

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie – technologie obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Konstrukce a výroba soustružnického nože pomocí 3D tisku

Autor: **Bc. Jindřich Sýkora**

Vedoucí práce: **Ing. Ivana Zetková, Ph.D.**

Akademický rok 2019/2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jindřich SÝKORA**
Osobní číslo: **S18N0073P**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie – technologie obrábění**
Téma práce: **Konstrukce a výroba soustružnického nože pomocí 3D tisku**
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

Zásady pro vypracování

1. Úvod
2. Rozbor současného stavu
3. Návrh, výroba a realizace experimentů
4. Zhodnocení výsledků
5. Závěr

Rozsah diplomové práce: **50 – 70 stran**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

- GIBSON, Ian, ROSEN, David a STUCKER, Brent. Additive manufacturing technologies Second edition. New York: Springer, 2015, 498 s. ISBN 978-1-4939-2112-6.
- SMITH, Graham T. Cutting tool technology: industrial handbook. London: Springer, 2008, 599 s. ISBN 978-1-84800-204-3.
- LÓPEZ DE LACALLE, L. N., ed. a LAMIKIZ, A., ed. Machine tools for high performance machining. London: Springer, 2010, 442 s. ISBN 978-1-84996-795-2.
- SPITLER, David. Fundamentals of tool design. 5th ed. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 2003, 404 s. ISBN 0-87263-650-X.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Ivana Zetková, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění

Konzultant diplomové práce: **Doc. Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**
Regionální technologický institut

Datum zadání diplomové práce: **16. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Tato diplomová práce mohla vzniknout díky pomoci a podpoře ze strany celé řady odborníků jak ze Západočeské univerzity v Plzni, tak i jiných institucí.

Tímto bych rád poděkoval paní Ing. Ivaně Zetkové, Ph.D., za odborné vedení práce. Dále děkuji všem kolegům z Regionálního technologického institutu, kteří mi poskytli pomoc i odborné rady týkající se konstrukce, výroby dílů i testování prototypů.

V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině a blízkým za ohromnou podporu v průběhu celé doby studia.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Sýkora	Jméno Jindřich	
STUDIJNÍ OBOR	2303T004 „Strojírenská technologie – technologie obrábění“		
VEDOUČÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Zetková, Ph.D.	Jméno Ivana	
PRACOVÍŠTĚ	ZČU - FST - KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Konstrukce a výroba soustružnického nože pomocí 3D tisku		

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

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	109	TEXTOVÁ ČÁST	64	GRAFICKÁ ČÁST	45
---------------	-----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	<p>Tato práce se zabývá návrhem nástroje pro soustružení a jeho výrobou s pomocí 3D tisku. Cílem práce bylo vytvořit nástroj se systémem vnitřních kanálků pro co nejefektivnější chlazení řezné hrany a tím zvýšení životnosti při obrábění slitiny Inconel 718. Výsledky práce mohou sloužit jako základ pro další vývoj nástrojů pro obrábění žárupevných slitin.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA	aditivní výroba, 3D tisk, soustružení, Inconel 718, zvyšování životnosti nástroje, konstrukce řezného nástroje

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Sýkora	Name Jindřich	
FIELD OF STUDY	2303T004 “Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Zetková, Ph.D.	Name Ivana	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Design and manufacturing of lathe tool using 3D printing		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KTO	SUBMITTED IN	2020
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	109	TEXT PART	64	GRAPHICAL PART	45
----------------	-----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The thesis is focused on the design of a lathe tool and its manufacturing using 3D printing. The aim was to create a tool with a system of cooling channels that should provide effective cooling of the cutting edge and therefore increase the tool life while machining Inconel 718 alloy. The results of this thesis could be the basis for further development of tooling for machining heat resistant alloys.
KEY WORDS	Additive manufacturing, 3D printing, turning, Inconel 718, tool life improvement, cutting tool design

Obsah

1	Úvod	11
1.1	Cíl práce.....	11
2	Rozbor současného stavu	12
2.1	Obráběný materiál	12
2.1.1	Specifika obrábění niklových slitin.....	12
2.1.2	Aplikace materiálu Inconel 718	13
2.2	Aditivní technologie.....	13
2.2.1	3D tisk metodou DMLS	13
2.2.2	Využití aditivní technologie pro řezné nástroje	25
2.3	Technologie obrábění	26
2.3.1	Strojní výroba rotačních součástí	26
2.3.2	Řezný nástroj.....	26
2.3.3	Tepelné jevy při obrábění.....	29
2.3.4	Řezné prostředí.....	30
2.4	Řezné materiály	31
2.4.1	Nástrojová ocel.....	32
2.4.2	Slinuté karbidy (SK).....	33
2.4.3	Cermety	34
2.4.4	Řezná keramika	35
2.4.5	Polykrystalický kubický nitrid boru (PKNB/CBN)	36
2.4.6	Polykrystalický diamant (PD)	36
2.5	Tenké vrstvy	37
2.5.1	Tenké vrstvy u řezných nástrojů	37
2.5.2	Depozice tenkých vrstev	38
2.5.3	Tenké vrstvy pro obrábění materiálu Inconel 718	39
3	Návrh, výroba a realizace experimentů.....	40
3.1	Návrh řešení pro realizaci cílů práce.....	40
3.2	Použité vybavení	40
3.2.1	Programové vybavení.....	40
3.2.2	Stroje a zařízení	41
3.3	Volba základních parametrů nástroje.....	42
3.3.1	Výběr vzorového nástroje	42
3.3.2	Návrh realizace vnitřního systému chlazení.....	43

3.4	Návrh testovací verze řezného nástroje.....	44
3.4.1	Popis podstatných částí konstrukce této verze	45
3.5	Příprava výroby testovací verze řezného nástroje	47
3.6	Výroba testovací verze řezného nástroje.....	49
3.6.1	Postprocessing	50
3.6.2	Dokončení nožového držáku	50
3.6.3	Dokončení VBD	51
3.7	Přívod chladicí kapaliny do nožového držáku	51
3.7.1	Spojka pro nožový držák – CPR-ND	51
3.7.2	Spojka pro připojení ke stroji – CPR-VDI	52
3.8	Zkoušky testovací verze řezného nástroje.....	52
3.9	Návrh finální verze řezného nástroje.....	54
3.9.1	Návrh nožového držáku	54
3.9.2	Návrh vyměnitelných břitových destiček.....	57
3.10	Příprava výroby finální verze nástroje	63
3.10.1	Návrh polotovarů pro výrobu pomocí aditivní technologie	63
3.10.2	Příprava pro výrobu polotovarů pomocí aditivní technologie	64
3.11	Výroba finální verze nástroje	67
3.11.1	Výroba polotovarů pomocí aditivní technologie.....	67
3.11.2	Postprocesing dílů	69
3.11.3	Dokončení nožového držáku	69
3.11.4	Dokončení VBD	71
3.12	Testování řezného nástroje	82
3.12.1	Obráběný materiál	83
3.12.2	Referenční VBD	83
3.12.3	Metodologie testování	83
3.12.4	Testování a vyhodnocení referenční VBD	85
3.12.5	Testování a vyhodnocení varianty B	86
3.12.6	Testování a vyhodnocení varianty E	87
4	Zhodnocení výsledků	91
5	Závěr	92
6	Seznam použité literatury	93

Seznam zkratek, symbolů a jednotek

Zkratka	Jednotka	Význam
α_o	[°]	Úhel hřbetu v ortogonální rovině
a_p	[mm]	Hloubka řezu
β_o	[°]	Úhel břitu v ortogonální rovině
CAD		Computer aided design – počítačová podpora konstrukce
CAM		Computer aided manufacturing – počítačová podpora výroby
CVD		Chemical vapor deposition –
DMLS		Direct metal laser sintering
δ_o	[°]	Úhel řezu v ortogonální rovině
F_c	[N]	Řezná síla
FDM		Fused deposition modelling – metoda 3D tisku
F_f	[N]	Síla ve směru posuvu
f_{ot}	[mm/ot]	Otáčkový posuv
F_p	[N]	Pasivní řezná síla
γ_o	[°]	Úhel čela v ortogonální rovině
h_{min}	[mm]	Minimální doporučená tloušťka odřezávané vrstvy
HRC		Tvrдость dle Rockwella
HSC		High speed cutting – obrábění vysokou s řeznou rychlostí
HV		Tvrдость dle Vickerse
κ_r	[°]	Úhel nastavení hlavního ostří
λ_s	[°]	Úhel sklonu hlavního ostří
PD		Polykrystalický diamant
PECVD		Plasma-enhanced chemical vapor deposition
PKNB/CBN		Polykrystalický kubický nitrid boru
PVD		Physical vapor deposition
$Q_{0,3}$	[mm ³]	Množství odebraného materiálu při dosažení opotřebení 0,3 mm
R_m	[Mpa]	Mez pevnosti
r_n	[um]	Poloměr zaoblení ostří
RO		Rychlořezná ocel
$R_{p0,2}$	[MPa]	Smluvní mez kluzu
SK		Slinutý karbid
STEP		Datový formát pro CAD modely

STL		Datový formát pro CAD modely
$t_{0,3}$	[min]	Čas v řezu při dosažení opotřebení 0,3 mm
VBD		Vyměnitelná břitová destička
VB_N	[mm]	Opotřebení na hřbetě ve formě vrubu v oblasti maximální hloubky řezu

1 Úvod

Soustružení patří v současnosti mezi nejvíce využívané výrobní technologie pro produktivní výrobu přesných rotačních součástí a pravděpodobně bude nepostradatelné i v dohledné budoucnosti. Efektivní obrábění rotačních součástí je klíčové pro celou řadu odvětví. Energetický, letecký i vesmírný průmysl vyžadují výrobu takových součástí z materiálů schopných odolávat náročným provozním podmínkám. Jedním z hojně využívaných materiálů v těchto odvětvích je slitina Inconel 718. Ta je nejčastěji nasazována pro výrobu vysoce teplotně i mechanicky namáhaných součástí, a to především díky své žárupevnosti, korozní odolnosti nebo houževnatosti za nízkých teplot.

Obrábění slitiny Inconel 718 je však poměrně problematické. Vzhledem k jejím vlastnostem (například náchylnosti ke zpevňování povrchu, nízké tepelné vodivosti nebo žárupevnosti) je řezný nástroj velmi intenzivně tepelně i mechanicky namáhán. Tepelné namáhání je u soustružení navíc ještě umocněno nepřerušovaným řezem. Jelikož je soustružení základní operací, kterou prochází značná část komponent ve výše zmíněných odvětvích, optimalizace životnosti nástrojů i strojů výrazně ovlivňuje náklady na výrobu těchto komponent. Soustružení, jako jedna z jednodušších operací, umožňuje velmi detailně sledovat vliv základních proměnných na řezný proces. Tyto poznatky pak mohou být přímo aplikovány na frézování – technologii, která je při výrobě dílů také hojně využívána. Z výše uvedeného vyplývá značný potenciál pro zlepšení efektivity výroby použitím nástroje optimalizovaného pro obrábění tohoto materiálu.

Současné aditivní technologie umožňují výrobu součástí z běžných materiálů (například z nástrojové oceli nebo slinutého karbidu) s velmi dobrými mechanickými vlastnostmi. Výroba pomocí aditivních technologií navíc dovoluje realizaci členitých vnitřních struktur. Při výrobě nástrojů je možné tuto vlastnost s výhodou využít pro tvorbu chladicích kanálů, které by pomocí konvenčního obrábění nebyly realizovatelné.

V teoretické části práce budou předneseny základní poznatky potřebné pro návrh soustružnického nože a jeho výrobu pomocí aditivních technologií. Tedy základní poznatky z materiálového inženýrství, konvenčního obrábění a aditivních technologií. Praktická část pak bude věnována interpretaci teoretických poznatků, konstrukci a výrobě nástroje, a následnému testování a optimalizaci nástroje i řezných podmínek pro obrábění slitiny Inconel 718.

1.1 Cíl práce

Mezi charakteristické jevy při obrábění slitiny Inconel 718 patří vysoká teplota v místě řezu a přenos velkého množství tepla do nástroje. Toto intenzivní tepelné namáhání je jednou z příčin rychlého opotřebení řezného břítu při obrábění tohoto materiálu.

Cílem práce tedy je, aplikovat současné poznatky v oblasti technologie obrábění pro návrh vhodného řezného nástroje s využitím předností aditivní technologie pro optimalizaci chlazení řezné hrany. Tedy vytvořit nástroj, který bude odrazovým můstkem pro snížení nákladů obrábění žáropevných slitin a bude dosahovat dobrých výsledků nejen na strojích s moderním vysokotlakým chlazením, ale i na starších výrobních zařízeních, u kterých je chladicí médium přiváděno pod nižším tlakem.

2 Rozbor současného stavu

2.1 Obráběný materiál

Inconel 718 je vysoko pevnostní slitina na bázi Niklu s austenitickou strukturou, používaná především v leteckém, energetickém a vesmírném průmyslu. Její hlavní výhody při aplikacích spočívají mimo jiné v žárupevnosti, dobré korozní odolnosti a pevnosti za nízkých teplot. Tato slitina je precipitačně vytvrditelná. Po tepelném zpracování, které zajistí vytvrzení, dosahuje pevnosti v tahu R_m až 1413 MPa. Tato hodnota platí pro tyče o průměru $\varnothing 38,1$ mm, které byly podrobeny tepelnému zpracování doporučenému společností Special Metals Corporation. [1]

Tabulka 1 – Chemické složení Inconelu 718 podle společnosti Special Metals Corporation [1]

Prvek	Min %	Max %	Prvek	Min %	Max %
Ni+Co	50	55	C	-	0,08
Cr	17	21	Mn	-	0,35
Fe	zůstatek		Si	-	0,35
Nb	4,75	5,50	P	-	0,015
Mo	2,80	3,30	S	-	0,015
Ti	0,65	1,15	B	-	0,006
Al	0,2	0,8	Cu	-	0,3
Co	-	1			

Tabulka 2 – Mechanické vlastnosti tyčí vyrobených z Inconel 718 o průměru $\varnothing 38,1$ mm při tahové zkoušce po tepelném zpracování doporučeném společností Special Metals Corporation [1]

	Žiháno	Žiháno a precipitačně vytvrzeno
R_m (mez pevnosti)	976 MPa	1413 MPa
$R_p 0,2$ (smluvní mez kluzu)	500 MPa	1079 MPa
Prodloužení při porušení	46%	20%

2.1.1 Specifika obrábění niklových slitin

Obrábění niklových slitin a konkrétně Inconelu 718 je možné bez větších obtíží v případě, že jsou vzaty v potaz základní charakteristiky tohoto materiálu. Obrobitelnost tohoto materiálu je však v porovnání s ocelí C45 výrazně horší. Jednou z jeho základních vlastností, hojně využívanou při aplikacích tohoto materiálu, je žárupevnost. Z toho vyplývá výrazně vyšší pevnost za teplot, kterých je běžně dosahováno v místě řezu v porovnání například s ocelí C45. Proto je vhodné obrábět tento materiál na strojích s co největší tuhostí. Zároveň je kvůli minimalizaci řezných sil příhodné volit nástroje s pozitivní geometrií je však nutné zachovat dostatečnou pevnost řezného břitu. Pozitivní geometrie a ostrá řezná hrana nástroje rovněž pomohou

minimalizovat deformační zpevnování, které negativně ovlivňuje životnost nástroje a je pro tento materiál typické. Ve struktuře Inconelu 718 jsou rovněž přítomny karbidové částice, které abrazivně opotřebovávají rezný břit a při jeho obrábění je obvyklá vysoká teplota v místě řezu. Z těchto důvodů by nástroj měl být schopen odolávat vysokým teplotám a abrazivnímu opotřebení. [2]

2.1.2 Aplikace materiálu Inconel 718

Superslitina Inconel 718 má široké spektrum využití v odvětvích, ve kterých jsou žádané její charakteristické vlastnosti, tedy žárupevnost, korozní odolnost a houževnatost za nízkých teplot. Mezi typické aplikace patří vesmírný a letecký průmysl, například u moderních proudových motorů je až 50% jejich hmotnosti tvořeno komponenty z této slitiny. Typickými v těchto motorech díly vyráběnými z Inconelu 718 jsou turbínové lopatky, které jsou mechanicky zatěžovány a pracují za vysokých teplot. Velmi časté je také použití petrochemickém průmyslu a námořním vybavení kde je využíváno dobré korozní odolnosti. V neposlední řadě se pak díly z tohoto materiálu uplatňují v energetickém průmyslu. [3], [4]

2.2 Aditivní technologie

Obecně výroba dílů pomocí aditivních technologií spočívá v přidávání materiálu. V současné době je však v souvislosti s aditivní výrobou nejčastěji zmiňován 3D tisk. Jedná se o postupné nanášení materiálu ve vrstvách, dokud není daný objekt zcela vytvořen. Aditivně je možné vyrábět objekty z celé řady materiálů, je pouze potřeba zvolit odpovídající metodu výroby.

Například pro výrobu plastových dílů je velmi častá metoda FDM (fused deposition modeling). Výroba pomocí této metody je uživatelsky velmi přívětivá a zároveň levná. Proto je hojně využívána pro výrobu prototypových dílů, ale také montážních přípravků i produktů pro koncové zákazníky.

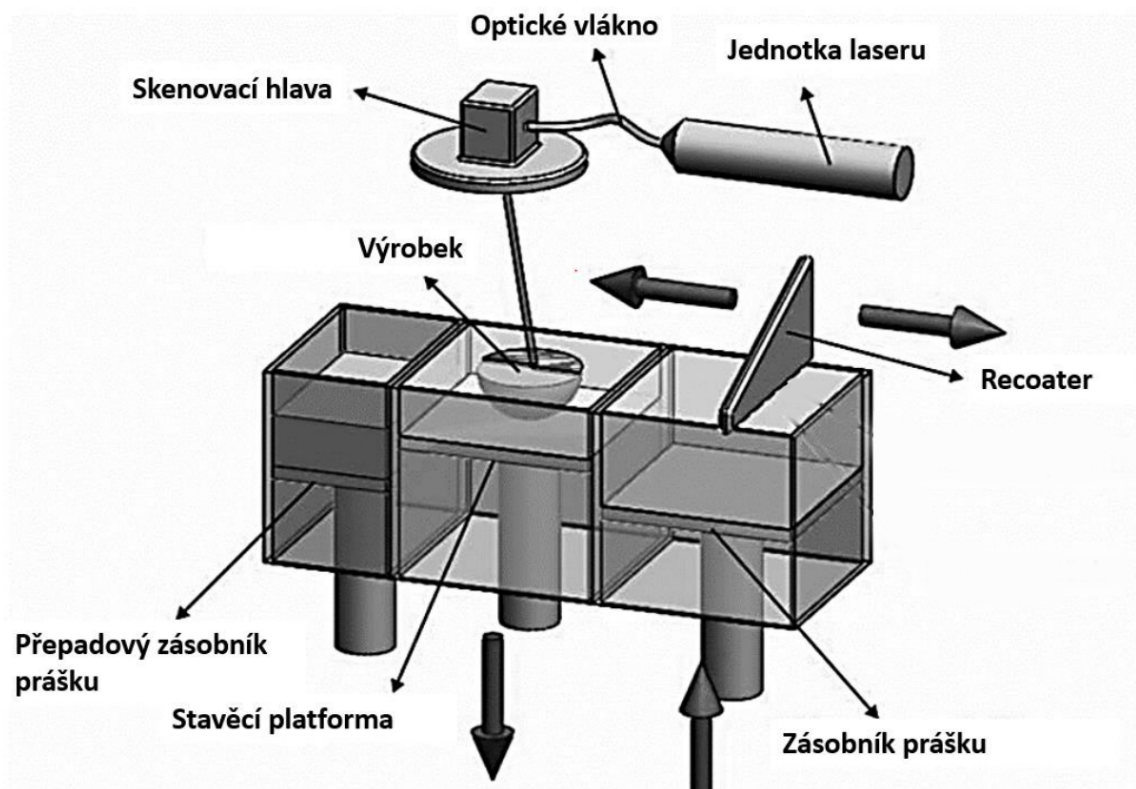
V oblasti 3D tisku kovů jsou dnes v největší míře zastoupeny technologie pracující na principu spékání odpovídajícího kovového prášku, ale existují také zařízení pracující metodou FDM. Pro potřeby této práce však budou dále rozebírány právě první zmíněné technologie konkrétně pak metoda DMLS (direct metal laser sintering). [5]

2.2.1 3D tisk metodou DMLS

Princip této metody je založen na nanášení tenké vrstvy kovového prášku pomocí tzv. recoateru a jejím následném spékání. Tato vrstva má obvykle tloušťku 20 – 100 μm a po nanášení je na vybraných místech roztavena pomocí laserového paprsku.

První vrstva prášku je nanášena na broušenou stavěcí platformu. K této platformě je tak vyráběný díl pevně přivařen. Po spečení dané vrstvy se stavěcí platforma posune o tloušťku nanášené vrstvy, recoater nanese novou vrstvu kovového prášku a laserový paprsek ji opět speče. Tento koloběh je opakován, dokud není daný objekt zcela vytvořen. Celý proces probíhá v ochranné atmosféře, jejíž složení závisí na tištěném materiálu. Nejčastěji se jedná o dusíkovou nebo argonovou ochranu atmosféru.

Vytvořený objekt je na konci procesu zcela obklopen nespečeným práškem. Díl je nutné od prášku, který je možné opětovně použít pečlivě očistit. Platformu s vytištěným objektem je nyní možné vyjmout ze stroje a přejít k postprocessingu. [5]



Obrázek 1 – Schéma zařízení pracujícího metodou DMLS a popis jeho základních částí [5]

2.2.1.1 Dokončování dílů vyrobených metodou DMLS

Než je možné díl vyrobený pomocí technologie DMLS použít, je vždy nutné provést dokončovací operace. Vzhledem ke značnému množství energie, která je vnášena do dílu během výrobního procesu je často prvním krokem tepelné zpracování celé tiskové platformy pro odstranění zbytkových napětí.

Následuje nezbytné oddělení dílu od tiskové platformy. Způsob oddělení se liší v závislosti na požitém tiskovém materiálu. Například pro ocel je nejčastěji používáno řezání na pile nebo elektrojiskrové řezání.

V případě, že při výrobě byly použity podpurné struktury následuje jejich oddělení od dílu a začištění místa spoje tedy tzv. **postprocessing**. Pokud jsou na výrobku požadovány přesnější rozměry nebo vyšší kvalita povrchu než je možné pomocí technologie DMLS dosáhnout následuje dokončení pomocí strojního nebo ručního obrábění. Po splnění těchto kroků je díl připraven k předání zákazníkovi.

2.2.1.2 Materiál pro výrobu pomocí DMLS

Polotovarem pro výrobu pomocí této technologie je kovový prášek. Velikost zrn tohoto prášku je závislá na daném materiálu, ale většinou se jedná o desítky μm . Například materiál MS1 podle výrobce EOS obsahuje 90% částic o velikosti 50 μm a zbylých 10% obsahuje částice o velikosti 10-50 μm a 50-63 μm .

Tabulka 3 – Portfolio materiálů pro DMLS společnosti EOS [6]

Typ	Obchodní název	Označení
Oceli	EOS MaragingSteel MS1	18Ni300
	EOS ToolSteel 1.2709	EN 1.2709
	EOS ToolSteel H13	ASTM A681
	EOS CaseHardeningSteel 20MnCr5	EN 10084
	EOS StainlessSteel GP1	Stainless steel 17-4 / 1.4542
	EOS StainlessSteel PH1	1.4540, UNS S15500
	EOS StainlessSteel 316L	1.4441, UNS S31673, F138
	EOS StainlessSteel 316L VPro	1.4404, UNS S31603
	EOS StainlessSteel CX	Precipitation hardening tool steel
	EOS StainlessSteel 17-4PH	1.4542, UNS17400, A564M
Nikl	EOS NickelAlloy IN718	NiCr19Fe19NbMo3
	EOS NickelAlloy IN625	NiCr22Mo9Nb
	EOS NickelAlloy IN939**	Inconel™ 939
	EOS NickelAlloy HX	UNS N06002, AMS 5390
Kobalt a chrom	EOS CobaltChrome MP1	ISO 5832-4
	EOS CobaltChrome SP2	“Type 4” CoCr dental ma- terial as per ISO 22674
	EOS CobaltChrome RPD	“Type 5” CoCr dental ma- terial as per ISO 22674
Měď	EOS Copper Cu	Vysoce čistá měď
	EOS CopperAlloy CuCrZr	C18150, CW106C
Titan	EOS Titanium Ti64 Grade 5	Ti6Al4V
	EOS Titanium Ti64 Grade 23	Ti6Al4V ELI

	EOS Titanium TiCP	ISO 5822-2
Hliník	EOS Aluminium AlSi10Mg	AlSi10Mg
	EOS Aluminium AlF357	AlSi7Mg0,6
Wolfram	EOS Tungsten W1	Čistý wolfram

2.2.1.2.1 Ocel EOS MaragingSteel - MS1

Jedná se o nástrojovou ocel speciálně optimalizovanou společností EOS pro účely jejího použití při výrobě na strojích od tohoto výrobce. Chemické složení MS1 je totožné s ocelí značenou 1.2709 dle evropské normy, případně 18Ni300 dle US značení nebo X3NiCoMoTi 18-9-5 podle německého značení. Ocel je precipitačně vytvrditelná, přičemž výsledná dosažitelná výsledná tvrdost je podle dokumentace 50 – 57 HRC. Kompletní materiálový list je součástí příloh.

