ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE

TECHNOLOGICKÉ MOŽNOSTI DOKONČOVÁNÍ SLEPÝCH OTVORŮ

TECHNOLOGICAL POSSIBILITIES OF BLIND HOLES FINISHING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

AUTOR: JOSEF POJŽÁREK

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. ZDENĚK PITRMUC

STUDIJNÍ PROGRAM: VÝROBA A EKONOMIKA VE STROJÍRENSTVÍ

STUDIJNÍ OBOR: TECHNOLOGIE, MATERIÁLY A EKONOMIKA STROJÍRENSTVÍ

PRAHA, 2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pojžárek** Jméno: **Josef** Osobní číslo: **483358**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

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

Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**

Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Technologické možnosti dokončování slepých otvorů

Název bakalářské práce anglicky:

Technological possibilities of blind holes finishing

Pokyny pro vypracování:

1) Rešerše vhodných technologií pro dokončování vnitřních válcových ploch
2) Posouzení možnosti aplikace technologiií dokončování pro konkrétní díl
3) Rozbor geometrie dílu a vlastností materiálu
4) Návrh technologie pro výrobu prototypového kusu

Seznam doporučené literatury:

STEPHENSON, David A. a John S. AGAPIOU. Metal cutting theory and practice. Third edition. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group, [2016]. ISBN 1-4665-8753-9.
MÁDL, Jan a Jaroslav BARCAL. Základy technologie II. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02610-8.
OVERBY, Alan. CNC machining handbook: building, programming, and implementation. New York: McGraw-Hill, c2011. ISBN 978-0-07-162301-8.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Zdeněk Pitrmuc, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Zdeněk Pitrmuc 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

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

Datum převzetí zadání	Podpis studenta

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

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci vypracoval samostatně. Dále prohlašuji, že jsem všechny použité zdroje správně a úplně citoval a uvádím je v přiloženém seznamu použité literatury.

Nemám závažný důvod proti zpřístupňování této závěrečné práce ve smyslu §60 zákona č. 121/2000Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) v platném znění. Souhlasím také s případnou publikací výsledků bakalářské práce nebo její podstatné části, pokud budu uveden jako její spoluautor.

V Praze dne: Podpis:

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Zdeňkovi Pitrmucovi za jeho cenné rady a připomínky k mé práci a také za pomoc při samotné výrobě přípravku pro pokus. Také bych rád poděkoval panu Tomáši Brychtovi a firmě Tvikon s.r.o. za dodání vzorků materiálu. V neposlední řadě pak své rodině a přátelům za pomoc a morální podporu při psaní práce a po celou dobu studia.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem vhodné dokončovací technologie slepých otvorů. Teoretická část pojednává o dokončovacích technologiích vnitřních ploch. Z nich jsou následně vybrány technologie, které je možné použít v praktické části pro naši konkrétní součást. Praktická část se zabývá volbou vhodného materiálu pro danou součást, volbou technologie dokončování povrchu a návrhem a výrobou přípravku pro použití technologie na dané součásti.

Klíčová slova

Dokončovací technologie, slepé otvory, leštění, korozivzdorná ocel, žáruvzdorná ocel

Abstract

This bachelor thesis deals with design of suitable technology of blind holes finishing. The theoretical part deals with inner surface finishing technologies. Among them are then selected technologies that can be used in practical part for our particular part. The practical part deals with the choice of a suitable material for a given component, the choice of surface finishing technology and the design and manufacture of a jig for the application of technology to the component.

Key words

Finishing technologies, blind holes, polishing, stainless steel, heat-resistant steel

Obsah

1 Úvod 9

2 Základní dokončovací metody 10

2.1 Broušení 10

2.1.1 Obvodové vnitřní broušení 10

2.1.2 Planetové broušení 11

2.1.3 Bezhroté vnitřní broušení 12

2.1.4 Dosahované parametry 13

2.2 Leštění 13

2.2.1 Mechanické leštění 13

2.2.2 Elektrolytické leštění 15

2.2.2.1 Příprava povrchu 15

2.2.2.2 Leštění 16

2.2.2.3 Potenciálová křivka 17

2.2.2.4 Dokončovací úpravy 18

2.2.3 Ultrazvukové leštění 18

2.3 Superfinišování 20

2.4 Lapování 22

2.5 Omílání 24

3 Posouzení možnosti technologií na konkrétní součást 25

4 Mechanické a chemické vlastnosti materiálu 27

4.1 Současný materiál ... 27
4.2 Vybrané alternativní materiály ... 27
4.2.1 Inconel 713 ... 28
4.2.2 Incoloy 800 ... 28
4.2.3 Ocel 1.2709 ... 29
4.2.4 Ocel 1.4777 ... 29
4.2.5 Ocel 1.4828 (AISI 309) ... 29
4.2.6 Ocel 1.4835 (253MA) ... 30
4.2.7 Ocel 1.4845 (AISI 310S) ... 30
5 Zkouška a výběr materiálu ... 31
5.1 Zkouška materiálu ... 31
5.2 Výsledky ... 32
6 Návrh technologie obrábění ... 35
7 Návrh technologie leštění ... 36
7.1 Elektrochemické leštění ... 36
7.1.1 Vana a kontakt ... 37
7.1.2 Víko ... 39
7.1.3 Míchátko ... 41
7.1.4 Výhody ... 41
7.1.5 Nevýhody ... 41
7.2 Mechanické leštění pomocí CNC frézky ... 42
7.2.1 Výhody ... 43

7.2.2 Nevýhody 43

8 Závěr 44

9 Seznam použité literatury 45

10 Seznam obrázků 49

1 Úvod

Dokončování vnitřních otvorů zejména malých průměrů je i v dnešní vyspělé době stále problémové téma. Zvláště problémové je leštění takovýchto otvorů. Dosažení požadovaných parametrů vyžaduje především vhodnou volbu technologie a značné zkušenosti

Tato práce bude věnována volbě vhodné dokončovací technologie a jejímu použití na konkrétní součást. V teoretické části práce budou popsány základní konvenční dokončovací technologie použitelné pro vnitřní plochy (broušení, leštění, omílání, lapování a superfinišování) a jejich dosahované parametry. Praktická část práce se poté soustředí na výběr technologie vhodné pro danou součást a aplikaci na ní. U každé vybrané metody bude popsáno její použití na součásti, její výhody a nevýhody. Dále bude popsán současný materiál, ze kterého je součást vyrobena a navrhnut materiál nový, který bude více vyhovovat daným požadavkům.

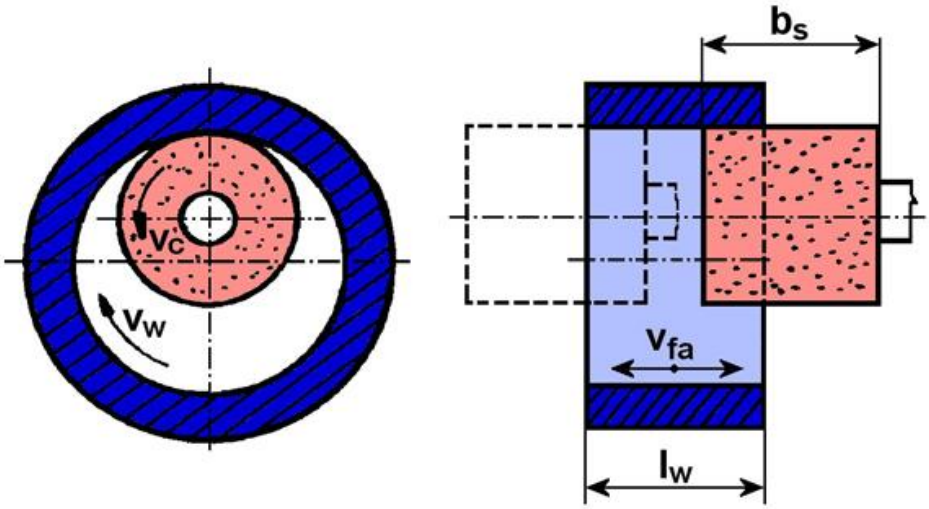
2 Základní dokončovací metody

2.1 Broušení

Broušení se řadí mezi jedny z nejstarších metod obrábění. Jedná se o základní dokončovací metodu používanou k obrábění rovinných, válcových, vnějších a vnitřních tvarových ploch za cílem dosažení požadovaných rozměrů a drsnosti povrchu. Broušení je nejčastěji realizováno pomocí brousicího kotouče nebo pásu s danými vlastnostmi, které jsou popsány v jeho označení. Nástroje pro broušení jsou tvořeny brusnými zrny, póry a pojivem. Na rozdíl od klasických obráběcích nástrojů, jako jsou např. soustružnické nože nebo frézy, nemají brusná zrna v brousicích kotoučích přesně definovanou geometrii břitu. V porovnání s frézováním a soustružením se při broušení používají vyšší řezné rychlosti, které mohou dosahovat až řádů stovek m/s. Taktéž hloubka řezu se u broušení pohybuje v řádech mikrometrů až setin mm, zatímco u soustružení a frézování od desetin mm až po několik milimetrů. [1][2][3]

2.1.1 Obvodové vnitřní broušení

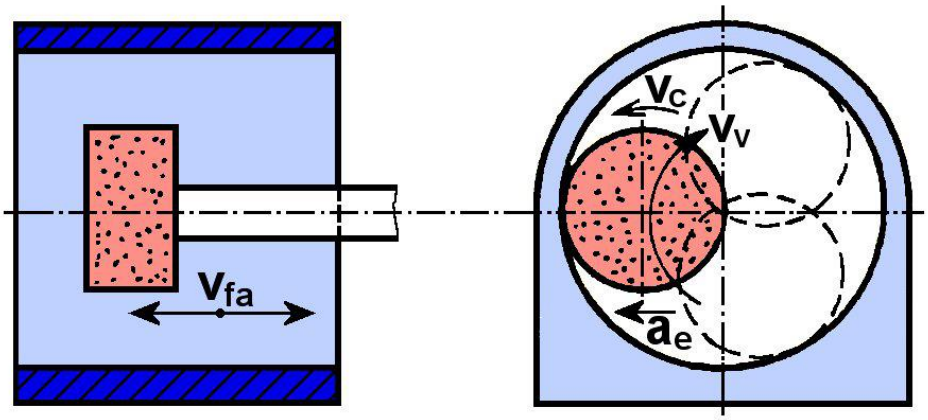
Tato metoda vnitřního broušení se používá především u obrobků, jejichž délka je větší než šířka brusného kotouče. Kratší součásti lze brousit bez použití axiálního posuvu. Brusný kotouč se otáčí proti směru otáčení součásti. Jeho průměr je vždy menší, než průměr obráběné díry a. To má za následek, že v případě broušení děr malých průměrů je nutné použít velmi malé průměry brusných kotoučů a dochází tak k jejich velkému namáhání a opotřebení. Se zmenšujícím se průměrem kotouče je taktéž potřeba docílit jeho vyšších otáček, což je obtížné. Z tohoto důvodu se malé díry brousí nízkými rychlostmi, které však mají za následek zhoršení povrchu a snížení výkonu broušení. Důsledkem toho jsou podmínky broušení nepříznivé, a proto se používá jen v případě, kdy nelze použít jinou metodu výroby přesné díry. K výrobě přesného otvoru můžeme použít i jinou technologii, jako je např.: vyvrtávání, vystružování, honování atd.. [1][2][3]



Obrázek 1 Obvodové vnitřní broušení [2]

