

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Diplomová práce

Technologie obrábění CoCr slitin

Autor: Bc. Jan Kafka

Studijní obor: Výrobní a materiálové inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Pitrmuc

Praha 2017

Prohlášení

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

V Praze dne 15.7.2017

.....

podpis

Anotace

Předkládaná diplomová práce pojednává o problematice obrábění CoCr slitin. V teoretické části je řešeno rozdělení nejpoužívanějších CoCr slitin v biomedicínských aplikacích, následně práce shrnuje poznatky z testování obrobitelnosti těchto slitin. Jako další je provedena rešerše nástrojových materiálů a dokončovacích metod obrábění. V praktické části je analyzován současný postup výroby dílu ze sestavy kolenního implantátu s návrhem nové technologie pro dosažení minimální drsnosti povrchu.

Klíčová slova

CoCr slitiny, obrobitelnost CoCr slitin, nástrojové materiály, dokončovací metody obrábění, optimalizace výrobního postupu, lapování CoCrMo

Annotation

This diploma thesis deals with machining of CoCr alloys. The theoretical part introduces the division of the most used CoCr alloys in biomedical applications and then summarizes the findings from the machining of these alloys. Next the search of tool materials and finishing machining methods is presented. The practical part analyzes the current process of manufacturing the part of a knee implant assembly with the design of a new technology to achieve the minimum surface roughness.

Key words

CoCr alloys, machinability of CoCr alloys, tool materials, finish machining processes, optimization of a production process, CoCrMo lapping

Obsah

1	Úvod.....	8
2	Kobaltové slitiny – rozdělení, vlastnosti, aplikace.....	9
2.1	Úvod.....	9
2.2	Co-Cr-Mo slitiny.....	10
2.3	Co-Cr-W-Ni slitiny	12
2.4	Co-Ni-Cr-Mo slitiny	13
3	Technologické vlastnosti a obrobiteľnosť.....	15
3.1	Obrobiteľnosť kobaltových slitin.....	15
3.2	Kryogenní vysokorychlostní obrábění CoCr slitin	15
3.3	Zkoumání brusných charakteristik a efektů modifikujících povrch slitiny CoCr	17
3.4	Zkoumání opotřebení nástroje v kryogenním prostředí.....	19
4	Nástrojové materiály a geometrie	21
4.1	Nástrojové materiály.....	21
4.1.1	Rychlořezné oceli	21
4.1.2	Slinuté karbidy nepovlakované	22
4.1.3	Slinuté karbidy povlakované	23
4.1.4	Cermety	24
4.1.5	Řezná keramika	24
4.1.6	Supertvrde řezné materiály.....	25
4.2	Geometrie nástroje.....	26
5	Dokončovací metody obrábění.....	28
5.1	Jemné soustružení a frézování	28
5.2	Honování.....	29
5.3	Superfinašování	30
5.4	Lapování	30
5.5	Leštění.....	31
5.6	Omílání	32
5.7	Válečkování	32
5.8	Elektrochemické metody	33
6	Návrh technologie pro dosažení minimální drsnosti povrchu.....	34
6.1	Analýza současného výrobního postupu.....	35

6.1.1	Výrobní časy.....	35
6.1.2	Analýza operací	36
6.2	Návrh výrobního postupu	46
6.3	Návrh přípravku.....	54
6.4	Návrh technologie pro dosažení minimální drsnosti povrchu	57
6.4.1	Návrh lapovacích hlav	58
6.4.2	Výroba lapovacích hlav	60
7	Technologické zkoušky.....	64
7.1	Zkoušky pro dosažení minimální drsnosti povrchu	65
7.1.1	Pokus 1	65
7.1.2	Pokus 2	66
7.1.3	Pokus 3	67
7.1.4	Pokus 4	69
7.2	Zkoušky pro dosažení předepsané drsnosti povrchu	70
7.2.1	Pokus 5	70
7.2.2	Pokus 6	70
7.2.3	Pokus 7	71
7.2.4	Pokus 8	72
7.2.5	Pokus 9	73
8	Závěr.....	75
	Použitá literatura.....	77
	Seznam obrázků.....	79
	Seznam tabulek.....	80
	Seznam příloh.....	81

Použité symboly a jednotky

Označení	Legenda	Jednotka
a_e	Šířka řezu	[mm]
a_p	Hloubka řezu	[mm]
E	Modul pružnosti v tahu	[GPa]
f_{min}	Posuv minutový	[mm]
f_{ot}	Posuv na otáčku	[mm]
f_z	Posuv na zub	[mm]
HB	Tvrдость Brinell	[-]
HRC	Tvrдость Rockwell	[-]
HV	Tvrдость Vickers	[-]
IT	Stupeň přesnosti výroby	[-]
Ot	Otáčky	[min ⁻¹]
pH	Vodíkový exponent	[-]
Ra	Střední aritmetická úchylka profilu	[μm]
Re	Mez pružnosti	[MPa]
Rm	Mez pevnosti	[MPa]
Rz	výška nerovnosti profilu určená z 10 bodů	[μm]
T_a	Čas jednotkový	[min]
T_b	Čas dávkový	[min]
VB_{max}	Velikost opotřebení hřbetu	[mm]
v_c	Řezná rychlost	[m.min ⁻¹]

1 Úvod

Předkládaná práce se zaměřuje na problematiku obrábění CoCr slitin používaných v biomedicínských aplikacích. Podnětem ke vzniku této práce byl zájem průmyslového partnera o analýzu výrobního postupu u dílu ze sestavy kolenního implantátu. CoCr slitiny se řadí mezi těžkoobrobitelné slitiny, a proto optimalizace výrobního postupu může značně ovlivnit ekonomickou náročnost výroby.

V České republice se nikdo této problematice publikačně nevěnuje, a proto práce čerpá ze zahraničních zdrojů. Lze předpokládat, že firmy (zřejmě) v této oblasti drží své know-how v tajnosti. Výrobci nástrojů uvádějí řezné podmínky pro CoCr slitiny pouze jako teoretické návody, jak daný materiál obrábět.

V teoretické části jsou nastíněny základní CoCr slitiny používané jako biokompaktní materiály, které určuje norma ISO 5832. V další kapitole práce, je pozornost věnována technologickým vlastnostem a obrobitelnosti, kde se zaměřuji na prováděné experimenty při obrábění CoCr slitin. Následuje rešerše nástrojových materiálů a geometrie nástroje. V poslední části se zaměřuji na dokončovací metody obrábění, z nichž bude vybrána metoda pro zkoušky v praktické části.

V praktické části bude analyzován dosavadní výrobní postup pro součást kolenního implantátu a navržen postup nový. Pro zjednodušení výroby bude nejspíše nutné navrhnout přípravek. Pro dokončování stykové plochy, která je v kontaktu se součástí sestavy, bude navržena dokončovací metoda. Dále budou vyrobeny potřebné nástroje a provedeny technologické zkoušky.

2 Kobaltové slitiny – rozdělení, vlastnosti, aplikace

2.1 Úvod

S atomovým číslem 27 kobalt leží v periodické tabulce prvků mezi železem a niklem. Jeho hustota je $8,9 \text{ g.cm}^{-3}$. Kobalt je feromagnetický do teploty $1000 \text{ }^\circ\text{C}$. Při teplotách do $417 \text{ }^\circ\text{C}$ kobalt vykazuje hexagonální mřížku, pak až do tavení při $1493 \text{ }^\circ\text{C}$ má kobalt kubickou plošně středěnou mřížku. Modul pružnosti kobaltu v tahu je 210 GPa , v tlaku pak 183 GPa [1].

Kobalt se používá jako přísada u barviv, niklových superslitin a vysokolegovaných ocelí, rezných karbidů i magnetických materiálů. Při legování slitin kobaltem se využívá jeho schopnosti zpevnit tuhý roztok a potlačit rozpustnost Al a Ti, následkem čehož se zvětší objemový podíl precipitující γ fáze [1].

Kobaltové slitiny vykazují vysokou korozní odolnost, otěruvzdornost a teplotní odolnost. Kobalt sám o sobě není karbidotvorným prvkem. V kombinaci s chromem se zvyšuje odolnost proti korozi. Jako další karbidotvorné prvky lze uvést W a Mo, které slitiny zpevňují [1].

Jelikož cena kobaltu je značně vysoká, tak se jeho slitiny využívají pouze tam, kde nelze použít slitin niklu. Je to tedy v prostředích, kde působí koroze a eroze. Hmotnostní úbytek kobaltových slitin je 3 - 14x menší ve srovnání s niklovými slitinami. Kobaltové slitiny vykazují zároveň vysokou pevnost a tvrdost [1].

Slitiny kobaltu se používají na ventily a jejich sedla, vysoce namáhané části armatur a manometrů. Dále nalézají uplatnění také jako tvrdonávary při svařování. Jejich vlastnosti z nich dělají ideální materiál pro biomateriály [1]. Materiály pro implantáty jsou normalizované, jejich rozdělením se zabývá norma ISO 5832, které se budu v této kapitole věnovat.

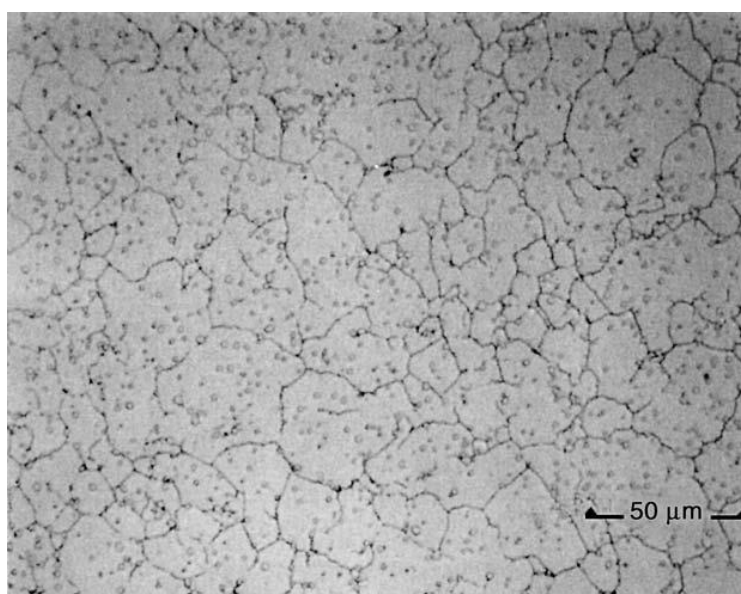
2.2 Co-Cr-Mo slitiny

Slitině na bázi kobaltu, chromu, molybdenu a dalších prvků se věnuje norma ISO 5832 IV. Jedná se o slitiny určené k odlévání. Typickými zástupci jsou slitiny ASTM F75 a ASTM F799 [2]. Obecné chemické složení udává norma, viz tab. 1.

Tabulka 1, Chemické složení Co-Cr-Mo [3]

Prvek	Chemické složení [%]
Chrom	26,5 - 30,0
Molybden	4,5 - 7,0
Nikl	1,0 max.
Železo	1,0 max.
Uhlík	0,35 max.
Hořčík	1,0 max.
Křemík	1,0 max.
Kobalt	zbytek

Hlavním rysem slitiny ASTM F75 je její odolnost proti korozi v chloridovém prostředí. Tato slitina má dlouhou historii použití ve vesmírném programu a biomedicínských implantacích [2].



Obrázek 1, Mikrostruktura ASTM F75 spěkaná [2]

Slitina se taví při 1350 - 1450 °C. Lije se metodou na vytavitelný model do keramických forem [2]. Model se připravuje z vosku s malými přísadkami na obrábění. Poté se model spojí s vtokovou soustavou. Následný stromeček se opakovaně namáčí do tzv. keramické břechky, která při vysušení ztuhne. Poté se forma vypálí, čímž vyteče vosk a vzniká dutina pro roztavený kov. Po ztuhnutí dochází k destrukci formy a vyjmutí odlitků.

Eutektická teplota je přibližně 1235 °C. Při tepelném zpracování je nutné zabránit překročení této teploty, jelikož by došlo k natavení mezidendritických vycezenin a ke znehodnocení slitiny [6].

V závislosti na detailech odlévání můžeme dostat minimálně tři mikrostruktury, které mohou silně ovlivňovat vlastnosti implantátů, často negativně. Aby se předešlo problémům s litou strukturou, používá se metoda slinování. Jemný prášek slitiny F75 se zahřívá (1100 °C) a společně s tlakem (100 MPa) se tváří do požadovaného tvaru, mikrostrukturu můžeme vidět na Obr. 1 [2].

Slitina ASTM F799 je v podstatě modifikovaná slitina F75, která byla mechanicky zpracována za tepla kování (800 °C) po odlití. Chemicky se liší minimálně. U slitiny F799 můžeme pozorovat po následném zařazení tváření dvojnásobné zvětšení meze kluzu a meze pevnosti, než u struktury lité F75 [2].

Tabulka 2, Porovnání mech. vlastností Co-Cr-Mo [2]

Materiál	E [GPa]	Re [MPa]	Rm [MPa]
ASTM F75 - litá	210	448 - 517	655 - 889
ASTM F75 - spékaná	253	841	1277
ASTM F799	210	896 - 1200	1399 - 1586

CoCrMo slitiny se používají tam, kde se vyžaduje vysoká mechanická odolnost. Například kolenní implantáty a široce rozšířené lité kyčelní dřívky. Široké uplatnění má též v dentální protetice.

2.3 Co-Cr-W-Ni slitiny

Dalším zástupcem kobaltových slitin je tvářená slitina ASTM F90, také známá jako Haynes Stellite 25 (HS-25). Slitina F90 je založena na Co-Cr-W-Ni. Wolfram a nikl jsou přidány pro zlepšení obrobitelnosti a výroby. V žíhaném stavu jsou mechanické vlastnosti velmi podobné jako u slitiny F75, viz tab. 2 a 3, ale při tváření za studena a přetvoření 44 %, jsou mechanické vlastnosti téměř dvojnásobné [2]. Tvářená slitina Co-Cr-W-Ni má austenitickou strukturu, tvořenou protáhlými zrny. Po žíhání a rekrystalizaci vznikají polyedrická zrna austenitu s typickými deskami hexagonálního martenzitu [6].

Tabulka 3, Mech. vlastnosti ASTM F90 [2]

Materiál	E [GPa]	Re [MPa]	Rm [MPa]
ASTM F90 - žíhaná	210	448 - 648	951 – 1220
ASTM F90 – tvářená	210	1606	1896

Tváření za teplot nad 650 °C vede k tvorbě austenitické struktury s protaženými zrny, přičemž nedochází k rekrystalizaci. Tvářená struktura vykazuje jemnější velikost zrna a částic [6].

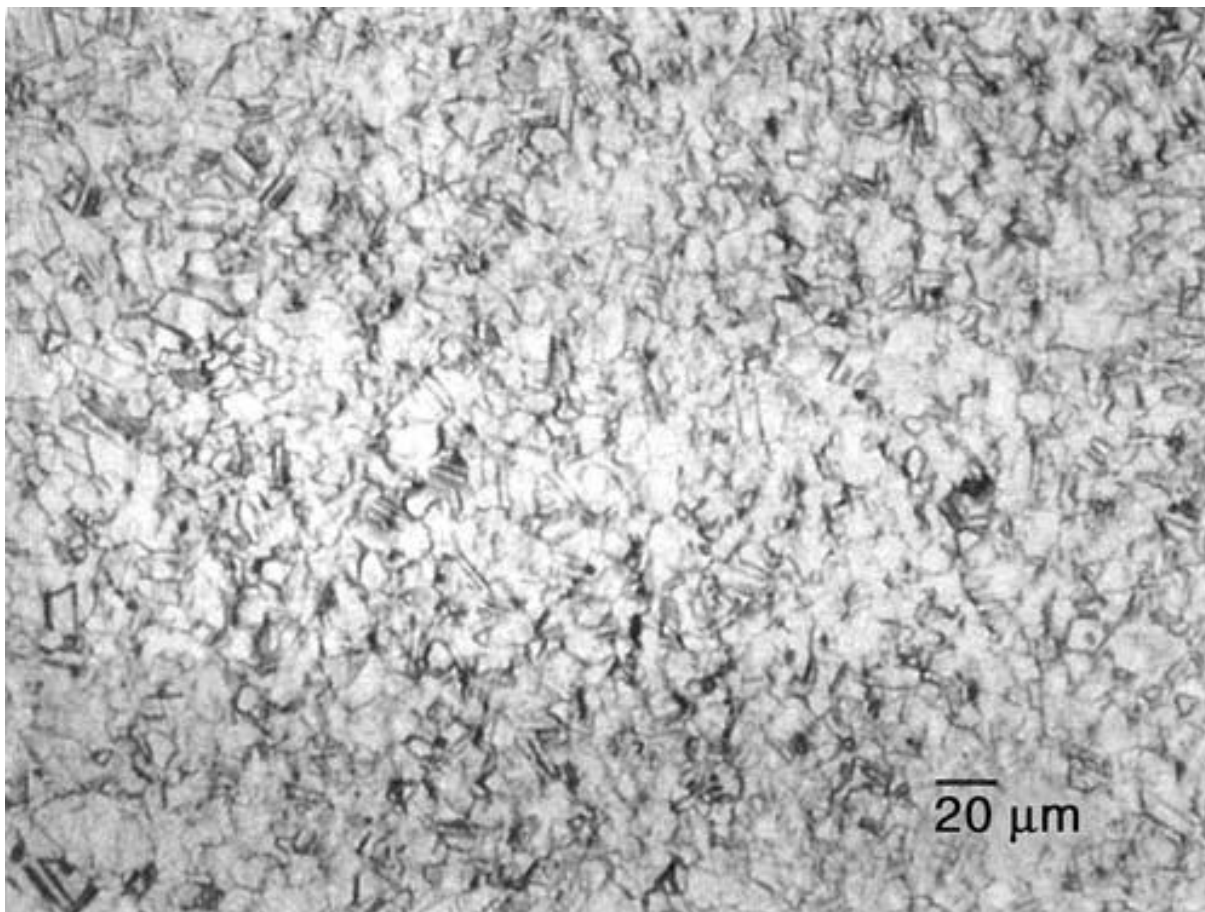
Tabulka 4, Chemické složení Co-Cr-W-Ni [4]

Prvek	Chemické složení [%]
Chrom	19,0 – 21,0
Wolfram	14,0 – 16,0
Nikl	9,0 – 11,0
Železo	3,0 max.
Uhlík	0,15 max.
Hořčík	2,0 max.
Křemík	1,0 max.
Síra	0,03
Fosfor	0,04
Kobalt	zbytek

CoCrWNi slitina se používá na stenty, což je zdravotnický prostředek trubicového tvaru umístěný v těle tak, aby udržel průchodnost trubicové struktury, která je zúžena, nebo uzavřena.

2.4 Co-Ni-Cr-Mo slitiny

Zástupcem této skupiny je slitina ASTM F562, která je primárně složena z kobaltu, niklu a významnou částí z chromu a molybdenu. Jedná se o vícefázovou slitinu, která může být tepelně zpracována a tvářena za studena, pro řízené vytvoření mikrostruktury (Obr. 2) a vysoké pevnosti [2].



Obrázek 2, Mikrostruktura ASTM F652

Struktura slitiny je tvořena austenitickými zrny. Po odlévání a ochlazení je ve slitině přítomen martenzit, který transformuje na austenit po ohřevu nad 650°C. Následuje ochlazení na pokojovou teplotu při zachování austenitické struktury [6].

Tabulka 5, Mech. vlastnosti ASTM F562 [2]

Materiál	E [GPa]	Re [MPa]	Rm [MPa]
ASTM F562 – kovaná za tepla	232	965 - 1000	1206
ASTM F562 – tvářená za studena, stárnutá	232	1500	1795

Slitina ASTM F562 se používá na kované kyčelní dřívky, lanka pro ortopedické využití a jako defibrilátorové elektrody.

Tabulka 6, Chemické složení Co-Ni-Cr-Mo [5]

Prvek	Chemické složení [%]
Nikl	33,0 – 37,0
Chrom	19,0-21,0
Molybden	9,0 – 10,5
Železo	1,0 max.
Titan	1,0 max.
Mangan	0,15 max.
Křemík	0,15 max.
Uhlík	0,025 max.
Fosfor	0,015 max.
Síra	0,010 max.
Kobalt	zbytek

Tyto tři popsané typy slitin jsou nejpoužívanější. Dále pak existují deriváty na základu Co-Ni-Cr-Mo slitin, které se liší v obsahu železa a wolframu. Jejich použití je však minimální.

3 Technologické vlastnosti a obrobiteľnosť

3.1 Obrobiteľnosť kobaltových slitin

Kobalt chromové slitiny majú vytvrdzovacie tendencie, ktorá spolu so špatnou tepelnou vodivosťou, vysokou pevnosťou a tvrdosťou má za následok špatnú obrobiteľnosť. Obrábění týchto slitin je často spojované s krátkou životnosťou nástroje a so špatnou kvalitou dokončeného povrchu. Z toho teda vyplýva nízka produktivita a vysoké výrobné náklady [7].

U katalogových rezných podmínek sa môžeme stretnúť s doporučenými reznými rýchlosťami $v_c = 30-90 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ pre karbidové nástroje. Minimálna hĺbka rezu a_p u soustružení by mala byť väčšia než 0,63 mm a posuv na otáčku f_{ot} väčšia než 0,12 mm. U frézování by hĺbka rezu a_p mala byť väčšia než 1 mm a posuv na zub $f_z = 0,03-0,1 \text{ mm}$.

