

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Strojírenská technologie – technologie obrábění

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Inovace řezných nástrojů monolitních a jejich experimentální testování

Autor: **Karel Bouše**
Vedoucí práce: **doc. Ing. Miroslav Zetek Ph.D.**

Akademický rok: 2019/2020

zadání

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské/diplomové práce.

V Plzni dne:

.....
podpis autora

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

AUTOR	Příjmení Bouše	Jméno Karel		
STUDIJNÍ OBOR	B2301 „Strojírenská technologie – technologie obrábění“			
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Zetek Ph.D.	Jméno Miroslav		
PRACOVIŠTĚ	ZČU – FST – KTO			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Inovace řezných nástrojů monolitních a jejich experimentální testování			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2020
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	53	TEXTOVÁ ČÁST	53	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX. 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Bakalářská práce se v teoretické části zaměřuje na rešerši nejaktuálnějších a nejprogresivnějších řešení týkajících se monolitních řezných nástrojů z komplexního pohledu. V praktické části byly zhotoveny inovativní systémy kanálků pro přívod kapaliny pomocí AM. Následně byly vytvořeny varianty, které se porovnály s konvenčním řešením.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>Procesní kapalina, Fréza, Inovace, Aditivní technologie</p>

SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

AUTHOR	Surname Bouše	Name Karel	
FIELD OF STUDY	B2301 „Manufacturing processes – Technology Of Metal Cutting“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Zetek Ph.D.	Name Miroslav	
INSTITUTION	ZČU – FST – KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Innovation of monolithic cutting tools and their experimental testing		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machining Technology	SUBMITTED IN	2020
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	53	TEXT PART	53	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The theoretical part of bachelor thesis is focused on searching the most current and the most progressive solutions of monolithic cutting tools from comprehensive point of view. In the practical part innovative channel systems for liquid supplies using additive technologies were designed. Subsequently, thanks to designed systems new possible variants were directly compared to conventional solution.
KEY WORDS	Cutting fluid, milling cutter, innovation, additive technologies

Poděkování

Zde bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce, panu doc. Ing. Miroslavu Zetkovi Ph.D., za jeho čas, ochotu, cenné rady a přístup při zpracování této kvalifikační práce.

Dále bych chtěl poděkovat RTI a především konkrétně pracovníkům laboratoře experimentálního obrábění za spolupráci, ochotu poskytnout potřebné informace, vybavení a materiály pro moji práci.

Poděkování také patří mé rodině, přátelům a spolužákům za neustálou podporu a trpělivost po celou dobu mého studia.

Obsah

Seznam obrázků.....	10
Přehled použitých zkratk a veličin.....	12
1 Úvod.....	13
2 Rozbor současného stavu	14
2.1 Monolitní řezné nástroje	14
2.1.1 Sandvik – CoroMill Plura	14
2.1.2 Sandvik – CoroMill 316	15
2.1.3 Gühring – RF 100 Speed End Mill	17
2.1.4 Gühring – RT 100	18
2.1.5 Iscar – MULTI-MASTER	19
2.1.6 Iscar – Solid ceramic endmill	19
2.2 Upínací systémy	20
2.2.1 Schunk – iTendo	20
2.2.2 Schunk – Tendo Slim 4ax	21
2.2.3 Sandvik – CoroChuck 930.....	22
2.2.4 Gühring – GühroSync	22
2.2.5 Iscar – Hydrofit.....	23
2.3 Přívod procesní kapaliny a výstupy kanálků	24
2.3.1 Sandvik – CoroMill Plura HFS ISO S	24
2.3.2 Gühring – RT 100 TRIGON	24
2.3.3 Iscar – X-Stream	25
2.3.4 Iscar – SpinJet (Green Line)	26
2.4 Aditivní technologie	27
2.4.1 Sandvik	28
2.4.1.1 Diamantový kompozit.....	28
2.4.2 Mapal	29
2.4.2.1 Minaturizované upínací sklíčidlo.....	29
2.4.3 Gühring	30
3 Návrh, realizace a zhodnocení vlastních experimentů.....	31
3.1 Návrh řešení.....	31
3.1.1 Výběr kleštiny.....	31
3.1.2 Varianta A1	32
3.1.2.1 Inovace originální kleštiny.....	32
3.1.2.2 Hlava s výstupními kanálky.....	33

3.1.3	Varianta A2.....	36
3.1.4	Varianta B.....	37
3.1.4.1	Inovace a optimalizace výchozí frézy.....	37
3.1.4.2	Hlava s výstupními kanálky.....	39
3.2	Realizace experimentu.....	42
3.2.1	Příprava experimentu.....	42
3.2.2	Průběh experimentu.....	44
3.3	Zhodnocení experimentu.....	45
4	Závěr.....	48
	Použitá literatura a internetové zdroje.....	49
	Seznam příloh.....	53

Seznam obrázků

Obr. 1 - Sada nástrojů CoroMill Plura [7]	14
Obr. 2 - CoroMill Plura HFS ISO S [15]	15
Obr. 3 - Sada nástrojů CoroMill 316 [14]	16
Obr. 4 - CoroMill 316 pro niklové slitiny [11]	16
Obr. 5 - RF 100 Speed End Mill [17]	17
Obr. 6 - Příklady speciálních fréz pro obrábění Inconel 718 [18]	17
Obr. 7 - Vrták RT 100 XF [19]	18
Obr. 8 - Porovnání tepelného zatížení konvenčního a RT 100 HF vrtáku [18]	19
Obr. 9 - Vyměnitelné hlavice MULTI-MASTER [21]	19
Obr. 10 - Monolitní keramická fréza ISCAR [23]	20
Obr. 11- Princip polygonálních upínacích systémů (zelená = stopka nástroje) [25]	20
Obr. 12 - Hydraulický upínač Schunk – iTendo [26]	21
Obr. 13 - Kontrolní smyčka dat upínače iTendo [26]	21
Obr. 14 - Tendo Slim 4ax [27]	22
Obr. 15 - Technologie Fulcrum v CoroChuck 930 při utaženém stavu [29]	22
Obr. 16 - Upínač GühroSync [30]	23
Obr. 17 - Schéma hydraulického upínače Hydrofit [31]	23
Obr. 18 - CoroMill Plura ISO S a jeho vnitřní chlazení [8]	24
Obr. 19 - Změna průtokové charakteristiky vrtáku RT 100 TRIGON (vpravo) [33]	25
Obr. 20 - Tepelný upínač SHRINKIN s vedením kapaliny X – Stream [34]	25
Obr. 21 - Zrychlovací hlava SpinJet a zařízení k zobrazení otáček [35]	26
Obr. 22 - Proces výroby pomocí 3D tisku [39]	27
Obr. 23 - Schéma výroby pomocí AM – Sandvik [43]	28
Obr. 24 - Prášek z diamantového kompozitu [44]	29
Obr. 25 - Miniaturizované upínací sklíčidlo pomocí aditivních technologií [45]	29
Obr. 26 - Zeštíhlený hydraulický upínač vyroben pomocí AM [41]	30
Obr. 27 - Kleština GZB-S KD [46]	31
Obr. 28 - GZB-S KD / GZB-S PK [46]	32
Obr. 29 - Hybridní kleština – výsledná podoba (var A1)	32
Obr. 30 - Schéma vyříznutých kanálků	33
Obr. 31 - Řez kleštinou / Pohled z čela	33
Obr. 32 - Výpočet teoretického ideálního vyložení nástroje	33
Obr. 33 - a) Řez hlavou s výstupními kanálky / b) Pohled na výstupní kanálky	34

Obr. 34 - Zobrazení řešení dutiny mezi kleštinou a novým komponentem	34
Obr. 35 - a) Pohled na dosedovou plochu kleštiny / b) Výsledné napojení	35
Obr. 36 - Detailní pohlední na řešení vnějšího průměru hlavy	35
Obr. 37 - Detail výstupní štěrby na kleštině GZB-S PK	36
Obr. 38 - Varianta 3 - finální řešení návrhu včetně inovované frézy	37
Obr. 39 - Inovovaná verze frézy / Výchozí fréza	37
Obr. 40 - a) Pohled na umístění kanálků / b) Detail drážky v příčném řezu	38
Obr. 41 - Zobrazení optimalizace řešení pro zajištění chlazení čela	38
Obr. 42 - Optimalizace úhlu odlehčení pro chlazení hřbetu	39
Obr. 43 - a) Řez hlavou / b) Výsledná podoba hlavy	39
Obr. 44 - a) Umístění kanálků ve šroubovici / b) Znázornění spojovacích kanálků	40
Obr. 45 - a) Detail výstupních kanálků - chlazení čela / b) Výstupní otvory v sestavě	40
Obr. 46 - a) Detailní pohled na výstup / b) Zobrazení chlazení hřbetu frézy	41
Obr. 47 - Detail sražení vnějšího průměru vytažených výstupů z hlavy	41
Obr. 48 - Detail řešení napojení výstupní šroubovice	42
Obr. 49 - Vytištěné varianty	42
Obr. 50 - Finální podoba variant A1 a A2	43
Obr. 51 - Varianta B / Zkušební výtisk výstupní hlavy pro Variantu B	43
Obr. 52 - Varianta A2 v upínači v rámci experimentu	44
Obr. 53 - Testovaná fréza před experimentem bez opotřebení	45
Obr. 54 - Opotřebení frézy při použití standardní kleštiny	45
Obr. 55 - Opotřebení frézy při upnutí do Var. A1 s malým vyložení	46
Obr. 56 - Opotřebení frézy při upnutí do Var. A1 s velkým vyložení	46
Obr. 57 - Opotřebení frézy při upnutí do Var. A2 s velkým vyložení	47

Přehled použitých zkratk a veličin

AM	Additive Manufacturing
RTI	Regionální Technologický Institut
HFS	High-Feed Side
ISO	International Organization for Standardization
HiPIMS	High Power Impulse Magnetron Sputtering
D [mm]	Průměr nástroje
z_n [-]	Počet zubů
n [ot/min]	Počet otáček za jednotku času
v_c [m/min]	Řezná rychlost
v_f [mm/min]	Rychlost posuvu nástroje
f_z [mm/z]	Posuv na zub
a_p [mm]	Hloubka řezu
a_e [mm]	Šířka řezu
MMR	Metal removal rate
TiAlSiN	Nitrid titanu, hliníku a křemíku
TiAlN	Nitrid titanu a hliníku
HSS	High Speed Steel
HPC	High Pressure Coolant
3D	Three Dimensional
CAD	Computer Aided Design
STL	Stereolithographyfile
BP	Bakalářská práce
DMLS	Direct Metal Laser Sintering

1 Úvod

V dnešní době je neustálá inovace nezbytnou součástí ve všech odvětvích výrobního procesu v průmyslové produkci. To se samozřejmě týká i výroby řezných nástrojů včetně těch monolitních. V posledních letech se vývoj posunul velmi dopředu, což se odráží především na produktivních řezných podmínkách, které ještě před několika lety byly nepředstavitelné, ale také na kvalitě obrobeného povrchu a v neposlední řadě na dlouhodobé životnosti monolitních fréz a vrtáků, kterým bude věnována největší pozornost. Důležité je však brát danou problematiku z komplexního pohledu. To znamená, že je podstatné se zaměřit nejen na samotné monolitní nástroje, ale také na správný způsob upnutí či přívodu procesní kapaliny k břítu nástroje. Nejnovějším prostředkem pro zdokonalování jsou bezpochyby aditivní technologie (AM – Additive Manufacturing), které přináší velké možnosti tvarové optimalizace, jelikož jsme schopni vytvořit tvary, které konvenčními metodami obrábění nejsou možné.

Teoretická část slouží k rešerši současného stavu na trhu a k vybrání současných nejnovějších trendů a inovací, co jsou momentálně k dispozici. Je rozdělena do nejdůležitějších oblastí, které ovlivňují obráběcí proces z pohledu monolitních řezných nástrojů.

Cílem bakalářské práce je vytvoření systému přívodu procesní kapaliny k břítu nástroje frézy o průměru 8 mm a jeho následné experimentální testování. Procesní kapalina bude přivedena pomocí inovované kleštiny vyrobené pomocí AM s vnějším průměrem 20 mm. Díky spolupráci s RTI je možné k vytvoření kanálků využít aditivní technologie či nástrojářskou brusku ANCA MX7, což nabízí velmi široké možnosti k realizaci. Po návrhu a zhotovení vytvořeného řešení proběhne testování, kde bude ověřena efektivita celého systému.

2 Rozbor současného stavu

Tato kapitola bude rozdělena na čtyři základní části. Bude proveden rozbor současného stavu u monolitních řezných nástrojů a to konkrétně výběrem nejaktuálnějších nástrojů na trhu a výběrem zajímavých novinek u vytipovaných společností aktivně zaměřených na výrobu monolitních řezných nástrojů. Dále bude věnována pozornost aktuálním upínacím a kleštinovým systémům, které nabízí současný trh. Předmětem zkoumání bude také přívod procesní kapaliny z pohledu upínače a výstupy samotných kanálků. Na závěr bude věnována pozornost aditivním technologiím, bude zaměřena na konkrétní nástroje na trhu vyrobené pomocí AM a zhodnocení výhod tohoto způsobu výroby

2.1 Monolitní řezné nástroje

Výběr bude směřovaný primárně na nástroje obrábějící materiál Inconel 718, který je superslitinou s vysokým obsahem niklu. Využití má především v extrémních teplotách a vysoce korozivních aplikacích. [5]

2.1.1 Sandvik – CoroMill Plura

Sestava vysoce výkonných monolitních karbidových fréz. V nabídce se vyskytuje široká škála různých typů fréz na různé druhy materiálů včetně titanových a niklových slitin. Možnost výběru je také v závislosti na typ frézovací operace, od hrubovacích operací, přes dokončovací až k tvorbě závitů, což nabízí různé typy aplikací. [6]

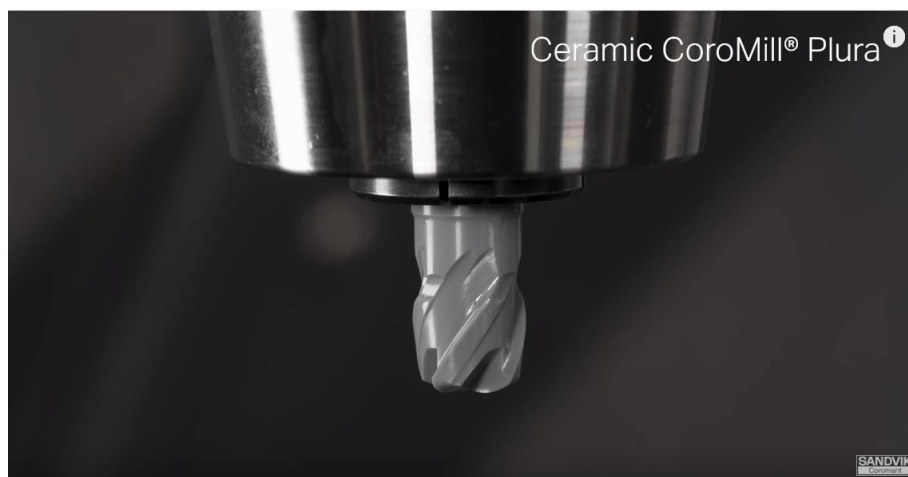


Obr. 1 - Sada nástrojů CoroMill Plura [7]

Přímo pro niklové slitiny Sandvik nabízí typ CoroMill Plura HFS (high-feed side) ISO S. Tyto nástroje jsou schopny navýšit řeznou rychlost až třicetkrát oproti klasickým karbidickým frézám, čímž se výrazně zvedá produktivita. Jsou také odolné proti otěru a zachovávají si svou tvrdost při vysokých teplotách. Optimalizace se týká geometrie, kde je ražena koncepce šesti břitů nástroje pro stranové frézování a čtyř břitů pro čelní frézování. Upraveny jsou také rozměry jádra s ohledem na vylepšení tuhosti při aplikaci. Speciální je i úhel čela a podbroušení přímo pro obrábění niklových slitin. Na povrchu nástroje se nachází speciální povlak GC 1710 optimalizovaný pro náročné pracovní podmínky silně adhezivních a tvrzených materiálů jako je Inconel 718. Tento nový povlak vytvořený inovativní technologií HiPIMS (high power impulse magnetron sputtering v překladu magnetronové naprašování pulzy velkého výkonu) snižuje také přilnavost povlaku, což zabraňuje vzniku tvorby nárůstku a tím se zvyšuje životnost nástroje. V následující tabulce č.1 bude uveden příklad porovnání konvenční karbidové frézy s keramickou frézou CoroMill Plura. Rozdíl v rychlosti úběru materiálu i v trvanlivosti nástroje je markantní. [8,9,11]

Nástroj	Konvenční fréza	CoroMill Plura
D [mm]	12	12
z_n [-]	4	6
n [ot/min]	663	13263
v_c [m/min]	25	500
v_f [mm/min]	92,82	2387,34
f_z [mm/z]	0,035	0,03
a_p [mm]	0,25	0,5
a_e [mm]	12	12
MMR [cm ³ /min]	0,28	14,32
Životnost nástroje	0,5	2

Tab. 1 - Porovnání řezných podmínek konvenční karbidické frézy s keramickou CoroMill Plura [10]



Obr. 2 - CoroMill Plura HFS ISO S [15]

2.1.2 Sandvik – CoroMill 316

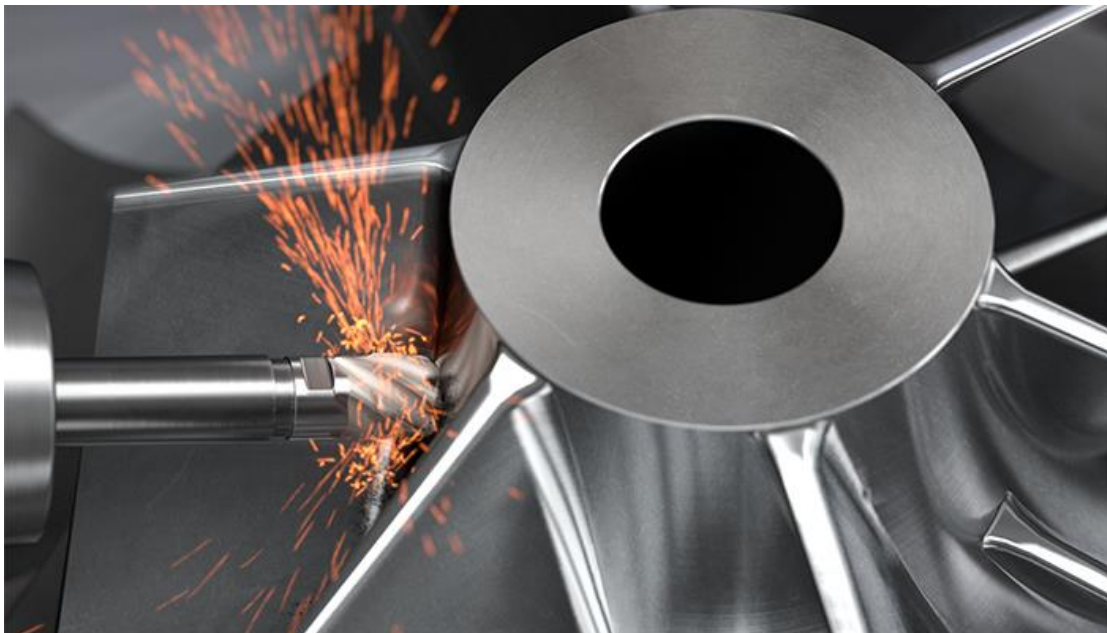
Tento systém nabízí také velmi široké možnosti všech typů frézování jako například čelní s vysokými posuvovými rychlostmi, drážky, šroubovou interpolací tvarové frézování atd. Frézy jsou aplikovatelné a optimalizované na všechny druhy materiálů od ISO P až po ISO S. Vyměnitelnost frézovacích hlavic zaručuje velmi rychlé a zároveň přesné přechody mezi různými typy operací.