2.1.2 Planetové broušení

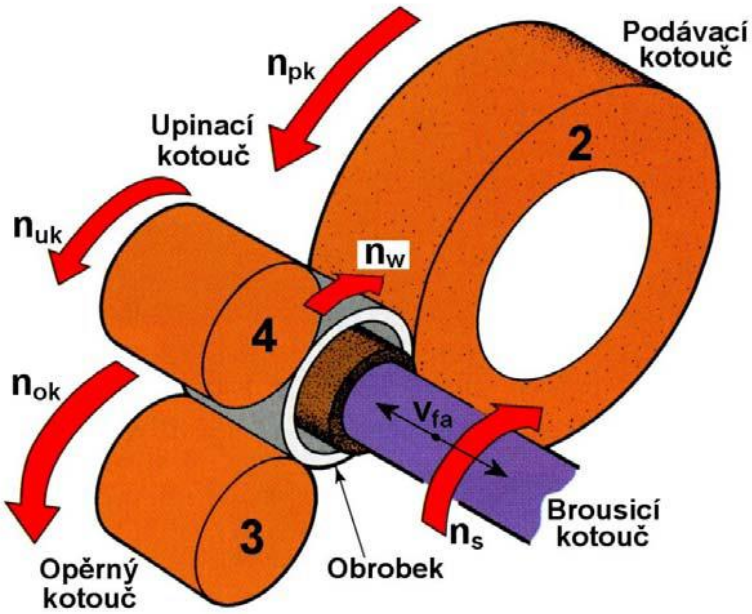
Planetové broušení se používá při obrábění velkých, těžkých a nejčastěji nerotačních obrobků, jako jsou bloky motorů, převodové skříně apod.. Broušená součást je napevno uchycená ke stolu brusky. Nástroj vykonává planetový pohyb, tzn. otáčí se kolem své osy i kolem osy obrobku. Podélný posuv vykonává stůl s obrobkem a příčný posuv vřeteník. Jelikož je tuhost vřetene malá, tak jsou dosahované přesnosti nižší. [31][1][3]



Obrázek 2 Planetové vnitřní broušení [2]

2.1.3 Bezhroté vnitřní broušení

Tento způsob broušení je velice podobný obvodovému vnitřnímu broušení s tím rozdílem, že součást je upnuta mezi třemi kotouči: upínacím, podávacím a opěrným. Upínací kotouč zajišťuje upnutí broušené součásti tím, že ji přitlačuje k podávacímu kotouči, který zajišťuje otáčení součásti, a opěrnému kotouči, který určuje polohu součásti. Dosahované přesnosti jsou ve srovnání s obvodovým broušením vyšší. [2]



Obrázek 3 Bezhroté vnitřní broušení [2]

2.1.4 Dosahované parametry

Dosahované parametry broušení jsou závislé na mnoha faktorech. Mezi ně řadíme zejména tuhost a přesnost strojů, vlastnosti brousicích kotoučů (materiál, velikost zrna, tvrdost, strukturu atd.), způsob broušení a řezné podmínky. [1]

Tvar broušené plochy	Způsob broušení	Přesnost rozměrů IT	Jakost obrobené plochy Ra (µm)
Rovinná	hrubování		
	čelem	9 až 11	0,8 až 6,3
	obvodem	8 až 11	0,8 až 3,2
	načisto		
	čelem	5 až 7	0,2 až 1,6
	obvodem	5 až 7	0,2 až 1,6
	jemné broušení	3 až 5	0,025 až 0,4
Vnitřní válcová	hrubování	9 až 11	1,6 až 3,2
	načisto	5 až 7	0,4 až 1,6
	jemné broušení	3 až 6	0,05 až 0,4
Vnější válcová	hrubování	9 až 11	1,6 až 3,2
	načisto	5 až 7	0,4 až 1,6
	jemné broušení	3 až 6	0,025 až 0,4

Tabulka 1 Dosahované parametry broušení [1]

2.2 Leštění

Leštění je dokončovací operace, jejíž hlavním cílem je odstranění drobných nerovností z povrchu a dosažení vysokého lesku a nízké drsnosti povrchu. Hlavním rozdílem oproti broušení je velmi malý úběr materiálu. Účelem leštění je především zkvalitnění vzhledu povrchu, ale zlepšuje i jeho odolnost proti korozi. [4][5]

2.2.1 Mechanické leštění

Mechanické leštění je velice podobné broušení. Materiál je odebírán mechanickým působením brusných zrn, která jsou umístěna buď přímo na nástroji, nebo jsou v kombinaci s kapalinou, případně pastou, nanesena mezi obrobkem a nástrojem (volné abrazivo). Celý proces mechanického leštění se skládá ze třech částí: broušení, leštění a

doleštění. K leštění se používají nejčastěji lešticí kotouče s pevným pojivem. Doleštění poté probíhá pomocí kotoučů z nasákavého materiálu a volného abraziva. Abrazivo pro doleštění je zpravidla jemnější než pro leštění. Výsledná jakost leštěného povrchu je ovlivněna druhem a zrnitostí brusiva, materiálem, obvodovou rychlostí kotouče, jeho tlakem na součást a v neposlední řadě také množstvím chladicí a mazací kapaliny. Pro zvýšení výkonnosti leštění se lešticí kotouče nahrazují pásy. Další možností je mechanické leštění pomocí kartáčů. Kartáče se vyrábějí z kovových i nekovových materiálů a volí se podle typu leštěného materiálu. Lešticí kartáče mají na rozdíl od kotoučů kovový, dřevěný, gumový, případně plastový střed, do kterého jsou upevněna vlákna o z ocele, bronzu, bavlny, plsti aj.. Vlákna mohou být uspořádána radiálně, tangenciálně, nahodile, ve šroubovici, nebo v řadách. Mechanické leštění na rozdíl od elektrochemického vždy zanechává nějaká poškození na povrchu materiálu, jako jsou škrábance, či zbytky brusiva v materiálu. Toto poškození není často viditelné lidským okem, ale až pod mikroskopem. Z tohoto důvodu ho tedy není možné použít v prostředích, kde je kladen důraz na čistotu povrchu např. farmacie, či výroba polovodičových součástek. [1][5][6][7]

Obrázek 4 Mechanické leštění pomocí leštícího pásu [8]

2.2.2 Elektrolytické leštění

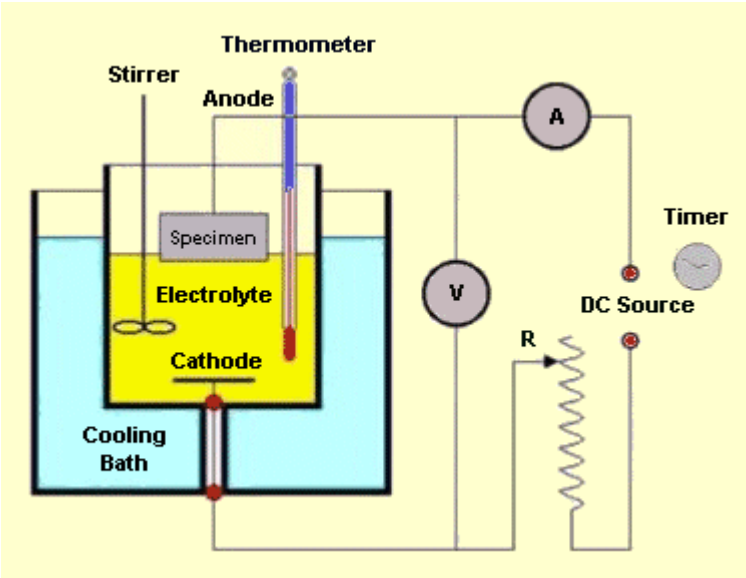
Tato metoda elektrochemického leštění je založena na principu anodického rozpouštění materiálu, k němuž dochází působením stejnosměrného proudu. Cílem je dosáhnout co nejmenší mikroskopické drsnosti povrchu, čímž se výrazně omezí usazování zbytků a nečistot na tomto povrchu, což má za následek snazší čistění povrchu. Tímto způsobem lze upravovat i poměrně malé, křehké a tvarově složité součásti. Své využití nachází zejména v potravinářském a zdravotnickém průmyslu. Samotnému leštění předchází několik přípravných operací. Jejich volba a správné provedení zajišťují vysokou jakost finálního povrchu součásti. [4][9]**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

2.2.2.1 Příprava povrchu

Přípravné operace mohou být mechanické i chemické. Nejčastěji se jedná o odmašťování, moření, mechanické čištění a broušení a pískování. Příprava povrchu probíhá v několika krocích. Prvním je alkalické čištění, případně čištění a odmaštění v rozpouštědlech. To má za úkol odstranit ze součásti zbytky olejů, tuků a další nečistoty. Nečistoty na povrchu by negativně ovlivnily výslednou jakost leštěného povrchu, proto je při manipulaci s obrobkem nutné dbát na udržení jeho čistoty. Odmaštění může být podpořeno mechanickým čištěním. K tomu se používají výhradně kartáče z plastu, aby se zamezilo narušení a poškození čištěného povrchu. V případě čištění svarů se používají kartáče z korozivzdorné oceli. Po čištění a odmaštění je nutné obrobek opláchnout v oplachové lázni, kde se odstraní zbytky chemikálií. Dalším krokem je moření kyselinami, které odstraní zbytky oxidů například po obrábění nebo sváření. Čím nižší je obsah chromu v oceli, tím nižší koncentraci kyseliny volíme a naopak. Po moření se součást opět opláchne a může přejít k finálnímu leštění. [4][9]**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

2.2.2.2 Leštění

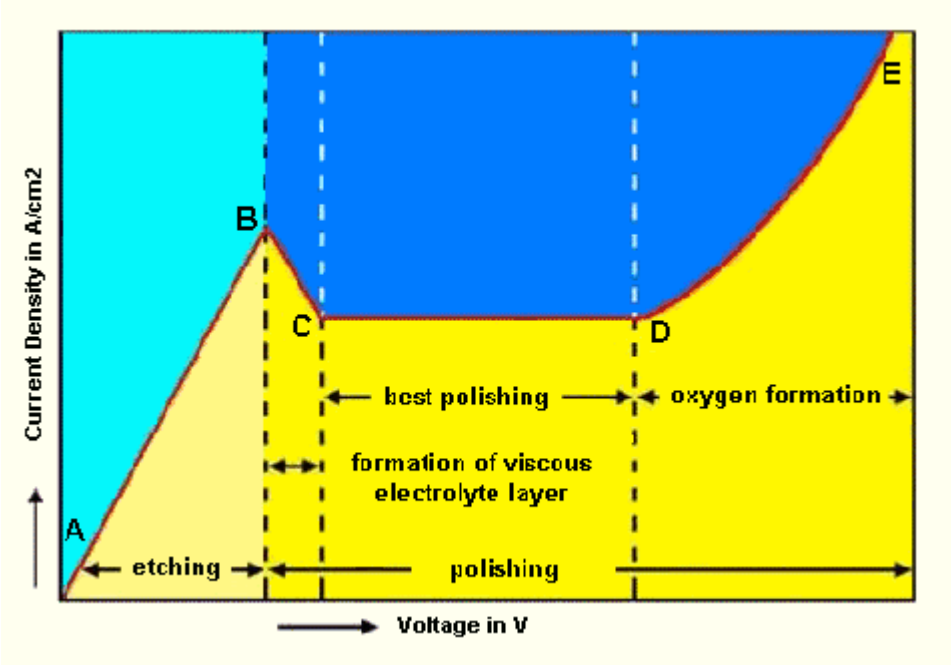
Po přípravných operacích následuje leštění v chemické lázni (elektrolytu). Složení lázně je závislé na leštěném materiálu. Nejčastěji se používají koncentráty kyseliny sírové, dusičné, ortofosforečné , chlorovodíkové a jejich kombinace. Do lázně jsou umístěny desky z olova, mědi nebo korozivzdorné oceli, které jsou připojeny na záporný pól zdroje elektrického proudu a slouží jako katoda. Leštěné součásti jsou pak zavěšené na závěsech z mědi, bronzu nebo titanu a jsou připojeny na kladný pól zdroje (anoda). Při leštění dutin je anodou vhodně tvarovaný plech, který je vložen do dutiny a odizolován od součásti například plastovou deskou. Vložením anody a katody do lázně vznikne uzavřený elektrický obvod, který je připojený na stejnosměrný zdroj proudu. Průchodem elektrického proudu obvodem se odebírají ionty ze součásti (anody) a jsou přitahovány ke katodě. Pro optimální leštění je potřeba, aby byl povrch leštěné součásti v pasivním nebo transpasivním stavu. Ten nastává pouze v určité oblasti, kdy se proudová hustota prakticky nemění. Většina odebraných iontů kovů zůstává v lázni, avšak část se jich uloží na katodě ve formě kalu. Proto je potřeba katody pravidelně čistit aby nebyla snížena účinnost leštění. Po leštění je součást zbavena zbytků elektrolytické lázně, opláchnuta horkou vodou a dále předána k dokončovací úpravě. [4][9]