Tabulka 4 - Chemické složení materiálu MS1 [7]

Prvek	Podíl
Fe	zůstatek
Ni	17 – 19 %
Co	8.5 – 9.5 %
Mo	4.5 – 5.2 %
Ti	0.6 – 0.8 %
Al	0.05 – 0.15 %
Cr, Cu	≤ 0.5 %
C	≤ 0.03 %
Mn, Si	≤ 0.1 %
P, S	≤ 0.001 %

2.2.1.3 Příprava dat pro výrobu pomocí DMLS

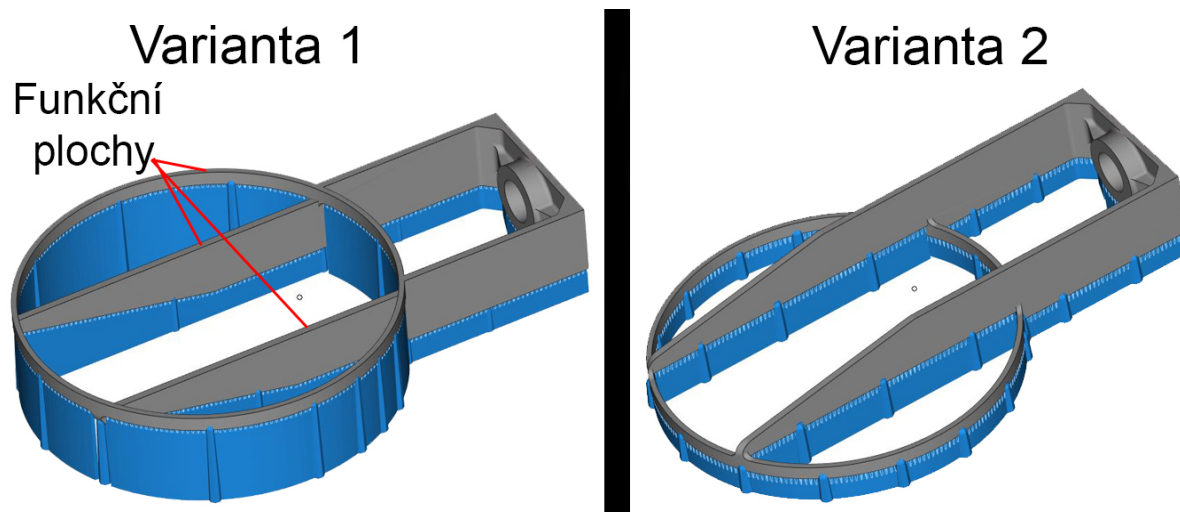
Základním podkladem pro výrobu pomocí DMLS je počítačový model výrobku. Tento model je zpravidla vytvářen pomocí libovolného CAD programu případně pomocí přesného skenu již existující součásti (například ve stomatologii). Model je následně exportován do formátu se kterým pracují programy pro přípravu tiskových dat nejčastěji se jedná o datové formáty STL a STEP. Dalším krokem je volba orientace objektu v tiskovém prostoru, vytvoření podpůrných struktur a případné technologické modifikace objektu (například vytvoření otvorů pro vysypání přebytečného prášku nebo vytvoření přídavků pro následné obrábění). Nyní je možné přestoupit k poslední fázi procesu, a to vytvoření tiskových dat. Společnost EOS používá pro tvorbu tiskových dat vlastní software EOS Print. Tento software umožňuje modifikovat výsledné parametry celého procesu například pomocí změny orientace objektů na tiskové platformě, výběru pořadí spékání jednotlivých objektů a také nastavením expozičních parametrů. Po zvolení všech

parametrů je vygenerován program, který obsahuje všechna data potřebná pro vlastní tisk, mimo jiné se jedná o parametry expozice laserovým paprskem, dráhy pohybu laserového paprsku, definici pohybů částí stroje a přípravu správné atmosféry. Tento program je odeslán do výrobního zařízení, a tím je datová příprava výroby hotova. Pro usnadnění fyzické přípravy výroby je však vhodné vytvořit pro obsluhu stroje seřizovací list.

2.2.1.3.1 Orientace dílu v tiskovém prostoru

Ideální orientace objektu v pracovním prostoru stroje je klíčová pro úspěšný a efektivní výrobní proces, zároveň také ovlivňuje výsledné funkční vlastnosti výrobku.

Vhodná orientace v pracovním prostoru umožní omezit použití podpůrných struktur. Vzhledem k vysoké ceně výchozího polotovaru se může jednat o nemalou finanční úsporu. Zároveň však může být vhodnou orientací zkrácen čas postprocessingu, kde hraje odstraňování podpůrných struktur a následné začišťování spojujících ploch výraznou roli. Vhodný příklad porovnání možností orientace dílu je na obrázku dole. Přestože mají podpůrné struktury u varianty 1 větší objem bude tato orientace výhodnější. Funkční plochy součásti totiž nebude nutné dále upravovat a postprocessing bude v porovnání s variantou 2 výrazně rychlejší.



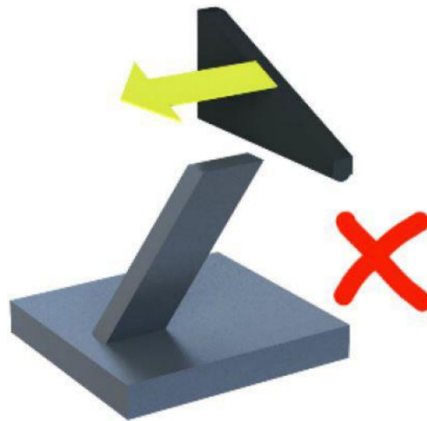
Obrázek 2 - Porovnání dvou variant orientace dílu, modře jsou zvýrazněny podpůrné struktury

Volba orientace bude rovněž záviset na požadované kvalitě funkčních ploch součásti, na některých plochách pak bude možné eliminovat schodišťový efekt (viz kapitola 2.2.1.8 Schodišťový efekt) a tyto plochy již potenciálně nebude potřeba před použitím součásti obrábět.

Díly vyrobené metodou DMLS v současné době nemají izotropní mechanické vlastnosti, proto je v některých případech vhodné při orientaci dílu v prostoru stroje brát v potaz také směr maximálního zatížení při aplikaci součásti. [8]

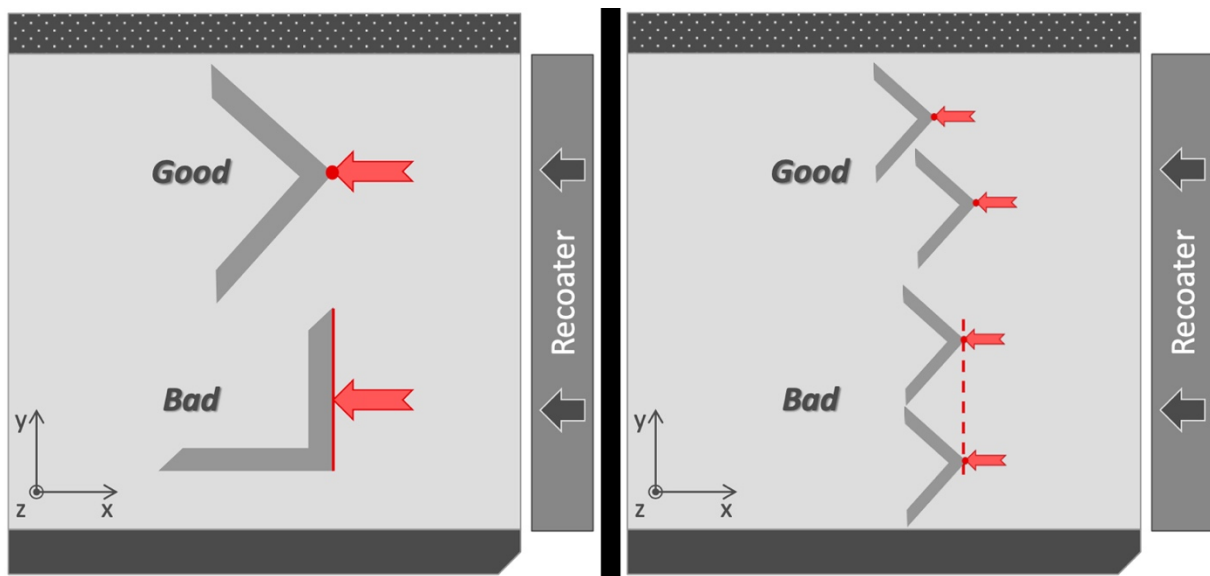
Orientace objektu pro efektivní výrobu popsaná v předchozím odstavci je značně specifická pro daný objekt a vychází ze zkušeností programátora. Existuje však několik základních pravidel, kterými je vhodné se pro zajištění úspěšného výrobního procesu řídit.

- Šikmé stěny objektu by neměly být nakloněny proti směru pohybu recoateru (viz Obrázek 3).



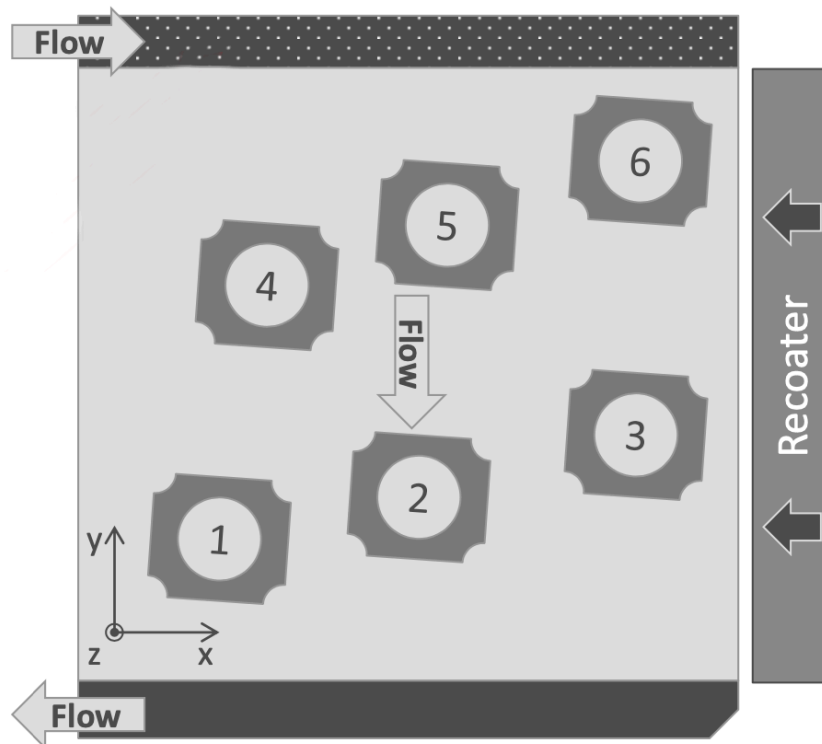
Obrázek 3 – Nevhodná orientace dílu vůči recoateru [9]

- Dlouhé stěny objektů by neměly být orientovány vodorovně s recoaterem, nýbrž svírat s recoaterem uhel alespoň 5° (viz Obrázek 4). Plocha prvního dotyku recoateru a součásti je tak menší a recoater najede na již vytištěnou část objektu za vynaložení menší síly. Tuto sílu je potřeba minimalizovat také pokud je v tiskovém prostoru více objektů vedle sebe a to vytvořením dostatečných rozestupů mezi nimi ve směru pohybu recoateru (Obrázek 4).



Obrázek 4 – Příklad správné a chybné orientace dílů v tiskovém prostoru stroje [10]

- V neposlední řadě je v případě více objektů v tiskovém prostoru zvolit pořadí jejich expozice tak, aby nejprve byly spékány objekty umístěné nejbližší k otvoru pro odtah spalin. Unášené spaliny a přetavené částice prášku jinak mohou kontaminovat ještě neexponovaná a způsobit vadu výrobku. Vzniklý kouř by rovněž mohl omezovat volný průchod laserového záření.



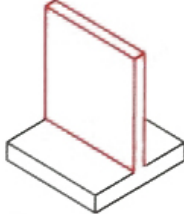
Obrázek 5 – Vyznačený systém odtahu spalin (flow) v pracovním prostoru stroje EOS M290 a ideální pořadí expozice dílů [10]

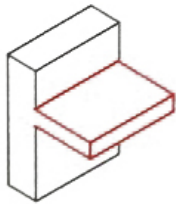
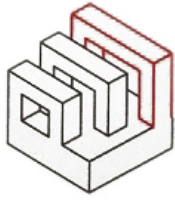
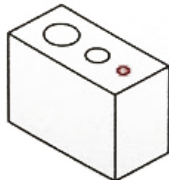
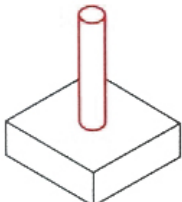
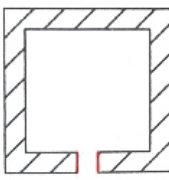
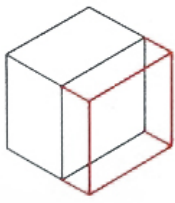
Jak vyplývá z předchozích odstavců, vhodná orientace objektu mnohdy může vyžadovat splnění několika protichůdných požadavků a přestože softwary pro přípravu dat jsou výrazným pomocníkem, tak je tento úkol stále značně závislý na zkušenostech a pečlivosti programátora.

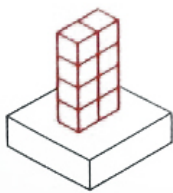
2.2.1.4 Omezení technologie DMLS

Při návrhu součástí, které budou vyráběny pomocí této technologie, je vhodné respektovat následující doporučení. Je však potřeba zmínit, že se jedná o doporučení obecná, která se mohou výrazně lišit v závislosti na orientaci na stavěcí platformě, orientaci vůči recoateru nebo na specifikách daného stroje i materiálu.

Tabulka 5 - Obecná doporučení pro design součástí vyráběných pomocí DMLS [11]

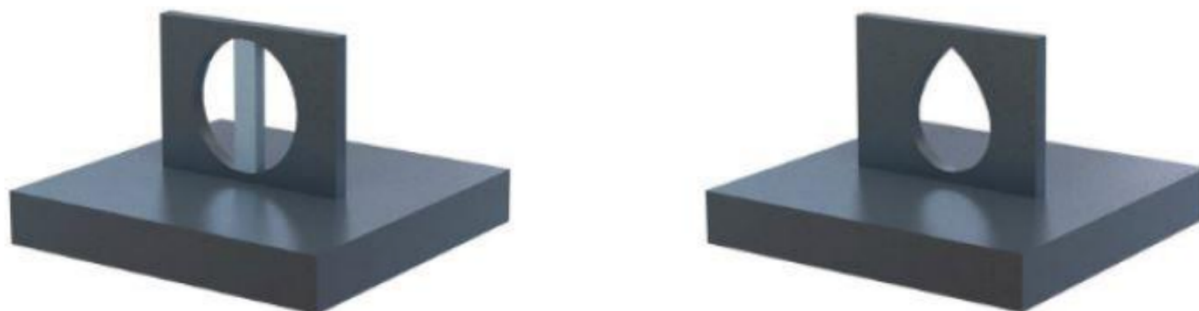
Designový prvek		Doporučení	
Tloušťka stěny		0.4 mm	Minimální doporučená tloušťka stěny, pro dosažení přesnosti a pro spolehlivou výrobu. Výroba tenkých stěn je však za určitých podmínek možná.

Nepodporované převisy		0.5 mm	Maximální délka horizontálního převisu, který je možné vyrobit bez použití podpor.
Horizontální mosty		2 mm	Maximální možná délka nepodporovaného mostu. Prvky, které převyšují tuto hodnotu mohou způsobit selhání tiskového procesu a povrch spodní plochy bude velmi nekvalitní.
Díry		1.5 mm	Nejmenší možná velikosti díry, kterou bude možné spolehlivě vyrobit pomocí DMLS.
Kolíky/čepy		1 mm	Nejmenší možný průměr kolíku. Kvalita kolíku se bude snižovat s rostoucí výškou.
Únikové díry		5 mm	V případě výroby dutých dílů je třeba stěny opatřit otvory pro vysypání nespečeného prášku.
Přídavek pro obrábění		0.5 – 1 mm	Volba velikosti přídavku pro obrábění bude záviset na poloze dané plochy v tiskovém prostoru a použitých podporách.

Štíhlostní poměr		8 : 1	Maximální doporučený štíhlostní poměr dílů pro zaručení stability na stavěcí platformě.
------------------	---	-------	---

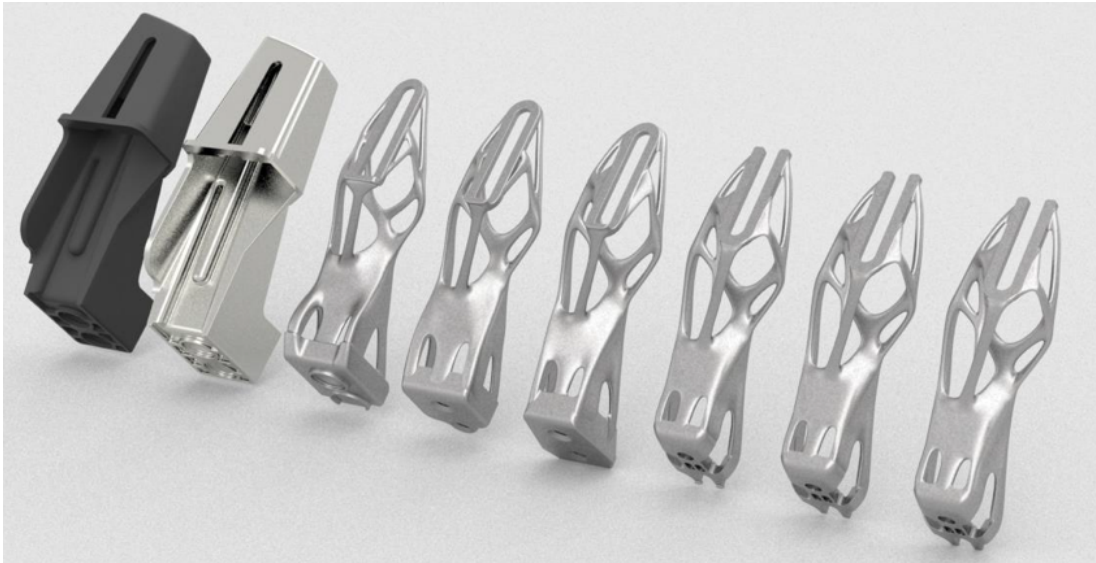
2.2.1.5 Specifika návrhu součástí pro tisk pomocí DMLS

Při návrhu designu součásti pochopitelně hraje, kromě požadovaných funkčních vlastností, výraznou roli také technologická vybavenost pracoviště na kterém je daná součást vyráběna. V případě, že výroba bude probíhat pomocí technologie DLMS je samozřejmě potřeba design této technologii přizpůsobit. Je vhodné vzít ohled na omezení technologie, tak aby ztráty materiálu byly co nejmenší, postprocessing co nejrychlejší a riziko přerušení tisku co nejmenší. Vhodným příkladem pro ilustrování důležitosti technologičnosti konstrukce může být výroba horizontálních dutin, případně konkávních oblouků. Tyto prvky je pomocí technologie DMLS za běžných okolností možné tisknout bez podpor pouze do průměru 6 mm. Z toho plyne, že vhodnou volbou geometrie (viz Obrázek 6) při návrhu součásti je možné použití podpůrných struktur eliminovat.

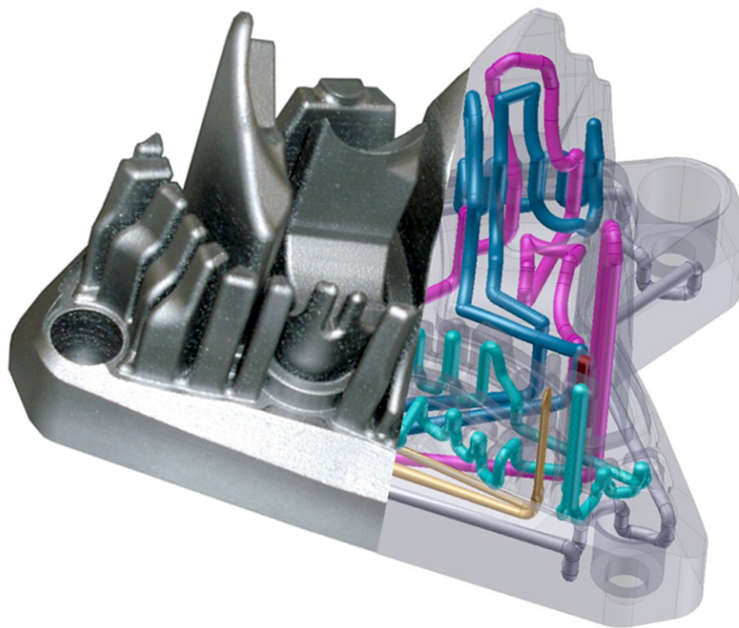


Obrázek 6 – Výroba objektu vlevo vyžaduje použití podpor, upravená geometrie vpravo umožňuje výrobu bez podpůrných struktur [9]

Pro 3D tisk je specifické, že výroba tvarově složitých ploch často není o mnoho komplikovanější, než výroba ploch rovinných nebo válcových. Této skutečnosti ve možné využít nasazením topologické optimalizace, která umožňuje výrazně snížit hmotnost součásti při nízkém vlivu na její mechanické vlastnosti. Dalším poměrně unikátní vlastností aditivní výroby je možnost výroby součástí s dutinami nebo specifickými vnitřními strukturami. Je tedy možné bez problému vytvářet součásti, které by jinými technologiemi nebyly vyrobitelné. Může se jednat například o formy, které jsou vybaveny chladicími kanálky v obrábění nedosažitelných místech.



Obrázek 7 – Evoluce dílu (zleva doprava) s využitím topologické optimalizace a aditivní výroby [12]



Obrázek 8 – Příklad formy určené pro výrobu pomocí aditivní technologie opatřené vnitřními chladicími kanály [13]

2.2.1.6 Poruchy (přerušení) tisku

Většina poruch a problémů při 3D tisku může být eliminována respektováním omezení této technologie již ve fázi návrhu dílu a také pečlivou přípravou výroby.

Nejčastěji se vyskytujícím problémem při tvorbě objektů technologií DMLS je přerušení tisku vlivem deformace vyráběného dílu. Výška tištěné vrstvy pro ocel MS1 od společnosti EOS na stroji EOS M290 je 20 μm , 40 μm nebo 50 μm . Spékáním jednotlivých vrstev je do dílu vnášeno velké množství energie, které se projeví zvýšením vnitřního pnutí v obroku a v kritických místech součásti může dojít i plastické deformaci. V případě, že je použita ocelová, případně keramická čepel recoateru a deformace dílu je v nevhodném směru výrazně větší než výška

nanášené vrstvy, dojde ke kolizi mezi tištěným objektem a čepelí recoateru. V takovém případě stroj vyhodnotí, že došlo ke kolizi a proces tisku zastaví. Operátor stroje následně musí provést kroky nutné pro obnovu procesu tisku, nebo proces ukončit a opakovat celý tisk od začátku. Zdrojem tohoto problému mohou být například nepodepřené převisy směřující proti pohybu recoateru.

2.2.1.7 Podpůrné struktury

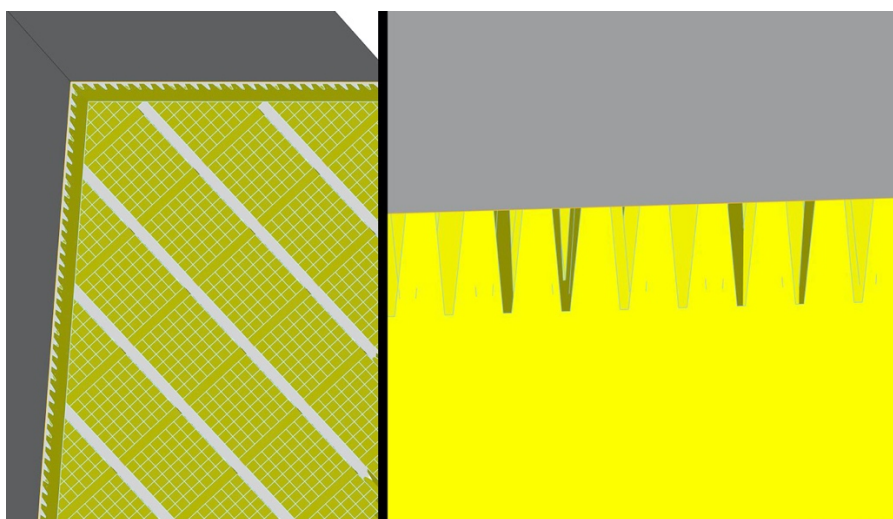
V případě použití metody DMLS je použití podpůrných struktur (též podpor) při výrobě nutné u většiny dílů. Tyto struktury mohou být rozličných druhů. Volba podpůrné struktury závisí například na geometrii součásti, materiálu součásti nebo výrobním zařízení. Přestože programy přípravu výroby generují podpůrné struktury automaticky, téměř vždy je stále potřeba lidský zásah. Podpory samozřejmě plní hned několik funkcí a zde jsou popsány ty nejzákladnější.

- Podpůrné struktury fixují díl ke stavěcí platformě, tak aby vlivem zbytkových napětí nedošlo k nežádoucí deformaci objektu.
- Značná část tepla je v určitých místech součásti ovládnuta z místa spékání právě podpůrnými strukturami.
- Prvky součásti, které porušují designová omezení týkající se použití podpůrných struktur (viz kapitola 2.2.1.4) musí být podporovány. Důvodem je kromě proveditelnosti výroby také zajištění kvality povrchu ploch a zaručení mechanických vlastností daného prvku (viz Obrázek 12).

2.2.1.7.1 Druhy podpůrných struktur

Software Materialise Magics, který je používán pro přípravu výroby v této práci umožňuje vytvářet mnoho druhů podpůrných struktur. Pro účely této práce jsou však podstatné pouze následující.

Blokové podpory – Jedná se mřížkové bloky, které jsou pro usnadnění odstraňování k dílu zpravidla připojeny pomocí tzv. zubů. Jednotlivé parametry blokových podpor jsou voleny na základě konkrétní situace. Stěny blokových podpor jsou vytvářeny jedním průchodem laserového paprsku a tím je tedy definována jejich tloušťka.



Obrázek 9 – Pohled zdola na podobu blokových podpor (vlevo) a detail připojovacích zubů (vpravo)

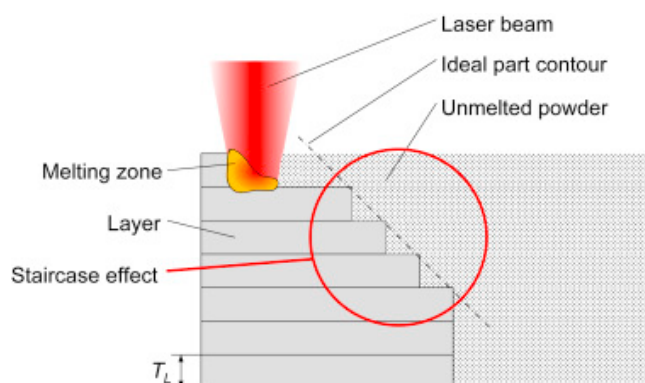
Kuželové podpory – V kritických místech součástí, kde hrozí riziko odtrhnutí od tiskové platformy, nebo je potřeba zlepšit odvod tepla ze spékaného místa jsou používány kuželové podpory. Jejich parametry opět závisí na konkrétní aplikaci, v této práci byly například použity kuželové podpory o průměru $\varnothing 1$ mm části připojené k dílu a průměru $\varnothing 1,4$ mm části připojené ke stavěcí platformě.