„Systém CoroMill 316 využívá spojku Coromant EH, jejímž základním prvkem je samostředící závit, který zaručuje spolehlivé upnutí a zajišťuje maximální tuhost a bezpečnost. Spojka je opatřena pevným dorazem, díky kterému lze snadno poznat, že je hlavice správně dotažena, a který zároveň slouží jako ochrana před zbytečným přepínáním upínacího mechanismu“. [12]



Obr. 3 - Sada nástrojů CoroMill 316 [14]

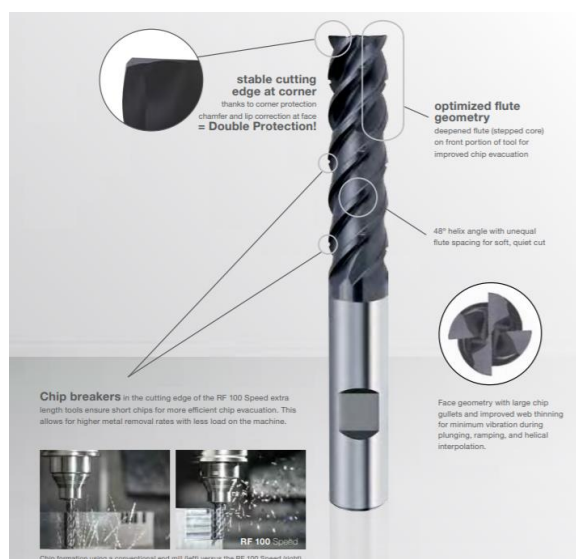
Pro niklové slitiny je konkrétně navržena hlavice s keramickými pájenými břity pro vysokorychlostní hrubování. Jedná se o optimalizovanou keramickou nástrojovou třídu GC6060. Skvěle totiž odolávají velmi vysokým teplotám, které jsou při náročných řezných podmínkách vyvinuty. Je možné dosahovat řezných rychlostí, které jsou klasickými karbidovými hlavicemi nemožné, čímž je zvýšena výrazně produktivita, ale i trvanlivost nástroje. Především je to optimalizací břitů, jež mají negativní úhel břitu a speciálně je upravená i řezná hrana. Rozdíl v geometriích se liší i podle typu obrábění, pro čelní frézování jsou navrženy 4 drážky pro odvod třísek, pro stranové dokonce šest. Efektivní odvod třísek je zaručen také pomocí upravení jádra. [13]



Obr. 4 - CoroMill 316 pro niklové slitiny [11]

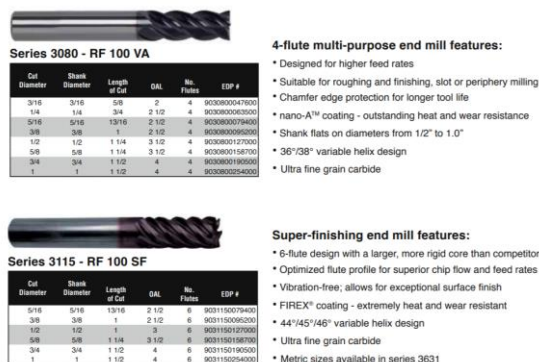
2.1.3 Gühring – RF 100 Speed End Mill

Nejaktuálnější monolitní stopkovitá fréza od Gühringu na trhu. Podobně jako u konkurenčního Sandviku je v nabídce mnoho optimalizovaných variant uzpůsobených na konkrétní aplikace ve frézování. Pro vývoj materiálu tohoto nástroje byl vytvořen naprosto nový typ slinutého karbidu s ultrajemnou zrnitostí, který se na základě svých vlastností skvěle hodí na vysokorychlostní obrábění. Fréza je specifická především díky velkému úhlu šroubovice, který má 48°, což poskytuje možnost obrábění do větších hloubek. Vyznačuje se také nestejným dělením břitů, což spolehlivě zajišťuje hladký a tichý chod nástroje. Na delší verzi této frézy je možné vidět lamače třísek, čímž je zajištěn lepší odvod třísek pryč od místa řezu. Tím je zaručen bezpečnější proces obrábění a menší zatížení stroje. Pro lepší odvod třísek byl optimalizován rovněž tvar šroubovitých drážek jejich prohloubením v přední části frézy. Tento prvek tedy také účelně napomáhá lepšímu odvodu třísek díky zvětšenému čelnímu prostoru. [16]



Obr. 5 - RF 100 Speed End Mill [17]

Gühring má v nabídce samozřejmě i frézy optimalizované na obrábění niklových slitin, avšak oproti Sandviku nejdou cestou keramických fréz, nýbrž jsou pouze speciálně upravené frézy z tvrdých a jemných částic slinutého karbidu. Nabídka je vcelku rozmanitá. Můžeme si například vybrat typ žáruvzdorného povlaku na základě typu aplikací a náročnosti řezných podmínek a také podle typu obráběného materiálu, jako například povlak nano-A či FIREX. Atypickým znakem je proměnlivý úhel šroubovice, jež zajišťuje tlumení vibrací a zlepšenou kvalitu obrobeneho povrchu. [18]



Obr. 6 - Příklady speciálních fréz pro obrábění Inconel 718 [18]

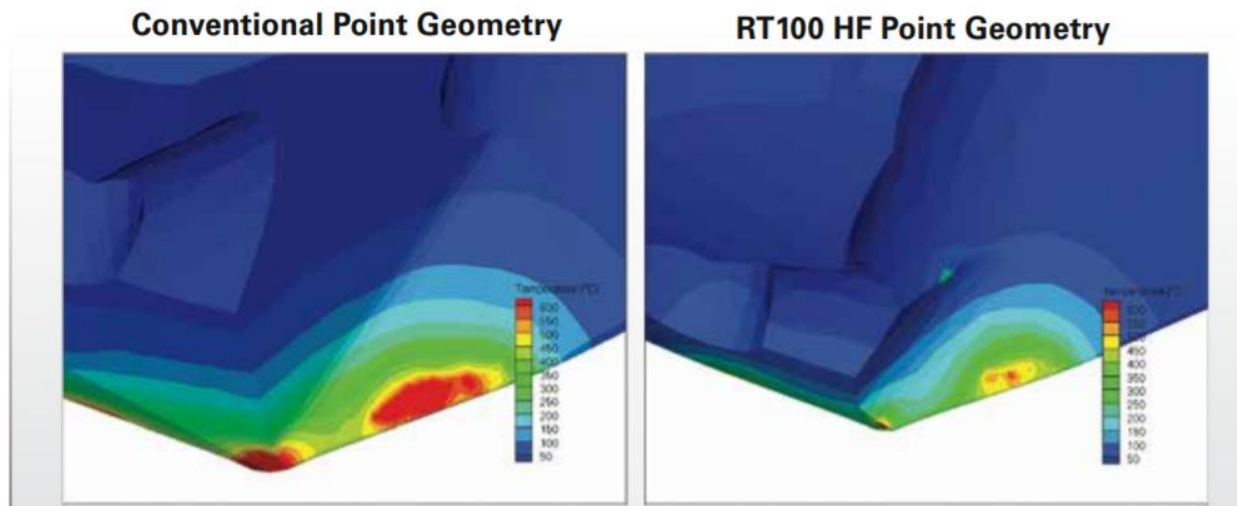
2.1.4 Gühring – RT 100

Gühring se v prvopočátcích zaměřoval především na vrtání a tvorbu nástrojů spojenou s tímto procesem. Ve vývojích pokračují dodnes a výsledkem jsou vrtáky RT 100. Nejnovějším typem aktuálně je RT 100 XF. Nabízí extrémně vysoké výkony pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů i při dokončovacích operacích. Dvojitá fazetka zabírá ve stejný okamžik, tím se eliminuje házení a zajišťuje přímost řezu. Leštěné drážky usnadňují evakuaci třísek a zároveň redukuje teploty v místě řezu, čímž se prodlužuje trvanlivost nástroje. Materiál nástroje je zhotoven z extrémně tvrdého a téměř nerozbitného karbidu, který svými vlastnostmi perfektně vyvažuje poměr mezi tvrdostí a houževnatostí. Na základě své speciální struktury je možné opakovaně ostřit břit, aniž by se snížila kvalita obrobeného povrchu, což samozřejmě zvyšuje podstatně dlouhodobost využití. Na povrchu je využit osvědčený povlak nano-FIREX, který je navíc ještě speciálně vyhlazen což pomáhá k jeho vyšší efektivitě. Díky zkosení břitu na konci nástroje a negativní geometrii je zajištěna ideální tuhost a odolnost. Honovací mikro-geometrické procesy zaručují extrémní přesnost břitů na mikrony. [19]



Obr. 7 - Vrták RT 100 XF [19]

Existují rovněž vrtáky řady RT 100, jež jsou optimalizované přímo pro niklové slitiny, jejich označení je RT 100 HF. Geometrie je prakticky stejná jako u verze XF, dvojitá fazetka zlepšuje kvalitu obrobeného povrchu a stabilitu řezu a materiál vrtáku je z ultra jemného zrna karbidu. Vrták je samostředící, to znamená, že není potřeba otvor navrtávat a vytvořené díry mají toleranci m7. Na povrchu je aplikován povlak nano-Si zajišťující delší trvanlivost. Tento povlak na bázi TiAlSiN poskytuje podobný výkon jako diamantové povlaky, avšak na rozdíl od nich neovlivňují strukturu základního materiálu. Při testování vrtacích nástrojů ukázaly výsledky nárůst životnosti přibližně o 35% v porovnání s ostatními variantami, jako například povlak na bázi TiAlN. Provozní teplota může dosahovat až hodnot přibližně kolem 800°C, což naznačuje vysokou tepelnou odolnost. Všechny tyto vlastnosti snižují tepelné namáhání břitů oproti konvenčním vrtákům. [18]



Obr. 8 - Porovnání tepelného zatížení konvenčního a RT 100 HF vrtáku [18]

2.1.5 Iscar – MULTI-MASTER

Řada vyměnitelných celokarbidových frézovacích hlavic. Poskytují řešení pro hrubovací i dokončovací aplikace, ale existují také speciální hlavice například pro gravírování či rybinové drážky. Díky velkému repertoáru nástrojů je zajištěna vysoká produktivita a vynikající výkon pro jakýkoliv druh materiálu. Spojení s upínačem je zajištěno pomocí speciálně tvarovaného závitu přímo pouze na tento typ hlavic. Velké flexibilitě výroby napomáhá také několik typů upínačů, které se liší délkou, průměry i typem materiálu, avšak spojovací závit je všude totožný. Tato univerzálnost výrazně snižuje nároky na zásoby různých typů speciálních nástrojů a umožňuje velkou variabilitu nastavení frézování. [20,21]



Obr. 9 - Vyměnitelné hlavice MULTI-MASTER [21]

2.1.6 Iscar – Solid ceramic endmill

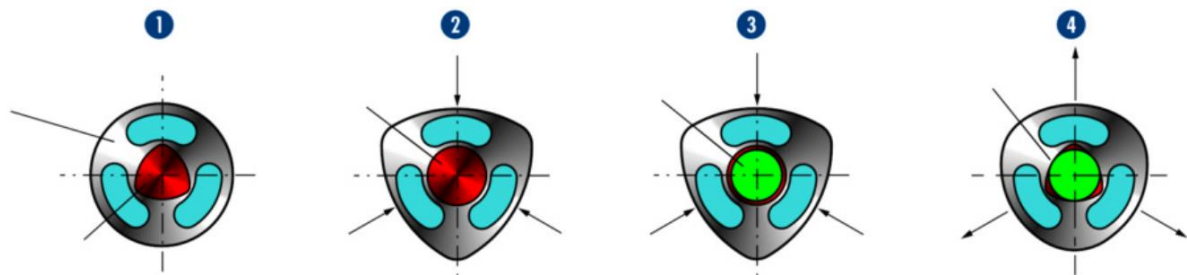
Avšak pro obrábění niklových slitin Iscar nabízí pouze variantu speciální monolitní stopkovité keramické frézy. Dokážou obrábět Inconel 718 až padesátkrát rychleji než standartní karbidové frézy, čímž se rapidně snižuje čas obrábění a tím i náklady. V nabídce jsou dvě varianty frézy, se třemi břity pro stranové frézování a se sedmi břity pro čelní. Průměry frézy jsou v rozmezí od 6 mm do 20 mm. Zajímavostí je také odlehčený krček v oblasti hned za reznými břity, což zaručuje výbornou efektivitu při bočních úběrech. [22]



Obr. 10 - Monolitní keramická fréza ISCAR [23]

2.2 Upínací systémy

Tato část bude zaměřena na nejnovější upínací systémy u vybraných společností. V dnešní době, kdy je kladen zřetel na každý detail, je volba správného upínače velmi důležitou součástí celkové vysoké efektivity obráběcího procesu. V současné době se v praxi můžeme setkat s několika druhy způsobu upínání. Jedním z typů jsou mechanické systémy využívající princip upnutí přes šrouby dosedající kolmo na vyfrézovaný otvor ve stopce nástroje či polygonální upínače, jejichž funkčnost je založena na změně otvoru při změně zatížení vnější síly viz Obr. 11. Dále existují hydraulické systémy fungující na principu stlačování olejového média pomocí upínacího šroubu v dutině upínače nebo například tepelně smrštitelné systémy, jenž pracují na způsobu zvětšování průměru dříku při zahřátí na určitou teplotu a následném opačném procesu vychladnutí, kdy se smrští. Zajímavou pomůckou pro pružnost výroby jsou bezpochyby kleštinová vyměnitelná pouzdra, jelikož umožní aplikovat několik průměrů nástrojů do jednoho upínače. [24]



Obr. 11- Princip polygonálních upínacích systémů (zelená = stopka nástroje) [25]

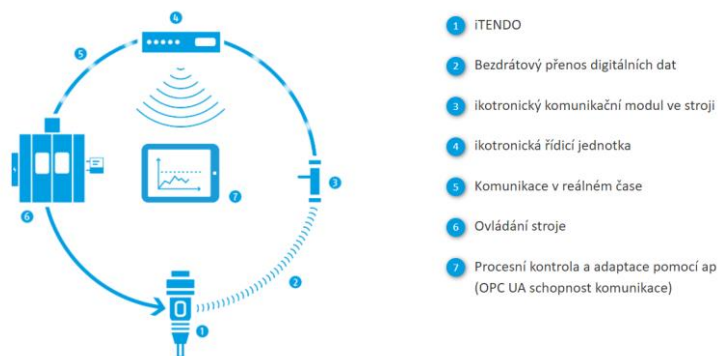
2.2.1 Schunk – iTendo

Tato firma se primárně specializuje na upínací a uchopovací systémy a přináší plno inovativních řešení v této problematice, které vyhovují požadavkům pro Průmysl 4.0. Tento hydraulický upínač je první na trhu, který monitoruje pracovní proces v reálném čase. Navíc je schopen autonomní optimalizace procesu v průběhu obráběcí aplikace na základě dat, které získává, čímž je zajištěna dokonalá stabilizace procesu. V praxi to vypadá tak, že tento nástroj nabízí detekci prasknutí nástroje, či regulaci rychlosti otáček nebo posuvu v průběhu obrábění. [26]



Obr. 12 - Hydraulický upínač Schunk – iTendo [26]

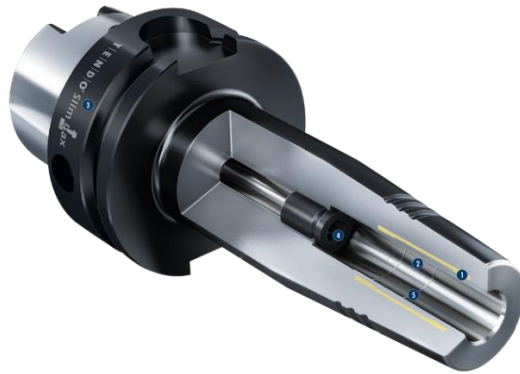
Díky dokonalému nastavení parametrů je možnost získat maximální účinnost výroby a dosáhnout výrazného snížení pracovních časů, takže iTendo může být efektivně využit i u malosériové výroby. Všechna data jsou zachována v kontrolní smyčce stroje, čímž je zajištěna jejich bezpečnost. Důležité bezpochyby také je, že z technologického hlediska je upínač plně funkční jako klasický hydraulický upínač, jeho tvar i tuhost je neměnná a neexistují žádná omezení při aplikaci procesních kapalin, takže je plně použitelný jako běžné hydraulické upínače. [27]



Obr. 13 - Kontrolní smyčka dat upínače iTendo [26]