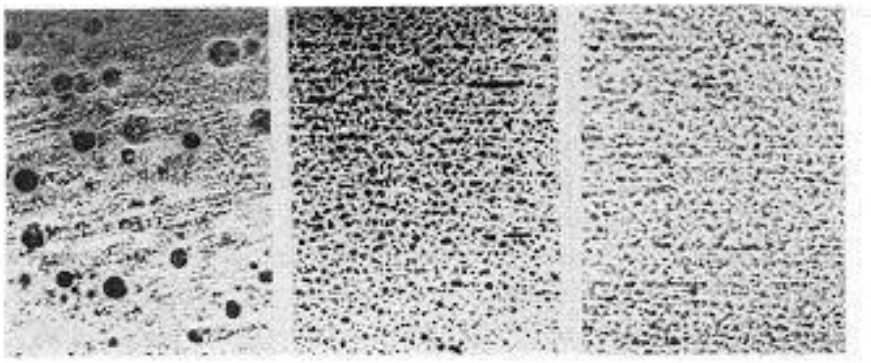
Obrázek 5 Schéma elektrolytického leštění [12]

2.2.2.3 Potenciálová křivka

Potenciálová křivka nám zobrazuje závislost proudové hustoty na napětí. Poprvé byla použita P.A. Jacquetem v 50. letech 20. století k analyzování anodického rozpouštění materiálu. Závislost se liší pro různé materiály, avšak vždy zahrnuje ve větší či menší míře čtyři oblasti: (na obrázku zleva) oblast leptání materiálu, oblast pasivace materiálu, oblast leštění materiálu a oblast uvolňování kyslíku. V oblasti leptání dochází k rozpouštění materiálu a objevují se zde známky pittingu. V pasivační oblasti v důsledku vytváření oxidické vrstvy na povrchu materiálu lehce klesá proudová hustota a roste napětí. V oblasti leštění je proudová hustota prakticky konstantní a dochází k nárůstu napětí, čímž dosahujeme vyšších hodnot lesku na povrhu materiálu. Při přílišném zvýšení napětí se však oxidační vrstva začíná rozpadat a dochází k uvolňování kyslíku. Bublinky kyslíku, které vznikají na povrchu materiálu, mají za následek vznik pittingu. Oblast, v které tyto děje probíhají, nazýváme Oblast uvolňování kyslíku. [10][11]



Obrázek 6 Potenciálová křivka [12]



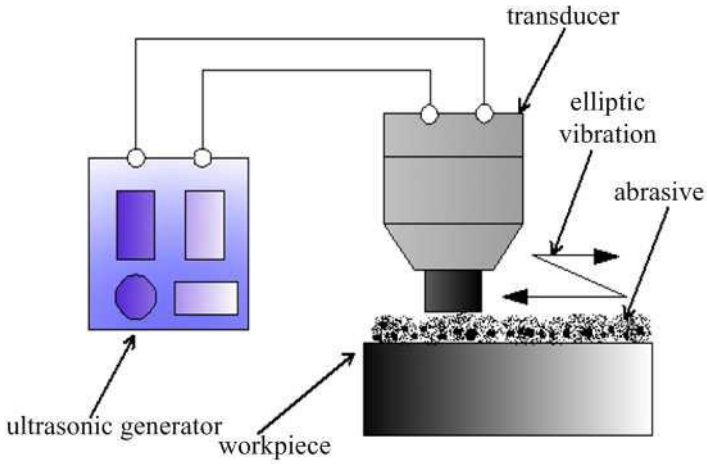
Obrázek 7 Pitting na povrchu materiálu při nesprávně zvolených parametrech leštění [11]

2.2.2.4 Dokončovací úpravy

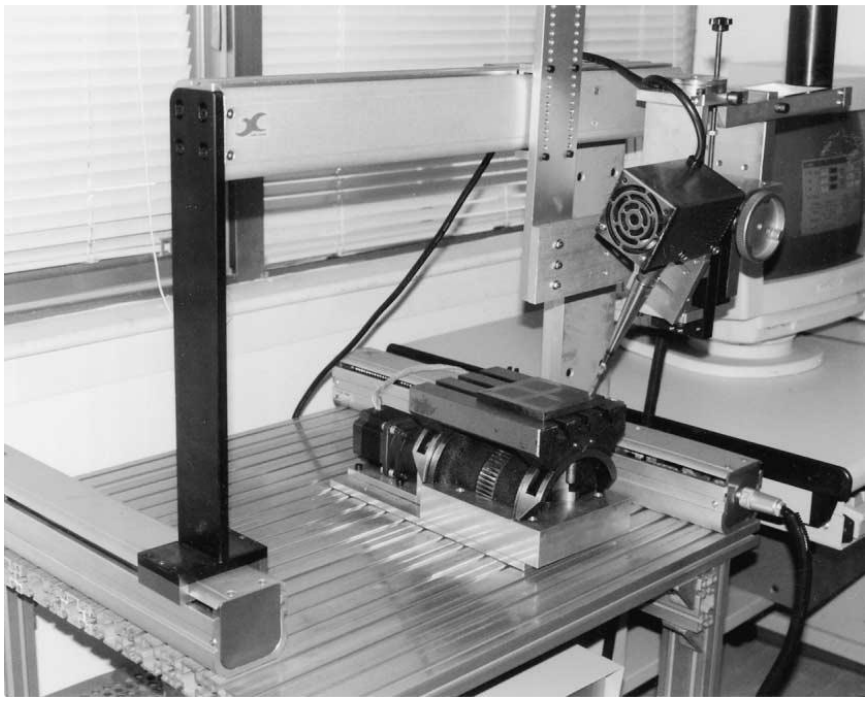
Dokončovací úprava má za úkol zbavit součást zbytků chemických zplodin, které se usadily na povrchu součásti po elektrochemické reakci. Vyleštěná součást se opláchne horkou vodou, která slouží zároveň i k sušení, jelikož je kov nahřátý na dostatečnou teplotu, aby se voda vypařila. Při neúplném vysušení způsobeném zejména u tvarově složitějších součástí pokračují součásti do sušičky. Tato část procesu elektrochemického leštění je důležitá z hlediska stálosti, korozní odolnosti a hygieny součásti. [4]

2.2.3 Ultrazvukové leštění

Tato metoda leštění je založena na ultrazvukovém vlnění. Ultrazvukový generátor přenáší vysokofrekvenční proud do ultrazvukového převodníku. Převodník vytváří vibrace, které jsou po zesílení transformátory přenášeny do leštící hlavy. Leštící hlava je přitlačována určitým tlakem na leštěnou součást. Mezi hlavou a obrobkem je umístěno brusivo, které za pomocí krouživých pohybů a vibrací hlavy leští povrch součásti. Nástroj se kvůli vysoké frekvenci pohybuje velmi rychle, po velmi krátké dráze. Výhodou tohoto řešení je možnost rovnoměrného leštění součástí komplikovaných tvarů. Nejčastěji se tato metoda používá k leštění lisovacích forem. [13][14][15][16]



Obrázek 8 Schéma ultrazvukového leštění [13]



Obrázek 9 Ultrazvukový lešticí přístroj [14]

Obrázek 10 Ruční ultrazvukový lešticí přístroj [17]

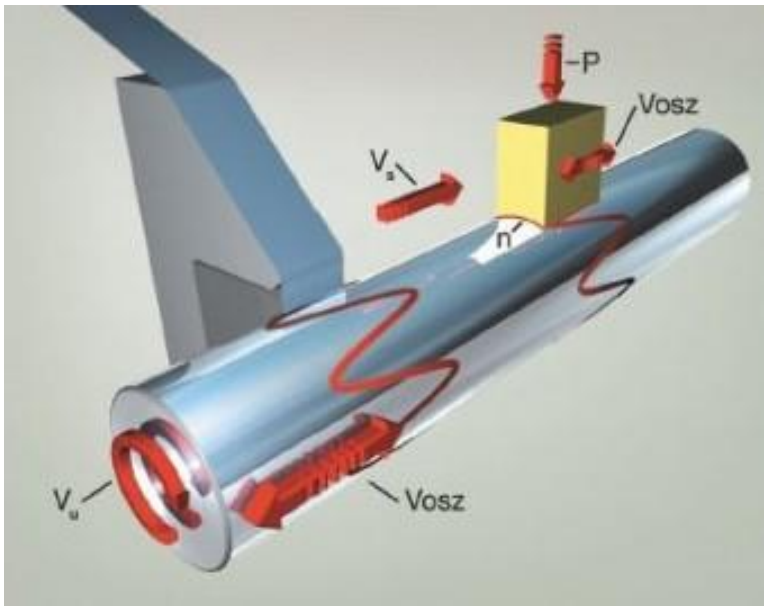
2.3 Superfinišování

Jedná se o dokončovací metodu obrábění rovinných a vnitřních i vnějších rotačních ploch pomocí jemnozrnných brusných kamenů. Používá se všude tam, kde je předepsána vysoká jakost povrchu. Metoda superfinišování je charakteristická svými nízkými řeznými rychlostmi a malými měrnými tlaky nástroje na obrobek, to vše v kombinaci s přímočarým, posuvným, otáčivým a kmitavým pohybem. Kombinací pohybů je docíleno časté změny místa úběru a dobré odstraňování třísek z řezu. Rozlišujeme dva druhy superfinišování: mechanické a elektrochemické. U mechanického způsobu je materiál ubírán působením brusných zrn brusného kamenu. U elektrochemického způsobu je materiál odebírán elektrochemickým anodickým rozpouštěním. Pomocí superfinišování lze obrábět prakticky všechny druhy materiálů jako například oceli, sklo, plasty, hliník, hliníkové slitiny aj.. K obrábění se používají speciální superfinišovací kameny hranatého, válcového nebo miskového tvaru, které

jsou přilepeny na držáku. Šířka kamenů se volí 0,6násobek průměru obrobku, délka pak 3násobek průměru obrobku, maximálně však může být 100 mm. Kmitání nástroje je vyvoláno mechanicky, pneumaticky, hydraulicky nebo elektromagneticky. Brusné kameny jsou tvořeny z brusných zrn a pojiva. Brusná zrna jsou tvořena z umělého korundu (k obrábění materiálů nízké pevnosti), karbidu křemíku (k obrábění materiálů vysoké pevnosti), diamant a kubický nitrid boru (k obrábění tvrdých materiálů). Podle tvrdosti materiálu volíme i tvrdost brusného kamene. Měkčí kameny se volí pro tvrdší materiály a naopak. Zrnitost brusiva se pohybuje obvykle od 6 do 3 µm. Použitím menších zrn dosáhneme vyšší jakosti obráběného povrchu. Pojivo se nejčastěji používá keramické, pro dosažení vyšší jakosti povrchu volíme bakelitové pojivo. Při použití kamenů se zrny z diamantu je možné použíti kovové pojivo. Před samotným superfinišováním je nutné plochy obrobit soustružením nebo broušením na drsnost Ra 0,2 až Ra 0,6. [1][2]

