrobek. Pomocí zkontrolovaného programu se uskutečnil samotný obráběcí proces. Na závěr zpravidla proběhla kontrola rozměrů a kvality povrchu.

5. Použité nástroje

Nástroje byly voleny na základě vytvořeného návrhu šachovnice. Pro efektivnější obrábění byly použity nástroje ze slinutých karbidů. Důraz byl kladen na výběr fréz s co možná největšími průměry. U takto volených nástrojů bylo možné volit vyšší posuvy. Díky tomu se výrazně zkrátila doba výroby a tím celkové náklady. Dále byla snaha vyhnout se povlakovaným nástrojům. Ty způsobovaly oproti klasickým nástrojům u hliníkových součástí otřepy.

Na výrobu šachovnice bylo použito hned několik frézovacích nástrojů. Nástroje byly koupeny od firem Dormer Pramet, ZPS-FN a.s. a KENNAMETAL. Přehled použitých nástrojů je uveden v následující tabulce.

Tab. 4: Přehled použitých nástrojů

Nástroj	Označení
Čelní válcová fréza $\varnothing 6$ mm	S6106.0
Čelní kulová fréza $\varnothing 6$ mm	S6296.0
Čelní kulová fréza $\varnothing 4$ mm	S511612.040
Čelní válcová fréza $\varnothing 2$ mm	C160402.020
Čelní válcová fréza $\varnothing 18$ mm	120517.180 AlTiN
Vrták $\varnothing 5,3$ mm	A0025.3
Záhlubník	G13619.0

K zarovnávání horní roviny u vzorků v kapitole 8.6. byla použita fréza s vyměnitelnými břitovými destičkami o průměru $d = 40$ mm. Tento nástroj není dále podrobněji specifikován.

5.1. Čelní válcová fréza S6106.0

Po průzkumu trhu s obráběcími nástroji byla vybrána fréza S6106.0 od firmy Dormer Pramet. Podmínkou bylo, aby nástroj obsahoval jeden břit přes střed. Ten umožňuje částečné zavrtávání nástroje nebo zvýšení úhlu sjezdu do záběru. Tento typ nájezdů byl často využíván při tvorbě zapuštění pro uložení figurek.



d_1	6 mm
d_2	6 mm
l_2	20 mm
l_1	60 mm
z	2

Obr. 15: Čelní válcová fréza S6106.0 [24]

Pomocí frézy S6106.0 byly uskutečněny veškeré hrubovací strategie zapuštění pro uložení figurek. Zvolený nástroj představoval nejvíce vyhovující řezné podmínky. Délka ostří spolu s délkou vyložení byly rovněž dostačující. Díky strmějšímu úhlu šroubovice byl zvolený nástroj vhodný na obrábění hliníku. Přehled doporučených řezných podmínek je podrobně rozepsán v Tab. 5.

Tab. 5: Doporučené řezné parametry nástroje S6106.0

Axiální hloubka řezu a_p	6 mm
Radiální hloubka řezu a_e	3 mm
Posuv na zub f_z	0,042 mm/z
Řezná rychlost v_c	350 m/min

5.2. Čelní kulová fréza S6296.0

Fréza byla zakoupena od již zmíněné firmy Dormer Pramet. Pomocí kulové frézy o průměru $d = 6$ mm byla provedena většina dohrubovacích a dokončovacích operací. V místech, kde nebylo možné tuto frézu z prostorových důvodů využít, byla použita kulová fréza s menším průměrem.



d_1	6 mm
d_2	6 mm
d_3	5,5 mm
l_3	20 mm
l_2	8 mm
l_1	57 mm
z	2

Obr. 16: Čelní kulová fréza S6296.0 [24]

Nástroje ze slinutých karbidů mají zpravidla menší vyložení. To představovalo problém při dohrubovacích a dokončovacích strategiích zapuštění krále a královny. Rozhodujícím faktorem pro výběr nástroje S6296.0 byla prodloužená délka vyložení l_3 .

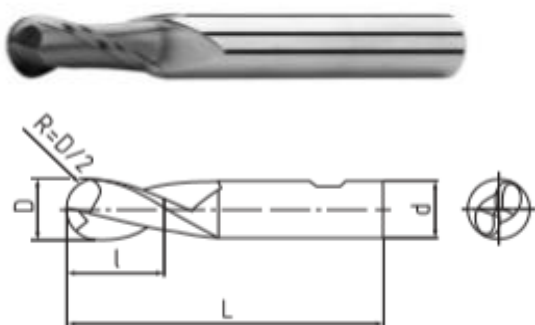
Tab. 6: Doporučené řezné parametry nástroje S6296.0

Axiální hloubka řezu a_p	0,6 mm
Radiální hloubka řezu a_e	0,3 mm
Posuv na zub f_z	0,054 mm/z
Řezná rychlost v_c	350 m/min

5.3. Čelní kulová fréza S511612.040

Kulová fréza S511612.040 byla zakoupena od firmy ZPS-FN a.s. Nástroj byl použit pouze v případě, kdy se z prostorových důvodů nedala využít kulová fréza S62896.0. Následkem bylo zvýšení celkového času obrábění. Nástroje poskytované vybranými firmami

mají zpravidla nejmenší průměr dřívku $d = 6$ mm. Při výrobě hlubších dutin je proto nutné dbát zvýšené opatrnosti, aby nedošlo ke kolizi nástroj - obrobek.



D	4 mm
d	6 mm
l	8 mm
L	57 mm
z	2

Obr. 17: Čelní kulová fréza S511612.040 [25]

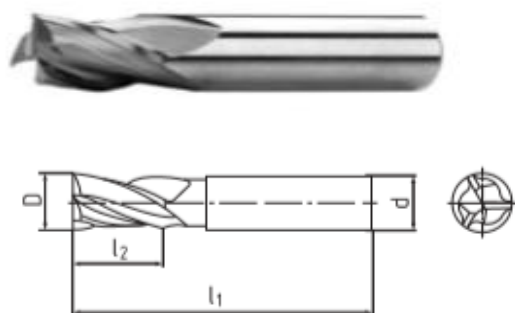
Nástroj byl použit na dohrubovací a dokončovací strategie u zapuštění pěšce a střelce. Z důvodu zvýšení celkového času obrábění přibližně o 30% v porovnání s S6296.0, byla snaha využití nástroje omezit. Přehled doporučených řezných podmínek pro S511612.040 je podrobně rozepsán v Tab. 7.

Tab. 7: Doporučené řezné parametry nástroje S511612.040

Axiální hloubka řezu a_p	0,4 mm
Radiální hloubka řezu a_e	0,2 mm
Posuv na zub f_z	0,038 mm/z
Řezná rychlost v_c	300 m/min

5.4. Čelní válcová fréza C160402.020

Frézovací nástroj C160402.020 byl rovněž zakoupen u firmy ZPS-FN a.s. Vybrán byl na základě testování mezi dostupnými nástroji, které je podrobně popsáno v kapitole 8.3.1. Nástroj je využit pro výrobu drážkování horní plochy šachovnice.



D	2 mm
d	6 mm
l₁	40 mm
l₂	4 mm
z	3

Obr. 18: Čelní válcová fréza C160402.020 [25]

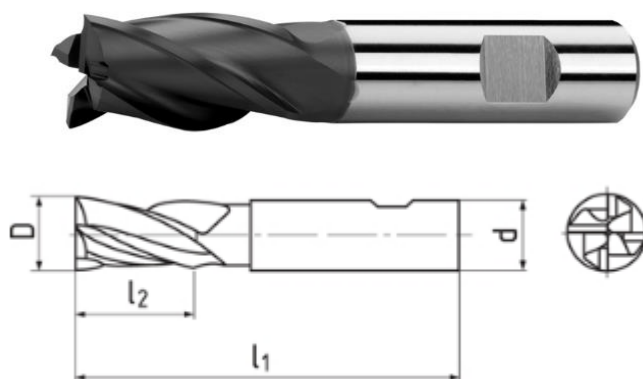
Nástroj není přímo určen pro obrábění hliníkových slitin. Společnost ZPS-FN a.s. proto neposkytuje řezné podmínky pro obrábění těchto materiálů. Vzhledem k obecným znalostem o obráběném materiálu a testování výroby drážkování byly doporučené řezné podmínky následně upravovány.

Tab. 8: Doporučené řezné parametry nástroje C160402.020

Axiální hloubka řezu a_p	1 mm
Radiální hloubka řezu a_e	2 mm
Posuv na zub f_z	0,0075 mm/z
Řezná rychlost v_c	140 m/min

5.5. Čelní válcová fréza 120517.180 AlTiN

Zvolený nástroj byl vybrán na základě testování výsledné kvality obrobeného povrchu a rychlosti obrábění. I když se jedná o povlakovaný nástroj, vykazoval nejvíce vyhovující požadované podmínky ze všech testovaných nástrojů.



D	18 mm
d	16 mm
l₁	92 mm
l₂	32 mm
z	4

Obr. 19: Čelní válcová fréza 120517.180 AlTiN [25]

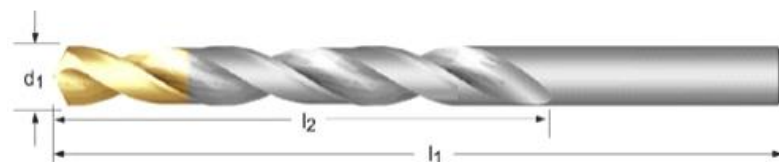
Jelikož se jedná o nástroj, který je primárně určen k obrábění ocelových slitin a vysoko – pevnostních materiálů, nejsou výrobcem specifikovány doporučené řezné parametry. Z toho důvodu jsou v Tab. 9 uvedeny doporučené řezné podmínky pro ocel podobných pevnostních vlastností. Na základě testování byla následně použita vyšší řezná rychlost. Posuv se upravoval tak, aby byla zajištěna ekvivalence řezného odporu dle velikosti ořezávané třísky.

Tab. 9: Doporučené řezné parametry nástroje 120517.180 AlTiN

Axiální hloubka řezu a_p	18 mm
Radiální hloubka řezu a_e	1,8 mm
Posuv na zub f_z	0,056 mm/z
Řezná rychlost v_c	99 m/min

5.6. Vrták A0025.3

Vrták byl vybrán z dostupných zdrojů ústavu. Na rozdíl od zbylých použitých nástrojů, vrták A0025.3 je vyroben z povlakované rychlořezné oceli. Rozměr byl určen na základě velikostí děr určených pro neodymové magnety. Aby bylo možné vytvořit vyhovující lepený spoj, musel být otvor větší o $0,2 \div 0,6$ mm než vkládaný magnet.



d₁	5,3 mm
l₁	86 mm
l₂	52 mm
z	2

Obr. 20: Vrták A0025.3 [24]

Doporučené řezné podmínky jsou podrobně popsány v Tab. 10. Po konzultaci s vedoucím práce a testování zavrtání nástroje, byly ve výsledném programu řezné parametry sníženy. Vzhledem k malému využití nástroje nedošlo k významnému prodloužení času obrábění.

Tab. 10: Doporučené řezné parametry nástroje A0025.3

Axiální hloubka řezu a_p	52 mm
Radiální hloubka řezu a_e	5,3 mm
Posuv na zub f_z	0,06 mm/z
Řezná rychlost v_c	125 m/min

5.7. Záhlubník G13619.0

Pro sražení horní hrany šachovnice byla nejprve zvolena frézovací hlava s VBD o průměru $d = 80$ mm. Při testování programu byl zjištěn problém, kdy díky velikosti výrobku docházelo k dojetí nástroje do koncových bodů stroje. Z toho důvodu došlo ke změně nástroje na 90° záhlubník G13619.0 od firmy DORMER s.r.o. Přesný rozměr vychází z dostupnosti nástroje na ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie.



l_1	63 mm
d_2	10 mm
úhel ostří	90°
z	3

Obr. 21: Záhlubník G13619.0 [24]

Tento nástroj byl těsně před výrobou finální šachovnice testován na kvalitu povrchu. Pro naše využití byly použity menší hodnoty zejména posuvu na zub f_z .

Tab. 11: Doporučené řezné parametry nástroje G13619.0

Axiální hloubka řezu a_p	10 mm
Radiální hloubka řezu a_e	10 mm
Posuv na zub f_z	0,18 mm/z
Řezná rychlost v_c	200 m/min

6. Použité stroje

Veškeré testování a samotná výroba probíhala na obráběcím centru VMC 500 poskytnutá ústavem technologie obrábění, projektování a metrologií. Samotný stroj je špatně uchycen a umístěn na nevhodných základech. Z toho důvodu je stroj náchylný na vibrace. S ohledem na tento fakt bylo potřeba částečně přizpůsobit řezné podmínky. Vlastnosti stroje jsou popsány v Tab. 12.



Obr. 22: VMC 500 [27]

Tab. 12: Podrobné informace stroje VMC 500

Osa X	508 mm
Osa Y	508 mm
Osa Z	508 mm
Délka stolu	787,4 mm
Šířka stolu	508 mm
Max. rychlost vřetene	8000 rpm
Síla hřídelového motoru	11,2 kW
Hmotnost	3593,5 kg

Generované NC kódy byly nahrávány prostřednictvím internetového připojení. Řídicím systémem je Acramatic 2100.

7. Volba řezných podmínek

Řezné podmínky byly voleny na základě doporučených hodnot, které poskytují výrobci řezných nástrojů. U menších fréz $d = 2 \div 6$ mm, které byly použity při vytváření povrchového reliéfu horní strany šachovnice a zapuštění jednotlivých figurek ze strany druhé, nebylo možné využít doporučenou řeznou rychlost v_c vzhledem k limitujícím maximálním otáčkám použité frézky VMC 500, které činily $8\,000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$.

7.1. Kvalita výsledného povrchu

Pro požadující kvalitu výsledného povrchu bylo potřeba zvolit vyhovující řezné podmínky. U hrubovacích a dohrubovacích operací byly voleny doporučené řezné parametry. Pro dokončující strategie byly testovány různé řezné podmínky, kdy byla sledována výsledná kvalita povrchu. Testování bylo provedeno pomocí kulových fréz ze slinutého karbidu S6296.0 a S511612.040.

Proběhlo vytvoření partprogramu pro obrábění zkušební vzorku, který obsahoval zkosenou stěnu pod úhlem 45° . Jako první byla pro testování použita fréza S6296.0. Zkosená plocha byla rozdělena na 25 částí o velikosti 20×20 mm. Na základě vizuální kontroly v programu PowerMill Ultimate 2018 (Obr. 23a) bylo vybráno několik velikostí posuvů na zub f_z a radiálních velikostí hloubky řezu a_e při konstantní řezné rychlosti v_c . V Tab. 13 jsou vypsány řezné podmínky pro jednotlivé části vzorku.

Tab. 13: Přehled řezných podmínek pro testování kvality povrchu frézou S6296.0

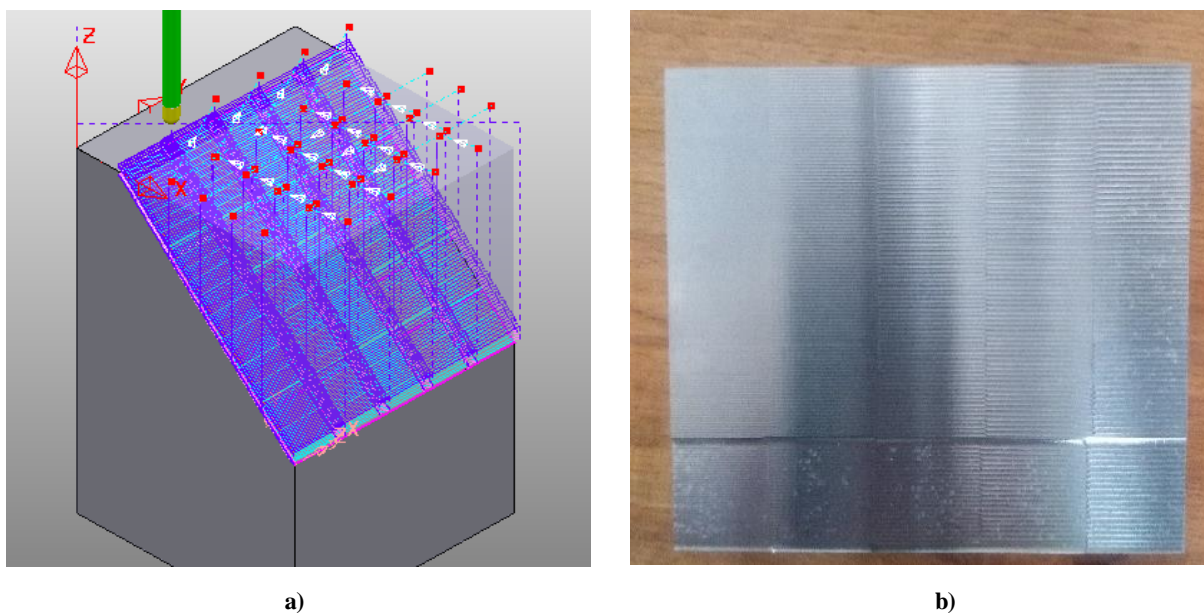
$f \text{ [mm/ot}^{-1}] \downarrow$ $a_e \text{ [mm]} \rightarrow$	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
0,040	1_1	1_2	1_3	1_4	1_5
0,048	2_1	2_2	2_3	2_4	2_5
0,056	3_1	3_2	3_3	3_4	3_5
0,064	4_1	4_2	4_3	4_4	4_5
0,072	5_1	5_2	5_3	5_4	5_5

Z důvodů šetření materiálu byl zvolen naklápěcí stůl, na který byl umístěn svěrák, do něhož byl umístěn polotovar ve tvaru kvádrů o rozměrech $96,3 \times 93,9 \times 26,6$ mm. Naklápěcí

stůl byl upevněn pomocí jednostranného sinusového magnetu. Díky tomu bylo možné vynechat hrubovací strategie a obrábět pouze načisto. Vzhledem k menšímu polotovaru byly okrajové části vytvořené v partprogramu nepatrně zmenšeny pomocí posunutí počátečního souřadnicového systému.

Viditelný zlom ve spodní části zkušební vzorku (Obr. 23b) byl způsoben opětovným spouštěním NC kódu. To bylo zapříčiněno dojetím hlavy použitého nástroje do dolní úvratě osy Z.

V levé a spodní oblasti výsledného povrchu se vyskytovali jemné rýhy. Tento jev byl zapříčiněn nesouslednou orientací obrábění. Dále lze vidět, že se zvyšujícím se posuvem na zub f_z byl výsledný povrch téměř totožný. Významnější vliv na zhoršování, respektive zlepšování povrchu představovala především radiální hloubka řezu a_e (horizontální krok). Pro hloubky řezu vyšších než $a_e = 0,4$ mm byla výsledná jakost povrchu již nevyhovující.



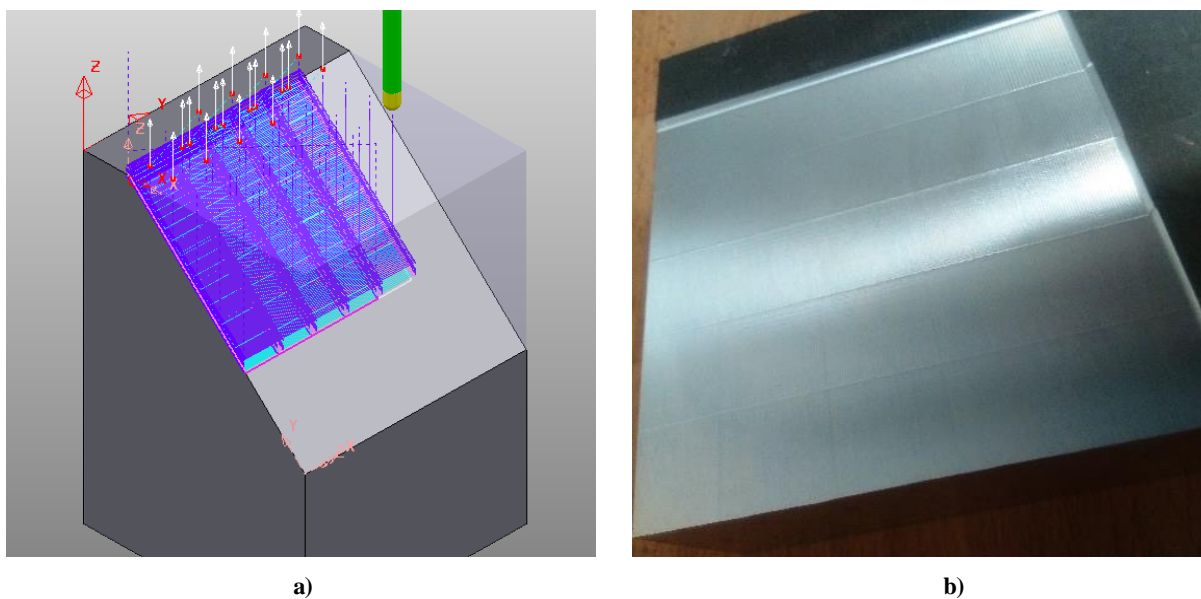
Obr. 23: Testování povrchu D6_01: **a)** vytvořený program pro obrábění zkosení; **b)** výsledný povrch

Jelikož byla většina výsledného povrchu nevyhovující, byl vytvořen obdobný program pro tentýž nástroj. Přesněji řečeno pro nižší radiální hloubky řezu a_e a stejné posuvy na zub f_z . Také byl již všude upraven směr řezu na sousledný. Jako poslední byly změněny velikosti jednotlivých částí z 20x20 mm na 15x15 mm z důvodu úspory materiálu a času.

Tab. 14: Přehled řezných podmínek pro druhé testování kvality povrchu frézou S6296.0

f [mm/ot ⁻¹] ↓ a_e [mm] →	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
0,04	1_1	1_2	1_3	1_4	1_5
0,048	2_1	2_2	2_3	2_4	2_5
0,056	3_1	3_2	3_3	3_4	3_5
0,064	4_1	4_2	4_3	4_4	4_5
0,072	5_1	5_2	5_3	5_4	5_5

Uchycení bylo taktéž provedeno pomocí jednostranného sinusového magnetu, naklápěcího stolu a svěráku. Obráběna byla protější strana původního vzorku. Díky strategii sousledného obrábění již nedocházelo ke vzniku rýh a prohlubní. Z použitých kombinací řezných parametrů nejvíce vyhovoval $f_z = 0,072$ mm/zub a $a_e = 0,2$ mm. To by však představovalo vysokou časovou náročnost, proto byla nakonec zvolena pro další obrábění radiální hloubka řezu $a_e = 0,25$ mm.



Obr. 24: Testování povrchu D6_02: a) vytvořený program pro obrábění zkosení; b) výsledný povrch

Stejně proběhlo testování povrchu pro frézu S511612.040. Vzhledem k rozdílným průměrům u obou fréz, nebylo možné použít stejné velikosti radiálního kroku, pro dosažení stejné maximální výšky nerovnosti. Proto byla pro následující obrábění zadávána maximální velikost výšky nerovnosti, odpovídající maximální výšce nerovností při použití frézy S6296.0.

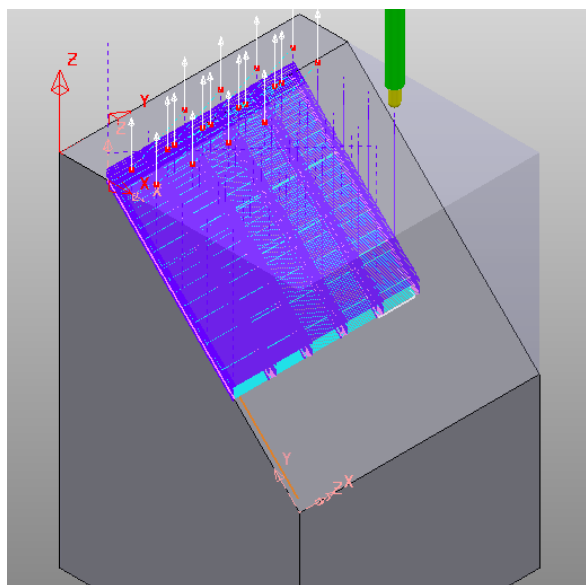
Výsledný krok, respektive radiální hloubka řezu byly dopočítány pomocí CAM softwaru. Posuv na zub f_z byl volen menší, aby nebyla překročena doporučená hodnota od výrobce.

Vzorek byl po druhém testování povrchu z jedné strany frézován do roviny čelní válcovou frézou a následně znovu obroben jako v předešlých případech. Tentokrát pomocí nástroje S511612.040. V Tab. 15 jsou vypsané řezné podmínky pro jednotlivé části vzorku.

Tab. 15: Přehled řezných podmínek pro testování kvality povrchu frézou S511612.040

f [mm/ot ⁻¹] ↓ a_e [mm] →	0,1633	0,2041	0,2449	0,2857	0,3264
0,039	1_1	1_2	1_3	1_4	1_5
0,046	2_1	2_2	2_3	2_4	2_5
0,053	3_1	3_2	3_3	3_4	3_5
0,060	4_1	4_2	4_3	4_4	4_5
0,067	5_1	5_2	5_3	5_4	5_5

Po vizuální kontrole vypadali jednotlivé části vzorku totožně, jako při použití frézy S6296.0. I při dodržení stejné maximální výšky nerovnosti, nebyla výsledná drsnost pro jednotlivé díly stejná. To však nemělo přílišný vliv na vzhled.



a)



b)

Obr. 25: Testování povrchu D4_01: a) vytvořený program pro obrábění zkosení; b) výsledný povrch

Pro dokončovací strategie použité při finální verzi šachovnice byly zvoleny řezné parametry v závislosti na druhu frézy. Pro S6296.0 je posuv na zub $f_z = 0,062$ mm/zub a radiální hloubka řezu $a_e = 0,25$ mm. U nástroje S511612.040 byly zvoleny hodnoty $f_z = 0,046$ mm/zub a $a_e = 0,204$ mm, aby bylo docíleno shodné maximální výšky nerovnosti.

7.2. Měření drsnosti povrchu

Měření drsností vytvořených vzorků bylo provedeno pomocí přenosného drsnoměru MahrSurf PS 10. Přístroj je vhodný pro měření drsností u frézovaných, soustružených, broušených a honovaných dílů. Jedná se o dotykovou metodu, kdy je měření realizováno pomocí indukčního snímače s patkou. Snímaná délka byla dle normy ISO 12085 4 mm. Rozlišení profilu je 8 nm. Výstupními parametry jsou Ra, Rz, Rmax, RSm.

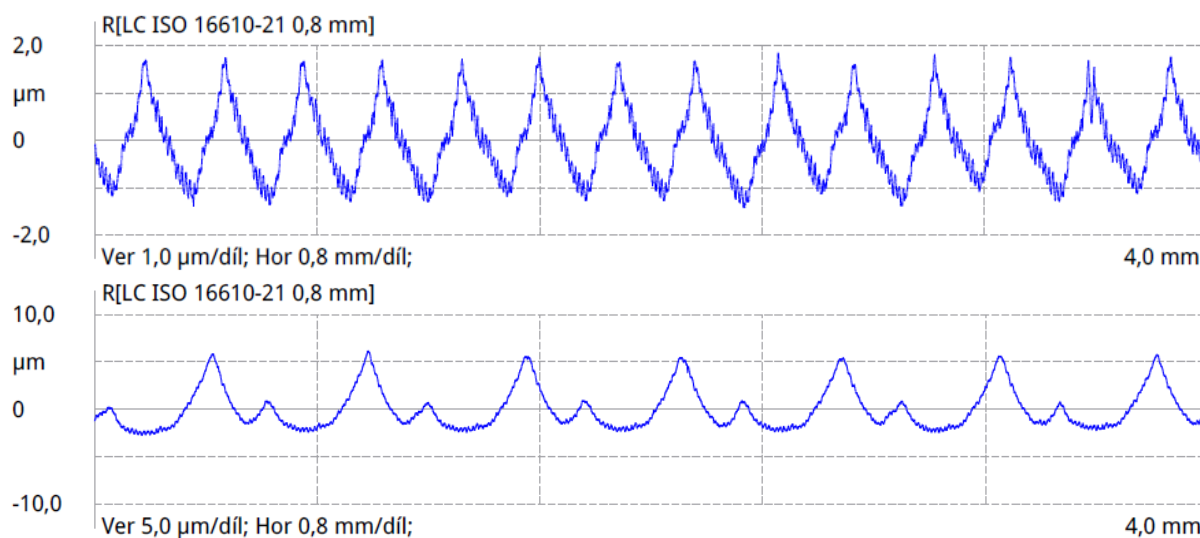


Obr. 26: Drsnoměr MahrSurf PS 10

7.2.1. Měření drsností – S6296.0

Nejprve bylo provedeno měření drsností vzorku obrobeneho pomocí frézy S6296.0. Pro každou část, kde byly odlišné řezné podmínky, se uskutečnilo jedno měření. Drsnoměr následně automaticky provedl vyhodnocení a vynesl výsledné hodnoty do grafu (Obr. 25).

Jak je možné vidět na Obr. 27, výsledné drsnosti obrobeneých ploch se významným způsobem liší. Přehled naměřených hodnot je vypsán v Tab. 16.



Obr. 27: Výsledné drsnosti obroběných ploch: 1_1 a 5_5 frézou S6296.0

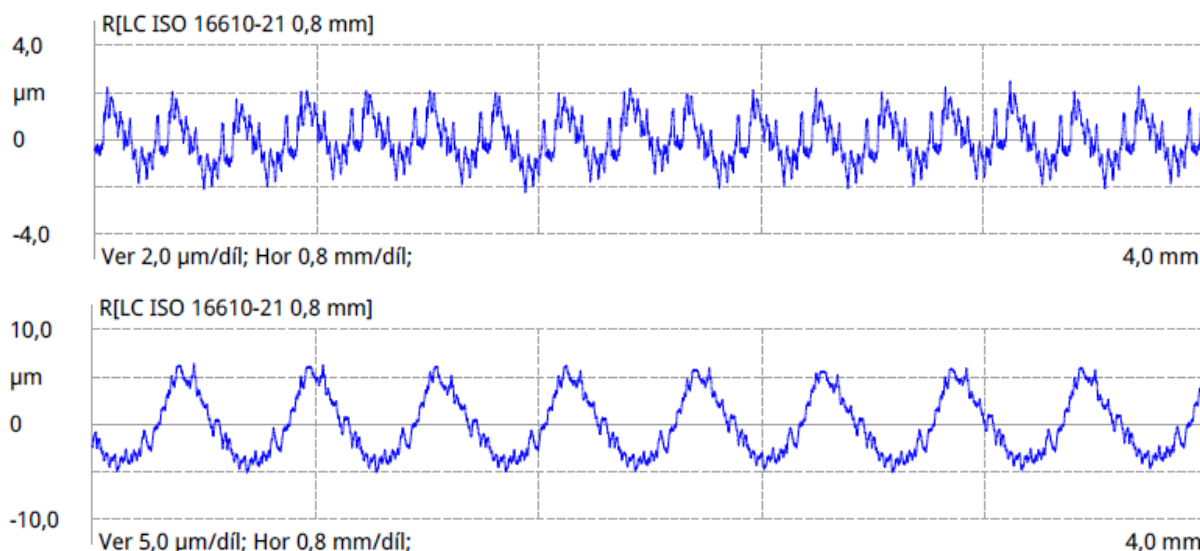
Tab. 16: Naměřené hodnoty drsností obroběných ploch pomocí S6296.0

Část	Ra [μm]	Rz [μm]	Rmax [μm]	RSm [μm]
1_1	0,641	3,126	3,226	284,731
1_2	1,577	6,289	6,409	354,200
1_3	2,068	8,289	8,818	424,000
1_4	2,116	8,213	8,877	491,500
1_5	1,829	8,747	8,959	339,091
2_1	0,592	2,839	3,713	283,643
2_2	1,760	6,679	6,717	354,200
2_3	2,151	8,421	8,679	424,563
2_4	1,815	7,711	8,001	496,643
2_5	1,827	8,792	9,018	331,545
3_1	0,603	2,844	3,035	280,423
3_2	1,726	6,698	6,879	354,500
3_3	2,159	8,716	8,893	424,750
3_4	1,901	7,805	7,982	494,214
3_5	1,869	9,499	9,806	284,154
4_1	0,565	2,742	2,853	283,615
4_2	1,756	6,761	6,949	354,400
4_3	2,156	8,807	8,981	424,556
4_4	1,979	7,953	8,651	495,214
4_5	1,869	9,321	9,721	261,857
5_1	0,572	2,814	2,855	283,269
5_2	1,746	6,954	7,192	354,636
5_3	2,160	8,791	9,131	424,563
5_4	1,926	7,853	8,032	495,714
5_5	1,740	8,158	8,569	423,375

Z naměřených hodnot je patrné, že na drsnost povrchu má vliv především radiální hloubka řezu a_e , jak bylo zřejmé z vizuální zkoušky. U částí s krokem 0,2857 a 0,3264 mm bylo měření negativně ovlivněno nerovností plochy pro vyrovnání jedné části drsnoměru. Vzhledem k obecnému tvaru zapuštění figurek je drsnost povrchu pouze orientační. Výše uvedené hodnoty platí pouze pro obrobenou plochu pod úhlem 45° . Pro zvolené řezné podmínky bude drsnost výsledného povrchu přibližně Ra 1,8.