Vývoj týchto rezných podmínek je výrobným tajomstvom firiem, ktoré sa zaoberajú obráběním CoCr slitin. Pre upresnění problematiky obrábění ťažko obrobiteľných slitin nižšie spracujú experimenty, ktoré boli prováděny a následně zveřejněny v literatuře.

3.2 Kryogenní vysokorychlostní obrábění CoCr slitin

Kryogenní chlazení kapalným dusíkom, jako alternativa chladicí kapaliny, je nový způsob pro zlepšení obrobiteľnosti ťažko obrobiteľných materiálů. Při tomto způsobu chlazení se řízené množství dusíku při teplotě $-197 \text{ }^\circ\text{C}$ přivádí do místa rezu, čímž se zlepšuje odvod tepla a snižuje se chemická reakce mezi rezným nástrojem a materiálom obrobku [7].

Jako materiál pro pokus sloužila kobalt chromová slitina CopraBond K o složení 61,0 % kobaltu, 27,9 % chromu, 8,56 % wolframu, 1,73 % Křemíku, 0,23 % hořčíku, 0,11 % železa a 0,07 % uhlíku. Jedná se o slitinu speciálně vyvinutou pro zubní protetiku. Průměrná tvrdost materiálu byla stanovena na 466 HV (46 HRC). Materiál byl o velikosti 70 mm x 70 mm x 25 mm [7].

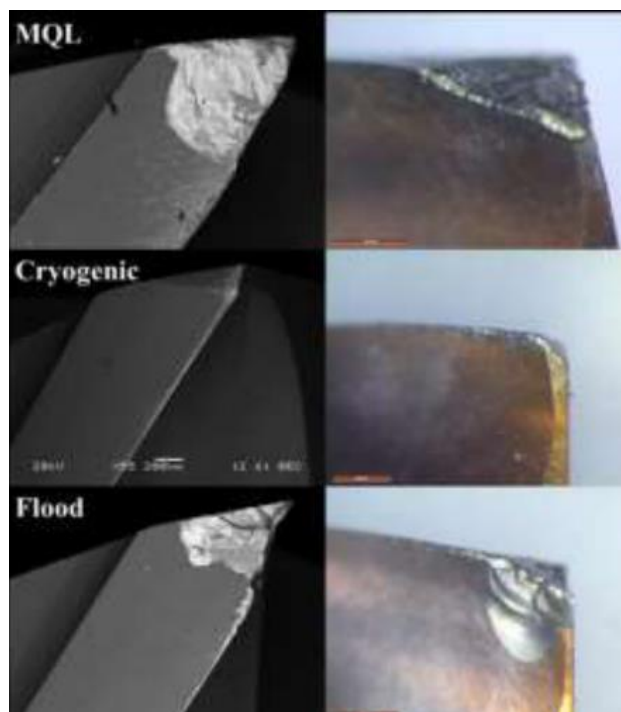
Metoda obrábění byla zvolena jako dokončovací frézování monolitní karbidovou frézou povlakovanou TiSiN se čtyřmi zuby. Úhel čela byl 12° a úhel šroubovice 37° . Rezná rychlost

v_c byla zvolena na $200 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, posuv na zub $f_z = 0,03 \text{ mm}$, hloubka řezu $a_p = 1 \text{ mm}$ a krok do strany $a_e = 4 \text{ mm}$. Celková délka obrábění byla 1470 mm pro jeden nástroj [7].

Pro vyhotovení závěrů se kryogenní chlazení porovnávalo s vodním chlazením a s chlazením s minimálním množstvím lubrikantu. U kryogenního chlazení se tekutý dusík natlakovaný na $1,5 \text{ baru}$ a průtoku $20 \text{ kg}\cdot\text{hod}^{-1}$ přivádí přímo do místa řezu. U chlazení s minimálním množstvím lubrikantu je tryskán řezný olej o průtoku $70 \text{ ml}\cdot\text{hod}^{-1}$ tlakem stlačeného vzduchu 5 barů dvěma tryskami [7].

Při srovnání řezných prostředí pomocí ukazatele drsnosti R_a se u kryogenního způsobu chlazení podařilo dosáhnout $0,23 \mu\text{m}$, což bylo o 35% a 42% méně než ve srovnání s chlazením s minimálním množstvím lubrikantu a vodním chlazením [7].

Opotřebení hřbetu nástroje bylo u kryogenního chlazení (Cryogenic) minimální. Za to u chlazení s minimálním množstvím lubrikantu (MQL) bylo 26krát větší a u vodního chlazení (Flood) 17krát větší než u kryogenního chlazení (Obr. 3) [7].



Obrázek 3, Opotřebení hřbetu (vlevo) a opotřebení čela (vpravo) [7]

3.3 Zkoumání brusných charakteristik a efektů modifikujících povrch slitiny CoCr

V současnosti je nejpoužívanější biomateriálem nerezová ocel, následovaná titanovými slitinami a CoCr slitinami. Nerezové oceli a titanové slitiny mají horší odolnost proti opotřebení, proto se využívají CoCr slitiny na pohyblivé díly jako jsou například kyčelní a kolenní klouby [8].

Povrch musí mít charakteristický zrcadlový odlesk pro zlepšení chemické stability. Kvůli těžké obrobitelnosti je známo jen několik případů, jak dosáhnout zrcadlového povrchu broušením. V dnešní době se hledají nové způsoby broušení, aby se nahradilo finální leštění, které bylo až dosud finální úpravou povrchu [8].

Výzkum, který byl proveden, se zabýval elektrochemickým (ELID) broušením slitiny ASTM F75. ELID broušení je metoda velmi přesného obrábění díky tuhému kovovému brusnému kotouči s diamantovými zrny a speciální pulsní metodě elektrolytu. Doposud provedené výzkumy ukazují, že ELID broušením lze dosáhnout vynikající kvality povrchu [8].

Tabulka 7, Podmínky experimentu [8]

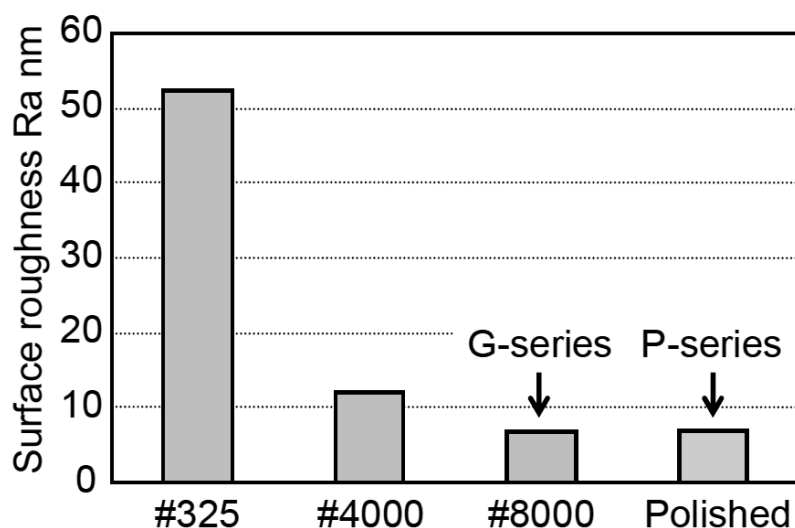
Obrobek	ASTM F75	
Stroj	Jednostranný leštící stroj	
Brusný kotouč	Hrubovací	#325 a #4000 diamantový kotouč s kovovou vazbou
	Dokončovací	#8000 diamantový kotouč s kovovo-pryskyřicovou hybridní vazbou
Brusná kapalina	Speciální upravený typ (pH 8,2, rozředěno 5 % vody)	
Brusné podmínky	Otáčky kotouče: 100 min^{-1} , Otáčky obrobku: 100 min^{-1}	
Elektrické podmínky	Napětí naprázdno: 90V, Pulsní časování (zap/vyp): 2/2 μs , Pulsní vlna: čtverec	

V této studii, jako v první, byl upraven elektrolytický roztok za účelem zachování biokompatibility. Byla odstraněna antiseptika a kapalina se naředila vodou, aby se pH snížilo

z 10 na 8,2, protože pH tělní tekutiny se pohybuje okolo 7,4. Tímto se zhoršily vlastnosti roztoku, ale vliv roztoku na biokompatibilitu neměl vliv [8].

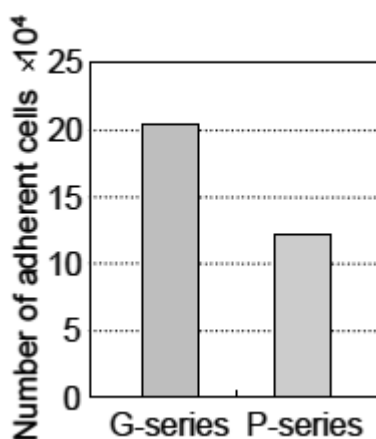
Pro porovnání broušeného vzorku byl srovnán s vyleštěným. Technologie leštění byla leštění smirkovým papírem o zrnitosti 4000 a poté leštění hlinitým brusivem. Tento vzorek byl označen písmenem P [8].

Z Obr. 4 vyplývá, že i přes úpravu elektrolytu jsme schopni broušením dosáhnout stejné drsnosti jako při použití leštění obvyklým způsobem. Naměřená hodnota drsnosti odpovídá R_a 7 nm. Zároveň byla porovnána nanotvrdost u obou technologií. Síla zatěžování byla 5 mN. Broušený vzorek vykázal značně vyšší tvrdost, a to 770 HV oproti 600 HV u leštěného, což bylo zjevně způsobeno difundací dusíku a kyslíku vznikajícího při broušicím procesu [8].



Obrázek 4, Drsnost hotového povrchu slitiny CoCr [8]

Elektrolyt měl pozitivní vliv i na biokompatibilitu. Broušený vzorek vykázal nižší cytotoxicitu, což je schopnost buněk nebo chemických látek ničit buňky. Zároveň byl proveden čtyřdenní test uchycení buněk. V něm broušený vzorek vykázal skoro dvojnásobný počet uchycených buněk, než vzorek leštěný (viz Obr. 6) [8].



Obrázek 5, Počet uchycených buněk [8]

3.4 Zkoumání opotřebení nástroje v kryogenním prostředí

Všeobecná obrobiteľnosť superslitin na soustruhu je těžko srovnatelná s konvenčními ocelmi, a tak se se často superslitiny popisují jako těžko obrobiteľné slitiny nebo těžko řezatelné. Některé prvky jako je kobalt, nikl, chrom a titan mají tak vysokou pevnost a odolnost proti korozi, že nepříznivě ovlivňují obrobiteľnost [9].

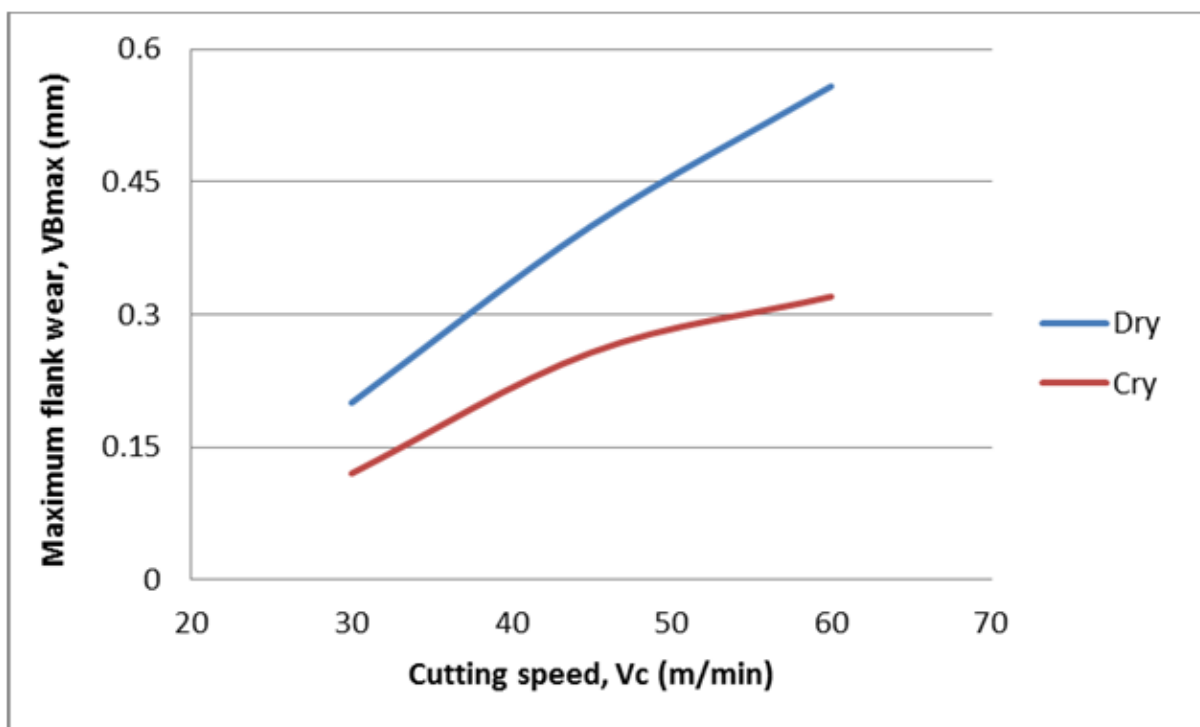
Jedním z hlavních problémů je generování tepla v oblasti řezu. Pro dosažení deformace tedy potřebujeme více energie a tím následně vytvořené tepelné pole ovlivňuje trvanlivost břítu i výsledný vzhled povrchu. Materiál Haynes Stellite 25 má nízkou tepelnou vodivost ($10 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$), což má za následek nedostatečný odvod tepla v třísece [9].

Zkoumaný materiál byl tedy Haynes Stellite 25, který zastupuje skupinu CoCrWNi slitin. Průměrná naměřená tvrdost byla 207 HB. Test byl prováděn na soustružnickém obráběcím centru s výkonem 15 kW [9].

Použitý nástroj Sandvik SNMG 12 04 08-QM měl následující geometrii: úhel čela 6° negativní, úhel nastavení 75° , úhel sklonu ostří -6° a rádius špičky 0,8 mm. Řezné podmínky byly definovány: řezná rychlost $v_c = 30 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $45 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, a $60 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, hloubka řezu $a_p = 1 \text{ mm}$, a posuv na otáčku $f_{ot} = 0,08 \text{ mm}$, $0,12 \text{ mm}$ a $0,16 \text{ mm}$ [9].

Pro porovnání kryogenního prostředí byly ty samé zkoušky provedeny i při suchém obrábění. Zkoumal se vliv prostředí na opotřebení hřbetu VB_{max} . Velikost VB_{max} byla měřena vždy po odebrání $10\,000\text{ mm}^3$ [9].

Z výsledků experimentů vyplývá, že kryogenní chlazení u materiálu Haynes Stellite 25 redukuje opotřebení hřbetu přibližně o 60 % oproti suchému obrábění. Nejmenší opotřebení bylo dosaženo u posuvu $f_{ot} = 0,16\text{ mm}$. Toho bylo dosaženo díky nízkému času záběru v materiálu [9].

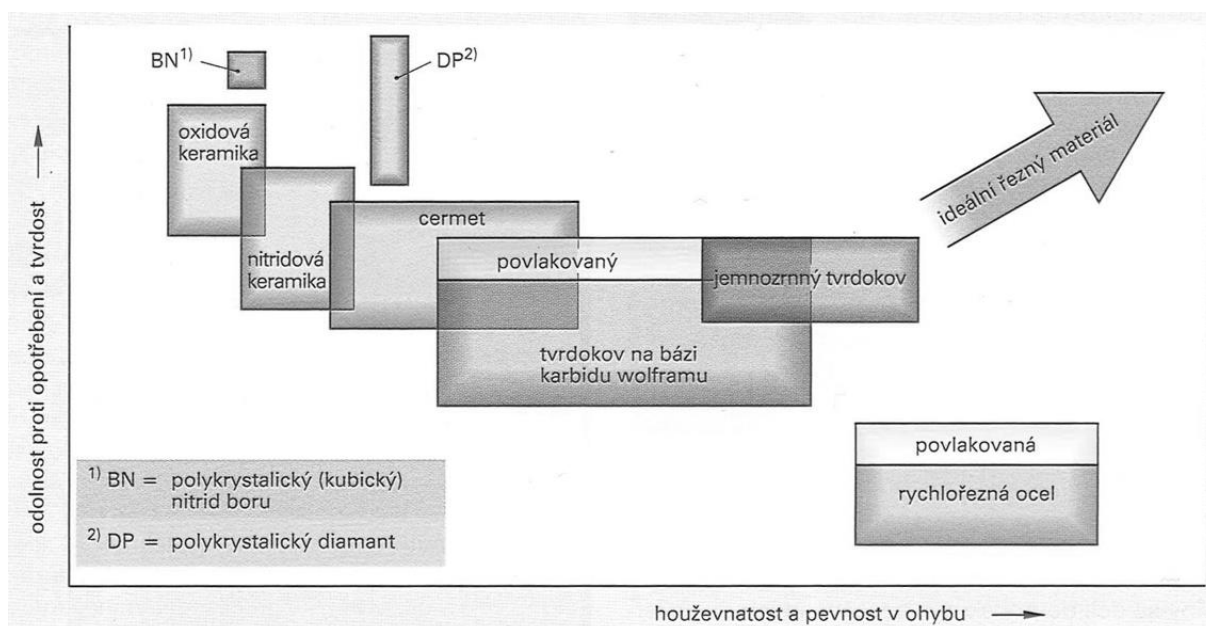


Obrázek 6, Graf závislosti opotřebení hřbetu VB_{max} na řezné rychlosti v_c [9]

4 Nástrojové materiály a geometrie

4.1 Nástrojové materiály

V dnešní době je k dispozici celá řada řezných nástrojových materiálů. V nejbližší době se nepředpokládá objevení nového materiálu, a tak se výrobci zaměřují na vylepšení těch stávajících. Od nástrojů se očekává vysoká houževnatost pro zvládnutí vysokých posuvů a zároveň vysoká tvrdost v místě břitu pro možnost dosažení co nejvyšší řezné rychlosti [10].



Obrázek 7, Mechanické vlastnosti používaných materiálů [11]

4.1.1 Rychlořezné oceli

Rychlořezné oceli jsou charakteristické svou houževnatostí a odolností proti adheznímu opotřebení. Nevýhoda je v oblasti použití do 600 °C. Po překročení této teploty oceli ztrácejí své pevnostní charakteristiky. Další nevýhodou je nízká řezná rychlost 50 m.min⁻¹ pro ocel. Díky houževnatosti lze nástroje používat na starých a méně tuhých strojích [12].

Dle chemické kompozice lze rychlořezné oceli rozdělit do 3 skupin:

- oceli s převažujícím obsahem wolframu,
- oceli s převažujícím obsahem molybdenu,
- oceli komplexně legované wolframem + molybdenem a vanadem [12].

V každé skupině můžeme nalézt oceli obsahující 5 % nebo 10 % kobaltu, který zvyšuje jejich pevnostní charakteristiky za tepla a materiál nese označení HSS-E, což značí vysoko výkonnou ocel [12].

Na rychlořezné oceli lze nanášet povlaky metodou PVD. Nelze nanášet povlaky za teplot vyšších, než je teplota popouštění ocelí. Nejčastěji používaným je povlak TiN, poté následují povlaky TiAlN a TiCN. Povlaky zlepšují řezivost rychlořezných ocelí, ale zdaleka nedosahují takového zlepšení jako při aplikaci povlaku na slinuté karbidy. Povlakované rychlořezné oceli se používají k běžnému obrábění ocelí do pevnosti 1200 MPa [12].

4.1.2 Slinuté karbidy nepovlakované

Slinuté karbidy (dále jen SK) jsou dvou a vícefázové materiály vyráběné práškovou metalurgií. Z hlediska složení se jedná o velmi tvrdé karbidové částice v kovové vazbě [12].

Nepovlakované slinuté karbidy lze rozdělit do tří skupin:

- skupina **K**: WC (87-92) % + Co (4-12) %,
- skupina **P**: WC (30-82) % + TiC (8-64) % + Co (5-17) %,
- skupina **M**: WC (79-84) % + TiC (5-10) % + TaC.NbC (4-7) % + Co (6-15) % [10].

Základem výroby SK je karbid wolframu (WC) v kovové vazbě (Co). Další používané karbidy při výrobě jsou kubické karbidy titanu (TiC), niobu (NbC) a tantalu (TaC). Karbidy tantalu a niobu jsou i ve skupině K a P, ale nevytvářejí samostatnou strukturní složku [10]. Vlastnosti SK jsou řízeny typem a velikostí částic, typem a množstvím pojiva a použitým procesem výroby [12].

Při srovnání s rychlořeznými ocelmi mají SK lepší odolnost proti opotřebení a větší tvrdost, s čímž souvisí i menší houževnatost. V některých aplikacích proto SK nahrazují zavedené nástroje z rychlořezných ocelí (např. vrtáky) [12].

SK jsou ve velkém objemu nabízeny jako vyměnitelné destičky, nebo jiná vyměnitelná tělesa. V malém objemu jsou nabízeny jako pájené destičky, které se vyznačují větší pevností a lepším odvodem tepla [12].