	Přesnost rozměrů IT		**Drsnost povrchu Ra (µm)**	
	Střední	**Rozsah**	**Střední**	**Rozsah**
Dokončovací	4	3 – 5	0,2	0,05 – 0,40
Jemné	3	2 – 4	0,05	0,025 – 0,100

Tab. 2 Dosahované parametry superfinišování [2]



Obrázek 11 Schéma superfinišování [18]

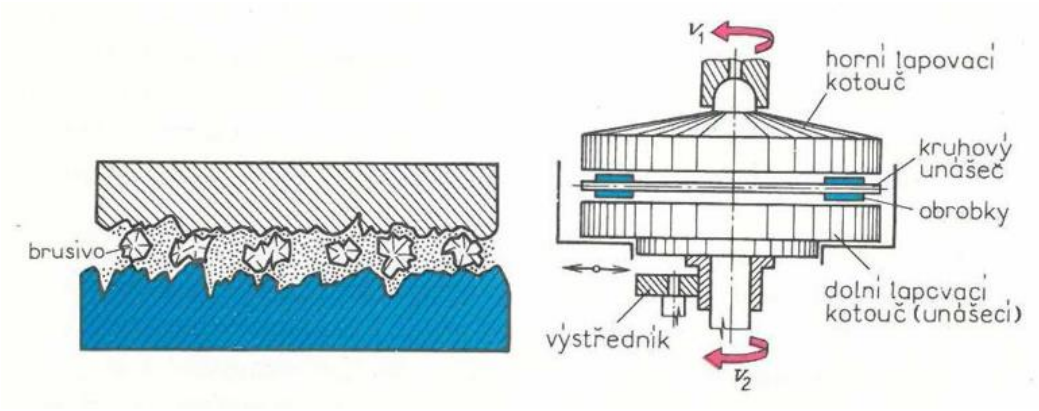
2.4 Lapování

Lapování je další z dokončovacích metod obrábění, při které se dosahuje vysoké jakosti obrobeného povrchu. Materiál je odebírán pohybem brusných zrn, která jsou rozptýlena v kapalině nebo pastě nanesené mezi obrobek a nástroj. Pohyb nástroje vyvolává pohyb zrn, která díky tomu neustále mění svoji dráhu a odebírají z povrchu materiál. Touto metodou dosáhneme zmenšení drsnosti a zvýšení přesnosti geometrického tvaru obráběné plochy. Lapovat lze rovinné, vnitřní i vnější válcové a tvarové plochy obrobků z měkkých, tvrdých i těžkoobrobitelných materiálů. Lapování dělíme na ruční a strojní a dále pak na mechanické, chemicko-mechanické a elektrochemické. Při ručním lapování se nástroj drží v ruce a člověk ručně vykonává všechny potřebné pohyb. Obrobek napevno umístěný a lapovací kapalina nebo pasta se mezi obrobek a nástroj nanáší štětcem nebo olejničkou. U strojního lapování vykonává pohyby místo člověka stroj a lapovací kapalina (pasta) je dodávána čerpadlem. U chemicko-mechanického lapování jsou brusná zrna v kapalině, která chemicky narušuje povrchovou vrstvu obrobku a zrna ji poté odstraní. U elektrochemické metody je navíc narušení povrchové vrstvy podpořeno elektrickým proudem. Lapovací nástroje se vyrábějí ve formě desek, kotoučů, pouzder a trnů. Desky a kotouče se používají pro lapování rovinných ploch. Pro hrubovací operace jsou na jejich činné ploše vytvořeny rýhy, naopak pro dokončovací operace je plocha hladká. Pouzdra jsou pevná nebo stavitelná a používají se při lapování vnějších rotačních ploch. Je důležité, aby délka pouzdra byla minimálně stejná jako průměr obroku. Trny se používají pevné nebo rozpínací a slouží k lapování vnitřních rotačních ploch. Na jejich pracovní ploše jsou vytvořeny drážky, sloužící jako zásobník lapovací kapaliny nebo pasty. Nástroj by měl být vyroben z měkčího materiálu, než obrobek. Nejčastěji se používá litina, měkká ocel, ale také například bronz, měď, cín, sklo, olovo, dřevo, plast a další. Při lapování vysoce tvrdých materiálů je nástroj navíc kalený nebo pochromovaný. Materiál nástroje musí být dále volen tak, aby na něm dobře držela lapovací kapalina (pasta), byl mechanicky co nejodolnější a neměnil svůj tvar v průběhu lapování. V případě použití chemicko-mechanického a elektrochemického lapování musí být materiál nástroje také chemicky

odolný. Brusná zrna jsou stejně jako u superfinišování z karbidu křemíku, umělého korundu, diamantu, kubického nitridu boru atd. Zrnitost je vyšší a pohybuje se od 1 do 100 µm. Pro hrubovací operace se volí zrna větší velikosti, pro dokončovací naopak menší. Brusná zrna jsou smíchána s nosným prostředkem, kterým je například olej, vazelína, líh, lůj, voda, benzín atd. U chemicko-mechanického lapování se poté používá například oxid železitý, hydroxid železitý, oxid chromitý aj.. Důležité je, aby měl prostředek velice dobré mazací schopnosti, jelikož by se jinak mohl nástroj při lapování zadřít. Po dokončení obrábění je nutné odstranit všechny zbytky lapovacího prostředku. Před lapováním povrchu je potřeba docílit dokonalého obrobení plochy, např. broušením, vystružováním, jemným soustružením atd.. [1][2]

	Přesnost rozměrů IT		**Drsnost povrchu Ra (µm)**	
	Střední	**Rozsah**	**Střední**	**Rozsah**
Hrubovací	4	3 – 5	0,2	0,14 – 0,40
Jemné	2	1 – 3	0,1	0,08 – 0,16
Velmi jemné			0,03	0,01 – 0,04

Tab. 3 Dosahované parametry lapování [2]



Obrázek 12 Schéma procesu lapování [19]

2.5 Omílání

Omílání je druh leštění, při němž jsou obrobky leštěny vlivem leštícího prostředku a vibrací či otáčení omílacího zařízení. Kromě leštění je možné tuto metodu použít také pro broušení, odjehlování, či odmašťování. Materiál z povrchu obrobku je odebírán v důsledku nárazů a tření leštícího prostředku. Leštící prostředek se skládá z abrazivního materiálu, kterým jsou nejčastěji úlomky brusných kotoučů, porcelánu, keramiky, ocelové kuličky, dřevěné piliny apod. a aktivní kapaliny, například nitridu nebo chloridu sodného apod. Obrobky s prostředkem jsou umístěny v rotačních nebo vibračních bubnech podle typu zařízení. Výsledná jakost povrchu obrobku závisí na době omílání, která se pohybuje od 2 do 6 hodin. Dále také na druhu a abrazivního materiálu a použité kapaliny. Omíláním nedochází ke zlepšení přesnosti rozměrů a tvaru. Jeho použití je nejvhodnější pro velké série malých obrobků. Dnešní moderní technologie ho však umožňují použít i na těžké a rozměrné díly. Pomocí těchto technologií je také možné snížit konečnou drsnost omílaného povrchu až na Ra 0,01 μm (OTEC Pulsfinish). [1][20][21][22]

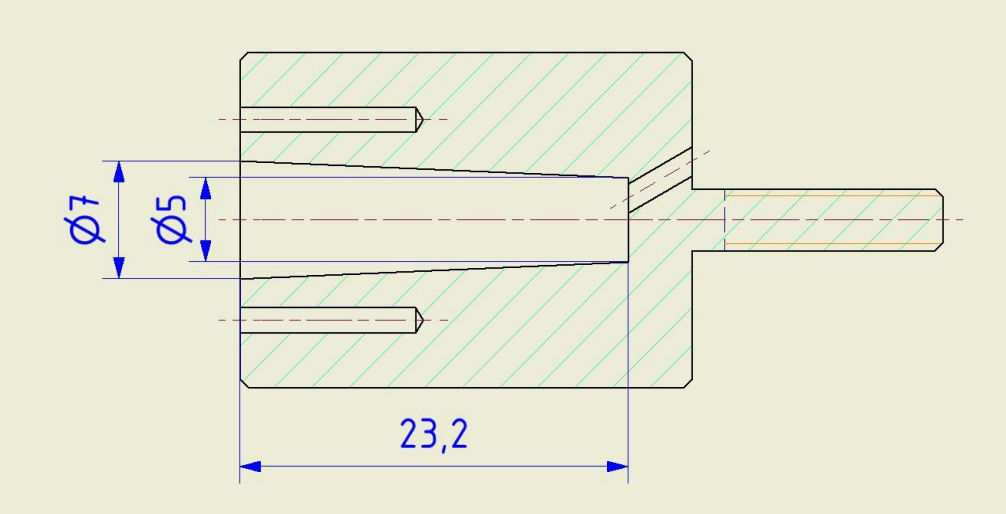
Drsnost povrchu Ra (μm)	0,01 – 0,4

Tab. 4 Dosahované parametry omílání [1]

Obrázek 13 Součástky v omílacím bubnu [23]

3 Posouzení možnosti technologií na konkrétní součást

Vyráběnou součástí je pícka určená k fúznímu spékání optických vláken. Těleso pícky je válcového tvaru o vnějším průměru 20 mm. Vnitřní kuželová díra musí být obrobena na nejvyšší možnou jakost, aby bylo možné vlákna po spékání lehce vyjmout. Z geometrie součásti je patrné, že ji lze soustružit a frézovat. Nejsložitější operací je obrobení vnitřní kuželové díry. Základní obrobení lze udělat soustružením nebo frézováním. Dále je potřeba zvolit vhodnou dokončovací metodu a následně metodu leštění. Osoustružený a ofrézovaný povrch je možné brousit, vystružovat, lapovat, případně superfinišovat. Při použití vnitřního broušení nastává problém s malým průměrem nástroje a následnými vysokými otáčkami. Ne každý stroj má dostatečnou tuhost, aby při vysokých rychlostech vřetene nedocházelo k chvění, které má negativní vliv na jakost obrobeného povrchu. Možností je snížení otáček, čímž ale dojde ke snížení řezné rychlosti a následkem toho k nevhodným řezným podmínkám, které mají taktéž negativní vliv na jakost povrchu. Možným řešením je použití metody vystružování. Zde však nastává problém s atypickou kuželovitostí díry. Řešením je výroba speciálního kuželového výstružníku, který bude vyhovovat požadavkům na kvalitu povrchu, nebo úprava kuželové díry v součásti na normalizovanou kuželovitost. Aby bylo dosaženo co nejvyšší kvality leštěného povrchu, je zapotřebí po broušení, či vystružování použít ještě dokonalejší dokončovací metody. Zde je možné zvolit mezi lapováním, omíláním a superfinišováním. Metoda omílání je u těchto tří nejjednodušší, avšak s nejnižší výslednou jakostí povrchu. Lapování a superfinišování dosahují velice podobných drsností povrchů. U obou metod by bylo zapotřebí použití speciálního nástroje z důvodu malého průměru díry. Nakonec je provedeno leštění. Zde je možné použít jakoukoliv metodu, jelikož všechny vedou k docílení podobných výsledků.