7.2.2. Měření drsností – S511612.040

Stejně jako v předešlém případě bylo provedeno měření drsnosti povrchu obrobeného frézou S511612.040. Pro každou část, kde byly odlišné řezné podmínky, se opět uskutečnilo jedno měření. Drsnoměr následně automaticky provedl vyhodnocení a zobrazil grafickou závislost.



Obr. 28: Výsledné drsnosti obrobených ploch: 1_1 a 5_5 frézou S511612.040

Při porovnání grafických závislostí drsností povrchů po obrobení obou nástrojů je patrné, že výsledný profil je odlišný. To je zapříčiněno odlišnou velikostí použitých fréz. I když je maximální velikost výstupků totožná, jejich četnost se liší. Drsnosti povrchu u radiální hloubky řezu $a_e = 0,1633, 2,041$ a $0,2449$ mm jsou podobné jako u obrobeného povrchu frézou S6296.0. Zbylé části jsou značně odlišné díky vytvoření stabilnějšímu vyrovnání drsnoměru. Tak bylo zamezeno vzniklé chybě z předešlého měření. Výsledná drsnost pro zvolené řezné podmínky je přibližně Ra 1,2.

Tab. 17: Naměřené hodnoty drsností obrobených ploch pomocí S511602.040

Část	Ra [μm]	Rz [μm]	Rmax [μm]	RSm [μm]
1_1	0,769	4,334	4,550	84,021
1_2	1,262	6,506	6,577	290,885
1_3	2,112	9,329	9,405	347,150
1_4	3,060	12,859	13,127	404,611
1_5	3,201	12,049	12,329	462,625
2_1	0,907	5,126	5,346	87,341
2_2	1,156	5,968	6,118	117,859
2_3	2,408	10,248	10,452	347,150
2_4	3,045	13,387	13,597	404,778
2_5	3,177	12,307	12,515	461,714
3_1	0,929	4,929	5,077	87,081
3_2	1,018	5,502	5,786	156,688
3_3	2,310	9,749	10,048	347,227
3_4	3,074	13,139	13,534	404,444
3_5	3,101	12,551	12,824	462,286
4_1	1,009	5,193	5,409	113,364
4_2	1,238	5,985	6,335	209,472
4_3	2,310	9,678	9,866	347,409
4_4	3,002	12,865	13,001	405,333
4_5	2,794	11,481	11,992	462,250
5_1	1,025	5,406	5,958	128,500
5_2	1,227	6,319	6,756	140,074
5_3	2,155	10,003	10,865	347,409
5_4	3,013	12,575	12,823	405,444
5_5	2,777	11,155	11,443	462,312

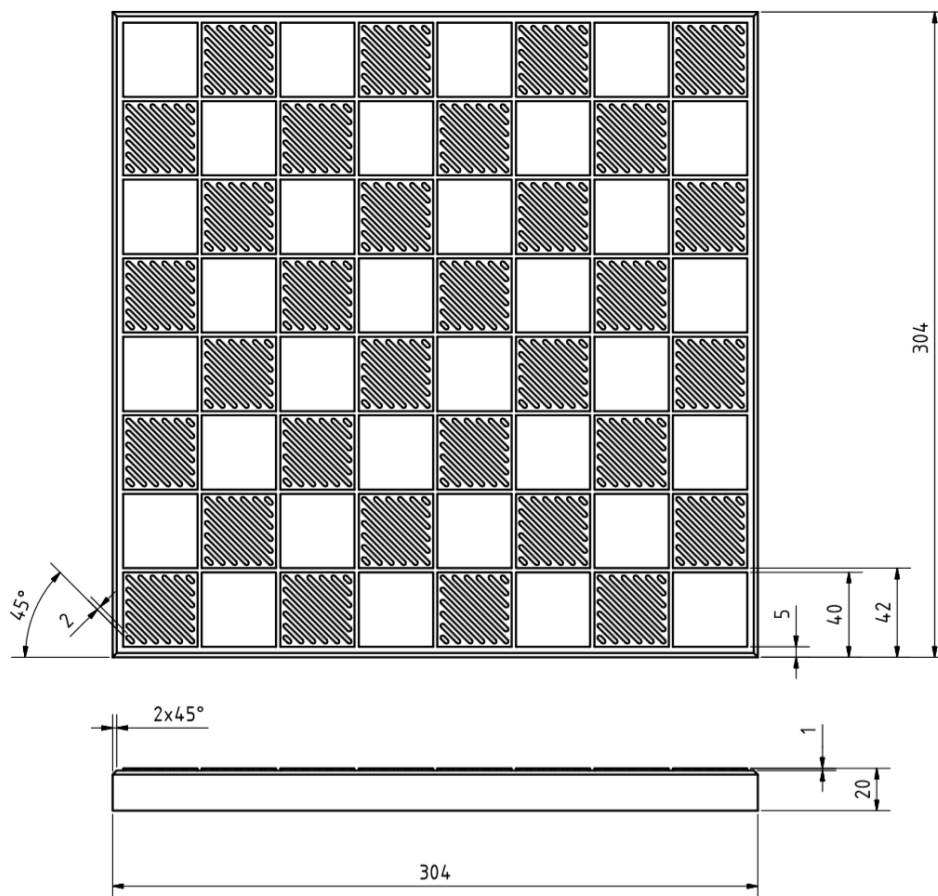
8. Návrh designu šachovnice

Vstupními parametry pro návrh samotné šachovnice byl zadán materiál, základní funkční vlastnosti výrobku a velikost dle již navržených hracích figurek. Deska musela být zavírací nebo rozebíratelná ze dvou částí. Musela také obsahovat úložný prostor pro hrací figurky.

8.1. Prvotní návrh šachovnice

Jako první byly navrženy hlavní rozměry samotné herní desky a jednotlivých polí na základě velikosti největší a nejmenší hrací figurky. Dalším rozhodujícím parametrem bylo možné uspořádání figurek ze spodní strany desky. Prvotní návrh šachovnice bylo nutné navrhnout a vyrobit v krátkém časovém intervalu. Z toho důvodu byla vytvořena pouze hrací

deska bez uložení pro figurky. Díky tomu bylo možné šachovnici navrhnout jako jeden díl. Základní rozměry jsou uvedeny na Obr. 29.

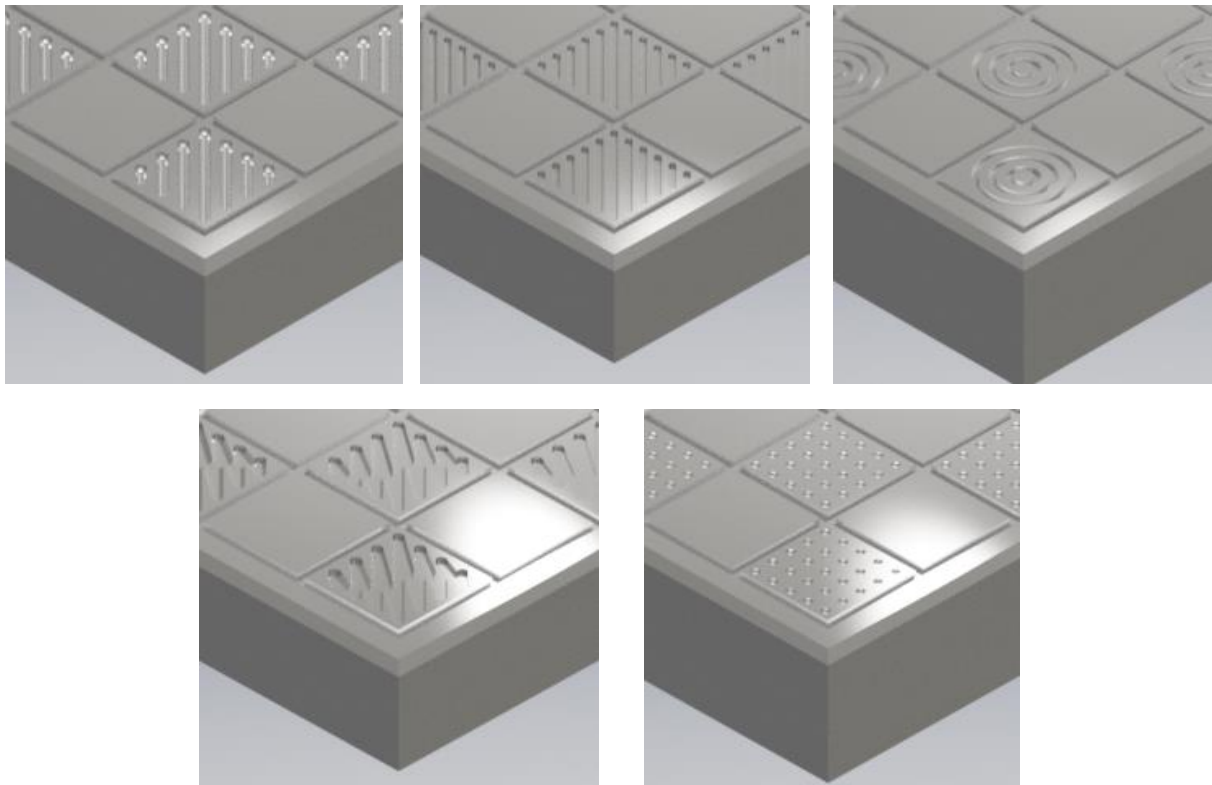


Obr. 29: Rozměry prvotního návrhu šachovnice

8.2. Herní pole

Každá šachovnice obsahuje bílé a černé pole. Jelikož se jedná o hliníkový materiál, rozlišení jednotlivých polí je možné pouze pomocí povrchové úpravy nebo vytvoření gravírování bílých, respektive černých polí pomocí frézování. Jedním z možných variant bylo eloxování, které by se vytvořilo ještě před samotným obráběním. Tím by zůstala vrstva pouze na námi vybraných místech. Problém byl v tom, že vlivem posouvání hliníkových figurek po povrchu, by mohlo docházet k porušení celistvosti povrchové vrstvy. Z toho důvodu bylo zvoleno odlišení bílých a černých polí pomocí vytvoření drážkování.

V dalším kroku bylo vytvořeno několik návrhů gravírování, které byly po konzultaci s vedoucím ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie zhodnoceny a následně byl vybrán jeden, který se dál aplikoval na finální výrobek. Přehled návrhů je zobrazen na Obr. 30.



Obr. 30: Druhy gravírování šachovnice

Vybrán byl návrh s jemným úhlopříčným drážkováním. To bylo provedeno pomocí čelní válcové frézy o průměru $d = 2$ mm. Při obrábění se vyskytlo hned několik problémů, které jsou popsány v kapitole 8.3.1.

8.3. Obrábění šachových polí

Během obrábění horní plochy prvotní šachovnice docházelo k vytváření otřepů na okrajích drážek. Druhý problém představovalo rozšíření drážky v místě zavrtávání frézy. Pro odstranění těchto problémů byl vytvořen vzorek, kde se testovali různé strategie, nástroje a řezné podmínky.

8.3.1. Testování drážkování

Zkouška kvality drážek byla provedena na zkušebním vzorku. Cílem testování bylo především odstranění otřepů při obrábění a vytvářených rozšíření drážek (Obr. 31). Použity byly tři různé nástroje a čtyři různé strategie.

U všech použitých nástrojů byly testovány následující způsoby vytváření drážek

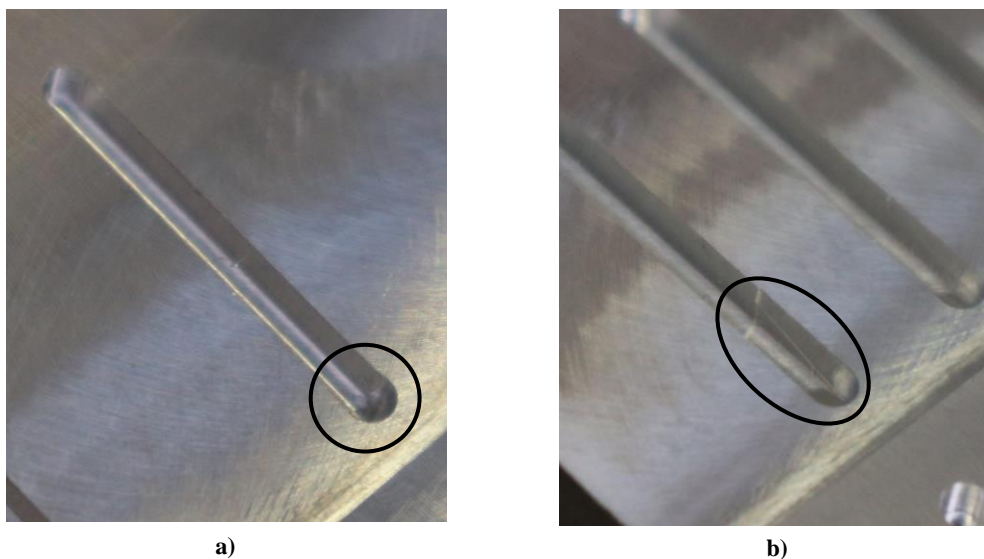
- obrábění s nájezdem pod úhlem,

- násobné obrábění s nájezdem pod úhlem,
- obrábění s nájezdem pod úhlem a s dokončením stěny drážky,
- obrábění s přímým nájezdem.

Testované nástroje představovaly čelní válcové frézy o průměru $d = 2$ mm. Přesné označení použitých nástrojů je:

- C160402.020,
- 233418.020 TiAlN,
- 220408.020.

První a poslední zmíněné frézy vykazovaly uspokojivé výsledky obrobeného povrchu při všech strategiích. Povlakovaná fréza 233418.020 TiAlN se při nájezdu do záběru zlomila. To mohlo být způsobeno přílišným vyložením nástroje nebo samotnou délkou nástroje, která byla výrazně větší než u zbylých dvou. Zmíněný nástroj byl pouze jeden, proto nebylo možné testování tímto nástrojem dále provést.



Obr. 31: Problémy při tvorbě drážkování: **a)** rozšíření drážky, **b)** stopa od nájezdu pod úhlem

Žádný z testovaných nástrojů nevytvářel výraznější otřepy, proto byla zaměřena pozornost především na problém s rozšiřováním drážky při přímém nájezdu a snižování časové náročnosti. Pomocí použití nájezdů pod úhlem, byl odstraněn problém s vytváření rozšíření drážky v místě zavrtávání nástroje. Nicméně tato strategie vytvářela výraznou stopu na stěnách drážky a byla časově náročná (Obr 31b). Tento jev neodstranilo ani použití násobných řezů v axiálním směru. Nejlepšího povrchu bylo dosaženo obrobením drážky s dokončovací

operací, kdy nástroj kopíroval obvod drážky. Tento způsob by však prodloužil výsledný čas obrábění horní plochy šachovnice o čtyřnásobek.

Pro konečné obrábění drážek byl zvolen nástroj ze slinutého karbidu C160402.020. Z důvodu nevyužití doporučených otáček byla navíc zvýšena jeho trvanlivost. Tento nástroj představoval nejkvalitnější výsledný povrch drážek. Výrobci obou testovaných nástrojů doporučují stejnou velikost f_z . Zvolený nástroj má však o jeden zub více. Díky tomu bylo možné zrychlit výslednou výrobu horní plochy šachovnice o 33 %. Dále tento nástroj vytvářel při přímém nájezdu do materiálu pouze zanedbatelné rozšíření. Kompromisem mezi celkovým časem obrábění a výslednou kvalitou povrchu byla zvolena strategie přímého nájezdu.

8.4. Zapuštění figurek

Nejnáročnější částí obráběcího procesu představovala výroba a optimalizace zapuštění pro vkládání figurek ze spodní strany šachovnice. Tyto zapuštění byly vytvořeny offsetem zjednodušeného tvaru každé figurky. Ten byl navržen na základě snížení celkového času obrábění a schopnosti obrobit složité tvary pokud možno co největšími nástroji pro snížení doby obrábění.



Obr. 32: Zadané figurky [32]

8.4.1. Úprava figurek

Jak již bylo zmíněno výše, základní tvar figurek byl dodán spolu s požadavky na výslednou šachovnici. Úpravy jednotlivých figurek probíhaly nezávisle na sobě. Důraz byl kladen na to, aby výsledné zapuštění co nejvíce kopírovalo původní tvar figurky. První krok představovalo vytvoření a testování offsetů původních figurek. Ty měly konečnou velikost 0,15 mm. Dále se upravily zejména úzké „límce“ v horní a spodní částí figurek. Důvodem byla možnost použití frézy s větším průměrem a mohlo tak opět dojít k časové úspoře při obrábění.



Obr. 33: Upravené figurky pro zapuštění

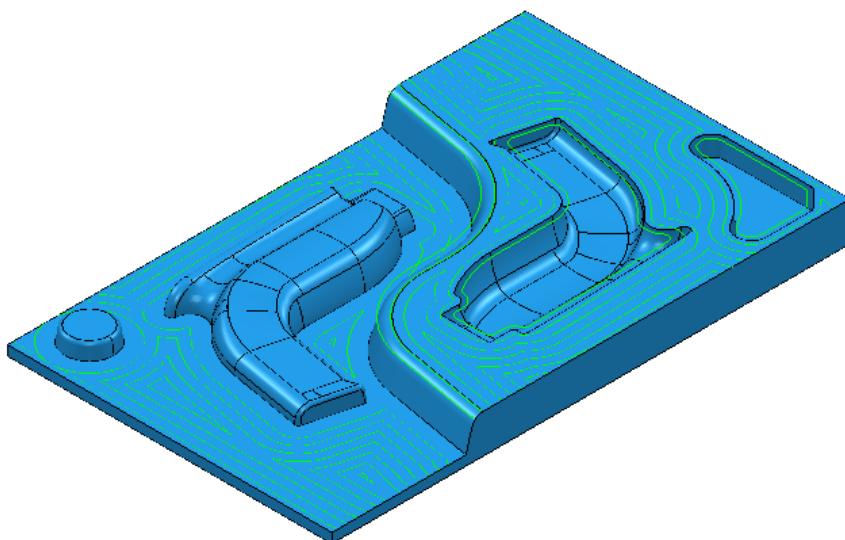
8.5. Testování dokončovacích strategií

U obrábění načisto bylo zkoušeno hned několik dokončovacích strategií. Největší důraz byl kladen na kvalitu výsledného povrchu a celkový čas obrábění. Zkoušeny byly strategie jako „3D konturování“, „řádkování“, „optimalizovaná hladina Z“ nebo „hladina Z“. Testování povrchů se provádělo pouze na zapuštění pěšce z důvodů úspory materiálů a času. Výjezdy,

nájezdy a propojení mezi řeznými dráhami byly u všech použitých strategií různé. Díky tomu bylo možné zajistit optimální dobu obráběcího procesu.

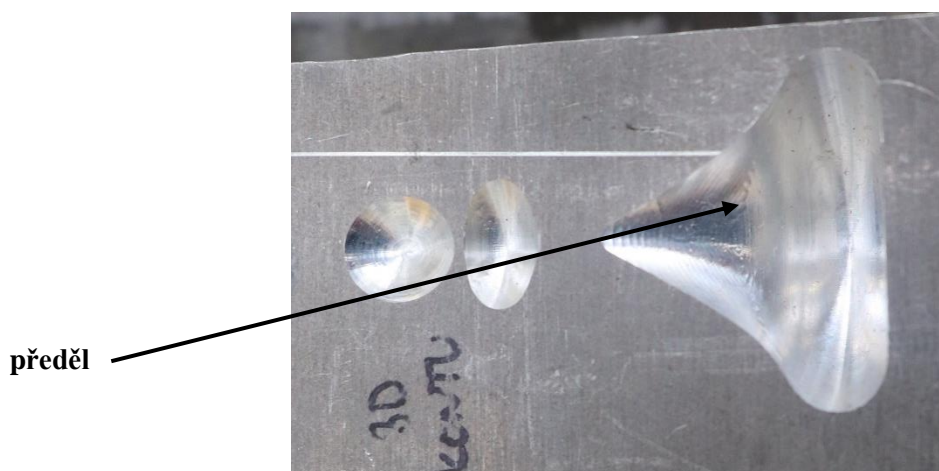
8.5.1. 3D konturování

Strategie „3D konturování“ funguje na principu množiny offsetů začínajících na vnější hranici. Tyto offsety pokračují o zvolený krok směrem do středu zadaného modelu. Strategie funguje na mnoha složitých modelech. Výjimkou jsou oblasti, které jsou vertikální nebo téměř vertikální.



Obr. 34: Příklad strategie 3D konturování [28]

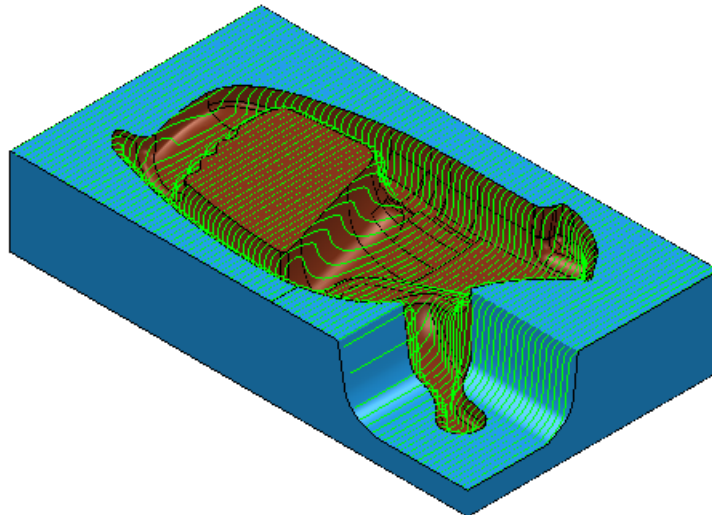
Tato strategie poskytla nedostačující kvalitu povrchu. Ve střední části zapuštění byl vytvořen viditelný předěl mezi jednotlivými dráhami. Jeho odstranění by zvýšilo náklady na obrábění.



Obr. 35: Testování strategie 3D konturování

8.5.2. Řádkování

Podstatou strategie „řádkování“ je vytvoření množiny křivek při požadovaném kroku v rámci zadané hranice. Křivky lze natáčet o potřebný úhel. Stejně tak se dá měnit jejich orientace či styl obrábění. Problém u strategie „řádkování“ může nastat u složitějších modelů, kdy je výrazný rozdíl v úhlu sklonu jednotlivých ploch modelu, které jsou vzhledem k vytvořeným drahám natočeny o libovolný úhel.



Obr. 36: Příklad strategie řádkování [28]

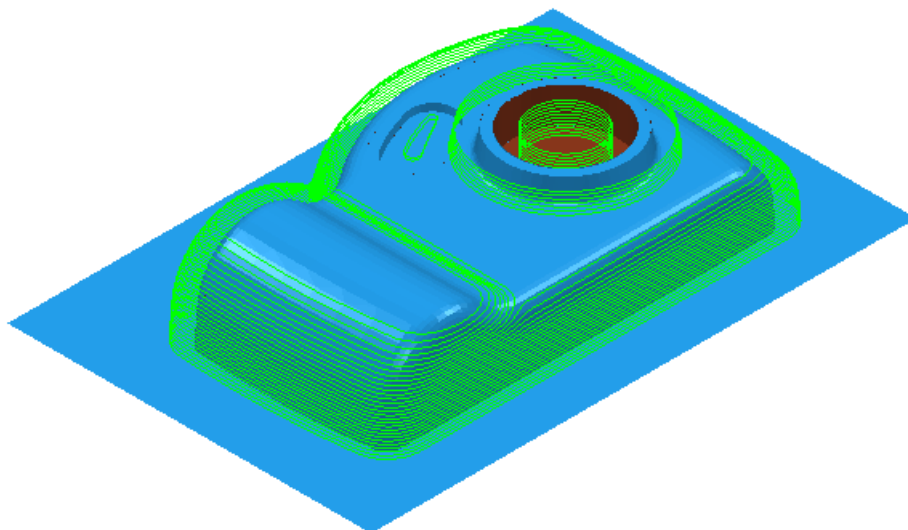
Výsledný povrch vytvořený touto strategií byl nejkvalitnější. Jak je možné vidět na Obr. 37, na obvodu zapuštění zůstaly viditelné stopy po nájezdech a výjezdech použité strategie. Vytvořené stopy lze odstranit pomocí strategie „dokončení po křivce“, která byla použita v dalších kapitolách. Výraznější překážkou byla doba obrábění. Z důvodu zachování sousledného smyslu obrábění, dosahovala tato strategie, téměř dvojnásobných hodnot v porovnání s dalšími testovanými strategiemi.



Obr. 37: Testování strategie řádkování

8.5.3. Hladina Z

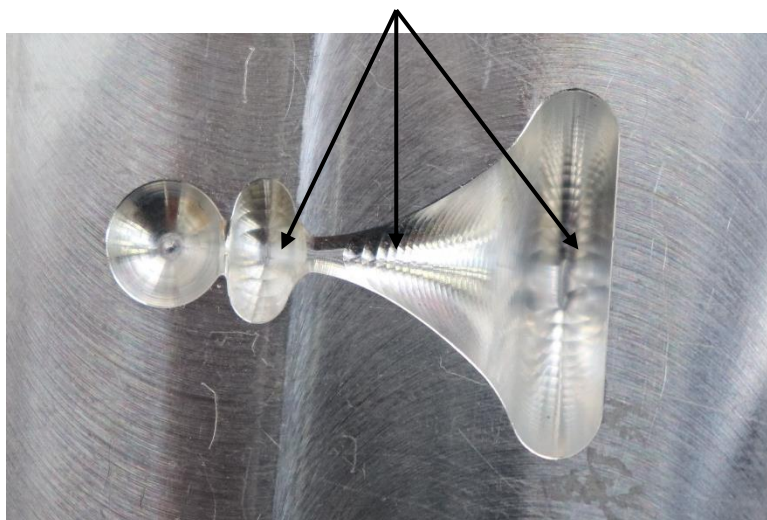
Další testovanou strategií bylo dokončení pomocí „hladiny Z“. Principem je rozřezání modelu na jednotlivé hladiny v ose z. Krok mezi takto vytvořenými hladinami má konstantní velikost. Strategie je vhodná především u téměř svislých a svislých ploch, kde je vyžadována konzistentní hloubka řezu. Při větších změnách sklonu ploch dochází ke značnému zhoršení kvality výsledného povrchu.



Obr. 38: Příklad strategie hladina Z [28]

Jak bylo zmíněno výše, tato strategie není vhodná pro obrábění modelů, kdy dochází k velkým rozdílům sklonu jednotlivých ploch. Z tohoto důvodu byla výsledná jakost obrobeneho povrchu nevyhovující. Konečný čas obrábění byl ze všech testovaných strategií nejkratší.

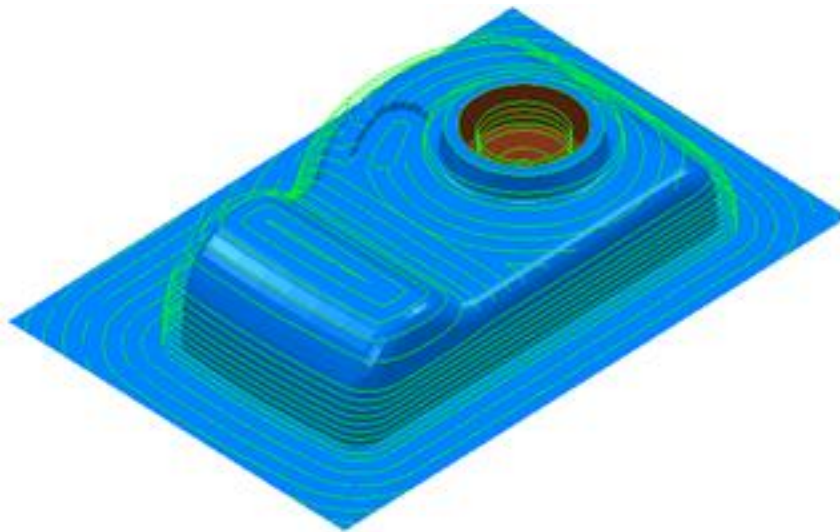
nežádoucí kvalita povrchu



Obr. 39: Testování strategie hladina Z

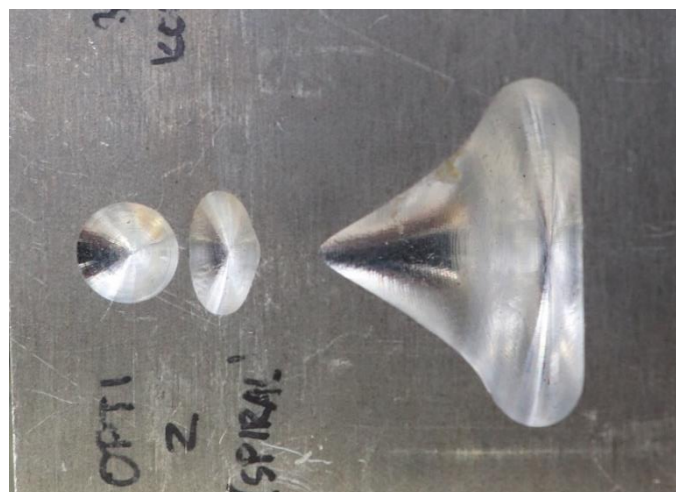
8.5.4. Optimalizovaná hladina Z

Poslední testovanou strategií bylo dokončení pomocí „optimalizované hladiny Z“. Jedná se o obdobnou strategii jako je dokončení „hladinou Z“. Základem je opět vytvoření jednotlivých hladin v ose z. Rozdíl představuje krok mezi dílčími dráhami, který není konstantní. Cílem je dosažení stejné maximální výšky nerovnosti obrobeneho povrchu ve všech místech konečného výrobku. Díky tomu je možné obrábět modely s rozdílným úhlem naklonění ploch s potřebnou kvalitou výsledného povrchu.



Obr. 40: Příklad strategie optimalizovaná hladina Z [28]

Jakost obrobeneho povrchu byla téměř srovnatelná se strategií „řádkování“. Zásadní rozdíl od zmíněné strategie byl v celkovém času obrábění, který byl podstatně kratší. Jediný problém představovaly drobné „zoubky“ ve spodní části zapuštění. Tento zdrsňený povrch bylo možné odstranit přidáním strategie „dokončení po křivce“, jak tomu bude v následujících kapitolách.



Obr. 41: Testování strategie optimalizovaná hladina Z

Rozhodovací kritéria pro výběr dokončovací strategie byly celkový čas obrábění a výsledná jakost obrobeného povrchu. V tabulce níže jsou číselně ohodnoceny jednotlivé strategie vzhledem k rozhodovacím kritériím, kdy číslo 1 je nejvíce vyhovující.