2.2.2 Schunk – Tendo Slim 4ax

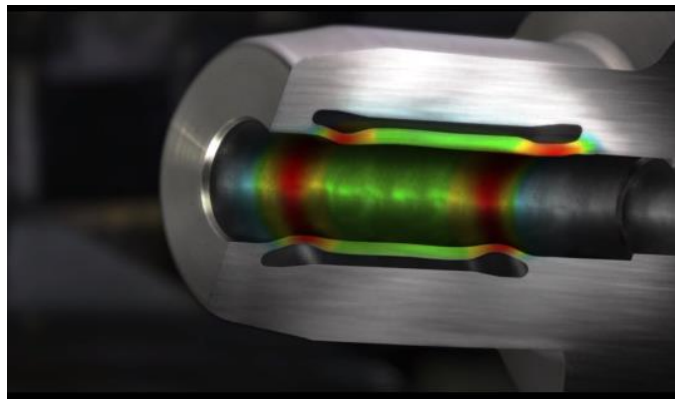
Tento upínač tvarově připomíná tepelně smrštitelný typ svojí štíhlostí, což je výhodou při axiálním obrábění s vysokou přesností. Avšak uvnitř Tendo Slim 4ax funguje na klasické hydraulické rozpínací technologii, což ve výsledku přináší inovativní upínač s fantastickými výhodami využitelné v praxi. Největší výhodou je bezesporu možnost snadné výměny nástrojů během krátkého okamžiku a především bez nutnosti přeprogramování obráběcího stroje, což výrazně usnadňuje a zrychluje výrobu. Výměna nástroje je postavena na principu Plug & Work, takže frézu či vrták lze snadno vyměnit pouze pomocí imbusového klíče. Tento systém dělá upínač téměř bezúdržbový, ale přesto s dlouhodobou životností. Navíc díky možnosti použití redukčních pouzder je i velmi flexibilní. Schunk také nabízí variantu cool-flow, která nabízí účinný systém pro chlazení nástroje skrz uchycení. Oproti konvenčním tepelně smrštitelným držákům se s tímto upínačem procesní kapalina plně dostane i do pouzdra nástroje až k řezné hraně, čímž se zefektivní odvod třísek a zlepší kvalita výsledného povrchu. [27,28]



Obr. 14 - Tendo Slim 4ax [27]

2.2.3 Sandvik – CoroChuck 930

Vysoce přesné hydraulické sklíčidlo pro aplikace dbající na jednoduchost manipulace, ale zároveň na přesnost a ochranu proti vytahování nástrojů. Ochrana proti vytahování může být navýšena ještě použitím kleštín. Mechanicky svorné spojení je totiž jak mezi kleštinou a sklíčidlem, tak i mezi kleštinou a stopkou nástroje, což zajišťuje zaručenou jistotu proti vysouvání nástroje. Díky tomu se zvyšuje produktivita při náročných aplikacích. Ochranu proti vysouvání nástrojů zajišťuje technologie Fulcrum, která pracuje na principu rozpínání tenké pájené membrány na obou koncích na základě jednoduchého povolení či utažení momentovým klíčem. Vznikají tedy dvě samostatné opěrné plochy, což zaručuje skvělý přenos krouticího momentu a také zvyšuje tlumení nástroje. [29]



Obr. 15 - Technologie Fulcrum v CoroChuck 930 při utaženém stavu [29]

2.2.4 Gühring – GühroSync

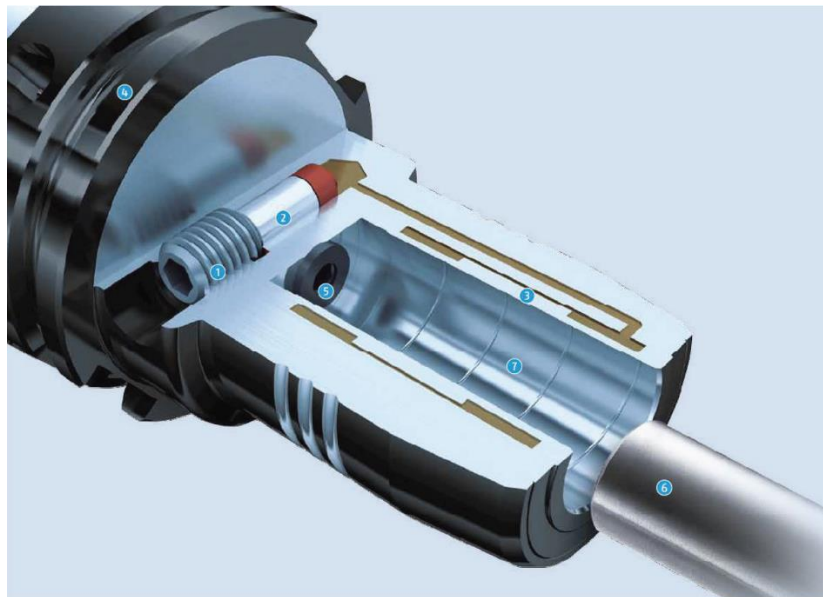
Upínací systém spadající do skupiny GM 300, což je komplexní systém upínacích nástrojů a příslušenství od firmy Gühring. Tento upínač je primárně pro tvorbu závitů a spojuje perfektně vlastnosti hydraulického a tzv. synchro upínacího systému. Výhody hydraulického systému jsou standartní jako například vysoká upínací síla, přesnost obvodového házení, které je menší než 0,004 mm či jednoduchost a opakovatelnost výměny nástroje. Další výhody jsou spojeny především s druhým kombinovaným systémem. Důležitým faktorem při tvorbě závitů totiž je synchronizace mezi posuvem a otáčkami vřetene a snaha o eliminaci vznikajících axiálních a radiálních sil. Pomocí kovových pružin uvnitř nástroje a dalších elastických tlumících prvků jsou dané požadavky naplněny. Výsledkem kombinace těchto dvou technologií je obrovské snížení opotřebení nástroje až o 75%, čímž při větším objemu výroby je možno dosáhnout i finančního ušetření a také lepší kvality vytvořených závitů. [30]



Obr. 16 - Upínač GühroSync [30]

2.2.5 Iscar – Hydrofit

Nejnovější hydraulický upínač od firmy Iscar. Aplikovatelný na veškeré typy obrábění od frézování přes vrtání až k závitování. Disponuje fantastickými parametry, například házení je nižší než 0,003 mm, skvělé tlumení vibrací, čímž je možno dosáhnout vysoké kvality obráběného povrchu i při vysokých řezných podmínkách. Výhodou z ekonomického hlediska je také možnost upnutí všech typů stopek od průměrů 3 mm až do 32 mm. Inovativní řešení je však především technologii hydraulické expanze. Výměna nástrojů probíhá snadno pomocí ovládacího šroubu imbusovým klíčem. Po upnutí už není třeba dalšího seřizování, což zrychluje flexibilitu výroby. Systém se skládá z ovládacího šroubu a pístku, který zajišťuje přesun hydraulické kapaliny do komorového systému, což je možno vidět na Obr. 17 pod čísly 1,2. Číslo 5 zobrazuje nastavovací šroub délky vyložení, kterým snadno můžeme korigovat délku vyložení nástroje. Upínač obsahuje také zápich, kam jsou vytlačeny zbytky maziva či procesní kapaliny do drážky, což zajišťuje suchost stopky nástroje. [31]



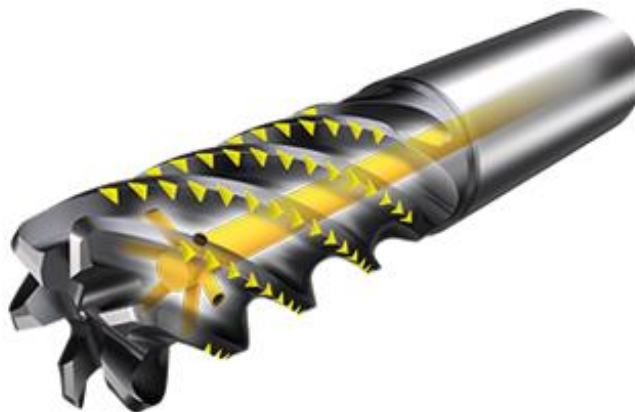
Obr. 17 - Schéma hydraulického upínače Hydrofit [31]

2.3 Přívod procesní kapaliny a výstupy kanálků

Procesní kapalina je v dnešním obrábění nezbytnou součástí. Její funkce je velmi komplexní, svůj význam má jako chladicí či mazací médium za účelem eliminace vznikajících vysokých teplot, ale funguje také jako prostředek k evakuaci třísek a nečistot z místa řezu, což zvyšuje nejen plynulost procesu, ale také výslednou drsnost obrobene součásti. Rozdělujeme tři základní principu přívodu kapaliny. Prvním je konvenční přívod kapaliny, kdy je médium přivedeno k místu obrábění pomocní externího rozvodového potrubí. Další možností je vnitřní přívod vedený nástrojem přímo k místu řezu. Tím je možno navýšit řezné podmínky, jelikož se kapalina dostane lépe do místa řezu ke špičce nástroje. Posledním způsobem v základním dělení je periferní přívod. Otvory jsou vyvedeny v upínací periferně podél nástroje. Důležitým aspektem na závěr je, že použití kapaliny při frézování není vždy vhodné, protože frézování je spojeno s častým přerušováním řezu a při obrábění například žáruvzdorných slitin by při použití kapaliny byly teplotní výkyvy tak obrovské, že by mohlo dojít až k prasknutí nástroje. [32]

2.3.1 Sandvik – CoroMill Plura HFS ISO S

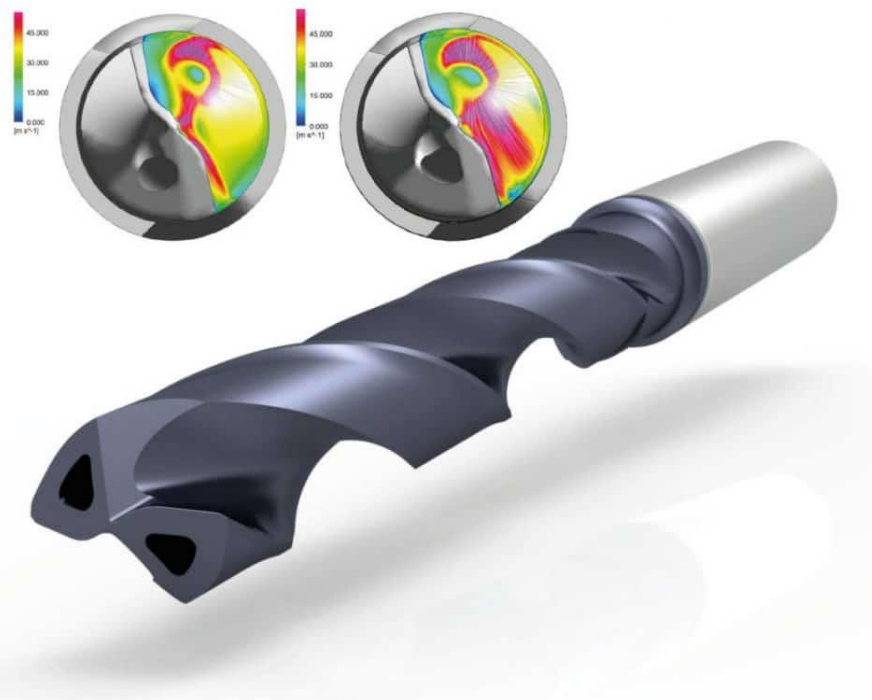
Pro tento typ frézy určený primárně k obrábění titanových slitin byla vytvořena varianta této frézy s vnitřním vedením kapaliny včetně zesilovače jejího účinku. Je určena především pro obrábění v náročných podmínkách, kde je kladen důraz na odvod třísek a regulaci teploty v oblasti řezu. Kanálky jsou zavedeny do všech šesti drážek frézy, takže výstup kapaliny z frézy je konstantní po celém obvodu, což v praxi v kombinaci s unikátním zesilovačem proudění znamená účinnější regulaci teploty. [8]



Obr. 18 - CoroMill Plura ISO S a jeho vnitřní chlazení [8]

2.3.2 Gühring – RT 100 TRIGON

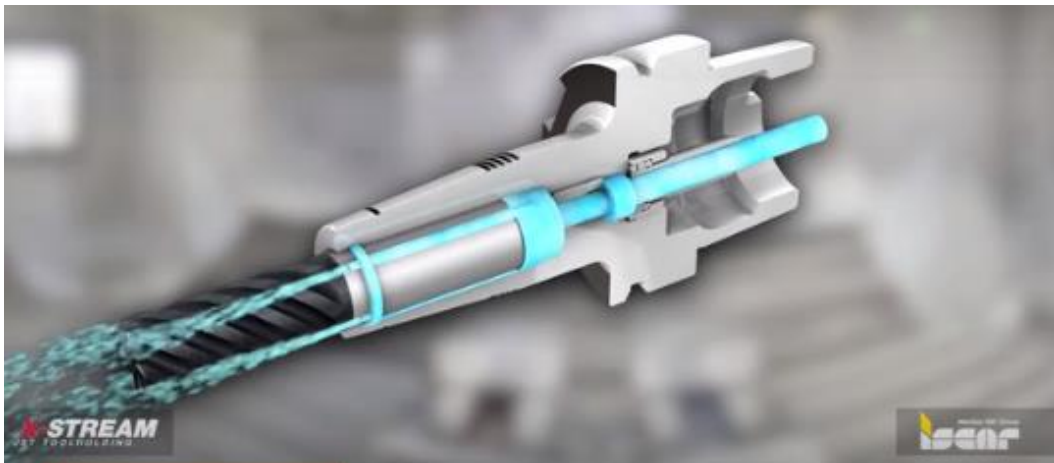
Vrták spadající do skupiny RT 100 s inovativním vnitřním vedením kanálků. Inovace spočívá v trojúhelníkovém tvaru chladících kanálků, díky kterým je optimalizován průtok a objem proudící kapaliny. Mnohem efektivněji jsou také eliminovány vysoké procesní teploty při aplikaci a oproti konvenčním kruhovým kanálkům je chladicí médium vedeno lépe k nejméně zatíženým oblastem, což zahrnuje řeznou hranu a rohy břitu. Důležitou informací je, že není jakýmkoliv způsobem narušena stabilita a efektivita nástroje i přes větší průřez kanálků. Na Obr. 19 je možno vidět srovnání průtokové charakteristiky konvenčních a trojúhelníkových kanálků TRIGON. [33]



Obr. 19 - Změna průtokové charakteristiky vrtáku RT 100 TRIGON (vpravo) [33]

2.3.3 Iscar – X-Stream

Tepelný upínač vhodný pro HSS (High Speed Steel v překladu rychlořezná ocel) a celokarbidové nástroje s vnitřním chlazením vyvedeným periferně podél nástroje. Chladicí kapalina z upínače vychází tak, že obepíná nástroj po jeho celém obvodu a tím dosahuje stejného efektu, jako když je vedena uvnitř nástroje. Tento systém přináší zlepšení v několika faktorech. Je možno dosáhnout vyšší rychlosti chladicího média zachováním průtokové rychlosti a zmenšením otvorů kanálků na výstupu. Kapalina směřuje přímo ke špičce nástroje na řezné hrany, čímž efektivněji zajistí evakuaci třísek, které by mohli ovlivnit kvalitu obrobeného povrchu. Díky zvýšené efektivitě chlazení je prodloužená životnost nástroje a tento tepelný upínač v kombinaci s danou technologií vedení kanálků je vhodný pro vysokorychlostní obrábění. Na Obr. 20 je schéma průtoku kapaliny, kde je možno si všimnout komory, kde se shromažďuje pracovní médium a odkud vedou kanálky směrem k výstupu s menším průměrem a kapalina zde proudí větší rychlostí. [34]



Obr. 20 - Tepelný upínač SHRINKIN s vedením kapaliny X – Stream [34]

2.3.4 Iscar – SpinJet (Green Line)

Zrychlovací hlava pracující na principu pohánění tlakem chladicí kapaliny pro širokou škálu obráběcích aplikací. Je vhodná pro dokončovací a polodokončovací aplikace a je určena pro použití nástrojů malých průměrů. Využití systému je efektivní především ve chvíli, kdy je potřeba vysokých otáček. U upravené verze Green Line jsme schopni dosáhnout až 55 000 otáček za minutu. Pro aplikaci daného systému je nutné využít vysokotlaký systém přívodu chladicí kapaliny (HPC). Uplatnění tento systém může mít jak u strojů s vestavěným vysokotlakým systémem, tak i pro modernizované doplněné vysokotlakým čerpadlem. SpinJet také nabízí zařízení k zobrazení aktuálních otáček v reálném čase. Nástroje se upínají pomocí kleštiny typu ER11 a maximální průměr stopky je 7 mm. Upevnění do hlavního vřetena je pomocí vtažovacího čepu, podmínkou je také otvor pro průchod chladicího média. Tento systém nabízí širokou škálu výhod, výrazně je zvýšená efektivita a doba obrábění a to zhruba až o 60% oproti strojům nevyužívající tento systém. Zvýšená je také přesnost a kvalita povrchu, což je dosaženo díky možnosti nastavení ideálních rezných podmínek. Na základě toho v kombinaci s neustálým přívodem procesní kapaliny se samozřejmě také výrazně prodlužuje životnost nástroje. V Tab. 2 jsou zaznamenány obecné strojní parametry nutné k efektivnímu využití SpinJet systému. [35, 36, 37]



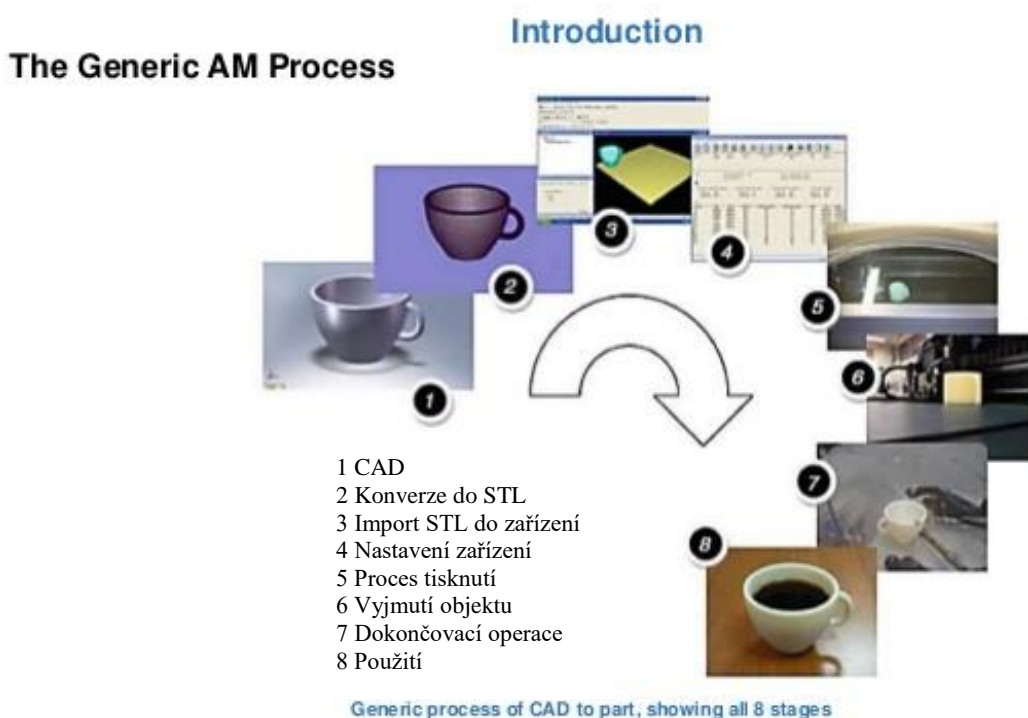
Obr. 21 - Zrychlovací hlava SpinJet a zařízení k zobrazení otáček [35]