Obrázek 14 Výkres leštěného otvoru v součásti

Obrázek 15 Vyráběná součást

4 Mechanické a chemické vlastnosti materiálu

4.1 Současný materiál

V současné době je těleso pícky vyrobeno z austenitické korozivzdorné oceli X5CrNi18-10 (1.4301, AISI 304). Tato ocel obsahuje cca 0,05% uhlíku, 18% chromu a minimálně 8% niklu. Její mez pevnosti v tahu se pohybuje od 520 do 750 MPa, což je srovnatelné například s ocelí ČSN 12 050, avšak její smluvní mez kluzu je nízká a pohybuje se kolem 210 MPa. Tato ocel je však náchylnější k mezikrystalické korozi při dlouhodobých teplotách mezi 500 a 950°C. Pro spékání vláken ve vakuové peci není potřeba materiál měnit, jelikož zde prakticky nedochází ke tvorbě okují. Tato metoda je ovšem finančně náročnější, proto bude uvažováno, že spékání bude realizováno v klasické komorové peci. Zde však nastává problém tvorby okují, které jsou pro tuto aplikaci nepřípustné a to hlavně na vnitřním leštěném povrchu pícky. Z tohoto důvodu je nutné zvolit lepší materiál, který bude odolnější proti vzniku okují při teplotách kolem 700°C. Je však potřeba zohlednit i možnost snadného obrábění a leštění materiálu do vysokého lesku. [24][25][26]

1.4301 (AISI 304)	**C**	**Si**	**Mn**	**P**	**S**	**N**	**Cr**	**Ni**
Obsah [%]	≤ 0,07	≤ 1,0	≤ 2,0	≤ 0,045	≤ 0,03	≤ 0,11	17,0 – 19,0	8,0 – 10,0

Tab. 5 Chemické složení oceli 1.4301 (AISI 304) [4]

4.2 Vybrané alternativní materiály

Materiál na výrobu tělesa pícky musí být korozivzdorný, žáruvzdorný, snadno obrobitelný, leštitelný (pokud možno elektrochemicky) a cenově dostupný. Korozivzdornost materiálu je dána obsahem chromu, který musí být větší než 12%. Dalším neméně důležitým legujícím prvkem je nikl, který zlepšuje jak korozivzdornost, tak mechanické vlastnosti a leštitelnost materiálu. Dalšími legujícími prvky korozivzdorných ocelí jsou například molybden, mangan nebo titan. Korozivzdorné oceli s obsahem titanu však není možné pro dané účely použít z důvodu velmi špatné

leštitelnosti těchto ocelí. Chrom také důležitý z hlediska žáruvzdornosti. Žáruvzdorné slitiny ho obsahují 15-25% spolu s max. 5% hliníku. Nejvíce žáruvzdorné jsou však slitiny, které obsahují méně než 50% železa, nebo ho neobsahují vůbec. Právě železo obsažené v ocelích a slitinách je hlavním důvodem tvorby okují při vyšších teplotách. Při dané aplikaci není potřeba příliš řešit pevnost oceli, jelikož při používání nebude docházet k žádnému většímu mechanickému namáhání. Zde je popsáno několik materiálů, které splňují naše požadavky. [24][25]

4.2.1 Inconel 713

Tento materiál se řadí do skupiny superslitin, které jsou vysoce odolné vůči korozi a vysokým teplotám (až do cca 1000°C). Jedná se o precipitačně tvrzenou slitinu niklu a chromu s přídavkem niobu a molybdenu, která dosahuje vyšší meze pevnosti v tahu, přibližně 760 MPa. Obrobitelnost Inconelu 713 je kvůli vysokému obsahu chromu a niklu značně zhoršená. Při obrábění dochází ke vzniku velmi vysokých teplot na břitu destičky, což má za následek rychlé opotřebení, vyštipování, či dokonce zlomení břitové destičky. K tomuto snížení životnosti dochází i při nízkých řezných rychlostech. Cenově se Inconel 713 řadí do skupiny dražších materiálů. Své využití nachází zejména v leteckém a energetickém průmyslu jako materiál pro výrobu lopatek motorů a turbín. [25][28][29][30][31]

Inconel 713	**Ni**	**Cr**	**Al**	**Mo**	**Nb+Ta**	**Ti**
Obsah [%]	základ	12,0 – 14,0	5,50 – 6,50	3,80 – 5,20	1,0	0,5 – 1,0
	Si	**C**	**Zr**	**S**	**B**	
Obsah [%]	≤0,5	0,08 – 0,12	0,05 – 0,15	0,015	0,005 – 0,015	

Tab. 6 Chemické složení slitiny Inconel 713 [31]

4.2.2 Incoloy 800

Incoloy 800 je materiál velmi podobný Inconelu. Jejich hlavním rozdílem je obsah niklu, který u Incoloye 800 činí přibližně 30%, stejně jako obsah chromu a železa. Slitina

je dále legována molybdenem, mědí, titanem, a hliníkem. Jedná se o slitiny s nejvyšší korozní odolností a to i za velmi vysokých teplot s pevností v tahu 630 Mpa. V porovnání s Inconelem, je tento materiál o trochu lépe obrobitelný a levnější. [25][29][30]

Incoloy 800	**Ni**	**Cr**	**Mn**	**Si**	**Ti**	**Al**	**S**	**C**	**Fe**
Obsah [%]	32,5	21,0	0,75	0,5	0,37	0,37	0,007	0,05	zbytek

Tab. 7 Chemické složení slitiny Incoloy 800 [6]

4.2.3 Ocel 1.2709

Ocel 1.2709 je martenziticky vytrvditelná ocel s vysokou pevností v tahu, dosahující až 2300 MPa a vysokou mezí kluzu. Má dobrou odolnost proti vzniku trhlin při opakujícím se teplotním namáhání i za velmi nízkých teplot. Je dobře obrobitelná i ve vytvrzeném stavu. [32]

1.2709	**Fe**	**Ni**	**Co**	**Mo**	**Ti**	**Al**
Obsah [%]	základ	18,5	9,0	5,0	0,7	0,1

Tab. 8 Chemické složení oceli 1.2709 [32]

4.2.4 Ocel 1.4777

Dalším alternativním materiálem je ocel 1.4777. Jedná se o korozivzdornou ocel, která je ale spíše zařazována mezi ocele žáruvzdorné. Tato ocel obsahuje 27 až 30 % chromu, méně než jedno procento niklu a 1,2 až 1,4 % uhlíku. Dále je legována manganem, křemíkem a molybdenem. Obsahuje také malé procento fosforu a síry, což zlepšuje její obrobitelnost. Její pevnost v tahu dosahuje až 880 MPa. [33]

1.4777	**Cr**	**Si**	**C**	**Ni**	**Mn**	**Mo**	**P**	**S**
Obsah [%]	27,0 – 30,0	1,0 – 2,5	1,2 – 1,4	1,0	0,5 – 1,0	0,5	0,035	0,030

Tab. 9 Chemické složení oceli 1.4777 [33]

4.2.5 Ocel 1.4828 (AISI 309)

Ocel 1.4828 je austenitická žáruvzdorná ocel. Její hlavní předností je odolnost proti oxidaci při teplotách do 1000°C. Obsahuje 22 až 24 % chromu, 12 až 15 % niklu a dále je legována křemíkem a manganem. Její pevnost v tahu se pohybuje mezi 500 a 750 MPa. Z hlediska obrobitelnosti patří mezi hůře obrobitelné materiály. [30][34]

1.4828	**Cr**	**Ni**	**Mn**	**Si**	**P**	**S**	**C**
Obsah [%]	22,0 – 24,0	12,0 – 14,0	2,0	1,0	0,045	0,030	0,2

Tab. 10 Chemické složení oceli 1.4828 (AISI 309) [34]

4.2.6 Ocel 1.4835 (253MA)

Austenitická žáruvzdorná ocel 1.4835 má vysokou odolnost vůči oxidaci, sulfidaci, otěru a erozi a to při teplotách až do 1150°C. Zároveň disponuje vysokou pevností při tečení. To vše je dosaženo legováním ceriem a dalšími doprovodnými prvky. Její pevnost v tahu je přibližně 660 MPa. [35][36][37]

1.4835	**Cr**	**Ni**	**Si**	**Mn**	**N**
Obsah [%]	20,0 – 22,0	10,0 – 12,0	1,40 – 2,00	0,80	0,14 – 0,20
	C	**Ce**	**P**	**S**	
Obsah [%]	0,05 – 0,10	0,03 – 0,08	0,04	0,030	

Tab. 11 Chemické složení oceli 1.4835 (253MA) [36]

4.2.7 Ocel 1.4845 (AISI 310S)

Ocel 1.4845 je austenitická žáruvzdorná ocel s odolností proti oxidaci vzduchem až do teploty 1050°C. Obsahuje 24 až 26 % chromu, 19 až 22% niklu a méně než 0,1% uhlíku. Dalšími legurami jsou mangan, křemík, fosfor, síra a dusík. Při tváření za studena mají sklon ke zpevňování, při vyšších teplotách (600-950°C) naopak ke křehnutí. Pevnost v tahu dosahuje přibližně 520 MPa. Tato ocel je dobře svařitelná, avšak velmi obtížně obrobitelná. Své použití nachází zejména v automobilovém a chemickém průmyslu a při stavbě pecí. [35][37][38][39][40][41]

1.4845	**Cr**	**Ni**	**Mn**	**Si**	**P**	**S**	**C**	**N**
Obsah [%]	24,0 – 26,0	19,0 – 22,0	≤2,0	≤1,50	≤0,045	≤0,015	≤0,10	≤0,11

Tab. 12 Chemické složení oceli 1.4845 (AISI 310S) [39]

5 Zkouška a výběr materiálu

5.1 Zkouška materiálu

Dle dodaných informací, bude fúzní spékání skelných vláken probíhat v komorové peci při teplotě 700 až 800°C, bez ochranné atmosféry. Na danou teplotu se musí skelná vlákna ohřívat rovnoměrně, jinak by došlo k jejich poškození. Cílem experimentu bylo porovnat materiály z hlediska tvorby okují při vysokých teplotách a vybrat vhodný materiál k výrobě nové pícky. K experimentu byla využita komorová pec Nabertherm N 61/H s řízeným programem (viz. Tabulka 14), bez použití ochranné atmosféry, do které bylo vloženo 6 vybraných materiálů (oceli 1.4301, 1.2709, 1.4828, 1.4835 a 1.4845 a slitinu Inconel 713). Celý proces fúzování trvá většinou jen několik minut. Přesná doba fúzování nám však nebyla sdělena, a proto jsme se rozhodli pro co nejtěžší podmínky a ponechaly vzorky na teplotě 804°C po dobu 4 hodin. Pro lepší indikaci byla jedna strana každého vzorku přebroušena.