Tab. 18: Zhodnocení dokončovacích strategií

Strategie	Celkový čas dokončení	Výsledná kvalita povrchu
3D konturování	3:57 min	3
Řádkování	5:47 min	1
Hladina Z	3:02 min	4
Optimalizovaná hladina Z	3:29 min	2

Vzhledem k dosaženým výsledkům byla zvolena pro dokončování strategie „optimalizovaná hladina Z“. Ta představovala nejvíce vyhovující kompromis mezi požadovanými kritérii.

8.6. Tvorba zapuštění

Podle upravených figurek (Obr. 33) byly následně zhotoveny výsledné vzorky s otisky pro jednotlivé figurky. U takto vytvořených vzorků se dále pomocí programu PowerMill Ultimate 2018 vytvořily jednotlivé partprogramy. Rozhodujícími parametry byla dostatečná kvalita povrchu a výsledný čas obrábění.

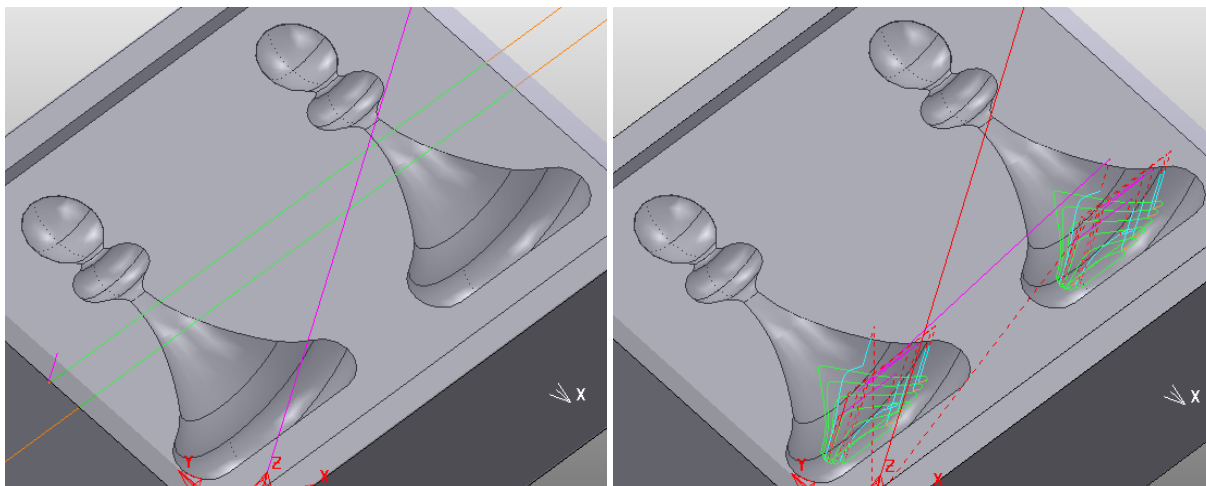
Veškeré vzorky vždy obsahovaly dvě zapuštění pro jednu figurku. Po obrobení se vzorek rozřezal na pásové pile. Tento způsob šetřil čas při opětovném upínání do stroje. Všechny vzorky byly zapuštěny o 3 mm jako u finálního návrhu šachovnice. Dále byl ponechán okraj pro přiklopení a následnou kontrolu fixace vložené figurky.

8.6.1. Pěšec

Vzhledem k testování dokončovacích strategií byl jako první zvolen pěšec pro jeho malé rozměry. Jako polotovar na výrobu vzorku zapuštění pěšce byl použit hliníkový přířez o rozměrech 75x64x30 mm.

1) Hrubování

Při hrubování je odebráno co největší množství přebytečného materiálu za co nejkratší časový úsek. Není zde potřeba klást důraz na kvalitu výsledného povrchu vzhledem k dalším použitým strategiím obrábění.



Obr. 42: Pěšec - hrubování

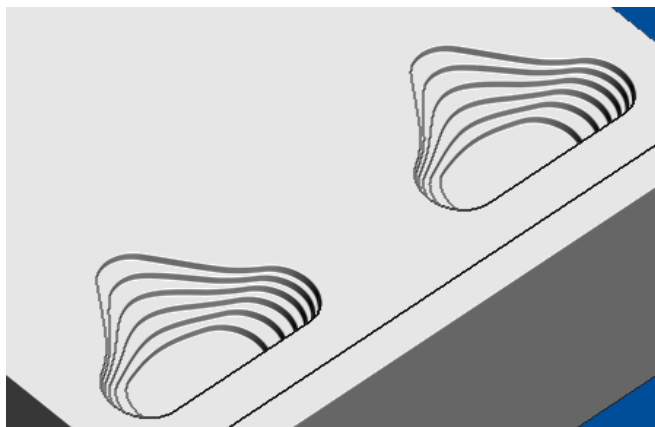
Jako první proběhlo zarovnání horní plochy vzorku pomocí válcové frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami o průměru $d = 40$ mm. Dále byla použita strategie „hrubování schodů“, kdy se nástroj částečně vrací v „hladině Z“ o předem zadaný krok. Při kroku zpět nástroj odebrává menší množství materiálu a bylo tak možné zvýšit celkový posuv.

Nájezdy a výjezdy při hrubování byly zvoleny tak, aby nedošlo ke kolizi nástroj - obrobek. U nájezdů byl použit úhel sjezdu 25° z výšky 2 mm. Ten byl určen na základě doporučených hodnot, které činí $15 \div 30^\circ$ při 70% posuvu. Při kontrole pomocí simulace bylo zjištěno, že není potřeba zadávat výjezdy ze záběru, aniž by došlo ke kolizi nástroj - obrobek. Propojení řezných drah představoval „krok dolů“.

Tab. 19: Řezné podmínky – hrubování pěšce

Nástroj	S6106.0
Axiální hloubka řezu a_p	3 mm
Radiální hloubka řezu a_e	6 mm
Posuv na zub f_z	0,042 mm/z
Řezná rychlost v_c	132 m/min
Přídavek načisto	0,2 mm
Chlazení	Ano
Směr řezu	Sousledný

Řezné podmínky pro zarovnání povrchu nejsou uváděny, jelikož je tato strategie použita pouze u vzorků. Parametry řezání pro hrubování samotného zapuštění jsou podrobně rozepsány v Tab. 19.

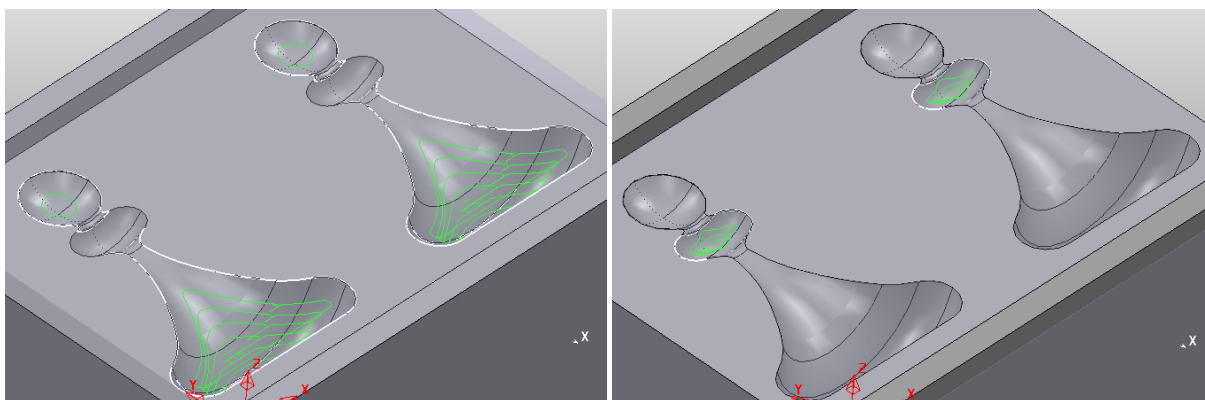


Obr. 43: Vizualizace pěšce - hrubování

2) Dohrubování

Jak je možné vidět výše, pro hrubování byla použita čelní válcová fréza o průměru $d = 6$ mm. Díky tomu nebylo možné zajistit konstantní přírůstek pro dokončovací operaci. Z toho důvodu bylo do obráběcího procesu zařazeno tzv. dohrubování. Tato strategie slouží k zajištění konstantního přírůvku pro dokončování.

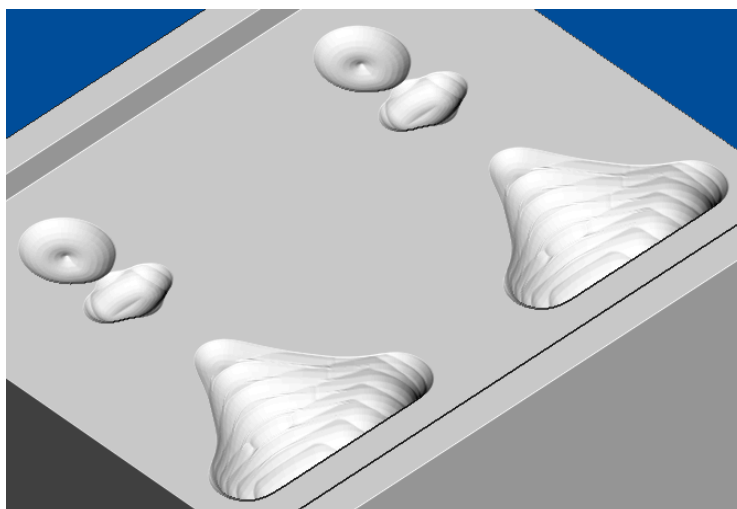
Dohrubování bylo rozděleno do dvou úseků (Obr. 44), dle použitého nástroje. První úsek byl obroběn pomocí kulové frézy S6296.0 o průměru $d = 6$ mm. Tento nástroj byl zvolen pro časovou úsporu. Pro jeho velké rozměry musela být dále použita kulová fréza $d = 4$ mm, která zajistila dohrubování i v horním límci stejného průměru. Stejně jako u hrubování byla použita strategie „hrubování schodů“. Stejně zůstaly i nájezdy, výjezdy a propojení.



Obr. 44: Pěšec - dohrubování

Tab. 20: Řezné podmínky – dohrubování pěšce

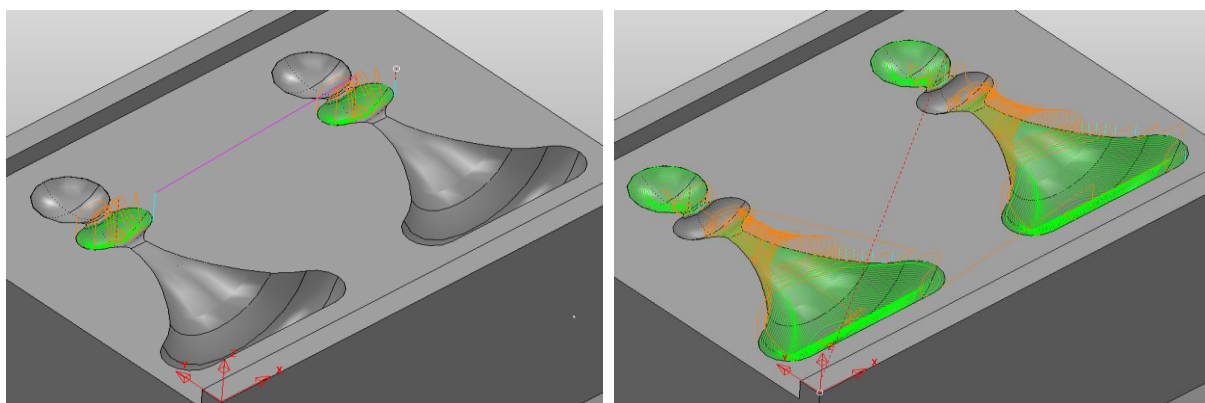
Nástroj	S6296.0	Nástroj	S511602.040
Axiální hloubka řezu a_p	0,3 mm	Axiální hloubka řezu a_p	0,2 mm
Radiální hloubka řezu a_e	0,6 mm	Radiální hloubka řezu a_e	0,4 mm
Posuv na zub f_z	0,054 mm/z	Posuv na zub f_z	0,038 mm/z
Řezná rychlost v_c	132 m/min	Řezná rychlost v_c	88 m/min
Přídavek načisto	0,2 mm	Přídavek načisto	0,2 mm
Chlazení	Ano	Chlazení	Ano
Směr řezu	Sousledný	Směr řezu	Sousledný



Obr. 45: Vizualizace pěšce - dohrubování

3) Dokončení optimalizovanou hladinou Z

Jak bylo podrobně rozepsáno v kapitole 8.5., strategie „optimalizovaná hladina Z“ nejvíce vyhovovala dokončení požadovaného tvaru zapuštění figurky.



Obr. 46: Pěšec - dokončení optimalizovanou hladinou Z

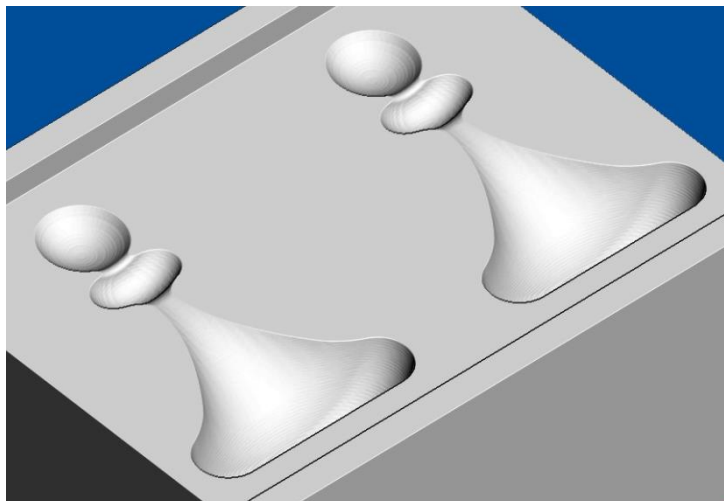
Stejně jako u strategie dohrubování, tak i dokončování muselo být rozděleno na dva úseky podle použitého nástroje. Nájezdy představoval tzv. vertikální oblouk při nastavení úhlu 45° a rádiusu 1 mm. Výjezdy zůstaly stejné jako u předešlých strategií. Propojení jednotlivých drah bylo realizováno pomocí tzv. kruhového oblouku. Ten představoval nejkratší čas obrábění.

Tab. 21: Řezné podmínky – dokončení pěšce

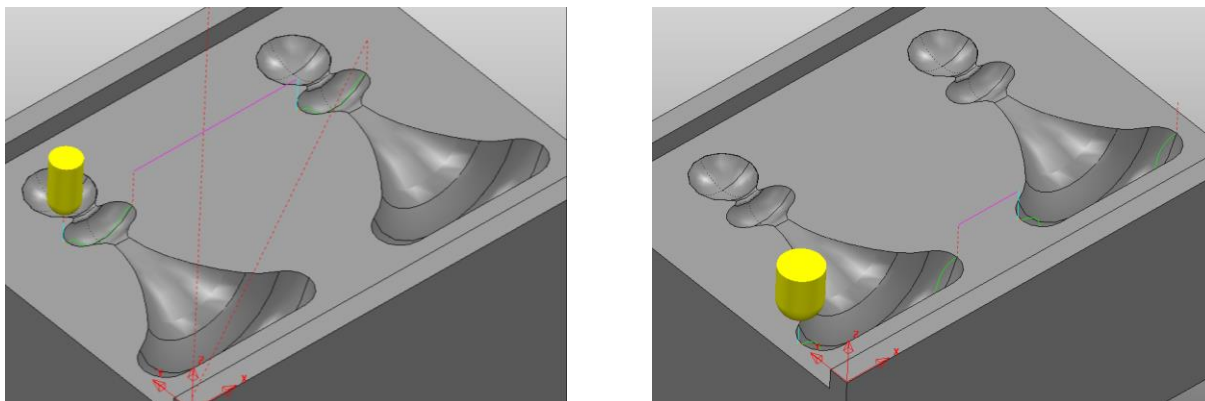
Nástroj	S6296.0	Nástroj	S511602.040
Axiální hloubka řezu a_p	0,2 mm	Axiální hloubka řezu a_p	0,2 mm
Radiální hloubka řezu a_e	0,25 mm	Radiální hloubka řezu a_e	0,204 mm
Posuv na zub f_z	0,062 mm/z	Posuv na zub f_z	0,046 mm/z
Řezná rychlost v_c	132 m/min	Řezná rychlost v_c	88 m/min
Chlazení	Ano	Chlazení	Ano
Směr řezu	Sousledný	Směr řezu	Sousledný

4) Dokončení po křivce 1

Dalším operačním úsekem bylo „dokončení po křivce“. Díky tomu bylo možné odstranit „zoubky“ ve spodních částech zapuštění. Strategie byla opět rozdělena do dvou částí podle velikosti „límce“.

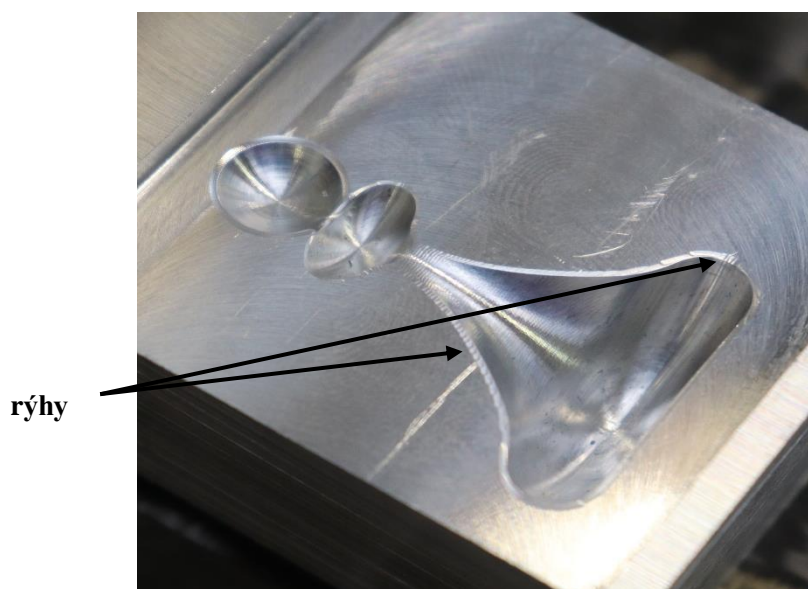


Obr. 47: Vizualizace pěšce - dokončení optimalizovanou hladinou Z



Obr. 48: Pěšec - dokončení po křivce 1

Pro operaci dokončení po křivce byly zvoleny stejné nástroje jako u předešlého dokončení „optimalizovanou hladinou Z“. Vzhledem k omezeným otáčkám nástroje se změnil pouze posuv na zub f_z , který se zvolil dle testovaných posuvů v kapitole 7.1.



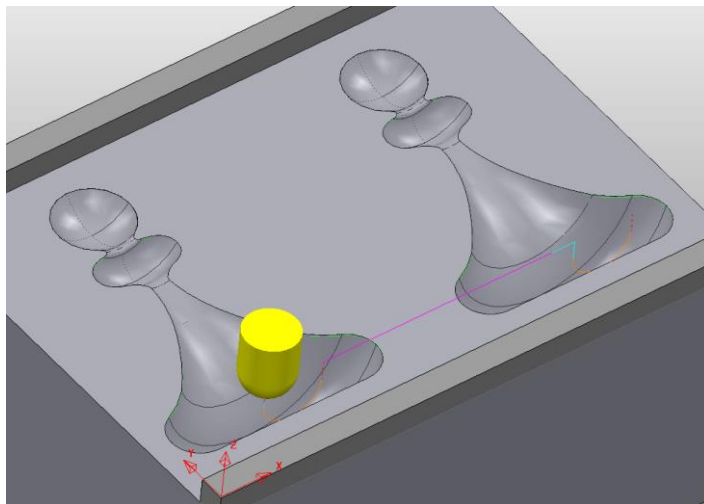
Obr. 49: Pěšec_V1

5) Dokončení po křivce 2

Jak je možné vidět na Obr. 49, samotné zapuštění mělo již vyhovující kvalitu povrchu. Poslední problém tvořily nájezdy, výjezdy a propojení při všech použitých obráběcích strategiích. Ty vytvářely rýhy na okraji zapuštění.

Z tohoto důvodu byla přidána poslední strategie „dokončení po křivce“, kdy kulová fréza S6296.0 kopírovala obvod zapuštění s axiálním offsetem 0,1 mm. Tím byl vytvořen pěkný obrys otisku figurky. Nájezd a výjezd byl realizován pomocí tzv. vertikálního oblouku

pod úhlem 90° , rádiusu 3 mm a lineárním pohybu 0,5 mm. Počáteční bod obrábění byl umístěn do lineární oblasti obvodu zapuštění. Lineární pohyb zajistil částečné překrytí nájezdu a výjezdu. Díky tomu bylo možné vytvořit obrys bez přerušení dráhy v počátečním bodě obrábění.



Obr. 50: Pěšec – dokončení po křivce 2

Na obrázku níže je možné vidět výsledný vzorek zapuštění pěšce. Použité strategie, pro jeho výrobu, byly dále využity u výsledné šachovnice. Strategie spolu s reznými podmínkami byly také vstupními hodnotami při tvorbě zapuštění u zbylých figurek. Nájezdy a propojení se částečně měnily pro optimalizaci obráběcího času.



Obr. 51: Pěšec_V2

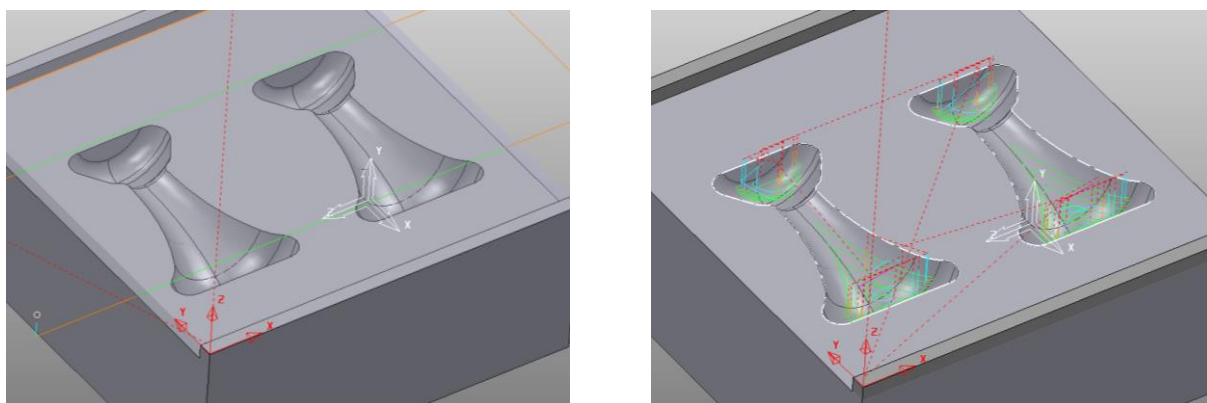
8.6.2. Věž

Obrábění následujících zapuštění probíhalo po dvou figurkách, kdy každá figurka byla vyfrézovaná na jedné straně vzorku. Díky tomu došlo k úspoře na spotřebovaném materiálu. Polotovár byl vždy navrhován podle větší figurky. Zapuštění věže bylo vyráběno spolu s otiskem střelce. Rozměry přířezu byly 80x82x30 mm.

1) Hrubování

V této části dochází k hrubování celé oblasti zapuštění vzorku. Při hrubování lze díky přidavku na dokončení použít vyšší toleranci obráběcí strategie. Nastavená tolerance byla 0,1 mm. Jinými slovy toleranční pole mezi ekvidistantami hrubovací dráhy obsahuje méně bodů, které musí stroj zpracovat. Výsledný čas obrábění je zpravidla díky větší toleranci kratší.

Jako první proběhlo opět zarovnání horní plochy vzorku. Jelikož se vycházelo ze strategií použitých u hrubování pěšce, byla použita strategie „hrubování schodů“, kdy se nástroj částečně vrací v „hladině Z“ o předem zadaný krok. Nájezdy a výjezdy při hrubování byly zvoleny tak, aby nedošlo ke kolizi nástroj - obrobek. U nájezdů byl použit úhel 25° z výšky 2 mm. Výjezdy nebyly zvoleny. Propojení řezných drah představoval „krok dolů“ s omezující podmínkou maximální délky, kdy je propojení použito. Při překročení omezující podmínky, bylo použito propojení „nejkratší“. Tento způsob propojení byl vybrán na základně testování nejkratšího času výsledného obrábění.

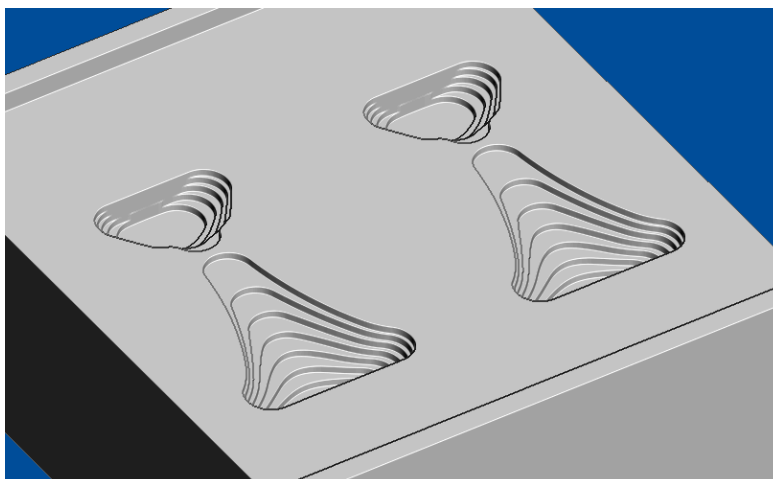


Obr. 52: Věž - hrubování

Řezné podmínky, díky použití totožných nástrojů, zůstaly stejné pro všechny hrubovací strategie vzorků. Přehled řezných podmínek je zobrazen v tabulce níže.

Tab. 22: Řezné podmínky – hrubování věže

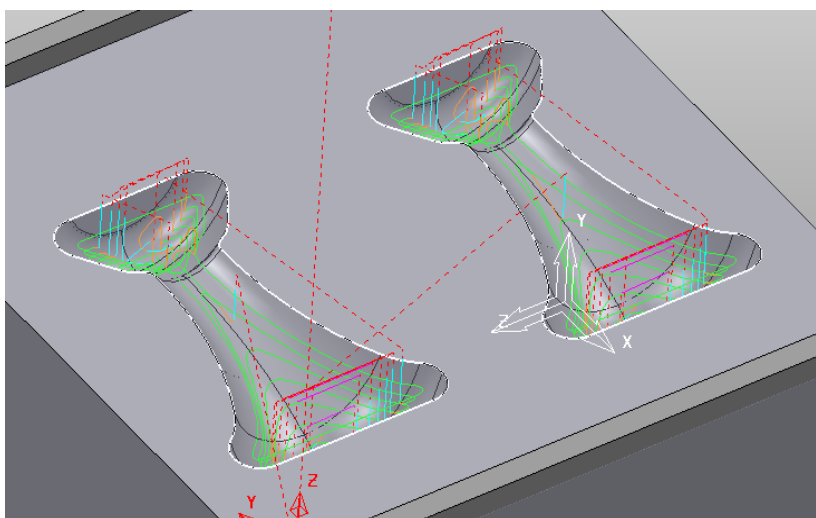
Nástroj	S6106.0
Axiální hloubka řezu a_p	3 mm
Radiální hloubka řezu a_e	6 mm
Posuv na zub f_z	0,042 mm/z
Řezná rychlost v_c	132 m/min
Přídavek načisto	0,2 mm
Chlazení	Ano
Směr řezu	Sousledný



Obr. 53: Vizualizace věže - hrubování

2) Dohrubování

Stejně jako u pěšce, tak i u otisku věže dochází k dohrubování zapuštění. Díky větším rozměrům než u předešlé figurky nebylo potřeba použít menší kulovou frézu a strategie byla realizována pouze jedním nástrojem. Přesné dráhy nástroje lze vidět na Obr. 54.



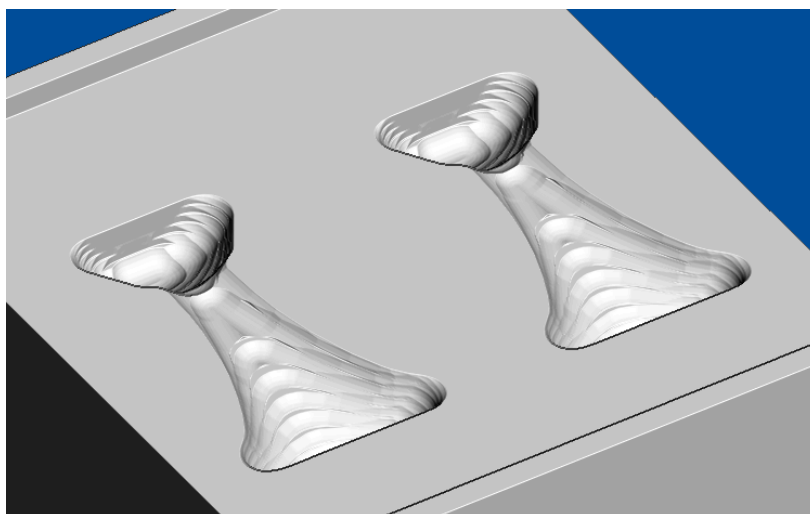
Obr. 54: Věž - dohrubování

Rovněž byla použita strategie „hrubování schodů“. Nájezdy a výjezdy nástroje zůstaly stejné. Propojení drah bylo uskutečněno tzv. kruhovým obloukem. Ten byl rovněž omezen maximální vzdáleností propojení pro zkrácení obráběcího času. Při překročení omezující podmínky, bylo propojení provedeno funkcí „nejkratší“.

Tab. 23: Řezné podmínky – dohrubování věže

Nástroj	S6296.0
Axiální hloubka řezu a_p	0,3 mm
Radiální hloubka řezu a_e	0,6 mm
Posuv na zub f_z	0,054 mm/z
Řezná rychlost v_c	132 m/min
Přídavek načisto	0,2 mm
Chlazení	Ano
Směr řezu	Sousledný

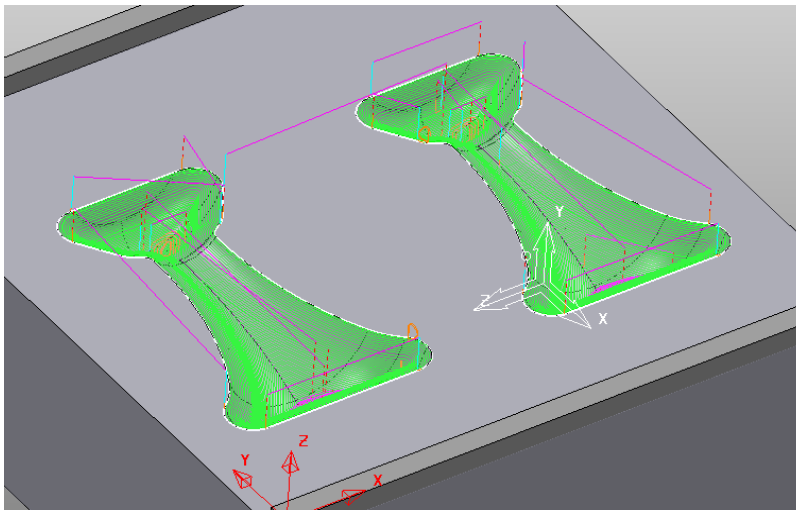
Díky této strategii byl zajištěn konstantní přídavek pro obrábění na čisto 0,2 mm ve všech částech zapuštění.



Obr. 55: Vizualizace věže - dohrubování

3) Dokončení optimalizovanou hladinou Z

Dokončovací strategie byla volena na základě předpokladu stejných výsledků kvality povrchu a výsledných poměrů časů obrábění, jako při testování strategií u zapuštění pěšce. Proto i zde byla zvolena strategie „dokončení optimalizovanou hladinou Z“. Jak je možné vidět na Obr. 56, dokončovací strategie byla realizována pouze větší z dvojice používaných kulových fréz S6296.0.