Třída K slouží k obrábění materiálu, které vytvářejí krátkou a drobivou třísku. Zejména se jedná o šedou litinu, neželezné slitiny a nekovové materiály. Třída P slouží k obrábění materiálů s dlouhou třískou. Sem můžeme zařadit uhlíkové oceli, slitinové oceli a feritické korozivzdorné oceli. Třída M je univerzální a používá se pro dlouhou a středně dlouhou třísku. Mezi obráběné materiály patří lité oceli, tvárné litiny a austenitické korozivzdorné oceli [10].

4.1.3 Slinuté karbidy povlakované

S povlakováním břitových destiček z SK začala firma Sandvik v roce 1969. Od té doby vzniklo mnoho generací povlaků s různou depozicí povlaku na SK. Jako první se používala metoda CVD a až na začátku 80. let se začala používat metoda PVD.

Metoda CVD (Chemical Vapour Deposition = chemické napařování z plynné fáze), která se vyznačuje teplotou (nad 1000 °C), zaujímala do začátku 90. let hlavní postavení při depozici povlaků na SK [13]. K výhodám této metody patří vysoká hustota povlaku, výborná adheze mezi podkladem a povlakem, možnost nanesení vrstev o větší tloušťce, povlakování předmětů složitějších tvarů, vysoká teplotní stabilita povlaku a vysoká homogenita povlaku. Mezi nevýhody lze zařadit vysoké pracovní teploty, které mohou mít nepříznivý vliv na vlastnosti povlakovaného předmětu i samotného povlaku; nelze napovlakovat ostré hrany, tahová napětí ve vrstvě a ekologicky nevyhovující pracovní plynné směsi (toxické chloridy) [10].

Metoda PVD (Physical Vapour Deposition = fyzikální napařování), která se vyznačuje teplotou (pod 600 °C), byla vyvinuta v 80. letech pro povlakování rychlořezných ocelí. V dnešní době se PVD povlakování používá pro SK u nástrojů s přerušovaným řezem (frézování). Nízká teplota zaručuje, že nedojde k ovlivnění vlastností povlakovaného materiálu. Tato metoda umožňuje napovlakovat ostré hrany a vytváří tlaková napětí ve vrstvě.

Mezi nevýhody lze zařadit náročnost přípravy povrchu, tenkou vrstvu povlaků (5 μm) a menší výběr typu povlaku [13].

Přehled povlaků:

- povlaky **1. generace**: jednovrstvý povlak (téměř výhradně TiC) s tloušťkou okolo 6 μm , se špatnou adhezí povlaku s podkladem zapříčiněnou vznikem křehkého eta-karbidu,
- povlaky **2. generace**: jednovrstvé povlaky (TiC, TiN, TiCN) s tloušťkou 7-10 μm bez vzniku eta-karbidu, díky vylepšení výrobní technologie,
- povlaky **3. generace**: vícevrstvé povlaky (TiC-Al₂O₃, TiC-TiN, TiC-TiCN-TiN, TiC-Al₂O₃-TiN), s jasně ohraničenými přechody mezi povlaky. První jsou na podklad kladeny vrstvy s lepší adhezí mezi podkladem a povlakem,
- povlaky **4. generace**: multivrstvý povlak, složený z 10 a více vrstev, ze stejných materiálů jako povlaky 3. generace [10].

4.1.4 Cermety

Cermet je názvová složenina slov **CER**amic/**MET**al, jedná se tedy o tvrdé částice (většinou TiC, TiN, TiCN) v kovovém (Ni, Mo, Co) pojivu, vyrobené práškovou metalurgií. Cermety vykazují velmi dobrou odolnost proti opotřebení, vysokou pevnost za tepla a chemickou stabilitu. Oproti SK vykazují menší houževnatost a odolnost proti teplotnímu rázu [12].

Stávající cermety jsou vhodné pro jemné obrábění a dokončování ocelí a ocelolitin. V dnešní době je vývoj cermetů velmi intenzivní a objevují se tak cermety s rozlišnými vlastnostmi v objemu tělesa (houževnaté jádro s tvrdou podpovrchovou vrstvou) díky novým technologiím slinování. Cermety se vyskytují i v povlakované formě metodou PVD.

4.1.5 Řezná keramika

Za keramický materiál dnes považujeme několik řezných materiálů s odlišným chemickým složením a mikrostrukturou. Nejstarším keramickým materiálem je čistá oxidická

keramika (Al_2O_3) s nízkou houževnatostí a odolností proti teplotnímu rázu, s vysokou odolností proti opotřebení a vynikající chemickou stálostí [12].

Všeobecné rozdělení:

- **oxidová keramika:**
 - čistá Al_2O_3 ,
 - polosměsná $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$,
 - směsná $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$,
- **nitridová keramika Si_3N_4** [10].

Všechny známé keramiky lze vyrábět ve formě s vyztuženými vlákny, whiskery SiC nebo Si_3N_4 a s otěruvzdornými povlaky CVD nebo PVD. Vývoj keramiky umožnil použití na obrábění prakticky všech materiálů na bázi železa, a to i při hrubování nebo přerušovaném řezu, včetně použití procesních kapalin [10].

4.1.6 Supertvrdé řezné materiály

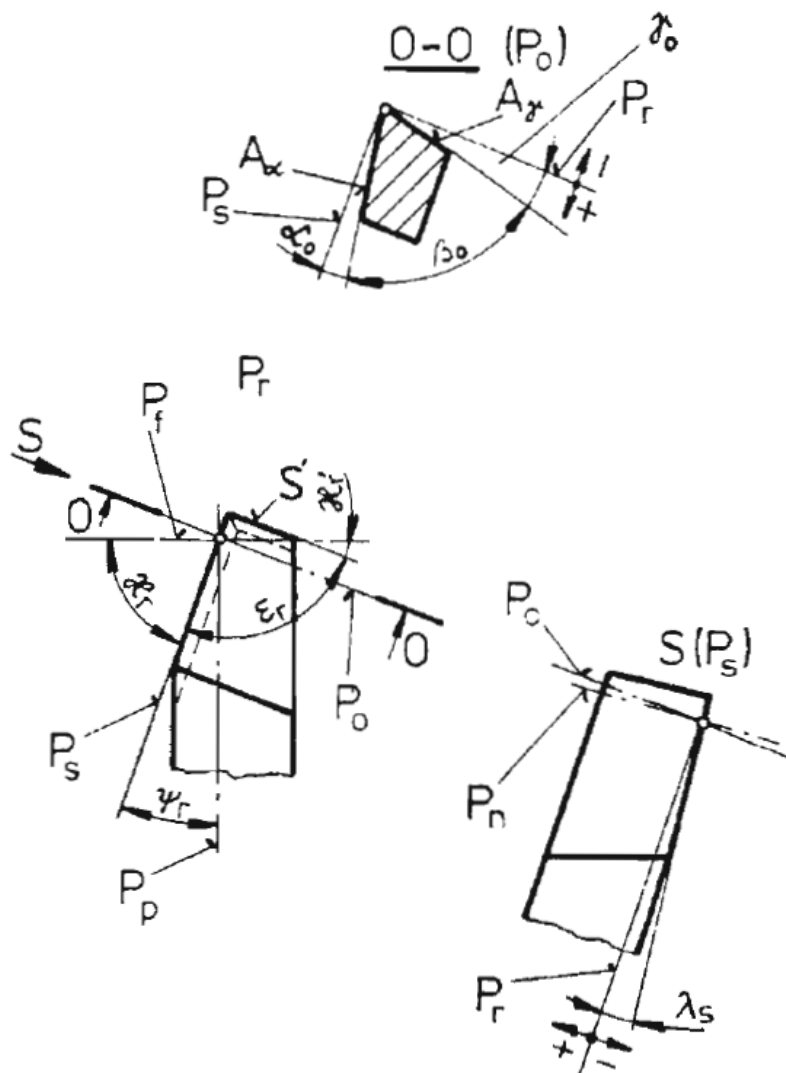
Mezi supertvrdé materiály řadíme diamant (PKD) a kubický nitrid boru (KNB). Jedná se o synteticky vyráběné materiály s vysokou pevností za tepla, výbornou odolností proti opotřebení a chemickou stabilitou k železným kovům. Výrobní postup obou materiálů je obdobný. Nejprve se transformací materiálu vytvoří částice, následuje zhutňování do kompakťů při tlacích 5000-6000 MPa a teplotě 1500 °C [12].

Diamant se nesmí používat nad teploty 650 °C, protože nad touto teplotou dochází k jeho přeměně na grafit; dále se nesmí používat k obrábění kovů na bázi železa, kde by při nadměrném ohřevu docházelo k difuzi mezi nástrojem a obrobkem. Diamant se používá k obrábění hliníkových slitin (v_c až 5000 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$), kompozitů, slitin mědi, SK a dalších abrazivních materiálů [12].

Kubický nitrid boru se používá pro soustružení a frézování kalených ocelí do tvrdosti 65 HRC řeznými rychlostmi až 200 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$. Minimální tvrdost obráběného materiálu je 45 HRC, vzhledem k ekonomičnosti obrábění [10]. Díky drsnosti výsledného obrobku povrchu ($R_a = 0,3$ až $0,4 \mu\text{m}$), nahrazuje obrábění kubickým nitridem boru broušení [12].

4.2 Geometrie nástroje

Při konstrukci nože se musí volit optimální geometrie břitu pro danou práci a druh obráběného i nástrojového materiálu. Řezné úhly se volí zejména s ohledem na trvanlivost břitu, jakost povrchu obráběné součásti, řezné podmínky a tuhosti stroje.



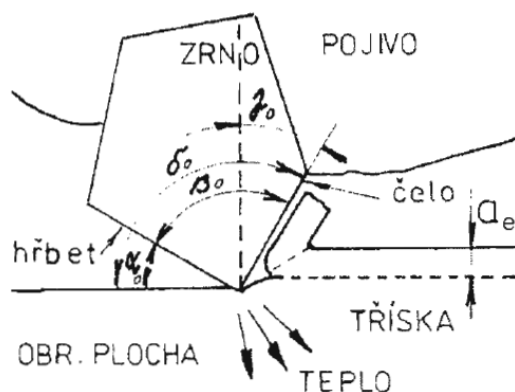
Obrázek 8, Nástrojová geometrie břitu soustružnického nože [14]

Na Obr. 8 vidíme řez soustružnického nože nástrojovou rovinou ortogonální. U úhlů s indexem r se v praxi označení “nástrojový“ neuvádí [14].

Tabulka 8, Popis Obr. 8 [14]

Označení	Název	Označení	Název
α_o	Úhel hřbetu ortogonální	δ_o	Úhel řezu ortogonální, $\alpha_o + \beta_o$
β_o	Úhel břitu ortogonální	ϵ_r	Úhel špičky
γ_o	Úhel čela ortogonální	ψ_r	Doplňkový úhel nastavení
χ_r	Úhel nastavení	λ_s	Úhel sklonu ostří
χ_r'	Vedlejší úhel nastavení	r_ϵ	Poloměr špičky

U broušení mají zrna převážně zápornou geometrii (úhly čela -15° i více). Zrna brusiva jsou v pojivu uspořádána náhodně a nemají stejnou geometrii břitu [14].



Obrázek 9, Nástrojová geometrie břitu broušícího kotouče [14]

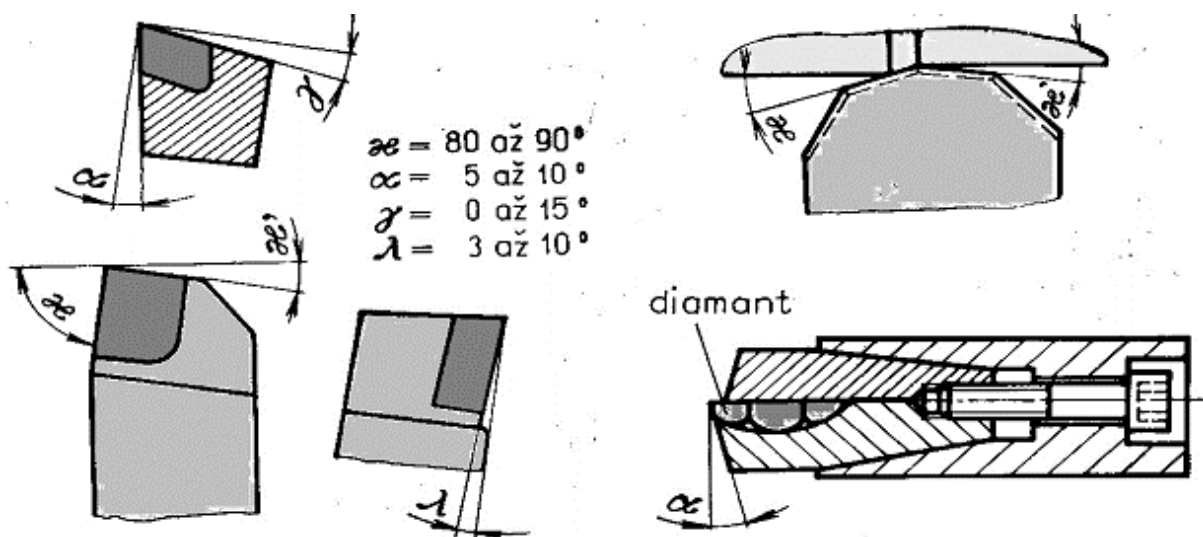
5 Dokončovací metody obrábění

Účelem dokončovacího obrábění je dosažení co nejlepší jakosti obráběného povrchu s dodržáním délkových a geometrických tolerancí.

5.1 Jemné soustružení a frézování

Tyto operace jsou specifickým druhem třískového obrábění, obvykle jednobřítým nástrojem ze slinutého karbidu nebo diamantu. Operace se vyznačují vysokou řeznou rychlostí, malou hloubkou řezu a malým posuvem nástroje. Velký důraz je kladen na chlazení celého procesu. Obrábění se musí kvůli vysokým řezným rychlostem provádět na velmi tuhých strojích.

Výhodami jemného soustružení a frézování jsou pouze malé deformace vznikající v povrchové vrstvě a obrobený povrch bez vtlačených brusných zrn u měkkých materiálů. Díky malému vývinu tepla je zaručena stálost tvaru obrobené plochy. Přidávky na dokončení se pohybují okolo 0,2 mm [15].



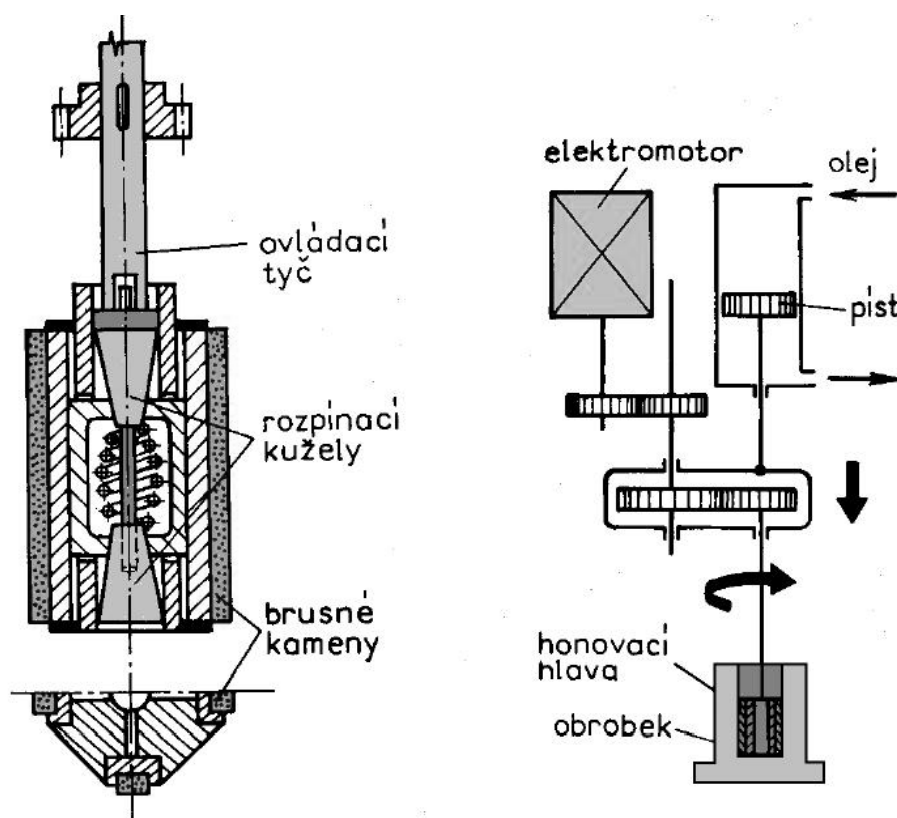
Obrázek 10, Nastavení a upnutí diamantu pro jemné soustružení [15]

Jemným soustružením se dosahuje přesnost IT 3 až IT 5, při drsnosti povrchu $R_a = 0,2$ až $0,8$. Při jemném frézování je přesnost IT 6 až IT 8 a drsnost povrchu $R_a = 0,1$ [15].

5.2 Honování

Honování je dokončovací operace, která se používá primárně k dokončování vnitřních válcových ploch, například válců motorů. Jedná se zde tedy o vnitřní honování, ale lze provádět i vnější. Honování je v podstatě broušení honovacími kameny, upnutými v honovací hlavě a přitlačovanými na obráběnou plochu mechanicky pružinami, nebo hydraulicky. Materiály používané na honovací kameny jsou umělý korund, karbid křemíku a diamant.

Přídavek na honování je obvykle do 0,08 mm a řezné rychlosti se pohybují do $30 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. K chlazení a odplavování brusiva se používá emulze petroleje s parafinem, nebo sířený olej. Honováním se dosahuje vysoké přesnosti geometrického tvaru válcových ploch, dochází k odstranění ovality, kuželovitosti a vlnitosti ploch [15].



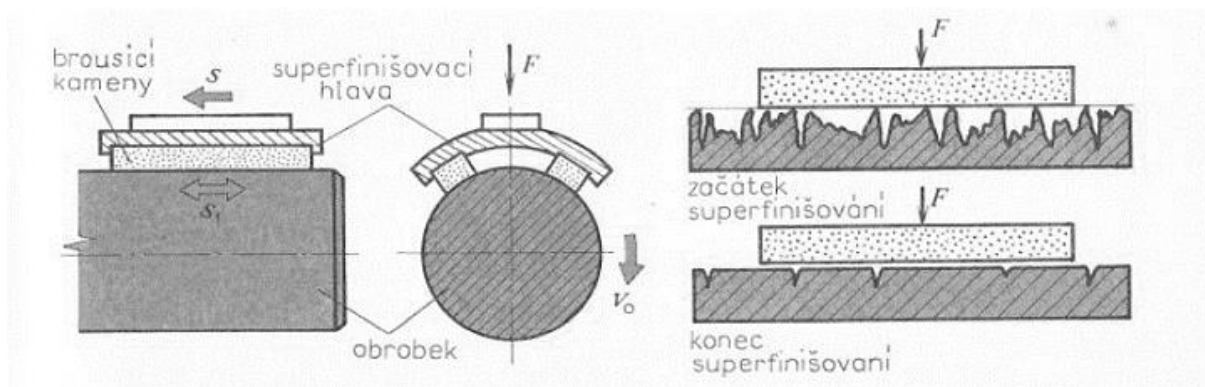
Obrázek 11, Honovací hlava a princip honování [15]

Při běžném honování se dosahuje přesnost IT 6 až IT 7, při drsnosti povrchu $R_a = 0,4$ až $0,8$. Jemným honováním je přesnost IT 5 a drsnost povrchu $R_a = 0,1$ až $0,2$ [15].

5.3 Superfinašování

Tato metoda se obvykle používá pro dokončování vnějších válcových ploch. Brousící kameny jsou uchyceny v superfinašovací hlavě, která je přitlačována k obráběné ploše tlakem do 0,25 MPa. Hlava koná kmitavý pohyb podél obráběné plochy (až 1200 dvoj zdvihů za minutu) a posouvá se ve směru osy výrobku. Obrobek se otáčí obvodovou rychlostí až 40 m.min⁻¹. Mezi obrobek a superfinašovací kameny je přiváděna chladicí kapalina (směs petroleje a oleje), která vytvoří film, jehož tloušťka je řízena tlakem hlavy [15].

Předřazená operace před superfinašování bývá broušení s přídavkem maximálně 0,02 mm a drsností $R_a = 0,5$ až 3. Superfinašováním dosáhneme drsnosti $R_a = 0,025$ až 0,1. Při správném připravení povrchu pro superfinašování trvá operace maximálně minutu. Zrnitost brusných kamenů bývá 400 až 600 [15].