Provozní data	Hodnoty
Provozní rozsah tlaku chladicí kapaliny [bar]	20 – 40
Provozní rozsah průtoku chladiva [l/min]	10 – 20
Otáčky vřetena [ot/min]	35 000 - 55 000
Optimální průměr rezného nástroje [mm]	Vrtání: 0,5 – 4
	Frézování: 1,5 – 3,5
Maximální průměr stopky nástroje [mm]	7

Tab. 2 - Obecné provozní údaje vřetena SpinJet GreenLine [37]

2.4 Aditivní technologie

Aditivní výroba neboli 3D tisk si už několik posledních let buduje svoje pevné postavení v rámci strojírenského průmyslu. Je to proces, při kterém vzniká trojrozměrný konečný výrobek nanášením tenkých vrstev materiálu postupně na sebe. V posledních letech se do popředí 3D tisku místo plastů dostávají především kovové materiály. Svoje uplatnění nachází především v automobilovém, leteckém a kosmickém průmyslu, jelikož je zde velký potenciál ve snížení hmotnosti komponentů. To je dosaženo především tvarovou optimalizací a tvorbou dutin, které by klasickými konvenčními metodami obrábění nebyly vůbec možné. Tomu také napomáhá schopnost přímého převádění modelů z CAD souborů do formátu STL, který je podporován tiskárnami a vytvoří uzavřené plochy originálního CAD modelu, čímž může být výrazně usnadněn a zrychlen proces výroby. Princip procesu zhotovení součásti pomocí aditivních technologií je znázorněn na Obr. 22. [4, 38]



Obr. 22 - Proces výroby pomocí 3D tisku [39]

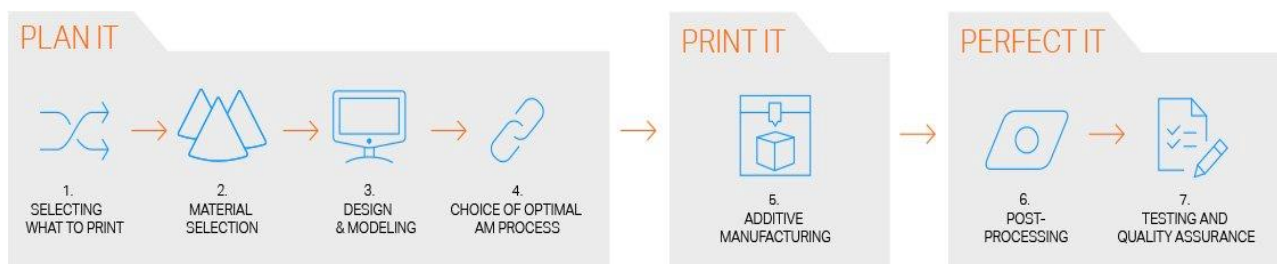
V následujících podkapitolách bude zhodnocen současný přínos a využití aditivních technologií v praxi u vybraných společností z předchozích kapitol a také firem konkrétně zaměřujících se inovaci monolitních řezných nástrojů. Přínos AM se stále rapidně zvyšuje, a proto bude zhodnocena míra jejich využití a schopnost implementace nových progresivních technologií do výroby. Například firma **Iscar** využívá 3D technologie prozatím jen pro prototypování a zařazení do plnohodnotné výroby je teprve ve fázi výzkumu.

Aditivní technologie v rámci monolitních řezných nástrojů jsou prozatím využívány jen velmi sporadicky. Důvodem jsou mnohem vyšší náklady na výrobu v porovnání se standardní výrobou. Využity však mohou být v procesech, kde není možné vytvořit požadované tvary pomocí klasických obráběcích metod. To může být například složité vedení chladících kanálků či vysoký počet pájených řezných elementů po obvodu frézy. Nejvíce aktivní ve vývoji podobných technologií jsou společnosti Mapal, Komet nebo LMT. [40]

V upínací technice momentálně není využívána aditivní výroba pro tvorbu celých upínáčů včetně upínacího kuželu. Důvodem je také především finanční stránka jako u monolitních nástrojů, jelikož náklady na výroby by byli výrazně vyšší. Svoje uplatnění má však výroba hybridní, kde se kombinují standartní výrobní postupy s těmi aditivními například pro štíhlé vedení kapaliny v hydraulickém systému. Společnost **Schunk**, která se zaměřuje na tvorbu upínacích zařízení, na trhu zatím nenabízí žádný upínač vyrobený pomocí aditivních technologií. Nabízí pouze možnost výroby 3D komponentů na zakázku a AM aktivně využila zatím pouze v tvorbě uchopovacích systémů. [41, 42]

2.4.1 Sandvik

Tato společnost jedna z neaktivnějších co se týče implementace velké škály inovací do výroby na celém trhu. Samozřejmě se to týká také aditivní výroby, která je v dnešní době už nezbytnou a plnohodnotnou součástí, jelikož už vznikla dceřiná společnost Sandvik Additive Manufacturing, jež je zaměřená konkrétně jen na tvorbu komponentů pomocí 3D tisku. Nabízí možnost pro ostatní firmy tvorby všemožných výrobků a nástrojů od návrhu, přes realizaci až po otestování daného návrhu s možností následných úprav. Vysokou flexibilitu a variabilitu výroby umožňuje také široká škála materiálových prášků. V následujících podkapitolách se zaměříme zajímavé inovace v oblasti AM. [43]



Obr. 23 - Schéma výroby pomocí AM – Sandvik [43]

2.4.1.1 Diamantový kompozit

Diamant je nejtvrďší přírodní materiál na světě. Je velmi důležitou součástí ve velké škále nástrojů ve strojírenském průmyslu včetně nástrojové výroby a to především díky své odolnosti a dlouhodobé životnosti. Už od 50. let minulého století se sice můžeme setkat také se syntetickým diamantem, ale vzhledem k tomu, že jeho výroba je komplikovaná, není možné tvořit složité tvary. Sandvik však jako první zhotovil 3D vytisknutelný diamantový kompozit, což nám nabízí možnost vytvářet takřka neomezené tvary z tohoto extrémně tvrdého materiálu. Proces výroby je však relativně komplikovaný. Tiskne se z diamantového prášku a polymerů, jenž tvoří směs s kašovitou konzistencí. K tisknutí se využívá metoda zvaná stereolitografie, kde výsledný tvar vzniká po malých vrstvách vznikajících postupně na sobě ztuhnutím materiálu v daných souřadnicích pomocí UV záření. Nejdůležitější je však krok po vytvoření 3D objektu. Sandvik vyvinul vlastní speciální metodu následného zpracování tak, aby bylo dosaženo ideálních vlastností diamantového kompozitu. Nevyužitý diamantový prášek může být extrahován z polymerové kaše a může být opět využit v další úloze, což výrazně snižuje celkové náklady na výrobu. [44]



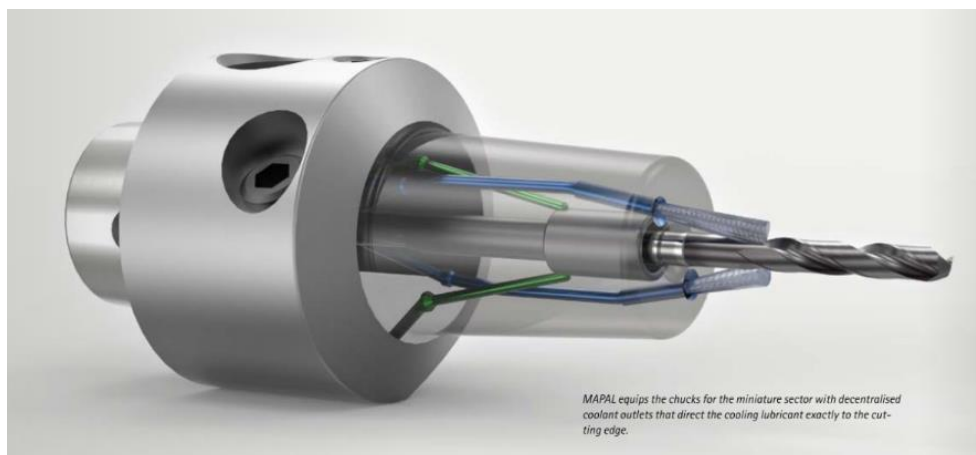
Obr. 24 - Prášek z diamantového kompozitu [44]

2.4.2 Mapal

Tato společnost se už desítky let zaměřuje na nástrojařskou výrobu. Jejich filozofie se zaměřuje na implementaci nejprogressivnějších metod za účelem co nejvyšší efektivity a kvality výroby. Uvědomují si všechny výhody aditivních technologií, které už jsou zmíněny výše v rámci mé BP. Vzhledem k tomu, že v rámci monolitních rezných nástrojů ještě neexistuje žádný konkrétní nástroj, pozornost bude zaměřena na hybridní výrobu upínacích systémů.

2.4.2.1 Miniaturované upínací sklíčidlo

V dnešní době je velice rozšířené obrábění miniaturními frézami s velmi malými průměry v řádu jednotek milimetrů. Tím se ale ještě více zvedají nároky na přesnost a kvalitu upnutí nástroje. Společnost Mapal nabízí miniaturní hydraulický upínač s vnitřním průměrem 3 mm vyrobený pomocí aditivních technologií. Tento upínač splňuje všechny požadavky miniaturního upínače jako je minimální radiální házení či přívod chladicí kapaliny. Minimální radiální házení zajišťuje inovativní řešení upínací komory, která těsně přiléhá ke stopce nástroje. Sklíčidlo také umožňuje homogenní zrychlení či zpomalení celého systému včetně nástroje, což vede k menšímu zatížení vřetena. Díky aditivním technologiím bylo možno navíc zhotovit decentralizované vývody pro chladicí kapalinu, které jsou nasměrovány přímo k břitě nástroje. Zajišťuje to ideální přívod kapaliny, díky kterému není potřeba následného čištění dílu. [45]



Obr. 25 - Miniaturizované upínací sklíčidlo pomocí aditivních technologií [45]

2.4.3 Gühring

Také společnost Gühring implementuje AM do několika odvětví své výroby. Příkladem je zeštíhlený hydraulický upínač pro malé průměry. Je zhotoven pomocí hybridní výroby tzn., že aditivní výroba není využita na celý upínač. Na platformě HSK kužele s hydraulickým systémem je dotisknuta nadstavba s požadovaným optimalizovaným tvarem. Upínání stopky je realizováno pomocí dvoukomorového hydraulického systému. „*Při klasickém způsobu výroby by zde nebylo možné propojit hydraulický systém s vnitřním upínacím pouzdem v přední části. Upínač má vynikající tlumicí vlastnosti nežádoucích kmitů, které vznikají při obrábění touto štíhlou nástrojovou soustavou.*“ Využití nachází například ve formářském průmyslu. [41]



Obr. 26 - Zeštíhlený hydraulický upínač vyroben pomocí AM [41]

3 Návrh, realizace a zhodnocení vlastních experimentů

Tato kapitola je věnována praktické části BP. V následujících podkapitolách bude popsán celý proces návrhu a zhotovení systému přívodu procesní kapaliny kleštinou. Cílem je nasměrovat tok procesní kapaliny ke špičce nástroje tak, aby co nejefektivněji chladila místo řezu a chránila břit odstraňováním nečistot a třísek. Tato inovace by měla přinést delší trvanlivost nástroje a zároveň zlepšení jakosti výsledného obrobeného povrchu. Experiment byl vyvíjen ve spolupráci s RTI, který nabízí širokou škálu možností, jakým způsobem může být optimalizace provedena.

3.1 Návrh řešení

V této podkapitole bude popsán proces navrhovaných řešení. Nejprve byla zvolena kleština, která je brána jako výchozí a budou se z ní vyvíjet další kroky návrhu. Následně budou popsány varianty vytvořených řešení s detailním popisem procesu zhotovení včetně využitých technologií.

3.1.1 Výběr kleštiny

Jako výchozí kleština, která byla zvolena pro tento experiment je GZB-S od firmy Schunk. Cílem experimentu je vytvoření systému procesní kapaliny pro frézu o průměru 8 mm. Na základě těchto základních požadavků bylo tedy vybráno vyměnitelné vložené pouzdro s vnitřním průměrem 8 mm, vnějším 20 mm a délkou 50,5 mm. Bližší specifikace základních rozměrů jsou poskytnuty na výkrese v příloze č.1. Společnost Schunk nabízí navíc tento typ kleštiny ve dvou verzích.

První typ s názvem GZB-S KD je odolná proti procesní kapalině až do tlaku 80 barů, což znamená, že pokud je potřeba využít procesní kapalinu při obráběcím procesu, je nutné využít externí chlazení či vnitřní chlazení vedené nástrojem.



Obr. 27 - Kleština GZB-S KD [46]

Druhý typ s označením GZB-S PK se liší tím, že jsou prodloužené podélné drážky až ke konci kleštiny, jak je možno vidět na Obr. 28. Vlevo je chladič odolná GZB-S KD a vpravo GZB-S PK s vyvedenými drážkami pro periferní chlazení. Co se týče ostatních rozměrů, jsou tyto kleštiny naprosto totožné. Při použití této kleštiny v praxi je sice dosaženo periferního přívodu procesní kapaliny, avšak kapalina není žádným způsobem směřována do požadovaného prostoru a pouze rovnoměrně obklopuje nástroj po jeho obvodu. Z kleštiny tedy vychází 6 úzkých štěrbin o šířce 0,3 mm a délce 6 mm.



Obr. 28 - GZB-S KD / GZB-S PK [46]

3.1.2 Varianta A1

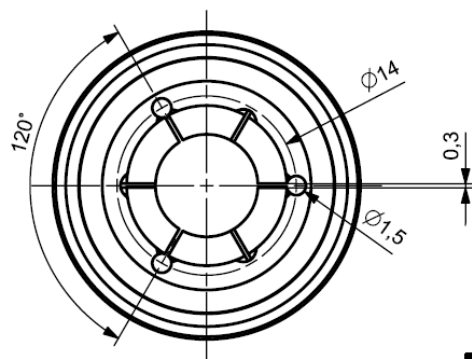
Hlavním smyslem úprav a inovací, na kterou byla zaměřena největší pozornost, je přesné usměrnění toku kapaliny tak, aby proud směřoval ke špičce nástroje. Důležitým aspektem je také zajištění dostatečného objemu pracovního média do procesu. Aby všechny tyto požadavky byly splněny, byla zhotovena hybridní kleština. Pomocí aditivních technologií totiž byl vytvořen nový komponent sestavy, který byl následně natisknut na předem optimalizovanou originální kleštinu GZB-S KD. V následujících podkapitolách bude popsán proces výroby celé sestavy rozdělený na jednotlivé části. Výsledný tvar je znázorněn na Obr. 29, kde hnědou barvou je zvýrazněn nový prvek vyrobený pomocí AM.



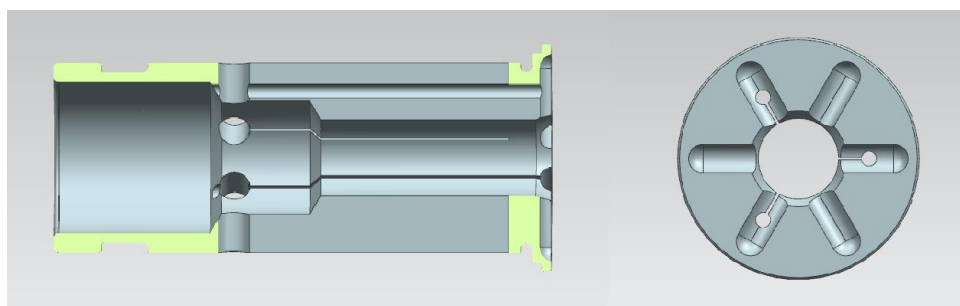
Obr. 29 - Hybridní kleština – výsledná podoba (var A1)

3.1.2.1 Inovace originální kleštiny

Jak už výše bylo zmíněno, vyměnitelné pouzdro GZB-S KD není určeno pro vedení procesní kapaliny, proto bylo nutné vytvořit systém kanálků tělem této kleštiny tak, aby byl zajištěn dostatečný objemový průtok směrem k natisknuté hlavě s výstupy. Proto pomocí stroje FANUC ROBOCUT α -c600ib, které pracuje na principu elektroerozivního drátového řezání, byly vyříznuty tři kanálky s průměrem 1,5 mm na roztečné kružnici 14 mm s rozestupy 120°. Vše přehledně zobrazuje Obr. 30, kde je představen jednoduchý výkres se všemi základními kótami. Obr. 31 znázorňuje na levé straně řez kleštinou, kde je možné vidět, v jaké oblasti jsou kanálky vedené tělem kleštiny. Napravo jsou vidět výstupy na čele, zde bude navržena nová navržená část pomocí AM.



Obr. 30 - Schéma vyříznutých kanálků



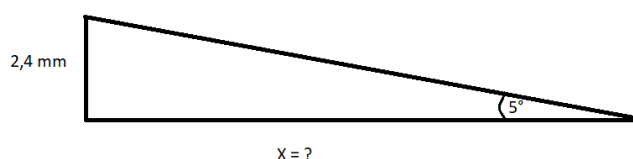
Obr. 31 - Řez kleštinou / Pohled z čela

3.1.2.2 Hlava s výstupními kanálky

Jak už bylo výše zmíněno, tento nově vytvořený komponent bude natisknut na předem upravenou originální kleštinu. To přináší obrovské množství výhod, ale zároveň také je potřeba splnit několik nezbytných požadavků tak, aby tento komponent byl vůbec vytisknutelný a bylo možné ho spojit s kleštinou. Všechny tyto aspekty budou popsány v následujících odstavcích. Co se týče základních funkčních rozměrů, tak vnitřní průměr samozřejmě zůstává na hodnotě 8 mm. Délka nového komponentu je 9 mm, z čeho vyplývá, že celková délka kleštiny nyní dosahuje délky 59,5 mm.