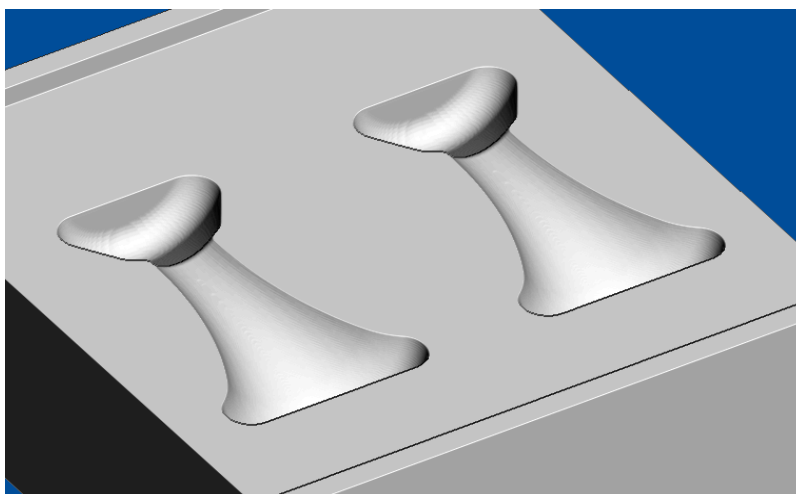


Obr. 56: Věž - dokončení optimalizovanou hladinou Z

Nájezdy, výjezdy a propojení jednotlivých drah byly stejné jako u dohrubování věže. Změnila se pouze velikost omezující podmínky u propojení drah. Řezné podmínky se změnily následovně:

Tab. 24: Řezné podmínky – dokončení věže

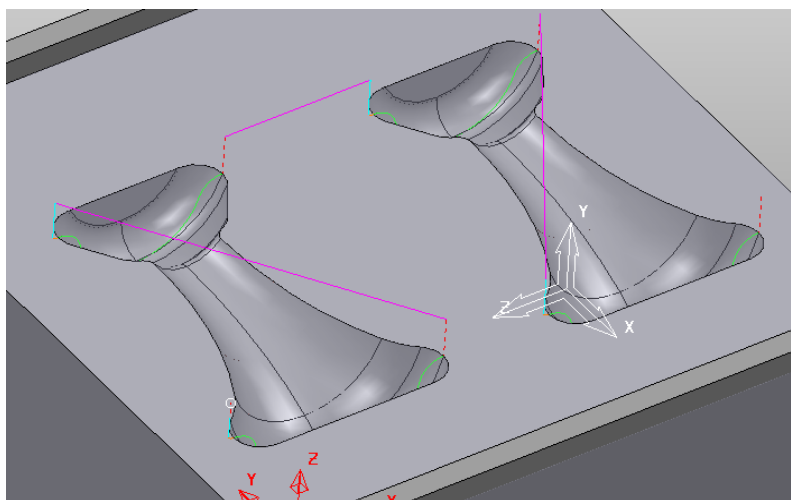
Nástroj	S6296.0
Axiální hloubka řezu a_p	0,2 mm
Radiální hloubka řezu a_e	0,25 mm
Posuv na zub f_z	0,062 mm/z
Řezná rychlost v_c	132 m/min
Chlazení	Ano
Směr řezu	Sousledný



Obr. 57: Vizualizace věže - dokončení optimalizovanou hladinou Z

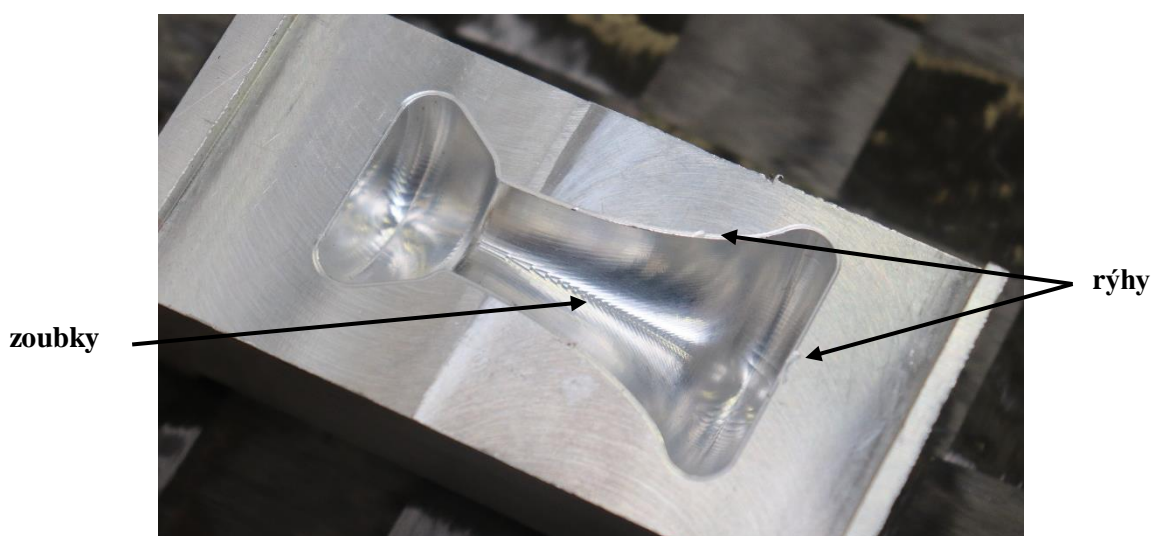
4) Dokončení po křivce 1

I v případě zapuštění figurky věže docházelo k tvorbě „zoubků“ ve spodních částech vzorku. Z toho důvodu byla zvolena další dokončovací strategie „dokončení po křivce“ v místech, kde nepřesnosti vznikaly. Díky tomu bylo možné dosáhnout požadované kvality výsledného povrchu.



Obr. 58: Věž - dokončení po křivce 1

Nástroj kopíroval povrch zapuštění ve směru vytvořené řídicí křivky. Pro operaci „dokončení po křivce“ byl zvolen stejný nástroj, jako u předešlého dokončení „optimalizovanou hladinou Z“. Nájezdy, výjezdy a řezné podmínky jsou rovněž totožné.



Obr. 59: Věž_V1

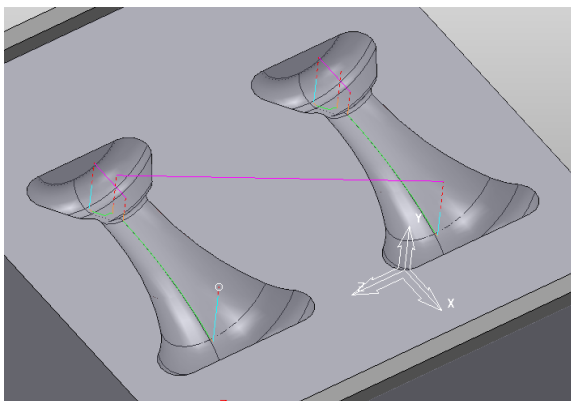
5) Dokončení po křivce 2

U věže nastal nový problém, kdy „zoubky“ vznikaly nejenom na spodních místech „límců“, ale i uprostřed těla zapuštění věže (Obr. 59). Tento nepříznivý jev, byl odstraněn stejným způsobem, jako v předešlé operaci pomocí dokončení po křivce, která byla vytvořena v problémové oblasti.

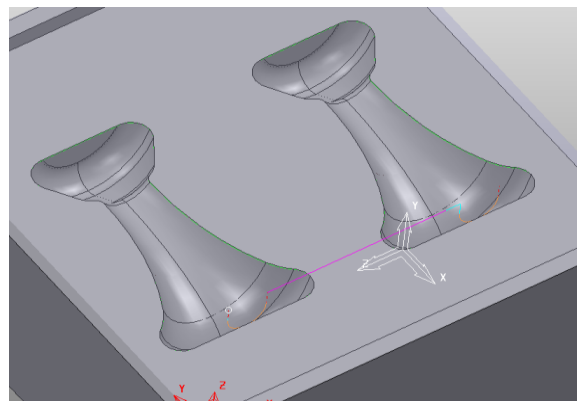
Veškeré technologické parametry zůstaly totožné jako v předešlé strategii. Směr řídicí křivky byl po testování stanoven z kraje zapuštění do středu vzorku.

6) Dokončení po křivce 3

Aby bylo docíleno stejného vzhledu jako u zapuštění pěšce, byla přidána poslední strategie „dokončení po křivce“, kdy kulová fréza S6296.0 kopírovala obvod zapuštění s axiálním offsetem 0,1 mm. Nájezd a výjezd byl realizován pomocí tzv. vertikálního oblouku se stejnými parametry jako u pěšce.



Obr. 60: Věž – dokončení po křivce 2



Obr. 61: Věž – dokončení po křivce 3

Na obrázku níže lze vidět výsledný vzorek zapuštění věže. Použité strategie jsou téměř totožné, jako u vzorku uložení pěšce. Nájezdy a propojení se částečně měnily pro optimalizaci obráběcího času.

Po samotné výrobě vzorku došlo opět ke kontrole rozměru zapuštění a fixace figurky při jejím zavření, jako tomu bude u výsledné šachovnice. Věž_V1 byla vyrobena s odsazením 0,2 mm a figurka byla příliš volná v ose x. U následující verze byl offset snížen na hodnotu 0,15 mm a vůle figurky byla vyhovující.



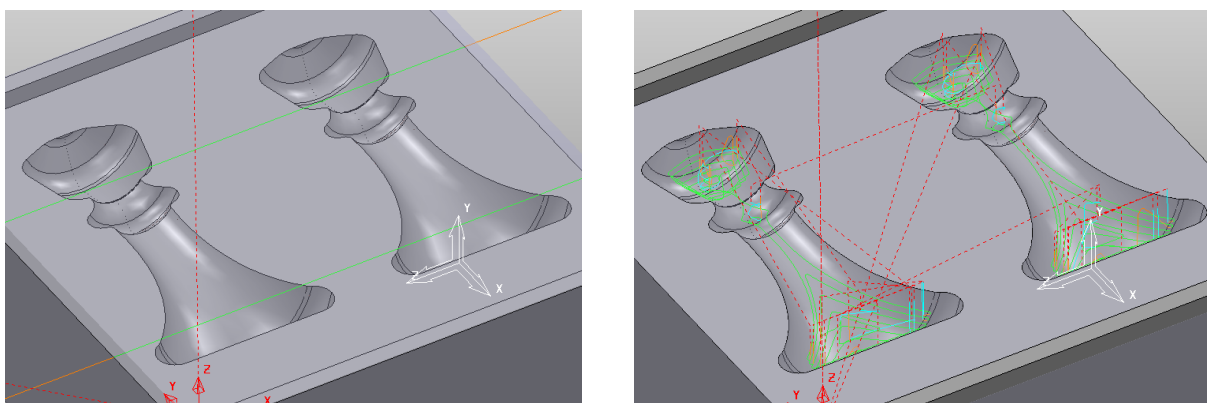
Obr. 60: Věž_V2

8.6.3. Střelec

Jak již bylo zmíněno, vzorky se z důvodu šetření materiálů, obráběly po dvou figurkách na protilehlých stranách. Zapuštění figurky střelce bylo obráběno spolu se zapuštěním věže. Polotovár byl navržen na základě rozměrů větší figurky, v tomto případě střelce. Rozměry hliníkového přířezu byly 80x82x30 mm.

1) Hrubování

Pomocí hrubování došlo k obrobení celého zapuštění střelce. Nejprve se válcovou frézou zarovnála vrchní plocha, aby bylo možné později provést kontrolu fixace figurky. Dále bylo totožnou frézou obrobeno vybrání 3 mm stejně jako u finálního návrhu šachovnice.



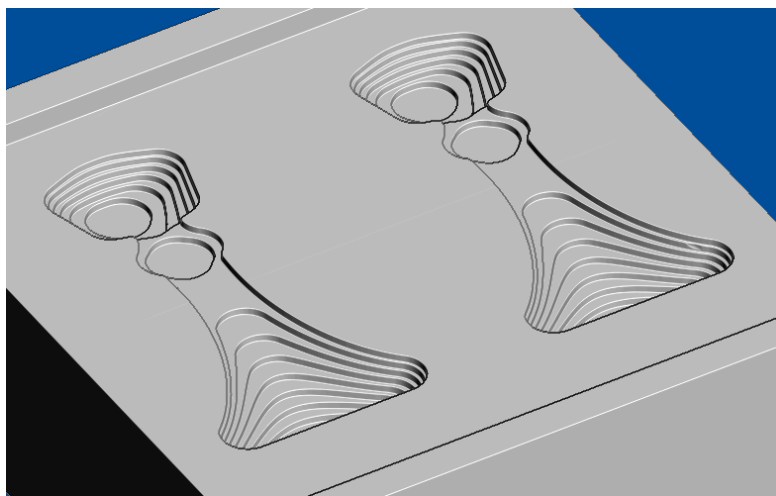
Obr. 61: Střelec - hrubování

Po výměně nástroje za S6106.0, byla provedena zkopírovaná strategie „hrubování schodů“. Nájezdy a výjezdy při hrubování byly zvoleny tak, aby nedošlo ke kolizi nástroj - obrobek. U nájezdů byl použit sjezdový úhel 25° z výšky 2 mm. Nejkratší čas výjezdů v tomto případě představoval omezený tzv. kruhový oblouk doplněný funkcí „krok dolů“.

Tab. 25: Řezné podmínky – hrubování střelece

Nástroj	S6106.0
Axiální hloubka řezu a_p	3 mm
Radiální hloubka řezu a_e	6 mm
Posuv na zub f_z	0,042 mm/z
Řezná rychlost v_c	132 m/min
Přídavek načisto	0,2 mm
Chlazení	Ano
Směr řezu	Sousledný

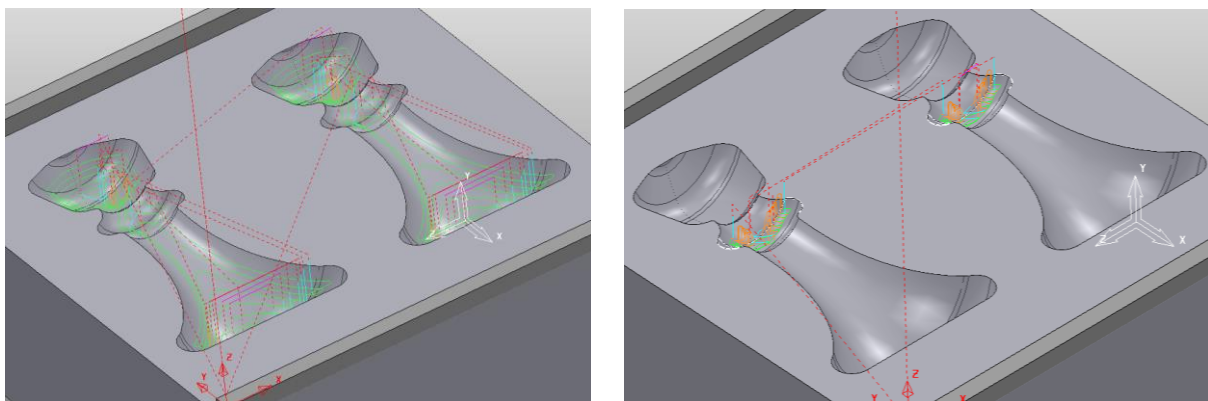
Řezné podmínky, díky použití stejných nástrojů, zůstávají totožné pro všechny hrubovací strategie vzorků. Na optimalizaci řezných parametrů zarovnání vrchní plochy nebyl kladen důraz z důvodu využití této strategie pouze u výroby vzorků. Přehled řezných podmínek je zobrazen v Tab. 25.



Obr. 62: Vizualizace střelece - hrubování

2) Dohrubování

Z důvodů použití co největších nástrojů pro snížení celkového času obrábění, bylo nutné přidat operaci dohrubování. Tím bylo dosaženo konstantního přídavku pro dokončovací strategie. Aby došlo k vytvoření co nejpresnějšího otisku střelece, byl horní „límeč“ rozšířen pouze na průměr $d = 4$ mm.



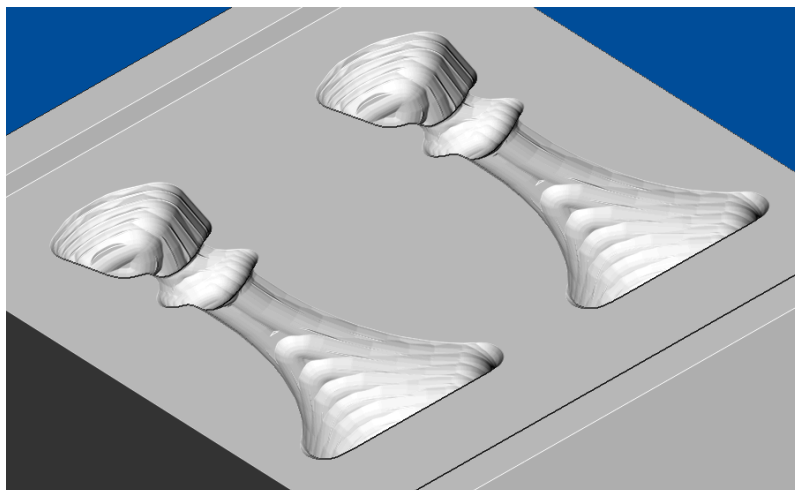
Obr. 63: Střelec - dohrubování

Jak je možné vidět na Obr. 65, strategie musela být rozdělena do dvou částí stejným způsobem, jako u zapuštění figurky pěšce. Celý vzorek byl nejprve dohrubován větším nástrojem S6296.0. Stejně jako u hrubování byla použita strategie „hrubování schodů“. Pomocí strategie „zbytkové hrubování“ a vytvoření přesné hranice v místech horního „límce“, bylo zapuštění dohrubováno pomocí menšího nástroje S511602.040.

Tab. 26: Řezné podmínky – dohrubování střelce

Nástroj	S6296.0	Nástroj	S511602.040
Axiální hloubka řezu a_p	0,3 mm	Axiální hloubka řezu a_p	0,2 mm
Radiální hloubka řezu a_e	0,6 mm	Radiální hloubka řezu a_e	0,4 mm
Posuv na zub f_z	0,054 mm/z	Posuv na zub f_z	0,038 mm/z
Řezná rychlost v_c	132 m/min	Řezná rychlost v_c	88 m/min
Přídavek načisto	0,2 mm	Přídavek načisto	0,2 mm
Chlazení	Ano	Chlazení	Ano
Směr řezu	Sousledný	Směr řezu	Sousledný

Nájezdy a výjezdy byly u obou částí dohrubování totožné. Nájezd jako u všech zbylých vzorků představoval sjezd pod úhlem 25° z výšky 2 mm. Propojení bylo realizováno tzv. kruhovým obloukem. Snížení celkového času obrábění, bylo docíleno rozdílnou okrajovou podmínkou této strategie u jednotlivých částí dohrubování.

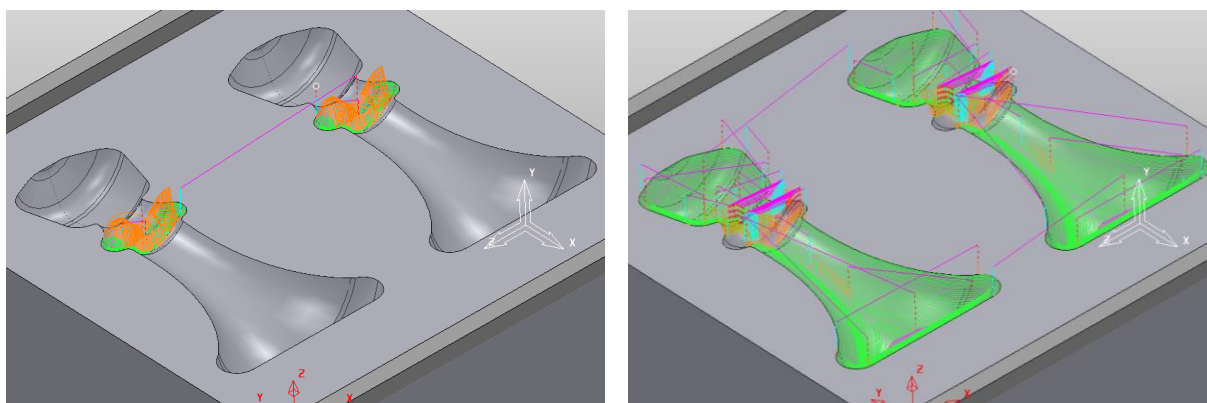


Obr. 64: Vizualizace střelce - dohrubování

Mezi strategiemi bylo vždy nutné nastavit počáteční a koncový bod. Ten byl zpravidla generován programem jako bezpečný bod. U operací mezi kterými docházelo k výměně nástrojů, byly tyto body nastaveny na bezpečnou vzdálenost $x = 0 \text{ mm}$, $y = 0 \text{ mm}$, $z = 100 \text{ mm}$.

3) Dokončení optimalizovanou hladinou Z

Použitá strategie pro první dokončovací operaci byla „optimalizovaná hladina Z“. Ta byla rovněž rozdělena do dvou částí dle použitého nástroje. Aby nemuselo dojít k opětovné výměně nástroje po poslední dohrubovací operaci, bylo provedeno nejprve dokončení menší kulovou frézou S511602.040.



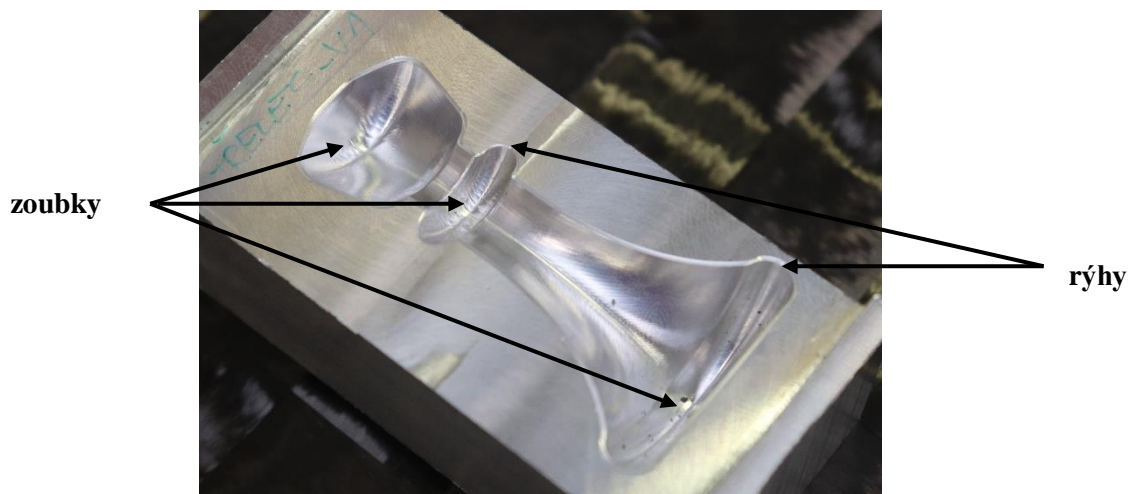
Obr. 65: Střelec – dokončení optimalizovanou hladinou Z

Nájezdy byly realizovány tzv. vertikálním obloukem. Výjezdy a propojení jednotlivých drah byly totožné jako v předešlé operaci s rozdílnými okrajovými podmínkami. Řezné podmínky se v porovnání s dohrubováním změnila následovně

Tab. 27: Řezné podmínky – dokončení střelce

Nástroj	S6296.0	Nástroj	S511602.040
Axiální hloubka řezu a_p	0,2 mm	Axiální hloubka řezu a_p	0,2 mm
Radiální hloubka řezu a_e	0,25 mm	Radiální hloubka řezu a_e	0,204 mm
Posuv na zub f_z	0,062 mm/z	Posuv na zub f_z	0,046 mm/z
Řezná rychlost v_c	132 m/min	Řezná rychlost v_c	88 m/min
Chlazení	Ano	Chlazení	Ano
Směr řezu	Sousledný	Směr řezu	Sousledný

Takto vyrobený otisk obsahoval obdobné problémy jako v případě předešlých vzorků. Spodní části „límce“ a střední část těla zapuštění vykazovaly sníženou kvalitu povrchu. Na obvodu vznikaly rýhy po výjezdech nástroje ze záběru. Na Obr. 68 je možné vidět zmíněné problémy. Na zobrazeném vzorku byla již provedena strategie „dokončení po křivce 1“.



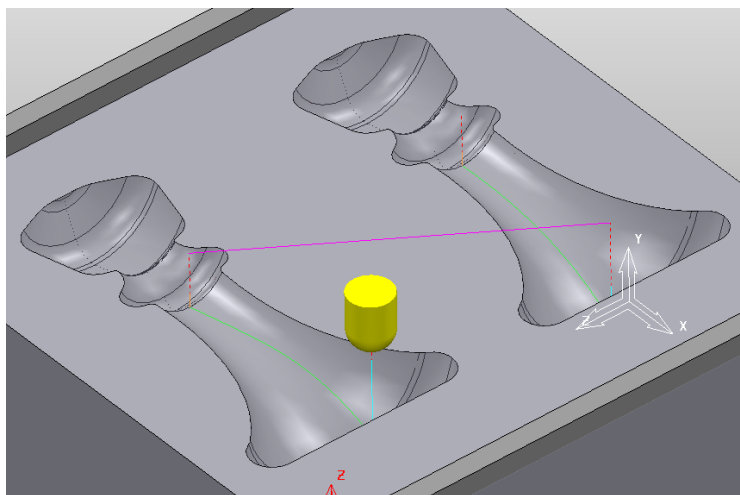
Obr. 66: Střelec_V1

4) Dokončení po křivce 1

Z důvodů problémů, které vznikly po „dokončení optimalizovanou hladinou Z“, byly přidány strategie „dokončení po křivce“. Jako první operační úsek byl vyhlazení těla otisku figurky ve střední části zapuštění. Nástroj kopíroval povrch zapuštění ve směru vytvořené řídicí křivky. Pro strategii „dokončení po křivce“ byl zvolen stejný nástroj, jako u předešlého dokončení „optimalizovanou hladinou Z“. Nájezdy, výjezdy, propojení drah a řezné podmínky byly rovněž totožné.

5) Dokončení po křivce 2

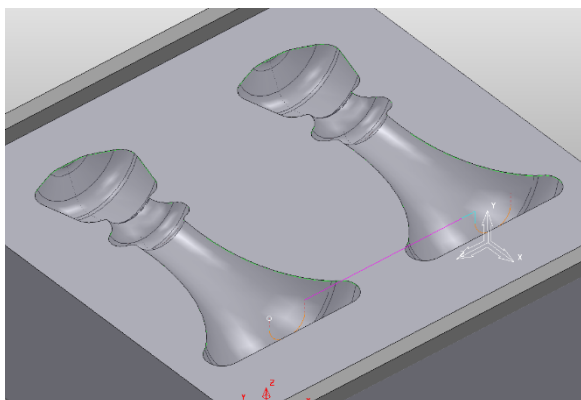
I v případě zapuštění figurky věže docházelo k tvorbě „zoubků“ ve spodních částech vzorku. Z toho důvodu byla zvolena další dokončovací strategie „dokončení po křivce“ v místech, kde nepřesnosti vznikaly. Díky tomu bylo možné odstranit nevyhovující kvalitu obrobeneho povrchu. Nájezdy, výjezdy, propojení drah a řezné podmínky byly rovněž totožné.



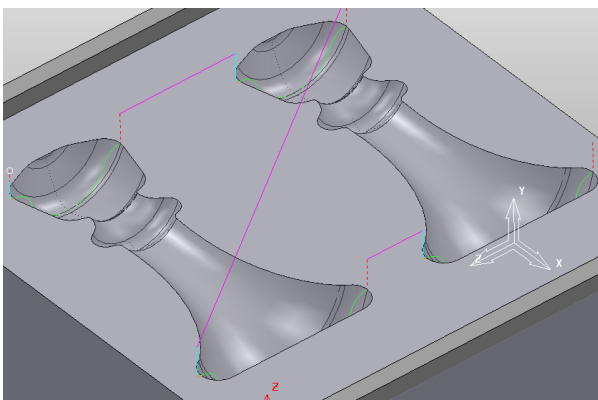
Obr. 67: Střelec - dokončení po křivce 1

6) Dokončení po křivce 3

Pro docílení stejného vzhledu jako u zbylých zapuštění, bylo obrábění vzorku otisku střelce doplněno o poslední strategii „dokončení po křivce“, kdy kulová fréza S6296.0 kopírovala obvod zapuštění s axiálním offsetem. Díky tomu bylo možné odstranit rýhy vytvořené především výjezdy při strategii „dokončení po křivce 1“. Nájezdy a výjezdy byly realizovány pomocí tzv. vertikálního oblouku se stejnými parametry jako u pěšce.



Obr. 70: Střelec - dokončení po křivce 2



Obr. 71: Střelec – dokončení po křivce 3

Řezné podmínky byly totožné jako u předešlé dokončovací strategie. Na obrázku níže je možné vidět výsledný vzorek zapuštění střelce. Použité strategie pro jeho výrobu byly použity při výrobě finální šachovnice.



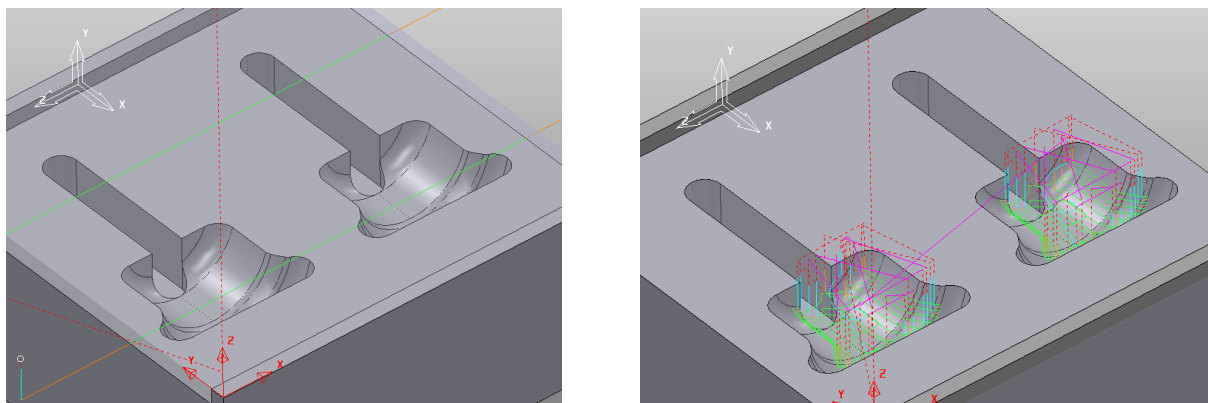
Obr. 68: Střelec_V2

8.6.4. Kůň

Zjednodušení figurky koně (Obr. 33), bylo navrženo tak, aby mělo symetrický tvar. Díky tomu bylo možné vkládat figurku do zapuštění oběma směry. Podstatným důvodem byla i možnost zrcadlení půlky šachovnice při jejím návrhu, které by jinak nebylo možné. Figurka koně byla vyrobena v době, kdy již byly zbylé vzorky odladěny. Z tohoto důvodu byl polotovar navržen pouze na základě rozměrů figurky koně. Rozměry přířezu byly 75x90x36 mm.

1) Hrubování

Při hrubování je odebráno co největší množství přebytečného materiálu za co nejkratší časový úsek. Nejprve došlo k zarovnání vrchní plochy, aby bylo možné provést kontrolu fixace figurky. Dále bylo totožnou frézou obrobena vybrání 3 mm stejně jako u finálního návrhu šachovnice. Vzhledem k rozměrům zapuštění došlo k hrubování pouze těla otisku koně.