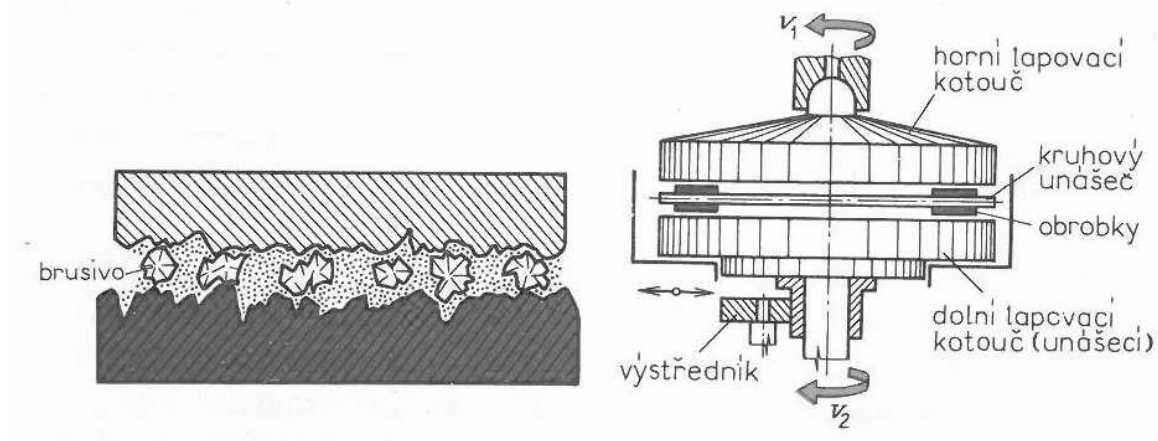


Obrázek 12, Superfinašování [15]

5.4 Lapování

Lapování je metoda, při které dochází k úběru materiálu volným brusivem rozptýleným v kapalině nebo brusné pastě. Kapalina nebo pasta se dávkuje mezi obrobek a lapovací nástroj. Zmenšování drsnosti povrchu a zlepšování geometrického tvaru se dosáhne řezným pohybem brusiva, které je vyvoláno lapovacím nástrojem a současně plastickou deformací nerovností povrchu. Brousící zrna jsou přitlačována k lapovacímu povrchu obrobku lapovacími nástroji, které se otáčejí a kmitají.

Lapovací nástroj bývá obvykle negativem lapované plochy. Materiál nástroje bývá měď, litina, měkká nebo kalená ocel či plast. Jako brusivo se používá karbid křemíku a umělý korund o různé zrnitosti. Pro lapování slinutých karbidů se používá karbid boru a diamantový prášek. Chladicí kapalinou je směs petroleje s olejem [15].



Obrázek 13, Lapování [15]

Lapováním lze docílit nejlepší jakosti obrobene plochy ze všech metod obrábění. Velmi jemným lapováním můžeme dosáhnout přesnosti IT 1 až IT 3 při drsnosti $R_a = 0,02$ až $0,05$. Předchozí operací před lapováním bývá broušení s přídavkem maximálně $0,03$ mm [15].

5.5 Leštění

Leštění má za úkol zlepšit vzhled obrobeneho povrchu. Tímto způsobem se odstraňují různé nečistoty jako kysličníky kovů, oduhličené vrstvy a další. K odebrání materiálu dochází jen do určité míry se snižováním drsnosti. Požadavky na leštění jsou tedy povrchová čistota, hladkost a lesk.

Používané materiály k leštění jsou textil nebo plst'. Většinou se používají kotouče s obvodovou rychlostí 5 až $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Při větší drsnosti a nečistotách povrchu se na povrch kotouče nalepují zrna brusiva nejmenší zrnitosti. Používá se zpravidla umělý korund. U jemného leštění se nanáší na plstěný kotouč leštící pasta. Dalšími nástroji mohou být diamantový pás, leštící tělísko nebo kartáč [15].

5.6 Omílání

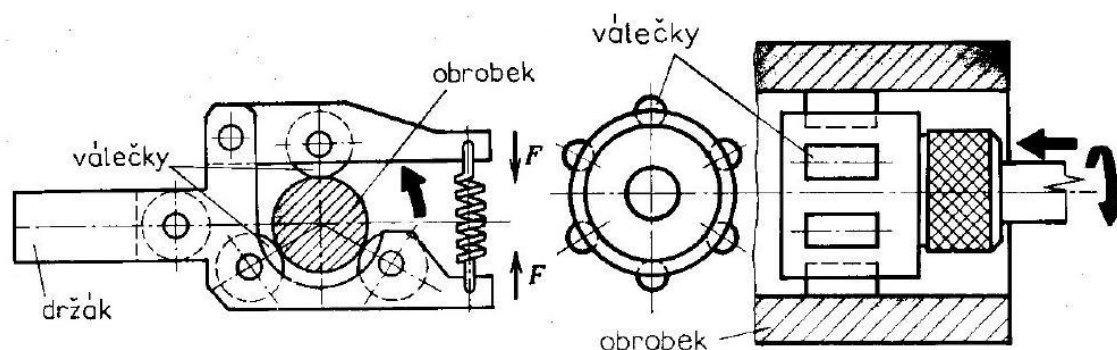
Omílání je speciální proces leštění, bez požadavků na přesnost rozměrů a tvarů. K úběru materiálu dochází třením a nárazy leštícího prostředku na povrchu obrobku v otáčivých nebo vibračních bubnech.

Při omílání se používají přírodní nebo umělé omílací prostředky. Mezi přírodní materiály patří žula, odřezky kůže a dřevěné piliny a mezi umělé pak karbid křemíku, oxid hlinitý a případně kalené ocelové kuličky. Při omílání se používá chlorid sodný nebo nitrid sodný za účelem odmaštění povrchu součástí, zabránění koroze a odstranění ostrých hran.

U omílání závisí jakost povrchu obrobku na celkovém čase omílání. Dále je drsnost povrchu úzce spojena se zvoleným omílacím prostředkem a chemickou látkou. Závisí zejména na druhu materiálu a tvaru součásti.

5.7 Válečkování

Válečkování patří mezi metody bez úběru materiálu. Podstatou je plastická deformace povrchu způsobená válečky vysoké tvrdosti, které jsou přitlačovány na obrobenou plochu. Do místa tváření je přiveden olej, popřípadě emulze. Princip u vnitřních průměrů je podobný jako u honování, tedy, válečky ve válečkovací hlavě jsou přitlačovány mechanicky nebo hydraulicky.



Obrázek 14, Vnější a vnitřní válečkování [15]

Válečkování lze zařadit po všech základních obráběcích operacích. Výchozí drsnost by měla být asi $R_a = 3,2$. Válečkováním se po několika průchodech dosáhne drsnosti asi $R_a = 0,25$ [15].

5.8 Elektrochemické metody

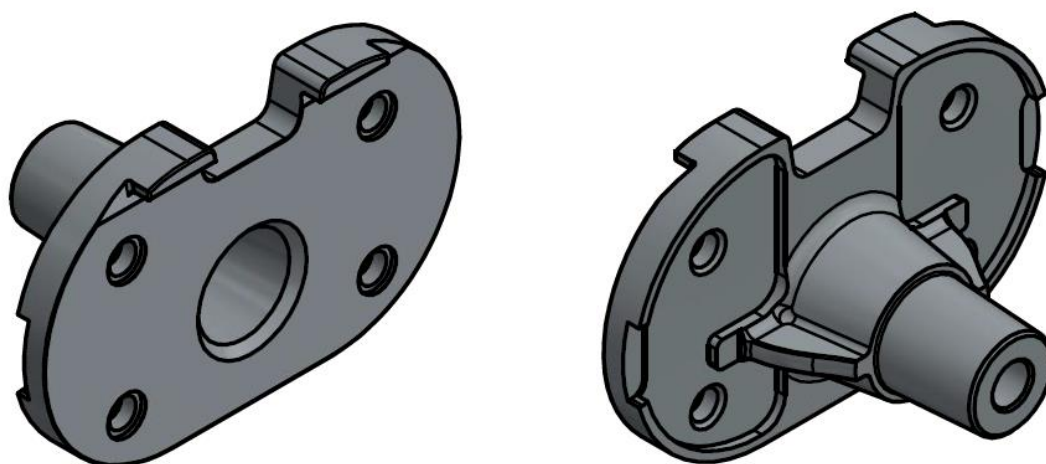
Pro **elektrochemické lapování** se používají ocelové nebo litinové kotouče. Do pracovního místa se spolu s elektrolytem přivádějí také volná brousící zrna. Touto metodou dosahujeme drsnosti $R_a = 0,2$ až $0,5 \mu\text{m}$ [16].

U **Elektrochemického honování** je kinematika obrábění stejná jako u honování klasického. Honovací hlava má nevodivé lišty a je připojena na záporný pól stejnosměrného napětí. Obráběná součást je od rámu stroje izolována a připojena na kladný pól. Honovací lišty jsou vyráběny ze zrn SiC , Al_2O_3 nebo diamantu uložených v kovové vazbě. Na výsledek práce má velký vliv velikost a stabilita pracovní mezery i dokonalost a úplnost rozptýlení elektrolytu v pracovní mezeře. Elektrochemické honování až 6krát zvyšuje produktivitu práce oproti klasickému honování. Dosahují se stejné parametry jako u klasického honování [16].

Elektrochemického leštění je anodické rozpouštění výstupků a nerovností povrchu materiálu v elektrolytu při průchodu stejnosměrného proudu. Nástroj (katoda) se většinou vyrábí z olova (nerozpustného v elektrolytu) a musí mít větší plochu než obrobek. Elektrochemické leštění se uplatňuje zejména při dokončovacím obrábění vnitřků nádob užívaných v potravinářském průmyslu, které jsou vyrobeny z korozivzdorné oceli, a k obrábění fólií a tenkostěnných trubek načisto [16].

6 Návrh technologie pro dosažení minimální drsnosti povrchu

Řešený díl, tibiální plato, je součástí sestavy kolenního implantátu. V rámci spolupráce s průmyslovým partnerem byly provedeny dvě pozorovací návštěvy, při nichž se analyzovala výroba řešeného dílu na CNC frézce, brusce na plocho a při leštění nástrojařem. Tato modifikace tibiálního plata se vyrábí pouze v několika desítkách kusů ročně. Polotovar je odlitek z CoCrMo slitiny (ASTM F75), litý metodou vytavitelného modelu s přídavky do 1 mm na plochu.



Obrázek 15, Tibiální plato

Na finální drsnosti a přesnosti dílu má podíl každá operace. Dále tedy bude provedena celková analýza výrobního postupu, s případnými komentáři ke zjednodušení a zefektivnění výroby. Následně bude věnována pozornost tvorbě nového výrobního postupu a návrhu přípravku.

Řešeným problémem je dosažení drsnosti $R_a = 0,03$ na horní ploše dílu, viz Obr. 30. Bude tedy vyhotoven návrh metody pro dokončování horní plochy a následně otestován při technologických zkouškách.

6.1 Analýza současného výrobního postupu

6.1.1 Výrobní časy

Důležitou ekonomickou roli mají výrobní časy, proto byl proveden jejich rozbor. Výroba řešeného dílu se skládá z celkem dvaceti operací, které zahrnují technologie frézování, broušení, úpravu, kontrolu, leštění a mytí. Následný rozbor vychází z časů uvedených ve výrobním postupu.

Tabulka 9, Rozbor časů výrobního postupu

Operace	Technologie	T _a [min]	T _b [min]
010	Frézování	10	0
020	Frézování	50	15
030	Frézování	40	15
040	Frézování	20	15
050	Kontrola	2	0
060	Broušení	40	15
070	Úprava	26,64	0
080	Kontrola	2	0
090	Kontrola	2	0
100	Frézování	40	15
110	Úprava	7,7	0
111	Úprava	26,64	0
120	Kontrola	2	0
130	Broušení	29	15
140	Kontrola	2	0
150	Kontrola	2	0
160	Leštění	8	0
170	Úprava	4	0
180	Úprava	4	0
190	Mytí	0,5	0
Celkové časy		318,48	90

Celkový jednotkový čas (T_a) je 318,5 min a dávkový čas (T_b) je 90 min. Z rozboru dle technologií (Tab. 10) můžeme vidět pracnost frézování a broušení, která má největší vliv na náklady.

Tabulka 10, Rozbor časů dle technologie

Technologie	T_a [min]	T_b [min]
Frézování	160	60
Broušení	69	30
Úprava	68,98	0
Kontrola	12	0
Leštění	8	0
Mytí	0,5	0
Celkové časy	318,48	90

6.1.2 Analýza operací

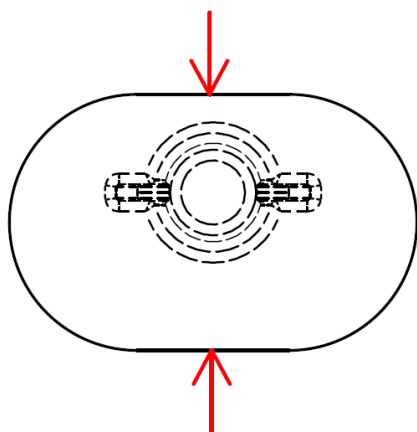
Každá operace byla převzata z výrobního postupu a následně byl proveden rozbor a navržena optimalizace. Pro každou operaci bylo vytvořeno schéma upnutí s přibližnou podobou rozpracovanosti.

Operace 010 – Frézování horní plochy

Úkon:

Přefrézovat horní plochu na rozměr 9,5 mm.

Schéma upnutí:



Obrázek 16, Schéma upnutí op. 010

Nástroje:

Čelní fréza s vyměnitelnými břitovými destičkami cca pr. 60 mm

Skutečný čas:

X – nepřítomni

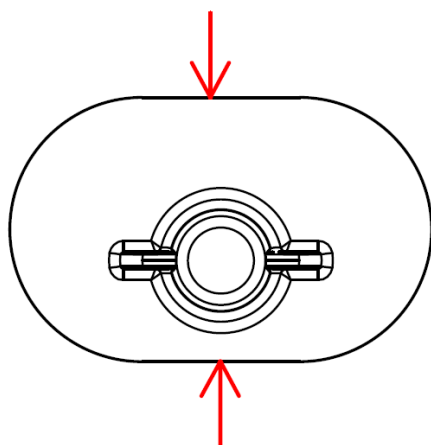
Návrh optimalizace:

Při dodržování rozměru 9,5 mm ne vždy dojde k přerovnání celé plochy. Je nutno dbát na důslednost při upínání a rovnání dílu. Při proměření čtyř již přefrézovaných kusů ve čtyřech bodech byla odchylka na síle (tloušťce plata) vždy minimálně 0,1 mm mezi změřenými body. Dva ze tří pozorovaných kusů nebyly přefrézovány v celé délce. Pro lepší vyrovnání bylo navrženo podepření u čelistí 4 mm silnými podložkami (slangově bajláky). Po přeobrobení je nutné proměřit sílu ve více bodech. Byla by vhodná změna nástroje na frézu čelní s kruhovými destičkami nebo vícebřitý monolitní nástroj o větším průměru s rohovým poloměrem >1 mm pro zlepšení drsnosti povrchu.

Operace 020 – Zarovnání čela kuželu, hrubování kuželu, vrtání otvoru pr. 6,5 mm

Úkon:

Podložit radecama na přefrézovanou plochu, upnout za boky oválu. Upínat nohou k sobě, X0 Y0 v ose dířku, Z0 na povrchu oválu. Zarovnání čela kuželu, vrtání otvoru pr. 6,5 mm.

Schéma upnutí:

Obrázek 17, Schéma upnutí op. 020

Nástroje:

Fréza pr. 10 tvk – plochy a kužel T30-0593 4JJC-100-005-070-R0,5

Vrták pr. 6,6 SECO SD205A-6.6-35-8R1

Vrták pr. 6,5 SECO SD207A-6.5-57-8R1

Skutečný čas:

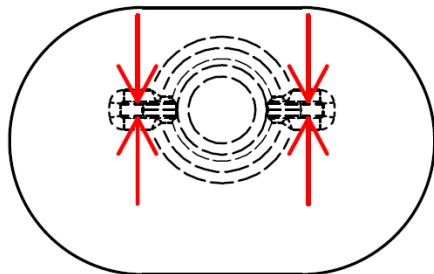
X - nepřítomni

Návrh optimalizace:

Byla by vhodná změna nástroje pr. 10 mm s větším rohovým poloměrem. Poté zařadit nástroj s ostrými rohy pro objetí kontury spodku kužele.

Operace 030 – Frézování horní plochy a výstupků, hrubování kuželu, zahloubení pr. 11 mm, vystružení kuželu, vrtání a řezání závitu, výroba zápichu**Úkon:**

Upnout do tvarových čelistí do svěráku v rotační ose výkrojem k sobě X0 Y0 v otvoru, (Z0 v ose rotace – neměří se). Frézování horní plochy a výstupků, hrubování kuželu, otvor pr. 11+0,2 na čisto, vystružení kuželu, vrtání otvorů pro závity a řezání závitu. Naklopit rotační osu 15 stupňů od sebe, vyrábět zápich na výstupcích.

Schéma upnutí:

Obrázek 18, Schéma upnutí op. 030

Nástroje:

Fréza pr. 10 tvk – plochy, kužel a otvor T30-0593 4JJC-100-005-070-R0,5

Fréza pr. 12 – MM12-12015-R05A30-M04

Vrták pr. 5 SECO SD203A-5.0-20-6R1-M

Fréza závitová M6

Výstružník T31-0419-TGS-N09794-11V20.130.45

Držák HORN M313.0012.01A + Destička HORN 313.0005.10 TN35

Skutečný čas:

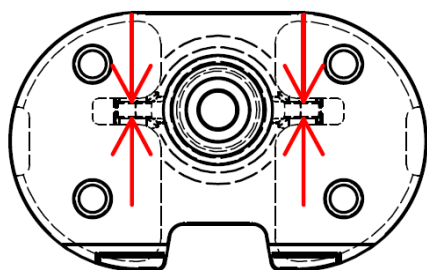
cca 180 min

Návrh optimalizace:

Opět je zde nejasný popis polohy osového kříže v hladině Z0 (možnost chyby operátora). Pro hrubování plochy by bylo výhodnější zvolit monolitní frézu o větším průměru s větším rohovým poloměrem nebo čelní frézu s kruhovou destičkou. Pro dokončení plochy by bylo vhodné volit vícebřitý nástroj o průměru >12 mm, kdy je nutné zadat korekci poloměru nástroje minimálně $+0,02$ mm. Korekce odstraní poskakování nástroje okolo výstupků a zlepší stav obrobené plochy na čisto. Pro zrychlení výroby by bylo dobré vyzkoušet řezání závitu namísto frézování a pro hrubování kužele pak zvolit frézu s větším rohovým poloměrem. Frézování zápichu lze vyzkoušet nesousledně, nesousledná kinematika lépe odvádí třísky z místa řezu a kvalita povrchu by se měla zlepšit. Při najíždění pod úhlem lze využít poloměru otáčení čtvrté osy a vycházet ze souřadného systému před rotací, najíždění na zkosené plochy je problematické a nepřesné. Pro kruhovitost kuželu a výslednou drsnost povrchu není optimální, když má výstružník pouze dva zuby. Při prvním kontaktu výstružníku a dílu dojde k přímkovému dotyku ve dvou místech proti sobě, při tomto záběru dochází ve tvaru k tzv. poskákání povrchu, neboli se místo dokonalého kruhu tvoří tisícíhran. Lepší variantou by byl vícebřitý výstružník, nebo použití kulového nástroje s technologií frézování po spirále.

Operace 040 – Frézování obvodu**Úkon:**

Upnout v přípravku výkrojem k sobě, upínat nohou k sobě, X0 Y0 v otvoru, Z0 na povrchu. Frézování obvodu.

Schéma upnutí:

Obrázek 19, Schéma upnutí op. 040

Nástroje:

Fréza pr. 10 tvk – plochy, kužel a otvor T30-0593 4JJC-100-005-070-R0,5

Fréza pr. 8 TVK

Fréza pr. 5 TVK

Skutečný čas:

cca 90 min

Návrh optimalizace:

Podle postupu nelze vyrobit. Noha musí směřovat dolů. Na stroji provedeno správně.

Operace 050 – Kontrola

Úkon:

Kontrola rozměrů a polohy kuželového otvoru prvního vyrobeného kusu na 3-souřadnicovém přístroji, určení korekce nástrojů.

Operace 060 – Broušení kužele

Úkon:

Brousit kužel 6 st.

Poznámka:

Vyřazeno z výrobního postupu.

Operace 070 – Leštění kužele

Úkon:

Upnout do sklíčidla do tvarových čelistí a leštit kužel leštícím kotoučem. CBN kuželem brousit sražení 1,5x45°

Skutečný čas:

cca 15 min

Návrh optimalizace:

Zkusit poptat 15° tělíška, jelikož upravená válcová nikdy nebudou mít přesný úhel. Vyzkoušet upnutí do svěráku a leštění ve stojanové vrtačce. Bude tak zaručen rovnoměrný tlak na celý kužel a nemělo by docházet ke ztrátě kruhovitosti. Broušení sražení se neprovádí, jelikož je sražení již vyfrézováno při operaci 030.

Operace 080 – Kontrola

Úkon:

Kontrola drsnosti a jakosti povrchu kužele.

Operace 090 – Kontrola

Úkon:

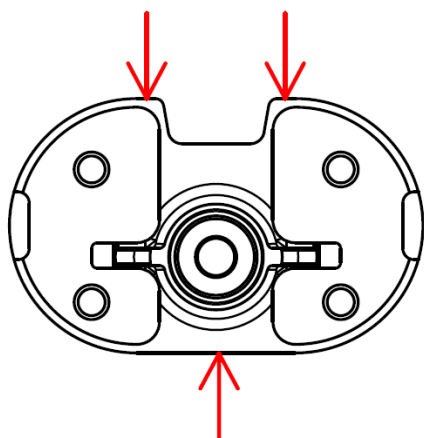
Kontrola rozměrů a polohy kuželového otvoru na 3-souřadnicovém přístroji – určení rozměrů pro frézaře.