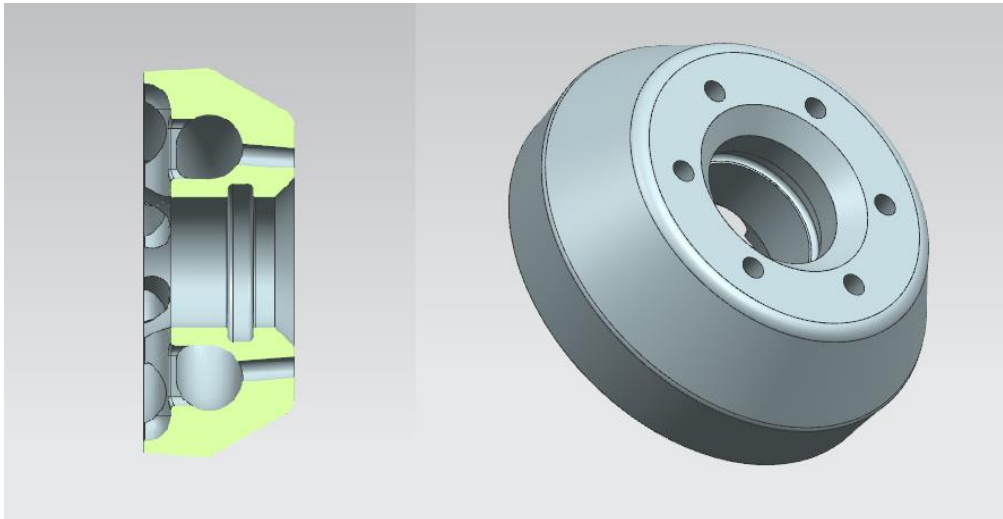
Jedním ze základních požadavků tohoto řešení bylo zajištění správného umístění kanálků. To bude splněno ve chvíli, kdy proud kapaliny bude směřovat přímo ke špičce nástroje pro zajištění co nejvyšší efektivity celého chladicího procesu. Bylo uvažováno běžné vyložení standartní frézy o průměru 8 mm v rozmezí 25 – 30 mm. Výstupy kanálků jsou na roztečné kružnici 12,8 mm a jsou sklopeny pod úhlem 5°. Tento úhel naklonění kanálků byl vybrán podle jednoduchého dosazení hodnot do rovnice z trojúhelníku na Obr. 32 pomocí funkce tangens byla dopočítaná teoretická ideální hodnota vyložení x, která dosahuje hodnoty 27,4 mm, což je vyhovující. Detailní pohled na celé řešení nabízí řez na Obr. 33 a).

$$x = \frac{2,4}{\text{tg } 5^\circ} = 27,4 \text{ mm}$$



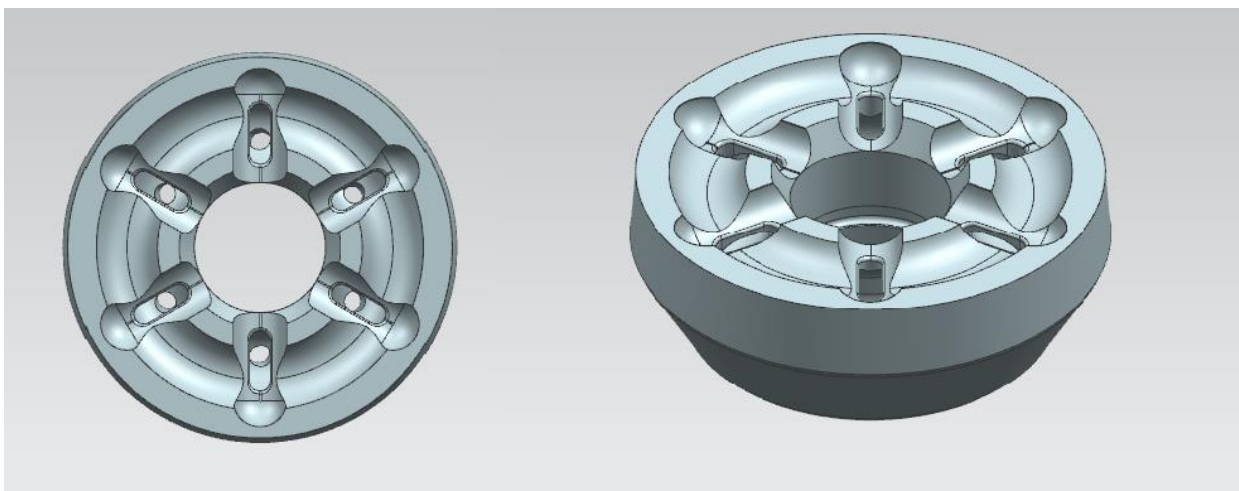
Obr. 32 - Výpočet teoretického ideálního vyložení nástroje

Dalším nezbytným úkolem bylo zajistit přísun dostatečného objemu kapaliny do procesu. To by mělo zařídit šest výstupních kanálků o průměru 1,3 mm, které jsou vidět na Obr 33 b). Pro zaručení rovnoměrného rozložení kapaliny do všech výstupních otvorů byla vytvořena komora, kde se shromažďuje kapalina po celém svém obvodu a poté díky tlaku, kterým je poháněna, se rovnoměrně rozděluje do všech výstupních kanálků. Základní tvar komory byl nastaven na 4x4 mm. Z důvodu tisknutelnosti však musely být všechny hrany zaobleny tak, aby vytvářeli téměř kruhový otvor. Efektivnost řešení by to nemělo nikterak ovlivnit. Výsledný tvar je ukázán na řezu, který představuje Obr. 33 a).



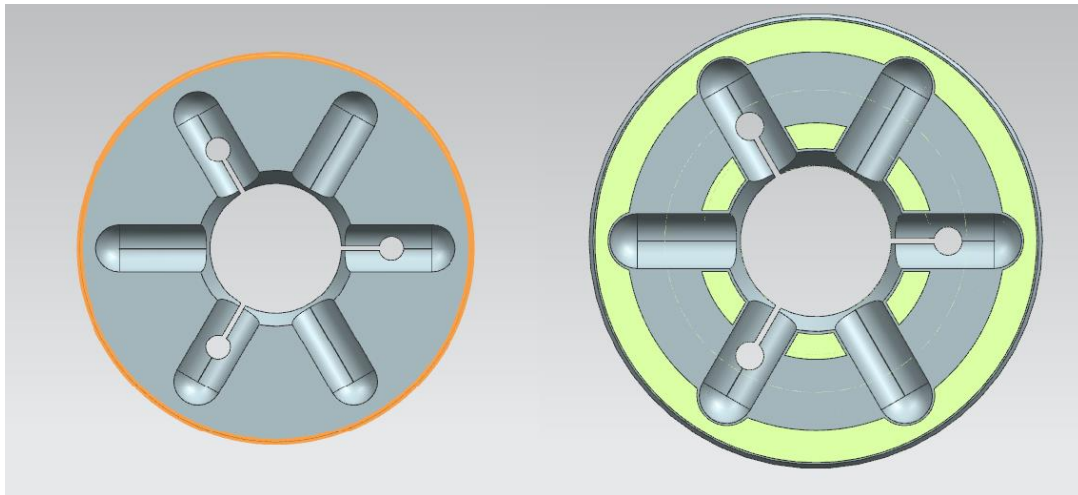
Obr. 33 - a) Řez hlavou s výstupními kanálky / b) Pohled na výstupní kanálky

Do komory je kapalina přivedena pomocí 6 oválných otvorů, které ji propojují s další vzniklou dutinou určenou pro kumulaci kapaliny. Oválné otvory byly umístěny přesně podle paprsků, které jsou na čele originální kleštiny GZB-S KD. Jejich délka činí 3,7 mm a šířka 1,2 mm. Tato komora byla vytvořena za účelem maximálního využití prostoru mezi kleštinou a hlavou s výstupními kanálky. Mezi jednotlivými paprsky s průchodem do hlavní komory byly navíc vytvořeny další dutiny, aby se kapalina mohla shromažďovat i v těchto prostorech. Šířka této dutiny dosahuje hodnoty 3,7 mm a hloubka v nejnižším bodě je 1,3 mm. Detaily celého řešení jsou zobrazeny na Obr. 34.



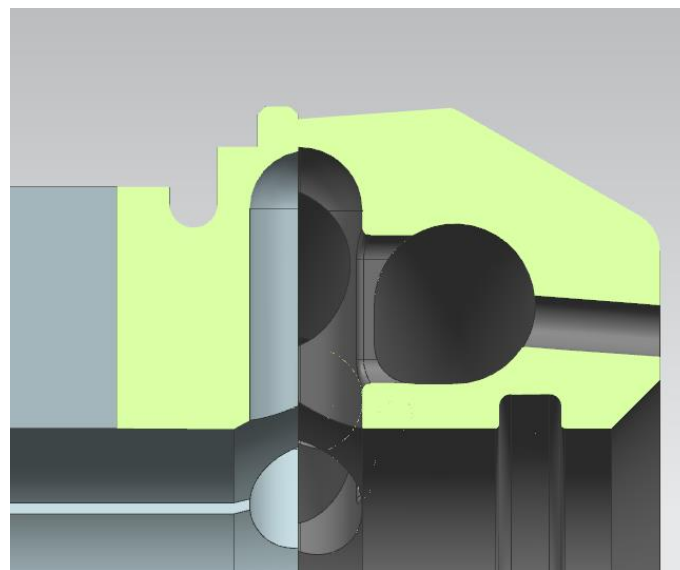
Obr. 34 - Zobrazení řešení dutiny mezi kleštinou a novým komponentem

Obr. 34 mimo jiné nabízí ukázkou ploch, které budou hlavu spojovat s kleštinou. Proto následující pozornost bude věnována popisu postupu zajištění natisknutelnosti návrhu hlavy na kleštinu. Základem řešení bylo nejprve okopírování tvaru dosedové plochy na kleštině. To znamenalo vytvoření stejného tvaru šesti „paprsků“ (Obr. 35 a). Musela se však zvětšit jejich velikost, aby byl prostor pro drobnou odchylku při natisknutí. Pro dostatečně pevné spojení nebyla potřeba využít všechnu zbývající dotykovou plochu. Na vnějším průměru tedy zůstává spojitá plocha po celém obvodu o tloušťce 1,7 mm a na vnitřním průměru šest ploch rozdělené jednotlivými paprsky o tloušťce 1,3 mm. Ve zbytku prostoru byla vytvořena dutina pro proudění kapaliny, která je popsána v předchozím odstavci. Výsledné řešení dotkových ploch je znázorněno na Obr. 35 b), kde zelené plochy představují prostory, kde jsou oba komponenty spojeny.



Obr. 35 - a) Pohled na dosedovou plochu kleštiny / b) Výsledné napojení

Také bylo potřeba vyřešit zkosení na vnějším průměru, které je oranžově zvýrazněno na Obr. 35 a). Znamenalo to upravit řešení tak, aby vnější průměr hlavy, která bude natisknuta na kleštinu, byl na stykové ploše stejný či menší než na kleštině. Jako první řešení se samozřejmě nabízelo vytvořit totožné sražení jako je na kleštině. Nakonec však byla zvolena varianta s postupným zužováním vnějšího průměru tak, že v místě stykové plochy byl menší o 0,2 mm, což ideálně splňuje požadavek pro bezproblémové natisknutí. Detailní pohled na výsledné řešení představuje Obr. 36.



Obr. 36 - Detailní pohlední na řešení vnějšího průměru hlavy

Na Obr. 36 je možné také vidět na vnitřním průměru drážka. Ta byla zhotovena pro těsnící O-kroužek o rozměrech 8x1 mm a je tedy zřejmé, že jejím účelem je zamezení úniku kapaliny po obvodu frézy. Šířka drážky je 1,55 mm, hloubka 0,85 mm a rádius vnitřních hran 0,3 mm. Tyto rozměry byly zvoleny na základě hodnot ze strojirenských tabulek.

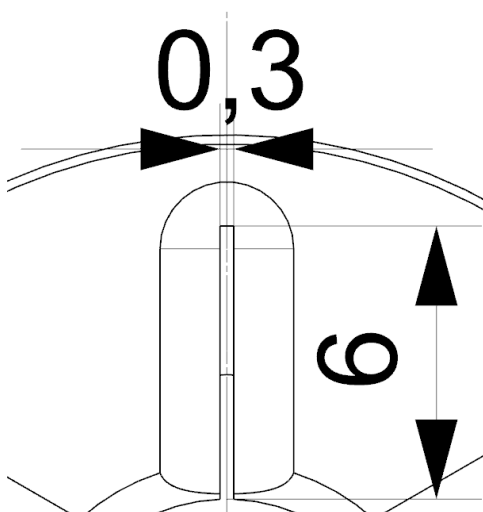
Hlava s výstupními kanálky byla natisknuta na stroji EOS M290 pomocí technologie DMLS. Je zhotovena z materiálu s označením MS1 (Manganing steel), což představuje nástrojovou ocel s vysokým obsahem legujících prvků (např. Ni, Co, Mo). Komponenty z tohoto materiálu vykazují velmi dobré mechanické vlastnosti. V Tab. 3 jsou zaneseny základní a tahové vlastnosti tohoto materiálu v rámci AM. [47]

Tloušťka vrstvy [μm]	40
Minimální tloušťka stěny [mm]	0,3
Přesnost komponentů [μm]	± 50
Hustota [g/cm^3]	8,0 – 8,1
Pevnost v tahu [MPa]	2080
Mez kluzu [MPa]	2000
Protažení do přetržení (tažnost) [%]	4

Tab. 3 - Základní a tahové vlastnosti materiálu MS1 [47]

3.1.3 Varianta A2

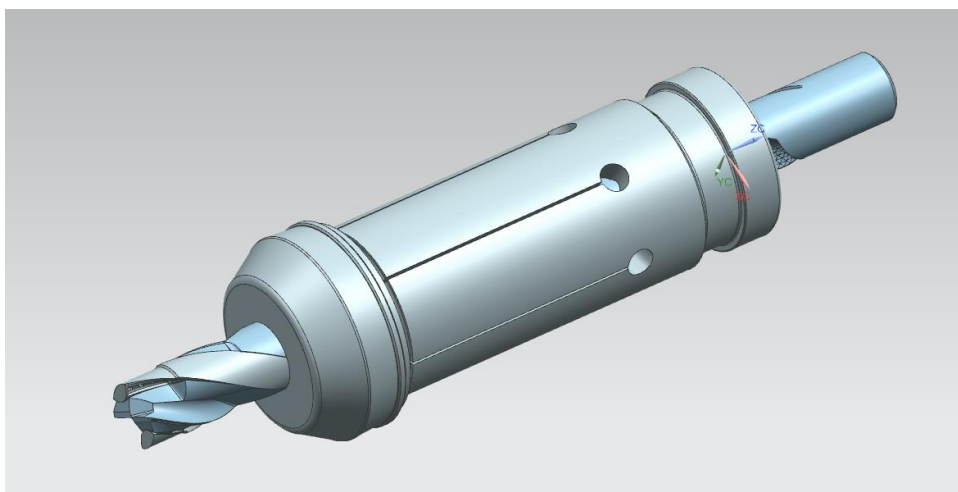
Tato varianta je velmi podobná variantě A1, která byla popsána v předchozích řádcích. Byla využita totožná hlava, jež byla natisknuta pomocí aditivní technologie ze stejného materiálu s označením MS1. Rozdíl v obou variantách tkví ve volbě kleštiny. Zde byla zvolena přímo originální kleština GZB-S PK s periferním chlazením, což znamená, že není potřeba zajistit systém pro proudění kapaliny kleštinou. Kapalina je přivedena do výstupních kanálků pomocí šesti štěrbin o šířce 0,3 mm a délce 6 mm, jeden z výstupů je detailně zobrazen na Obr. 37. Tvarové provedení tohoto řešení je tedy stejné jako u předchozí varianty. Znamená to, že byly zajištěny všechny požadavky pro vytisknutelnost stejně jako ty, co jsou popsány v rámci návrhu A1. Cílem tohoto řešení je především porovnat efektivnost proříznutí kanálků ve variantě A1 s konvenčním řešením pro proudění kapaliny kleštinou od společnosti Schunk.



Obr. 37 - Detail výstupní štěrbiný na kleštině GZB-S PK

3.1.4 Varianta B

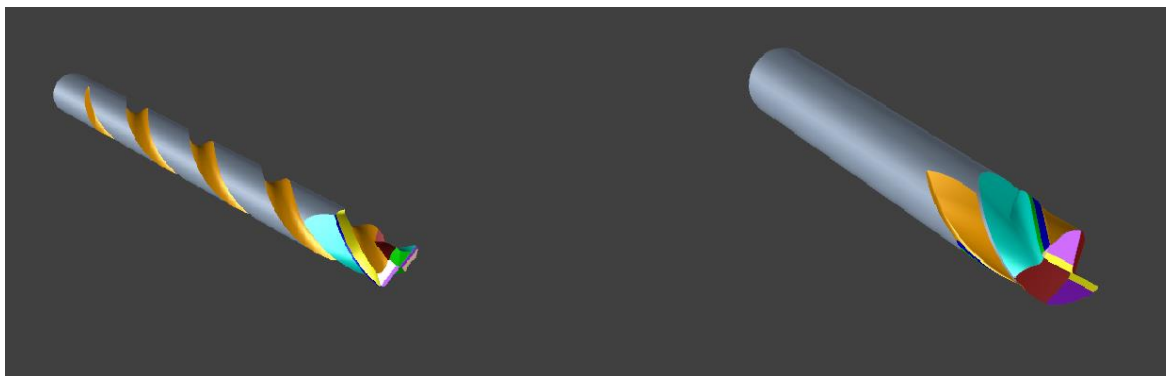
Smyslem navrhovaných řešení je přivést a nasměrovat kapalinu co nejpřesněji do místa řezu, aby chlazení a evakuace nečistot z místa řezu byla co nejefektivnější. V této variantě byly kanálky vyvedeny v bezprostřední blízkosti u řezného břitu, což by v případě správné funkčnosti mělo přinést vynikající výsledky. Pro tuto variantu byla zvolena kleština GZB-S PK, která poskytuje možnost proudění kapaliny s periferními výstupy. Navíc však byl zhotoven systém kanálek přímo po obvodu frézy. Ty však byly zhotoveny primárně z důvodu vytažení výstupních otvorů pro kapalinu v blízkosti řezné hrany. Všechny optimalizace týkající se frézy byly provedeny nástrojařské brusce Anca MX7 a to konkrétně v programu iGrind, který slouží k tvorbě monolitních nástrojů. I zde pomocí AM byla na kleštinu natisknuta hlava s výstupními kanálky, které tentokrát byly vytaženy po obvodu frézy až ke špičce nástroje. Detailní postup celého procesu zhotovení této varianty bude popsán v následujících krocích.