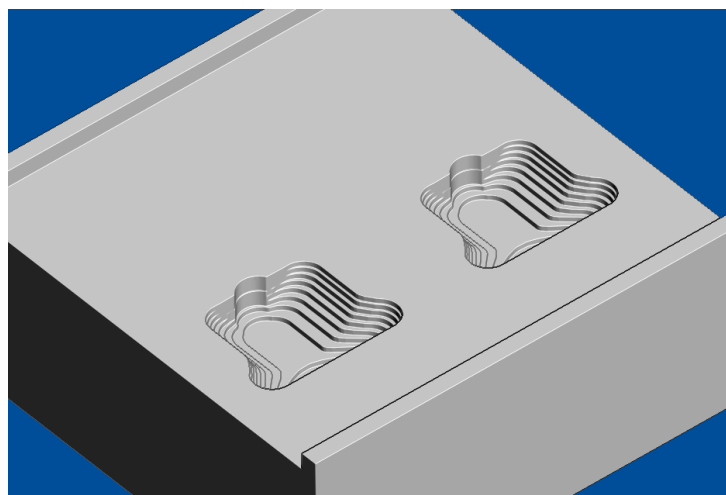


Obr. 69: Kůň - hrubování

Pro hrubování těla otisku koně byla použita strategie „hrubování schodů“. U nájezdů byl použit úhel sjezdu 25° z výšky 2 mm. Výjezdy nebyly zvoleny. Propojení řezných drah, představuje „krok dolů“ s omezující podmínkou maximální délky, kdy bylo propojení použito. Při překročení omezující podmínky bylo použito propojení „nejkratší“.

Tab. 28: Řezné podmínky – hrubování koně

Nástroj	S6106.0
Axiální hloubka řezu a_p	3 mm
Radiální hloubka řezu a_e	6 mm
Posuv na zub f_z	0,042 mm/z
Řezná rychlost v_c	132 m/min
Přídavek načisto	0,2 mm
Chlazení	Ano
Směr řezu	Sousledný

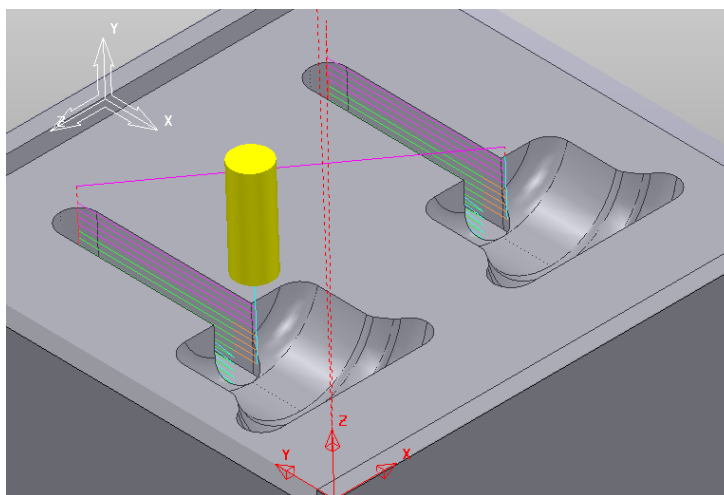


Obr. 70: Vizualizace koně - hrubování

Řezné podmínky, vzhledem k použití stejných nástrojů, zůstaly totožné pro všechny hrubovací strategie vzorků. Přehled řezných podmínek je zobrazen v Tab. 28.

2) Dokončení po křivce 1

Jako druhá strategie bylo zvoleno „dokončení po křivce 1“. Důvodem bylo použití stejného nástroje, jako u hrubování těla otisku koně. Velikost zahlobení hlavy otisku bylo navrženo tak, aby došlo k jejímu obrobení jedním projetím nástroje S6106.0. Řídící křivka byla vytvořena po celé délce zapuštění hlavy figurky. Pro dokončení zahlobení, bylo využito násobných řezů v axiálním směru.

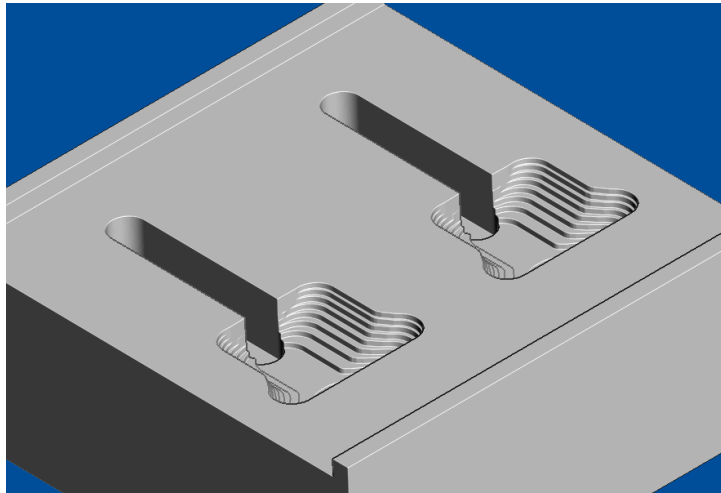


Obr. 71: Kůň – dokončení po křivce 1

Nájezdy používaly strategii protažení. Ta byla nastavena na vzdálenost 4 mm, aby nedošlo ke kolizi nástroj-obrobek. Jakmile nástroj dosáhl hloubky, kdy nebylo možné najíždět pomocí protažení, využíval sjezd pod úhlem 25° z výšky 2 mm, jako u ostatních použitých strategií. Jelikož se jednalo o dokončovací operaci, byla nastavena hloubka řezu $a_p = 1$ mm.

Tab. 29: Řezné podmínky – dokončení koně po křivce 1

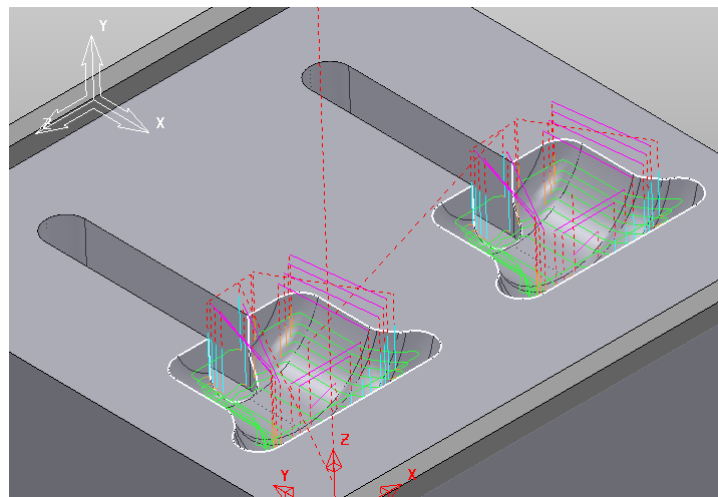
Nástroj	S6106.0
Axiální hloubka řezu a_p	1 mm
Radiální hloubka řezu a_e	6 mm
Posuv na zub f_z	0,062 mm/z
Řezná rychlost v_c	132 m/min
Chlazení	Ano
Směr řezu	Sousledný



Obr. 72: Vizualizace koně – dokončení po křivce 1

3) Dohrubování

Po předchozím dokončení „hlavy“ otisku došlo k výměně nástroje na S6296.0. V této strategii proběhlo dohrubování „těla“ zapuštění pro zajištění konstantního přídávku na obrábění. Díky větším rozměrům nebylo potřeba použít menší kulovou frézu a strategie byla realizována pouze jedním nástrojem. Dohrubování proběhlo pomocí strategie „zbytkové hrubování“, kdy byla vytvořena přesná hranice „těla“ otisku figurky. Stejně jako u strategie hrubování koně, byla použito „hrubování schodů“.

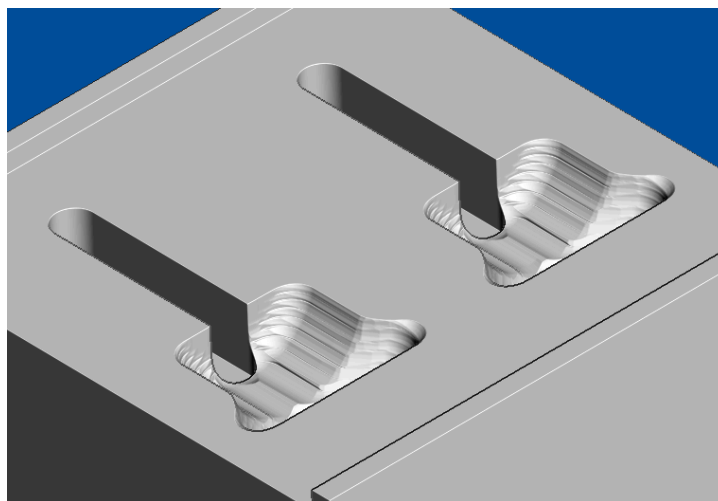


Obr. 73: Kůň – dohrubování

Nájezdy a výjezdy nástroje zůstaly stejné jako v předešlých dohrubovacích operacích. Propojení drah bylo uskutečněno tzv. kruhovým obloukem. Ten byl rovněž omezen maximální vzdáleností propojení 3 mm pro zkrácení obráběcího času. Při překročení omezující podmínky, bylo propojení provedeno, strategií „nejkratší“.

Tab. 30: Řezné podmínky – dohrubování koně

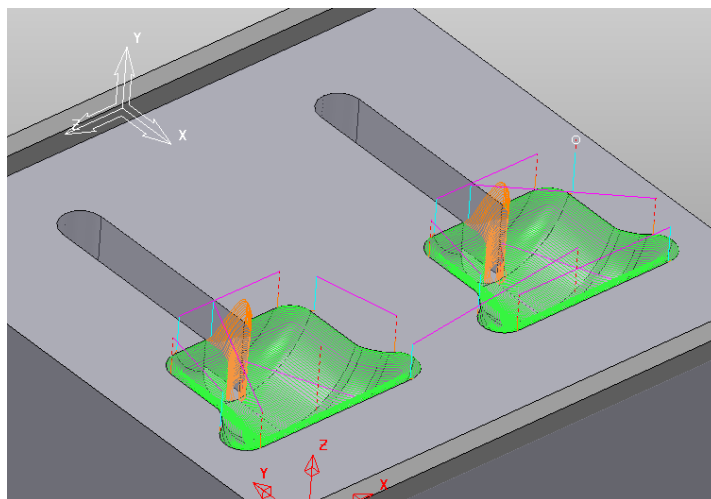
Nástroj	S6296.0
Axiální hloubka řezu a_p	0,3 mm
Radiální hloubka řezu a_e	0,6 mm
Posuv na zub f_z	0,054 mm/z
Řezná rychlost v_c	132 m/min
Přídavek načisto	0,2 mm
Chlazení	Ano
Směr řezu	Sousledný



Obr. 74: Vizualizace koně – dohrubování

4) Dokončení optimalizovanou hladinou Z

Další použitou strategií bylo dokončení „optimalizovanou hladinou Z“. To bylo vzhledem k „dokončení po křivce 1“ provedeno pouze na podstavě otisku figurky. Dokončovací strategie byla realizována pouze větší z dvojice používaných kulových fréz S6296.0.



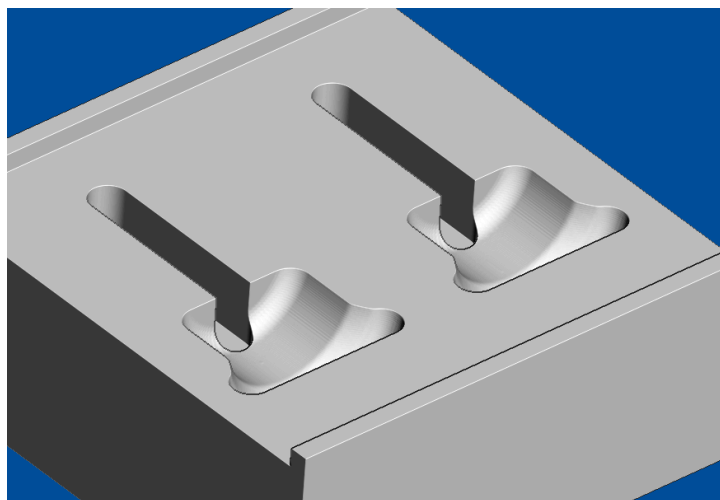
Obr. 75: Kůň – dokončení optimalizovanou hladinou Z

Nájezdy byly realizovány tzv. vertikálním obloukem. Propojení jednotlivých drah zůstaly totožné jako v předešlé operaci s rozdílnými okrajovými podmínkami. Řezné podmínky jsou podrobně popsány v Tab. 31.

Tab. 31: Řezné podmínky – dokončení koně

Nástroj	S6296.0
Axiální hloubka řezu a_p	0,2 mm
Radiální hloubka řezu a_e	0,25 mm
Posuv na zub f_z	0,062 mm/z
Řezná rychlost v_c	132 m/min
Chlazení	Ano
Směr řezu	Sousledný

Protože bylo zapuštění koně vytvářeno jako poslední, automaticky proběhlo přidání strategie „dokončení po křivce“, aby došlo k zamezení problémů, které vznikaly u předešlých vzorků. Díky tomu mělo zapuštění koně verze 1 odpovídající kvalitu výsledného povrchu.



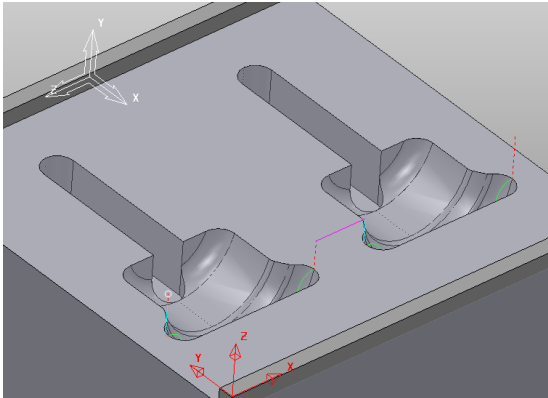
Obr. 76: Vizualizace koně – dokončení optimalizovanou hladinou Z

5) Dokončení po křivce 2

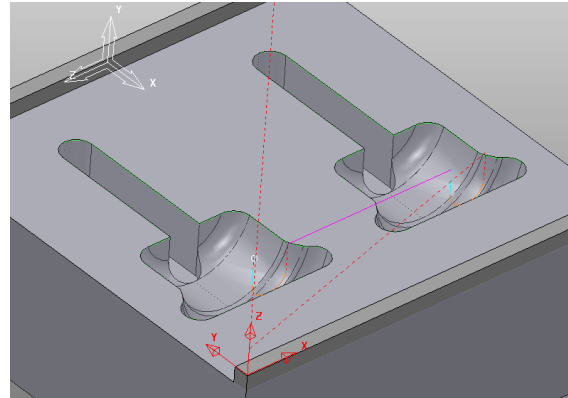
Vzhledem k automatickému přidání strategie „dokončení po křivce“ již v první verzi, nebylo možné zjistit, jestli docházelo k tvorbě „zoubků“ jako u předešlých vzorků. V porovnání s ostatními strategiemi se jedná o minimální časovou náročnost, proto zůstala nadále zařazena při výrobě zapuštění koně. Vyhlazení proběhlo pouze ve spodní části „těla“ otisku koně. Nájezdy, výjezdy a řezné podmínky zůstaly totožné jako v předešlé operaci.

6) Dokončení po křivce 3

V této operaci kopíruje nástroj obvod zapuštění ve směru vytvořené řídicí křivky. Díky tomu bylo možné odstranit rýhy vytvořené předešlými strategiemi. Pro strategii „dokončení po křivce“ byl zvolen nástroj S6296.0. Nájezd a výjezd byl realizován pomocí strategie „vertikální oblouk“ se stejnými parametry jako u zbylých zapuštění.



Obr. 81: Kůň – dokončení po křivce 2



Obr. 82: Kůň - dokončení po křivce 3

Na obrázku níže je možné vidět výsledný vzorek zapuštění koně. Použité strategie pro jeho výrobu byly použity u výsledné šachovnice. Po samotném vyrobění vzorku, došlo opět ke kontrole rozměru zapuštění a fixace figurky při jejím zavření, jako tomu bylo u výsledné šachovnice.



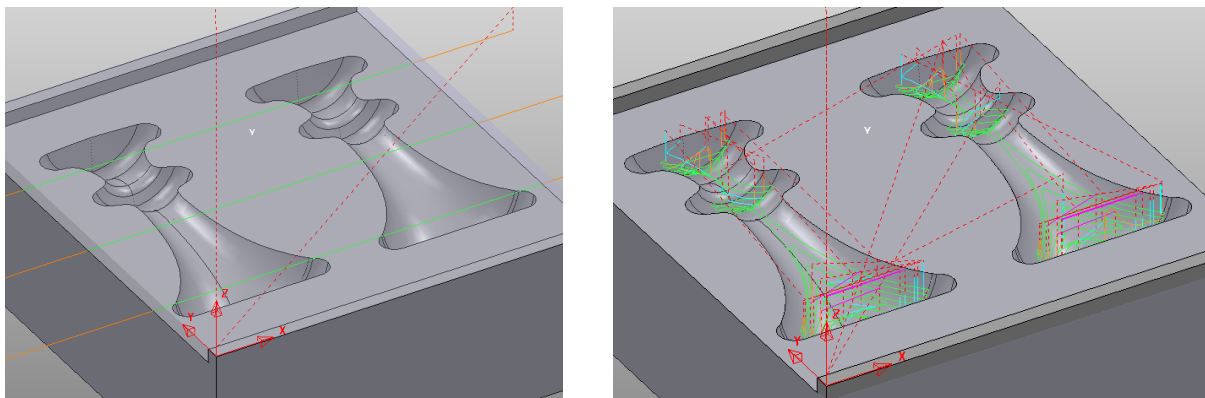
Obr. 83: Kůň

8.6.5. Královna

Vzorek zapuštění královny byl vzhledem k velkým rozměrům vyráběn spolu se zapuštěním krále. Každá figurka byla vyfrézovaná na protilehlé straně vzorku. Díky tomu došlo k úspoře na spotřebovaném materiálu. Polotovar byl navrhován dle větší figurky krále. Rozměry hliníkového přířezu byly 90x95x40 mm.

1) Hrubování

V této části obrábění docházelo k hrubování celé oblasti zapuštění vzorku. Při hrubování lze díky přidavku na dokončení použít vyšší toleranci obráběcí strategie. Nejprve došlo válcovou frézou o průměru $d = 40$ mm k zarovnání vrchní plochy, aby bylo možné později provést kontrolu fixace figurky. Dále bylo totožnou frézou obrobena vybrání 3 mm stejně jako u finálního návrhu šachovnice.

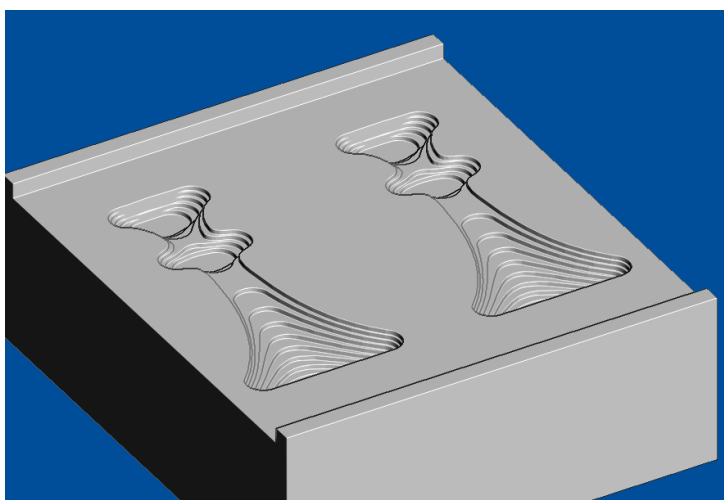


Obr. 774: Královna - hrubování

Zapuštění bylo vyrobeno stejným způsobem jako u předešlých vzorků. Z hlediska úspory času byla použita strategie „hrubování schodů“, kdy se nástroj částečně vracel v „hladině Z“. Nájezdy a výjezdy při hrubování byly zvoleny tak, aby nedošlo ke kolizi nástroj - obrobek. U nájezdů byl použit úhel 25° z výšky 2 mm. Výjezdy nebyly zvoleny. Propojení řezných drah představoval „kruhový oblouk“ s omezující podmínkou maximální délky, kdy bylo propojení použito. Při překročení omezující podmínky, bylo použito propojení „nejkratší“.

Tab. 32: Řezné podmínky – hrubování královny

Nástroj	S6106.0
Axiální hloubka řezu a_p	3 mm
Radiální hloubka řezu a_e	6 mm
Posuv na zub f_z	0,042 mm/z
Řezná rychlost v_c	132 m/min
Přídavek načisto	0,2 mm
Chlazení	Ano
Směr řezu	Sousledný

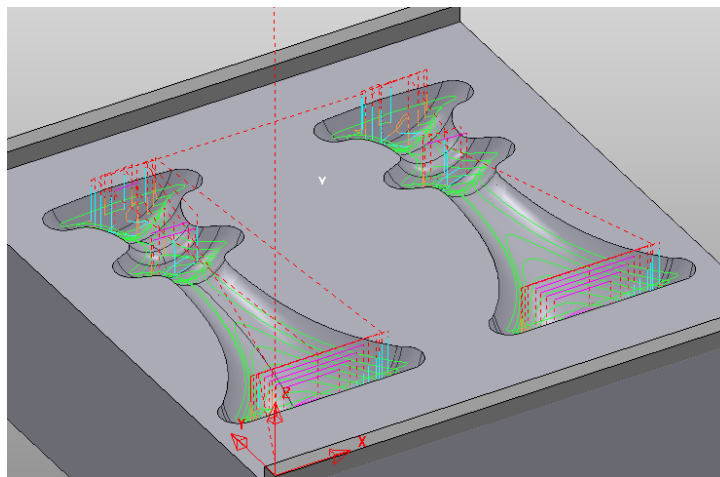


Obr. 85: Vizualizace královny – hrubování

Řezné podmínky zůstávají totožné pro všechny hrubovací strategie vzorků. Na optimalizaci řezných parametrů zarovnání vrchní plochy nebyl kladen důraz z důvodu využití této strategie pouze u výroby vzorků. Přehled řezných podmínek je zobrazen v Tab. 32.

2) Dohrubování

Pomocí dohrubovací strategie došlo k vytvoření konstantního přídavku na dokončení. Vzhledem k relativně velkým rozměrům figurky královny bylo možné využít pouze jeden nástroj s větším průměrem. Bylo použito „hrubování schodů“, kdy došlo k určení zbytkového materiálu.

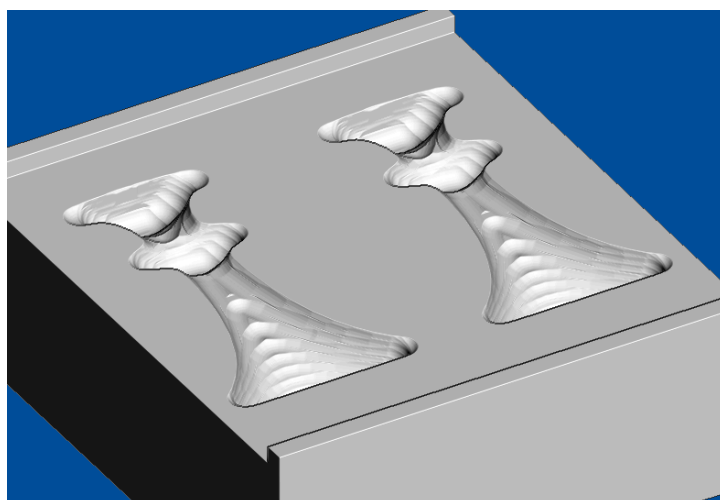


Obr. 86: Královna - dohrubování

Nájezdy a výjezdy nástroje zůstaly stejné. Propojení drah bylo uskutečněno tzv. kruhovým obloukem. Ten byl omezen maximální vzdáleností 4 mm pro zkrácení obráběcího času. Při překročení omezující podmínky bylo propojení provedeno pomocí funkce „nejkratší“. Řezné podmínky jsou podrobně popsány v Tab. 33.

Tab. 33: Řezné podmínky – dohrubování královny

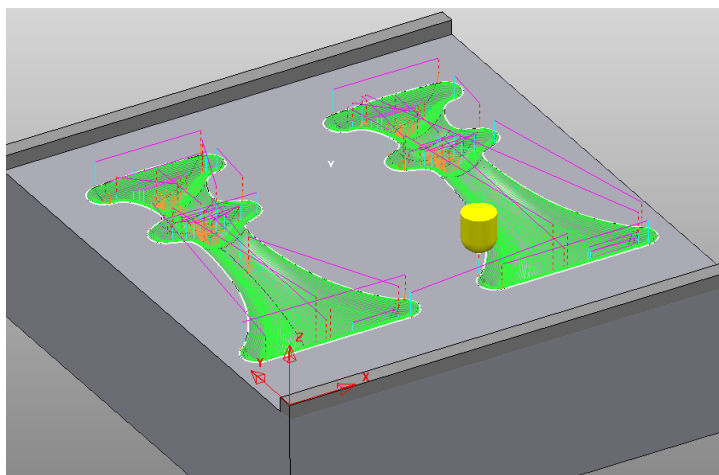
Nástroj	S6296.0
Axiální hloubka řezu a_p	0,3 mm
Radiální hloubka řezu a_e	0,6 mm
Posuv na zub f_z	0,054 mm/z
Řezná rychlost v_c	132 m/min
Přídavek načisto	0,2 mm
Chlazení	Ano
Směr řezu	Sousledný



Obr. 87: Vizualizace královny – dohrubování

3) Dokončení optimalizovanou hladinou Z

Dokončení „optimalizovanou hladinou Z“ proběhlo stejně jako strategie dohrubování pouze nástrojem S6296.0. Nájezdy představoval tzv. „vertikální oblouk“ při nastavení úhlu 45° a rádiusu 1 mm. Výjezdy zůstaly stejné jako u předešlých strategií. Propojení jednotlivých drah bylo realizováno pomocí tzv. kruhového oblouku. Ten byl rovněž omezen stejně jako v předešlé strategii. Lišila se pouze okrajová podmínka.



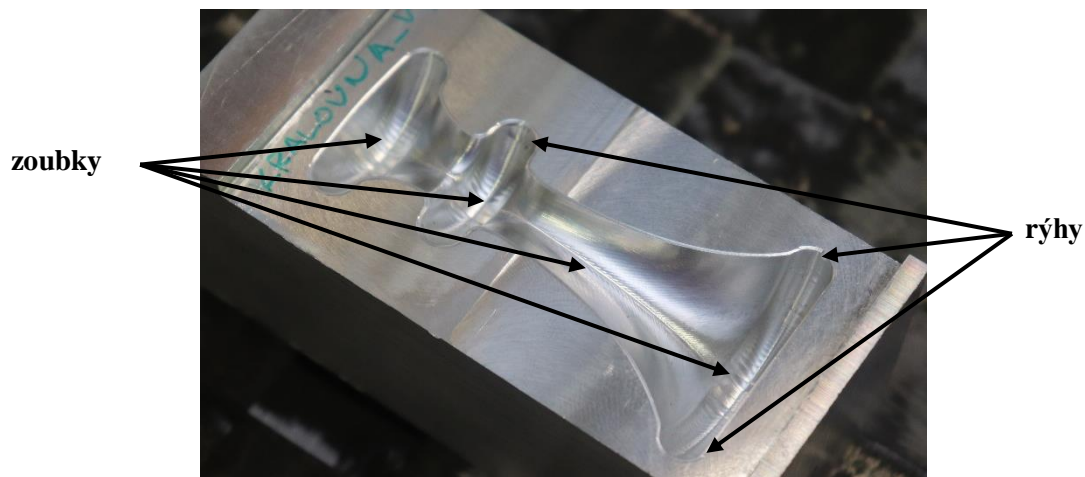
Obr. 88: Královna – dokončování optimalizovanou hladinou Z

Řezné podmínky zůstaly totožné pro všechny dokončovací strategie vzorků. Na optimalizaci řezných parametrů zarovnání vrchní plochy nebyl kladen důraz z důvodu využití této strategie pouze u výroby vzorků. Podrobný přehled řezných podmínek je zobrazen v Tab. 34.

Tab. 34: Řezné podmínky – dokončení královny

Nástroj	S6296.0
Axiální hloubka řezu a_p	0,2 mm
Radiální hloubka řezu a_e	0,25 mm
Posuv na zub f_z	0,062 mm/z
Řezná rychlost v_c	132 m/min
Chlazení	Ano
Směr řezu	Sousledný

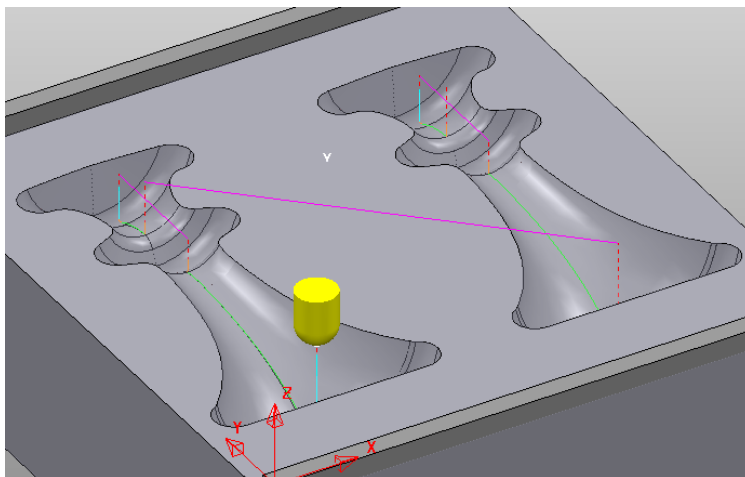
Takto vyrobené zapuštění obsahovalo obdobné problémy jako v případě předešlých vzorků. Spodní částí „límců“ a střední část těla zapuštění vykazovaly sníženou kvalitu výsledného povrchu. Na obvodu vznikaly rýhy po výjezdech nástroje ze záběru. Na Obr. 89 je možné vidět zmíněné problémy.



Obr. 89: Královna_V1

4) Dokončení po křivce 1

V této strategii byla vytvořena řídicí křivka kopírující střed těla otisku královny. Díky tomu došlo k vyhlazení vzniklých „zoubků“. Nástroj kopíroval povrch zapuštění ve směru vytvořené řídicí křivky. Vytvořené dráhy jsou znázorněny na Obr. 90. Pro „dokončení po křivce 1“ byl zvolen stejný nástroj jako u předešlého dokončení „optimalizovanou hladinou Z“. Nájezdy, výjezdy, propojení drah a řezné podmínky zůstaly rovněž totožné jako u předešlé strategie.



Obr. 90: Královna - dokončení po křivce 1

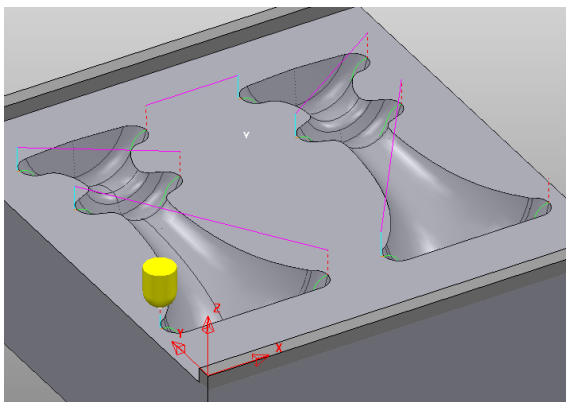
5) Dokončení po křivce 2

V případě zapuštění figurky královny docházelo k tvorbě „zoubků“ ve všech třech „límčích“. Z toho důvodu byla zvolena další dokončovací strategie „dokončení po křivce 2“

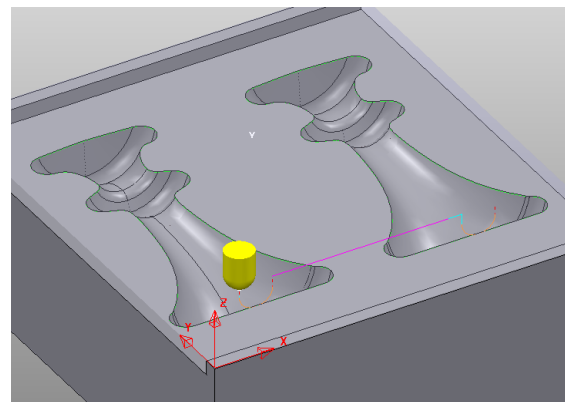
v místech, kde nepřesnosti vznikaly. Díky tomu bylo možné odstranit nevyhovující kvalitu obrobeneho povrchu. Nájezdy, výjezdy, propojení drah a řezné podmínky zůstaly totožné jako v předešlých dokončovacích operacích.