Operace 100 – Frézování spodní plochy a vylehčení

Úkon:

Frézovat spodní plochu na rozměr 4,5 mm (s přídávkem na broušení dle naměřené hodnoty na 3-souřadnicovém přístroji) s odlehčením se stěnou 1,5 mm. Podložit podložkami na přetočenou plochu, upnout za boky oválu tak, aby vyčnívala plocha nad čelistmi min. 1 mm. Upínat nohou k sobě X0 Y0 v ose otvoru, Z0 na povrchu oválu. Výroba kapes.

Schéma upnutí:



Obrázek 20, Schéma upnutí op. 100

Nástroje:

Fréza pr. 10 tvk – plochy, kužel a otvor T30-0593 4JJC-100-005-070-R0,5

Fréza pr. 8 minimaster

Fréza pr. 4 TVK

Skutečný čas:

cca 120 min

Návrh optimalizace:

Není opět jasně definované upnutí (došlo ke kolizi). Rozdělit program na hrubování a na poslední vrstvu. Při odměření a následném puštění programu odpadne doba, kdy nástroj jezdí naprázdno.

Operace 110 – Úprava

Úkon:

Zámečnický odhrotovat pouze dosedací plochu. Ne křídla a kužel, roh křídel jen pokud nesedí kontrolní kroužek. Gumosmirkem přebrousit otlaky a drážky. Vybrousit vady na povrchu.

Operace 111 – Úprava

Úkon:

Upnout do sklíčidla do tvarových čelistí, brousit a leštit leštícím kotoučem plochy dorazu na rozměr 2,5 0/+0,2 mm.

Poznámka: Vyřazeno z výrobního postupu.

Operace 120 – Kontrola

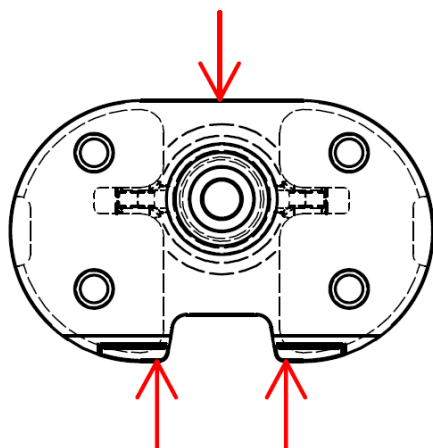
Úkon:

Určit hodnotu, o kterou se bude horní plocha brousit.

Operace 130 – Broušení horní plochy

Úkon:

Upnout do sklíčidla pomocí tvarových čelistí. Brousit výchozí plochu – dle údajů z mezikontroly.

Schéma upnutí:

Obrázek 21, Schéma upnutí op. 130

Nástroje:

Brusný kotouč 98A 80K 9V

Brusný kotouč 98A 150J 10V

Brusný kotouč AL 600 E

Skutečný čas:

cca 120 min

Návrh optimalizace:

Sjednocením přídavek, ale to lze pouze restrukturalizací postupu a opakovatelností při frézování což je předmětem návrhu nové technologie. Odebírání přídavek v řádu desetin mm (0,2 až 0,6 mm) kotoučem o zrnitosti 600 je extrémně zdlouhavé. Vzhledem k přítomnosti zoubků lze přidávat pouze v zadní úvrati, což vede k nerovnoměrnému opotřebení kotouče. Po celou dobu hrubování se vytváří rovina, která není kolmá k ose kužele. V blízkosti výstupků je plocha o až o 0,03 mm výše. Rovinnost plocha dostává až po finálním orovnání a dokončovacích řezech. Vzhledem k požadavkům na drsnost a konstrukci brusky nelze brousit s hrubším kotoučem a nelze zařadit ani výměnu kotouče.

Operace 140 – Kontrola**Úkon:**

Kontrola rozměrů po broušení na 3-souřadnicovém stroji.

Operace 150 – Kontrola

Úkon:

Kontrola po broušení – povrch, rozměry.

Operace 160 – Leštění horní plochy

Úkon:

Leštit horní plochu hadrovým kotoučem.

Skutečný čas:

cca 20 min

Návrh optimalizace:

Omezit množství vneseného tepla, aby nedocházelo k vytrhávání povrchu. Zkusit najít vhodnou variantu strojního leštění pro zaručení geometrických tolerancí.

Operace 170 – Úprava

Úkon:

Ochránit horní broušenou plochu a celou komponentu tryskat korundem zr. č. 32.

Operace 180 – Úprava

Úkon:

Obvod komponenty přebrousit a kartáčovat.

Operace 190 – Mytí

Úkon:

Čistit v ultrazvuku – oplach, sušit.

Celkové návrhy optimalizace:

- Sjednocení souřadného systému - tj. na spodní ploše oválu v ose díry, v tomto bodě pouze rotovat souřadným systémem při obrábění shora a zespoda. Touto optimalizací by se měla zaručit podobnost a přesnost vyráběných dílů.
- Metoda 5S – jelikož je okolo strojů málo místa, měli by být pracovníci s touto metodou seznámeni. V českém prostředí ji lze přeložit jako 5U, tedy Utřídit, Uspořádat, Udržovat pořádek, Určit pravidla, Upevňovat a zlepšovat. Pracovník se pak vyhne zbytečným prodlevám při hledání vhodného nářadí a nástrojů. Například dávkový čas byl překročen u každé frézovací operace minimálně dvakrát, a to dávka byla pouze jeden kus.
- Toolmanagement – celková správa nástrojů. Pověřit odpovědnou osobu výdejem nástrojů k programovým listům, po odjetí kusů dle výrobního postupu opět odnést pověřené osobě, vyhodnotit opotřebení a stav nástroje, zajistit broušení a povlakování. Přebroušené nástroje používat pro hrubovací operace (snížení nákladů na nové nástroje). U stroje zajistit sadu používaných náhradních nástrojů, využívat vydávání nástrojů na jméno, zajištění přehledu trvanlivosti a nákladů na nástroje. Zajistit více upínačů pro nástroje. Proškolit obsluhu v preciznosti upínání (vyložení nástroje, čistota). Neupínat tvrdokovové vrtáky do hlavičky. Nekupovat tvrdokovové nástroje s vnitřním chlazením, když jím stroj nedisponuje.
- Řezné podmínky – Posuv na zub f_z a rezná rychlost v_c v pořádku. U čelního frézování dle zveřejněných studií jít s hloubkou řezu a_p až k 1 mm. Materiál má tendenci ke zpevňování povrchu, tudíž by hloubka třísky měla být větší. U bočního frézování by boční přísuv a_e měl být roven 8 % a_e/D_n dle katalogu Sandvik, což je pro frézu pr. 12 mm boční přísuv a_e 1 mm.
- Překontrolovat kruhové házení kleštin a vřetene – stroj je prý po kolizi (servis). Bylo provedeno proměření házení pouze při otáčkách rukou a na kalibru při strojních otáčkách. Vliv má samozřejmě vyložení nástroje z upínače. Nejvíce byl vyložen výstružník, proto je hodnota větší než u zbytku. Při pohledu do tabulky 11 lze vidět značný rozdíl u válcového kalibru při ručních otáčkách a strojních. Tedy pokud

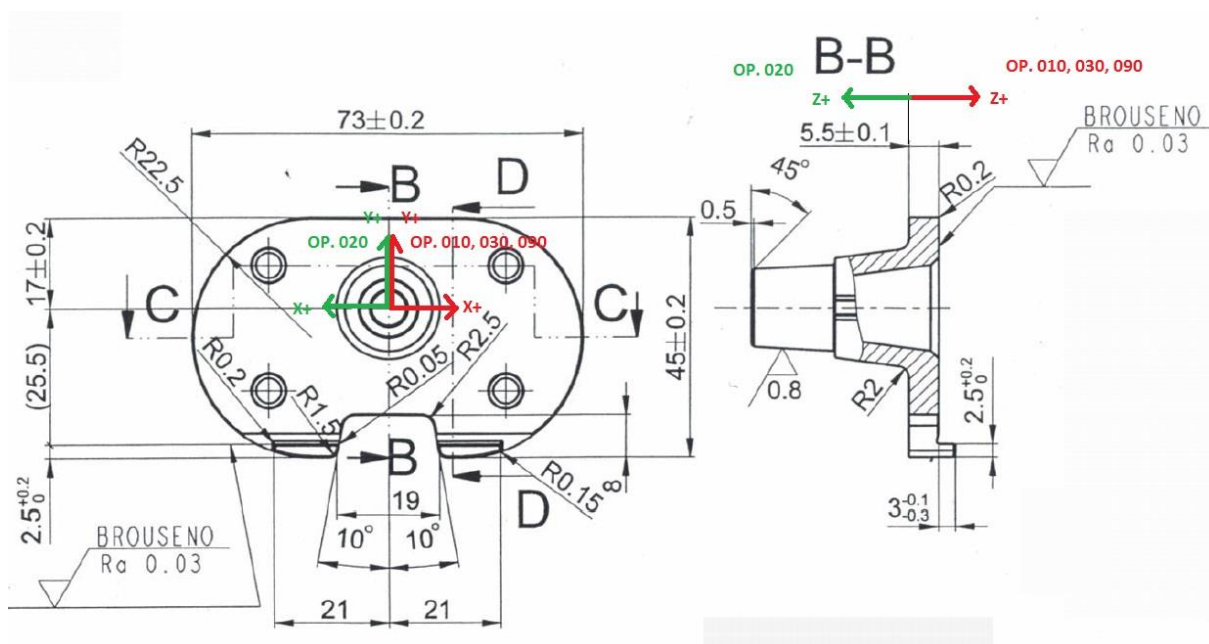
výstružník vykazuje kruhové házení při ručních otáčkách 0,03 mm, dá se očekávat, že při strojních to bude přes 0,05 mm.

Tabulka 11, Kruhové házení nástrojů

Nástroj	Kruhové házení [mm]
Výstružník (vyložení cca. 100 mm)	0,03
Fréza pr. 5 mm	0,01
Závitník M5	0,01
Válcový kalibr (ručně)	0,005
Válcový kalibr (strojně)	0,02

6.2 Návrh výrobního postupu

Při návrhu výrobního postupu se vycházelo z jednoho souřadného systému (Obr. 22), kterým se pouze rotuje. Jelikož frézování je nejpracnější technologií, byla pozornost zaměřena hlavně na zjednodušení výroby na frézce. Broušení na brusce na plocho trvalo minimálně dvakrát déle, než je uvedeno v postupu, protože každý kus je unikátní a brusič má tak ztížené podmínky při upínání a následném broušení. Proto bylo navrženo sjednocení přídavek na broušení, zpřesněním výroby kuželového otvoru, který určuje polohu horní plochy.



Obrázek 22. Souřadné systémy dílu

Operace 010 – Frézování seshora

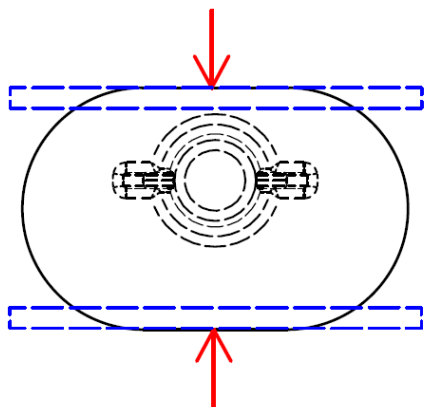
Úkon:

Podložit 4 mm silnými podložkami u čelistí, upnout za ovál (noha jde dolů), doklepat.

X0Y0Z0 v ose otvoru na spodní ploše hotového dílu. Přídavky rozdělit.

Přefrézovat horní plochu na rozměr $9,3 \pm 0,05$ mm. Měřit sílu ve více bodech.

Schéma upnutí:



Obrázek 23, Schéma upnutí op. 010N

Nástroje:

Fréza TVK pr. >12 mm s rohovým sražením nebo poloměrem

Fréza čelní s kruhovými destičkami

Operace 020 – Frézování zespoda

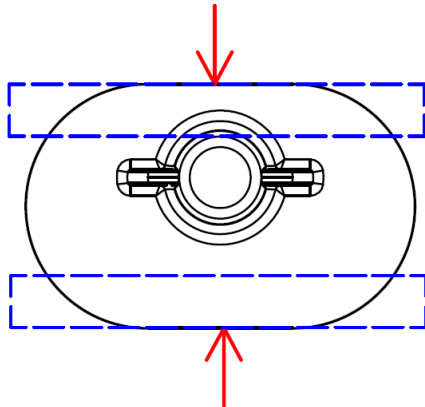
Úkon:

Podložit silnými podložkami, upnout za ovál (noha jde nahoru), doklepat. X0Y0Z0 v ose otvoru na spodní ploše hotového dílu. Počítat přídavek 0,5 mm na spodní ploše.

Hrubovat čelo kuželu, kužel, spodní plochu oválu, vylehčení.

Na čisto čelo kužele, kužel, spodní plochu oválu, vylehčení.

Vrtat pr. $6,5 \pm 0,2$ mm.

Schéma upnutí:

Obrázek 24, Schéma upnutí op. 020N

Nástroje:

Fréza TVK pr. 10R0,5 mm

Fréza TVK pr. 6 mm

Fréza TVK pr. 4 mm

Fréza TVK pr. 5R2,5 mm

Vrták pr. 6,6 SECO SD205A-6.6-35-8R1

Vrták pr. 6,5 SECO SD207A-6.5-57-8R1

Operace 030 – Frézování shora**Úkon:**

Podložit 4 mm silnými podložkami u čelistí (nebo přípravkem), upnout za ovál (noha jde dolů), doklepat. X0Y0Z0 v ose otvoru na spodní ploše hotového dílu.

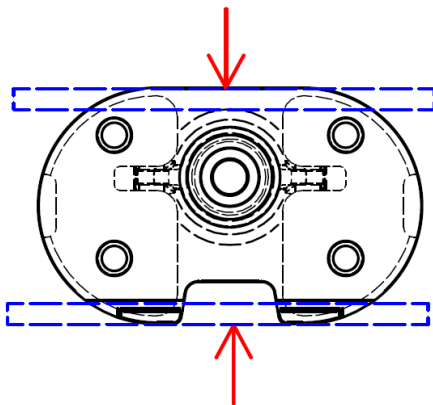
Hrubovat horní plochu (nechat přídavek 0,3 mm). Vrtat pr. 10 mm v kuželu. Vrtat, řezat M6.

Hrubovat kužel, pr. 11+0,2 mm.

Na čisto pr. 11+0,2 mm, čičky u závitu, výstupky (boky), sražení 1,5x45° hotově, vystružit kužel (frézovat kužel).

Kontrola kužele, v Z0 změřit sondou pr. 15,11–15,25 mm, případně korigovat výstružník.

Vyklonit o 15° a frézovat drážku.

Schéma upnutí:

Obrázek 25, Schéma upnutí op. 030N

Nástroje:

Fréza TVK pr. >12 mm s rohovým sražením nebo poloměrem

Fréza TVK pr. 10R0,5 mm

Fréza TVK pr. 6R3 mm

Fréza TVK pr. 4 mm

Vrták pr. 5 SECO SD203A-5.0-20-6R1-M

Fréza závitová M6 (Závitník průchozí M6)

Výstružník T31-0419-TGS-N09794-11V20.130.45 nebo Fréza pr.8R4 mm

Držák HORN M313.0012.01A + Destička HORN 313.0005.10 TN35

Operace 040 – Kontrola**Úkon:**

Kontrola rozměrů a polohy kuželového otvoru prvního vyrobeného kusu na souřadnicovém měřicím stroji, určení korekce nástrojů.

Operace 050 – Leštění kužele**Úkon:**

Upnout do tvarových čelistí a leštit kužel leštícím tělískem na stojanové vrtačce.

Operace 060 – Kontrola

Úkon:

Kontrola drsnosti a jakosti povrchu kužele.

Operace 070 – Kontrola

Úkon:

Kontrola rozměrů a polohy kuželového otvoru na souřadnicovém měřicím stroji – určení hodnoty, o kterou frézovat, aby na broušení zbylo 0,1 mm

Operace 080 – Úprava

Úkon:

Zámečnický odhrotovat pouze dosedací plochu. Ne křídla a kužel, roh křídel jen pokud nesedí kontrolní kroužek. Gumosmirkem přebrousit otlaky a drážky. Vybrousit vady na povrchu. Zkusit na přípravku.

Operace 090 – Frézování plochy a obvodu

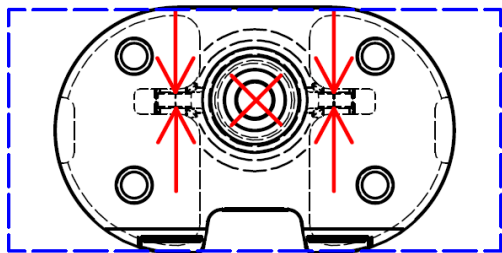
Úkon:

Upnout do přípravku, vyrovnat kus pomocí červíků, upnout přípravek do svěráku. Zkontrolovat hodinkami přípravek, vyrovnat. Překontrolovat rotaci sondou na výstupcích. X0Y0Z0 v ose otvoru na spodní ploše hotového dílu, Z osu najíždět na broušené ploše přípravku.

Frézovat na čisto plochu o hodnotu určenou z měření a výstupky.

Hrubovat obvod, obvod na čisto.

Nevyjímat díl z přípravku!

Schéma upnutí:

Obrázek 26, Schéma upnutí op. 090N

Nástroje:

Fréza TVK pr. >12 mm vícebřitá (dokončení plochy)

Fréza TVK pr. 10R0,5 mm

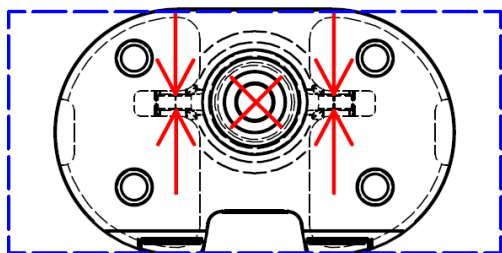
Fréza TVK pr. 4 mm

Operace 100 – Broušení horní plochy**Úkon:**

Upnout s přípravkem do svěráku, vyrovnat přípravek, zkontrolovat horní plochu.

Brousit o 0,1 mm.

Nevyjímat díl z přípravku!

Schéma upnutí:

Obrázek 27, Schéma upnutí op.100N

Nástroje:

Brusný kotouč AL 600 E

Operace 110 – Kontrola

Úkon:

Nevyjímat díl z přípravku!

Kontrola rozměrů po broušení na souřadnicovém měřicím stroji.

Operace 120 – Kontrola

Úkon:

Nevyjímat díl z přípravku!

Kontrola po broušení – povrch, rozměry.

Operace 130 – Lapování horní plochy

Úkon:

Upnout přípravek do svěráku. Vyrovnat přípravek, překontrolovat horní plochu.

Lapovat horní plochu lapovací hlavou

Nástroje:

Lapovací hlava

Plátno MD – Largo + 9 μm diamantový roztok

Plátno MD – Plus + 3 μm diamantový roztok

Operace 140 – Úprava

Úkon:

Ochránit horní broušenou plochu a celou komponentu tryskat korundem zr. č. 32.

Operace 150 – Úprava

Úkon:

Obvod komponenty přebrousit a kartáčovat.

Operace 160 – Mytí

Úkon:

Čistit v ultrazvuku – oplach, sušit.

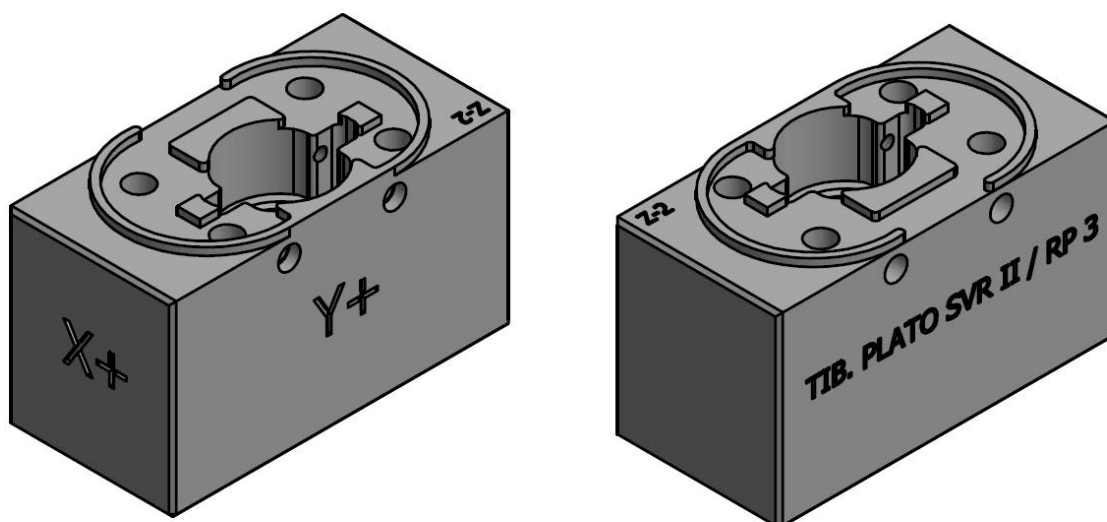
Komentář k postupu:

- Nástroje považují teoreticky vhodné k obrábění určitých technologických prvků.
- Umístnění hladiny Z0 na spodní část hotového dílu by mělo mít za následek zpřesnění výroby a opakovatelnosti.
- Pro dokončení plochy volit šestibřítý nástroj se sklonem šroubovice okolo 50°.
- Stejná výška všech dílů, by měla přinést zrychlení při broušení více kusů najednou.
- Vždy rozdělit program na čisto a na hrubování.