Obr. 38 - Varianta 3 - finální řešení návrhu včetně inovované frézy

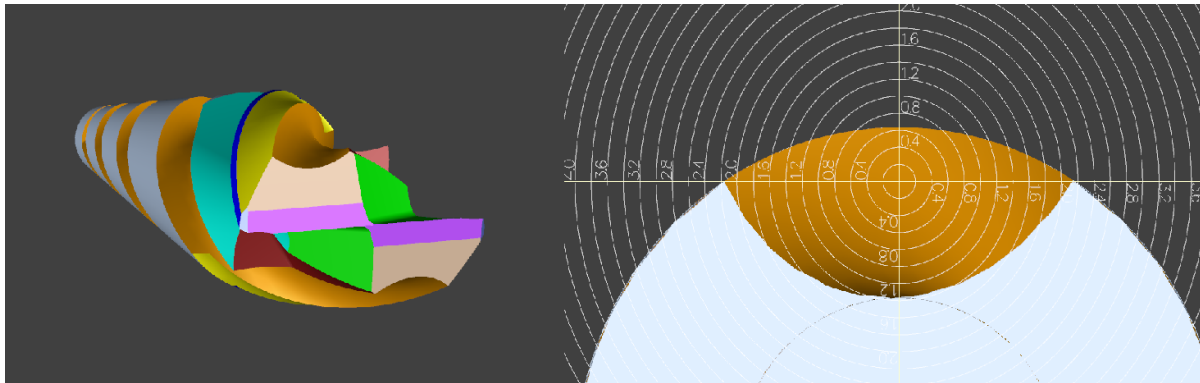
3.1.4.1 Inovace a optimalizace výchozí frézy

Základem všech následujících kroků v rámci této varianty bylo vytvoření podélných kanálek po celém obvodu monolitní frézy o průměru 8 mm. Základní výchozí frézou byl zvolen typ s dvěma řeznými břity a úhlem šroubovice 30°. Jak už bylo zmíněno, úkolem bylo zhotovit kanálky po celém obvodu frézy tak, aby kapalina mohla proudit směrem k výstupní hlavě a nikterak nebyla ovlivněna funkčnost a zároveň byla zachována tuhost frézy. Další nezbytným úkolem bylo optimalizování frézy do takové podoby, aby byl zajištěn přívod kapaliny jak na špičku, tak na hřbet břitu, čímž byla zajištěna komplexnost chladičho systému. Výslednou podobu frézy v porovnání s výchozí je možno vidět na Obr. 39.



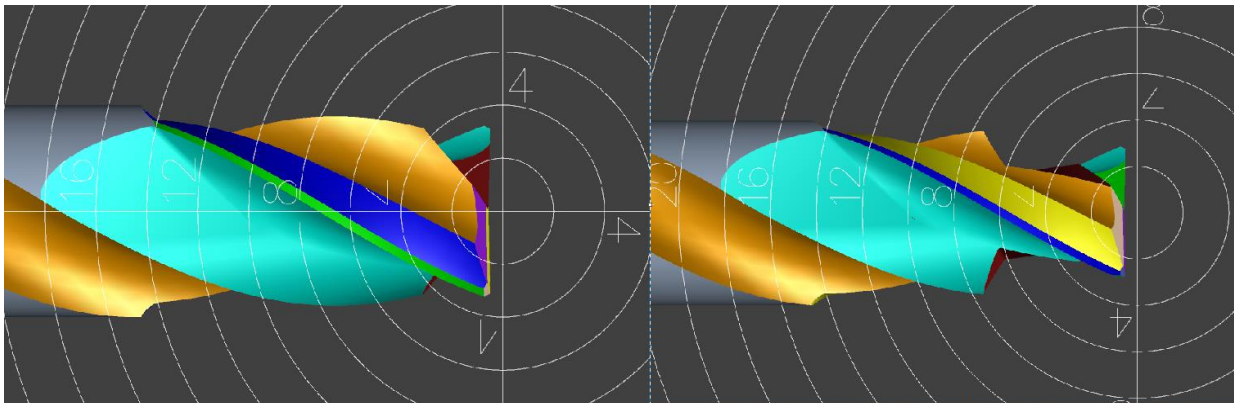
Obr. 39 - Inovovaná verze frézy / Výchozí fréza

Nejprve bude zaměřena pozornost na systém dvou podélných kanálků po obvodu frézy. Základním požadavkem, na který musel být brán zřetel, bylo nastavit hloubku, šířku a umístění drážek tak, aby nebyla ovlivněna funkčnost a tuhost frézy. Kanálky jsou vedeny pod stejným úhlem šroubovice jako výchozí drážka frézy, to znamená 30° . Umístěny byly v dostatečně velké vzdálenosti od břitu, takže není ohrožena tuhost celého řešení. Přesné umístění kanálků je oranžově zobrazeno na Obr. 40 a). Hloubka drážky byla nastavena na hodnotu 2 mm, což znamená, že zůstal zachován průměr jádra frézy, který byl 4 mm. Šířka drážky je přibližně 3,8 mm, což by mělo v kombinaci s kleštinou GZB-S PK s periferními výstupy zajistit dostatek objemu kapaliny do hlavy s výstupními kanálky. Na Obr. 40 b) je ukázán průřez kanálků v příčném řezu.



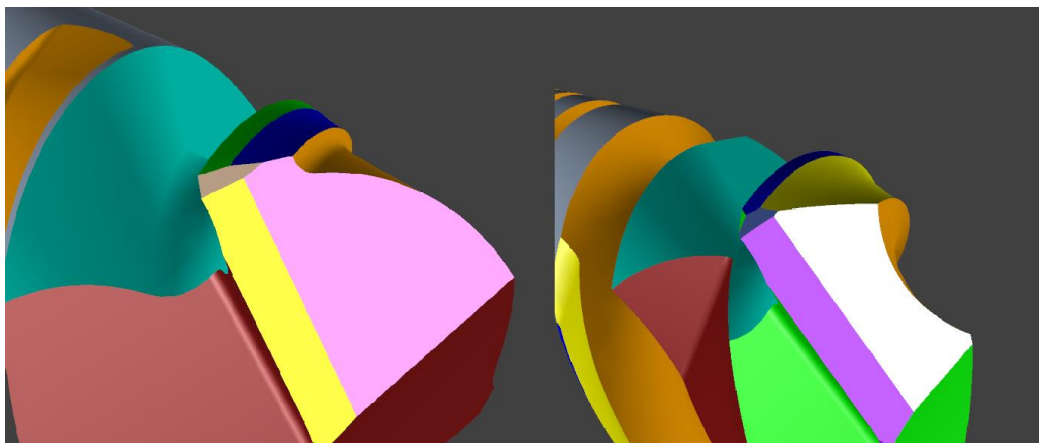
Obr. 40 - a) Pohled na umístění kanálků / b) Detail drážky v příčném řezu

Dále bylo zapotřebí upravit frézu tak, aby proud kapaliny směřoval přímo na řeznou hranu. Pro zajištění přívodu kapaliny na čelo břitu byla seříznuta hrana vytvořeného podélného kanálku z předchozího kroku až do hloubky cca 5 mm od špičky frézy. Na Obr. 41 je k vidění rozdíl před a po odstranění přebytečného materiálu. V pravé části obrázku je jasně vidět, že z oranžové drážky, kde vychází výstupní kanálek, bude možné dostat proud kapaliny přímo k čelu řezného břitu.



Obr. 41 - Zobrazení optimalizace řešení pro zajištění chlazení čela

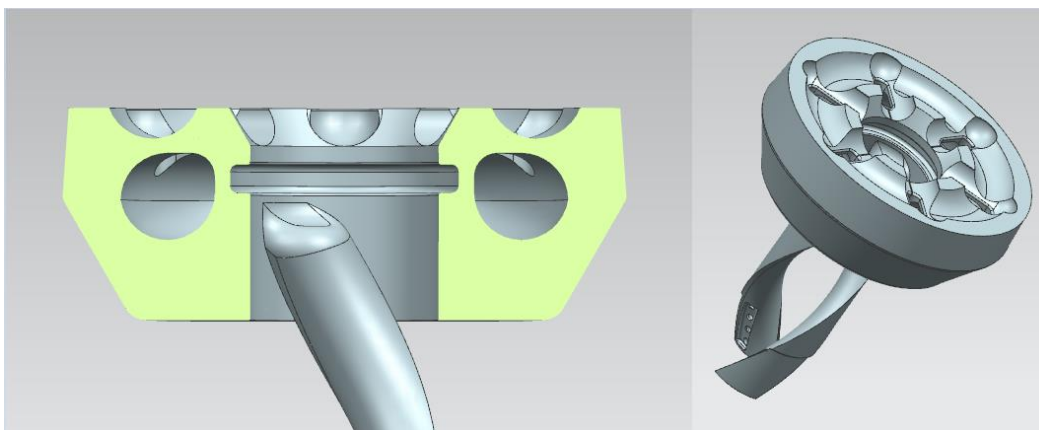
Aby výsledný chladicí systém byl co nejvíce komplexní, bylo nutné provést takové úpravy, aby bylo zajištěno chlazení hřbetu. Pro vyřešení tohoto požadavku byla potřeba optimalizace úhlu odlehčení, který navazuje na úhel hřbetu. Na Obr. 42 je vidět rozdíl mezi původním a optimalizovaným řešením. Na levém obrázku je zeleně úhel hřbetu a modře úhel odlehčení, který je $18,7^\circ$. Na upravené verzi je úhel hřbetu modře, který se nikterak nezměnil, ale úhel odlehčení, který je naznačen žlutě, byl zvýšen na hodnotu 35° . Už z obrázku je patrné, že upravená verze řešení poskytne značně více prostoru, což bylo nezbytné zajistit pro vytvoření úzkého výstupního kanálku, kterým bude přiváděna kapalina i pro hřbet řezného břitu.



Obr. 42 - Optimalizace úhlu odlehčení pro chlazení hřbetu

3.1.4.2 Hlava s výstupními kanálky

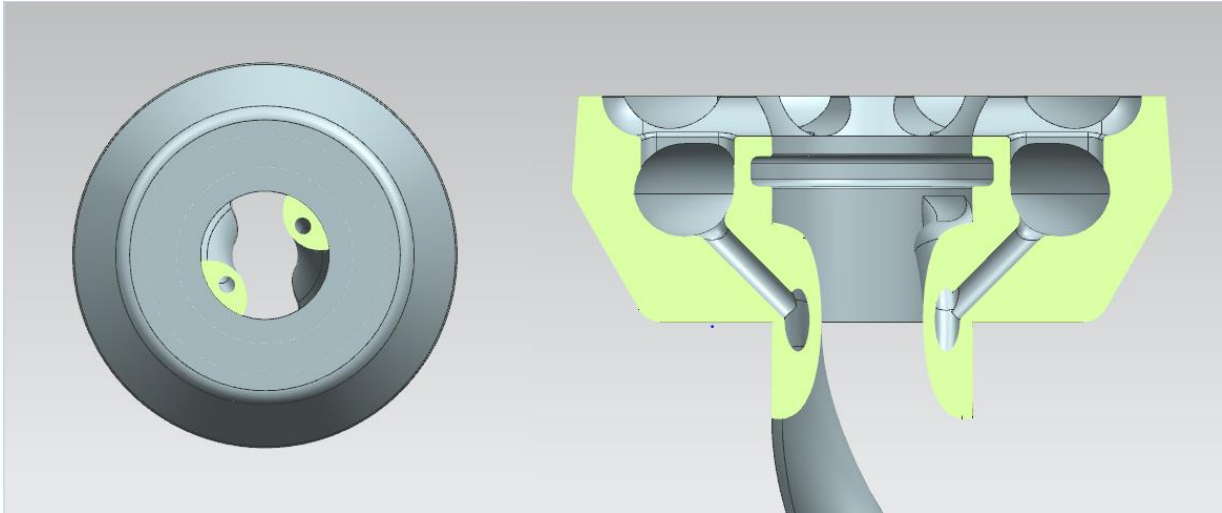
Hlava s výstupními kanálky pro tuto variantu vychází z řešení, které bylo aplikované pro variantu A1 a A2. V praxi to znamená, že se například nezměnila styková plocha mezi kleštinou a hlavou, což znamená, že požadavky pro natisknutí zůstaly stejné, viz Obr. 35, 36. Neměnná zůstala i dutina pro shromažďování kapaliny včetně šesti průchodů spojující tento prostor s hlavní komorou, což zobrazuje Obr. 34. Hlavní komora zůstala rozměrově stejná, z čehož vyplývá, že stále vychází ze základního rozměru 4x4 mm a hrany jsou v rámci vytisknutelnosti zaoblené. Musela se však upravit její pozice v rámci optimalizace pro danou variantu a je nyní orientovaná na větší roztečné kružnici, což je možné vidět na řezu, který představuje Obr. 43 a). Zde je také možné vidět, že byla posunuta pozice drážky pro těsnící O-kroužek, avšak rozměry drážky zůstali stejné a jsou nadefinované pro těsnící kroužek o rozměrech 8x1 mm. Posunutí je zapříčiněno vytvořením šroubových drážek, které kopírují tvar podélných kanálků na fréze. Výsledná podoba hlavy je zobrazena na Obr. 43 b)



Obr. 43 - a) Řez hlavou / b) Výsledná podoba hlavy

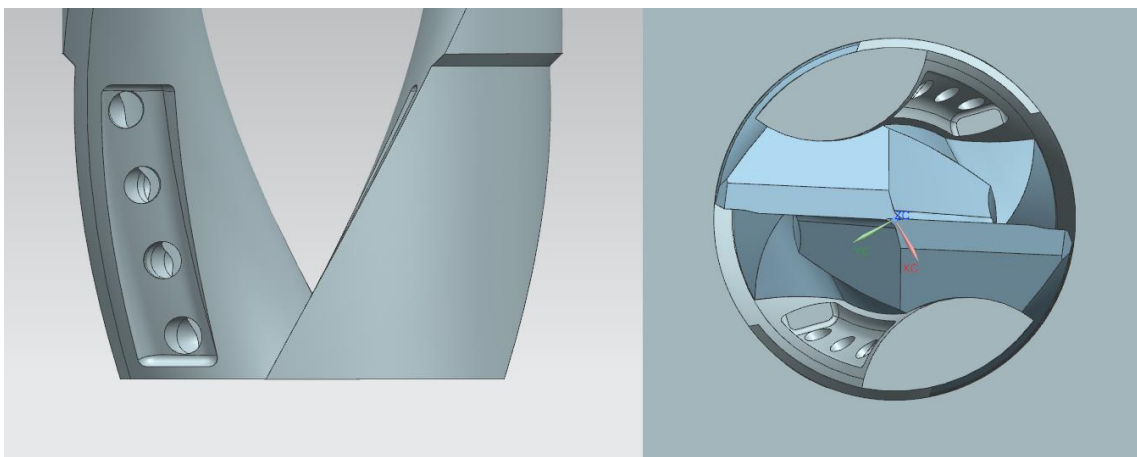
Z Obr 43. b) je poznat, že hlavní inovací v rámci optimalizace hlavy pro variantu B, bylo vytažení dvou výstupů po šroubovici, které byli přesně nadefinované podle vytvořených podélných kanálků na fréze v programu iGrind zobrazené na Obr 40. To znamená, že úhel šroubovice byl nastaven na 30° a rozměry jsou přesně okopírované podle rozměrů vybroušených drážek na fréze. Délka výstupů od původní konečné hrany byla nastavena na 18 mm. To znamená, že i vyložení frézy bude jen o několik desetin milimetru větší, protože výstupy jsou dotaženy až do blízkosti špičky frézy. V praxi bude systém pracovat tak, že přes vybroušené podélné drážky bude fréza šroubovitě natočena do vytvořených vytažených výstupů z hlavy.

Uvnitř těchto dvou výstupů jsou vedeny kanálky o průměru 1 mm po celé délce. Na Obr. 44 a) je zobrazeno jejich přesné umístění. Dále bylo potřeba zajistit propojení mezi hlavní komorou pro shromažďování kapaliny a kanálky vedené vytaženou šroubovicí. Řešením byly dva spojovací kanálky o průměru 1 mm, které jsou taženy pod úhlem 45° a napojují se přesně do dutin uvnitř vytažené šroubovice. Celé řešení propojovacích kanálků je vidět na řezu z Obr. 44 b).