6) Dokončení po křivce 3

Pro docílení stejného vzhledu byla automaticky přidána poslední strategie „dokončení po křivce 3“. Ta měla za úkol, vytvořit souvislý obrys zapuštění figurky pomocí frézy S6296.0. Nájezd a výjezd byl realizován pomocí tzv. vertikálního oblouku se stejnými parametry jako u zbylých figurek. Počáteční bod obrábění byl určen do středu lineární části zapuštění.



Obr. 9178: Královna - dokončení po křivce 2



Obr. 92: Královna – dokončení po křivce 3

Na obrázku níže je možné vidět výsledný vzorek zapuštění královny. Použité strategie, pro jeho výrobu, byly použity u výsledné šachovnice.



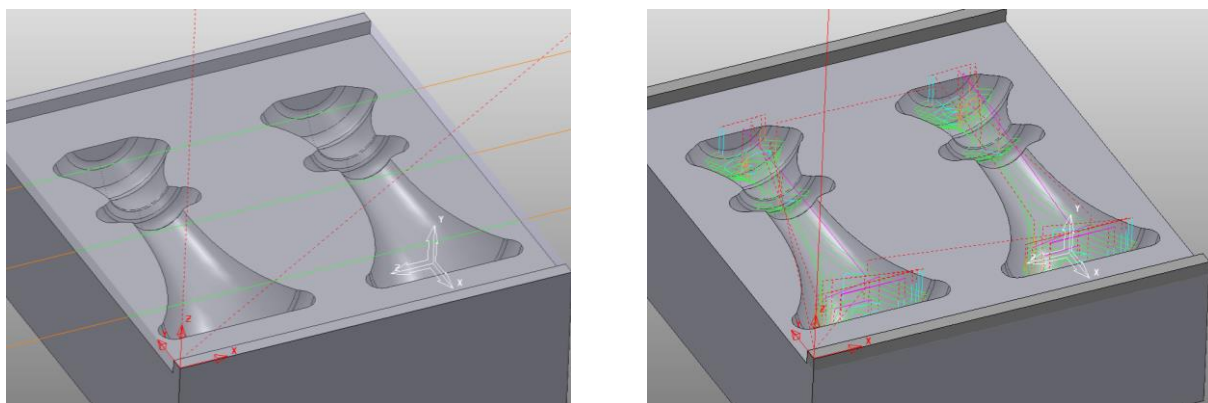
Obr. 93: Královna_V2

8.6.6. Král

Posledním testovaným vzorkem bylo zapuštění krále. Ten byl vyráběn spolu se vzorkem královny. Každá figurka byla vyfrézovaná na protilehlé straně polotovaru. Rozměry hliníkového přířezu byly 90x95x40 mm.

1) Hrubování

I v případě hrubování zapuštění krále došlo nejprve k zarovnání horní plochy pro budoucí kontrolu polohy figurky. Následně proběhlo hrubování dutiny o 3 mm jako v případě finální šachovnice. Díky tomu nebylo dále potřeba řešit zapuštění pro kříž figurky. Posledním operačním úsekem bylo hrubování zapuštění otisku figurky.



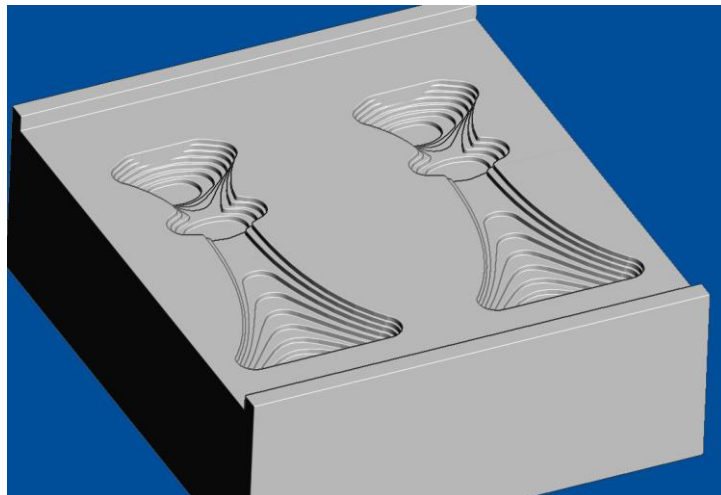
Obr. 94: Král - hrubování

U hrubování zapuštění byla použita strategie „hrubování schodů“. Nájezdy a výjezdy při hrubování byly zvoleny tak, aby nedošlo ke kolizi nástroj - obrobek. U nájezdů byl použit úhel 25° z výšky 2 mm. Výjezdy nebyly zvoleny. Propojení řezných drah představuje „kruhový oblouk“ s omezující podmínkou maximální délky 6 mm, kdy je propojení použito. Při překročení omezující podmínky bylo použito propojení „nejkratší“.

Tab. 35: Řezné podmínky – hrubování krále

Nástroj	S6106.0
Axiální hloubka řezu a_p	3 mm
Radiální hloubka řezu a_e	6 mm
Posuv na zub f_z	0,042 mm/z
Řezná rychlost v_c	132 m/min
Přídavek načisto	0,2 mm
Chlazení	Ano
Směr řezu	Sousledný

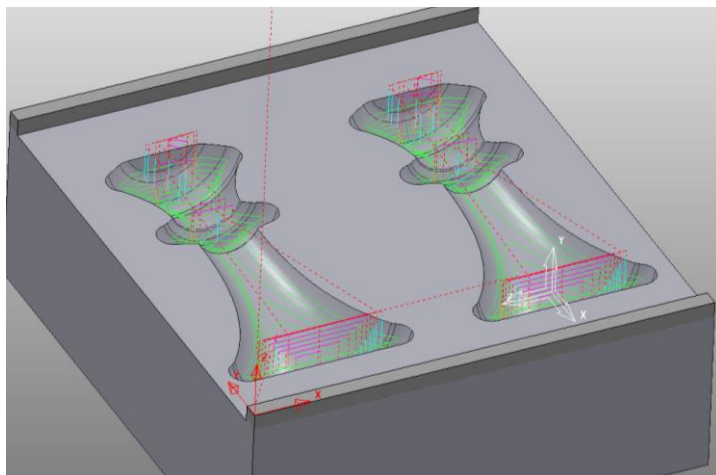
Řezné podmínky byly použity na základě doporučených hodnot od výrobce. Řezná rychlost v_c byla částečně snížena kvůli omezujícím maximálním otáčkám. Řezné parametry pro hrubování jsou podrobně popsány v Tab. 35.



Obr. 95: Vizualizace krále – hrubování

2) Dohrubování

V této operaci docházelo k zajištění konstantního přídávku pro dokončovací strategie. Použitá strategie je totožná jako u hrubování spolu se zbytkovým hrubováním. Dohrubování je provedeno pouze jedním nástrojem S6296.0.

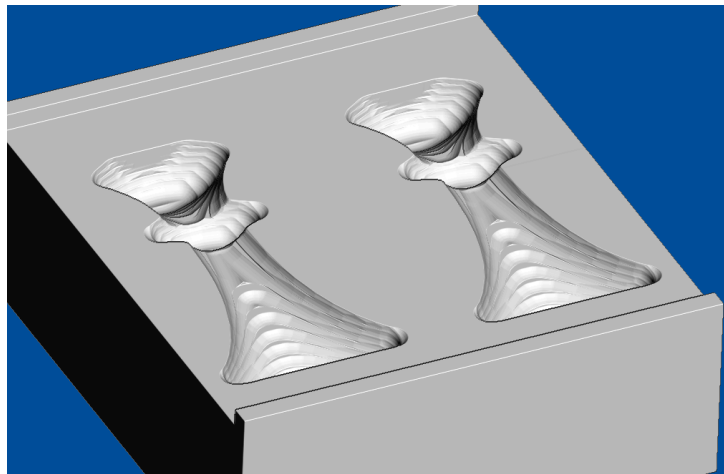


Obr. 9679: Král - dohrubování

Nájezd byl prováděn pod úhlem 25° z výšky 2 mm. Výjezdy nebyly zvoleny. Propojení řezných drah představoval „kruhový oblouk“ s omezující podmínkou maximální délky 3 mm, kdy je propojení použito. Při překročení omezující podmínky bylo použito propojení „nejkratší“. Řezné parametry dohrubování jsou popsány v Tab. 36.

Tab. 36: Řezné podmínky – Dohrubování krále

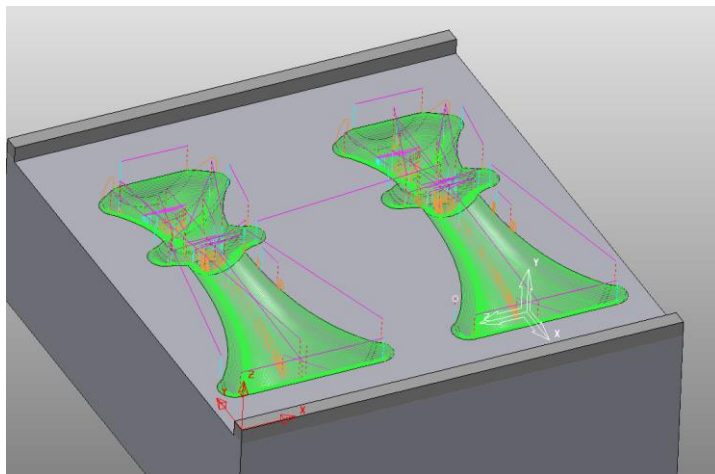
Nástroj	S6296.0
Axiální hloubka řezu a_p	0,3 mm
Radiální hloubka řezu a_e	0,6 mm
Posuv na zub f_z	0,054 mm/z
Řezná rychlost v_c	132 m/min
Přídavek načisto	0,2 mm
Chlazení	Ano
Směr řezu	Sousledný



Obr. 97: Vizualizace krále – dohrubování

3) Dokončení optimalizovanou hladinou Z

Dokončovací strategie byla volena na základě předpokladu stejných výsledků kvality povrchu a výsledných poměrů časů obrábění jako při testování strategií u zapuštění pěšce. Proto i zde byla volena strategie „dokončení optimalizovanou hladinou Z“. Jak je možné vidět na Obr. 9, dokončovací strategie byla realizována pouze větším z dvojice používaných kulových fréz S6296.0.



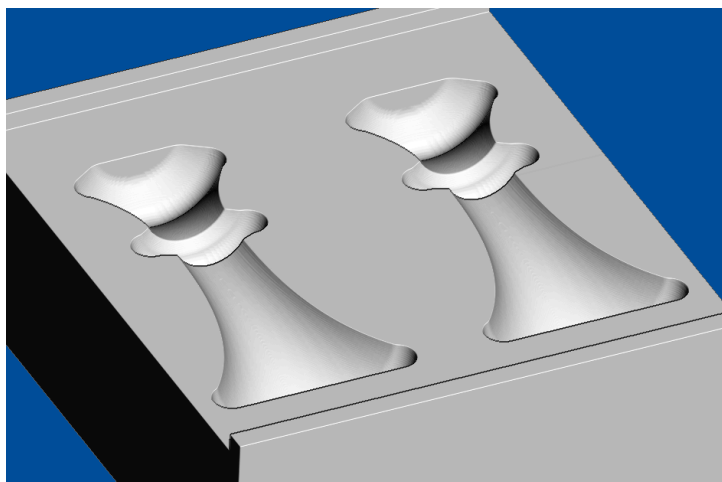
Obr. 808: Král – dokončení optimalizovanou hladinou Z

Nájezdy představoval jako u všech zbylých vzorků tzv. vertikální oblouk při nastavení úhlu 45° a rádiusu 1 mm. Výjezdy zůstaly stejné jako u předešlých strategií. Propojení jednotlivých drah bylo realizováno pomocí tzv. kruhového oblouku. Ten zajišťoval nejkratší čas obráběcího procesu. Přehled použitých řezných parametrů je podrobně popsán v Tab. 37.

Tab. 37: Řezné podmínky – dokončení krále

Nástroj	S6296.0
Axiální hloubka řezu a_p	0,2 mm
Radiální hloubka řezu a_e	0,25 mm
Posuv na zub f_z	0,062 mm/z
Řezná rychlost v_c	132 m/min
Chlazení	Ano
Směr řezu	Sousledný

Takto vyrobený otisk obsahoval obdobné problémy jako v případě předešlých vzorků. Spodní části „límčů“ a střední část těla zapuštění vykazovaly sníženinou kvalitou povrchu. Na obvodu vznikaly rýhy po výjezdech nástroje ze záběru.

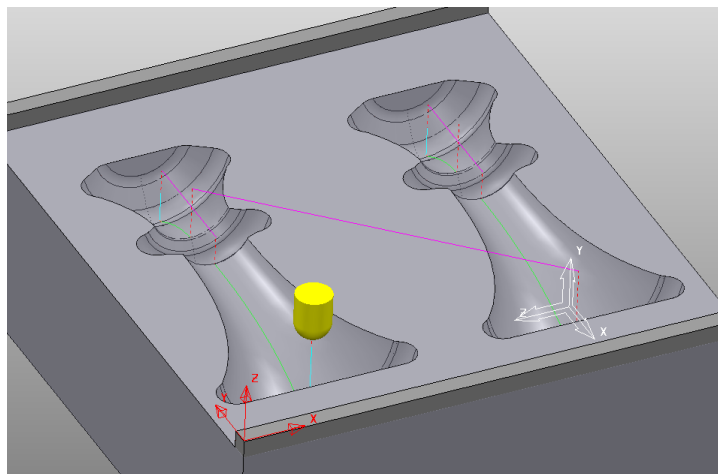


Obr. 819: Vizualizace krále – dokončení optimalizovanou hladinou Z

4) Dokončení po křivce 1

Stejně jako u vzorku pěšce či jiných, tak i při výrobě zapuštění krále, došlo automaticky k přidání následující strategie. „Dokončení po křivce 1“ představovalo vyhlazení středu těla zapuštění krále. Řídící křivka byla rozdělena na dvě části. Nástroj kopíroval povrch zapuštění ve směru vytvořené řídicí křivky. Pro strategii „dokončení po křivce 1“ byl zvolen stejný nástroj

jako u předešlého dokončení „optimalizovanou hladinou Z“. Nájezdy, výjezdy, propojení drah a řezné podmínky zůstaly rovněž totožné.



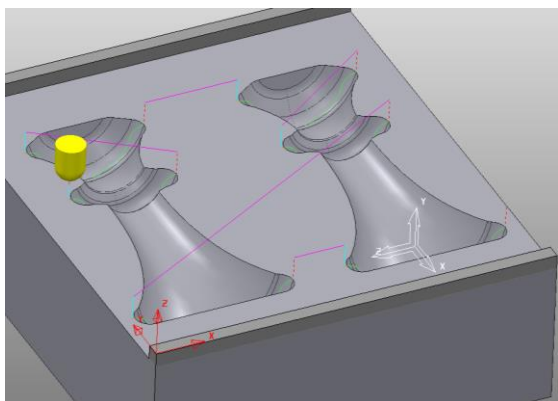
Obr. 100: Král – dokončení po křivce 1

5) Dokončení po křivce 2

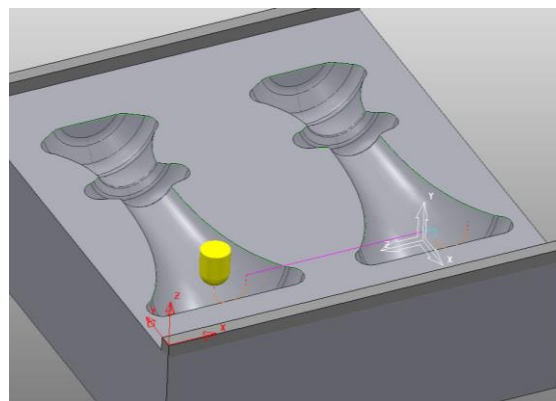
Vzhledem k vytváření „zoubků“ ve spodních částech zapuštění u všech zbylých vzorků, byla automaticky přidána strategie „dokončení po křivce 2“. Nástroj kopíroval povrch zapuštění ve směru vytvořené řídicí křivky. Pro strategii „dokončení po křivce 2“ byl zvolen stejný nástroj jako u předešlé strategie. Použitý nástroj, nájezdy, výjezdy a řezné podmínky zůstaly totožné.

6) Dokončení po křivce 3

V této operaci kopíroval nástroj obvod zapuštění ve směru vytvořené řídicí křivky. Díky tomu bylo možné odstranit rýhy vytvořené předešlými strategiemi. Použitý nástroj, nájezdy, výjezdy a řezné podmínky zůstaly totožné.



Obr. 101: Král – dokončení po křivce 2



Obr. 102: Král – dokončení po křivce 3

Na obrázku níže je možné vidět výsledný vzorek zapuštění krále. Použité strategie pro jeho výrobu byly použity u výsledné šachovnice. Po samotné výrobě vzorku došlo ke kontrole rozměrů zapuštění a fixace figurky při zavření vzorku demonstrující zavření šachovnice.



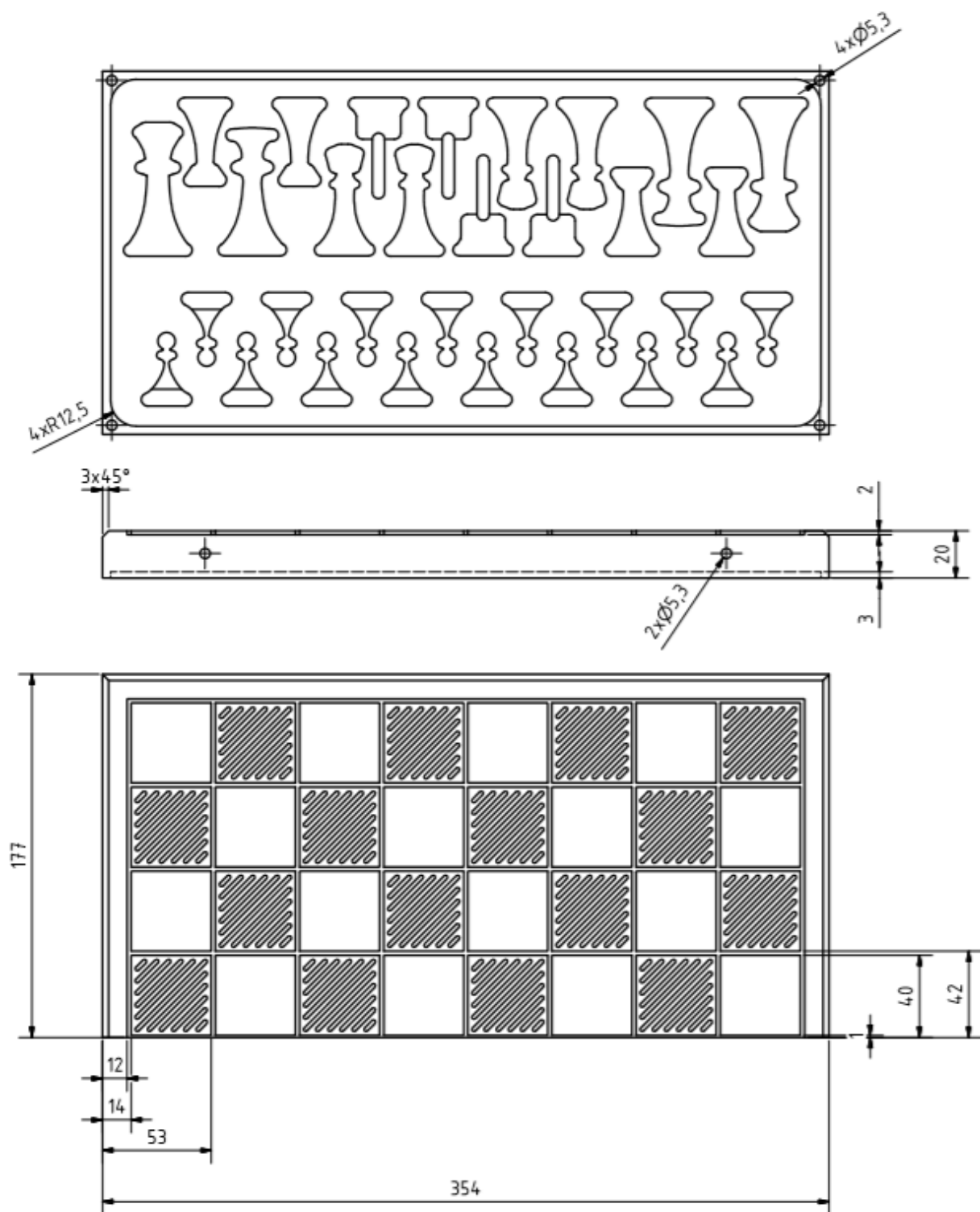
Obr. 103: Král

8.7. Konečný návrh šachovnice

Konečný návrh šachovnice se skládal ze dvou částí. Každá polovina obsahovala hrací pole a úložný prostor pro jednotlivé figurky. Hrací pole byly rozděleny, stejně jako u prvotního návrhu, pomocí jemného úhlopříčného drážkování reprezentující černá pole. Tloušťka drážky byla dána použitou frézou c160402.020.

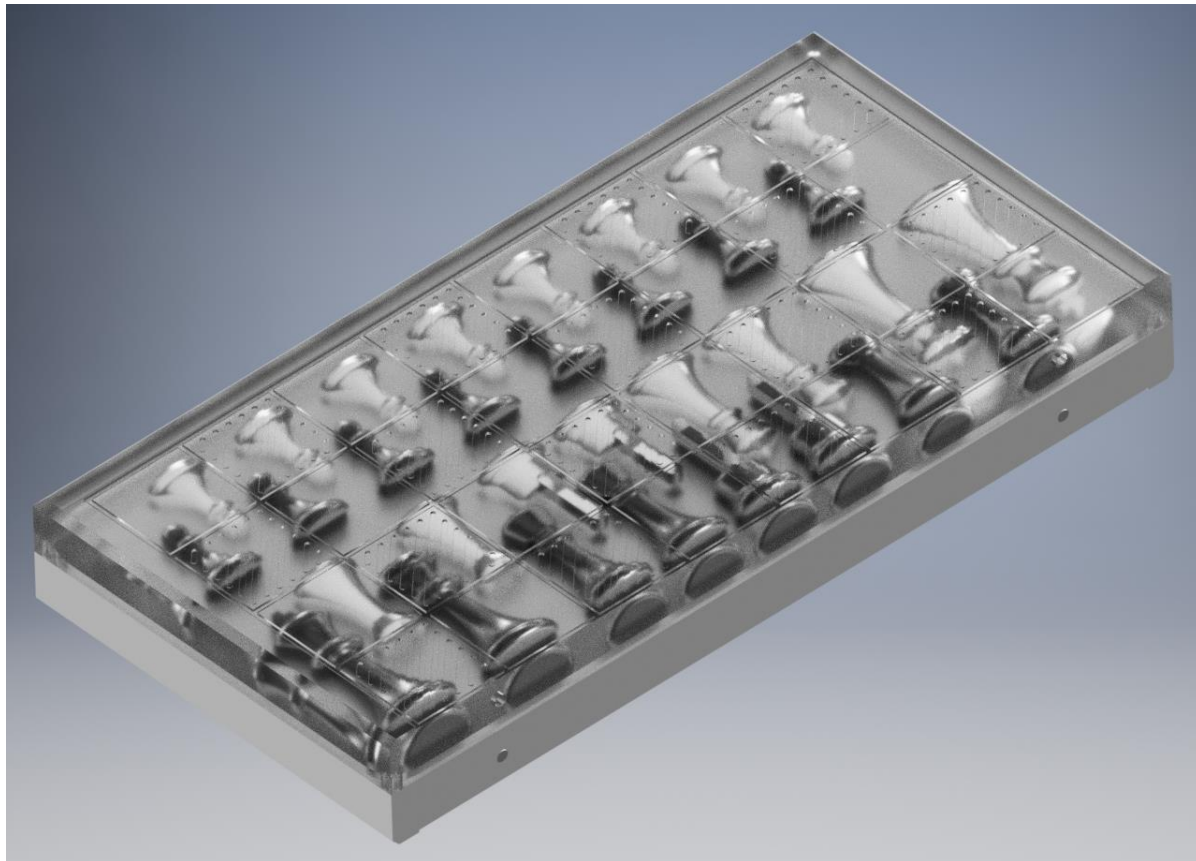
Ze spodní strany šachovnice bylo navrženo zapuštění pro všechny figurky. To bylo navíc ještě celé zapuštěné o 3 mm. Krajiní rádiusy zahloubení byly navrženy dle zvoleného hrubovacího nástroje.

Obě poloviny hrací desky rovněž obsahovaly čtyři krajní otvory o průměru $d = 5,3$ mm pro neodymové magnety. Ty se připojí k herní desce po vyrobení pomocí vytvoření lepeného spoje. Magnety slouží k zabránění samovolnému otevírání šachovnice. Dalším důvodem je připevnění obou polovin k sobě při rozložení šachovnice. Jeden magnet má průměr $d = 5 \pm 0,5$ mm a hloubku 5 mm.



Obr. 824: Konečný návrh šachovnice

Jak je možné vidět na Obr. 104, hlavní rozměry, v porovnání s původním návrhem, se částečně změnilly. Příčinou bylo vytvoření úložného prostoru šachovnice. Detailní rozložení bylo navrženo na základě předešlého testování drážkování a zapuštění pro uložení figurek.



Obr. 105: Konečný model uzavřené šachovnice

Celkový návrh byl proveden pomocí programu Autodesk Inventor. Následně došlo ke kontrole umístění všech figurek. Model byl dále optimalizován, aby bylo docíleno co nejnižší hmotnosti šachovnice. Výsledná hmotnost jedné poloviny hrací desky činí 2,7 kg. Celá šachovnice spolu s figurkami 6,1 kg.

Na obou polovinách se rozmístí celkem 12 neodymových magnetů vzhledem k zjištěné hmotnosti sestavy. Jeden magnet představoval sílu přibližně 900 g.

9. Výroba šachovnice

Celková výroba finální šachovnice probíhala na obráběcím centru VMC 500. Velkou výhodou stroje bylo využití zásobníku pro uložení nástrojů. Díky tomu nebylo potřeba využívat ruční výměny nástrojů, která by významně prodloužila celkový čas obrábění.

Použitým materiálem byla již zmíněná hliníková slitina EN AW 7075, známá jako letecký hliník. Jako polotovar byl vybrán přířez, který byl z horní a spodní strany frézovaný a potažený ochrannou fólií. Výsledkem bylo docíleno lesklého povrchu, který již nemusel být znovu opracováván. Rozměry byly stanoveny dle návrhu poloviny hrací desky na 355x178x20 mm.

9.1. Zarovnání

Zakoupené polotovary bylo potřeba nejprve zarovnat na přesný rozměr. To bylo provedeno pomocí čelního frézování libovolnou dostupnou frézou o průměru větším jak $d = 40$ mm. Pomocí tohoto technologického postupu bylo možné zarovnat oba polotovary současně. Tento způsob ušetřil čas a snižoval možnost výskytu nepřesnosti při obrábění odděleně.



Obr. 106: Zarovnávání okrajů šachovnice

Vzhledem k jednoduchosti operace bylo obrábění provedeno pomocí ručního programování. Tímto způsobem došlo ke zfrézování všech čtyř stran.

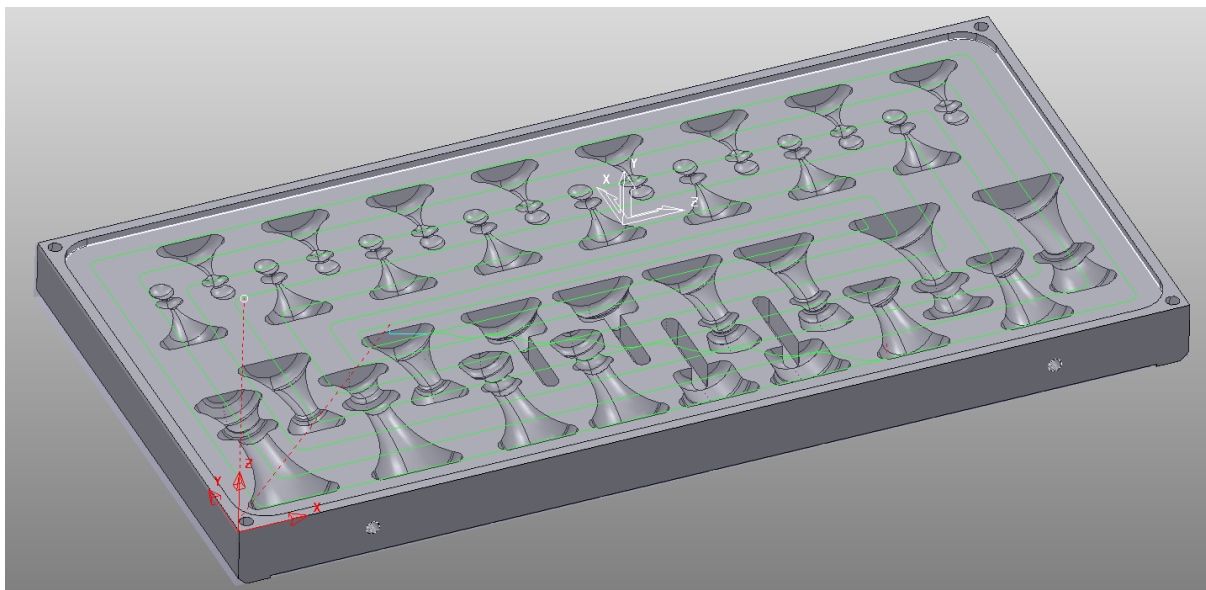
9.2. Spodní strana

Další operací bylo obrobení spodní strany šachovnice. Dosažení vysoké přesnosti zajistila sonda, která byla použita pro určení počátku souřadnicového systému. Hodnoty byly měřeny vždy ze středu polotovaru, aby došlo k rozdělení nepřesnosti. Dále byl polotovar

podepřen podpíracími šrouby v místech přesahu. Tento způsob snížil pravděpodobnost vzniku vibrací. Výsledná maximální odchylka v ose Z po celé ploše polotovaru byla 0,07 mm. Maximální dovolená odchylka se rovnala offsetu figurek, který činil 0,15 mm.

1) Hrubování šachovnice

Nejprve došlo pomocí čelní válcové frézy 120517.180 k hrubování dutiny šachovnice. Požadovaný materiál byl odebrán jedním axiálním krokem. Pro dokončovací strategii byl ponechán přídavek na čisto 0,2 mm.



Obr. 107: Hrubování šachovnice

Nájezd byl realizován sjezdem pod úhlem 15° z výšky 1 mm. Výjezd nebyl definován. Jelikož se jedná o jedinou dráhu, nebylo potřeba určovat propojení mezi jednotlivými dráhami. Řezné podmínky byly nejprve testovány. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v Tab. 38.