6.3 Návrh přípravku

Při návrhu přípravku se vycházelo z výrobního postupu. Přípravek měl splňovat několik podmínek:

- možnost upnutí dílu ustaveného v přípravku do čelistí svěráku,
- možnost obrábění obvodu ustaveného dílu,
- možnost snadného vyrovnání přípravku a ustaveného dílu,
- zachycení tečných sil, aby nedošlo k pootočení,
- snadné najetí hladiny Z0,
- mobilitu pro různé technologie a operace,
- nedovolit průhyb ustaveného dílu.

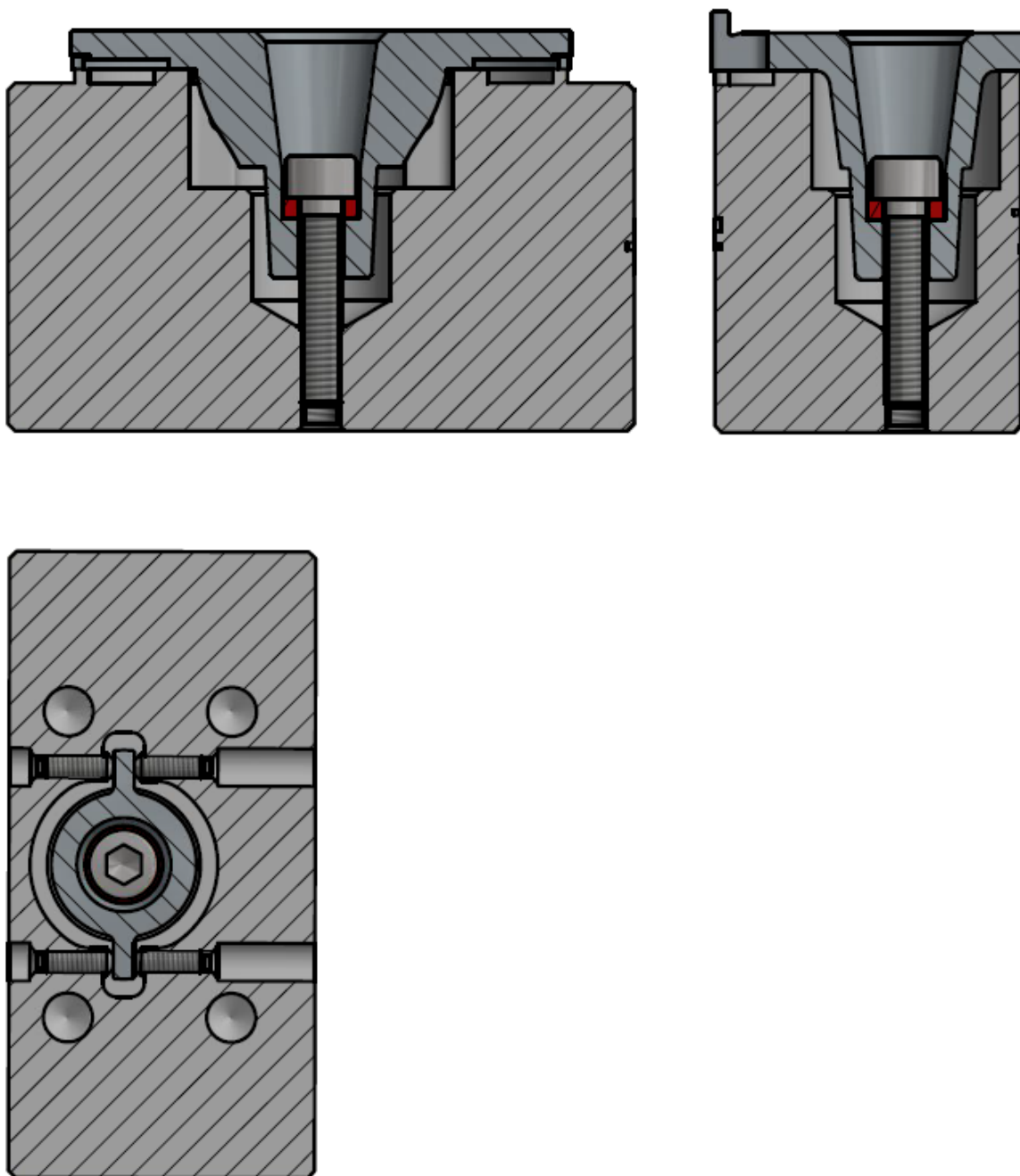


Obrázek 28, Přípravek

Při prvotním návrhu se vycházelo z přípravku, který měl ustavený díl přidržovat šroubem a kopírovat tvar vylehčení. Tento přípravek se ukázal jako nevhodný, jelikož při utažení docházelo k prohýbání dílu v ose X až o 0,05mm.

Zvolen byl tedy plošně menší typ podepření, za cenu podepření ve středu součásti u utahovaného šroubu. Šroub je podložen podložkou z konstrukčního plastu. Jelikož přípravek tvarově nezajišťuje aretaci pro přenos sil v ose X a Y, bylo navrženo upnutí přes čtyři stavěcí šrouby. Ty zároveň slouží pro ustavení dílu. V mezeře mezi přípravkem

a ustaveným kusem je mezera 1,5 mm. Závit stavěcího šroubu má stoupání 0,7 mm, tedy by měly stačit necelé 2 a čtvrt otáčky pro vyrovnání (2,15 ot.).



Obrázek 29, Způsob ustavení dílu v přípravku

Pro možnost frézování obvodu a upnutí oválu do svěráku byly tvarové plochy vylehčeny o 0,5 mm a vyvýšeny 2 mm nad plochu přípravku. Pro snadné rovnání přípravku

bude obvod celé kostky broušen. Broušen bude i rozměr vyvýšení 2 mm, kvůli najíždění Z hladiny na přípravku.

Materiál navržen pro přípravek byl 16MnCr5 (ČSN 14 220) nebo podobný. Navržené tepelné zpracování bylo cementování a kalení na tvrdost HRC = 62±1.

Sled technologických operací k výkresu 1_003_001 v přílohách:

Operace 010 – Frézování hranolu s přídávky

Úkon:

Frézovat hranol 90+0,4x52+0,4x44+0,4 – úhlovat.

Operace 020 – Frézování výběru a tvarové části

Úkon:

Přídavky rozdělit. Vrtat pr. 20, vrtat 4x pr. 7, frézovat výběr do hl. 17 mm hotově. Frézovat tvarovou část s přídávkem v Z 0,2 mm. Frézovat popis.

Operace 030 – Vrtat, řezat M4

Úkon:

Přídavky rozdělit. Vrtat pro 4x M4, Vrtat vylehčení 4x pr. 6, řezat 4x M4. Frézovat popis.

Operace 040 – Vrtání, řezat M6

Úkon:

Přídavky rozdělit. Vrtat pro M6, řezat M6.

Operace 050 – Tepelné zpracování

Úkon:

Cementovat a kalit na HRC = 62±1.

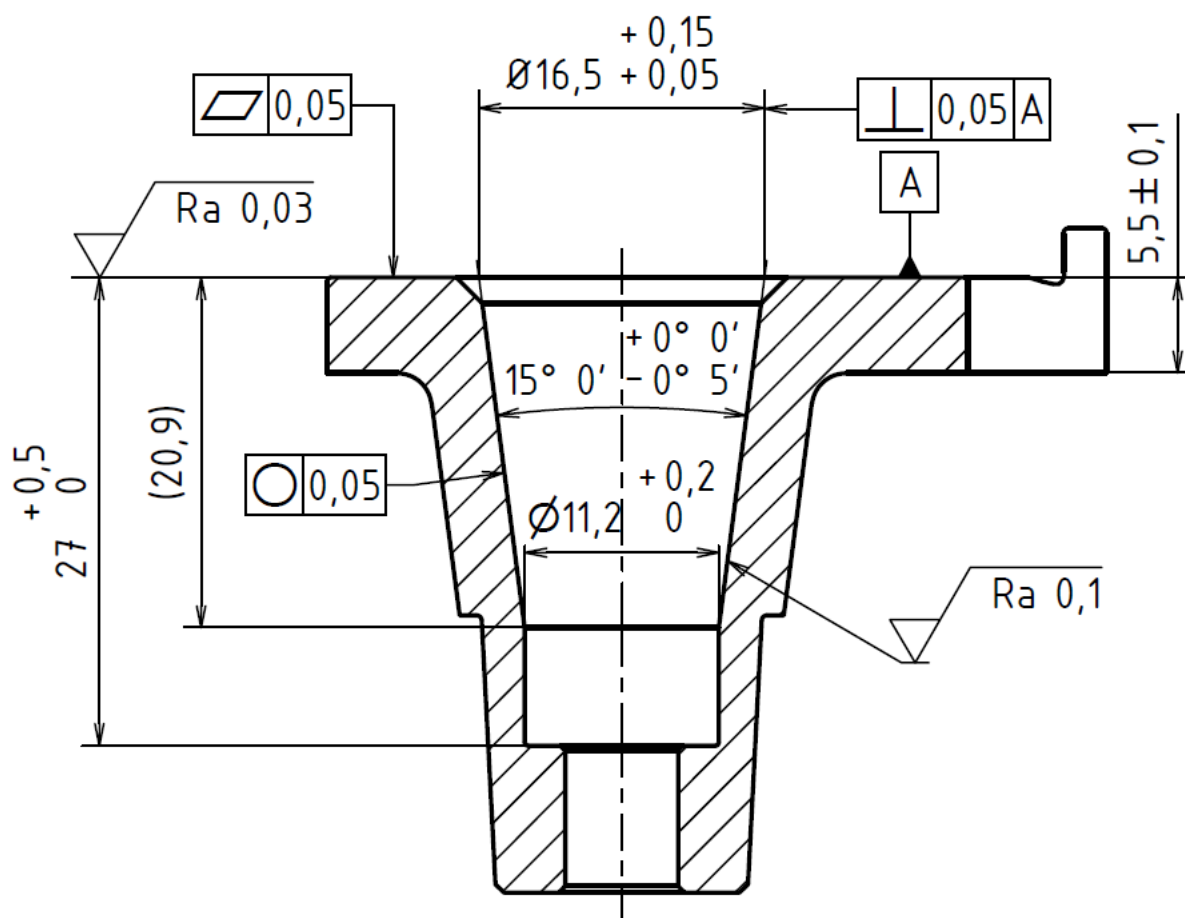
Operace 060 – Broušení

Úkon:

Přídavky rozdělit. Brousit rozměry $90 \pm 0,02$; $52 \pm 0,02$, $44 \pm 0,02$ a $2 \pm 0,01$ – úhlovat.

6.4 Návrh technologie pro dosažení minimální drsnosti povrchu

Na řešeném díle je na horní plochu několik požadavků; drsnost lepší než $Ra = 0,03$, rovinnost $0,05$ mm a kolmost kuželu k ploše v toleranci $0,05$ mm. V dosavadní výrobě probíhá leštění horní plochy ručně pomocí plstěného kotouče a leštící pasty. Při této technologii není zaručena rovinnost a opakovatelnost stejných vlastností plochy. Zároveň je do dílu přivedeno obrovské množství tepla, což má zřejmě za následek vytrhávání částí povrchu ve směru leštění plstěným kotoučem.



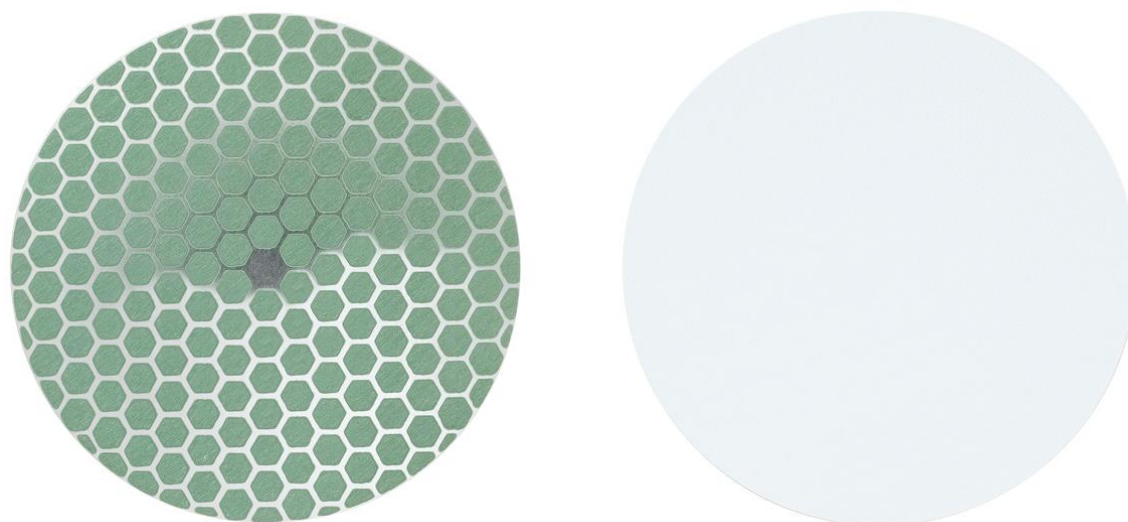
Obrázek 30, Řešené technologické prvky Tibiálního plata

6.4.1 Návrh lapovacích hlav

Jak již název kapitoly napovídá, zvolená technologie byla lapování. Lapováním by se teoreticky mělo dosahovat drsnosti $Ra = 0,01$. Při návrhu se vycházelo z metodiky pro výbrus metalografických vzorků. Bylo tedy třeba navrhnout lapovací hlavu s vhodným plátnem jako unáščem brusiva.

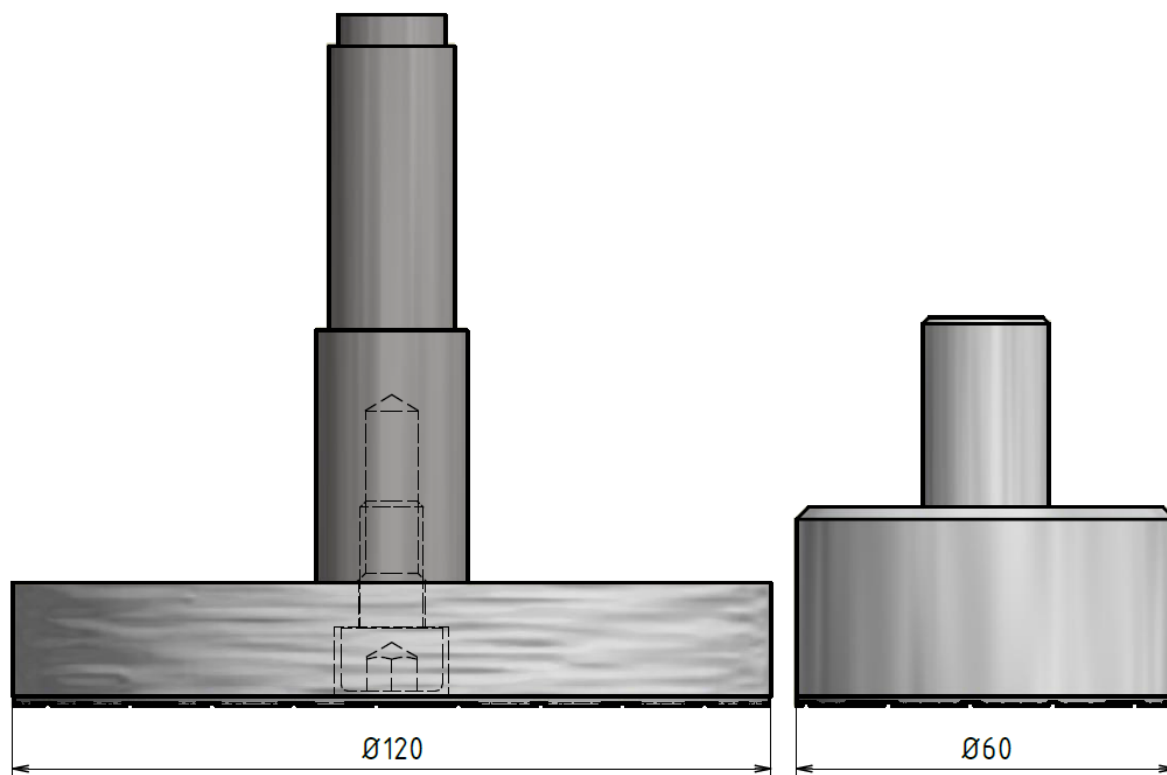
Materiál přípravku musel vykazovat dostatečnou tvrdost, korozivzdornost a zároveň nízkou hmotnost. Pro velkou lapovací hlavu (příloha 1_001_000 a 1_002_000) byl zvolen materiál tyče (příloha 1_001_002) EN 1.4000, jedná se tedy o nerezovou ocel. Pro lapovací hlavu (příloha 1_001_001), z hlediska úspory hmotnosti, byl zvolen letecký dural EN AW-7075 T6. Pro malou lapovací hlavu (příloha 1_004_000 a 1_005_000) byl zvolen opět letecký dural EN AW-7075 T6.

Pro účely zkoušek bylo k dispozici několik již používaných leštících pláten o průměru 250 mm. Vybrána byla plátna MD – Plus a MD – Largo. Plátno MD – Plus je určeno pro jednofázové leštění slinutých karbidů a ocelí. Jako materiál unášče je zde využít syntetický vlas. Plátno MD – Largo je určeno pro jednokrokové jemné broušení materiálů tvrdosti $>HV 40$, v kombinaci s diamantem. Pro kujné materiály jako neželezné kovy a nerezové oceli, ale také pro křehké materiály jako keramika a tvrdé minerály.



Obrázek 31, MD – Largo (vlevo), MD – Plus (vpravo)

Pro plátno MD – Largo byla zvolena universální diamantová suspenze s velikostí zrna 9 μm pro metalografické jemné broušení a leštění. Směs obsahuje jak diamantovou suspenzi, tak chladicí směs. Pro plátno MD – Plus byla zvolena suspenze o stejném složení s velikostí zrna 3 μm .



Obrázek 32, Lapovací hlava velká (vlevo) a malá (vpravo)

Problematické se ukázalo býti spojení lapovacího plátna s celou hlavou. Na metalografické brusce je spojení zajištěno pomocí magnetu. Z důvodu menší plochy vystřiženého plátna oproti ploše celkové bylo navrženo přilepení. První testy byly provedeny s lepidlem Pattex Chemoprén extrém. Lepidlo bohužel nevydrželo zatížení a pro další testování bylo použito lepidlo Pattex Repair epoxy ultra strong. Toto lepidlo by mělo odolat síle 130 $\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$, teplotě do 150 $^{\circ}\text{C}$ a strojnímu obrábění. K maximálnímu vytvrzení dochází po 24 hodinách.

Při reálném nasazení do výroby a možnosti výměny lapovacích pláten bude nutné vyvinout nový způsob upínání. Jako nejlepší varianta se nabízí upevnění magnetu na lapovací hlavu. Magnet musí udržet plátno při cca 500 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$ a minimální přitlačné síle. Vytipovaný

magnet pro další testy byl Neodymový magnetický válec pr. 70 x 20 mm, s odtrhovou silou 96,5 kg a teplotní odolností 80 °C s cenou 1 060 Kč.

U velké lapovací hlavy slouží ke spojení tyče a hlavy šroub se zápusťnou hlavou M10 x 20. Upínání hlavy do hlavičky zajišťuje kleština o průměru 20 mm. Jako stroj pro zkoušky byla navržena frézka F2V s digitálním odměřováním.