Obrázek 10 – Příklad použití blokových podpůrných struktur

2.2.1.8 Schodišťový efekt

Specifikum vytváření objektu nanášením jednotlivých vrstev, tak jako u technologie DMLS, je možnost vzniku tzv. schodišťového efektu. Tento efekt je velmi dobře ilustrován na následujícím obrázku. Stěny, které svírají s tiskovou platformou jiný úhel než 90° ve výsledku připomínají schodiště. Schodišťový efekt má proto pochopitelně výrazný vliv na kvalitu povrchu daných ploch a případně také na výslednou rozměrovou přesnost. Míra schodišťového efektu je ovlivňována výškou vrstvy a úhlem sklonu dané stěny. S touto skutečností je potřeba kalkulovat mimo jiné při volbě přídavek pro obrábění.

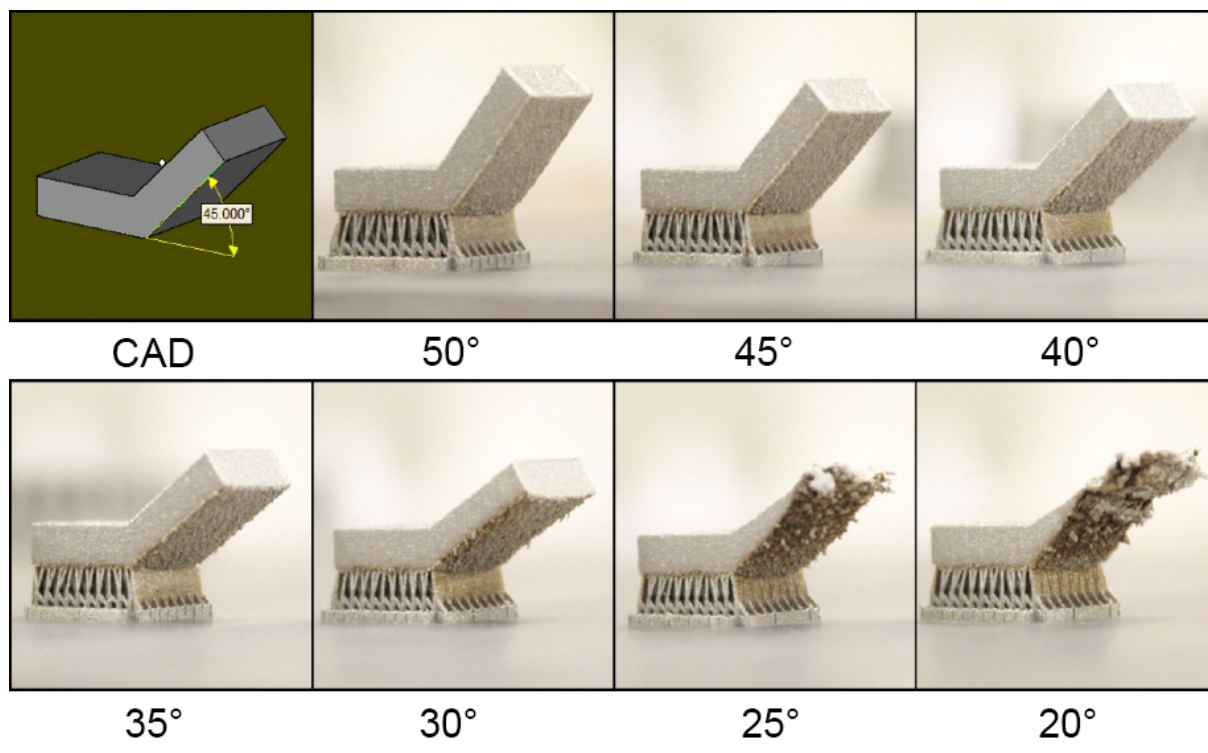


Obrázek 11 – Schodišťový efekt [14]

2.2.1.9 Přesnost a kvalita povrchu

Jak je zřejmé z předchozích kapitol, rozměrová přesnost jednotlivých prvků na dílech i kvalita povrchu ploch jsou vždy závislé na orientaci dílu v tiskovém prostoru. Kvalita povrchu ploch svírajících se stavěcí platformou jiný úhel než 90° je ovlivněna schodišťovým efektem a v případě ploch svírajících s plochou platformy úhel menší než 90° (tzv. převisy) může být kvalita

povrchu ovlivněna také nedostatečnou podporou těchto stěn. Plocha rovnoběžná se stavěcí platformou může být ovlivněna makro nerovnostmi způsobenými strategií pohybu laserového paprsku.



Obrázek 12 – Kvalita povrchu ploch vyrobených bez použití podpor, svírajících s platformou úhel menší než 90° [15]

Rozměrová přesnost dílů vyrobených metodou DMLS se liší v závislosti na tiskovém materiálu, použitém stroji i velikosti dílu. Například při výrobě dílů do rozměru 80x80 mm z materiálu MS1 a použití stroje EOS M290 je dosažitelná přesnost $\pm 20 \mu\text{m}$. Přičemž v rovině XY jsou obvykle rozměry přesnější. Nejlepší kvalita povrchu pak bude u stěn svírajících se stavěcí platformou úhel 90°. Na základě těchto kritérií je tedy vhodné díly navrhovat a také orientovat v tiskovém prostoru stroje. [7]

2.2.2 Využití aditivní technologie pro řezné nástroje

Aditivní technologie jsou již v současné době využívány mnoha výrobci řezných nástrojů. Tyto technologie však rozhodně nenahrazují konvenční výrobní metody, ale především přináší nové možnosti konstrukce řezných nástrojů. Umožňují tvorbu nástrojů, které by bez použití aditivních technologií byly z hlediska zhotovení nepraktické nebo zcela nevyrobitelné. Aditivní technologie jsou nejčastěji nasazovány pro výrobu odlehčených nástrojů, nebo výrobu nástrojů vybavených systémem vnitřních kanálků pro chladicí médium.

Vhodným příkladem použití aditivní technologie pro výrobu nástroje se systémem chladicích kanálků jsou vrtáky řady QTD vyráběné společností Mapal. Těla těchto vrtáků jsou vyrobena z oceli a opatřena systémem vrtaných kanálků pro chladicí médium, které je tak přiváděno do místa řezu. Řeznou část nástroje tvoří vyměnitelná špička ze slinutého karbidu. Jedná se o cenově výhodnější alternativu k monolitním vrtákům ze slinutého karbidu. Při výrobě ocelových těl vrtáků třískovým obráběním byl jejich nejmenší možný průměr 13 mm a to kvůli konstrukčně protichůdným požadavkům zachování dostatečné tuhosti ocelové stopky a

dostatečného průtoku chladicího média. Aplikace aditivní technologie umožnila optimalizaci konstrukce tedy využití kanálků nerotačního průřezu s trajektorií kopírující šroubovici vrtáku. Tyto úpravy umožněné využitím aditivní technologie tak dovolují vyrábět vrtáky o nejmenším průměru až 8 mm při současném zachování dostatečné tuhosti nástroje a efektivního chlazení řezné části. [16], [17]



Obrázek 13 – Aditivně vyrobená těla QTD vrtáků [16]

Možnosti aditivní technologie v oblasti redukce hmotnosti nástroje naplno využila například společnost Sandvik při vývoji a výrobě frézovací hlavy CoroMill® 390. Tělo konvenční frézy bylo topologicky optimalizováno a následně vyrobeno pomocí aditivní technologie z titanové slitiny. Výrazná redukce hmotnosti oproti konvenčně vyrobené verzi frézy pomáhá minimalizovat vibrace při obrábění s velkým vyložení nástroje a tím umožňuje zvýšení produktivity například při výrobě hlubokých kapes. [18]

2.3 Technologie obrábění

2.3.1 Strojní výroba rotačních součástí

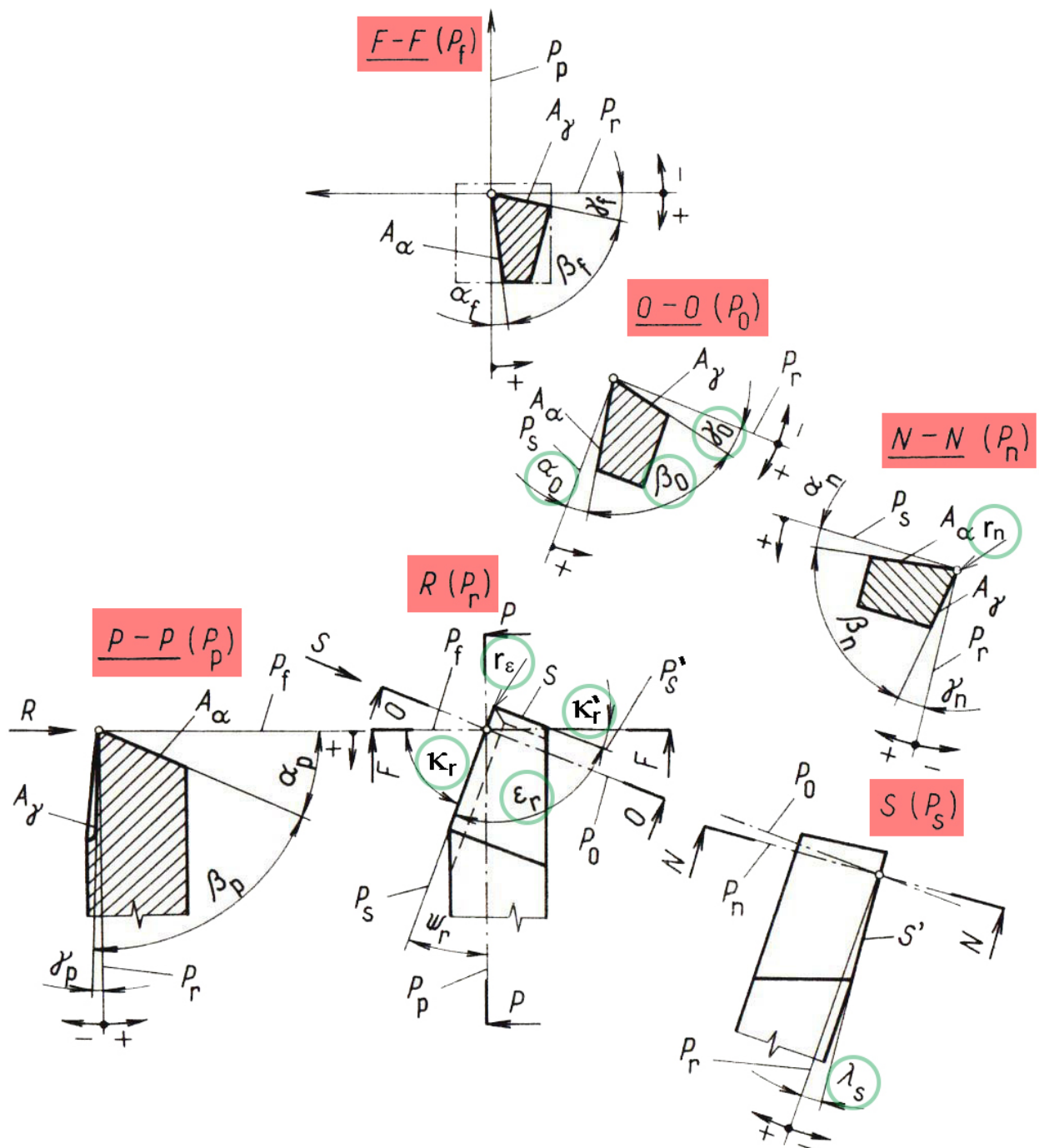
Výroba rotačních součástí je v současnosti uskutečnitelná celou řadou výrobních technologií. Pro produktivní a relativně přesnou výrobu je však nejrozšířenější technologií soustružení.

2.3.2 Řezný nástroj

Řezný nástroj realizuje proces obrábění. Pro vlastní realizaci tohoto procesu je potřeba zajistit relativní pohyb mezi nástrojem a obrobkem a jejich vzájemné silové působení. Zároveň je potřeba aby nástroj disponoval větší tvrdostí než obráběný materiál. Způsob fungování řezného nástroje je závislý především na řezném a obráběném materiálu, geometrii nástroje a řezných podmínkách.

2.3.2.1 Geometrie řezného nástroje

Geometrie nástroje ovlivňuje možnosti použití nástroje, jeho trvanlivost, kvalitu obrobeného povrchu a další aspekty související s obráběním. Vhodná volba geometrie je proto důležitá pro efektivní řezný proces a musí být příhodně přizpůsobena podmínkám obrábění. Geometrie nástroje je určena vzájemnou polohou jednotlivých nástrojových rovin a základními rozměry nástroje. Jednotlivé geometrické charakteristiky mohou být pravděpodobně nejjednodušeji jednoznačně definovány pomocí diagramu statických geometrických parametrů pravého přímého ubíracího nože (viz Obrázek 14). [19]



Obrázek 14 - Diagram statických geometrických parametrů přímého ubíracího nože [19]

2.3.2.2 Význam vybraných geometrických parametrů nástroje

Volba geometrických parametrů nástroje závisí především na obráběném materiálu, rezném materiálu, rezných podmínkách a požadovaných vlastnostech obrobenej plochy.

2.3.2.2.1 Úhel nastavení hlavního ostří – κ_r

Ovlivňuje:

- Tvar průřezu třísky
- Složky celkové rezné síly (poměr sil F_p a F_f)

Úhel κ_r doplňuje do 180° úhel nastavení vedlejšího ostří κ_r' , který ovlivňuje vlastnosti obrobenej plochy, a úhel špičky ϵ_r , který je u nástrojů s VBD (vyměnitelná břitová destička) dán tvarem břitové destičky.

2.3.2.2.2 Úhel sklonu hlavního ostří – λ_s

Ovlivňuje:

- Tuhost břitu
- Zatížení špičky nástroje
- Směr odchodu třísky z místa řezu

Hodnoty λ_s jsou nejběžněji voleny v rozmezí $\pm 6^\circ$, přičemž pro obrábění měkkých a méně pevných materiálů jsou používány úhly kladné, naopak pro tvrdé a pevnější materiály úhly záporné.

2.3.2.2.3 Úhel čela v ortogonální rovině – γ_o

Ovlivňuje:

- Mechanismus tvorby třísky
- Tvar třísky
- Rezné síly – rezný odpor k_c – Zvětšení úhlu γ_o o 1° vede ke snížení rezné síly F_c přibližně o 1%. [20]
- Tuhost břitu

2.3.2.2.4 Úhel hřbetu v ortogonální rovině – α_o

- Má vliv na velikost tření hřbetu o obrobenu plochu a tuhost břitu.

Hodnoty α_o jsou vždy pozitivní a pohybují se v rozmezí $3^\circ - 25^\circ$. Přičemž se snižováním hodnoty α_o se zvětšuje úhel β_o a tím i tuhost břitu. Vysoké hodnoty α_o jsou voleny pro obrábění hliníkových slitin.

2.3.2.2.5 Úhel břitu v ortogonální rovině – β_o

Má vliv především na tuhost rezného břitu jeho hodnoty se obvykle pohybují v rozmezí $40^\circ - 100^\circ$, přičemž hodnota úhlu β_o by měla růst spolu s pevností obráběného materiálu.

2.3.2.2.6 Úhel řezu v ortogonální rovině – δ_o

Úhel řezu δ_o je součtem úhlů α_o a β_o . Měl by být volen nejmenší možný úhel, avšak s ohledem na dostatečnou tuhost břitu vzhledem k zatížení nástroje při obrábění.

2.3.2.2.7 Poloměr zaoblení špičky – r_c

Je nejčastěji volen v rozmezí 0,2 – 5 mm. Větší hodnoty poloměru zaoblení jsou používány pro větší hodnoty posuvů. Poloměr zaoblení v kombinaci s velikostí posuvu výrazně ovlivňuje podobu povrchu obrobku.

2.3.2.2.8 Poloměr zaoblení ostří – r_n

Zaoblení ostří tvoří přechod mezi čelem a hřbetem nástroje. Důležitou roli hraje kromě velikosti také kvalita povrchu – důležitá je především před depozicí tenkých vrstev (viz 2.5.1.1).

Poloměr zaoblení je volen podle obráběného materiálu, řezného materiálu a řezných podmínek, ale také v závislosti na případné depozici tenké vrstvy. Velikostí r_n je dána minimální doporučená tloušťka odřezávané vrstvy (h_{min}). Podle teorie obrábění by měla být dodržena podmínka $h_{min} > r_n$. Poloměr zaoblení ostří také výrazně ovlivňuje oblast terciální plastické deformace a tedy přispívá k deformačnímu zpevnění obrobeného povrchu. Zvyšující se poloměr zaoblení ostří vede ke zvýšení trvanlivosti nástroje, ovšem horní hranice pro kterou tato teze platí je v rozmezí 20 – 30 μm . [19], [21], [22]

2.3.2.3 Požadavky na geometrie nástroje pro obrábění materiálu Inconel 718

Materiál Inconel 718 ve vyžádaném stavu svými vlastnostmi klade na geometrii řezného nástroje protichůdné požadavky. Na jedné straně vykazuje značnou hodnotu pevnosti v tahu a tak se jako ideální jeví použití řezného břítu s vysokou tuhostí (negativní geometrie). Zároveň se však jedná o velmi houževnatý materiál pro jejichž obrábění je vhodnější pozitivní geometrie. Pro Inconel 718 je rovněž typické enormní deformační zpevnění povrchové vrstvy obráběním. Tato zpevněná vrstva následně významně opotřebovává řezný břit při dalších průchodech materiálem a tak je minimalizace tohoto jevu základem pro efektivní obrábění. Z toho důvodu je ideální, aby nástroj způsoboval co nejmenší terciální plastickou deformaci a jsou pro obrábění nejčastěji doporučovány nástroje s pozitivní geometrií a ostrou řeznou hranou (malý poloměr zaoblení ostří). [2]

2.3.3 Tepelné jevy při obrábění

Při procesu řezání je téměř veškerá práce potřebná pro jeho realizaci přeměněna na teplo, které ovlivňuje proces řezání. Tepelná bilance řezného procesu je dána následující rovnicí:

$$Q_{pe} + Q_{\gamma} + Q_{\alpha} = Q_t + Q_n + Q_o + Q_{pr}$$

Kde:

Q_{pe} – teplo vznikající v oblasti primární plastické deformace

Q_{γ} – teplo vznikající v oblasti sekundární plastické deformace a třením na třísky na čele nástroje

Q_{α} – teplo vznikající v oblasti terciální plastické deformace a třením hřbetu nástroje o obrobenou plochu

Q_t – teplo odvedené třískou

Q_n – teplo odvedené nástrojem

Q_o – teplo odvedené obrobkem

Q_{pr} – teplo odvedené prostředím

Podíl jednotlivých složek vznikajícího i odvedeného tepla je závislý na více faktorech, především pak na řezných podmínkách, geometrii nástroje, tepelné vodivosti řezného a obráběného materiálu a řezném prostředí. Pro vznikající teplo však obecně platí, že $Q_{pe} > Q_V > Q_\alpha$. Největší množství tepla je obvykle odváděno z místa řezu třískou (Q_t).

- Množství vznikajícího tepla roste spolu se vzrůstající řeznou rychlostí. Tento nárůst však není lineární, s rostoucí teplotou řezu dojde ke snížení měrného řezného odporu a další nárůst teploty se zpomalí. Tohoto efektu může být v některých případech s výhodou využito (tzv. HSC obrábění), je však třeba použít odpovídající řezný materiál a sledovat případné tepelné ovlivnění obrobené plochy.
- Méně výrazně než v případě zvyšování řezné rychlosti roste teplota řezu při zvyšování hloubky řezu (a_p) nebo posuvu na otáčku (f_{ot}). Štíhlá tříska, tedy co nejmenší poměr f_{ot}/a_p , je z hlediska teploty řezu výhodnější.
- Při zvyšování úhlu nastavení hlavního ostří je teplo soustředěno do stále menšího úseku řezného břitu a tím roste tepelné zatížení nástroje.
- Zmenšování úhlu čela zvyšuje míru plastické deformace, tedy práci potřebnou pro řezný proces a tím také množství vznikajícího tepla.
- Zmenšení úhlu hřbetu znamená větší tření nástroje s obrobenou plochou a tím opět zvětšení vznikajícího tepla. Tření na hřbetu nástroje navíc hřbet opotřebovává a úhel čela s nárůstem opotřebení dále klesá.

Poměrně nízká tepelná vodivost materiálu Inconel 718 ($11.4 \text{ w.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) způsobuje, že poměr tepla odváděného z místa řezu třískou je výrazně menší například v porovnání z ocelí C45 (tepelná vodivost $49 \text{ w.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$). [21] Toto je jeden z důvodů, proč je pro obrábění tohoto materiálu typická poměrně vysoká teplota v místě řezu. V případech, kdy cílem není tzv. HSC (high speed cutting) obrábění, se doporučuje maximalizovat odvedení tepla z místa řezu prostředím, tedy aplikací efektivního chlazení řezným médiem. [19], [22], [22]

2.3.4 Řezné prostředí

Prostředí v místě řezu a jeho okolí má významný vliv na ekonomické i kvalitativní faktory řezného procesu. Asi nejzákladnějším řezným prostředím je okolní vzduch, pro zlepšení mazacího, chladicího i čistícího účinku jsou však používána různá další média. Typ použitého média závisí na konkrétní technologické operaci.

2.3.4.1 Požití řezných kapalin

Výsledný efekt na proces obrábění ovlivňuje řada faktorů, značný význam má především druh řezné kapaliny, ústí přívodu řezné kapaliny a její tlak.

Při soustružení, na které je zaměřena tato práce, jsou nejčastěji používány tzv. emulzní kapaliny. Emulzní kapaliny jsou tvořeny směsí vody a mazacího oleje. Rozptýlení drobných kapek oleje ve vodě je možné díky použití emulgátoru, který zabraňuje jejich spojení. Emulzní kapaliny vhodně kombinují chladicí a mazací účinek.

Způsob přívodu kapaliny do oblasti řezání značně ovlivňuje trvanlivost nástroje i kvalitu obrobené plochy. Pro zaručení nejúčinnějšího možného chlazení je u moderních strojů kapalina přiváděna k místu řezu pod vysokým tlakem (až 20 MPa) tryskami o průměru 0.3 až 1 mm. Pro další zvýšení trvanlivosti nástrojů mohou být řezné kapaliny podchlazovány na nižší než okolní teplotu. Kromě chladicího účinku pomáhá řezná kapalina přiváděná pod vysokým tlakem na

čelo nástroje také při dělení třísky a snižuje tření na čele nástroje, čímž dochází k redukci vzniku nárůstku. [25], [26]

Pro obrábění materiálů, které extrémně tepelně zatěžují řezný nástroj (např. Inconel 718) začíná být v poslední době také využíváno tzv. kryogenní chlazení. Například firma Walter AG představila frézu se dvěma tryskami směřujícími na řeznou hranu, přičemž jednou tryskou je přiváděno kapalné CO_2 a druhou může být přiváděn vzduch, aerosol nebo emulzní kapalina (viz Obrázek 15). Toto řešení podle všeho výrazně zvyšuje životnost nástroje. [27]

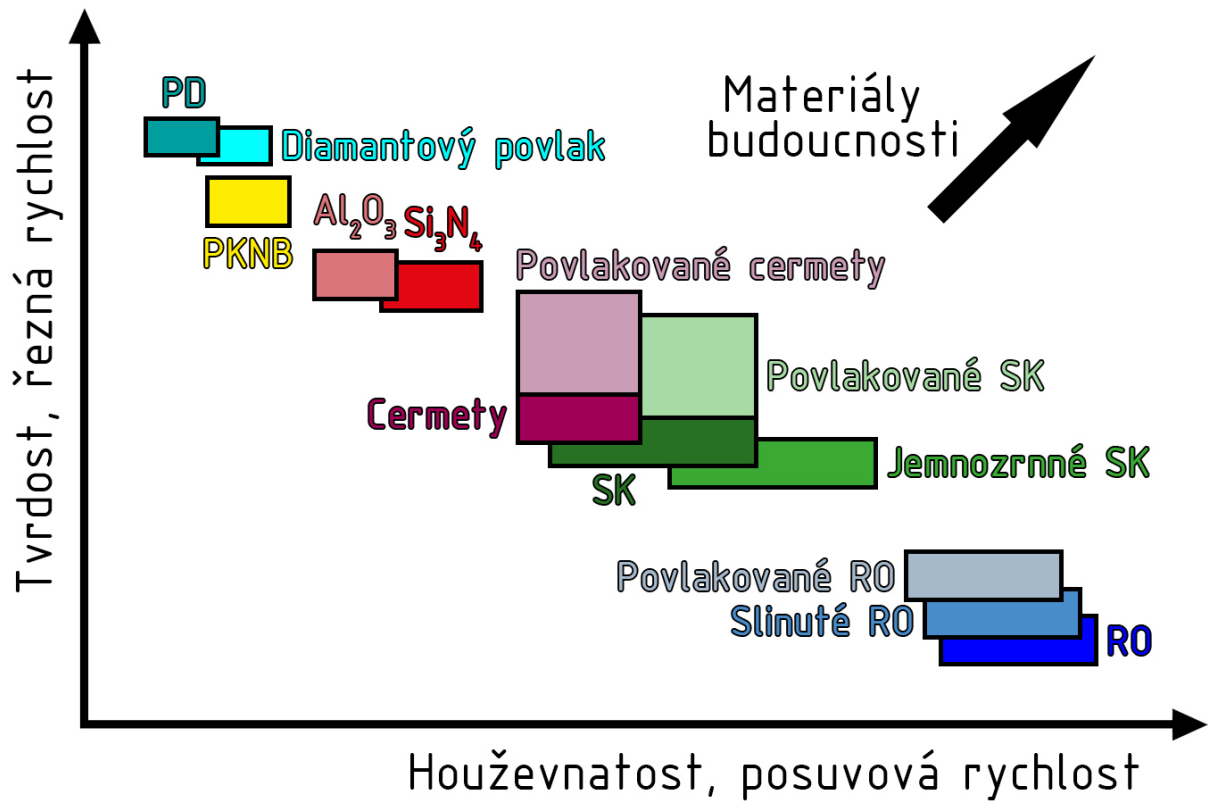


Obrázek 15 – Fréza vyrobená firmou Walter AG opatřená systémem kryogenního chlazení [27]

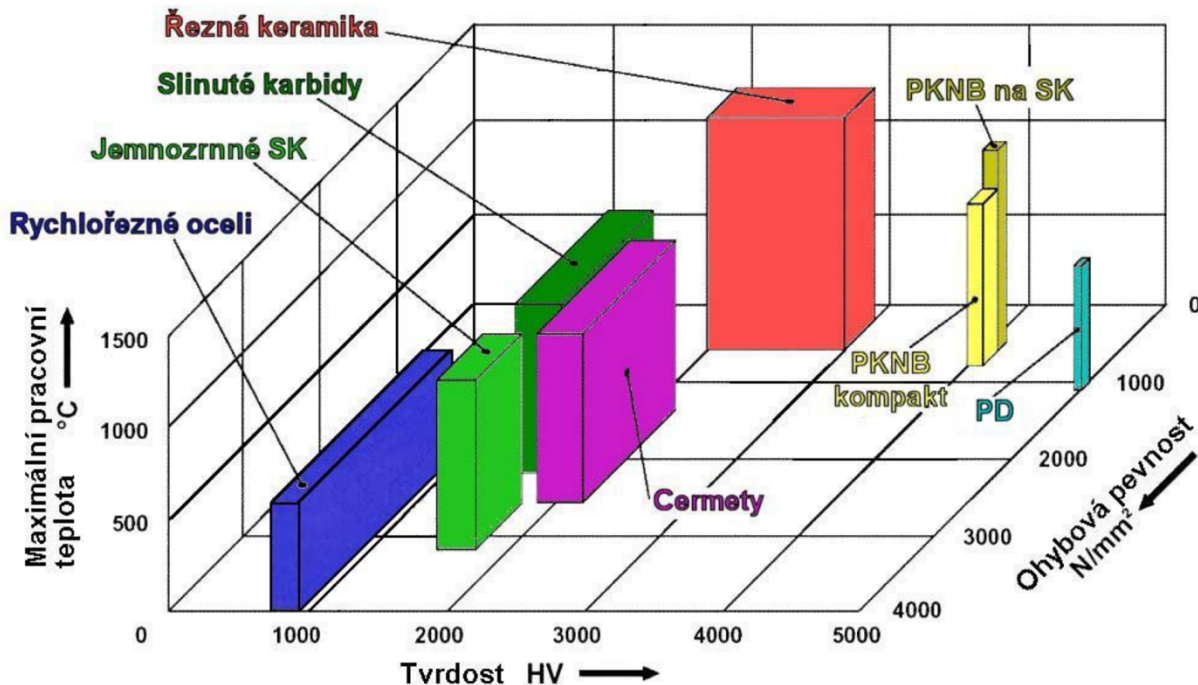
2.4 Řezné materiály

Materiál, ze kterého je vyrobena řezná část nástroje hraje při procesu obrábění klíčovou roli. V první řadě musí materiálu být přizpůsobena konstrukce řezného nástroje. Dále je pak jeho vlastnostmi přímo ovlivněna volba základních parametrů řezného procesu tedy například řezné rychlosti a posuvu. V neposlední řadě pak výběr řezného materiálu závisí na materiálu obrobku. V průmyslové praxi pak značnou roli samozřejmě hraje také cena za kterou je možné z daného materiálu vytvořit potřebný nástroj a jeho následná trvanlivost. Pro dosažení optimální ekonomiky procesu obrábění je tak volba vhodného řezného materiálu naprosto klíčová. [28]

Vzhledem k těmto důvodům budou v této kapitole jednotlivě popsány základní charakteristiky řezných materiálů, které jsou v současné době běžně používány v oblasti obrábění kovů, a jejich aplikace při obrábění slitiny Inconel 718.