Program	Ohřev	Požadovaná teplota	Výdrž na teplotě
Segment 1	222 °C/h	677°C	30 min
Segment 2	333°C/h	804°C	4 h

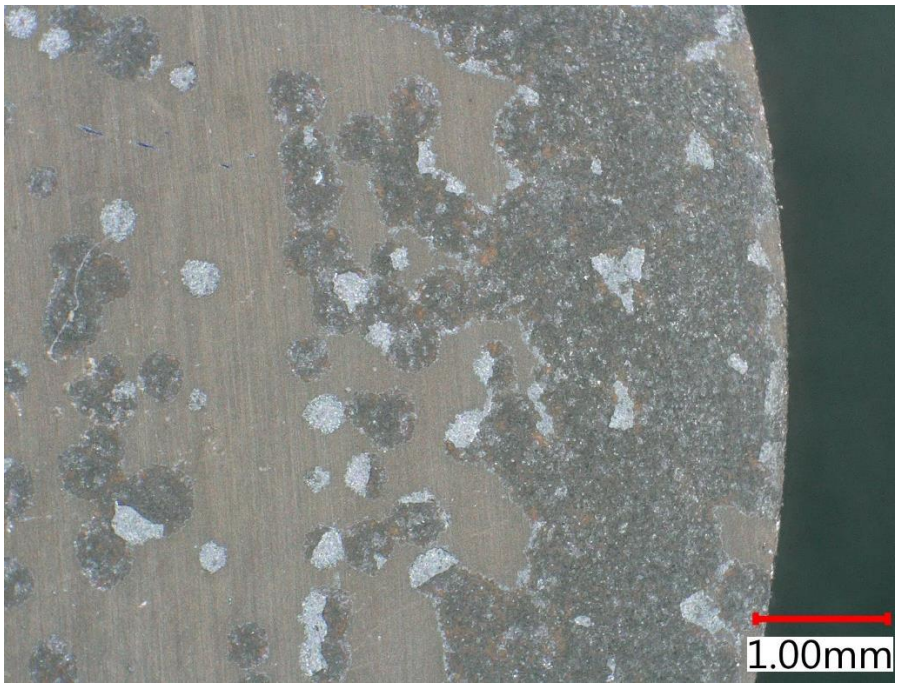
Tab. 13 Program fúzování skla

Obrázek 16 Komorová pec Nabertherm N61/H [42]

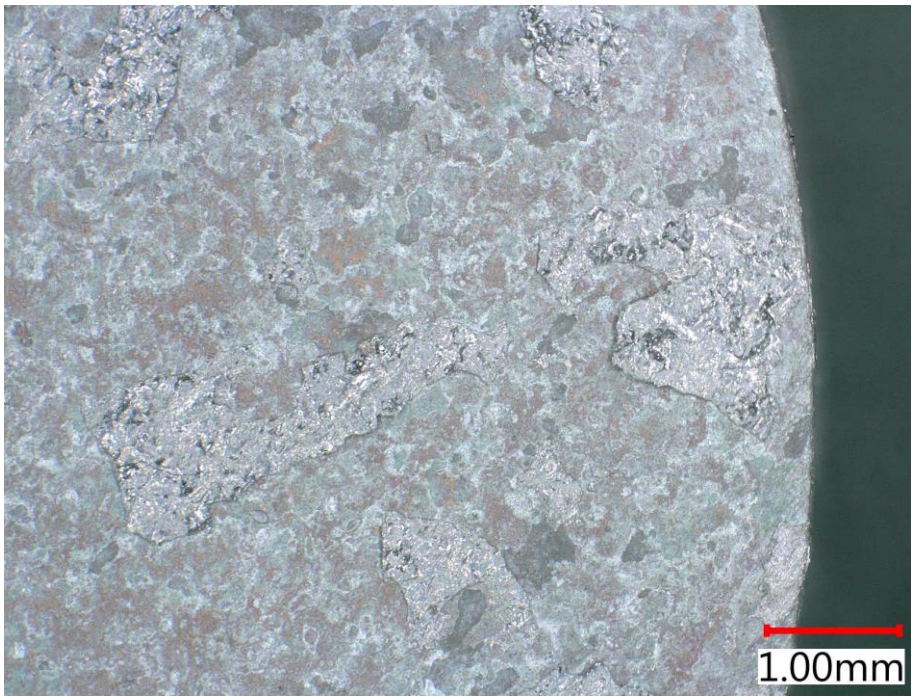
Obrázek 17 Řezání vzorků materiálů

5.2 Výsledky

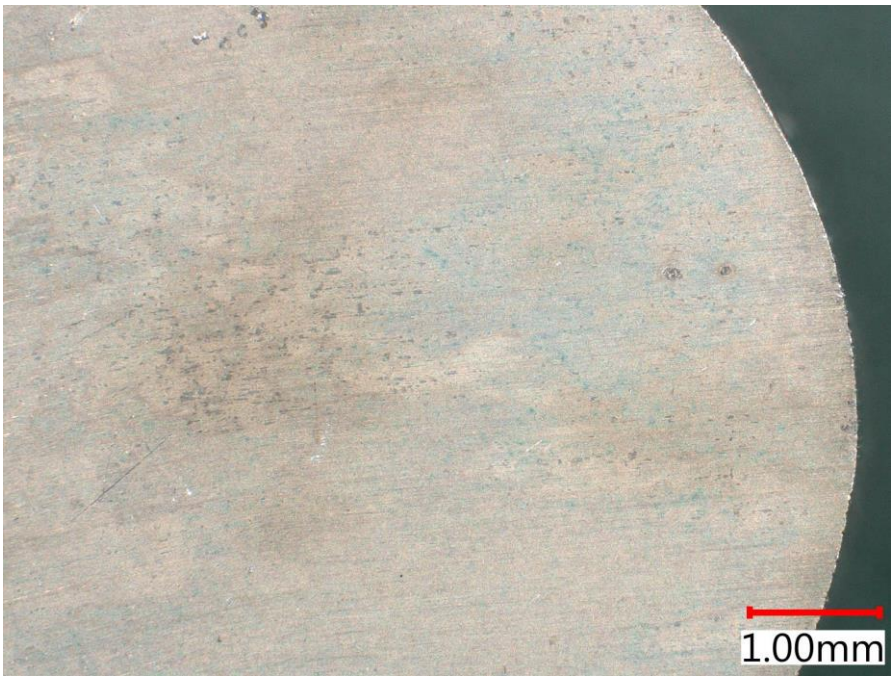
Velká většina vzorků bohužel nese vysoké známky okujení. Jediné materiály, které tak splňují požadavky, jsou Inconel 713 a žáruvzdorná ocel 1.4835. Pouze tyto dva materiály nenesou prakticky žádné stopy okujení. Povrch Inconelu 713 dopadl mírně lépe, avšak z ekonomického hlediska je vhodnější doporučit následnou výrobu pícky z žáruvzdorné oceli 1.4835, jejíž výsledky jsou plně dostačující. Na následujících obrázcích je možné vidět rozdíly v okujení povrchů jednotlivých materiálů.



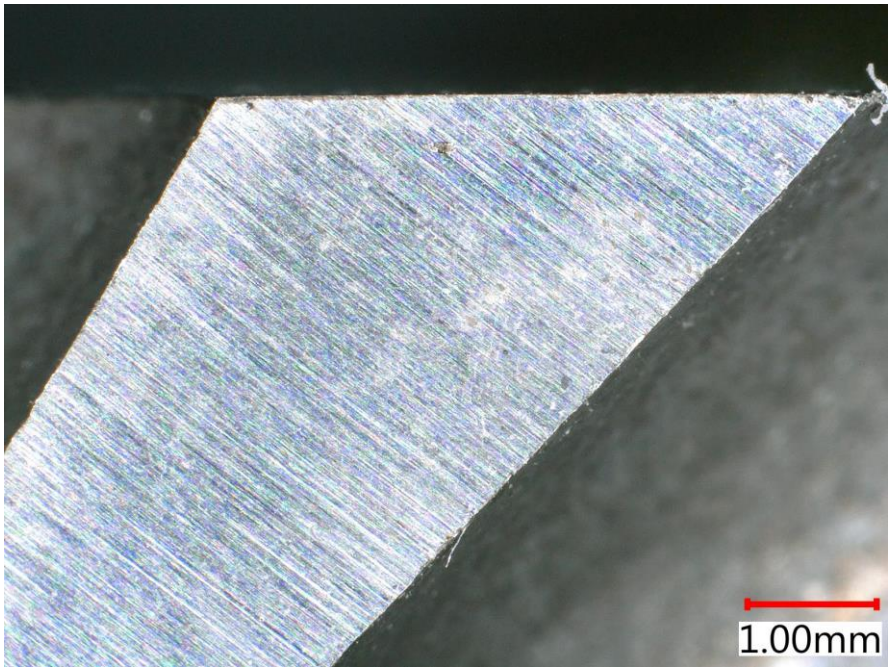
Obrázek 18 Povrch ocele 1.4301 po 4h při 804°C



Obrázek 19 Povrch ocele 1.2709 po 4h při 804°C



Obrázek 20 Povrch ocele 1.4835 po 4h při 804°C



Obrázek 21 Povrch Inconelu 713 po 4h při 804°C

6 Návrh technologie obrábění

Návrh technologie obrábění je zpracován pouze pro vnitřní kuželový otvor, který bude dále leštěný. Před samotným leštěním je však potřeba otvor obrobit tak, aby jeho povrch měl co nejmenší drsnost. Teprve poté může být leštěním dosaženo vysoce kvalitního lesklého povrchu. Jelikož je otvor kuželový, je velmi vhodné ho soustružit. Součást bude ve stroji upevněna ve sklíčidle, popřípadě v kleštině. Nejprve bude otvor předvrtán vrtákem 4,5 mm a dále soustružen na požadované rozměry a tvar. Z důvodu malého rozměru otvoru byl zvolen vnitřní monolitní karbidový soustružnický nůž Iscar PICCO R 050.4-28N (případně lze použít Sandvik CoroTurn CXS-04T090-15-4215R 1025). Nůž je vybaven vnitřním chlazením, které zlepšuje chlazení a pomáhá odvádět třísky ven z otvoru.

Obrázek 22 Vnitřní monolitní karbidový soustružnický nůž Iscar Picco [43]

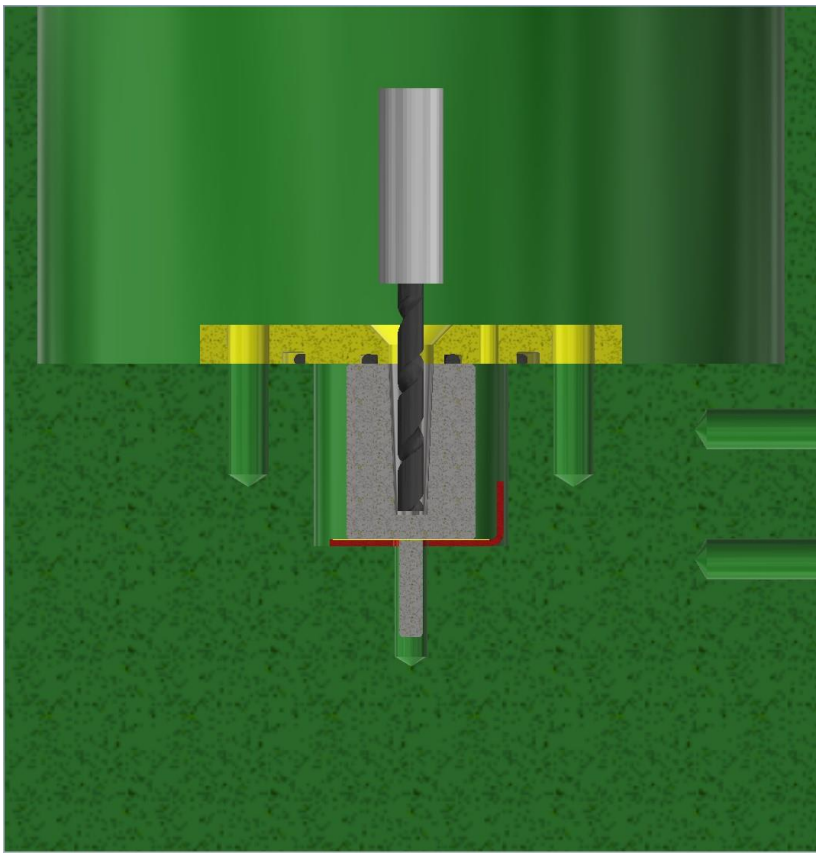
7 Návrh technologie leštění

Jelikož je otvor v součásti poměrně malých rozměrů a kuželového tvaru, je ideální pro jeho vyleštění použít elektrochemické nebo mechanické leštění. Obě technologie je však potřeba přizpůsobit pro použití na dané součásti, ať už se jedná o výrobu speciálních přípravků a nástrojů nebo nastavení individuálních parametrů leštění.