Tab. 38: Řezné podmínky – hrubování šachovnice

Nástroj	120517.180
Axiální hloubka řezu a_p	2,8 mm
Radiální hloubka řezu a_e	17 mm
Posuv na zub f_z	0,042 mm/z
Řezná rychlost v_c	200 m/min
Přídavek na čisto	0,2 mm
Chlazení	Ano
Směr řezu	Sousledný

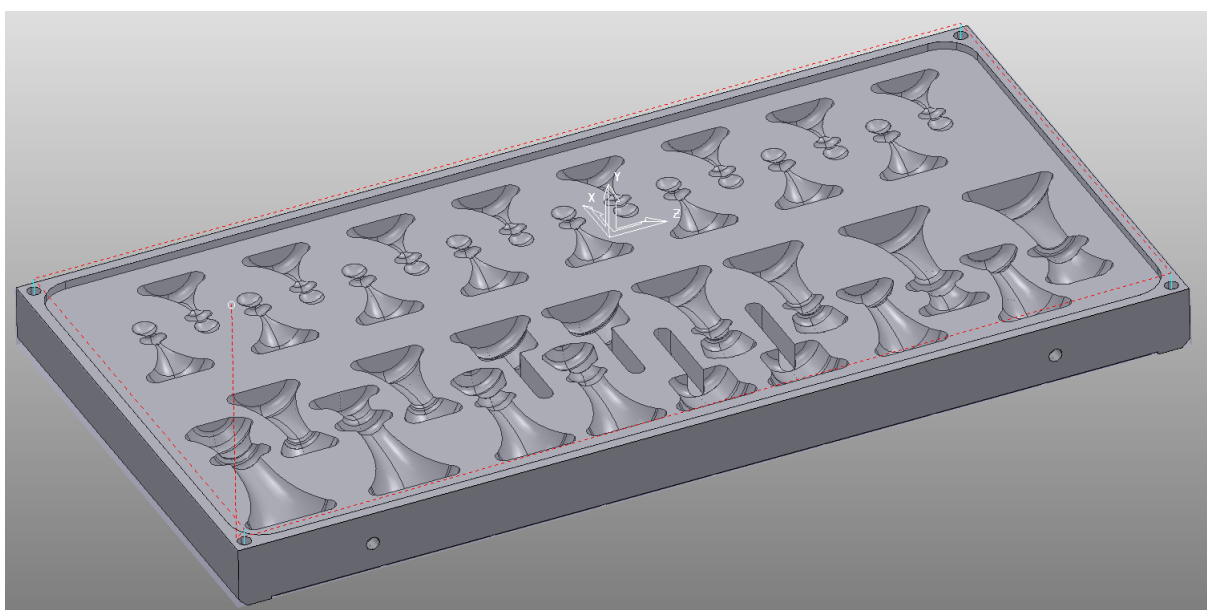
Při větším opásání nástroje v rozích docházelo k „pískání“. Z toho důvodu by bylo vhodné pro výrobu dalších šachovnic zvolit např. trochoidní obrábění nebo koupit nástroj vhodnější na frézování hliníkových slitin.

2) Dokončení roviny spodní strany

Dokončení plochy vytvořené na spodní straně šachovnice proběhlo stejným nástrojem jako v předešlé strategii hrubování. Dráha, nájezdy, výjezdy a propojení zůstaly nezměněné. Změnila se pouze řezná rychlost na 250 m/min. Radiální krok byl volen menší než poloměr nástroje, aby nedocházelo k nesouslednému smyslu obrábění.

3) Vrtání

Další strategií bylo vyvrtání děr, které slouží k umístění neodymových magnetů. Podle magnetické síly jednotlivých magnetů, byly navrženy čtyři díry na obvodu šachovnice. K vyvrtání byl použit vrták požadovaného rozměru A0025.3.



Obr. 108: Vrtání děr

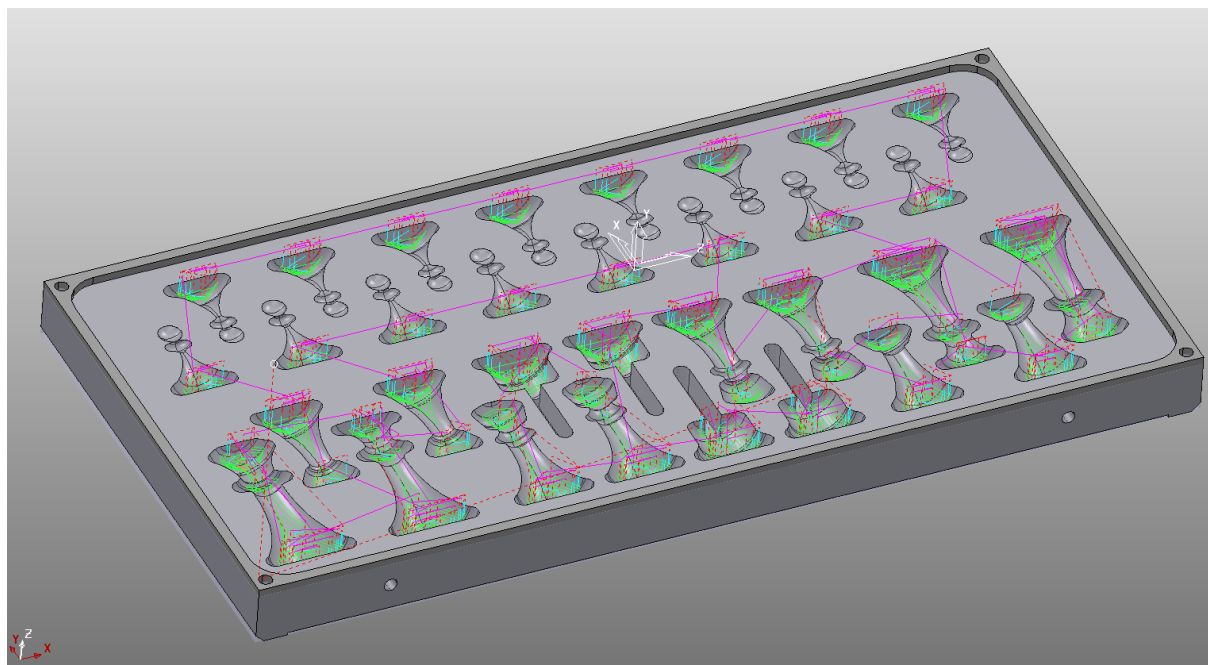
Nájezd do záběru byl volen přímo. Nájezdová rychlost byla poloviční než rychlost řezná z důvodu přesného chycení nástroje do materiálu. Použité řezné podmínky jsou popsány v následující tabulce.

Tab. 39: Řezné podmínky - vrtání děr

Nástroj	A0025.3
Hloubka vrtání	5 mm
Průměr řezu	5,3 mm
Posuv na zub f_z	0,06 mm/z
Řezná rychlost v_c	16,6 m/min
Chlazení	Ano
Směr řezu	Sousledný

4) Hrubování zapuštění figurek

Následně došlo k hrubování samotného zapuštění figurek. To bylo provedeno pomocí čelní válcové frézy S6106.0. Veškeré parametry zůstaly totožné jako v kapitole 8.6.



Obr. 109: Hrubování zapuštění figurek

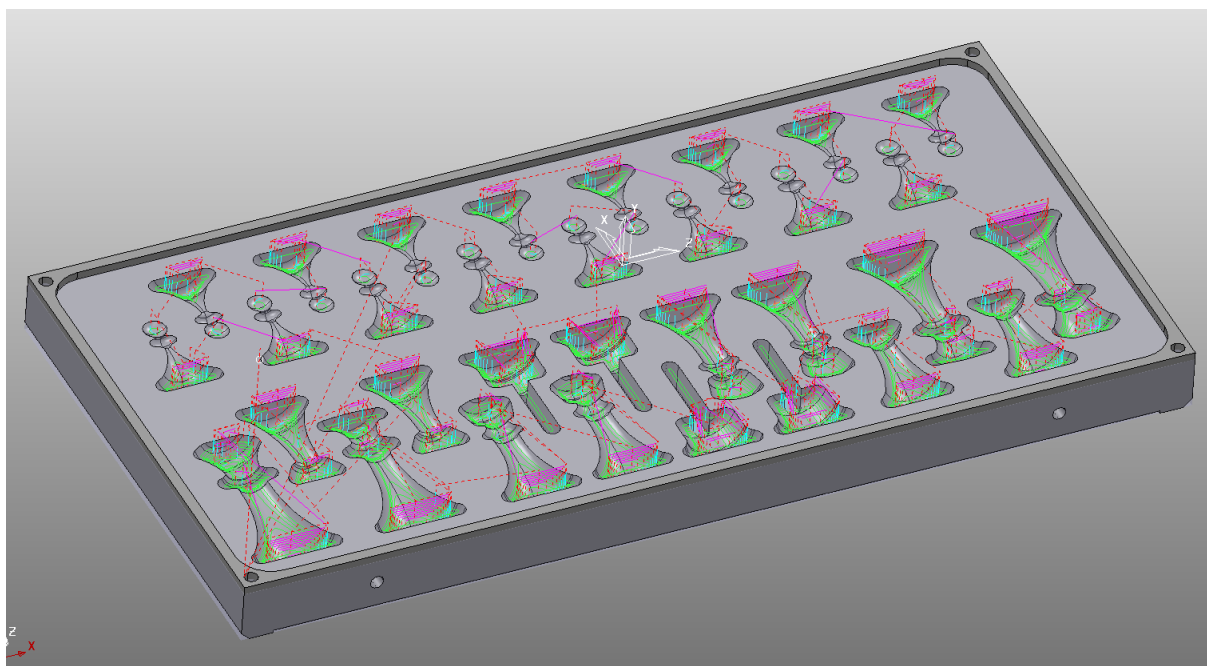
Vytvořené dráhy byly optimalizované pouze pomocí funkce „automatické přeskládání“. Možné zredukování času by bylo možné ručním přeskládáním. To je, vzhledem k prototypové výrobě, příliš pracné a časová úspora by nebyla tak významná.

5) Dokončení hlavy koně

Dále došlo k dokončení hlavy koně. Důvodem bylo využití stejného nástroje jako v předešlé strategii. Velikost hloubky řezu představovala 1 mm. Zvolené a_p vykazovalo při testování nejlepší kvalitu výsledného povrchu. Způsob obrobení byl stejný jako v kapitole 8.6.4.

6) Dohrubování zapuštění figurek

Strategie dohrubování byla provedena pro všechny figurky stejně. Tím nedošlo k optimálnímu propojení řezných drah, jako u testovaných vzorků. Nájezdy byly sníženy na výšku 1 mm pro zkrácení času obrábění. Propojení představoval „kruhový oblouk“ s omezující podmínkou maximální délky 3 mm. V opačném případě byla použita funkce „nejkratší“.



Obr. 110: Dohrubování zapuštění figurek

7) Dohrubování zapuštění figurek D4

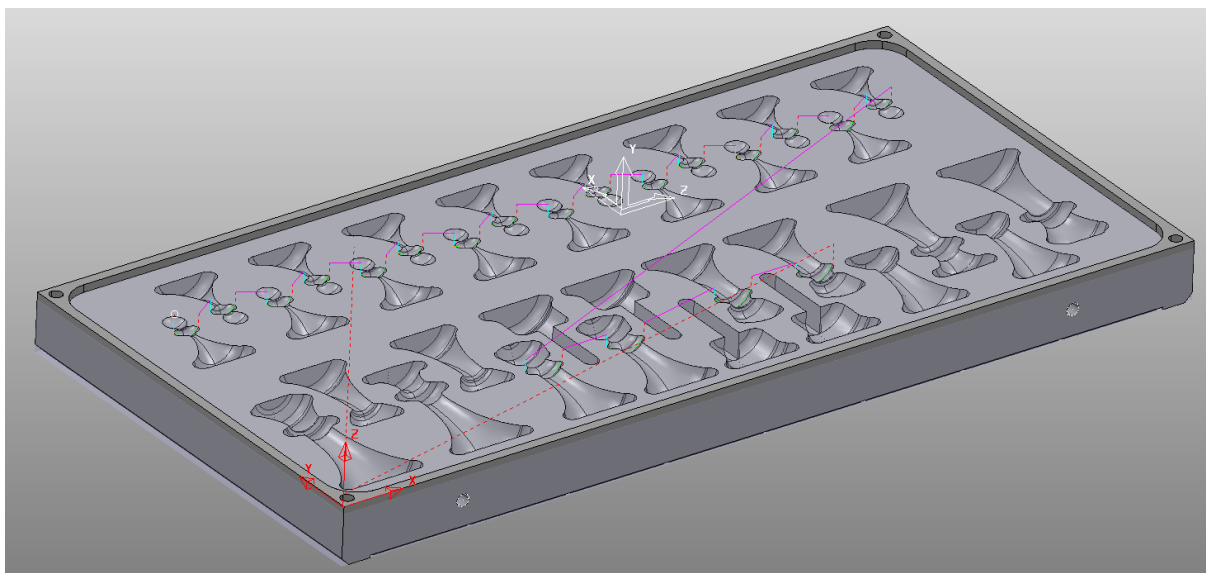
Pomocí této strategie byly dohrubovány oblasti zapuštění, které nebylo možné obrobit kulovou frézou o průměru $d = 6$ mm. Jedná se o horní „límce“ zapuštění pěšce a střelce. V těchto místech došlo k dohrubování pomocí menšího nástroje S511602.040. Strategie byly rozděleny zvláště pro pěšce a střelce. Díky tomu bylo možné ponechat optimalizované propojení jednotlivých drah. Dráhy a řezné podmínky jsou popsány v kapitole 8.6.1. a 8.6.3.

8) Dokončení zapuštění figurek D4

Dále došlo k dokončení stejných oblastí, jako tomu bylo v předcházející strategii. Důvodem bylo využití totožného nástroje. Strategie byly rovněž rozděleny pro obě figurky. Dráhy a řezné podmínky zůstali identické jako u vzorků z kapitoly 8.6.1. a 8.6.3.

9) Vyhlazení límce D4

Poslední strategií využívající nástroj S511602.040 bylo vyhlazení límce D4. Tato strategie již nebyla rozdělena podle druhu zapuštění. I tak bylo možné dráhu snadno ručně optimalizovat pro zajištění nejkratšího času obrábění. Parametry strategie jsou uvedeny v kapitole 8.6.1. a 8.6.3. Výsledné dráhy jsou zobrazeny na Obr. 111.



Obr. 111: Dokončení límce D4

10) Dokončení zapuštění figurek

Nejnáročnější strategií na čas obrábění představovalo dokončení zapuštění jednotlivých figurek. V porovnání s hrubováním a dohrubováním jednotlivých zapuštění, došlo u dokončení k rozdělení jednotlivých drah. Díky tomu nedošlo k nárůstu obráběcího času. Protože byly tyto dráhy již otestovány, mohlo dojít k částečnému snížení rovin rychloposuvu a sjezdu. Veškeré použité parametry jsou popsány v kapitole 8.6.

11) Vyhlazení límce

Jedná se o stejnou strategii jako v případě vyhlazení límce D4. Rozdíl představuje pouze použitý nástroj. Vzhledem k jednoduchosti strategie nedošlo k jejímu rozdělení dle druhu zapuštění. Dráhy byly ručně přeskládány. Řezné parametry strategie zůstaly stejné jako v kapitole 8.6.

12) Vyhlazení těla zapuštění figurek

Další nekvalitní část zapuštění figurek představoval střed otisků. V těchto místech docházelo k tvorbě „zoubků“. Problém byl po otestování odstraněn pomocí dokončení po křivce. Všechny zapuštění byly dokončeny pomocí jediné strategie. Dráhy a řezné parametry, stejně jako u ostatních testovaných drah, byly zkopírovány z kapitoly 8.6.

13) Obrisy zapuštění figurek

Poslední použitou strategií při výrobě spodní strany šachovnice bylo vytvoření obrysů zapuštění figurek. Jedná se pouze o estetické vyhlazení okrajů zapuštění, které obsahovaly otisky od nájezdů a výjezdů. Dráha byla ručně přeskládána. Nájezdy, výjezdy, propojení a řezné parametry byly převzaty z kapitoly 8.6.



Obr. 112: Spodní strana šachovnice

Druhá polovina spodní strany byla vyrobena stejným způsobem. Jediný rozdíl byl v zrcadlovém provedení, aby bylo možné šachovnici zavřít. Časy výroby jedné poloviny spodní strany jsou zobrazeny v Tab. 40.

Tab. 40: Časy obrábění jedné poloviny spodní strany šachovnice

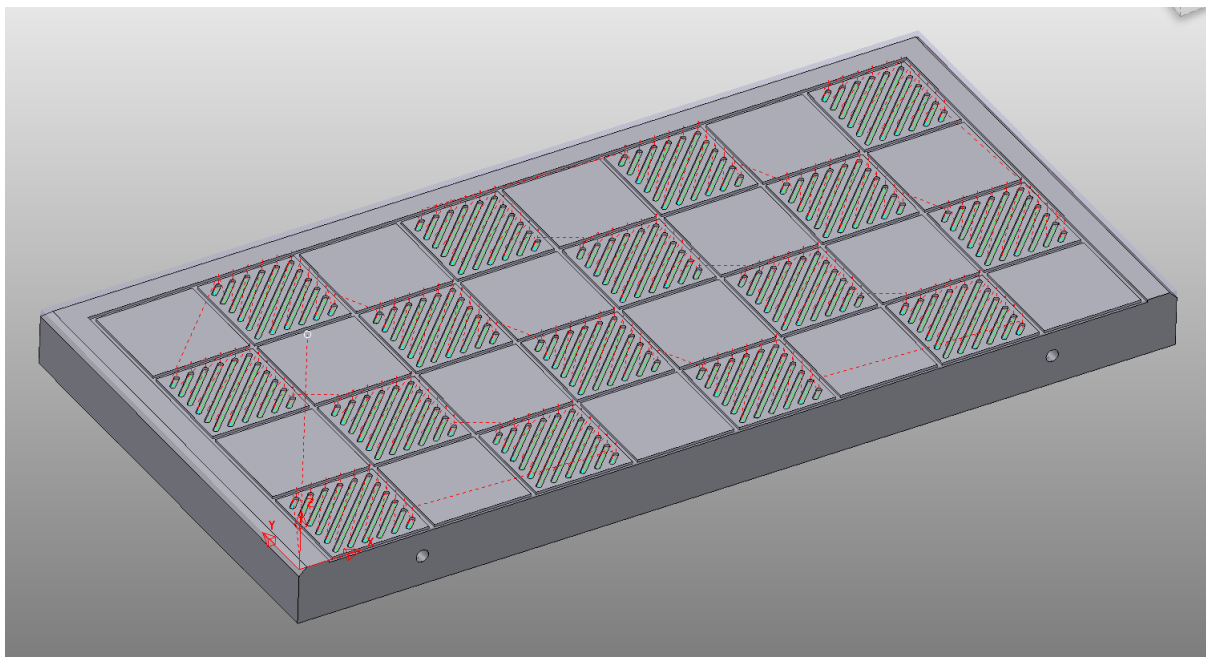
PowerMill Ultimate 2018	Výsledný čas
4:14:41 hod	4:14:33 hod

9.3. Horní strana

Poslední operace představovalo vyfrézování herních polí na horní straně šachovnice. Bylo nutné dát pozor na správné určení nulového bodu, aby bylo možné šachovnici správně zavřít. I zde bylo využito sondy pro přesnější stanovení souřadnicového systému. Polotovar podepřen podpíracími šrouby v místech přesahu svěráku. Výsledná maximální odchylka v ose Z po celé ploše polotovaru byla přibližně 0,04 mm.

1) Dokončení drážek – hrací pole

Jako první byla použita strategie „dokončení po křivce“, kdy došlo k vytvoření jemného drážkování. To je možné vidět na Obr. 30. Vzhledem k testování drážkování byl vybrán nástroj C160402.020.



Obr. 113: Dokončení drážek – hrací pole

Dráhy byly ručně přeskládány. To zajistilo nižší náročnost na celkový čas obrábění. Z důvodů najíždění nástroje přímo do materiálu, došlo ke snížení posuvu na 50 % řezného posuvu. Výjezdy nebyly definovány. Propojení představovala strategie „ochrana“. Řezné parametry byly nastaveny dle doporučení výrobce nástroje.

Tab. 41: Řezné podmínky – dokončení drážek hracích polí

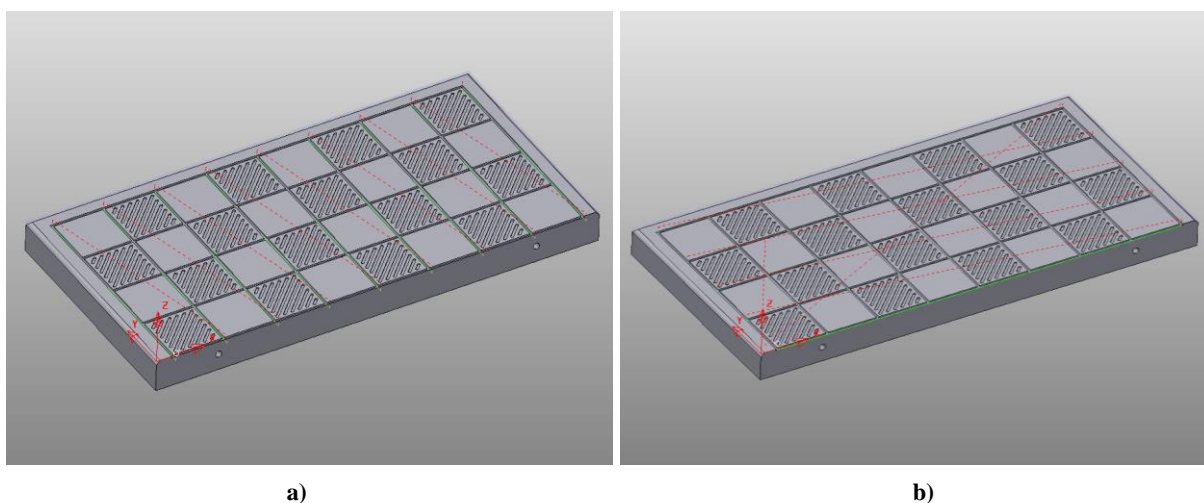
Nástroj	C160402.020
Axiální hloubka řezu a_p	1 mm
Radiální hloubka řezu a_e	2 mm
Posuv na zub f_z	0,015 mm/z
Řezná rychlost v_c	44 m/min
Chlazení	Ano
Směr řezu	Sousledný

2) Dokončení drážek – podélné

Následovalo vyfrézování podélných drážek oddělující jednotlivá pole. Rovněž byla použita válcová fréza o průměru $d = 2$ mm. Nájezdy v této strategii představovalo tzv. protažení. Tento druh nájezdu dovozoval využití 100% posuvu. Řezné parametry zůstaly stejné jako v předcházející strategii. Jediný rozdíl představovala axiální hloubka řezu, která se u dokončení podélných drážek rovnala 2 mm.

3) Dokončení drážek – příčné

Dále došlo k dokončení příčných drážek. Zde již nebylo možné využití nájezdů pomocí „protážení“, ale byly realizovány „přímými“ nájezdy. I tak byla nájezdová rychlost rovna 100 % rychlosti řezné. Důvodem bylo zvolení počátečního bodu v místě, kde již byl materiál odebrán předchozí strategii. Řezné parametry byly totožné, jako v případě dokončení podélných drážek.



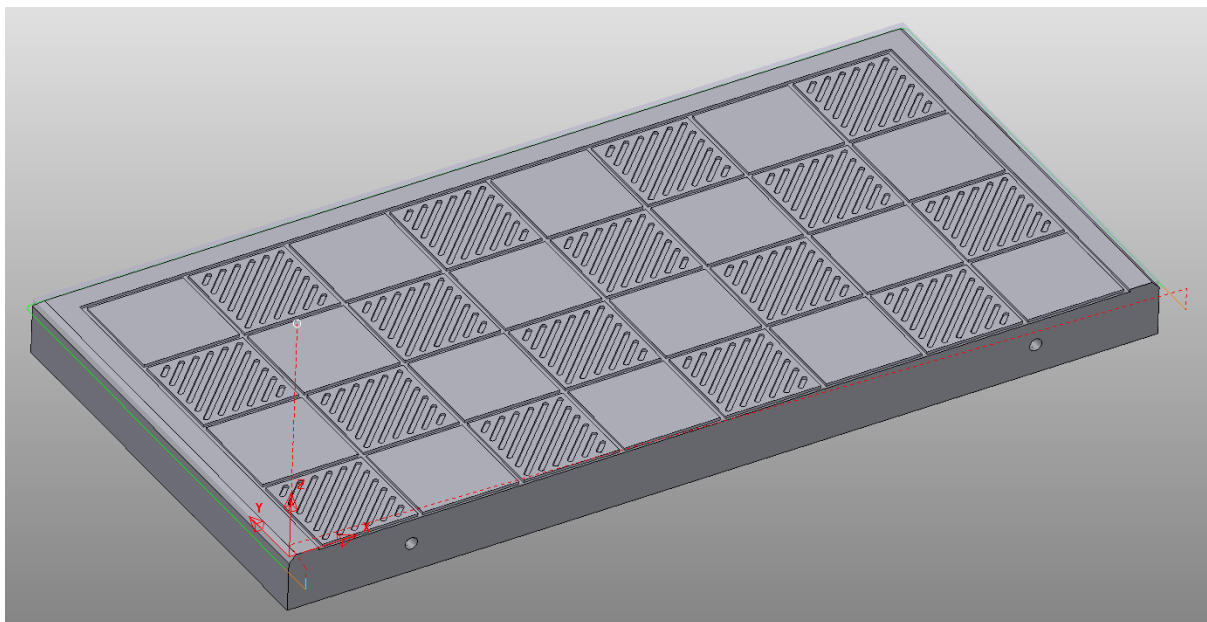
a)

b)

Obr. 114: Dokončení – a) podélných drážek, b) příčných drážek

4) Sražení hran

Poslední strategií při výrobě horní poloviny šachovnice představovalo sražení hran. V tomto operačním úseku došlo k výrobě sražení 3x3 mm po obvodu šachovnice. Použitý nástroj byl záhlubník G13619.0.



Obr. 115: Dokončení - sražení hran

Nájezd představovalo opět „protážení“. Výjezd byl nastaven stejným způsobem. Před samotným frézováním hrany šachovnice proběhlo testování zvoleného nástroje. Na základě tohoto testování byly významně sníženy řezné podmínky. Díky tomu byl zajištěn uspokojivý výsledný povrch.

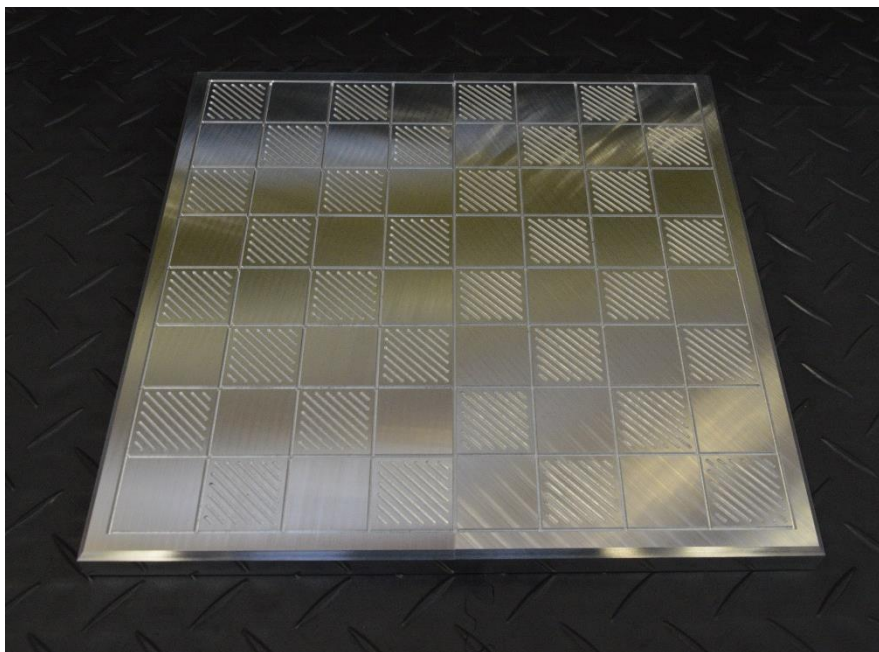
Tab. 42: Řezné podmínky – sražení hran

Nástroj	G13619.0
Axiální hloubka řezu a_p	3 mm
Radiální hloubka řezu a_e	3 mm
Posuv na zub f_z	0,02 mm/z
Řezná rychlost v_c	120 m/min
Chlazení	Ano
Směr řezu	Sousledný

Druhá polovina spodní strany byla vyrobena stejným způsobem. Časy výroby jedné poloviny byly výrazně nižší, v porovnání s výrobou spodní strany.

Tab. 43: Časy obrábění jedné poloviny horní strany šachovnice

PowerMill Ultimate 2018	Výsledný čas
35:42 min	34:14 min



Obr. 116: Horní strana šachovnice

10. Technicko - ekonomické zhodnocení

10.1. Ekonomické zhodnocení

Ekonomické zhodnocení výroby hrací šachovnice je provedeno pomocí hodinové sazby pracoviště. Náklady na strojní práci frézky VMC 500 byla stanovena, po konzultaci s vedoucím práce, na 1500 Kč/hod. S ohledem na to, že se jedná o prototypovou výrobu, budou stanoveny náklady na přípravu obrábění a nástroje pouze orientačně. Kalkulace nákladu na jeden operační úsek je proveden dle vztahu (10.1). Použité vzorce v této kapitole byly převzaty z [31].

$$N = N_s + N_n + N_{nv}. \tag{10.1}$$

Obráběcí proces jedné poloviny hrací desky byl rozdělený na jednotlivé operace. Pro každý úsek došlo k přibližnému stanovení celkového času přípravy $t_{připrava}$. Pomocí softwaru PowerMill byly vygenerovány strojní časy t_{As} .