Obrázek 16 – Základní porovnání řezných materiálů na základě jejich tvrdosti a houževnatosti [19]



Obrázek 17 – Porovnání vybraných vlastností řezných materiálů [19]

2.4.1 Nástrojová ocel

Nástrojové oceli patří podle značení ČSN do třídy 19. V minulosti se jednalo o nejběžnější nástrojový materiál. V současné době je však v průmyslové praxi tendence jej nahrazovat

jinými materiály. Jeho dřívější úlohu obvykle přebírají nástroje ze slinutých karbidů a to jak nástroje monolitní tak i nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami. Nástrojová ocel je v současnosti nejčastěji používána pro výrobu nástrojů monolitních, speciálních a nástrojů u kterých není předpoklad vysoké teploty řezu. Přesnější rozdělení nástrojových ocelí a jejich popis je patrný z tabulky dole.

Tabulka 6 – Rozdělení nástrojových ocelí [19]

	Nelegované	Legované	Rychlořezné
Označení	19 0XX – 19 2XX	19 3XX – 19 7XX	19 8XX
Obsah C [%]	0,5 – 1,5	0,8 – 1,2	0,7 – 1,3
Obsah legujících prvků [%]	< 1	10 – 15	> 30
Legující prvky	Mn, Si, Cr	Cr, W, Mo, V, Mn, Si, Ni	W, Mo, Cr, V, Co
Tvrdość po kalení [HRC]	62 – 64	66	64 – 68
Použití	ruční nástroje a nářadí (pilníky, nůžky)	strojní nástroje pro nižší hodnoty řezné rychlosti (protahovací trny)	strojní nástroje (soustružnické nože, frézy, vrtačky, výstružníky)

Při obráběcích operacích, kde je požadavek na vyšší řeznou rychlost (především soustružení a frézování) jsou používány tzv. rychlořezné oceli (RO). Rychlořezné oceli, označované jako 19 8XX dle ČSN, jsou vysoce legované vhodnými prvky a díky tomu je jejich popouštěcí teplota vyšší než u ostatních nástrojových ocelí a tak je možné volit vyšší hodnoty řezných rychlostí. Kvůli snížení rizika vzniku trhlin při kalení i provozu nástroje je u nástrojových ocelí požadována vysoká čistota materiálu (nižší obsah vměstků) a také rovnoměrné rozložení karbidů v matici. Zvýšení homogenity mikrostruktury a zjemnění zrna výrobků z nástrojové je dosahováno pomocí využití práškové metalurgie.

Proces obrábění materiálů na bázi niklu nástroji z rychlořezných ocelí je limitován nízkou řeznou rychlostí. V případě použití jiných nástrojových ocelí než 19 8XX bude muset být řezná rychlost ještě více snížena. V případě RO se doporučuje využít pozitivní úhly čela (0° – 8°) a malé poloměry zaoblení řezné hrany, tak aby bylo usnadněno řezání a minimalizováno zpevnování povrchu obrobku vlivem obrábění. Doporučený úhel hřbetu je 6° – 8° . [2], [19], [29]

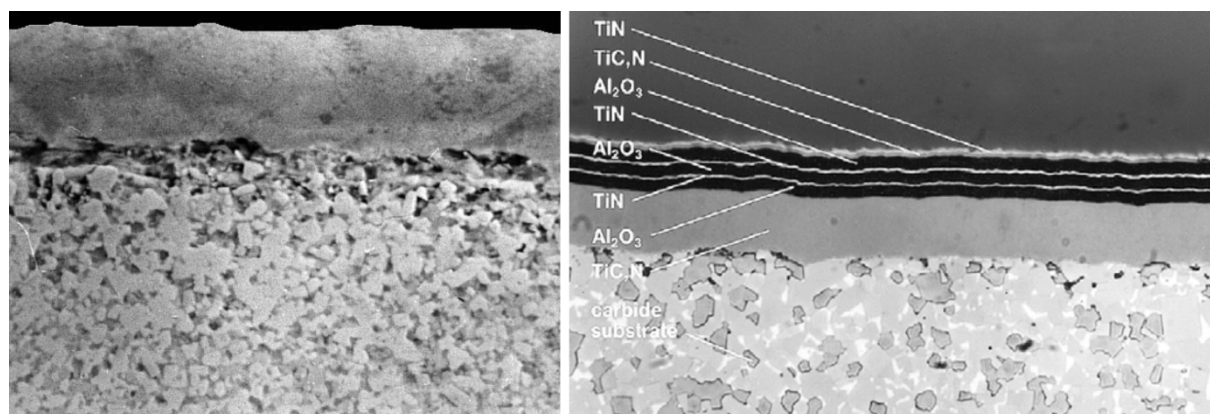
2.4.2 Slinuté karbidy (SK)

Na počátku dvacátého století bylo zjištěno, že žádané funkční vlastnosti rychlořezných ocelí způsobuje přítomnost karbidů v jejich kovové matici přičemž největší význam hraje karbid wolframu (WC). Výrobci nástrojů tedy následně začali pracovat na zužitkování těchto poznatků a vyrábět tzv. slinuté karbidy (SK). Jedná se o produkty práškové metalurgie. Značně zjednodušeně je možné jejich výrobu popsat následovně: Jemný karbidový prášek je co nejlépe promíchán s pojivem (např. kobalt) a případně také s dalšími příměsemi, tato směs je následně lisována do požadovaného tvaru a slinována. Cílem je dosáhnout struktury tvořené rovnoměrně rozptýlenými karbidovými zrny obalenými pojivím kovem. Požadovaná velikost zrn závisí na

aplikaci daného nástroje. Přičemž čím více je struktura jemnozrná tím ostřejší řezný břit je možné na nástroji vybrousit a tím větší je výsledná tvrdost nástroje.

Průmyslovou výrobu slinutého karbidu WC-Co zahájil německý výrobce nástrojů Krupp. Kvůli zlepšení trvanlivosti nástrojů byly následně vyvíjeny tzv. vícesložkové slinuté karbidy, ve kterých jsou kromě WC zastoupeny i další karbidy například TiC. Vícesložkové SK jsou v současnosti používány téměř výhradně. V minulosti byly břity ze slinutých karbidů na nástrojové držáky pájeny. V současné době jsou používány mechanické způsoby upevnění a břity jsou snadno vyměnitelné. Zároveň jsou dnes již velmi často vyráběny také monolitní karbidové nástroje.

Dalšího zvýšení řezivosti slinutých karbidů je dosahováno s pomocí tenkých vrstev. Na podkladový materiál (tzv. substrát) je aplikována speciální tenká vrstva s vysokou tvrdostí a odolností proti opotřebení. Tyto vlastnosti tenké vrstvy jsou výrazně lepší ve srovnání se základním substrátem. Toto je způsobeno několika faktory: tenká vrstva neobsahuje žádné pojivo, má výrazně jemnější zrnitost, a obsahuje méně defektů než základní substrát. Tenká vrstva rovněž tvoří bariéru proti difuznímu opotřebení nástroje a zamezuje oxidaci kobaltového pojiva. První tzv. povlakovaný slinutý karbid uvedla v roce 1969 společnost Sandvik a jednalo se o vrstvu TiC. Pro dosažení co nejlepších vlastností jsou však dnes používány především povlaky tvořené více vrstvami. Jejich úkolem je kromě zvýšení odolnosti proti opotřebení například zlepšení rozvodu tepla nebo zlepšení adheze celého povlaku k základnímu substrátu (více viz kap. 2.5 Tenké vrstvy).



Obrázek 18 – Porovnání jednovrstvého a vícevrstvého povlaku [19]

Slinuté karbidy opatřené vhodnou tenkou vrstvou patří v současné době mezi nejobvyklejší řezné materiály používané pro obrábění slitiny Inconel 718. Ve většině případů se jedná o velmi tvrdé karbidové substráty opatřené vhodnými tenkými vrstvami. Například společnost Iscar na submikronový substrát nanáší tenkou vrstvu TiAlN metodou PVD a po jejím nanesení ještě nástroj speciálně ošetřuje pro zvýšení jeho životnosti. Opět je doporučováno použít řeznou nástrojovou geometrii. Klíčem k úspěšnému obrábění karbidovými nástroji je použití dostatečně výkonného obráběcího stroje a zajištění maximální možné tuhosti soustavy SNOP(stroj-nástroj-obrobek-přípravek) pro snížení vibrací. Řezné nástroje opatřené tenkou vrstvou totiž obvykle vykazují značné zaoblení řezné hrany. [2], [19], [28], [30]

2.4.3 Cermety

Základní myšlenkou při vzniku cermetu bylo vytvořit materiál kombinující vysokou tvrdost keramiky a houževnatost kovů. Odtud název **cer** (ceramics) + **met** (metal). Jedná se prakticky také o slinuté karbidy, které jsou však tvořeny tvrdými částicemi na bázi titanu. Cermety jsou

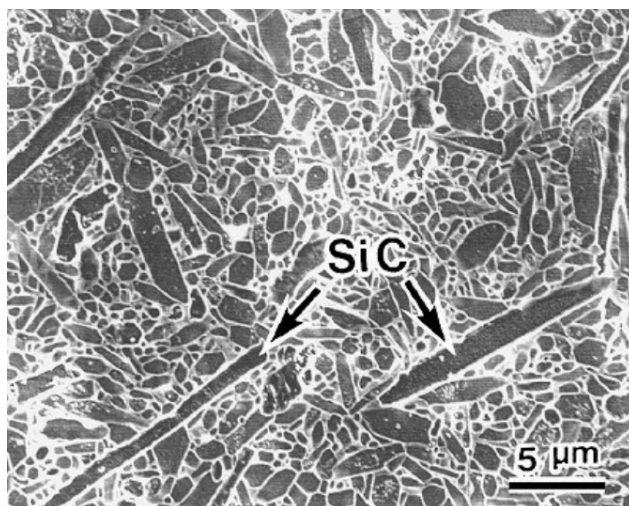
složeny z tvrdých částic TiC a TiN a niklového nebo kobaltového pojiva. Struktura je tvořena jádry z TiC nebo TiN které jsou obaleny komplexními karbonitridy, tato zrna jsou propojena vybraným pojivem. Jejich charakteristikou je velmi nízká hmotnost oproti SK, která je způsobena absencí těžkého karbidu wolframu. Oproti slinutým karbidům mají cermety větší odolnost vůči otěru a menší tendenci k tvorbě nárůstku. Cermety jsou nejčastěji využívány pro dokončovací obrábění ocelí avšak hodí se podle všeho i pro obrábění materiálu Inconel 718. V porovnání se slinutými karbidy vykazují delší životnost a zároveň je možné s nimi dosahovat lepší kvality obrobené plochy. [28], [31], [32]

2.4.4 Řezná keramika

Pojem řezná keramika zahrnuje hned několik materiálových skupin s poměrně rozdílnými vlastnostmi, které jsou vhodné pro rozmanité aplikace. Obecně se řezná keramika vyznačuje vysokou tvrdostí kterou si udržuje i za vysokých teplot a vysokou trvanlivostí. Její největší nedostatky jsou omezená lomová houževnatost a nízká odolnost proti náhlým změnám teploty. Nástroje z řezné keramiky se tedy nejčastěji používají pro vysoko rychlostí soustružení, ale jsou obecně méně vhodné pro přerušovaný řez a vysoké posuvy.

Například výrobce nástrojů Sandvik rozlišuje čtyři skupiny řezné keramiky.:

1. **Oxidová keramika** je tvořena kombinací oxidu hlinitého (Al_2O_3) a oxidu zirkoničitého (ZrO_2). Tento materiál je odolný vůči vzniku a šíření trhlin, je chemicky stabilní, ale není odolný vůči teplotním šokům, tudíž není vhodné při jeho nasazení používat chladicí kapalinu.
2. **Nitridová keramika** je primárně tvořena nitridy křemíku příkladem může být Si_3N_4 . Tato skupina disponuje poměrně vysokou houževnatostí. Je vhodná pro obrábění šedých litin, ale využití pro další materiály je omezeno nedostatečnou chemickou stabilitou.
3. **Smišená keramika** oproti oxidové navíc obsahuje karbidy nebo karbonitridy, tím je zvýšena teplotní vodivost i houževnatost. Do této skupiny můžeme řadit také nástrojovou třídu zvanou **Sialon** (název vychází z jejího chemického složení: SiAlON), která patří k nejnovějším trendům v oblasti řezné keramiky. Sialon výhodně kombinuje samovyztužitelné síť tvořené nitridem křemíku a vysokou chemickou stabilitu. Tyto třídy jsou podle všeho ideální pro obrábění žáruvzdorných slitin.
4. **Vyztužená keramika** může být oxidová i nitridová a obsahuje vyztužující vlákna (tzv. whiskery) SiC nebo Si_3N_4 . Whiskery způsobují značný nárůst houževnatosti, proto je možné při obrábění využít chlazení řeznou kapalinou. Právě vyztužená keramika je vhodná pro obrábění niklových slitin.



Obrázek 19 – Nitridová keramika vyztužená vlákny SiC [19]

Keramické řezné materiály jsou v současné době rovněž velmi rozšířené při obrábění materiálu Inconel 718. Keramické nástroje vykazují dlouhou životnost a jejich vlastnosti umožňují volbu vysokých řezných rychlostí a tím je zajištěna dobrá produktivita obrábění. Zároveň je možné obrábět bez použití procesní kapaliny, což je výhodné z ekologického hlediska. [19], [28], [33], [34]

2.4.5 Polykrystalický kubický nitrid boru (PKNB/CBN)

CBN je nástrojový materiál, který se spolu s polykrystalickým diamantem (PD) řadí mezi tzv. supertvrdé řezné materiály. Oproti PD je však možné jej používat i za výrazně vyšších teplot a za vysokých teplot si zachovává svoji tvrdost. CBN je také odolný proti teplotním šokům a zachovává si poměrně dobrou houževnatost.

Skupina nástrojových materiálů označovaná jako CBN je již v současné době tvoří téměř výhradně kompozitními materiály. Společnost Sandvik rozlišuje dvě základní skupiny. První obsahuje 40 – 65% CBN a zbytek je tvořen keramickým pojivem, které zvyšuje odolnost vůči chemickému otěru k němuž je čistý CBN náchylný. Druhá skupina je tvořena 85 – 100% CBN doplněným o kovové pojivo, které zvyšuje houževnatost materiálu. Břitové destičky jsou obvykle realizovány upevňováním tenkých břitů CBN na podklad ze slinutého karbidu. Upevnění je realizováno pomocí pájeného spoje, případně kombinací mechanického zámku a pájeného spoje, ale používány jsou také tzv. monolitní VBD z tohoto materiálu.

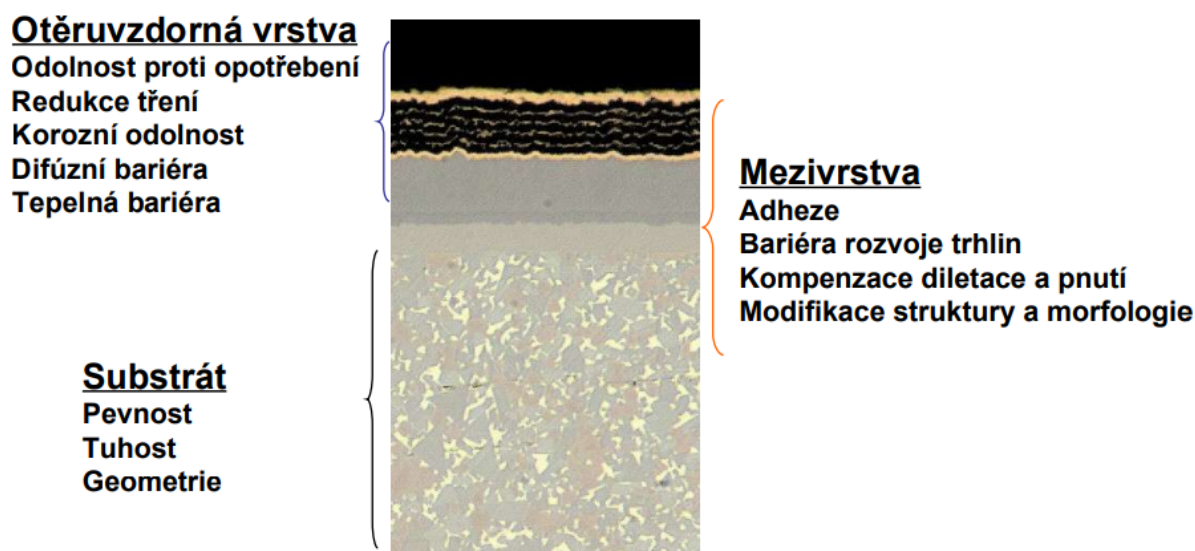
CBN je používán především pro dokončovací soustružení ocelí s tvrdostí na 45 HRC. Vyšší obsah feritu u ocelí s nižší tvrdostí způsobuje při obrábění výrazné opotřebení otěrem. V porovnání s řeznou keramikou a slinutým karbidem vykazuje tento řezný materiál při obrábění materiálu Inconel 718 nejvyšší životnost i produktivitu. Zároveň vytváří obrobený povrch s nejlepší kvalitou a nejtenčí deformačně zpevněnou povrchovou vrstvou. Nástroje z tohoto řezného materiálu však jsou velmi nákladné a tudíž při většině aplikací ekonomicky méně. [2], [4], [19], [34]

2.4.6 Polykrystalický diamant (PD)

PD je nejtvrdší používaný řezný materiál s výbornou odolností proti otěru. Jeho nevýhodou však je nízká chemická stabilita za zvýšených teplot a vysoká afinita k železu. Je proto vhodný především k obrábění neželezných materiálů a pro obrábění slitiny Inconel 718 jej pravděpodobně není možné efektivně použít. [34]

2.5 Tenké vrstvy

Tenkou vrstvou zpravidla rozumíme materiál o tloušťce od desítek nm až do jednotek μm , který je aplikován na základní materiál (tzv. substrát). Tenké vrstvy jsou již řadu let používány pro povrchovou úpravu různých základních materiálů a jejich aplikací se upravují vlastnosti celého dílu. Na tyto výsledné vlastnosti pak má vliv celý systém substrátu a aplikovaných tenkých vrstev. [35]



Obrázek 20 - Význam jednotlivých složek systému [35]

2.5.1 Tenké vrstvy u řezných nástrojů

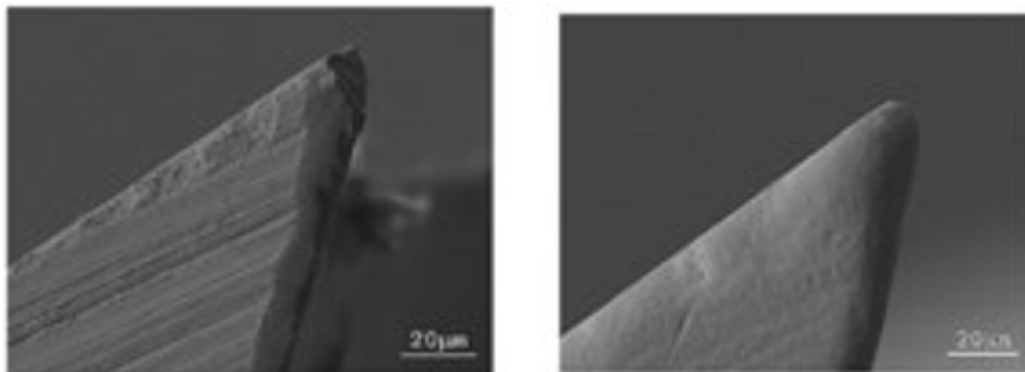
Hlavním důvodem aplikace tenkých vrstev na řezné nástroje je zvýšení jejich životnosti. Některými přínosy použití tenkých vrstev jsou například:

- Zvýšení povrchové tvrdosti řezného nástroje
- Zlepšení kluzných vlastností povrchu
- Ochrana proti oxidaci substrátu
- Účinnější odvod tepla z místa řezu

2.5.1.1 Přípravy nástrojů před depozicí tenké vrstvy

Adheze tenké vrstvy k substrátu je důležitým předpokladem pro zajištění životnosti tenké vrstvy. Na substrátu jsou proto prováděny přípravy, způsobující její zlepšení. Tímto by měla být zajištěna úspěšná depozice vrstvy a její následná trvanlivost. Podle druhu substrátu se jedná například o úpravu řezných hran a chemické nebo iontové čištění substrátu.

Jednou z běžně používaných technologií pro úpravu nástrojů před depozicí tenké vrstvy je tzv. omílání. Řezných nástroj je vláčen ve vhodném abrazivním médiu čímž je jeho povrch upravován. Omíláním dochází, kromě zvýšení kvality povrchu také k minimalizaci defektů a ostrých přechodů. Ty zpravidla vznikají právě na vybroušených řezných hranách a způsobují nedostačnou přilnavost tenké vrstvy v tomto místě. [35]



Obrázek 21 - Čelní stopková fréza ze slinutého karbidu s nabroušenou hranou (vlevo) a po omletí (vpravo) [36]

2.5.2 Depozice tenkých vrstev

Jedná se zpravidla o poslední operaci prováděnou při výrobě rezného nástroje. Nejběžnějšími technologiemi depozice tenkých vrstev jsou CVD (chemical vapor deposition) a PVD (physical vapor deposition). Hlavním charakteristickým rozdílem mezi těmito technologiemi je zdroj materiálu, který tvoří tenkou vrstvu a jejich pracovní teplota. V případě PVD je zdrojem materiálu pevný terč a v případě CVD směs plynů. [35]

Tabulka 7 – Pracovní teploty pro jednotlivé technologie depozice tenkých vrstev [37]

Technologie	Pracovní teplota
CVD	900 – 1100 °C
PECVD	450 – 550 °C
PVD	180 – 550 °C

2.5.2.1 Technologie CVD

Tenká vrstva se vytváří v důsledku chemických procesů probíhajících v objemu plazmatu a na rozhraní mezi plazmatem a substrátem. Vzhledem k použití plynu je tento proces vhodný pro aplikaci tenké vrstvy na špatně přístupná místa (například chladicí kanálky nebo dutiny).