7.1 Elektrochemické leštění

Elektrochemické leštění je jednou z možností jak leštit takto malý otvor. K jeho použití na dané součásti je zapotřebí speciálního přípravku, který zaručí souosost vřetene stroje s osou součásti. To je důležité kvůli malému pracovnímu prostoru nástroje (míchátka), jehož vychýlení by mohlo leštěnou součást poškodit. Nástroj kromě míchání musí také zajistit vyplachování otvoru, aby elektrolyt v něm byl vždy čistý, což má pozitivní vliv na výslednou kvalitu povrchu. Přípravek tedy musí pojmout dostatečný objem elektrolytu, který bude cirkulovat. Větší objem má také výhodu v tom, že se elektrolyt bude pomaleji zahřívat a tím pádem není potřeba jeho dodatečného chlazení. Dále je potřeba zajistit, aby byl elektrolyt v kontaktu pouze s leštěnou plochou a nepoškodil tak ostatní plochy součásti a stroje.

Leštění touto metodou lze provést na jakémkoliv stroji se svislým vřetenem a regulací otáček, např. sloupové vrtačce, konvenční frézce nebo CNC frézce. Pro upevnění součásti byl navržen a vyroben speciální přípravek, který slouží zároveň jako vana na elektrolyt. Přípravek je složen z pěti dílů: vany, měděného kontaktu, dvou těsnicích o-kroužků a víka. Všechny části mimo kontaktu jsou vyrobeny z elektricky nevodivého materiálu, aby v průběhu procesu leštění nedocházelo k jejich naleptání a také k propojení s frézkou, které by mělo za následek poškození její elektroinstalace. Celý přípravek je upevněn ve sklíčidle umístěném na stole frézky.



Obrázek 23 Schéma návrhu elektrolytického leštění součásti

7.1.1 Vana a kontakt

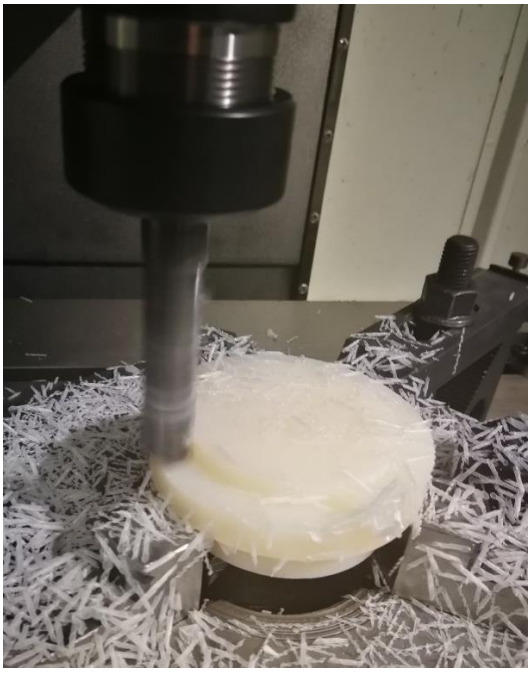
Vana tvoří držák součásti a zároveň zajišťuje prostor pro elektrolyt. Výroba proběhla na CNC frézce MAS VMC 500 z materiálu POM-C pomocí nástrojů ze slinutého karbidu Objem vany je přibližně 0,7 litru, což je dostatečné pro cirkulaci i chlazení elektrolytu. Vyfrézovaná kapsa slouží k uložení leštěné součásti a kontaktu. Průměr kapsy je zvolen tak, aby bylo vkládání a vyjímaní součásti pohodlné. Na dně kapsy je vyvrtána díra, která slouží k aretaci leštěné součásti a zajišťuje tak její souosost s vřetenem. Mezi součást a spodní část držáku je vložen kontakt, pomocí kterého je součást připojena ke kladnému pólu zdroje elektrického proudu. Kontakt je vyroben z mědi, která zaručuje jeho dobrou vodivost. K propojení kontaktu se zdrojem slouží vodič vyvedený skrze víko držáku. Boční díry slouží k upevnění sloupku s kontaktem, který spojuje míchátko se zdrojem elektrického proudu.

Obrázek 24 Hotový kontakt

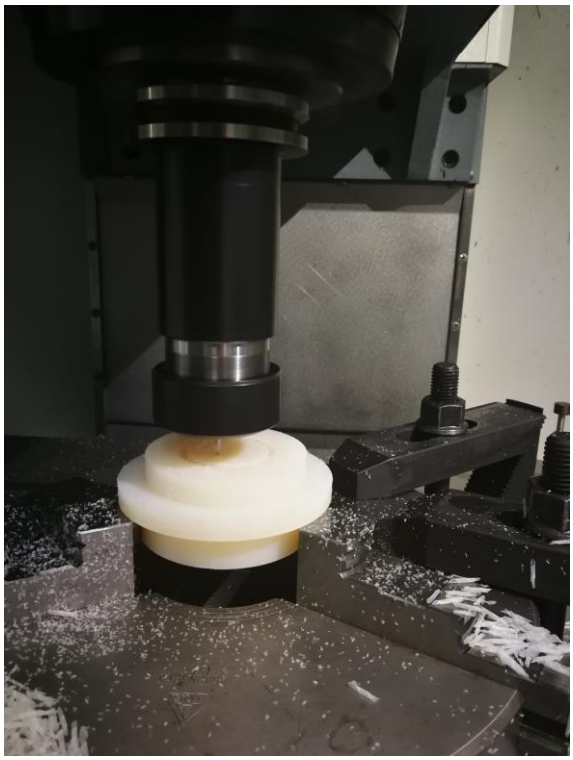
Obrázek 25 Umístění součásti a kontaktu ve vaně

7.1.2 Víko

Víko slouží k upevnění součásti v držáku. Ve víku jsou umístěny dva o-kroužky z materiálu odolného vůči kyselinám (silikonová pryž MVQ 60). O-kroužky zajišťují, že elektrolyt je v kontaktu pouze s leštěnou plochou součásti a nedochází tak k nežádoucímu naleptání ostatních ploch součásti. Stejně jako při výrobě vany, i zde byl program na výrobu víka vytvořen v softwaru Autodesk Fusion 360. Víko poté bylo vyrobeno na CNC frézce MAS VMC 500 s použitím nástrojů ze slinutého karbidu.



Obrázek 26 Výroba víka



Obrázek 27 Frézování drážek pro o-kroužky

Obrázek 28 Dokončené víko osazené těsnicími o-kroužky

7.1.3 Míchátko

Ve vřeteni frézky je upevněno míchátko, které zároveň slouží jako katoda. Míchátko (viz. Obrázek 27) je vyrobeno z korozivzdorné oceli 1.4301 a od stroje je odizolováno silonovým mezikusem. Pro zlepšení promíchávání elektrolytu má tvar šroubovice. K zápornému pólu zdroje elektrického proudu je propojeno pomocí měděného pásku.

Obrázek 29 Návrh míchátka elektrolytu

7.1.4 Výhody

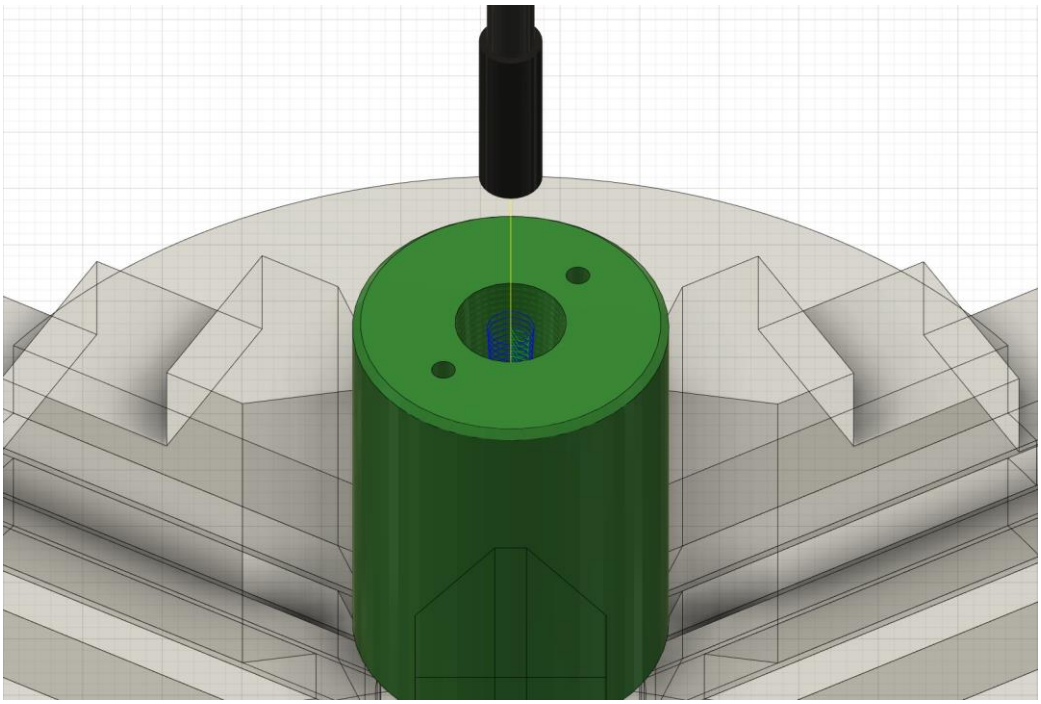
Výhodou této metody je prakticky dokonalé vyleštění povrchu, bez žádných vrypů. Další výhodou je nižší cena v porovnání s mechanickým leštěním, jelikož elektrolyt je vícekrát použitelný a levnější.

7.1.5 Nevýhody

Nevýhodou je především složitost nastavení a odladění parametrů pro leštění daného materiálu. Dále také nutná výroba speciálního přípravku a míchátka.

7.2 Mechanické leštění pomocí CNC frézky

Tento experiment nebylo možné z časových důvodů realizovat, a proto byl zpracován pouze ve fázi návrhu. Leštění probíhá pomocí lešticího tělíska umístěného ve vřeteni stroje a diamantové suspenze (např. Struers DP Suspension). Součást je umístěna ve sklíčidle, které je připevněno ke stolu frézky. Dráha, ve tvaru šroubovice, po které se bude nástroj pohybovat (viz. Obrázek 28) byla navržena v softwaru Autodesk Fusion 360. Použité tělísko je vyrobeno z filcu, má průměr 4mm a délku 12 mm, díky čemuž je možné otvor vyleštit v celé jeho délce. Tělísko je upnuto v kleštině, což nám zaručí jeho dokonalou souosost s osou vřetene. To je důležité zejména z důvodu malého prostoru mezi součástí a tělískem, kde každé sebemenší vychýlení může způsobit problémy. Tento způsob leštění může být proveden na jakékoliv CNC frézce, která dosahuje rychlosti vřetene alespoň 5000 ot./min, ideálně vyšší. Bohužel tímto způsobem nelze dosáhnout optimálních podmínek pro leštění, jelikož je průměr lešticího tělíska malý a je tak zapotřebí velmi vysokých otáček vřetene, kterých frézky nejsou schopné dosáhnout. Suspenze je do leštěného místa dodávána ručně, stejně tak i chladicí kapalina (voda nebo líh). Nejprve je použita suspenze se zrny o velikosti 9 μm. Poté následuje výplach otvoru, aby byl čistý pro použití suspenze s jemnějšími zrny. Konečné doleštění je provedeno suspenzí se zrny o velikosti 3 μm. Celý program leštění je opakován, dokud není docíleno požadovaného výsledku.