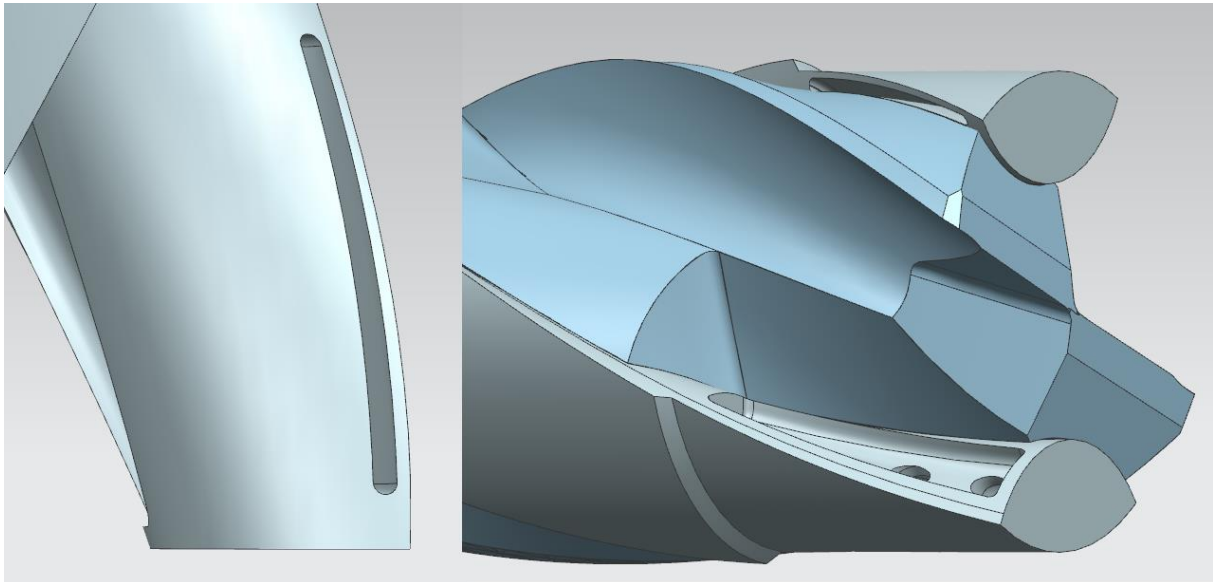
Obr. 44 - a) Umístění kanálků ve šroubovici / b) Znáznornění spojovacích kanálků

Velmi důležitým aspektem pro co nejlepší efektivitu celého řešení bylo zhotovení výstupních kanálků tak, aby kapalina směřovala co nejlépe do místa řezu. Nejprve bylo nezbytné rozdělit celkové řešení tak, aby bylo zajištěné zároveň chlazení čela i hřbetu bříty. Pro čelo hřbetu byli vytvořené 4 výstupní kanálky o průměru 0,6 mm orientované za sebou. Kanálky byly vyvedeny v rozmezí od 0,5 mm do 5 mm od konce vytažených výstupů. Každý má svoji vlastní upravenou geometrii tak, aby jeho výstup byl co nejideálněji nasměrován. Detailní pohled nabízí Obr. 45 a). Zde je také vidět vyhloubení v celé oblasti výstupních kanálků, které bylo zhotoveno za účelem lepšího nasměrování kapaliny do požadovaného prostoru řezného bříty. Na Obr. 45 b) je zobrazena sestava včetně optimalizované frézy a vytvořených výstupních otvorů směřujících na čelo bříty až do vzdálenosti 5 mm od špičky.



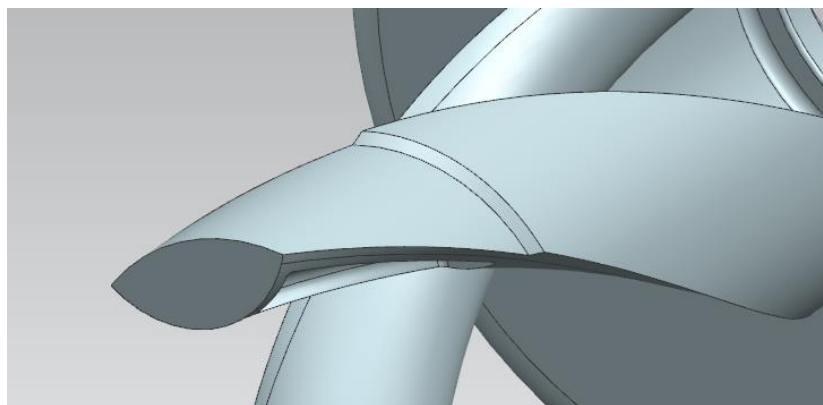
Obr. 45 - a) Detail výstupních kanálků - chlazení čela / b) Výstupní otvory v sestavě

Tvorba výstupního otvoru pro chlazení hřbetu byla komplikovanější, jelikož prostor pro tento požadavek byl velmi malý. Na základě daných požadavků bylo řešení zhotoveno jako úzký spojitý výstup o šířce 0,2 mm. Orientován byl v rozmezí 0,5 mm do 4,7 mm od konce vytažených prvků z hlavy. Na Obr. 46 a) je ukázán detailní pohled na vytvořené výstupní řešení. Obr. 46 b) zobrazuje celý systém včetně frézy. Je zde vidět, že byl využit maximální možný prostor pro výstupní otvor pro co nejefektivnější chlazení hřbetu břitů.



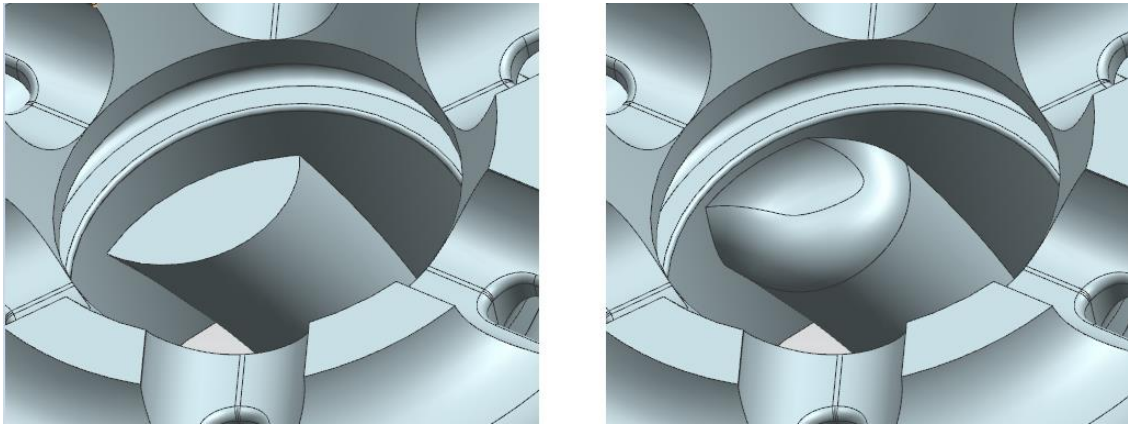
Obr. 46 - a) Detailní pohled na výstup / b) Zobrazení chlazení hřbetu frézy

Byla potřeba také zajistit funkčnost celého řešení v praxi. Tento systém byl navrhován pro čelní frézování. Muselo být zajištěno, aby vytažené výstupy z hlavy nemohli jakkoli zasáhnout do obráběcího procesu. Jejich vnější průměr je 8 mm, což je stejná hodnota jako průměr frézy. Proto ve vzdálenosti do 5 mm od jejich ukončení byl zmenšen jejich vnější průměr o 0,2 mm, což zajišťuje, že vytažené výstupy nemohou ovlivnit proces frézování. Vytvořené sražení přehledně zobrazuje Obr. 47.



Obr. 47 - Detail sražení vnějšího průměru vytažených výstupů z hlavy

Jak už bylo zmíněno v prvním odstavci této podkapitoly, všechny požadavky pro tisknutelnost celého řešení včetně napojení na kleštinu zůstaly zachovány. V této variantě se však navíc muselo vyřešit napojení šroubových výstupů na vnitřní průměr hlavy. To nakonec bylo vyřešeno pomocí dvou rádií o hodnotě 1 mm. Jeden byl vytvořen na vnitřní hraně mezi vnitřním průměrem a vytaženým kanálkem a druhý na vnější hraně. Na Obr. 48 je zobrazeno původní a optimalizované řešení.



Obr. 48 - Detail řešení napojení výstupní šroubovice

I tato varianta hlavy byla natisknuta na stroji EOS M290 a použitý byl materiál s označením MS1, jež představuje nástrojovou ocel. Základní vlastnosti tohoto materiálu pro aditivní technologie byly již popsány v rámci Tab. 3. Na Obr. 49 jsou zobrazeny všechny tři varianty bezprostředně po procesu natištění hlav s výstupními kanálky.



Obr. 49 - Vytištěné varianty

3.2 Realizace experimentu

V této části budou nejprve popsány veškeré úkony, které byly nutné pro uskutečnění samotného experimentu. Všechny tyto kroky musely být řešeny na základě komplikací, které přineslo zhotovení daných variant do reálné podoby. Dále bude vylíčen celý průběh a princip experimentu včetně detailního popisu postupu.

3.2.1 Příprava experimentu

Po zhotovení variant do konečných podob, kdy byly natisknuty vytvořené hlavy s výstupními kanálky, bylo potřeba vyřešit několik vzniklých komplikací, které tento proces přinesl. Varianta A1 žádné komplikace nepřinesla, avšak u varianty A2, která byla natištěna na kleštinu GZB-S PK s periferním chlazením už problematická byla. Bylo zjištěno, že při tisku se nepatrně zmenšil vnitřní průměr kleštiny v řádech setin milimetru, což stačilo k tomu, že fréza do kleštiny nešla vložit. Důvodem zmenšení vnitřního průměru zřejmě bylo, že v této variantě jsou drážky vedené kleštinou vyvedené až do konce originální kleštiny a tím pádem je nepatrně pružnější. Problém byl vyřešen pomocí jemného vybroušení vnitřního průměru smirkovým papírem.



Obr. 50 - Finální podoba variant A1 a A2

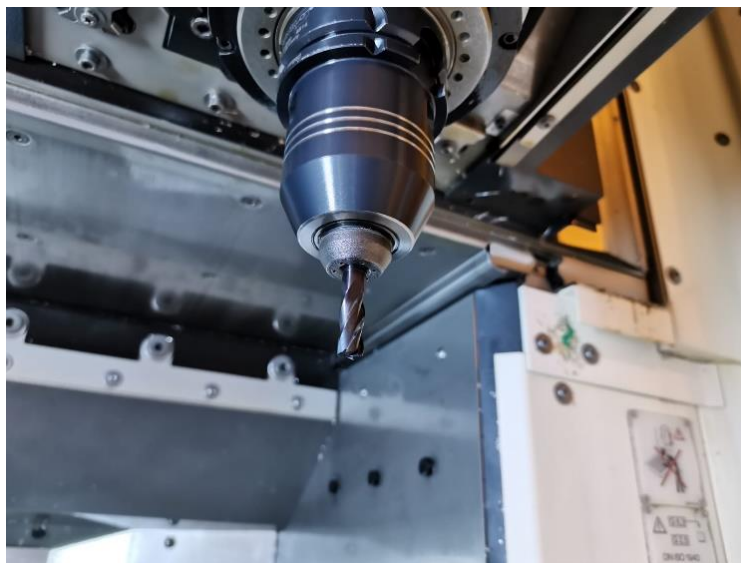
U varianty B bohužel nastaly problémy většího rázu. Tato varianta má jednoznačně největší předpoklady k tomu být nejúčinnější díky vyvedeným kanálkům až k místu řezu. Na druhou stranu je zde potřeba zajistit nejvíce kroků tak, aby vůbec byla funkční. Z tohoto důvodu se bohužel tato varianta nestihla připravit do takové fáze, aby mohla být otestována v rámci experimentu spadající do této BP. Problém nejdříve vznikl při tisku, kdy se jeden z vytažených kanálků nedotiskl kompletní. Tento problém byl však způsoben pouze špatným natočením na platformě a byl tedy rychle vyřešen. Hlavní problém však byl, že výstupní kanálky a drážky na fréze byly prvotně zhotoveny s naprosto totožnými rozměry a vzhledem k tomu, že při procesu 3D tisknutí i broušení frézy dochází k nepatrným odchylkám od požadovaného tvaru, bude potřeba tento složitý systém tvarově doladit tak, aby byl funkční. Znamená to, že v rámci výzkumu pro RTI bude dále vývoj pokračovat a ve chvíli, kdy bude tento systém připraven, bude následně otestována jeho efektivita. Na Obr. 51 je zobrazen zkušební vzorek hlavy z varianty B a také nepovedený pokus dotisku na kleštinu.



Obr. 51 - Varianta B / Zkušební výtisk výstupní hlavy pro Variantu B

3.2.2 Průběh experimentu

Experiment proběhl v prostorách pracoviště RTI. Probíhal na obráběcím centru s označením DMU 40 eVo linear. Experiment se zabýval měřením opotřebení frézy, která byla upnuta do kleštin čtyř různých variant. Všechny varianty měli nastaveny stejné řezné podmínky a zkušební polotovar pro experiment byl z Inconelu 718, pro který je standardní využití procesní kapaliny. Testované frézy, na kterých bylo měřeno opotřebení, byly běžné dvoubřité ze slinutého karbidu s úhlem šroubovice 30°. Cílem experimentu tedy bylo porovnat inovovaná řešení s konvenčním přívodem chlazení, ale také porovnat rozdíl mezi variantou A1 vůči A2. Další součástí testování bylo porovnání vyložení nástroje, které bylo aplikováno na variantě A1. V jedné variantě bylo zachováno standardní vyložení vůči upínači, které činilo 25 mm, což v praxi znamenalo, že vyložení od konce inovované kleštiny bylo pouze 15 mm. Ta byla porovnána s variantou, kde bylo zachováno vyložení frézy od konce upínací části, tedy i včetně nové natisknuté části a bylo nastaveno na standardních 25 mm. To je také hodnota vyložení, na kterou byly výstupní kanálky z hlavy nastaveny.



Obr. 52 - Varianta A2 v upínači v rámci experimentu

Testovány tedy byly čtyři různé varianty:

1. Konvenční kleština se standardním chlazením i vyložení (25 mm od upínače)
2. Varianta A1 s vyložení 15 mm (cca 25 mm od upínače)
3. Varianta A1 s vyložení 25 mm (cca 35 mm od upínače)
4. Varianta A2 s vyložení 25 mm (cca 35 mm od upínače)

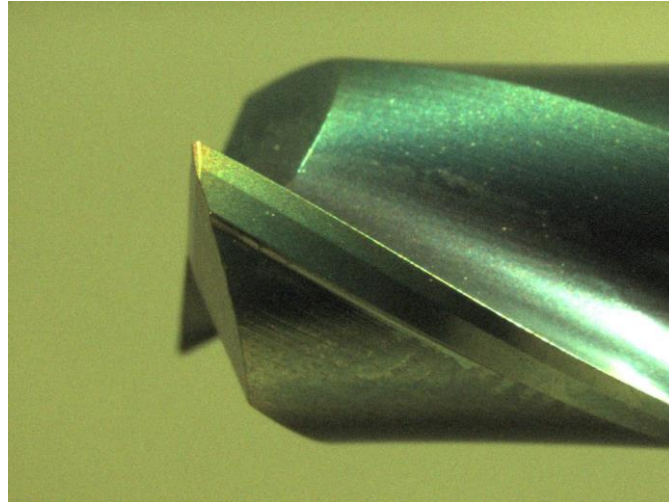
Jak už bylo zmíněno výše, obráběným materiálem byl Inconel 718. Každá varianta absolvovala deset přejezdů o délce přibližně 140 mm za daných řezných podmínek, které jsou zaneseny v Tab. 4

Řezné podmínky	
n [ot/min]	1392
f_z [mm]	0.111
a_p [mm]	3
a_e [mm]	0,5
Tlak procesní kapaliny [bar]	46

Tab. 4 – Řezné podmínky pro experimentální testování

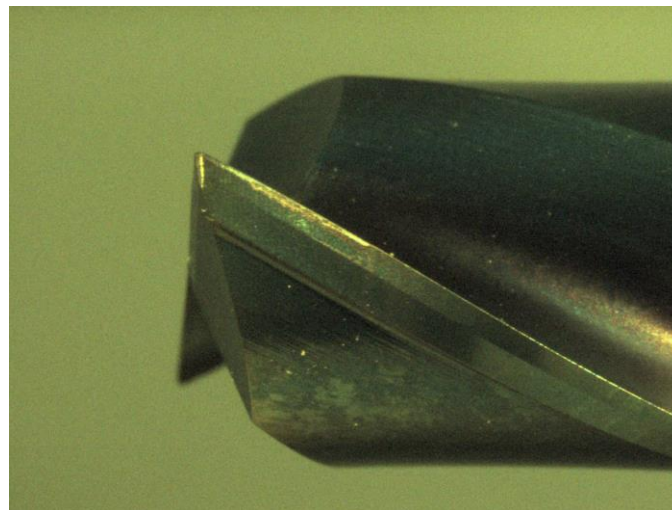
3.3 Zhodnocení experimentu

Po provedení experimentu všech vybraných variant přišlo na řadu vyhodnocení opotřebení testovaných fréz pomocí mikroskopu umístěného taktéž v prostorách RTI. Nejdůležitějšími faktory pro vyhodnocení byla šířka a profil opotřebení řezného břitu. Na Obr. 53 je zobrazena fréza před testováním bez opotřebení.



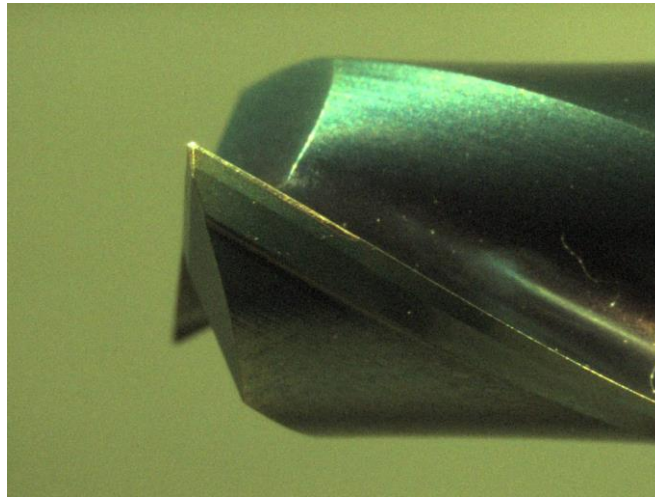
Obr. 53 - Testovaná fréza před experimentem bez opotřebení

První otestovaná varianta tedy byla standartní kleština s konvenčním přívodem procesní kapaliny. Opotřebení břitu dosahovalo hodnoty až 0,13 mm a bylo na obou břitech totožné. Z Obr. 54 je zřejmé, že šířka opotřebení nebyla po celé délce stejná, což je nežádoucí efekt.