Nevýhodou této technologie je vysoká teplota depozičního procesu (viz Tabulka 7), a tak jí není možné použít například pro deponování vrstev na nástroje z rychlořezné oceli jelikož by při procesu došlo k degradaci substrátu. Tento proces je tedy používán pro aplikaci tenké vrstvy na nástroje ze slinutých karbidů. Vzhledem k poměrně značné tloušťce deponované vrstvy (10-15 µm) pak dochází k výraznému zaoblování rezných hran nástrojů. Další nevýhodou této technologie je ekologie, k procesu depozice jsou použity toxické chloridy kovů. [35], [37]

2.5.2.2 Technologie PECVD

Jedná se o depoziční metodu podobnou CVD, kdy je energie atmosféry v komoře zvýšena pomocí ionizace. Výsledným efektem je nižší pracovní teplota než u metody CVD. Tuto technologii tedy lze použít pro deponování substrátů, které by při metodě CVD degradovaly. Nevýhodou však je obtížnější deponování dutin a drážek oproti metodě CVD. [35]

2.5.2.3 Technologie PVD

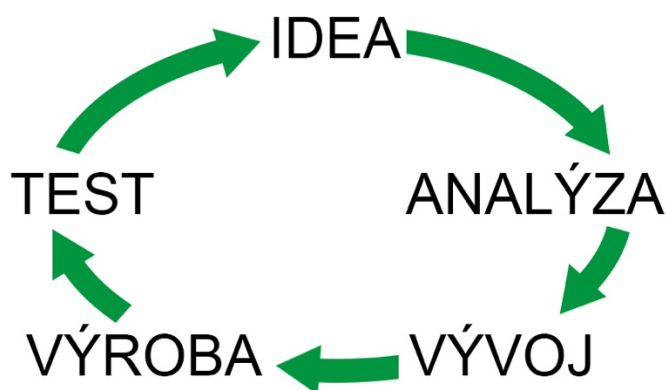
Podstatou této technologie depozice je převedení materiálu vytvářejícího vrstvu do plynné fáze, následně transport par od zdroje k substrátu, a nakonec přilnutí materiálu na povrchu substrátu. Aplikace tenkých vrstev metodou PVD se uskutečňuje v prostředí vysokého vakua za teplot 150-500°C. Z toho důvodu je možné tuto metodu použít pro aplikaci tenkých vrstev na ocelové, hliníkové i plastových díly. [35], [37]

2.5.3 Tenké vrstvy pro obrábění materiálu Inconel 718

Obecně by celý systém tenkých vrstev na nástrojích pro obrábění materiálu Inconel 718 měl zajišťovat nízký koeficient tření a tak minimalizovat tvorbu nárůstku, zároveň by měl být odolný proti abrazi, kterou způsobují karbidy přítomno v tomto materiálu a jeho chemické složení by mělo být vůči obráběnému materiálu neutrální. Obvykle je v současné době používány vrstvy TiAlN, TiN nebo TiCN. Celý systém tenké vrstvy je však většinou speciálně vyvíjen výrobcí nástrojů. Za povšimnutí stojí například tenká vrstva nazývaná Signum, kterou vyvíjí společnost Gühring. Jedná se o nanokompozitní mikrostrukturu složenou z TiAlN a TiAlSiN. Mikrostruktura této vrstvy je tvořena nanokrystaly TiAlN, které jsou v matici z TiAlSiN. Tato vrstva vykazuje vysokou tvrdost i za vysokých teplot a navíc jelikož je její struktura bez průběžných hranic zrn, tak je nežádoucí difuze obráběného materiálu do nástroje výrazně omezena. [38], [39]

3 Návrh, výroba a realizace experimentů

V této kapitole je podrobně popisována aplikace poznatků získaných v teoretické části práce. Vzhledem ke značné spletnosti problému bylo vyvinuto několik verzí nástroje. Evaluace těchto variant probíhala buď již ve fázi CAD návrhu, nebo na základě testů vyrobených dílů. Tato kapitola tedy bude rozdělena do několika částí zabývajících se jednotlivými variantami. Celý postup probíhal podle osvědčeného vývojového frameworku (viz Obrázek 22). V první řadě se jedná o proces návrhu konstrukce nástroje podle aktuálních znalostí. Následuje návrh technologie výroby a realizace výroby celého produktu nebo jeho částí. Poté je provedeno testování a zjištěné poznatky jsou zapracovány do nového návrhu. Přičemž díky použití CAD systému je umožněno jednodušší testování předpokladů již ve fázi návrhu. Tento koloběh by pochopitelně měl být opakován dokud není dosaženo požadovaného výsledku.



Obrázek 22 – Vývojový framework [40]

3.1 Návrh řešení pro realizaci cílů práce

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, jedním z problémů při obrábění slitiny Inconel 718 je značné tepelné zatížení nástroje. Z toho důvodu je hlavní téze této práce odvádět teplo z místa řezu pomocí efektivního chlazení. Jednou z výhod aditivních technologií je možnost velmi snadno vyrábět vnitřní chladicí kanálky a právě této skutečnosti je u nástroje využito. Chladicí médium je skrz tělo nástroje přiváděno do systému kanálků v rezné části. Kanálky následně přivádějí chladicí médium do největší možné blízkosti místa řezu. Tento systém by měl umožňovat zvýšení efektivity chlazení také u strojů, které nejsou vybaveny moderním vysokotlakým chlazením a snížení množství potřebné chladicí kapaliny.

Na základě této prvotní domněnky bylo pro ověření hypotézy navrženo, vytvořeno a následně testováno několik variant nástroje.

3.2 Použité vybavení

3.2.1 Programové vybavení

Programové vybavení bylo v případě realizace tohoto nástroje nepostradatelnou součástí procesu. Bylo využito jak pro návrh konstrukce, tak i pro uskutečnění výroby dílů. Zde je pro jednoduchost zmíněno pouze to nejpodstatnější programové vybavení.

- **Autodesk Fusion 360**

Tento CAD nástroj byl téměř výhradně využit pro kompletní návrh konstrukce nástroje. Hlavní výhodou je, že se jedná o tzv. cloudový software. Veškeré návrhy jsou ukládány na serverech výrobce a jsou tedy přístupné z kteréhokoliv počítače s nainstalovaným

programem Fusion 360 a připojením k internetu. Na serverech výrobce také probíhá většina náročných výpočtů, proto jsou nároky na výpočetní výkon používaného počítače poměrně nízké.

- **Materilase Magics**

Jedná se o software pro přípravu dílů pro aditivní výrobu. Pomocí tohoto programu je určena poloha dílu v tiskovém prostoru stroje a jsou vytvořeny podpůrné struktury (viz 2.2.1.7 Podpůrné struktury).

- **EOS Print**

Tento program je dodáván výrobcem zařízení pro aditivní výrobu EOS a slouží k vytvoření dat pro aditivní výrobu a komunikaci s výrobním zařízením. Je zde možné nastavit například požadovanou výšku vrstvy nebo parametry expozice laserem a následně generovat výrobní program.

- **SolidCAM**

Tento software umožňuje vytvářet programy pro obráběcí stroje. V tomto případě v něm byly vytvářeny programy pro dokončování aditivně vyrobených komponent a výrobu přípravků.

- **Siemens NX**

Software Siemens NX je komplexní CAD a CAM balíček, v této práci byl využit jeho CAM modul pro vytváření obráběcích programů pro brusku ANCA MX7.

3.2.2 Stroje a zařízení

Zde jsou zmíněny zásadní stroje a zařízení, které jsou součástí strojového parku Západočeské univerzity v Plzni a byly využity pro vývoj a výrobu nástroje.

- **Zařízení pro aditivní výrobu – EOS M290**

Jedná se o zařízení pro aditivní výrobu pracující technologií DMLS. Pomocí tohoto stroje byly vyráběny polotovary nástroje z materiálu MS1.

- **Frézovací centrum – DMU 40 eVo linear**

Toto univerzální obráběcí centrum umožňuje plynulé 5osé frézování a bylo využito pro dokončování polotovaru držáku, výrobu přípravku a úpravy řezné části.

- **Multifunkční soustruh – EMCO MAXXTURN 25**

Tento stroj byl použit pro testování výsledného nástroje. Jedná se soustružnicko-frézovací centrum s následujícími základními parametry:

- Maximální průměr obrobku: 114 mm
- Maximální délka obrobku: 315 mm
- Maximální otáčky vřeten: 8000 ot/min
- Maximální výkon hlavního vřeten : 6,5 kW
- Maximální výkon protivřeten: 3,5 kW

Upínání nástrojů je řešeno revolverovou hlavou, která disponuje dvanácti pozicemi pro držáky VDI 16. Stroj je vybaven VDI držáky pro upínání soustružnických nožů s rozměry upínací části 12x12 mm a pro obrábění na hlavním vřetenu jsou nejvhodnější levé soustružnické nože. Rozvod chladicího média je řešen pomocí čerpadla vyvíjejícího tlak až 14 bar. [41]

- **Nástrojařská bruska – ANCA MX7**

- **Zařízení pro úpravu povrchu – OTEC DF 3**

- **Opticko-skenovací mikroskop – IFM G4**

- **Mikroskop – Keyence VHX-6000**

- **Univerzální měřicí přístroj – Zoller Genius 3s**

- **Rovinná bruska**

- Frézka – TOS FNGJ 20
- Soustruh – TOS SUI 32
- Elektroerozivní drátová řezačka – FANUC ROBOCUT α -C600iB

3.3 Volba základních parametrů nástroje

Pro prvotní ověření funkčnosti systému chlazení byla zvolena technologie soustružení. Z důvodu zjednodušení a urychlení procesu návrhu a pro následné porovnání vybrán existující nástroj a použit jako předloha.

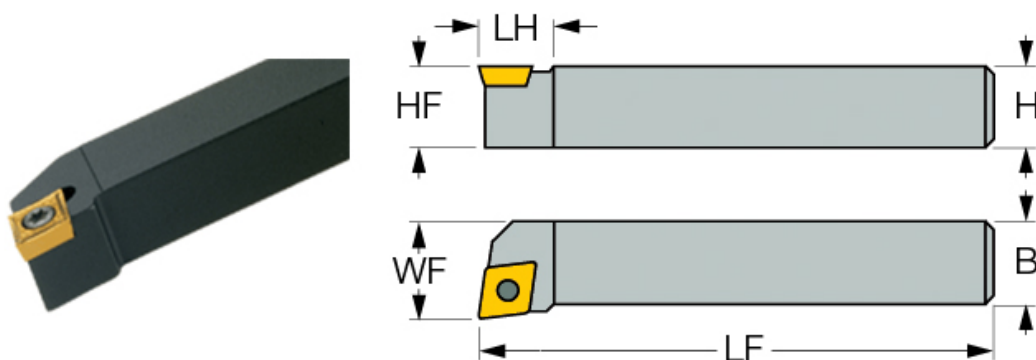
3.3.1 Výběr vzorového nástroje

Pro testování vyrobeného nástroje byl použit stroj EMCO Maxxturn 25, kterým disponuje Katedra technologie obrábění na ZČU v Plzni, proto byl zvolen levý soustružnický nožový držák s rozměry upínací části 12x12 mm. Pro upnutí řezné části byl vybrán systém ISO S, jedná se o systém upínání pomocí šroubku. Toto řešení bylo zvoleno, jelikož je jeho výroba nejjednodušší a zároveň umožňuje vhodné upínání i při dokončování vlastní vyměnitelné břitové destičky. Z teoretické části práce pak vyplývá, že pro obrábění slitiny Inconel 718 se hodí pozitivní geometrie nástroje.

Na základě těchto parametrů byl jako předloha zvolen nástroj od společnosti Iscar s označením SCLCL 1212F-09. Tento nástroj je konstruován pro vyměnitelné břitové destičky s označením CCMT 09T304-14 a je s ním možné realizovat jak podélné tak i čelní soustružnické operace.

Tabulka 8 – Základní rozměry nožového držáku SCLCL 1212F-09 v mm

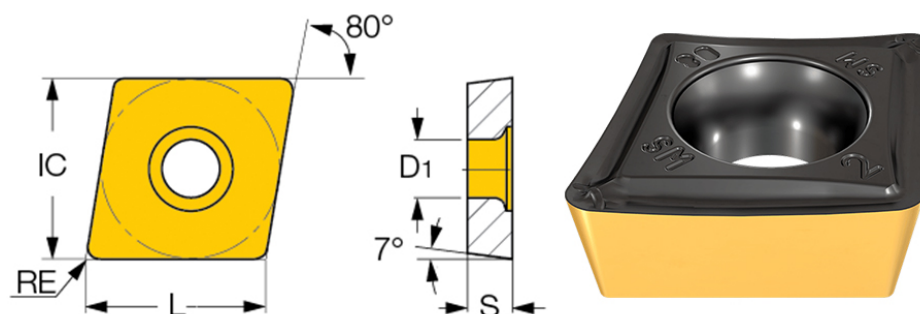
H	HF	B	LF	LH	WF
12	12	12	80	14	16



Obrázek 23 – Nožový držák SCLCR 1212F-09 s břitovou destičkou CCMT 09T304-14 [42]

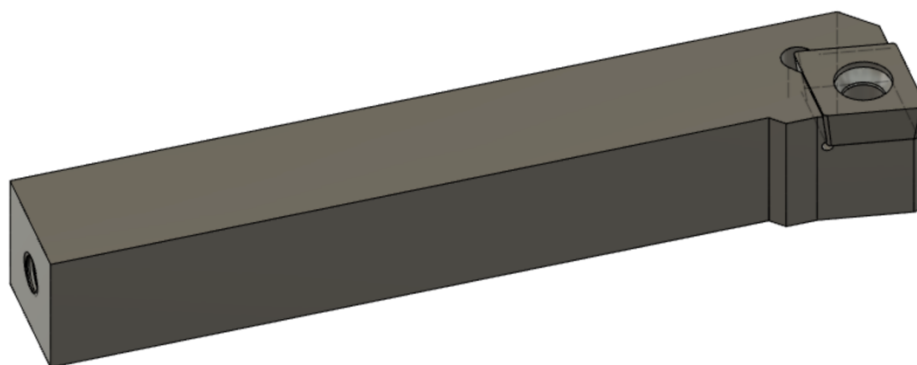
Tabulka 9 – Základní rozměry vyměnitelné břitové destičky CCMT 09T304-SM v mm [43]

L	IC	S	RE	D1
9,7	9,52	3,97	0,4	4,40



Obrázek 24 – Vyměnitelná břitová destička CCMT 09T304-SM [43]

Prvním krokem po vybrání vzorového nástroje bylo vymodelování jeho přibližné kopie v CAD programu Fusion 360. Na tomto modelu pak byly prováděny první experimenty s tvorbou systému vnitřního chlazení. Přestože by při návrhu nástroje teoreticky bylo možné volit různé podoby vyměnitelné rezné části i držáku, tak bylo zvoleno řešení co nejvíce se podobající standardním nástrojům aby byla zaručena zaměnitelnost s těmito nástroji.



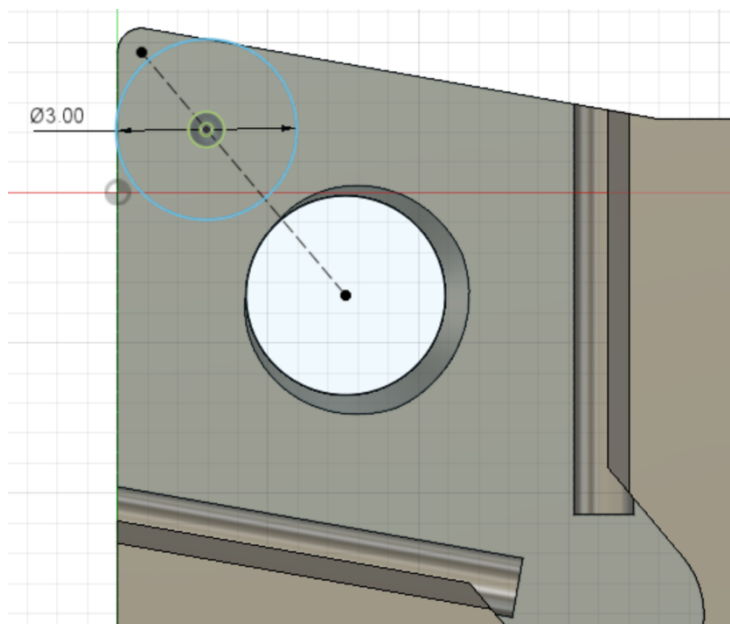
Obrázek 25 – Vytvořený CAD model vzorového nástroje

3.3.2 Návrh realizace vnitřního systému chlazení

Jak vyplývá z předchozích kapitol práce, cílem bylo přivádět kapalinu co nejbližší místu řezu. Díky aditivním technologiím je možné vytvářet tvarově komplikované kanálky i ve vyměnitelné břitové destičce. Přívod kapaliny do systému kanálku ve vyměnitelné břitové destičce je samozřejmě možné uskutečnit několika způsoby. V tomto případě byla zvolena varianta přívodu přes nožový držák. Tato varianta s sebou přináší nutnost uskutečnění vzájemného těsného spojení mezi nožovým držákem a VBD.

3.3.2.1 Návrh realizace těsného spojení mezi držákem a VBD

Z důvodu maximálního využití standardně dostupných komponent bylo jako nejvhodnější zvoleno těsnění pomocí o-kroužku. Jako příhodné umístění zahloubení pro o-kroužek, byla vybrána spodní plocha lůžka pro VBD v nožovém držáku. Toto umístění se zdá být z hlediska technologičnosti konstrukce jako nejlepší.

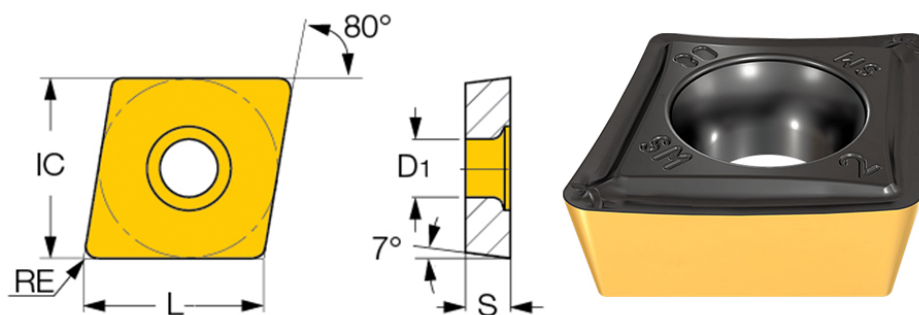


Obrázek 26 – Detail lůžka pro VBD CCMT 09T304-SM s kružnicí představující vnější průměr o-kroužku 1x1

Nejmenší běžně dostupné o-kroužky (označované 1x1) mají vnitřní průměr 1 mm a průměr průřezu také 1 mm. Tento o-kroužek by však vzhledem k jeho zástavbovým rozměrům nebylo možné použít. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto, že bude nožový držák upraven tak aby bylo možno použít jako předlohu nejbližší větší VBD stejného typu, kterou má výrobce Iscar ve svém portfoliu (viz Tabulka 10). Zvětšení vyměnitelné řezné části přináší i další výhody. V první řadě, je v ní možné vyrobit kanálky o větším průřezu, lze je dílem vézt s menšími záhyby a snáze směřovat jejich ústí. Za druhé, jelikož je tato VBD běžně používána pro větší nástroje je možné ji přímo přenést i na větší stroje a například pouze upravit standardní nožové držáky (například Sandvik C3-SCLCR-22040-12) a vyhnout se tak výrobě speciálních.

Tabulka 10 – Základní rozměry vyměnitelné břitové destičky CCMT 120404-SM v mm

L	IC	S	RE	D1
12,9	12,7	4,76	0,4	5,5



Obrázek 27 – Vyměnitelná břitová destička CCMT 120404-SM [44]

3.4 Návrh testovací verze řezného nástroje

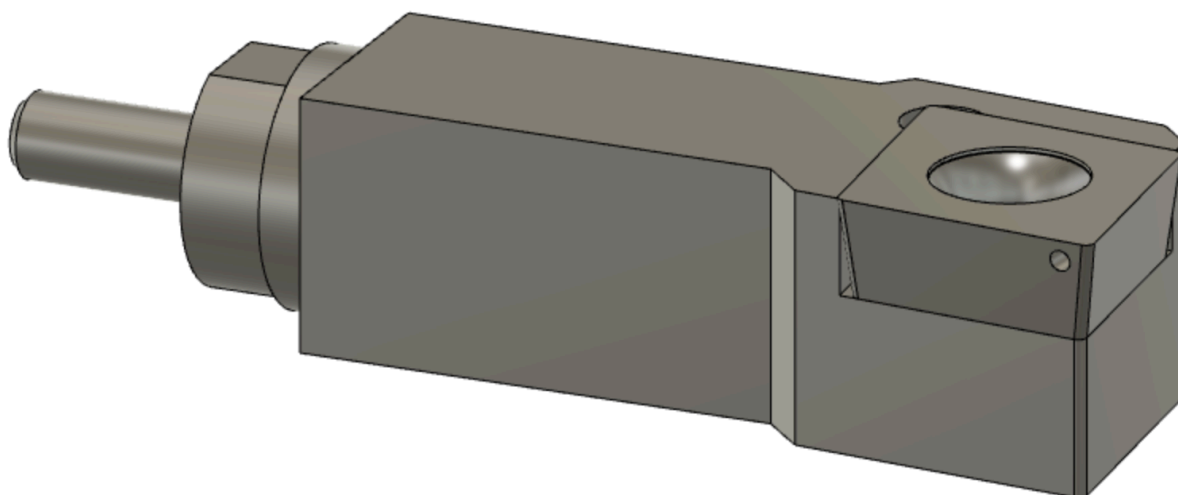
Po pečlivém uvážení (viz předchozí odstavce) byly vybrány základní parametry soustružnického nože. Jedná se o nožový držák s rozměry upínací části 12x12 mm a řeznou část ve formě vyměnitelné břitové destičky značené CCMT 120404-SM dle ISO.

Na základě těchto podkladů byla navržena první verze výsledného nástroje, určená především pro ověření funkčnosti kritických částí celku:

- Průchodnost chladicích kanálků vyrobených pomocí aditivní technologie DMLS
- Těsnost spoje mezi nožovým držákem a VBD
- Přívod chladicího média do nožového držáku

Celý model nástroje byl nejprve opět vytvořen v CAD systému. Vzhledem k tomu, že se jednalo testovací verzi nástroje, byla konstrukce úměrně uzpůsobena:

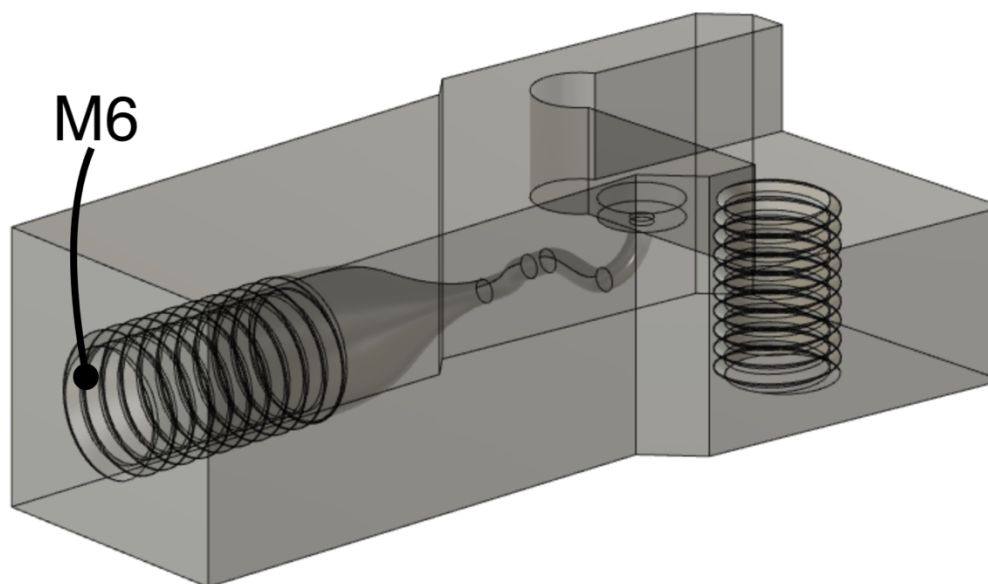
- Jelikož tato verze není primárně určena pro řezné zkoušky, byla délka upínací části co nejvíce redukována, tak aby byl ušetřen nákladný tiskový materiál.
- Lůžko pro VBD bylo zjednodušeno tak aby bylo možné následné dokončení provést co nejjednodušeji. Použití rovných stěn je pro účely této verze dostačující a umožňuje snadné obrobení na frézce TOS FNGJ 20.
- Díra pro upínací šroub M5 a zahloubení pro těsnící kroužek budou vyrobeny aditivní technologií.
- Hřbety VBD budou vyrobeny bez přídavku ponechány v surovém stavu po 3D tisku.



Obrázek 28 – Sestava testovací verze nástroje

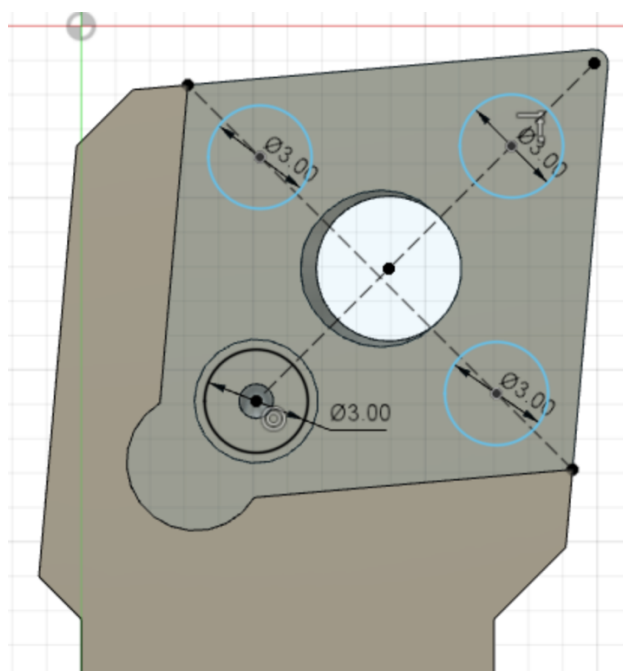
3.4.1 Popis podstatných částí konstrukce této verze

Chladicí kanálky mají u této varianty kruhový průřez o nejmenším průměru 1 mm. Jak je možné si povšimnout na obrázku Obrázek 29 trajektorie kanálku v nožovém držáku je na první pohled zbytečně komplikovaná a průřez kanálku je v některých místech menší, než by bylo možné. Tyto prvky totiž mají za cíl ověřit skutečné možnosti výroby vnitřních kanálků metodou DMLS na stroji EOS M290 z materiálu MS1 (viz 2.2.1.4). Stejnou funkci primárně plní také kanálek ve VBD, z toho důvodu není v tomto případě jeho ústí směřováno přímo na řeznou hranu.