Tab. 37: Operace – použité časy

Operace		$t_{připrava}$ [min]	t_{As} [min]
N_1	Zarovnání	20	5
N_2	Spodní strana	30	256
N_3	Hrací pole	30	34

Nejprve došlo k vypočítání nákladů na strojní práci N_s vztaženou na jeden operační úsek. Veličina byla vyjádřena jako

$$N_s = (t_{\text{připrava}} + t_{As}) \cdot \left[k_C \cdot \left(\frac{M_o}{60} + \frac{HRP}{60} \right) + \frac{N_{hs}}{60} \right], \quad (10.2)$$

$$N_s = (t_{\text{připrava}} + t_{As}) \cdot N_{sm}. \quad (10.3)$$

Vzhledem ke stanovení nákladu na strojní práci N_{sm} , byl použit vztah (10.3). Výpočty pro jednotlivé operační úseky vypadají následovně

$$N_{s1} = (20 + 5) \cdot \frac{1500}{60} = 625 \text{ Kč}, \quad (10.4)$$

$$N_{s2} = (30 + 256) \cdot \frac{1500}{60} = 7150 \text{ Kč}, \quad (10.5)$$

$$N_{s3} = (30 + 34) \cdot \frac{1500}{60} = 1600 \text{ Kč}. \quad (10.6)$$

$$N_{s,\text{sachovnice}} = 2 \cdot \sum N_{si} = 2 \cdot (625 + 7150 + 1600) = 18825 \text{ Kč}. \quad (10.7)$$

Jelikož se jedná o prototypovou výrobu, tak bylo značně složité určit náklady spojené s použitými nástroji. Náklady na nástroje (údržba, odpis, ošetření) lze vyjádřit následovně

$$N_n = z_v \cdot N_{nT}, \quad (10.8)$$

kde z_v je počet výměn nástroje za jeden operační úsek. Ty byly odhadnuty dle vytiženosti jednotlivých nástrojů. Veličina N_{nT} představuje náklady spojené s provozem nástroje vztažené na jednu trvanlivost bříty. Ty lze vyjádřit jako

$$N_{nT} = \frac{C_n - C_{zn}}{z_o + 1} + t_{os} \cdot k_C \left(\frac{M_o}{60} + \frac{HRP}{60} \right) \cdot \frac{z_o}{z_o + 1}. \quad (10.9)$$

Pro snadnější kalkulaci bylo stanoveno, že trvanlivost je rovna životnosti nástroje. Náklady na provoz nástroje je tak možné zjednodušeně brát jako jeho cenu danou dodavatelem $N_{nT} = C_n$. Výsledné vztahy nákladů na nástroje pro výrobu jedné poloviny šachovnice lze rozepsat následovně

$$N_{n,valcova2} = 0,250 \cdot 251 = 63 \text{ Kč}, \quad (10.10)$$

$$N_{n,valcova6} = 0,250 \cdot 1039 = 260 \text{ Kč}, \quad (10.11)$$

$$N_{n,valcova18} = 0,125 \cdot 1111 = 139 \text{ Kč}, \quad (10.12)$$

$$N_{n,kulova4} = 0,200 \cdot 461 = 92 \text{ Kč}, \quad (10.13)$$

$$N_{n,kulova6} = 0,250 \cdot 1234 = 309 \text{ Kč}, \quad (10.14)$$

$$N_{n,vrtak} = 0,050 \cdot 110 = 6 \text{ Kč}, \quad (10.15)$$

$$N_{n,srazechran} = 0,100 \cdot 300 = 30 \text{ Kč}, \quad (10.16)$$

$$N_{n,sachovnice} = 2 \cdot \sum N_{n,nastroj} = \quad (10.17)$$

$$= 2 \cdot (63 + 260 + 139 + 92 + 309 + 6 + 30) = 1798 \text{ Kč}.$$

Poslední náklady spojené s použitými nástroji jsou na jejich výměnu. I zde by bylo v ideálním případě nutné použít komplexní vztah

$$N_{vn} = t_{vn} \cdot \left[k_C \cdot \left(\frac{M_o}{60} + \frac{HRP}{60} \right) + \frac{O_S}{60} \right] \cdot z_v, \quad (10.18)$$

$$N_{vn} = t_{vn} \cdot N_{vnm} \cdot z_v. \quad (10.19)$$

V tomto případě byla odhadnuta velikost nákladu na výměnu nástroje za minutu. Jednotlivé náklady na výměnu byly rozděleny stejně jako u rovnic (10.10-10.16) dle použitých nástrojů odpovídající výrobě poloviny hrací desky

$$N_{vn,valcova2} = 5 \cdot 25 \cdot 0,250 = 31 \text{ Kč}, \quad (10.20)$$

$$N_{vn,valcova6} = 5 \cdot 25 \cdot 0,250 = 31 \text{ Kč}, \quad (10.21)$$

$$N_{vn,valcova18} = 5 \cdot 25 \cdot 0,125 = 16 \text{ Kč}, \quad (10.22)$$

$$N_{vn,kulova4} = 5 \cdot 25 \cdot 0,200 = 25 \text{ Kč}, \quad (10.23)$$

$$N_{vn,kulova6} = 5 \cdot 25 \cdot 0,250 = 31 \text{ Kč}, \quad (10.24)$$

$$N_{vn,vrtak} = 5 \cdot 25 \cdot 0,050 = 6 \text{ Kč}, \quad (10.25)$$

$$N_{vn,srazechran} = 10 \cdot 25 \cdot 0,100 = 25 \text{ Kč}, \quad (10.26)$$

$$N_{vn,sachovnice} = 2 \cdot \sum N_{vn,nastroj} = \quad (10.27)$$

$$= 2 \cdot (31 + 31 + 16 + 25 + 31 + 6 + 25) = 165 \text{ Kč.}$$

Po dosazení získaných hodnot do původní rovnice (10.1) byly vypočteny výrobní náklady na výrobu šachovnicové desky.

$$N_{sachovnice} = N_{s,sachovnice} + N_{n,sachovnice} + N_{nv,sachovnice}, \quad (10.28)$$

$$N_{sachovnice} = 18825 + 1798 + 165 = 20788 \text{ Kč.} \quad (10.29)$$

Vypočtená hodnota $N_{sachovnice}$ představuje pouze výrobní náklady na výrobu šachovnice. Náklady u obrábění představuje z velké části cena materiálu. Z toho důvodu je kladen důraz na hospodárné využívání materiálu. Náklady na jeden polotovar jsou dány vztahem (10.30).

$$N_{mat} = N_m \cdot C_{mat} - z_m \cdot C_{vžš}. \quad (10.30)$$

Výše uvedený vztah obsahuje tzv. normu spotřeby materiálu N_m . Ta se využívá především ke stanovení materiálně technického zásobování a vychází z dlouhodobé statistiky spotřeby materiálu u tvarově podobných součástí. Jedná se o tzv. rozborově propočtovou metodu. Pro zjednodušení výpočtu budou v další kalkulaci uvažovány pouze náklady vycházející z ceny materiálu na kilogram stanovené dodavatelem. Výsledné náklady na polotovar odpovídající jedné šachovnice jsou $N_{mat} = 3148 \text{ Kč}$. [29; 30]

Do celkových nákladů nebyl započítán čas na návrh a tvorbu partprogramů. Ten by se nejvíce projevil při porovnávání různě velkých sérií. Do výsledného vzorce byly rovněž započítány náklady na očištění, leštění, lepení magnetů apod. Celkové náklady hrací šachovnice jsou popsány v následujících rovnicích

$$N_c = N_{sachovnice} + N_{ostatní} + N_{mat}, \quad (10.31)$$

$$N_c = 20788 + 1000 + 3148 = 24936 \text{ Kč.} \quad (10.32)$$

10.2. Technické zhodnocení

Frézování hliníkové slitiny představuje jistá úskalí. I přes relativně nízké mechanické vlastnosti, jako je například pevnost, se hliníkové slitiny řadí ke špatně obrobitelným materiálům. To je dáno především vysokou tepelnou vodivostí a sklonem k adhezi. Z toho důvodu je potřeba klást důraz na volbu vhodných rezných nástrojů s pozitivní geometrií břitu. Dále je doporučeno materiál při obrábění důkladně chladit pro zabránění nalepování obráběného materiálu na břit.

Největší část nákladů představuje strojní práce. Tyto náklady lze nejjednodušeji snížit využitím výkonnějšího obráběcího centra, aby bylo možné dosáhnout celého potenciálu obráběcích nástrojů ze slinutých karbidů. Dále je možné využití polotovaru, který není frézovaný, ale nebude dosaženo stejné kvality povrchu. Nakonec je možno optimalizovat rezné podmínky a obráběcí dráhy. Ty nebyly plně vyladěny z důvodu výroby pouze jednoho kusu šachovnice. Při požadavku na větší sérii výrobku je doporučeno, výrobu dále optimalizovat.

11. Závěr

Tato práce měla za úkol navrhnout, vyrobit a zhodnotit výrobu šachovnice z hliníkové slitiny EN AW 7075. Nejdříve došlo k vypracování teoretické části, kde autor seznamuje s problematikou hliníkových slitin a třískového obrábění, zaměřeného na metodu frézování. Získaný přehled byl dále zužitkován při samotné výrobě v praktické části práce.

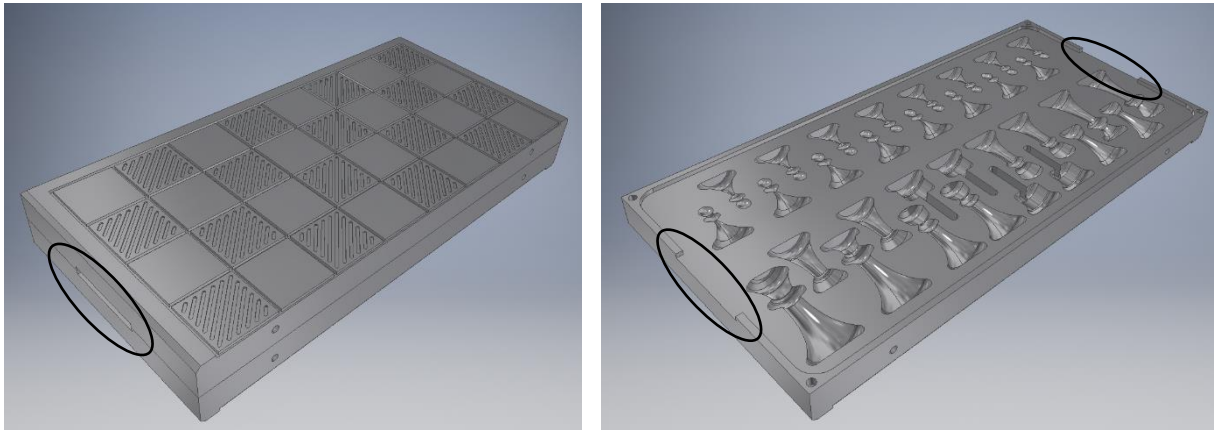
Nejprve došlo k návrhu šachovnice na základě požadavků ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie. Pomocí programu Autodesk Inventor Professional 2018 byl vyhotoven 3D model herní desky, kde došlo zároveň k testování možného umístění figurek do spodní strany šachovnice.

Vzhledem k vytvořenému 3D modelu byly navrženy vhodné obráběcí nástroje. Vrták A0025.3, záhlubník G13619.0 a válcová fréza 120517.180 AlTiN byly použity pouze pro jejich dobrou dostupnost na ústavu. Pro další výrobu je vhodné zvolit nástroje, určené pro obrábění hliníkových slitin. U většiny použitých nástrojů došlo k testování rezných podmínek. Snahou bylo především snížit čas obrábění a zajistit požadovanou kvalitu výsledného povrchu. Pro zrychlení obrábění je doporučeno testování maximálních otáček stroje na 8000 ot/min.

V dalším kroku proběhlo rozsáhlé testování dokončovacích strategií pro výrobu drážek a zapuštění figurek. Vybrané strategie představovaly kompromis mezi kvalitou povrchu a celkových časem obrábění.

Následně došlo k výrobě samotné herní šachovnice. Výroba byla rozdělena do tří operací. První operaci představovalo zarovnání, kdy došlo ke zfrézování všech stran polotovaru na přesný rozměr. Dále bylo vytvořeno uložení pro figurky ze spodní strany šachovnice spolu s dírami na magnety. Nakonec proběhlo frézování horní poloviny desky. Řezné podmínky byly z velké části převzaty z předcházejícího testování.

Při testování magnetů byl zjištěn problém s otevíráním složené šachovnice. Z tohoto důvodu nebyly neodymové magnety do šachovnice nalepeny. Řešením je částečné obrobení okraje na spodní straně desky. Tím vznikne, při uzavření, úchyt o hloubce 6 mm a libovolné délce. Šachovnice tak bude snadno rozebíratelná.



Obr. 117: Návrh uchycení šachovnice

Poslední bod představovalo technicko - ekonomické zhodnocení. Zde došlo k přibližnému určení nákladů na výrobu jedné šachovnice. Kalkulace zahrnovala náklady na materiál, stroj, nástroj a jeho výměnu. Největší část nákladů představovala strojní práce. Tyto náklady lze nejjednodušeji snížit využitím výkonnějšího obráběcího centra, aby bylo možné dosáhnout potenciálu obráběcích nástrojů ze slinutých karbidů.

Bibliografie

- [1] *Encyklopedie hliníku*. Alcan Děčín Extrusions, 2005. ISBN 8089041884.
- [2] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.
- [3] DORAZIL, E. *Nauka o materiálu – II. část*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1973, 266 s. b.r.
- [4] POLMEAR, I. *Light alloys: from traditional alloys to nanocrystals*. 4th ed. Burlington, MA: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2006. ISBN 07-506-6371-5.
- [5] HRČKOVÁ, Martina. *Optimalizace tepelného zpracování slitiny hliníku AlSi7Mg0,6*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. MARTIN JULIŠ, Ph.D.
- [6] RYŠ, Přemysl; KLESNIL, Mirko; USTOHAL, V. *Nauka o materiálu*. Brno: VAAZ, 1965. 725 s. b.r.
- [7] JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. *Perspektivní materiály*. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3.
- [8] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
- [9] Hliník (13Al). *Chemie* [online]. b.r. [cit. 2018-02-03]. Dostupné z: http://chemie.gfxs.cz/index.php?pg=prvek&prvek_id=13
- [10] BRYCHTA, Josef, Jana NOVÁKOVÁ a Lenka PETŘKOVSKÁ. *Technologie II*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007-2008. ISBN 978-80-248-1641-8.
- [11] KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Brno: CERM, 2001. ISBN 80-214-1996-2.
- [12] *Nástroje pro obrábění hliníkových slitin s mikroleštěným povrchem*. *MM Spektrum* [online]. 2002 [cit. 2017-12-04]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-pro-obrabeni-hlinikovych-slitin-s-mikrolestenym-povrchem.html>

- [13] HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění - 1.část* [online]. 2003 [cit. 2018-04-16].
- [14] KUŠNÝ, Vladimír. *Optimalizace výroby modelů*. Zlín, 2010. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Doc. Ing. Imrich Lukovics, Csc.
- [15] KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie výroby II: Řešené příklady* [online]. Brno, 2002 [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TechnVyroby_II.pdf
- [16] 10. *Frézování* [online]. In: . s. 7 [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: https://www.spszengrova.cz/texty/texty/STT/STT2-10_Frezovani_RAJ.pdf
- [17] *SANDVIK Coromant: Sousledné frézování* [online]. b.r. [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/getting_started/general_guidelines/cutter_position/pages/down-milling.aspx
- [18] Základní vzorce pro frézování. In: *TaeguTec* [online]. b.r. [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: http://www.taegutec.cz/innotool/prirucka_obrabeni_2114.pdf
- [19] Frézování. In: *Střední průmyslová škola* [online]. b.r. [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: http://www.sps-ko.cz/documents/STT_obeslova/Fr%C3%A9zov%C3%A1n%C3%AD.pdf
- [20] Neželezné kovy a jejich slitiny I. *SlidePlayer* [online]. b.r. [cit. 2017-12-03]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/2894537/>
- [21] Drsnost povrchu. *Spszengrova* [online]. b.r. [cit. 2018-02-04]. Dostupné z: https://www.spszengrova.cz/texty/texty/TEK/Drsnost_povrchu.pdf
- [22] Předepisování jakosti povrchu. *SlidePlayer* [online]. b.r. [cit. 2018-07-13]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/3134827/>
- [23] Drsnost povrchu. *E-konstruktor: Portál pro strojní konstruktéry* [online]. [cit. 2018-07-13]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/drsnost-povrchu>

- [24] DORMER: *Katalog* [online]. 2015 [cit. 2018-07-13]. Dostupné z: <https://www.dormerpramet.com/cs-cz/newssite/Pages/new-dormer-catalogue-2015.aspx?country=cz>
- [25] FN: ZPS - FRÉZOVACÍ NÁSTROJE [online]. 2016 [cit. 2018-07-13]. Dostupné z: <https://www.zps-fn.cz/katalog-ke-stazeni/>
- [26] ToolsUnited: 80B06RS45SE12F [online]. [cit. 2018-07-13]. Dostupné z: <https://www.toolsunited.com/App/Article/ArticleDetailsPage/24696400130631759>
- [27] CNC Machine. *Made-in-China.com* [online]. [cit. 2018-07-13]. Dostupné z: <https://czjyjc.en.made-in-china.com/product/oMOJUtervmIf/China-CNC-Machine-Vertical-Machine-Center-VMC500-VMC530-VMC650-.html>
- [28] POWERMILL. *AUTODESK* [online]. [cit. 2018-07-13]. Dostupné z: <https://knowledge.autodesk.com/support/powermill?sort=score>
- [29] ZEMČÍK, Oskar. *Technologická příprava výroby*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. [cit. 2018-07-13] ISBN 80-214-2219-X.
- [30] RYBKA, L. *Ekonomická analýza výrobního procesu*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 58 s. [cit. 2018-07-13] Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jaroslav Prokop, CSc.
- [31] MÁDL, Jan a Ivo KVASNIČKA. *Optimalizace obráběcího procesu*. Praha: České vysoké učení technické, 1998. [cit. 2018-07-13] ISBN 80-010-1864-6.
- [32] MARTINEC, Vladislav. *Návrh a výroba šachových figurek*. Diplomová práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojního inženýrství, 2018. [cit. 2018-07-30] Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Novák, Ph.D.

Seznam použitých symbolů a zkratek

R_m	Mez pevnosti	[MPa]
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu	[MPa]
A	Tažnost	[%]
Z	Kontrakce	[%]
K_v	Index obrobitelnosti	[-]
v_{15ck}	Řezná rychlost při trvanlivost 15 pro zkoušený materiál	[m/min]
v_{15et}	Řezná rychlost při trvanlivost 15 pro etalonový materiál	[m/min]
T_n	Trvanlivost	[min]
q	Kvocient	[-]
CAD	Computer aided design	[-]
CAM	Computer aided manufacturing	[-]
GP zóna	Guiner-Preston zóna	[-]
v_c	Řezná rychlost	[m/min]
φ	Úhel posuvového pohybu	[°]
v_f	Rychlost posuvového pohybu	[m/min]
η	Úhel řezného pohybu	[°]
P_{fe}	Pracovní boční rovina	[-]
λ_s	Úhel natočení ostří nástroje vzhledem ke směru řezného pohybu	[°]
ϕ_M	Úhel OM	[°]
ϕ_N	Úhel ON	[°]
δ_o	Nástrojový ortogonální úhel řezu	[°]
P_{sh}	Rovina stříhu	[-]
ϕ	Úhel roviny stříhu	[°]
h_D	Jmenovitá tloušťka řezu	[mm]
h_{Dc}	Tloušťka třísky	[mm]

Δp	Tloušťka elementu třísky	[mm]
Δs	Posunutí elementu třísky	[mm]
φ_t	Třecí úhel mezi odcházející třískou a čelem nástroje	[°]
π	Matematická konstanta	[-]
D	Průměr frézy	[mm]
n	Otáčky frézy	[min ⁻¹]
f_z	Posuv na zub	[mm/z]
z	Počet zubů frézy	[-]
a_e	Radiální hloubka řezu	[mm]
a_p	Axiální hloubka řezu	[mm]
Q	Objem odebíraného materiálu	[mm ³ /min]
P	Výkon	[W]
P_c	Příkon	[W]
η_u	Účinnost stroje	[-]
L	Celková délka obrábění	[mm]
i	Počet záběrů	[-]
x	Průměr frézy bez délky náběhu	[mm]
l_n	Délka náběhu	[mm]
l_p	Délka přeběhu	[mm]
N_c	Celkové náklady na šachovnici	[Kč]
N	Výrobní náklady na operační úsek	[Kč]
N_s	Náklady na strojní práci na operační úsek	[Kč]
N_n	Náklady na nástroje na operační úsek	[Kč]
N_{vn}	Náklady na výměnu nástroje/VBD na operační úsek	[Kč]
t_{As}	Strojní čas	[min]
$t_{připrava}$	Čas na přípravu	[min]
k_c	Přirážka směnového času	[-]

M_o	Mzda operátora	[Kč/hod]
HRP	Hodinový režijní paušál	[Kč/hod]
N_{hs}	Hodinové náklady na provoz stroje	[Kč/hod]
N_{sm}	Náklady na strojní práci	[Kč/min]
N_{si}	Náklady na strojní práci jednotlivých op. úseků	[Kč]
$N_{s,sachovnice}$	Náklady na strojní práci na šachovnici	[Kč]
z_v	Počet výměn nástroje na operační úsek	[-]
N_{nT}	Náklady na provoz nástroje na jednu trvanlivost bříty	[Kč]
C_n	Cena nástroje	[Kč]
C_{zn}	Cena zbytku nástroje	[Kč]
z_o	Počet možných přeostržení nástroje	[-]
t_{os}	Čas ostření nástroje	[min]
$N_{n,nastroj}$	Náklady na nástroj na polovinu šachovnice	[Kč]
$N_{n,sachovnice}$	Náklady na nástroje na šachovnici	[Kč]
t_{vn}	Čas na výměnu nástroje	[min]
O_s	Odpisy stroje	[Kč/hod]
N_{vnm}	Náklady na výměnu nástroje	[Kč/min]
$N_{vn,nastroje}$	Náklady na výměnu nástroje na polovinu šachovnice	[Kč]
$N_{vn,sachovnice}$	Náklady na výměnu nástrojů na šachovnice	[Kč]
N_{mat}	Náklady na materiál vztažené na polotovar	[Kč]
N_m	Norma spotřeby materiálu	[kg]
$N_{ostatní}$	Náklady na čištění, broušení, leštění apod.	[Kč]
C_{mat}	Cena materiálu za kilogram	[Kč]
z_m	Celkové jednotkové ztráty materiálu při výrobě	[kg]
$C_{vžš}$	Cena výkupu šrotu za kilogram	[Kč]

Seznam obrázků

Obr. 1: Šachovnice	9
Obr. 2: Rozdělení hliníkových slitin: 1 – slévárenské slitiny, 2 – tvářené slitiny, 3 – vytvrditelné slitiny, 4 – nevytvrditelné slitiny [20].....	11
Obr. 3: Příklad značení hliníkových slitin dle ČSN [1].....	15
Obr. 4: Schéma pohybů u soustružení a frézování; 1) směr hlavního pohybu, 2) směr posuvového pohybu, 3) směr řezného pohybu, 4) bod ostří [13]	20
Obr. 5: Realizace procesu řezání; a) ortogonální řezání, b) obecné řezání [14]	21
Obr. 6: Schéma tvorby deformací u ortogonálního řezání [15].....	21
Obr. 7: Model tvorby elementární třísky při ortogonálním řezání [15]	22
Obr. 8: a) válcové sousledné frézování, b) válcové nesousledné frézování, c) druhy čelního frézování [13].....	23
Obr. 9: Rozdělení frézovacích nástrojů dle různých hledisek	24
Obr. 10: Schéma pro výpočet celkové dráhy L, a) válcové a kotoučové frézování, b) čelní frézování [19].....	26
Obr. 11: Rozdělení drsnosti dle orientace [21].....	27
Obr. 12: Příklad charakteristiky drsnosti povrchu [22].....	28
Obr. 13: Dosažitelná drsnost pro různé způsoby obrábění [22]	28
Obr. 14: Schéma výroby šachovnice.....	29
Obr. 15: Čelní válcová fréza S6106.0 [24].....	30
Obr. 16: Čelní kulová fréza S6296.0 [24]	31
Obr. 17: Čelní kulová fréza S511612.040 [25].....	32
Obr. 18: Čelní válcová fréza C160402.020 [25].....	32
Obr. 19: Čelní válcová fréza 120517.180 AlTiN [25].....	33
Obr. 20: Vrták A0025.3 [24]	34
Obr. 21: Záhlubník G13619.0 [24].....	35
Obr. 22: VMC 500 [27]	35
Obr. 23: Testování povrchu D6_01: a) vytvořený program pro obrábění zkosení; b) výsledný povrch.....	37
Obr. 24: Testování povrchu D6_02: a) vytvořený program pro obrábění zkosení; b) výsledný povrch.....	38
Obr. 25: Testování povrchu D4_01: a) vytvořený program pro obrábění zkosení; b) výsledný povrch.....	39
Obr. 26: Drsnoměr MahrSurf PS 10.....	40
Obr. 27: Výsledné drsnosti obrobených ploch: 1_1 a 5_5 frézou S6296.0.....	41
Obr. 28: Výsledné drsnosti obrobených ploch: 1_1 a 5_5 frézou S511612.040	42
Obr. 29: Rozměry prvotního návrhu šachovnice	44
Obr. 30: Druhy gravírování šachovnice	45
Obr. 31: Problémy při tvorbě drážkování: a) rozšíření drážky, b) stopa od nájezdu pod úhlem.....	46
Obr. 32: Zadané figurky.....	47
Obr. 33: Upravené figurky pro zapuštění.....	48
Obr. 34: Příklad strategie 3D konturování [28].....	49
Obr. 35: Testování strategie 3D konturování.....	49
Obr. 36: Příklad strategie řádkování [28]	50
Obr. 37: Testování strategie řádkování	50
Obr. 38: Příklad strategie hladina Z [28]	51
Obr. 39: Testování strategie hladina Z.....	51
Obr. 40: Příklad strategie optimalizovaná hladina Z [28].....	52
Obr. 41: Testování strategie optimalizovaná hladina Z.....	52
Obr. 42: Pěšec - hrubování	54
Obr. 43: Vizualizace pěšce - hrubování.....	55
Obr. 44: Pěšec - dohrubování.....	55

Obr. 45: Vizualizace pěšce - dohrubování.....	56
Obr. 46: Pěšec - dokončení optimalizovanou hladinou Z.....	56
Obr. 47: Vizualizace pěšce - dokončení optimalizovanou hladinou Z.....	57
Obr. 48: Pěšec - dokončení po křivce 1.....	58
Obr. 49: Pěšec_V1.....	58
Obr. 50: Pěšec – dokončení po křivce 2.....	59
Obr. 51: Pěšec_V2.....	59
Obr. 52: Věž - hrubování.....	60
Obr. 53: Vizualizace věže - hrubování.....	61
Obr. 54: Věž - dohrubování.....	61
Obr. 55: Vizualizace věže - dohrubování.....	62
Obr. 56: Věž - dokončení optimalizovanou hladinou Z.....	63
Obr. 57: Vizualizace věže - dokončení optimalizovanou hladinou Z.....	63
Obr. 58: Věž - dokončení po křivce 1.....	64
Obr. 59: Věž_V1.....	64
Obr. 60: Věž – dokončení po křivce 2.....	65
Obr. 61: Věž – dokončení po křivce 3.....	65
Obr. 62: Věž_V2.....	66
Obr. 63: Střelec - hrubování.....	66
Obr. 64: Vizualizace střelce - hrubování.....	67
Obr. 65: Střelec - dohrubování.....	68
Obr. 66: Vizualizace střelce - dohrubování.....	69
Obr. 67: Střelec – dokončení optimalizovanou hladinou Z.....	69
Obr. 68: Střelec_V1.....	70
Obr. 69: Střelec - dokončení po křivce 1.....	71
Obr. 70: Střelec – dokončení po křivce 2.....	71
Obr. 71: Střelec - dokončení po křivce 3.....	71
Obr. 72: Střelec_V2.....	72
Obr. 73: Kůň - hrubování.....	73
Obr. 74: Vizualizace koně - hrubování.....	73
Obr. 75: Kůň – dokončení po křivce 1.....	74
Obr. 76: Vizualizace koně – dokončení po křivce 1.....	75
Obr. 77: Kůň – dohrubování.....	75
Obr. 78: Vizualizace koně – dohrubování.....	76
Obr. 79: Kůň – dokončení optimalizovanou hladinou Z.....	76
Obr. 80: Vizualizace koně – dokončení optimalizovanou hladinou Z.....	77
Obr. 81: Kůň - dokončení po křivce 2.....	78
Obr. 82: Kůň – dokončení po křivce 3.....	78
Obr. 83: Kůň.....	78
Obr. 84: Královna - hrubování.....	79
Obr. 85: Vizualizace královny – hrubování.....	80
Obr. 86: Královna - dohrubování.....	81
Obr. 87: Vizualizace královny – dohrubování.....	81
Obr. 88: Královna – dokončování optimalizovanou hladinou Z.....	82
Obr. 89: Královna_V1.....	83
Obr. 90: Královna - dokončení po křivce 1.....	83
Obr. 91: Královna - dokončení po křivce 2.....	84
Obr. 92: Královna – dokončení po křivce 3.....	84
Obr. 93: Královna_V2.....	84

<i>Obr. 94: Král - hrubování</i>	85
<i>Obr. 95: Vizualizace krále – hrubování</i>	86
<i>Obr. 96: Král - dohrubování</i>	86
<i>Obr. 97: Vizualizace krále – dohrubování</i>	87
<i>Obr. 98: Král – dokončení optimalizovanou hladinou Z</i>	87
<i>Obr. 99: Vizualizace krále – dokončení optimalizovanou hladinou Z</i>	88
<i>Obr. 100: Král – dokončení po křivce 1</i>	89
<i>Obr. 101: Král – dokončení po křivce 2</i>	89
<i>Obr. 102: Král – dokončení po křivce 3</i>	89
<i>Obr. 103: Král</i>	90
<i>Obr. 104: Konečný návrh šachovnice</i>	91
<i>Obr. 105: Konečný model uzavřené šachovnice</i>	92
<i>Obr. 106: Zarovnávání okrajů šachovnice</i>	93
<i>Obr. 107: Hrubování šachovnice</i>	94
<i>Obr. 108: Vrtání děr</i>	95
<i>Obr. 109: Hrubování zapuštění figurek</i>	96
<i>Obr. 110: Dohrubování zapuštění figurek</i>	97
<i>Obr. 111: Dokončení límce D4</i>	98
<i>Obr. 112: Spodní strana šachovnice</i>	99
<i>Obr. 113: Dokončení drážek – hrací pole</i>	100
<i>Obr. 114: Dokončení – a) podélných drážek, b) příčných drážek</i>	101
<i>Obr. 115: Dokončení - sražení hran</i>	102
<i>Obr. 116: Horní strana šachovnice</i>	103
<i>Obr. 117: Návrh uchycení šachovnice</i>	103

Seznam tabulky

Tab. 1: Přehled tvářených slitin hliníku [1]	12
Tab. 2: Přehled slévárenských slitin hliníku [4]	13
Tab. 3: Vybrané fyzikální vlastnosti hliníku [1; 2].....	14
Tab. 4: Přehled použitých nástrojů.....	30
Tab. 5: Doporučené řezné parametry nástroje S6106.0	31
Tab. 6: Doporučené řezné parametry nástroje S6296.0	31
Tab. 7: Doporučené řezné parametry nástroje S511612.040	32
Tab. 8: Doporučené řezné parametry nástroje C160402.020	33
Tab. 9: Doporučené řezné parametry nástroje 120517.180 AlTiN	34
Tab. 10: Doporučené řezné parametry nástroje A0025.3.....	34
Tab. 11: Doporučené řezné parametry nástroje G13619.0	35
Tab. 12: Podrobné informace stroje VMC 500.....	35
Tab. 13: Přehled řezných podmínek pro testování kvality povrchu frézou S6296.0	36
Tab. 14: Přehled řezných podmínek pro druhé testování kvality povrchu frézou S6296.0	38
Tab. 15: Přehled řezných podmínek pro testování kvality povrchu frézou S511612.040.....	39
Tab. 16: Naměřené hodnoty drsností obrobených ploch pomocí S6296.0	41
Tab. 17: Naměřené hodnoty drsností obrobených ploch pomocí S511602.040.....	43
Tab. 18: Zhodnocení dokončovacích strategií.....	53
Tab. 19: Řezné podmínky – hrubování pěšce.....	54
Tab. 20: Řezné podmínky – dohrubování pěšce.....	56
Tab. 21: Řezné podmínky – dokončení pěšce.....	57
Tab. 22: Řezné podmínky – hrubování věže.....	61
Tab. 23: Řezné podmínky – dohrubování věže.....	62
Tab. 24: Řezné podmínky – dokončení věže	63
Tab. 25: Řezné podmínky – hrubování střelce	67
Tab. 26: Řezné podmínky – dohrubování střelce	68
Tab. 27: Řezné podmínky – dokončení střelce	70
Tab. 28: Řezné podmínky – hrubování koně.....	73
Tab. 29: Řezné podmínky – dokončení koně po křivce 1.....	74
Tab. 30: Řezné podmínky – dohrubování koně	76
Tab. 31: Řezné podmínky – dokončení koně.....	77
Tab. 32: Řezné podmínky – hrubování královny	80
Tab. 33: Řezné podmínky – dohrubování královny	81
Tab. 34: Řezné podmínky – dokončení královny	82
Tab. 35: Řezné podmínky – hrubování krále.....	85
Tab. 36: Řezné podmínky – Dohrubování krále.....	87
Tab. 37: Řezné podmínky – dokončení krále.....	88
Tab. 38: Řezné podmínky – hrubování šachovnice.....	94
Tab. 39: Řezné podmínky - vrtání děr.....	96
Tab. 40: Časy obrábění jedné poloviny spodní strany šachovnice.....	99
Tab. 41: Řezné podmínky – dokončení drážek hracích polí.....	101
Tab. 42: Řezné podmínky – sražení hran	102
Tab. 43: Časy obrábění jedné poloviny horní strany šachovnice.....	102