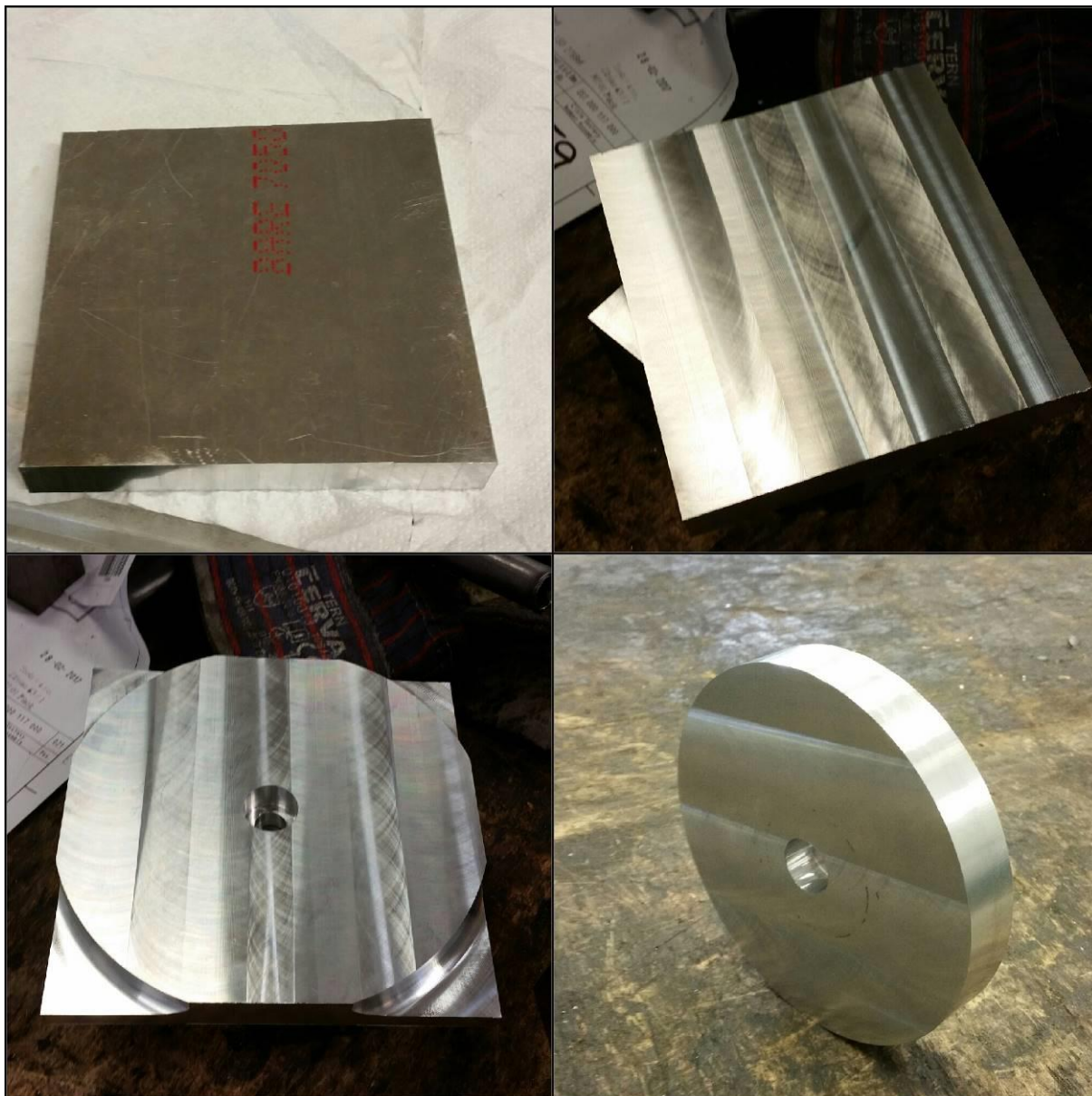
Velikosti hlav (Obr. 32) vycházely z rozměru dílu s tím, že u velké hlavy měl být v záběru pouze poloměr nástroje, zatímco u malé hlavy by mělo docházet ke kontaktu v téměř celém průměru. Jako první se do fáze výroby dostala pouze velká hlava. Po zdařilých testech byla vyrobena i hlava malá.

6.4.2 Výroba lapovacích hlav

Kvůli návrhu přilepení lapovacích pláten musely být vyrobeny dvě hlavy od každé velikosti. Pro první zkoušky se počítalo pouze s velkou hlavou. Kvůli zjednodušení výroby byla navržena velká lapovací hlava jako sestava.

Upínací tyč byla vyrobena z polotovaru o průměru 25 mm a délce 95 mm. Materiál byl již zmíněná nerezová ocel EN 1.4000. Obrábění bylo prováděno na univerzálním soustruhu SV 18. V první operaci se zarovnal čelo, vyvrtána díra 8,5 mm pod závit, vyřízl závit a obrobil průměr 24 mm. Ve druhé operaci následovalo zarovnání druhého čela a vyvrtání středícího důlku. Ve třetí operaci byl díl podepřen hrotem a obroben průměr 17 mm a 20 mm.

Hlava ze sestavy velké lapovací hlavy byla vyrobena z polotovaru 130 x 130 x 20 mm. Obrábění probíhalo na CNC frézce MAS MCV 750 s řídicím systémem Heidenhain. Všechny operace byly programovány ručně pomocí dialogu. V první operaci byla přerovnána plocha síly, díl byl upnut ve svěráku. Ve druhé operaci byl díl otočen, upnut do svěráku a doklepán na dvě podložky. Následovalo frézování síly na rozměr 18+1 mm, vyvrtání díry o průměru 10,5 mm, frézování zahloubení průměr 18 x 11 mm a vyfrézování průměru 130 mm pro najíždění po přeupnutí. Ve třetí operaci byl díl podložen podložkou a skrz díru přitažen přes podložku šroubem. Průměr 130 mm byl najet vykrúžovacími hodinkami a následovalo obrobení průměru 120 mm. Jednotlivé operace lze sledovat na obrázku 33.



Obrázek 33, Sled operací na dílu Hlava

Po následném smontování hlavy a tyče pomocí šroubu M10 x 20, došlo k přebrobení průměru 120 mm a kontaktní plochy na soustruhu s kleštinovým upínačem. Toto opatření bylo provedeno kvůli celkovému házení hlavy.

Nyní přišla na řadu úprava lapovacího plátna. Plátna se pro metalografické brusky dodávají v průměrech 200, 250 a 300 mm. Bylo tedy nutné plátno nůžkami na plech vystříhnout na průměr 125 mm. Pro použití v praxi navrhuji řezání plátna na vodním paprsku, nebo vystřížení střížníkem, dle možností podniku.

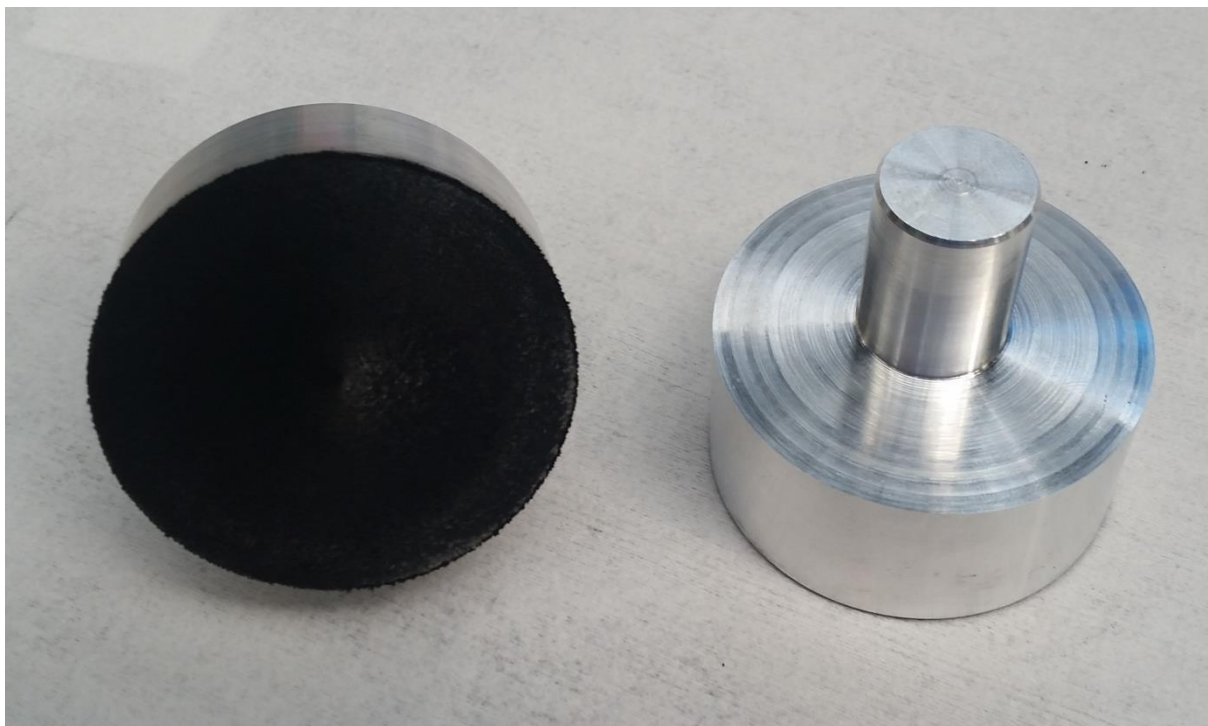
Poté bylo naneseno na lapovací hlavu a plátno lepidlo Pattex Chemoprén extrém. Lepidlo se nechalo 15 minut odvětrat a následně byly oba kusy stlačeny na pákovém lisu. Slepené kusy se zatěžkaly a zůstaly tak 12 hodin. Další den byly okraje plátna zbrušeny na kotoučové brusce. Při pokusu, o strojní odebrání otřepu na soustruhu, lepidlo plátno neudrželo a došlo k narušení spoje. Bylo tedy nutné vyzkoušet jiné lepidlo. Jako další bylo použito lepidlo Pattex Repair epoxy ultra strong. Díl s plátnem nebyl stlačen na lisu, ale pouze zatěžkán a nechán 48 hodin vytvrdit. Lepidlo vydrželo strojní obrábění lapovacího plátna k průměru 120 mm, za účelem orovnění kraje plátna na soustruhu s kleštinovým upínačem (obrázek 23).



Obrázek 34, Soustružení nalepeného plátna

Pro malou lapovací hlavu byl zvolen stejný materiál jako pro díl hlava, tedy EN AW-7075 T6. Polotovarem byla tyč o průměru 65 mm a délce 65 mm. Soustružení se projevilo jako velmi problematické. Materiál tvořil tzv. nekonečnou třísku. V první operaci byl obroben průměr 20 mm a zarovnáno čelo. Ve druhé operaci byl díl otočen, přesoustružen na průměr 60 mm a následně bylo zarovnáno čelo. Pro lepší pevnost lepeného spoje, byly

na stykové ploše vyrobeny dvě drážky. Lepení a zarovnání plátna na soustruhu probíhalo stejně jako u velké lapovací hlavy.

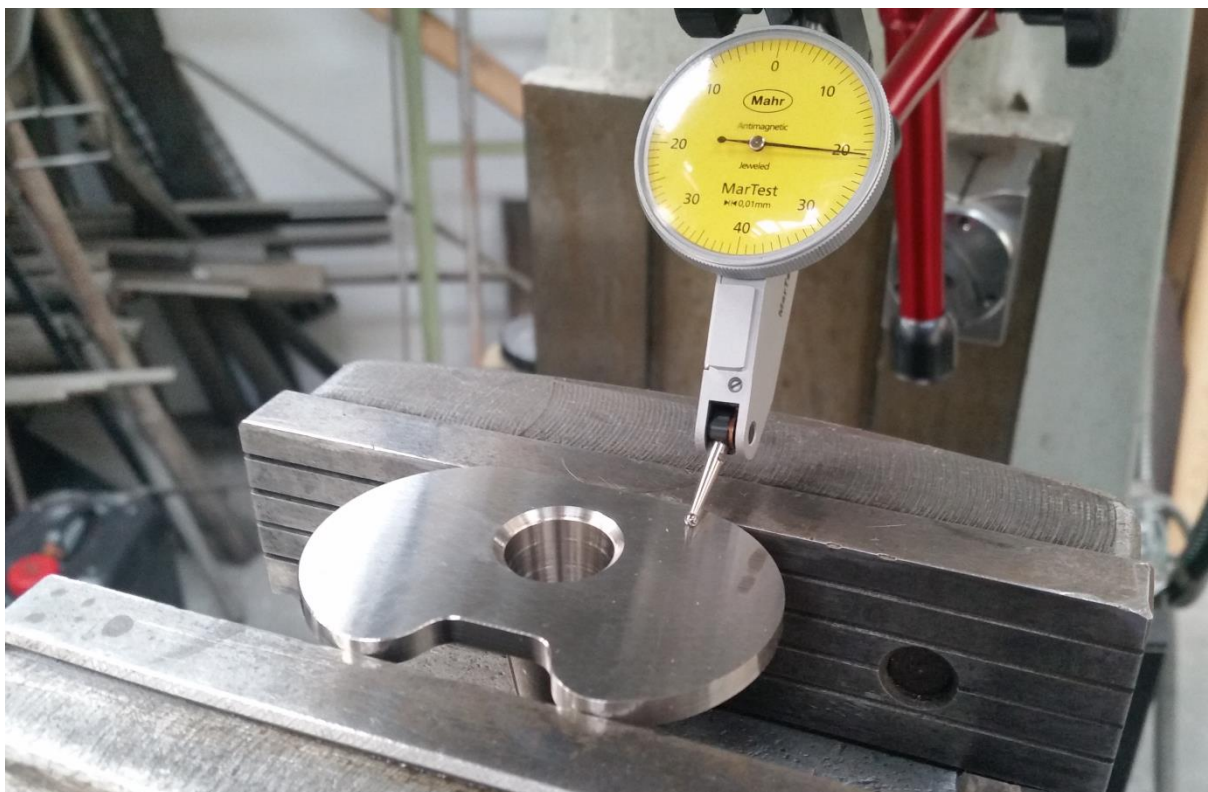


Obrázek 35, Malé lapovací hlavy

7 Technologické zkoušky

CoCrMo slitina by měla vykazovat vysokou leštitelnost. K dispozici pro technologické zkoušky byly čtyři díly. Jeden z dílů byl díl řešený s výstupky, zbylé tři byly modifikace bez výstupků. Materiál a způsob výroby polotovaru byl u všech kusů stejný.

Stroj pro zkoušky byla již zmíněná frézka F2V s digitálním odměřováním. K upínání byl použit svěrák na sklopném stole v jedné ose. Rovnání podle horní plochy se ukázalo jako velmi náročné. Při použití přípravku by se měla doba rovnání rapidně snížit. Pro přesné vyrovnání dílu se používal páčkový úchylkoměr Mahr 800SG (Obr. 36). Rovinnost vyrovnané plochy byla vždy do 0,02 mm.



Obrázek 36, Upnutí Tibiálního plata pro lapování

Vyhodnocení drsnosti bylo provádění na profiloměru Mahr XCR 20. Měření bylo vždy prováděno dvakrát ve směru posuvu lapovací hlavy a dvakrát ve směru kolmo na posuv.

7.1 Zkoušky pro dosažení minimální drsnosti povrchu

Při těchto zkouškách nebyl brán zřetel na výrobní čas. Docházelo k seznamování s procesem a možností opakovatelnosti dosahované drsnosti.

7.1.1 Pokus 1

Díl: Tibiální plato s výstupky

Výchozí povrch: Frézován

Nástroj: Velká lapovací hlava hrubá a jemná

Suspenze: Diamantová suspenze s velikostí zrna 9 μm a 3 μm

Tabulka 12, Postup lapování pokus 1

Přejezd	Ot [min^{-1}]	f_{min} [mm]	Přísuv v Z [mm]	Hrubá+9 μm	Jemná+3 μm
1.	75	40	0,000	•	
2.	100	40	0,000	•	
3.	100	40	-0,010	•	
4.	100	40	-0,010	•	
5.	180	40	0,000	•	
6.	180	40	0,000		•
7.	180	40	-0,010		•
8.	180	40	-0,010		•
9.	180	112	0,000		•
10.	224	40	-0,010		•
11.	224	40	-0,010		•
12.	224	40	-0,010		•
13.	224	40	-0,010		•

Pro první pokus byl určen díl s frézovaným povrchem. Bylo nutné vyzkoušet, zda lepidlo udrží lapovací plátno a možnosti najíždění Z hladiny. Najíždění probíhalo při ručních otáčkách nástroje na 0,05 mm silnou planžetu. Styková plocha hrubého plátna na velké hlavě nebyla celým svým obsahem v kontaktu, zjevně se projevila nepřesnost při lepení. Při lapování s hrubým plátnem docházelo u posledních přejezdů k mírnému zahřátí dílu

a lapovací hlavy. Lze to považovat za signál k výměně lapovací hlavy s hrubým plátnem za jemné plátno. Při ustavení plochy s přesností 0,02 mm bylo dosažení záběru na celé ploše. Pro tento díl nebyly vyhotoveny zkoušky drsnosti, jelikož se nepodařilo dokonale rozleštit stopy po frézování.

7.1.2 Pokus 2

Díl: Tibiální plato bez výstupků I.

Výchozí povrch: Strojně broušen $R_a = 0,05$

Nástroj: Velká lapovací hlava hrubá a jemná

Suspenze: Diamantová suspenze s velikostí zrna 9 μm a 3 μm

Tabulka 13, Postup lapování pokus 2

Přejezd	Ot [min^{-1}]	f_{min} [mm]	Přísuv v Z [mm]	Hrubá+9 μm	Jemná+3 μm
1.	224	40	0,000	•	
2.	224	40	-0,010	•	
3.	224	40	-0,010	•	
4.	300	40	0,000	•	
5.	300	40	0,000		•
6.	300	40	-0,010		•
7.	350	40	-0,005		•
8.	400	28	-0,005		•
9.	450	28	0,000		•

Pro pokus 2 byl použit díl, který byl strojně broušen. Na díle bylo dosaženo záběru na celé ploše a dosaženou drsnost lze vidět v tabulce 14. Nejlepšího vzhledu povrchu bylo dosaženo při 450 $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$ a posuvu 28 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Více otáček by zřejmě vyvolalo větší tření a tím pádem větší množství vneseného tepla, čemuž jsme se chtěli vyvarovat.

Tabulka 14, Výsledná drsnost pokus 2

Měření	Ve směru posuvu		Ve směru kolmo na posuv	
	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
1	0,0045	0,0400	0,0100	0,0510
2	0,0088	0,1221	0,0104	0,0594
Ø	0,0067	0,0811	0,0102	0,0552

7.1.3 Pokus 3

Díl: Tibiální plato bez výstupků II.

Výchozí povrch: Ručně broušen na metalografické brusce

Nástroj: Velká lapovací hlava hrubá a jemná

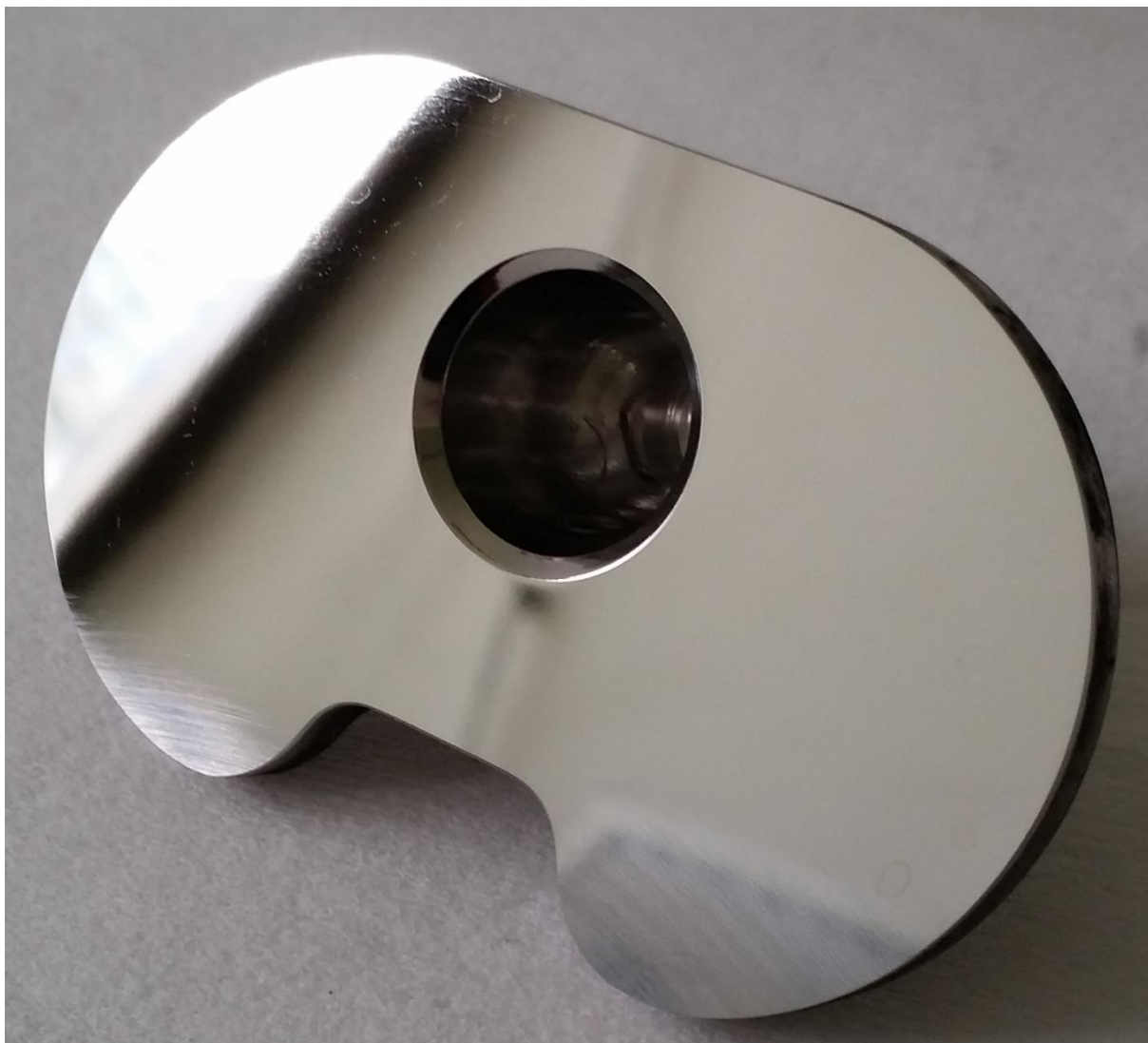
Suspenze: Diamantová suspenze s velikostí zrna 9 μm a 3 μm

Tabulka 15, Postup lapování pokus 3

Přejezd	Ot [min^{-1}]	f_{min} [mm]	Přísuv v Z [mm]	Hrubá+9 μm	Jemná+3 μm
1.	250	28	0,000	•	
2.	250	28	-0,005	•	
3.	315	28	-0,010	•	
4.	355	28	-0,010	•	
5.	355	28	0,000	•	
6.	355	28	0,000		•
7.	400	28	-0,010		•
8.	400	40	-0,010		•
9.	400	28	-0,010		•
10.	450	28	-0,005		•
11.	450	28	-0,005		•
12.	450	28	0,000		•

Pro pokus 3 byl použit díl přebroušený na metalografické brusce. O přebroušení se rozhodlo z důvodu vycházet vždy z podobné plochy. Samozřejmě bylo bráno v úvahu, že plocha bude v nějakých místech podbroušena a nemůže dojít k záběru na celé ploše.