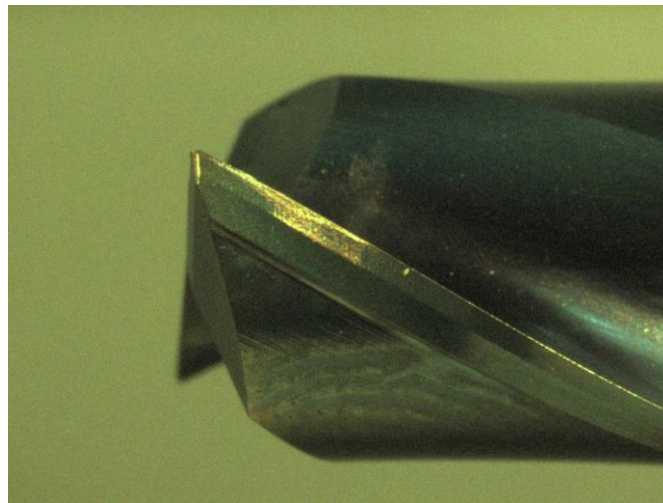
Obr. 54 - Opotřebení frézy při použití standartní kleštiny

Dalším otestovaným řešením byla varianta A1 se standartním vyložením vůči upínači. V této variantě opotřebení dosáhlo hodnoty pouze 0,09 mm a především je z Obr 55. vidět linearita opotřebení po celé délce břitu, což je důležitý faktor pro co nejvyšší trvanlivost břitu.



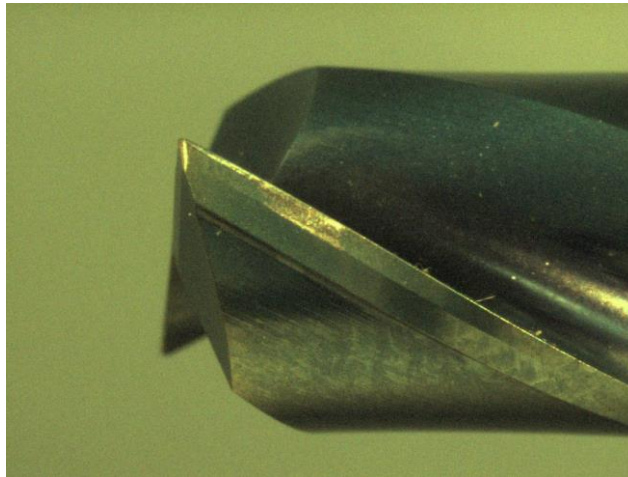
Obr. 55 - Opotřebení frézy při upnutí do Var. A1 s malým vyložením

Tentokrát opět byla v upínači upravená hybridní kleština z varianty A1, tentokrát však s vyložením 35 mm od upínače. Z Obr. 56 je vidět, že opotřebení je velmi nepravidelné a na fazetce břitu se vytvořila zhruba 2 mm od špičky ploška. Tento nežádoucí efekt zřejmě vznikl z důvodu vibrací vytvořených na základě velkého vyložení frézy. Vzhledem k tomu, že celková délka testované frézy byla cca 60 mm, tak problém zřejmě vznikl v nedostatečném upnutí stopky frézy v upínacím systému, jelikož natisknutá hlava s výstupními kanálky nemá upínací funkci.



Obr. 56 - Opotřebení frézy při upnutí do Var. A1 s velkým vyložením

Posledním testovaným systémem byla varianta A2 se stejným vyložením nástroje 35 mm vůči upínacímu systému jako u předchozí testované varianty. Tato varianta se potýkala s podobnými problémy jako předchozí na základě stejných problémů s nedostatečnou délkou stopky v upínací části. Na Obr. 57 je však vidět, že když nebudeme brát v úvahu opět vzniklou plošku na fazetce, tak opotřebení je lineárního charakteru a dosahuje hodnoty 0,11 mm.



Obr. 57 - Opatření frézy při upnutí do Var. A2 s velkým vyložením

Tento experiment nám přinesl několik užitečných informací, které využijeme především do dalšího vývoje, které bude pokračovat v rámci RTI. Prvním pozitivním zjištěním je, že ve chvíli, kdy bylo zanecháno vyložení nástroje vůči upínací stejné jako u konvenčního řešení, bylo opotřebení nižší zhruba o 30% a mělo lineární průběh po celé délce opotřebeného břitu, což značí předpoklad k vyšší trvanlivosti. Potenciál zlepšení je však ještě větší, jelikož kanálky byly orientovány pro vyložení 35 mm od upínací části a tím pádem nesměřovaly dokonale do místa řezu.

Díky tomu se dostáváme k řešení otázky správného vyložení nástroje. Nabízejí se dvě možnosti optimalizace daného řešení. Prvním je využívání fréz s delší stopkou nástroje, čímž bude zajištěna dostatečná délka stopky v upínací části a zamezí se tím možný vznik vibrací, házení, či jiných problémů přinášející větší vyložení nástroje. Ve chvíli, kdy bude prioritou zachování používaných fréz, se lepším řešením zdá být optimalizovat naklopení výstupních kanálků tak, aby směřovali k břitu s vyložení 25 mm od upínače, což znamená cca 15 mm od jejich ukončení.

Posledním výstupem z tohoto experimentu bylo porovnání navržených variant A1 a A2, tedy původně chladičuvzdorné kleštiny s vyříznutými kanálky a originální kleštiny s periferními výstupy pro procesní kapalinu. Výsledky experimentu naznačily, že efektivita obou řešení je víceméně podobná. Rozdíl však byl při realizaci obou řešení. Varianta A1 byla zhotovena bez potíží, u varianty A2 došlo při natištění hlavy s výstupními kanálky k nepatrnému sevření kleštiny, což s největší pravděpodobností způsobil fakt, že díky periferním výstupům má nižší tuhost.

4 Závěr

Tato bakalářská práce byla rozdělena do dvou hlavních částí, kterým byla věnována pozornost. Teoretická část zobrazuje nejaktuálnější a nejprogresivnější idey a produkty, které nabízí současný světový trh. Bylo potvrzeno, že v dnešní době největší potenciál skrývají aditivní technologie a že už je v dnešní době nezbytnou součástí při vývoji nových řešení nejen týkajících se přívodu procesní kapaliny, ale například také i při navrhování celých upínacích systémů. Tato rešerše současného stavu byla velmi užitečná pro získání potřebných znalostí pro praktickou část.

Hlavním záměrem této kvalifikační práce bylo totiž zhotovení systému pro proudění procesní kapaliny orientované do místa řezu pomocí aditivních technologií. Díky spolupráci s Regionálním technologickým institutem bylo možné pro vývoj využít také široké škály moderních strojů a technologií, jako například nástrojovou brusku Anca MX7 či elektroerozivní drátovou řezačku FANUC ROBOCUT α -c600ib, což napomáhalo k vytvoření zajímavých řešení. V rámci této práce byly nakonec představeny tři hybridní kleštiny, z čehož dvě byly součástí zkušebního experimentu.

Experimentální testování nám přineslo plno nových poznatků a informací. Do dalšího vývoje bude potřeba optimalizovat naklopení výstupních kanálků u variant A1 a A2. A především se bude pokračovat ve vývoji varianty B, která má největší potenciál a bude potřeba celý systém vyladit tak, aby byl dokonale funkční a efektivní. Proto bych si zatím netroufal odhadovat, jaká z vytvořených variant přinesla největší přínos. Závěrem je potřeba především dodat, že tento experiment naznačil, že provedené inovace měly smysl a vyplní se do nich dále investovat čas a píli.

Použitá literatura a internetové zdroje

- [1] ASTAKHOV, Viktor, DAVIM, J. Paulo, BASAK, A.K., et al. Metal Cutting Technologies: Progress and Current Trends: Advanced Mechanical Engineering. De Gruyter Oldenbourg, 2016. ISBN 3110449420, ISBN 9783110449426.
- [2] DAVIM, J Paulo. Machining of hard materials. Springer, 2014. ISBN 978-1-84996-450-0.
- [3] BIAN, Linkan, ed., SHAMSAEI, Nima, ed. a USHER, John , ed. Laser-based additive manufacturing of metal parts: modeling, optimization, and control of mechanical properties. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2018. ISBN 978-1-4987-3998-6.
- [4] CHUA, Chee Kai a LEONG, Kah Fai. 3D printing and additive manufacturing: principles and applications. The 4th edition of Rapid prototyping: principles and applications. New Jersey: World Scientific, 2015. ISBN 978
- [5] Heat treatment and fine-blankin Inconel 718. *RMZ – Materials and Geoenvironment* [online]. [cit. 22.11.2019]. Dostupné z: https://www.rmz-mg.com/letniki/rmz55/RMZ55_0163-0172.pdf
- [6] SANDVIK Coromant. *CoroMill Plura* [online]. Copyright © Sandvik Coromant [cit. 22.11.2019]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/coromill_plura/Pages/default.aspx
- [7] End mill milling tool - CoroMill Plura - SANDVIK COROMANT - carbide / for titanium. *AeroExpo - The B2B marketplace for aeronautical material and products: aircraft, ground support, airport terminal equipment, etc.* [online]. Copyright © [cit. 22.11.2019]. Dostupné z: <https://www.aeroexpo.online/prod/sandvik-coromant/product-182560-37856.html>
- [8] SANDVIK Coromant. *CoroMill Plura* [online]. Copyright © Sandvik Coromant [cit. 22.11.2019]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/coromill_plura/pages/solid-carbide-end-mill-for-high-feed-side-milling.aspx
- [9] High-feed side milling cutters offer first-class ticket to productivity. Document Moved [online]. Copyright © Sandvik Coromant [cit. 22.11.2019]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/en-us/news/press_releases/pages/get-a-first-class-ticket-to-productivity.aspx
- [10] SANDVIK Coromant. *CoroMill® 316, CoroMill® Plura* [online]. Copyright © [cit. 22.11.2019]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/brochures/cs-cz/c-1040-231.pdf>
- [11] SANDVIK Coromant. *CoroMill Plura*. [online]. Copyright © Sandvik Coromant [cit. 22.11.2019]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/coromill_plura/pages/ceramic-end-mills-for-high-speed-roughing.aspx
- [12] SANDVIK Coromant. *CoroMill 316*. [online]. Copyright © Sandvik Coromant [cit. 22.11.2019]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/coromill_316/pages/default.aspx
- [13] SANDVIK Coromant. *CoroMill 316*. [online]. Copyright © Sandvik Coromant [cit. 22.11.2019]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/coromill_316/Pages/ceramic-brazed-milling-heads-for-high-speed-roughing.aspx

- [14] CNC Face Milling and Silent Turning tool by Sandvik. *EXPO21XX.com - Online exhibitions for industry, consumer goods & energy* [online]. Copyright © 1997 [cit. 22.11.2019]. Dostupné z: https://www.expo21xx.com/metalworking/20536_st3_high_precision_machine_tool/default.htm
- [15] High speed roughing in HRSA with ceramic CoroMill® Plura and CoroMill®316 - YouTube. *YouTube* [online]. Copyright © 2019 Google LLC [cit. 22.11.2019]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=5W8O4oVGL00>
- [16] RF 100 Speed End Mills Offering - GUHRING. *Guhring, Inc. - World-class Drills, End Mills, Taps, Thread Mills, Tool Holders, Tool Management, Coating Services, Tool Reconditioning - GUHRING* [online]. Copyright © 2020 [cit. 09.01.2020]. Dostupné z: <https://www.guhring.com/ProductsServices/ViewProductLine/RF-100-Speed>
- [17] GÜHRING. *RF 100 SPEED* [online]. [cit. 09.01.2020]. Dostupné z: https://www.guhring.com/media/catalogs/ef0sdwpsela.pdf?_=062017083246
- [18] *Guhring, Inc. - World-class Drills, End Mills, Taps, Thread Mills, Tool Holders, Tool Management, Coating Services, Tool Reconditioning - GUHRING* [online]. Copyright © [cit. 09.01.2020]. Dostupné z: <https://www.guhring.com/media/catalogs/vm2yazeznoz.pdf>
- [19] RT 100 XF High Performance Carbide Drill Offering - GUHRING. *Guhring, Inc. - World-class Drills, End Mills, Taps, Thread Mills, Tool Holders, Tool Management, Coating Services, Tool Reconditioning - GUHRING* [online]. Copyright © 2020 [cit. 09.01.2020]. Dostupné z: <https://www.guhring.com/ProductsServices/ViewProductLine/RT-100-XF>
- [20] Iscar. *MULTI-MASTER vyměnitelné celokarbidové frézovací hlavice* [online]. [cit. 29.01.2020]. Dostupné z: <https://www.iscar.cz/Products.aspx/countryid/6/ProductId/12295>
- [21] ISCAR TECH TALK MULTI-MASTER - YouTube. *YouTube* [online]. Copyright © 2020 Google LLC [cit. 29.01.2020]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=fykt8L0OGOs&t=130s>
- [22] Iscar. *New Solid Ceramic Endmills for Machining Nickel-Based Superalloys* [online]. [cit. 29.01.2020]. Dostupné z: <https://www.iscar.cz/Products.aspx/countryid/6/ProductId/12291>
- [23] ISCAR Solid Ceramic Endmills - YouTube. *YouTube* [online]. Copyright © 2020 Google LLC [cit. 29.01.2020]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=Myb_um2LKyE&feature=emb_title
- [24] *TT | Technický týdeník* [online]. [cit. 14.02.2020] Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/upinace-nastroju/upinace-nastroju-2_8498.html
- [25] SCHUNK. *Upínací technika* [online]. Copyright © Autorská práva 2020 SCHUNK GmbH [cit. 14.02.2020]. Dostupné z: https://schunk.com/cz_cs/upinaci-technika/series/tribos-r/
- [26] SCHUNK. *iTENDO* [online]. Copyright © Autorská práva 2020 SCHUNK GmbH [cit. 14.02.2020]. Dostupné z: https://schunk.com/cz_cs/domovska-stranka/itendo/
- [27] SCHUNK. *TENDO Slim 4ax* [online]. Copyright © Autorská práva 2020 SCHUNK GmbH [cit. 14.02.2020]. Dostupné z: https://schunk.com/cz_cs/domovska-stranka/tendo-slim-4ax/

- [28] SCHUNK. *Tiskové zprávy* [online]. Copyright © Autorská práva 2020 SCHUNK GmbH [cit. 14.02.2020]. Dostupné z: https://schunk.com/cz_cs/novinky/highlights/tiskove-zpravy/article/25465-uzky-hydraulicky-rozpinaci-upinac-nastroju-s-technologie-cool-flow/
- [29] SANDVIK Coromant. *CoroChuck® 930* [online]. [cit. 2020-02-14]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/corochuck_930/pages/default.aspx
- [30] GÜHRING. *Clamping Systems: Precision is a matter of setting-up – Gühring tool holders* [online]. © Gühring KG 2020 [cit. 14.02.2020]. Dostupné z: <https://guehring.com/en/products/clamping-systems/>
- [31] Iscar. *Hydraulický upínač pro všechny typy aplikací: Frézování (hrubování a dokončování), vrtání, závitování a vystružování* [online]. [cit. 22.02.2020]. Dostupné z: <https://www.iscar.cz/newarticles.aspx/countryid/6/newarticleid/2998>
- [32] *Vysoké učení technické v Brně* [online]. Copyright © [cit. 22.02.2020]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=84741
- [33] GÜHRING. *Drilling Tools: Sophisticated drill technology* [online]. [cit. 22.02.2020]. Dostupné z: <https://guehring.com/en/products/drilling-tools>
- [34] Iscar. *Tepelné upínače s vnitřním chlazením podél nástroje* [online]. [cit. 22.02.2020]. Dostupné z: <https://www.iscar.cz/newarticles.aspx/countryid/6/newarticleid/2839>
- [35] Iscar. *SPINJET Coolant-Driven HSM Spindles* [online]. [cit. 22.02.2020]. Dostupné z: <https://www.iscar.cz/products.aspx/countryid/6/productid/12042>
- [36] Iscar. *Zrychlovací hlava poháněná tlakem chladicí kapaliny* [online]. [cit. 22.02.2020]. Dostupné z: <https://www.iscar.cz/newarticles.aspx/countryid/6/newarticleid/2862>
- [37] Iscar. *New Generation SPINJET GREEN LINE* [online]. [cit. 22.02.2020]. Dostupné z: <https://www.iscar.cz/newarticles.aspx/countryid/6/newarticleid/2862>
- [38] *Techmagazín.cz* [online]. Copyright ©w [cit. 23.03.2020]. Dostupné z: http://www.techmagazin.cz/ke_stazeni/archiv/2018/techmagazin2018_02.pdf
- [39] Module 1 Additive Manufacturing. *Share and Discover Knowledge on LinkedIn SlideShare* [online]. Copyright © 2020 [cit. 23.03.2020]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/taruian/module-1-additive-manufacturing>
- [40] Výhled oboru řezných nástrojů na rok 2019 | Technický týdeník. *TT | Technický týdeník* [online]. Copyright © Business Media CZ Nádražní 32, 150 [cit. 23.03.2020]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/obrabeci-stroje-a-jejich-prislusenstvi/vyhled-oboru-reznych-nastroju-na-rok-2019_47140.html
- [41] Aditivní výroba precizních nástrojů a upínačů. *Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum* [online]. Copyright © 2020 www.mmspektrum.com [cit. 23.03.2020]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/aditivni-vyroba-preciznich-nastroju-a-upinacu.html>
- [42] SCHUNK. *Upínací technika* [online]. Copyright © Autorská práva 2020 SCHUNK GmbH [cit. 23.03.2020]. Dostupné z: https://schunk.com/cz_cs/upinaci-technika/series/sluzba-3d-tisku/
- [43] Products & services — Sandvik Additive Manufacturing. Document Moved [online]. Copyright © Sandvik AB [cit. 23.03.2020]. Dostupné z: <https://www.additive.sandvik/en/products-services-am/>

[44] The world's first 3D printed diamond composite — An innovation by Sandvik — Sandvik Additive Manufacturing. *Document Moved* [online]. Copyright © Sandvik AB [cit. 23.03.2020]. Dostupné z: <https://www.additive.sandvik/en/diamond/>

[45] MAPAL: Home [online]. [cit. 28.03.2020] Dostupné z: https://www.mapal.com/fileadmin/mapal_ftp/Blaetterkataloge/index.html?catalog=MAPAL-Innovations-2019&lang=cs_CZ#page_26

[46] SCHUNK. *GZB-S Ø20 Ø8 KD* [online]. [cit. 06.05.2020]. Dostupné z: https://schunk.com/cz_cs/upinaci-technika/product/12291-0207925-gzb-s-20-8-kd/

[47] EOS. INFO. *Material data sheet* [online]. [cit. 06.05.2020]. Dostupné z: https://www.eos.info/03_system-related-assets/material-related-contents/metal-materials-and-examples/metal-material-datasheet/werkzeugstahl_ms1_cx/ms1/ms-ms1-m290_material_data_sheet_10-17_en.pdf

Seznam příloh

Příloha č.1 – Výkres kleštiny