Obrázek 30 Návrh dráhy nástroje v softwaru Autodesk Fusion 360

7.2.1 Výhody

Hlavní výhodou tohoto způsobu leštění je nenáročnost. Není zapotřebí vyrábět žádné speciální držáky, nástroje jsou levné a k dispozici v mnoha obchodech.

7.2.2 Nevýhody

Značnou nevýhodou této metody je vyšší cena diamantové suspenze (cca 1500Kč/0,5l). Dále také potřeba odladění NC programu kvůli malému pracovnímu prostoru lešticího tělíska. Jelikož je tělísko v kontaktu s leštěnou plochou nejvíce svojí spodní hranou, dochází k jejímu rychlému opotřebení. K opotřebení dochází také u samotného stroje (frézky) vlivem diamantové suspenze, která se dostane mimo leštěnou součást a může způsobit poškození jeho částí. Tomu je možné předcházet např. instalací krytu. Omezený prostor také značně zhoršuje chlazení a může dojít k poškození tělíska a součásti. Nevýhodou je do značné míry také potřeba vysokých otáček vřetene. Úpravou procesu (pomalejší posuv, vícero projetí dráhy) se tato potřeba snižuje, zároveň má ale za následek prodloužení trvání procesu.

8 Závěr

V teoretické části byly vybrány a popsány technologie vhodné pro dokončování vnitřních ploch součástí. U každé technologie je uveden její popis a dosahované parametry. Dále byl proveden rozbor součásti, pro jejíž dokončení byla následně technologie volena. Z rozboru vyšlo, že vnitřní otvor součásti je vhodné soustružit a jediné použitelné dokončovací metody jsou elektrochemické nebo mechanické leštění. Pro jejich použití je však nutná výroba přípravku a specifický přístup, jelikož se jedná o použití v malých rozměrech. Pro soustružení byl navrhnut postup a použitelné nástroje. Pro metodu elektrochemického leštění byl navržen a vyroben speciální přípravek pouze pro danou součást. Vzhledem k omezenému času po uvolnění protiepidemických opatření, bohužel nebylo možné přípravek ani obě metody vyzkoušet, a tak zůstávají pouze ve fázi návrhu pro pozdější využití. Nastavení vhodného napětí a omezení proudových hustot u elektrochemického leštění pro konkrétní sestavu materiál – elektrolyt – katoda je předmětem navazujících činností, které svým rozsahem přesahují rámec této bakalářské práce. Dále byl popsán současný materiál, ze kterého je součást vyrobena. Podle požadavků bylo vybráno několik materiálů, které jsou svými vlastnostmi vhodnější pro dané použití. U těchto materiálu poté byla provedena zkouška okujení. Z výsledků vyšla nejlépe ocel 1.4835, která je velmi vhodná pro budoucí výrobu této součásti.

Z informací získaných při tvorbě této práce považuji metodu elektrochemického leštění jako nejvhodnější pro danou součást, jestliže bude možné dosáhnout podobně vysoké kvality výsledného povrchu, jako na vnějších plochách. Dalšími důvody jsou rychlost a také cena této technologie. Ve fázi sepisování této bakalářské práce byla vymyšlena další inovace přípravku, která zjednoduší jeho výrobu a používání.

9 Seznam použité literatury

[1] ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3*. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005. ISBN 80-718-3337-1.

[2] Technologie II 2. díl [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_2dil.pdf

[3] MASLOV, J.N. *Teorie broušení kovů*. 1979.

[4] Elektrolytické leštění korozivzdorných ocelí. KOSMAČ, Alenka. *Elektrolytické leštění korozivzdorných ocelí* [online]. Brusel: Euro Inox, 2009, s. 20 [cit. 2021-07-21]. ISBN 978-2-87997-319-7. Dostupné z: https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/Electropolishing_CZ.pdf

[5] KOPEC, Rudolf, Ivan IVANUSIV a Jaroslav MACEK. *Úprava povrchu broušením a leštěním*. 1952.

[6] *Delstar Metal Finishing, Inc.: Mechanical Polishing* [online]. [cit. 2021-7-21]. Dostupné z: https://www.delstar.com/mechanical-polishing

[7] *Delstar Metal Finishing, Inc.: Electropolishing* [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: https://www.delstar.com/electropolishing

[8] Polishing belt [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z WWW: http://www.sharptoolsusa.com/index.php?target=product&prodID=236&catID=8

[9] OBR, Ladislav. *Elektrolytické leštění korozivzdorných ocelí* [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-62016/elektrolyticke-lesteni-korozivzdornych-oceli.html

[10] HAN, Wei a Fengzhou FANG. Fundamental aspects and recent developments in electropolishing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2019, 139, 1-23. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2019.01.001

[11] NEUFELD, P. a D. SOUTHALL. Gas Evolution and Pitting in Electropolishing. *Transactions of the IMF*. 2017, 54(1), 40-44. ISSN 0020-2967. Dostupné z: doi:10.1080/00202967.1976.11870370 OBRÁZEK PITTING

[12] *EBSD Oxford Instruments: Electrolyte Polishing & Etching* [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: https://www.ebsd.com/hints-tips-for-ebsd-data-collection/ebsd-sample-preparation/electrolyte-polishing-etching

[13] YIN, Shao Hui, Zhi Qiang XU, Jian Wu YU a Ze Biao WANG. *Solid State Phenomena* [online]. 2011, 175 [cit. 2021-07-21]. ISSN 1662-9779. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.175.140

[14] HOCHENG, H. a K.L. KUO. Fundamental study of ultrasonic polishing of mold steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2002, 42(1), 7-13. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:10.1016/S0890-6955(01)00099-2

[15] GFROERER, Heinz. *MoldMaking Technology: Conventional Polishing Versus Ultrasonic Polishing* [online]. 2010 [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: https://www.moldmakingtechnology.com/careers/conventional-polishing-versus-ultrasonic-polishing

[16] *Kemet: Ultrasonic Polishing - Tips and Process* [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: https://www.kemet.co.uk/blog/toolroom/ultrasonic-polishing-tips-and-process

[17] *Gesswein* [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: https://www.gesswein.com/p-12183-ultramax-mf-touch.aspx

[18] Zlepšení povrchu a tvaru. *Tribotechnika* [online]. TechPark [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-52013/zlepseni-povrchu-a-tvaru.html

[19] Lapování. *ELUC* [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1385

[20] Omílání jako univerzální metoda pro úpravu povrchů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2002, [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/omilani-jako-univerzalni-metoda-pro-upravu-povrchu.html

[21] Omílání velkých a senzitivních obrobků. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2016, [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/omilani-velkych-a-senzitivnich-obrobku.html

[22] *OTEC: Proudová omílací zařízení* [online]. [cit. 2021-7-21]. Dostupné z: https://www.otec.de/cs/produkty/omilani/proudova-omilaci-zarizeni/

[23] *BSV Kubiš s.r.o.: Omílání, odhrotování a leštění* [online]. [cit. 2021-7-21]. Dostupné z: http://www.bsv.zlin.cz/24833-omilani-odhrotovani-lesteni

[24] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *Nauka o materiálu: kovy a kovové materiály*. Praha: České vysoké učení technické, 2002. ISBN 80-010-2568-3.

[25] MACEK, Karel a Jaromír SODOMKA. *Kovové materiály: kovy a kovové materiály*. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-010-3513-1.

[26] *Italinox* [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: https://www.italinox.cz/

[27] *Iscar* [online]. [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: https://www.iscar.cz/index.aspx/countryId/6

[28] *LKAlloy* [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: https://lkalloy.com/cs/

[29] *Aesteiron* [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: https://www.aesteiron.com/

[30] *MachiningDoctor* [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: https://www.machiningdoctor.com/

[31] *Nickel INSTITUTE: Engineering Properties of ALLOY 713C* [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: https://nickelinstitute.org/media/2487/alloys-713c_337.pdf

[32] *BÖHLER: W720VMR* [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: https://www.bohler.cz/cs/products/w720vmr/

[33] *SteelGr* [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: https://www.steelgr.com/Steel-Grades/Mould-Steel/1-4777.html

[34] *VIRGAMET* [online]. [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: https://virgamet.com/

[35] *Tvikon* [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: http://www.tvikon.cz/material/

[36] *NeoNickel* [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: https://www.neonickel.com/cs/alloys/nerezove-oceli/253-ma/

[37] *SCLF* [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: https://www.lfspecialsteel.com/stainless-steel/stainless-steel-bar/253ma-stainless-steel-bar-1-4835.html

[38] *Italinox: Charakteristika korozivzdorných materiálů a základní informace o použití, zpracování, svařování a možné korozi* [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: https://www.italinox.cz/plechy/charakteristika-materialu/strana-2

[39] *AGST Draht & Biegetechnik* [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: https://www.agst.de/4845?lang=cs

[40] *Inerez.cz* [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: https://www.inerez.cz/jakosti-nerezovych-materialu/

[41] *Austral Wright Metals - Ferrous, Non-Ferrous and High Performance Alloys: Stainless Steel - Properties and Applications of Grades 310/310s Stainless Steel* [online]. [cit. 2021-7-21]. Dostupné z: https://www.azom.com/suppliers.aspx?SupplierID=3563

[42] *ARTIK STUDIO* [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: https://www.keramickepece.cz/cs/47-laboratorni-komorove-pece

[43] *Iscar PiccoJet* [online]. [cit. 2021-7-21]. Dostupné z: https://www.iscar.com/eCatalog/Family.aspx?fnum=4484&mapp=IS&app=210&GFSTYP=M

10 Seznam obrázků

Obrázek 1 Obvodové vnitřní broušení [2] 11

Obrázek 2 Planetové vnitřní broušení [2] 11

Obrázek 3 Bezhroté vnitřní broušení [2] 12

Obrázek 4 Mechanické leštění pomocí leštícího pásu [8] 14

Obrázek 5 Schéma elektrolytického leštění 10 16

Obrázek 6 Potenciálová křivka [12] 17

Obrázek 7 Pitting na povrchu materiálu při nesprávně zvolených parametrech leštění [11] 18

Obrázek 8 Schéma ultrazvukového leštění [13] 19

Obrázek 9 Ultrazvukový lešticí přístroj [14] 19

Obrázek 10 Ruční ultrazvukový lešticí přístroj [17] 20

Obrázek 11 Schéma superfinišování [18] 21

Obrázek 12 Schéma procesu lapování [19] 23

Obrázek 13 Součástky v omílacím bubnu [23] 24

Obrázek 14 Výkres leštěného otvoru v součásti 26

Obrázek 15 Vyráběná součást 26

Obrázek 16 Komorová pec Nabertherm N61/H [42] 31

Obrázek 17 Řezání vzorků materiálů 32

Obrázek 18 Povrch ocele 1.4301 po 4h při 804°C 33

Obrázek 19 Povrch ocele 1.2709 po 4h při 804°C 33

Obrázek 20 Povrch ocele 1.4835 po 4h při 804°C 34

Obrázek 21 Povrch Inconelu 713 po 4h při 804°C 34

Obrázek 22 Vnitřní monolitní karbidový soustružnický nůž Iscar Picco [43] 35

Obrázek 23 Schéma návrhu elektrolytického leštění součásti 37

Obrázek 24 Hotový kontakt 38

Obrázek 25 Umístění součásti a kontaktu ve vaně 38

Obrázek 26 Výroba víka 39

Obrázek 27 Frézování drážek pro o-kroužky 40

Obrázek 28 Dokončené víko osazené těsnicími o-kroužky 40

Obrázek 29 Návrh míchátka elektrolytu 41

Obrázek 30 Návrh dráhy nástroje v softwaru Autodesk Fusion 360 43