To můžeme vidět na obrázku 35. Pro představu o časové náročnosti trvalo vylapování plochy okolo dvou hodin.



Obrázek 37, Vylapované Tibiální plato II.

Tabulka 16, Výsledná drsnost pokus 3

Měření	Ve směru posuvu		Ve směru kolmo na posuv	
	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
1	0,0034	0,0228	0,0028	0,0155
2	0,0047	0,0294	0,0031	0,0197
Ø	0,0041	0,0261	0,0030	0,0176

7.1.4 Pokus 4

Díl: Tibiální plato bez výstupků III.

Výchozí povrch: Ručně broušen na metalografické brusce

Nástroj: Malá lapovací hlava hrubá a jemná

Suspenze: Diamantová suspenze s velikostí zrna 9 μm a 3 μm

Tabulka 17, Postup lapování pokus 4

Přejezd	Ot [min^{-1}]	f_{min} [mm]	Přísuv v Z [mm]	Hrubá+9 μm	Jemná+3 μm
1.	400	28	0,000	•	
2.	400	28	-0,010	•	
3.	400	28	-0,010	•	
4.	400	28	-0,005	•	
5.	400	28	0,000	•	
6.	450	28	0,000		•
7.	450	28	-0,010		•
8.	450	28	-0,010		•
9.	500	28	-0,005		•
10.	500	28	0,000		•

Při tomto pokusu byly poprvé zařazeny malé lapovací hlavy. U hrubšího plátina se prokazatelně zvětšila styková plocha. Ve dvou místech byla opět plocha podbroušena, vlivem ručního broušení. Teoreticky se vzdálenost styku zkrátila o 60 mm na jednom přejezdu, ale na výslednou drsnost to nemělo vliv. Doba lapování se zkrátila přibližně o hodinu, což je údaj čistě informační.

Tabulka 18, Výsledná drsnost pokus 4

Měření	Ve směru posuvu		Ve směru kolmo na posuv	
	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
1	0,0031	0,0214	0,0033	0,0384
2	0,0039	0,0249	0,0029	0,0248
Ø	0,0035	0,0232	0,0039	0,0316

7.2 Zkoušky pro dosažení předepsané drsnosti povrchu

Pro následující zkoušky byly dva díly strojně přebroušeny na rovinné brusce. Hlavními sledovanými parametry zde byla drsnost a výrobní čas pro dokázání, že lze metodu reálně nasadit do výroby.

7.2.1 Pokus 5

Díl: Tibiální plato bez výstupků III.

Výchozí povrch: Strojně broušen $R_a = 0,2$

Nástroj: Velká lapovací hlava jemná

Suspenze: Diamantová suspenze s velikostí zrna $9 \mu\text{m}$

Tabulka 19, Postup lapování pokus 5

Přejezd	Ot [min^{-1}]	f_{min} [mm]	Přísuv v Z [mm]	Jemná+9 μm
1.	450	28	0,000	•
2.	450	28	-0,010	•
3.	450	28	-0,010	•
4.	450	28	-0,005	•
5.	450	28	-0,005	•

Pro tento vzorek nebylo vyhotoveno měření drsnosti, jelikož nedošlo k záběru na většině plochy a pokus byl vyhodnocen jako nezdařilý. Byla použita jenom hlava jemná se suspenzí s velikostí zrna $9 \mu\text{m}$. Výchozí drsnost byla větší než u předchozích kusů, což se zjevně také promítlo na výsledku.

7.2.2 Pokus 6

Díl: Tibiální plato s výstupky

Výchozí povrch: Strojně broušen $R_a = 0,15$

Nástroj: Malá lapovací hlava jemná a hrubá

Suspenze: Diamantová suspenze s velikostí zrna $9 \mu\text{m}$ a $3 \mu\text{m}$

Tabulka 20, Postup lapování pokus 6

Přejezd	Ot [min^{-1}]	f_{min} [mm]	Přísuv v Z [mm]	Hrubá+9 μm	Jemná+3 μm
1.	450	40	0,000	•	
2.	450	40	-0,010	•	
3.	450	40	-0,010	•	
4.	450	40	-0,010	•	
5.	450	28	-0,005	•	
6.	450	28	0,000	•	
7.	500	40	0,000		•
6.	500	40	0,010		•
7.	500	40	-0,010		•
8.	500	40	-0,010		•
9.	500	28	-0,010		•
10.	500	28	-0,005		•
11.	500	28	-0,005		•
12.	500	28	0,000		•

Pro tento pokus opět nebyla měřena drsnost, jelikož byl považován za nezdařilý. Opět se vycházelo z povrchu s větší drsností a to se promítlo do výsledku.

7.2.3 Pokus 7

Díl: Tibiální plato s III.

Výchozí povrch: Strojně broušen $R_a = 0,04$

Nástroj: Malá lapovací hlava jemná a hrubá

Suspenze: Diamantová suspenze s velikostí zrna 9 μm a 3 μm

Tabulka 21, Postup lapování pokus 7

Přejezd	Ot [min^{-1}]	f_{min} [mm]	Přísuv v Z [mm]	Hrubá+9 μm	Jemná+3 μm
1.	560	40	0,000	•	
2.	560	40	-0,010	•	
3.	560	40	-0,010	•	

Přejezd	Ot [min^{-1}]	f_{min} [mm]	Přísuv v Z [mm]	Hrubá+9 μm	Jemná+3 μm
4.	560	40	-0,010	•	
5.	560	40	-0,005	•	
6.	560	40	0,000	•	
7.	560	40	0,000		•
6.	560	40	-0,010		•
7.	560	40	-0,010		•
8.	560	40	-0,010		•
9.	560	40	-0,010		•
10.	560	40	-0,010		•
11.	560	28	-0,005		•
12.	560	28	0,000		•

Po dvou nezdařilých pokusech byla testována metoda znovu. Plocha byla přebroušena externě na drsnost $R_a = 0,04$. Otáčky byly zvýšeny na 560 min^{-1} , což lze považovat za přípustné maximum. Při posledních průjezdech u každé hlavy docházelo k zahřívání. Z plochy se dokonale podařilo odstranit stopy po broušení.

Tabulka 22, Výsledná drsnost pokus 7

Měření	Ve směru kolmo na posuv	
	R_a [μm]	R_z [μm]
1	0,0082	0,0444
2	0,0095	0,0572
Ø	0,0089	0,0508

7.2.4 Pokus 8

Díl: Tibiální plato s IV.

Výchozí povrch: Strojně broušen $R_a = 0,05$

Nástroj: Malá lapovací hlava jemná

Suspenze: Diamantová suspenze s velikostí zrna 3 μm

Tabulka 23, Postup lapování pokus 8

Přejezd	Ot [min^{-1}]	f_{min} [mm]	Přísuv v Z [mm]	Jemná+3 μm
1.	560	40	0,000	•
2.	560	40	-0,010	•
3.	560	40	-0,010	•
4.	560	40	-0,010	•
5.	560	40	-0,010	•
6.	560	40	-0,010	•
7.	560	28	-0,005	•
8.	560	28	-0,005	•
9.	560	28	0,000	•

Cílem tohoto pokusu bylo urychlení metody, proto tedy byla použita pouze jemná hlava s 3 μm diamantovou suspenzí. Povrch vykazoval zbytkové stopy po broušení. Doba lapování bez přípravy byla okolo 35 minut. U posledních přejezdů opět docházelo k zahřívání dílu.

Tabulka 24, Výsledná drsnost pokus 8

Měření	Ve směru kolmo na posuv	
	Ra [μm]	Rz [μm]
1	0,0053	0,0289
2	0,0048	0,0263
\emptyset	0,0051	0,0276

7.2.5 Pokus 9

Díl: Tibiální plato s výstupky

Výchozí povrch: Strojně broušen Ra = 0,04

Nástroj: Malá lapovací hlava jemná

Suspenze: Diamantová suspenze s velikostí zrna 3 μm

Tabulka 25, Postup lapování pokus 9

Přejezd	Ot [min^{-1}]	f_{min} [mm]	Přísuv v Z [mm]	Jemná+3 μm
1.	560	40	0,000	•
2.	560	40	-0,010	•
3.	560	40	-0,010	•
4.	560	40	-0,010	•
5.	560	40	-0,010	•
6.	560	40	-0,010	•
7.	560	40	-0,010	•
8.	560	40	-0,010	•
9.	560	28	-0,005	•
10.	560	28	-0,005	•
11.	560	28	0,000	•

Při posledním pokusu byla opět použita pouze jemná hlava s 3 μm diamantovou suspenzí. Povrch na hranách, které byly u čelistí svěráku, není vyleštěn. Zřejmě za to může přepnutí dílu ve svěráku.

Tabulka 26, Výsledná drsnost pokus 9

Měření	Ve směru kolmo na posuv	
	Ra [μm]	Rz [μm]
1	0,0091	0,0567
2	0,0068	0,0530
Ø	0,0080	0,0549

8 Závěr

Teoretická část diplomové práce pojednává o nejpoužívanějších CoCr slitinách určených pro bioimplantáty. Pozornost je věnována především chemickému složení, výrobě polotovarů a technologickým vlastnostem. Dále je podrobně rozpracován přehled nástrojových materiálů a dokončovacích technologií, které by byly potenciálně aplikovatelné na dokončení řešeného dílu.

Pro potřeby průmyslového partnera byla provedena analýza stávajícího výrobního postupu v technologii frézování, broušení a leštění. Bylo upozorněno na technologické nedostatky a byla navržena nápravná opatření. Tato opatření se neomezují pouze na výrobu konkrétního dílu, ale jsou obecně přenositelná na celý výrobní program. Zvláštní pozornost byla věnována nástrojovému hospodářství.

Po důkladném rozboru výrobního postupu byl navržen výrobní postup nový. Ten by měl přinést zrychlení výroby dílu a hlavně zvýšení přesnosti, opakovatelnosti a rychlosti při dokončování, a to díky optimalizaci přídavek a sjednocení hladiny Z pro obrábění.

Při návrhu přípravku se vycházelo z nedokončeného přípravku, který byl k dispozici u průmyslového partnera. Důraz byl kladen na zamezení průhybu upnutého kusu, na jednoduchost a přesnost upínání.

Navržený přípravek pro nový postup by se mohl stavebnicově upínat do šablony například po 3 kusech, čímž by se urychlila technologie broušení a dokončování povrchu. V každém případě bude nutné přípravek otestovat a vyzkoušet správné umístění dosedacích ploch, aby zde nedocházelo k průhybu dílu.

Byla navržena technologie strojního lapování povrchu tibiálního plata. Byly vyrobeny celkem čtyři lapovací hlavy se dvěma druhy leštících plátén. Jako leštící element byla použita diamantová suspenze s velikostí zrna 3 μm a 9 μm .

Z výsledku navržené technologie lapování vyplývá, že touto metodou je možné získat zrcadlový povrch a o řád lepší drsnost, než je požadována výkresem. Lepších výsledků by se

jednoznačně dosáhlo upnutím kusu do navrženého přípravku. Utahování momentovým klíčem zajistí, že nebude docházet k přepnutí a vyboulení povrchu. Přípravu a upínání ve svěráku nelze použít v reálné výrobě z důvodu extrémní spotřeby dávkových časů a nedostatečné opakovatelnosti.

Pro zavedení technologie do sériové výroby lze využít libovolné CNC frézky menších rozměrů. Vzhledem k jednoduchému požadavku na kinematiku stroje by bylo vhodné zvážit nákup jednoúčelového zařízení vyrobeného na zakázku.

Celkově lze říci, že navržená dokončovací metoda vyhovuje výkresovým požadavkům, a proto ji lze doporučit pro zavedení do sériové výroby. Přesto bude potřeba provést ještě několik finálních úprav, které povedou k jejímu zdokonalení.

Použitá literatura

- [1] MACEK, Karel. *Kovové materiály*. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 8001035131.
- [2] *Biomaterials science: an introduction to materials in medicine*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2004. ISBN 0125824637.
- [3] ISO 5832-4. *Implants for surgery - Metallic materials - Part 4: Cobalt-chromium-molybdenum casting alloy*. Second edition. Praha: Český normalizační institut, 1996.
- [4] ISO 5832-5. *Implants for surgery - Metallic materials - Part 5: Wrought cobalt-chromium-tungsten-nickel alloy*. Third edition. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [5] ISO 5832-6. *Implants for surgery - Metallic materials - Part 6: Wrought cobalt-nickel-chromium-molybdenum alloy*. Second edition. Praha: Český normalizační institut, 1997.
- [6] FILIP, Peter. *Progresivní typy biomateriálů*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1995. ISBN 8070782730.
- [7] SHOKRANI, ALBORZ, Vimal DHOKIA a Stephen T. NEWMAN. Cryogenic High Speed Machining of Cobalt Chromium Alloy. *Procedia CIRP* [online]. 2016, **2016**(46), 404-407 [cit. 2017-04-13]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827116302001>
- [8] OHMORI, H., K. KATAHIRA, Y. AKINOU, J. KOMOTORI a M. MIZUTANI. Investigation on Grinding Characteristics and Surface-Modifying Effects of Biocompatible Co-Cr Alloy. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* [online]. 2006, **55**(1), 597-600 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://80.www.sciencedirect.com/dialog/cvut.cz/science/article/pii/S0007850607604910>

- [9] SARIKAYA, Murat a Abdulkadir GÜLLÜ. Examining of Tool Wear in Cryogenic Machining of Cobalt-Based Haynes 25 Superalloy. *International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering* [online]. 2015, **104**(8), 984-988 [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: <http://waset.org/publications/10001925>
- [10] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM Publishing, 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [11] DILLINGER, Josef. *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. Praha: Europa-Sobotáles, 2007. ISBN 978-80-86706-19-1.
- [12] MÁDL, Jan a Ivo KVASNIČKA. *Optimalizace obráběcího procesu*. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-01-01864-6.
- [13] Trendy v povlakování slinutých karbidů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2001, **2001**(7), 43 [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-v-povlakovani-slinutych-karbidu.html>
- [14] MÁDL, Jan a Jaroslav BARCAL. *Základy technologie II*. Vyd. 2. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03733-1.
- [15] HNILICA, Jaroslav, Dobroslav NĚMEC a Jan ODEHNAL. *Strojírenská technologie: učebnice pro 3. ročník středních průmyslových škol strojnických*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1979. Řada strojírenské literatury.
- [16] Nekonvenční metody obrábění. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2007, **2007**(10), 58 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-2-2.html>

Seznam obrázků

<i>Obrázek 1, Mikrostruktura ASTM F75 spékaná [2]</i>	10
<i>Obrázek 2, Mikrostruktura ASTM F652</i>	13
<i>Obrázek 3, Opatření hřbetu (vlevo) a opatření čela (vpravo) [7]</i>	16
<i>Obrázek 4, Drsnost hotového povrchu slitiny CoCr [8]</i>	18
<i>Obrázek 5, Počet uchycených buněk [8]</i>	19
<i>Obrázek 6, Graf závislosti opotřebení hřbetu VB_{max} na řezné rychlosti v_c [9]</i>	20
<i>Obrázek 7, Mechanické vlastnosti používaných materiálů [11]</i>	21
<i>Obrázek 8, Nástrojová geometrie bříty soustružnického nože [14]</i>	26
<i>Obrázek 9, Nástrojová geometrie bříty broušícího kotouče [14]</i>	27
<i>Obrázek 10, Nastavení a upnutí diamantu pro jemné soustružení [15]</i>	28
<i>Obrázek 11, Honovací hlava a princip honování [15]</i>	29
<i>Obrázek 12, Superfinašování [15]</i>	30
<i>Obrázek 13, Lapování [15]</i>	31
<i>Obrázek 14, Vnější a vnitřní válečkování [15]</i>	32
<i>Obrázek 15, Tibiální plato</i>	34
<i>Obrázek 16, Schéma upnutí op. 010</i>	36
<i>Obrázek 17, Schéma upnutí op. 020</i>	37
<i>Obrázek 18, Schéma upnutí op. 030</i>	38
<i>Obrázek 19, Schéma upnutí op. 040</i>	39
<i>Obrázek 20, Schéma upnutí op. 100</i>	41
<i>Obrázek 21, Schéma upnutí op. 130</i>	43
<i>Obrázek 22, Souřadné systémy dílu</i>	46
<i>Obrázek 23, Schéma upnutí op. 010N</i>	47
<i>Obrázek 24, Schéma upnutí op. 020N</i>	48
<i>Obrázek 25, Schéma upnutí op. 030N</i>	49
<i>Obrázek 26, Schéma upnutí op. 090N</i>	51
<i>Obrázek 27, Schéma upnutí op. 100N</i>	51
<i>Obrázek 28, Přípravek</i>	54
<i>Obrázek 29, Způsob ustavení dílu v přípravku</i>	55
<i>Obrázek 30, Řešené technologické prvky Tibiálního plata</i>	57
<i>Obrázek 31, MD – Largo (vlevo), MD – Plus (vpravo)</i>	58
<i>Obrázek 32, Lapovací hlava velká (vlevo) a malá (vpravo)</i>	59
<i>Obrázek 33, Sled operací na dílu Hlava</i>	61
<i>Obrázek 34, Soustružení nalepeného plátna</i>	62
<i>Obrázek 35, Malé lapovací hlavy</i>	63
<i>Obrázek 36, Upnutí Tibiálního plata pro lapování</i>	64
<i>Obrázek 37, Vylapované Tibiální plato II.</i>	68

Seznam tabulek

<i>Tabulka 1, Chemické složení Co-Cr-Mo [3]</i>	10
<i>Tabulka 2, Porovnání mech. vlastností Co-Cr-Mo [2]</i>	11
<i>Tabulka 3, Mech. vlastnosti ASTM F90 [2]</i>	12
<i>Tabulka 4, Chemické složení Co-Cr-W-Ni [4]</i>	12
<i>Tabulka 5, Mech. vlastnosti ASTM F562 [2]</i>	14
<i>Tabulka 6, Chemické složení Co-Ni-Cr-Mo [5]</i>	14
<i>Tabulka 7, Podmínky experimentu [8]</i>	17
<i>Tabulka 8, Popis Obr. 8 [14]</i>	27
<i>Tabulka 9, Rozbor časů výrobního postupu</i>	35
<i>Tabulka 10, Rozbor časů dle technologie</i>	36
<i>Tabulka 11, Kruhové házení nástrojů</i>	46
<i>Tabulka 12, Postup lapování pokus 1</i>	65
<i>Tabulka 13, Postup lapování pokus 2</i>	66
<i>Tabulka 14, Výsledná drsnost pokus 2</i>	67
<i>Tabulka 15, Postup lapování pokus 3</i>	67
<i>Tabulka 16, Výsledná drsnost pokus 3</i>	68
<i>Tabulka 17, Postup lapování pokus 4</i>	69
<i>Tabulka 18, Výsledná drsnost pokus 4</i>	69
<i>Tabulka 19, Postup lapování pokus 5</i>	70
<i>Tabulka 20, Postup lapování pokus 6</i>	71
<i>Tabulka 21, Postup lapování pokus 7</i>	71
<i>Tabulka 22, Výsledná drsnost pokus 7</i>	72
<i>Tabulka 23, Postup lapování pokus 8</i>	73
<i>Tabulka 24, Výsledná drsnost pokus 8</i>	73
<i>Tabulka 25, Postup lapování pokus 9</i>	74
<i>Tabulka 26, Výsledná drsnost pokus 9</i>	74

Seznam příloh

DRSNOST_POKUS_2

DRSNOST_POKUS_2_KOLMO

DRSNOST_POKUS_3

DRSNOST_POKUS_3_KOLMO

DRSNOST_POKUS_4

DRSNOST_POKUS_4_KOLMO

DRSNOST_POKUS_7_KOLMO

DRSNOST_POKUS_8_KOLMO

DRSNOST_POKUS_9_KOLMO

1_001_000_SESTAVA_LAP_HLAVA_HRU

1_001_001_HLAVA_LAP_HLAVA

1_001_002_TYC_LAP_HLAVA

1_002_000_SESTAVA_LAP_HLAVA_JEMNA

1_003_000_SESTAVA_PRIPRAVEK

1_003_001_PRIPRAVEK

1_003_002_PODLOZKA_PRIPRAVEK

1_004_000_LAP_HLAVA_MALA_HRUBA

1_004_001_LAP_HLAVA_MALA

1_005_000_LAP_HLAVA_MALA_JEMNA