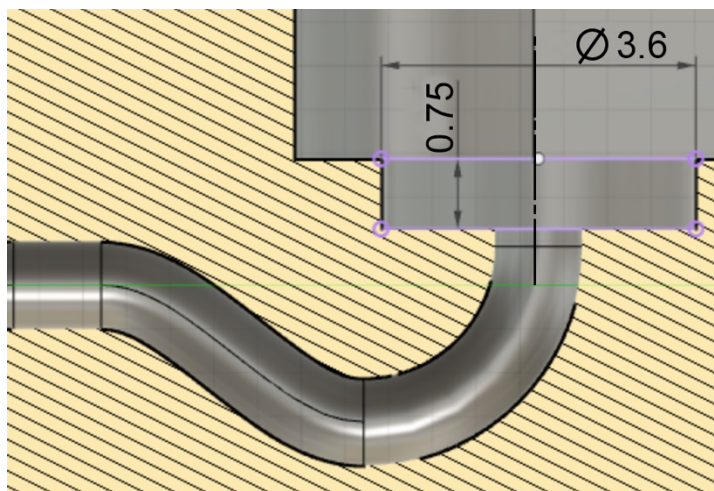
Obrázek 29 – Pohled na systém vnitřních kanálků v testovací verzi nožového držáku

Připojení přívodu chladicí kapaliny do nožového držáku je realizováno na zadní straně součásti pomocí závitu M6 (viz Obrázek 29), který je vyroben pomocí aditivní technologie. Těsnost mezi spojkou pro připojení chladicí kapaliny a nožovým držákem je zajištěna použitím o-kroužku 6x2.



Obrázek 30 – Možné varianty umístění o-kroužku

Na obrázku nahoře jsou kružnicemi označeny potenciální prostory pro umístění těsnícího prvku. Pro tuto variantu byl vybráno umístění na zadní straně lůžka. Díky aplikaci VBD CCMT 120404-SM bylo možné použít větší o-kroužek (1,3x1,1), kterému bylo zhloubení přizpůsobeno. Rozměry zhloubení byly do jisté míry voleny podle doporučení výrobce, běžně se ovšem doporučuje o-kroužky umístit do drážky. V tomto případě však vzhledem k nedostatku prostoru bylo použito jednoduché válcové zhloubení (viz Obrázek 31). [45]



Obrázek 31 – Válcové zahloubení pro o-kroužek

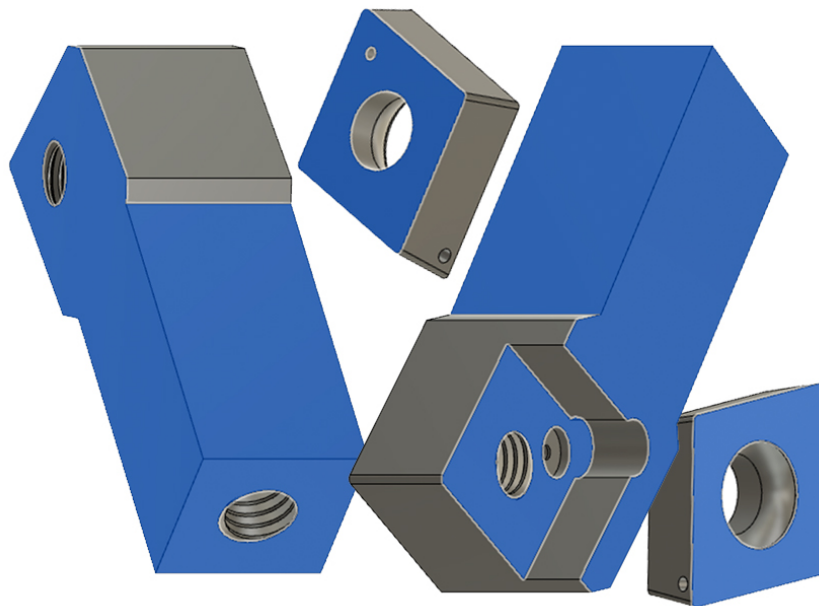
Proto bylo potřeba nejprve ověřit správné fungování tohoto zahloubení. K tomu došlo pomocí poměrně primitivního, ale spolehlivého pohledového pokusu. Do ocelového polotovaru byla vytvořena válcová zahloubení (viz obrázek dole). Do těchto zahloubení, pak byly vkládány těsnící o-kroužky různých rozměrů a stlačeny pomocí průhledného plexiskla. Přes plexisklo pak byla pozorována podoba deformovaného o-kroužku, tedy především zdali nepřekrývá myšlený otvor pro přívod chladicího média. Na základě tohoto jednoduchého testu byla zvolena nejvhodnější kombinace o-kroužku a válcového zahloubení (o-kroužek 1,3x1,1 a válcové zahloubení o průměru $\varnothing 3,6$ mm a hloubce 0,75 mm).



Obrázek 32 – Přípravek pro výběr vhodných parametrů zahloubení

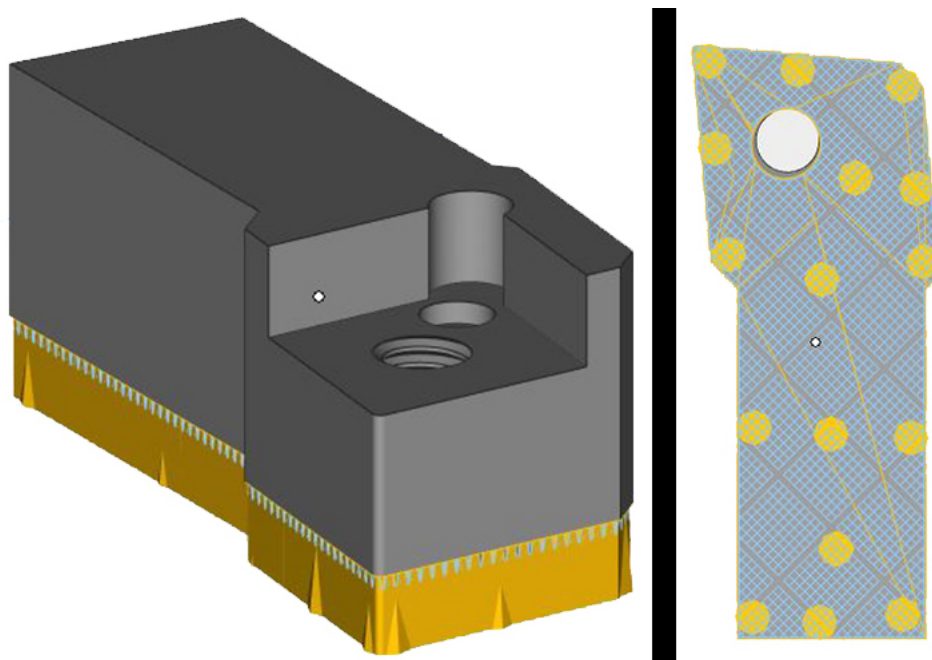
3.5 Příprava výroby testovací verze řezného nástroje

Po dokončení konstrukce bylo možné přejít k přípravě výroby dílů, tedy připravit data pro výrobu pomocí technologie DMLS na stroji EOS M290 z materiálu EOS MaragingSteel MS1. Nejprve bylo potřeba zvolit vhodné přídavky. V tomto případě byl použit jednotný přídavek 0,3 mm na všechny plochy, které budou později dokončovány pomocí třískového obrábění. Tato hodnota je menší než běžně doporučovaná (viz 2.2.1.4), ale na základě orientace dílů v tiskovém prostoru, technologie následného dokončování a zkušeností s dostupným výrobním zařízením by měla být dostačující. Po vytvoření přídavku na odpovídajících plochách (viz Obrázek 33) byly díly uloženy jako soubor STL.

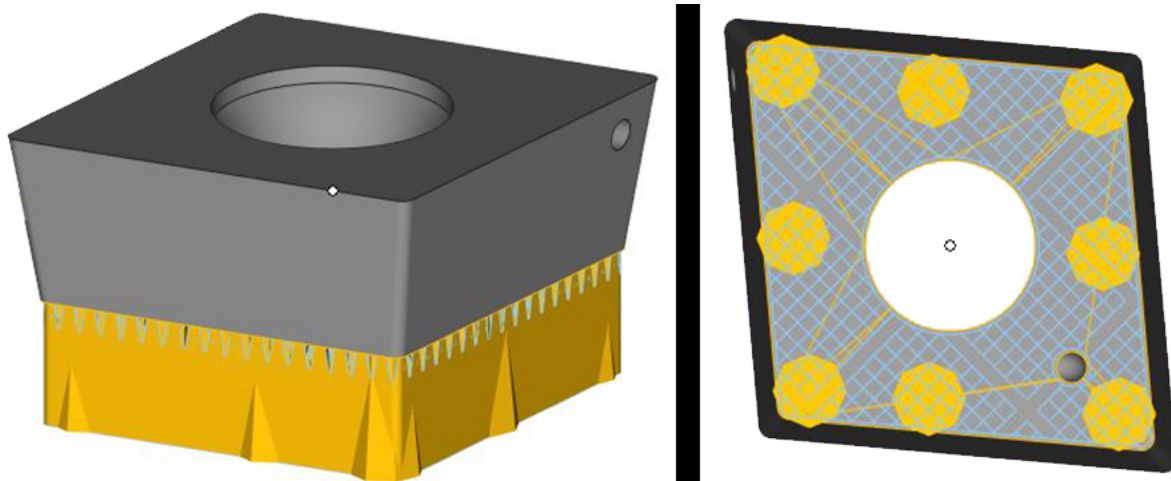


Obrázek 33 – Modře označené plochy opatřené přídavkem 0,3 mm

Dalším krokem byla volba vhodné orientace v tiskovém prostoru stroje a vytvoření podpůrných struktur v programu Materialise Magics (viz Obrázek 34 a Obrázek 35). Obě části nástroje byly navrženy tak, aby bylo možné umístit podpory pouze na jejich spodní plochu. Přičemž byly použity dva druhy podpůrných struktur. Blokovaná podpora pokrývá celou spodní plochu součástí a zajišťuje pevné spojení stavěcí platformy a součástí. Kuželové podpory o průměru $\varnothing 1$ mm v místě připojení k dílu a průměru $\varnothing 1,4$ mm v místě připojení k tiskové platformě jsou pak strategicky rozmístěny pro další zvýšení pevnosti spojení a zlepšení odvodu tepla. Jejich funkce je pak nejdůležitější v místě, kde dochází k prvním kontaktům mezi součástmi a recoaterem.

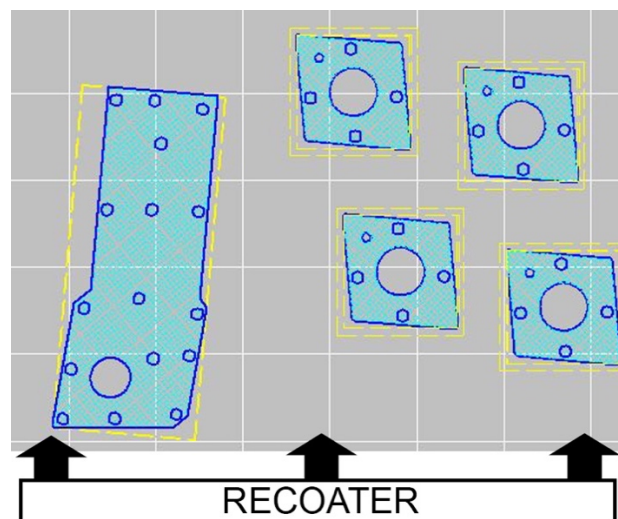


Obrázek 34 – Orientace a podpory nožového držáku, vpravo: pohled na spodní plochu držáku, modře bloková podpora a žlutě kuželové podpory



Obrázek 35 – Orientace a podpory VBD, vpravo: pohled na spodní plochu držáku, modře bloková podpora a žlutě kuželové podpory

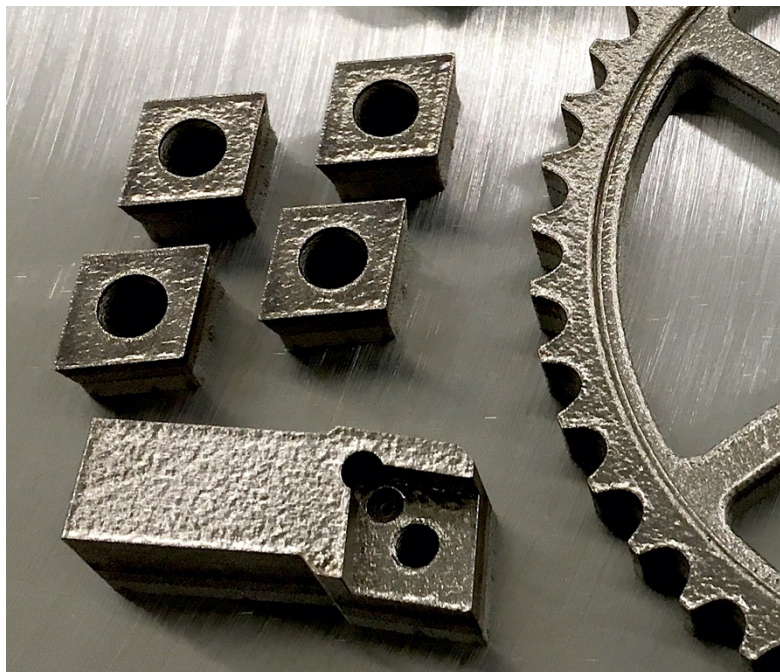
V tuto chvíli byla příprava v programu Magics hotova a díly exportovány k dalšímu zpracování. Pro finální tvorbu výrobních dat byl použit program EOS Print 1.10. V tomto programu byly dílům i podporám přiřazeny tiskové parametry (například výška vrstvy nebo parametry a pořadí expozice laserovým paprskem) a stanovila se jejich poloha na tiskové platformě. Všechny díly jsou polohovány tak, aby plocha prvního kontaktu mezi dílem a recoaterem byla co nejmenší.



Obrázek 36 – Finální orientace dílů na tiskové platformě – Snímek obrazovky z programu EOS Print 1.10

3.6 Výroba testovací verze řezného nástroje

Během procesu tisku nedošlo k žádným problémům a všechny díly byly bezchybně vyrobeny. Po vyjmutí stavěcí platformy ze stroje následovalo nezbytné tepelné zpracování pro snížení pnutí a vytvrzení.



Obrázek 37 – Díly na tiskové platformě po tepelném zpracování

3.6.1 Postprocessing

Po oddělení dílu ze stavěcí platformy pomocí pásové pily následoval postprocessing. Podpůrné struktury byly odstraněny pomocí sekáčů a jejich zbytky hrubě začištěny na pásové brusce. V posledním kroku pak byl stlačeným vzduchem důkladně pročištěn systém vnitřních kanálů.



Obrázek 38 – Odstraňování podpůrných struktur na VBD pomocí sekáče

3.6.2 Dokončení nožového držáku

Dokončení nožového držáku bylo provedeno s pomocí rovinné brusky a nástrojové frézky. První operací po postprocessingu bylo broušení upínací části, tedy dosedací plochy nožového

držáku a plochy protilehlé. Z obou stran byl držák obroušen o 0,3 mm na finální tloušťku 12 mm.

Po obroušení následovalo dokončení zbývajících částí frézováním. V prvních dvou operacích byl polotovár upnut do svěráku za již dokončené plochy a doklepnut na podložky. Následovalo frézování bočních ploch upínací části držáku čelem stopkové frézy o průměru $\varnothing 16$ mm. Pro třetí operace, frézování zadní plochy upínací části, vyžadovala vertikální upnutí držáku realizované pomocí 90° úhelníku. Obrábění bylo provedeno stejným nástrojem.

V posledním kroku došlo k obrobení lůžka pro VBD. Polotovár byl do otočného svěráku upnut za boční plochy upínací části a doklepnut na podložky. Svěrák byl natočen o příslušný úhel, tak aby boční stěna lůžka byla rovnoběžná s osou X frézky. Monolitní frézou o průměru 4 mm ze SK pak byla stěna postupně dokončena. Axiální i radiální hloubka řezu byla 0,1 mm. Stejný postup byl opakován i pro druhou stěnu lůžka. Zbývajícím materiálem na dně lůžka pak byl odebrán v posledním kroku. Posledními operacemi bylo ruční začištění obou závitů odpovídajícími závitníky a ruční odstranění otřepů.

Ačkoliv výsledek toto technologického postupu je v porovnání s použitím CNC obráběcího stroje poměrně nepřesný, tak pro prvotní testování se jeví jako dostačující. Jeho hlavní výhodou pak v tomto případě byla jeho rychlost v porovnání s použitím jiného postupu a možnost hlubšího vhledu do problematiky výroby nožových držáků.

3.6.3 Dokončení VBD

Jak již bylo zmíněno výše, vyměnitelná břitová destička u této verze nástroje byla zjednodušena pro usnadnění jejího dokončování. Přestože pro potřeby testování teoreticky stačilo obrobit pouze dosedací plochu destičky bylo dokončeno také čelo. Obrobení plochy čela bylo při již připraveném stroji časově nenáročné a znamenalo větší přiblížení se reálnému nástroji, tudíž lepší představu o jeho finální podobě.

VBD byla pro první operaci upnuta na magnetický stůl rovinné brusky za čelo a zajištěna ze všech stran pomocí zářek. Následovalo broušení na rozměr 5,06 mm. Poté byl díl upnut za obroušenou plochu a dokončeno čelo VBD na finální tloušťku 4,76 mm.

3.7 Přívod chladicí kapaliny do nožového držáku

Vzhledem k parametrům stroje EMCO Maxxturn 25 byly pro přivedení přívodu chladicího média do nožového držáku zvoleny hadice FUP-04 a FUPC-04 o vnitřním průměru $\varnothing 4$ mm dostupné u prodejce VSK Profi, s.r.o. a k nim odpovídající hadicové spony. Pro připojení hadice ke stroji a nožovému držáku bylo potřeba navrhnout a vyrobit vhodné spojky. [46]

3.7.1 Spojka pro nožový držák – CPR-ND

Vstupní parametry pro návrh spojky CPR-ND:

- Rozměry hadic FUP-04 a FUPC-04
- Připojení spojky k nožovému držáku je řešeno pomocí závitů M6 a těsnost spoje je zajištěna o-kroužkem 6x2.
- Aby bylo možné realizovat upnutí nožového držáku do stroje, tak obrys spojky musí být menší než obrys upínací části nožového držáku.
- Dotažení i povolení spojky by mělo být realizovatelné pomocí stranového klíče.

Na základě těchto kritérií byla spojka CPR-ND navržena a vyrobena z oceli C45 s pomocí univerzálního hrotového soustruhu a frézky.



Obrázek 39 – Finální podoba spojky CPR-ND

3.7.2 Spojka pro připojení ke stroji – CPR-VDI

Držáky VDI16 používané na stroji EMCO Maxxturn 25 jsou opatřeny zadním výstupem pro chladicí kapalinu, který může být s výhodou využit pro tuto aplikaci.

Vstupní parametry pro návrh spojky CPR-ND:

- Rozměry hadic FUP-04 a FUPC-04
- Výstupní otvor pro chladicí kapalinu v použitém VDI držáku je opatřen závitem M6.
- Dotažení i povolání spojky by mělo být realizovatelné pomocí stranového klíče.

Výsledná spojka CPR-VDI byla navržena podle těchto parametrů a vyrobena na univerzálním hrotovém soustruhu a frézce z oceli C45.



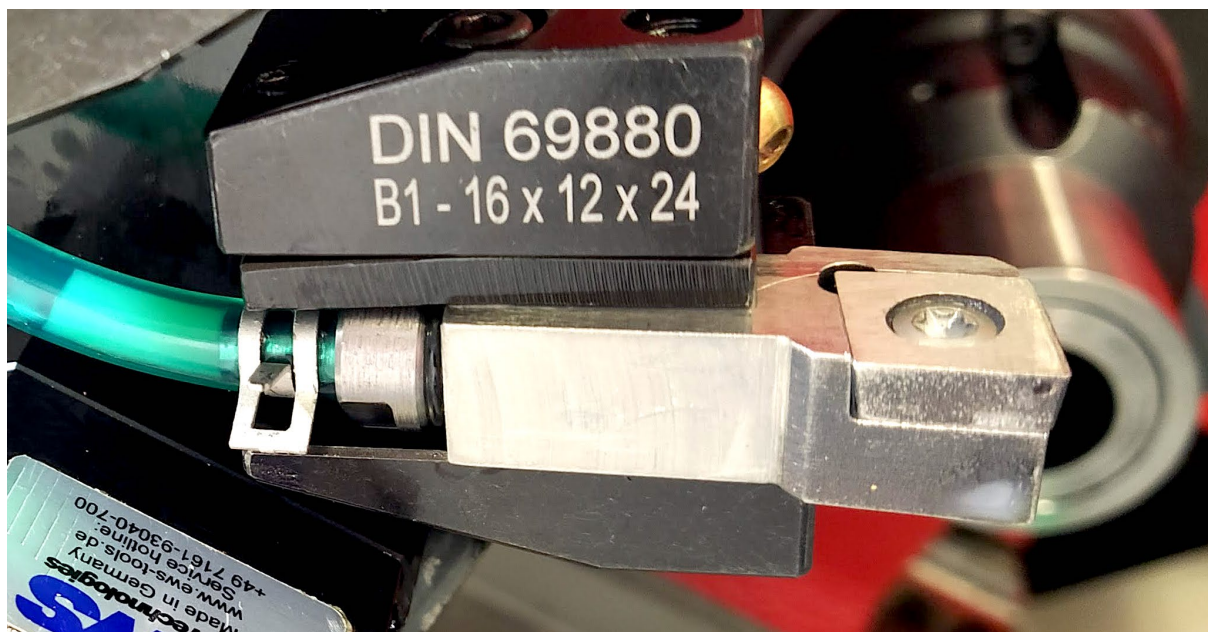
Obrázek 40 – Finální podoba spojky CPR-VDI

3.8 Zkoušky testovací verze řezného nástroje

Jak již bylo zmíněno výše, tato verze nástroje byla vytvořena především pro ověření správné funkce systému chlazení. Úvodní zkouškou bylo ověření průchodnosti kanálků pomocí stlačeného vzduchu. Nožový držák a VBD byly nejprve testovány odděleně, a oba díly byly průchozí.

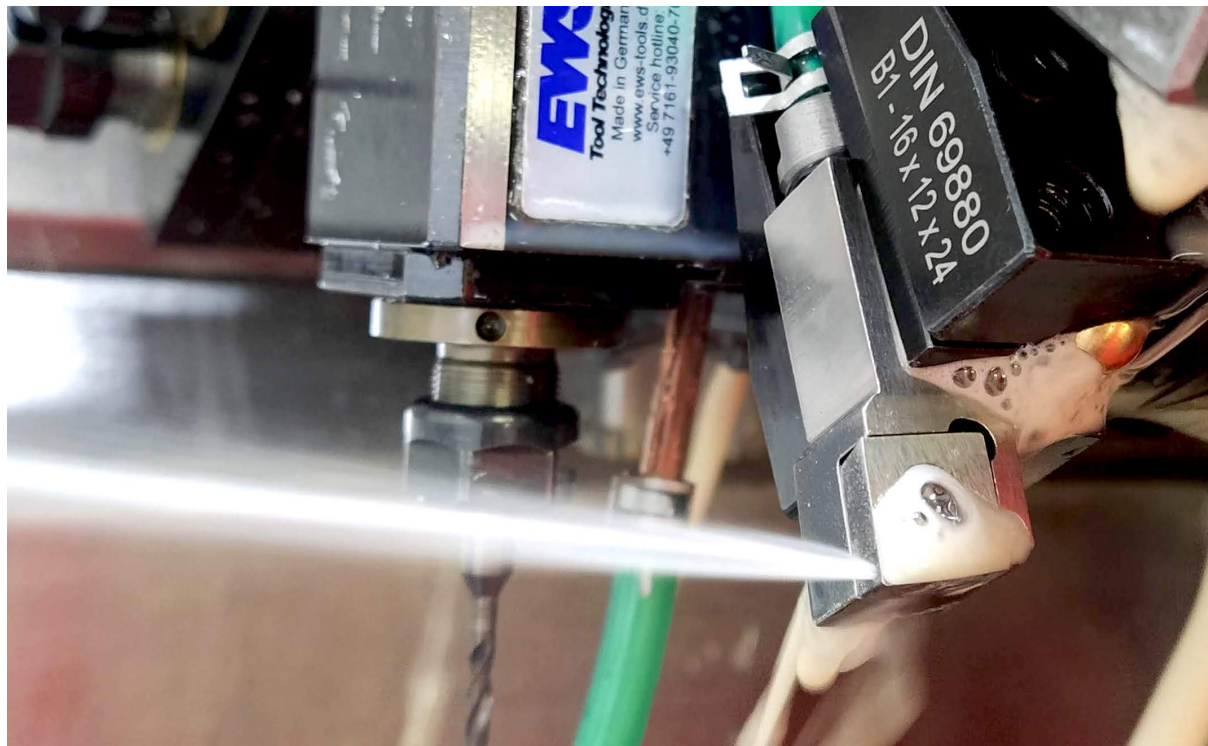
Druhým krokem bylo testování celé sestavy a při použití o-kroužku 1,3x1,1 systém kanálků průchozí nebyl. Po přeměření lůžka v nožovém držáku se ukázalo, že hloubka zahloubení pro o-kroužek je o 0,15 mm menší než hodnota na výkresu. Další měření držáku ukázalo, že tato nepřesnost byla s největší pravděpodobností způsobena nedostatečným vyrovnáním kusu při frézování lůžka. Při obrábění finální verze nožového držáku bude zahloubení vyrobeno spolu s lůžkem na jedno upnutí, vyrovnání kusu bude ověřeno obrobkovou sondou, a tím by chyba měla být eliminována. V dalším pokusu tak byl na základě těchto poznatků použit o-kroužek 1,15x1, s jeho aplikací již byl celý systém vnitřních kanálů průchozí, a tak bylo možné přistoupit k testování na stroji.

Nůž byl upnut do odpovídajícího držáku a kapalina byla přiváděna pomocí hadice o vnitřním průměru $\varnothing 4$ mm. Ke stroji byla hadice provizorně připojena přes trysku pro vnější chlazení při vrtání a spojení s nožovým držákem zajišťovala spojka CPR-ND (viz 3.7).



Obrázek 41 – Upnutí nástroje ve stroji EMCO Maxxturn 25

Jak je patrné z obrázku dole, hladicí kapalina prochází celou sestavou a spoj mezi VBD a nožovým držákem se zdá být dostatečně těsný, systém kanálků tudíž pracuje dle očekávání a je možné přestoupit k návrhu a realizaci finálního nástroje.



Obrázek 42 – Test průchodu chladicí kapaliny vnitřním systémem kanálků

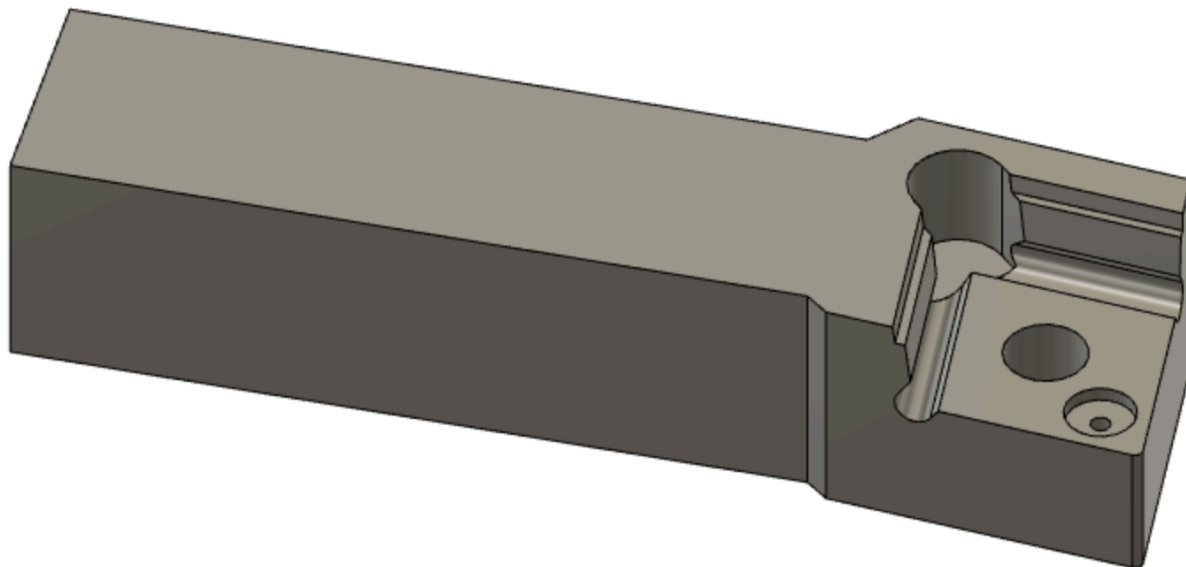
3.9 Návrh finální verze řezného nástroje

Po vyhodnocení zkoušek testovací verze nástroje bylo možné poznatky aplikovat na finální verzi nástroje. V této kapitole budou popsány základní konstrukční části nástroje.

3.9.1 Návrh nožového držáku

Nožový držák, je stejně jako testovací verze navrhován pro VBD CCMT 120404-SM a použití na stroji EMCO Maxxturn 25 proto jsou rozměry jeho upínací části 12x12 mm. Oproti testovací

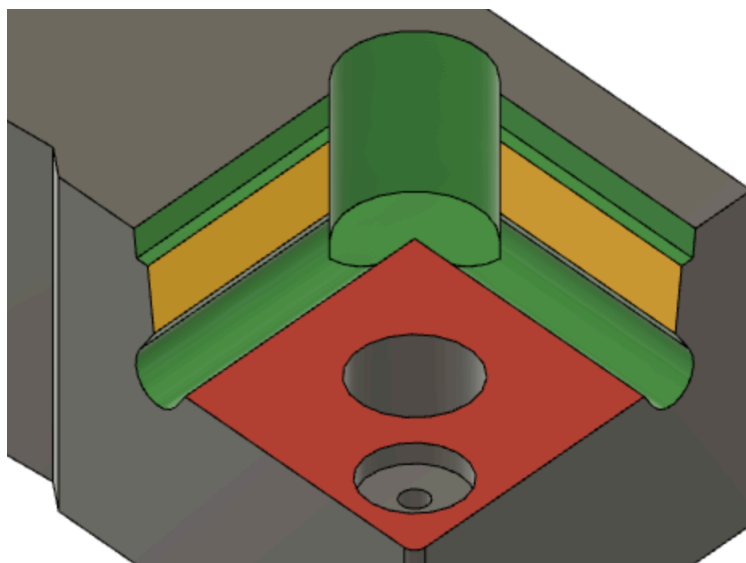
verzi nástroje se však výrazně liší, na první pohled je zřejmé zvětšení délky upínací části na 40 mm. Další podstatné prvky konstrukce jsou popsány níže.



Obrázek 43 – CAD model finální verze nožového držáku

3.9.1.1 Lůžko pro VBD

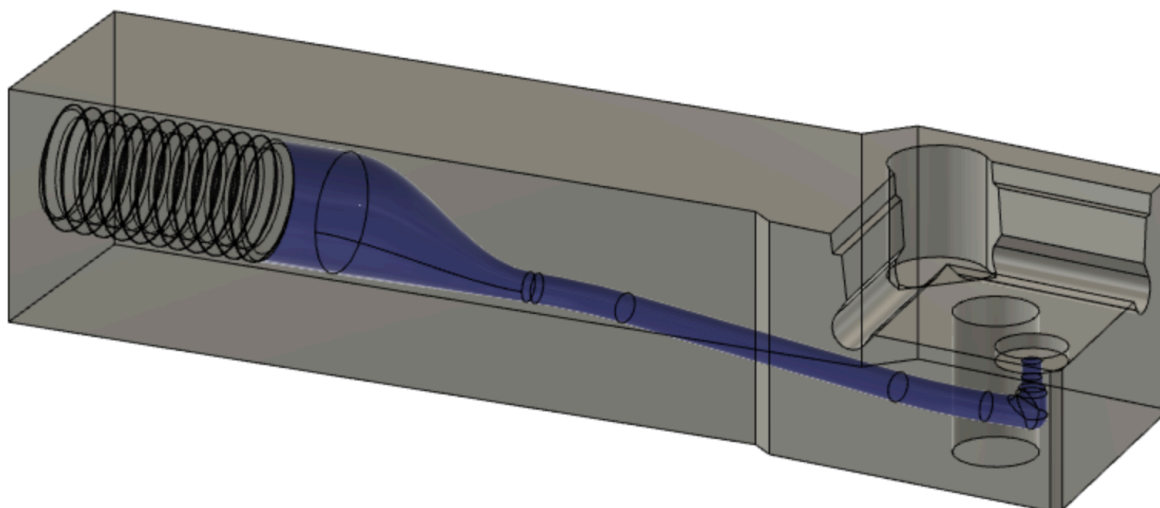
Lůžko bylo konstruováno, tak aby umožnilo realizaci tuhého a opakovatelného upnutí břitové destičky. Při konstrukci byly samozřejmě brány na zřetel technologie, které budou pro výrobu použity. Jelikož prvním krokem byla výroba polotovaru pomocí aditivní technologie, byl kladen důraz na vyrobiteľnost všech konstrukčních prvků a také minimalizaci přídavek pro obrábění. Stejně jako v předchozí variantě držáku, byl použit ověřený způsob upnutí pomocí šroubku. Po upnutí se VBD opírá o do držáku o spodní plochu a dva hřbety. Spodní a horní hrana lůžka i prostor pro špičku VBD jsou odlehčeny tak, aby bylo minimalizováno jak riziko poškození VBD při upínání, tak i riziko nepřesného upnutí vlivem nečistot (odlehčení jsou zvýrazněna zelenou barvou na obrázku dole). Všechna odlehčení jsou navržena v souladu se zásadami pro návrh dílů vyráběných pomocí aditivní technologie DMLS, kterou budou vyráběny. Střed díry pro šroubek opatřené závitem M5, je posunut o 0,1 mm směrem do lůžka, tak aby po dotažení byla VBD předepnuta o hřbety do odpovídajících dosedacích ploch lůžka (na obrázku dole značeno žlutou barvou).



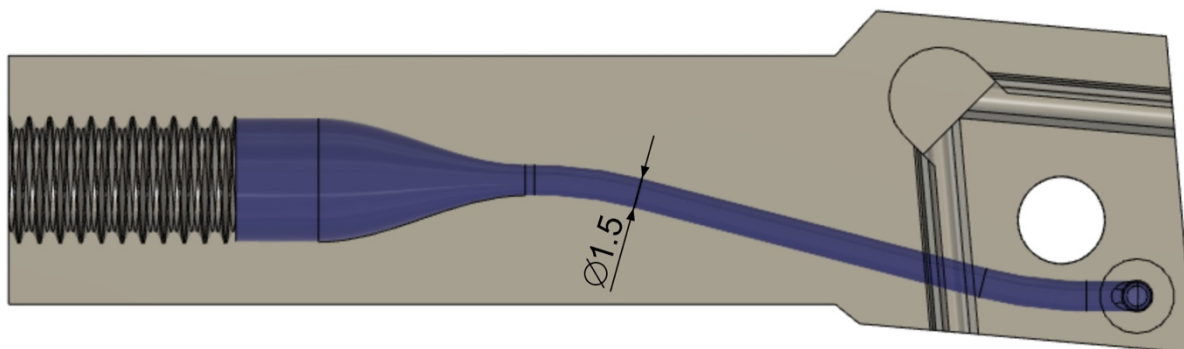
Obrázek 44 – Detail lůžka s vyznačenými došedacími plochami pro VBD (žlutá a červená) a odlehčeními (zelená)

3.9.1.2 Systém vnitřních kanálků

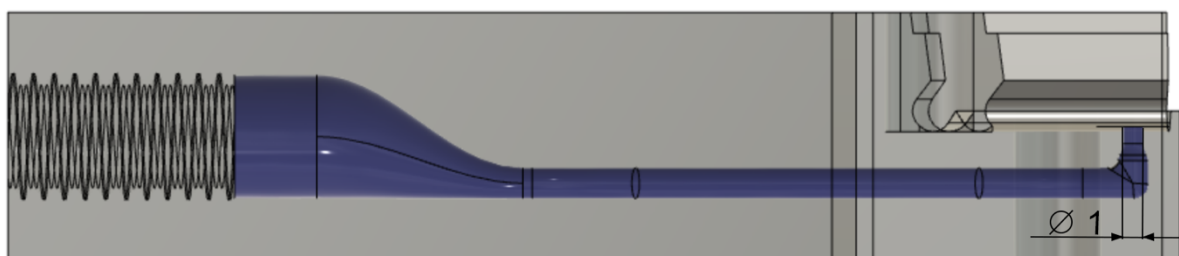
Místo připojení přívodu chladicí kapaliny bylo přímo převzato z testovací verze. Dále byl však systém rozvodu chladicí kapaliny (označeno modrou barvou na obrázcích dole) výrazně upraven a jeho podoba je dobře patrná na obrázcích dole. Cílem úpravy bylo zvětšení průřezu kanálků a minimalizaci záhybů.



Obrázek 45 – 3D pohled na systém rozvodu chladicí kapaliny



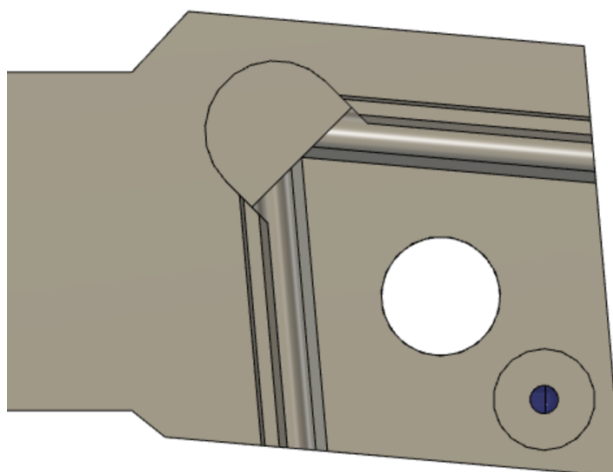
Obrázek 46 – Pohled shora na systém rozvodu chladicí kapaliny v držáku



Obrázek 47 – Pohled zleva na systém rozvodu chladicí kapaliny v držáku

3.9.1.3 Připojení systému kanálků k VBD

Oproti testovací verzi nástroje bylo místo pro připojení kanálků držáku a VBD přemístěno na přední stranu lůžka (viz obrázek dole). Pro změnu umístění bylo několik důvodů. Zaprvé, po vytvoření odlehčení lůžka nezbyvá v původním umístění dostatek prostoru. Dále pak změna umístění umožní zkrátit kanálky ve VBD, umožní více variant trajektorií a usnadní případnou tvorbu destiček se dvěma řeznými hranami.



Obrázek 48 – Pohled shora na lůžko pro VBD s modře označeným ústím systému kanálků

3.9.2 Návrh vyměnitelných břitových destiček

Navrhované vyměnitelné břitové destičky pochopitelně opět vychází z použité předlohy, tedy VBD s označením CCMT 120404-SM. Jelikož se však bude jednat o VBD určené pro dokončování materiálu Inconel 718 na stroji EMCO Maxxturn 25 bude u všech variant zmenšen

rádus špičky (r_ϵ) na 0,2 mm. Díky tomu bude s VBD možné bez problému obrábět při menších hloubkách řezu. Vytvořeny byly dvě základně koncepce lišící se systémem kanálků pro chladicí kapalinu a v nich několik odlišných variant, které budou představeny v této kapitole. Všechny varianty mají dvě výstupní trysky pro chlazení nástroje a jejich výstupní průřez byl navrhován, tak aby se jeho plocha po výrobě pokud možno blížila ploše vstupního otvoru do VBD, který má kruhový průřez od průměru $\varnothing 1$ mm.

3.9.2.1 Materiál pro výrobu vyměnitelných břitových destiček

Výroba polotovarů VBD byla samozřejmě opět realizována pomocí aditivní technologie metodou DMLS. Z materiálů pro jejichž výrobu jsou pracoviště aditivní výroby na Západočeské univerzitě vybavena je pro tuto aplikaci ideální materiál MS1. Tento materiál sice není nejvhodnější pro produktivní obrábění žárupevných slitin, ale bude možné s ním ověřit celkovou koncepci a také jej použít jako nosič pro řezný břit z jiného materiálu. Další možností je pak budoucí výroba navržených VBD v kooperaci z vhodnějšího řezného materiálu.

Pro tuto práci bylo rozhodnuto vytvořit dvě verze. Zaprvé, VBD kompletně z vytvrzeného materiálu MS1. Toto řešení by samozřejmě znamenalo výrazné omezení řezné rychlosti, jelikož si tento materiál nezachovává svou tvrdost a pevnost za vysokých teplot. Tato verze tedy bude sloužit především pro ověření koncepce, pro reálné použití bylo potřeba vyrobít VBD z jiného řezného materiálu. Zadruhé, vyrobít aditivně nosič opatřený systémem chlazení z materiálu MS1 a na něj připevnit řeznou hranu ze slinutého karbidu nebo kubického nitridu boru.

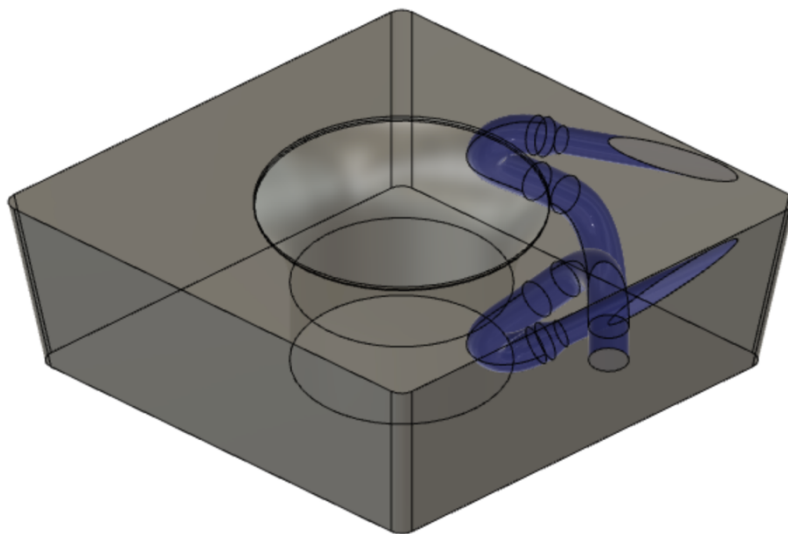
3.9.2.2 Koncepce 1 – Boční trysky

První variantou systému chlazení ve vyměnitelných břitových destičkách je použití dvou chladicích kanálků, které ústí na hlavním i vedlejším hřbetu. Navržený průřez výstupního otvoru obou trysek je kruhový o průměru $\varnothing 0,7$ mm. Pro zajištění co největší účinnosti chlazení jsou trysky jsou směřovány na řeznou hranu. Kombinace účinku obou trysek by zde teoreticky měla zajišťovat efektivní chlazení oblasti špičky VBD a jejího okolí, které budou při dokončování nejvíce tepelně i mechanicky namáhány. Přičemž právě využití bočních trysek by mělo minimalizovat zeslabení VBD v místě největšího zatížení a tím i riziko destrukce VBD. Použití trysek na hlavním i vedlejším hřbetu rovněž zabezpečí efektivní chlazení také při soustružení čela. Tato koncepce předpokládá, že v případě potřeby bude chlazení čela zajištěno standardním způsobem, tedy tryskami z držáku VDI.

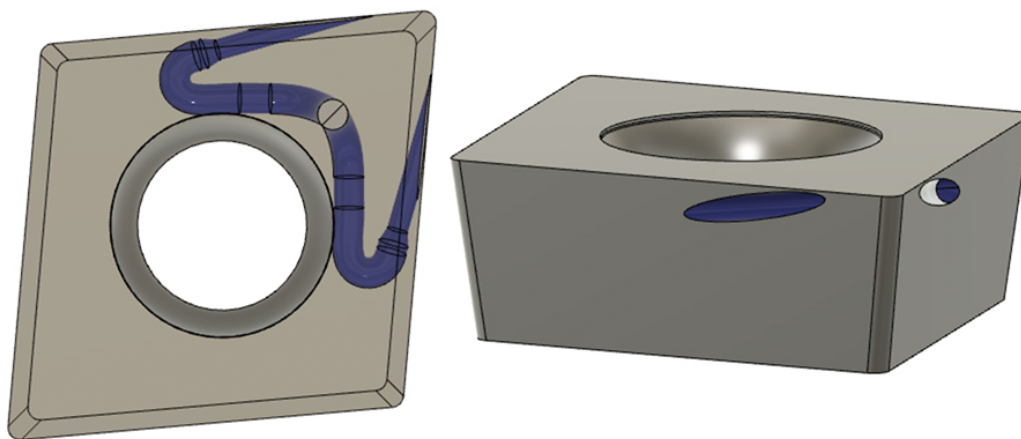
3.9.2.2.1 VBD z materiálu MS1 – Varianta A

Celá VBD bude aditivní technologií vyrobena z materiálu MS1 a vnější obrys dílu bude shodný s předlohou CCMT 120404-SM. Podoba trajektorie kanálků (na obrázcích dole jsou kanálky

modře zvýrazněny) je navrhována tak, aby bylo možné trysky co nejlépe nasměrovat na řezné hrany.



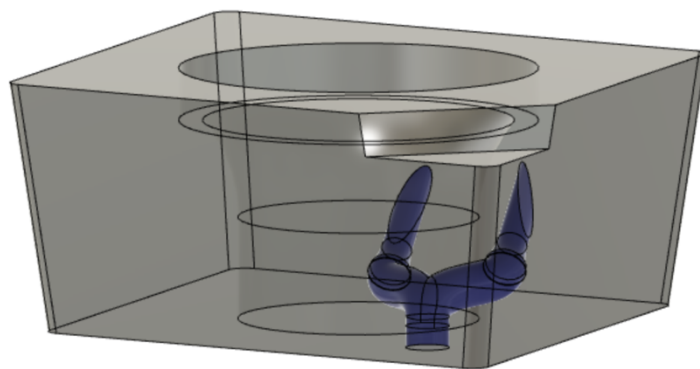
Obrázek 49 – 3D pohled na VBD s bočními chladicími kanálky



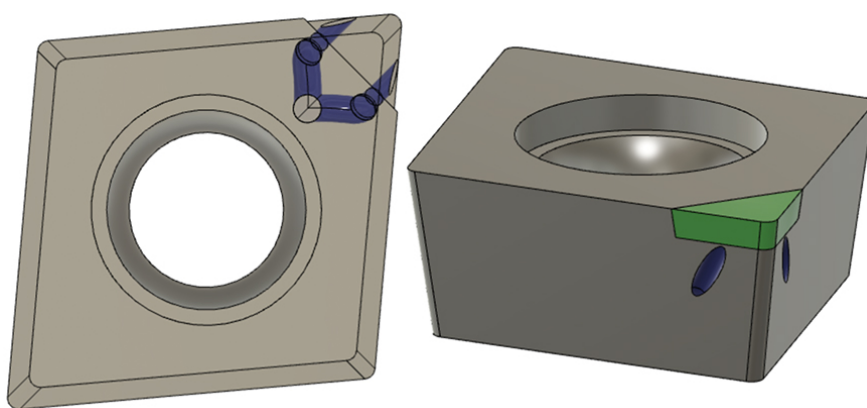
Obrázek 50 – Pohled shora na trajektorii bočních kanálků a 3D pohled na ústí kanálků

3.9.2.2.2 VBD z materiálu MS1 s připájeným břitem – Varianta B

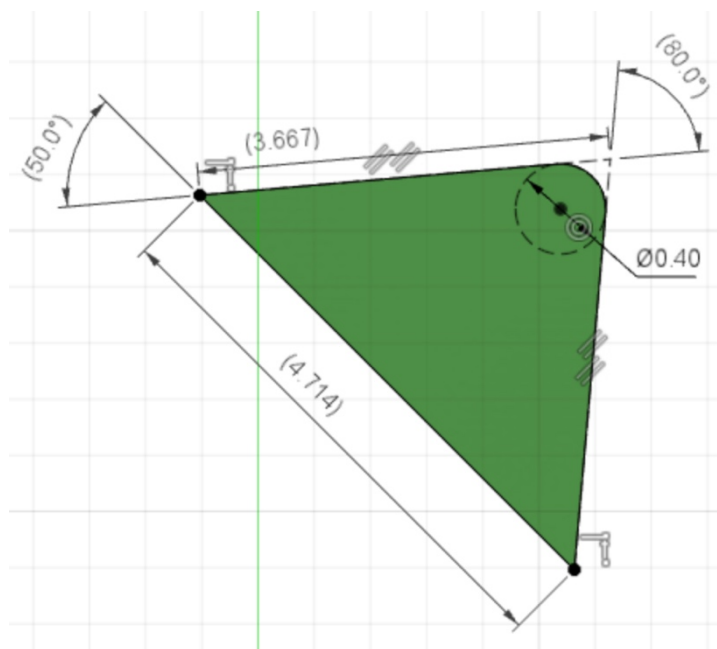
VBD z materiálu MS1 je u této varianty použita jako nosič pro břit z vhodného řezného materiálu. Konstrukce počítá s použitím břitu o tloušťce 1 mm (další rozměry břitu viz Obrázek 53) umístěným na špičce nástroje (viz Obrázek 52, kde je břit zvýrazněn zelenou barvou). Trajektorie chladicích kanálků byla upravena, tak aby jejich ústí opět směřovalo na řeznou hranu nástroje. Za účelem vytvoření vhodné trajektorie byla celá VBD zvýšena o 1 mm oproti předloze.



Obrázek 51 – 3D pohled na VBD s bočními chladicími kanálky a prostorem pro připevnění řezného břitu



Obrázek 52 – Pohled shora na trajektorii bočních kanálků a 3D pohled na ústí kanálků a připevněný řezný břit



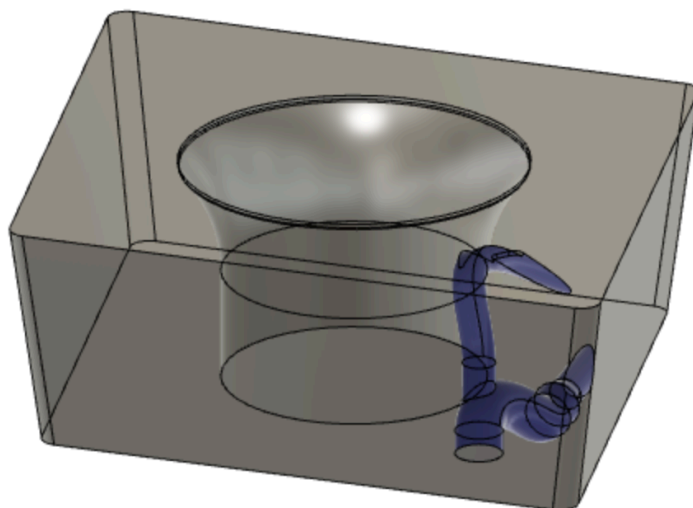
Obrázek 53 – Rozměry řezného břitu

3.9.2.3 Koncepce 2 – Trysky středem VBD

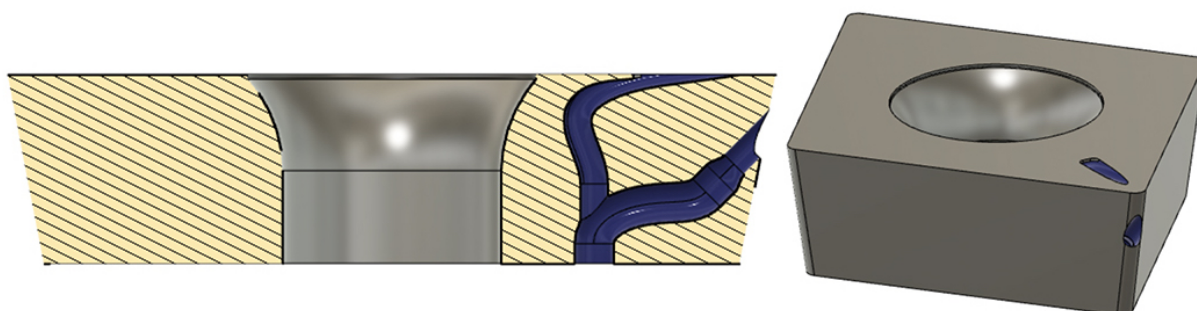
Druhá koncepce je opatřena kanálky pro chladicí médium vedenými středem VBD. Tato koncepce opět vychází z předpokladu, že nejvíce tepelně namáhaným místem při dokončovacím obrábění bude špička rezného nástroje a její těsné okolí. Chlazení je opět realizováno pomocí dvou trysek, v tomto případě však na hřbetu nástroje ústí pouze jedna, přičemž druhá zajišťuje chlazení z čela. Chladicí kanálek ústící na čele nástroje je u jednotlivých variant odlišný naproti tomu chladicí kanálek ústící na hřbetu je jednotný pro všechny varianty. Tato koncepce je tedy teoreticky z hlediska chlazení soběstačná a chlazení ze hřbetu i čela je realizováno systémem kanálků nástroje. Proud chladicího média z čela nástroje pak navíc může být přínosný pro lepší dělení třísky. Nevýhodou tohoto řešení je zeslabení VBD chladicími kanálky v místě největšího zatížení.

3.9.2.3.1 VBD z materiálu MS1 s originálními rozměry – Varianta C

První variantou je opět VBD s rozměry identickým s předlohou CCMT 120404-SM. Chladicí kanálek vystupující na čele, je tvarován, tak aby ústí chladicího kanálku pokud možno směřovalo proud chladicí kapaliny směřoval do místa řezu. Varianta C pravděpodobně není ideální z hlediska chlazení čela, ovšem z hlediska technologie výroby je nejvýhodnější.



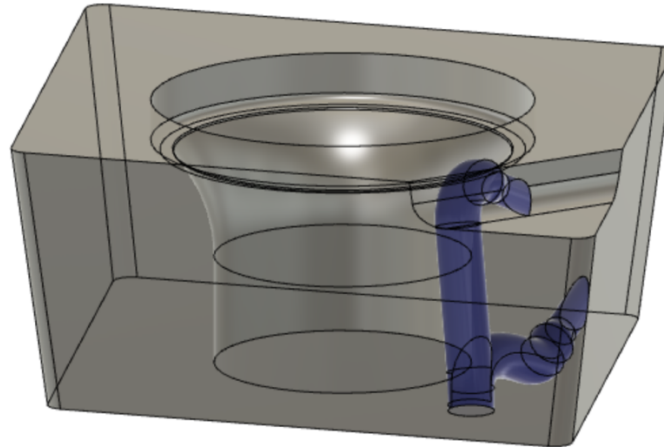
Obrázek 54 – 3D pohled na VBD s celkovou výškou 4,76 mm a kanálky vedenými středem



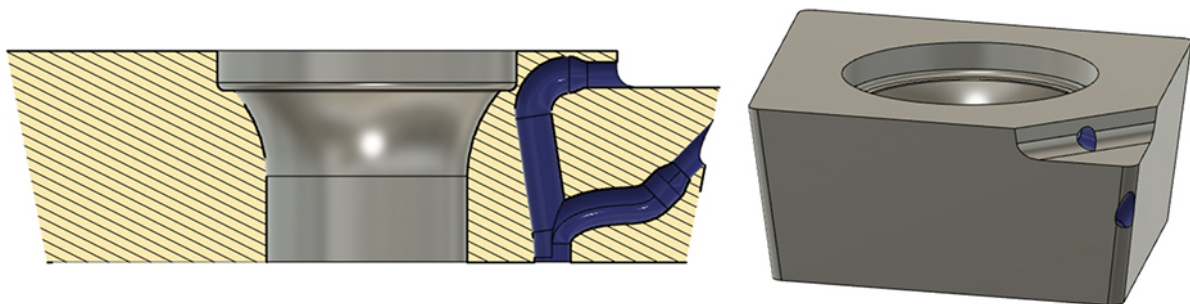
Obrázek 55 – Pohled na podobu chladicích kanálků varianty C v řezu VBD (vlevo) a na ústí kanálků (vpravo)

3.9.2.3.2 VBD z materiálu MS1 zvýšená pro chlazení čela – Varianta D

Druhá varianta VBD je oproti předloze zvýšená o 1 mm avšak vzdálenost řezné hrany od základny zůstává 4,76 mm. Tímto je vytvořen prostor plnohodnotnou trysku na čele, která proud chladicí kapaliny směřuje do místa řezu.



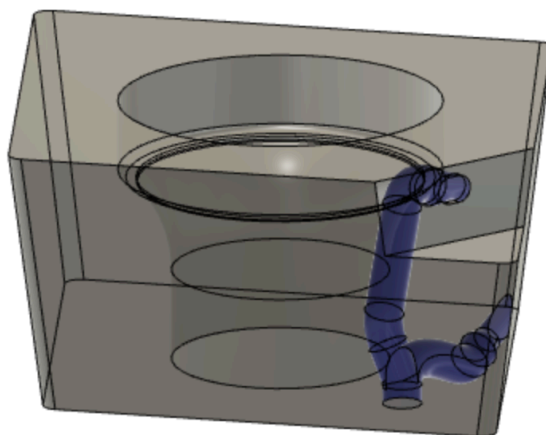
Obrázek 56 – 3D pohled na zvýšenou VBD se středovými chladicími kanálky



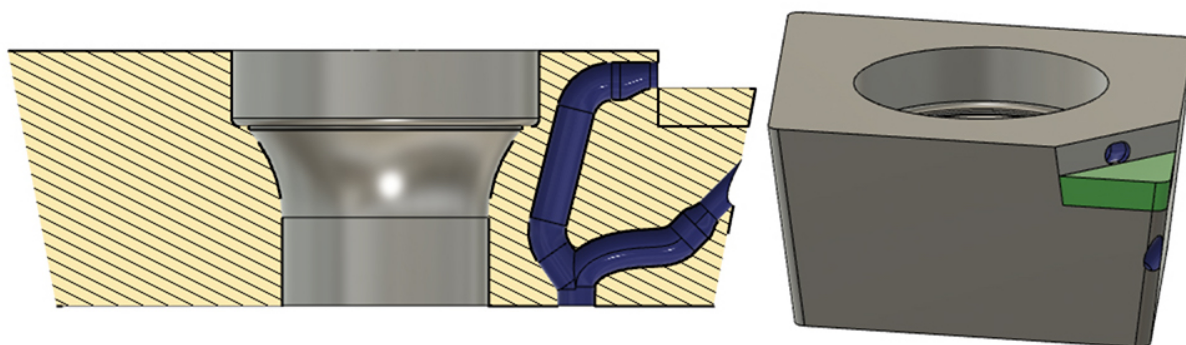
Obrázek 57 – Pohled na podobu chladicích kanálků varianty D v řezu VBD (vlevo) a na ústí kanálků (vpravo)

3.9.2.3.3 VBD z materiálu MS1 s připájeným břitem – Varianta E

Poslední varianta využívá aditivně vyrobenou VBD jako nosič pro řezný břit, který bude zhotoven z vhodnějšího řezného materiálu. Kvůli použití 1 mm tlustého řezného břitu a čelní chladicí trysky byla celková výška VBD zvětšena o 2 mm. Řezná hrana je tedy o 1 mm výše oproti předloze CCMT 120404-SM.



Obrázek 58 – 3D pohled na VBD se středovými chladicími kanálky a vybráním pro umístění rezného břítu



Obrázek 59 – Pohled na podobu chladicích kanálků varianty E v řezu VBD (vlevo) a na připravený rezný (zvýrazněno zeleně) břit a ústí kanálků (vpravo)

3.10 Příprava výroby finální verze nástroje

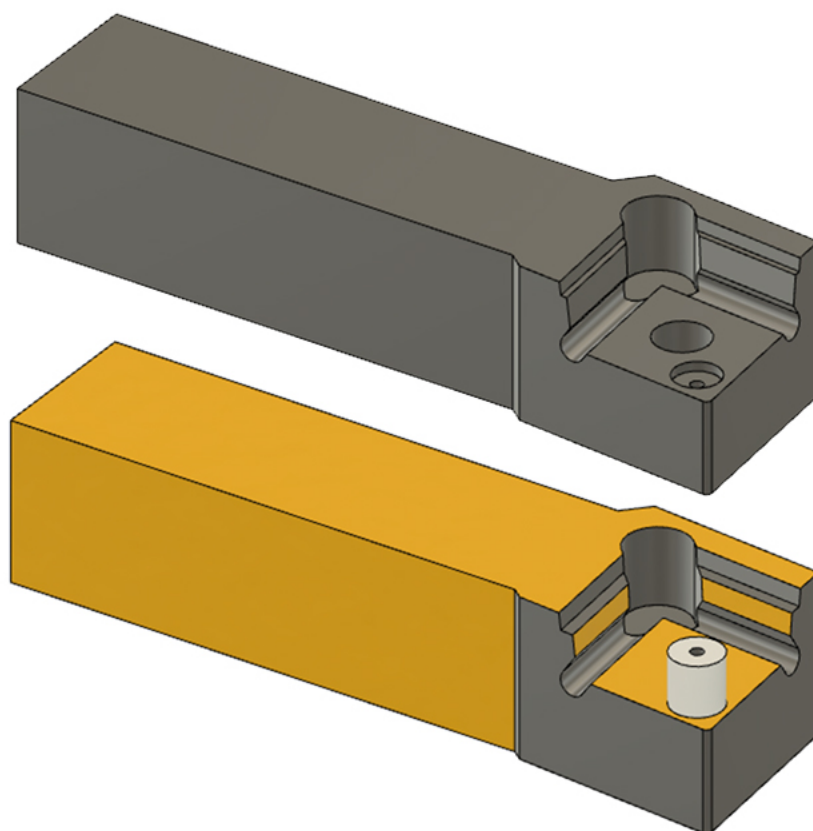
Pracovní postup přípravy výroby měl velmi podobný průběh jako v případě testovací verze nástroje, s tím rozdílem, že pro finální vytvoření tiskových dat byl použit program EOS Print 2.6.

3.10.1 Návrh polotovarů pro výrobu pomocí aditivní technologie

První fází přípravy výroby bylo vytvoření CAD modelů polotovarů dílů, tak aby je bylo možné vyrobit aditivní technologií. Tyto modely pochopitelně přímo vycházejí z finální podoby dílů popsanych v předchozí kapitole.

3.10.1.1 Úpravy modelu nožového držáku

Pro všechny plochy upínací části nožového držáku byl zvolen jednotný přídavek 0,3 mm, který se osvědčil při výrobě přechodí varianty. Výraznější pak byla úprava lůžka pro VBD. Prvotně byl pro všechny dosedací plochy zvolen přídavek 0,5 mm. Díra pro upínací šroub M5 i zahloubení pro umístění o-kroužku pak byly zcela vyplněny. V posledním kroku byl pak v přední části lůžka vytvořen technologický přídavek sloužící pro přesné zaměření kusu při dokončování lůžka. Podoba (válec o průměru $\varnothing 4$ mm a výšce 4 mm) i umístění tohoto prvku byly voleny v závislosti na později použitém doteku (kulička o průměru $\varnothing 4$ mm) obrobkové sondy, tak aby bylo kus možné zaměřit co nejpřesněji.



Obrázek 60 – Porovnání finální podoby nožového držáku (nahore) a polotovaru pro výrobu pomocí aditivní technologie (dole), plochy opatřené přídávkem označeny žlutě a technologický přídavek bíle

3.10.1.2 Úpravy modelů VBD


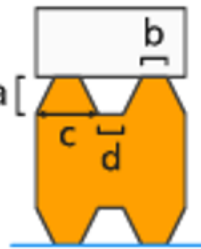

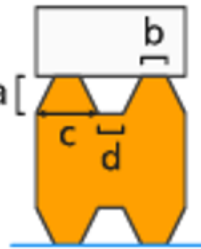
Hřbety, dosedací plochy i čela všech variant VBD byly opatřeny jednotným přídávkem 0,3 mm, který se rovněž osvědčil u testovací varianty. Zahloubení na špičce destičky bylo u odpovídajících variant vyplněno materiálem, který bude odebrán při dokončování. Varianty B a E, které jsou určeny pro připájení břitů byly připraveny i ve verzi se zaslepenými ústími chladicích kanálků, tak aby v případě pájení břitů nedošlo k jejich zanesení pájkou.

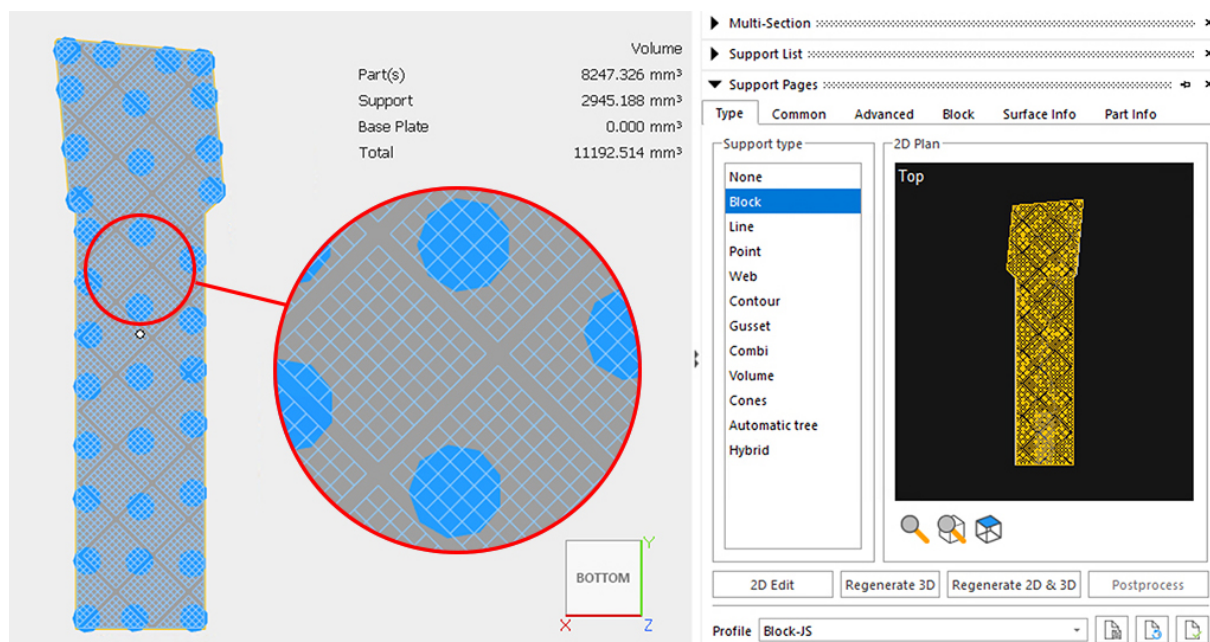
3.10.2 Příprava pro výrobu polotovarů pomocí aditivní technologie

Prvotní příprava polotovarů pro tisk probíhala stejně jako u předchozí verze, v programu Materialise Magics, orientace dílů v prostoru a plochy pro umístění podpor byly rovněž totožné s testovací verzí nástroje. Díly byly umístěny do vzdálenosti 4,2 mm (ve směru osy Z) od stavěcí platformy a s ní spojeny pomocí podpůrných struktur. Jako hlavní byla použita bloková podpora doplněná na strategických místech o podpory kuželové ($\varnothing 1$ mm v místě připojení podpory k dílu a $\varnothing 1,4$ mm v místě připojení ke stavěcí platformě). Parametry podpůrných struktur jsou shodné pro všechny vyráběné díly.

Tabulka 11 – Základní parametry použité blokové podpory

Název prvku	Název parametru	Hodnota	Obrázek
Hatching	X hatching (a)	0,5 mm	

	Y hatching (b)	0,5	mm	
	Rotation angle (c)	45	°	
Hatching teeth	Height (a)	0,8	mm	
	Top length (b)	0,35	mm	
	Base length (c)	0,6	mm	
	Base interval (d)	0,1	mm	
Fragmentation	X interval (a)	5	mm	
	Y interval (b)	5	mm	
	Separation width (c)	0,5	mm	
Border teeth	Height (a)	1	mm	
	Top length (b)	0,35	mm	
	Base length (c)	0,6	mm	
	Base interval (d)	0,1	mm	

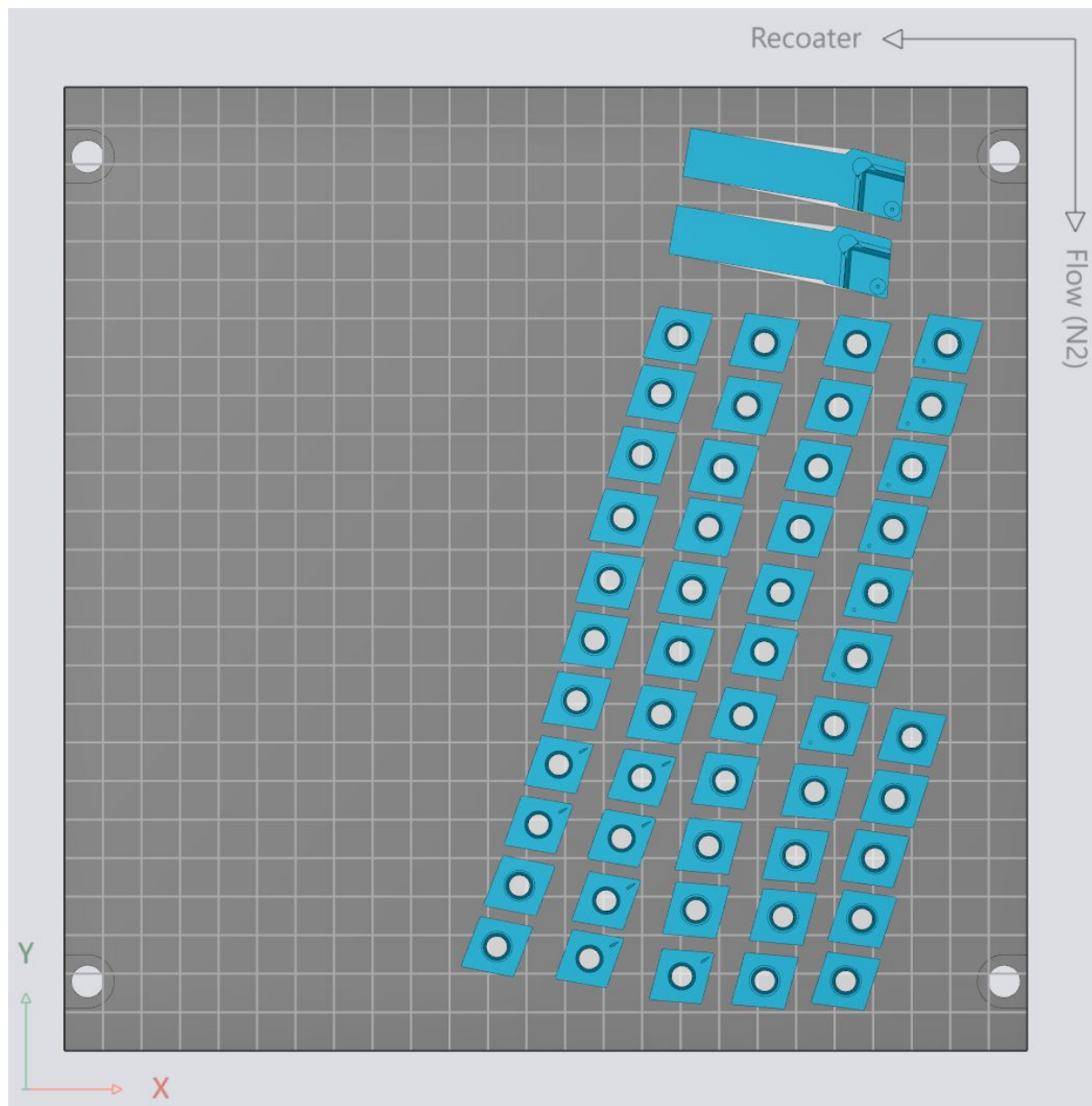


Obrázek 61 – Pohled na podpůrné struktury nožového držáku v programu Materialise Magics

Dalším krokem byla vlastní příprava tiskového souboru v programu EOS Print 2.6. Byl zvolen tiskový materiál (ocel MS1) a výška vrstvy (0,04 mm). Jednotlivým prvkům byla přiřazena odpovídající sada expozičních parametrů, které jsou pro jednotlivé prvky předdefinovány výrobcem. Následovalo vhodné naorientování všech dílů na tiskové platformě (viz 2.2.1.3.1 Orientace dílu v tiskovém prostoru). V posledním kroku byl tiskový soubor odeslán do výrobního stroje, tak aby mohl být spuštěn proces tisku.

Tabulka 12 – Expoziční parametry jednotlivých prvků

Prvek	Sada expozičních parametrů
Díl	EOS_DirectPart 0.040mm
Blokové podpory	EOS_ExternalSupport 0.040mm
Kuželové podpory	EOS_DirectTool 0.040mm



Obrázek 62 – Rozmístění a orientace všech dílů na stavěcí platformě

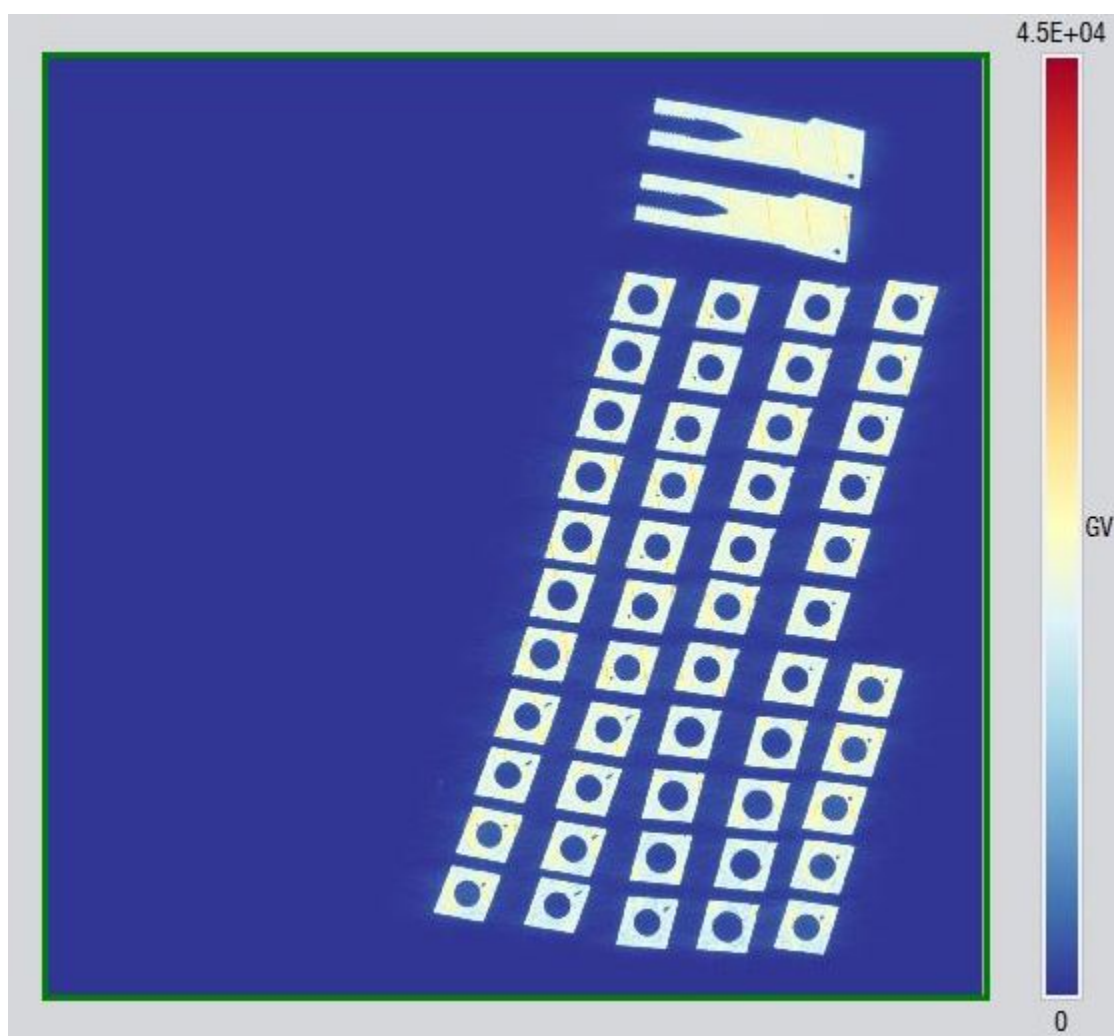
3.11 Výroba finální verze nástroje

3.11.1 Výroba polotovarů pomocí aditivní technologie

Celý proces výroby polotovarů trval 8 hodin a 48 minut, byl monitorován systémem EOSTATE Exposure OT (viz Obrázek 63) a proběhl bez problému. Na záznamu z monitorování nebyly patrné žádné defekty nebo extrémně přehřátá místa. Po vyjmutí stavěcí platformy ze stroje bylo provedeno tepelné zpracování celé platformy (žíhací proces dle doporučení výrobce). Následovalo oddělení všech dílů od stavěcí platformy pomocí pásové pily a proces vytvrzení vybraných dílů. Ve vyžíhaném stavu byly ponechány pouze nožové držáky a čtyři VBD, které jsou určeny pro pozdější nanesení tenké vrstvy. Vytvrzené díly vykazovali tvrdost 53 HRC.

Tabulka 13 – Přehled vyrobených dílů

Název	Počet kusů
Nožový držák	2
VBD – Varianta A	7
VBD – Varianta B	14
VBD – Varianta C	7
VBD – Varianta D	7
VBD – Varianta E	14



Obrázek 63 – Záznam z monitorovacího systému EOSTATE Exposure OT z vrstvy ve výšce 9,12 mm



Obrázek 64 – Vyrobené díly připravené k odříznutí

3.11.2 Postprocessing dílů

Odstranění podpůrných struktur probíhalo standardním způsobem, tedy pomocí svěráku, sekáče a kladiva. Po odsekání podpor bylo potřeba srazit hranu VBD, tak aby nepřekážela při následném dokončování. Toto bylo provedeno pomocí diamantového pilníku. Průměrná doba postprocessingu jedné VBD tak činí přibližně 4 minuty. Postprocessing nožového držáku pak zabral přibližně 7 minut.



Obrázek 65 – Odstraňování podpůrných struktur z nožového držáku

3.11.3 Dokončení nožového držáku

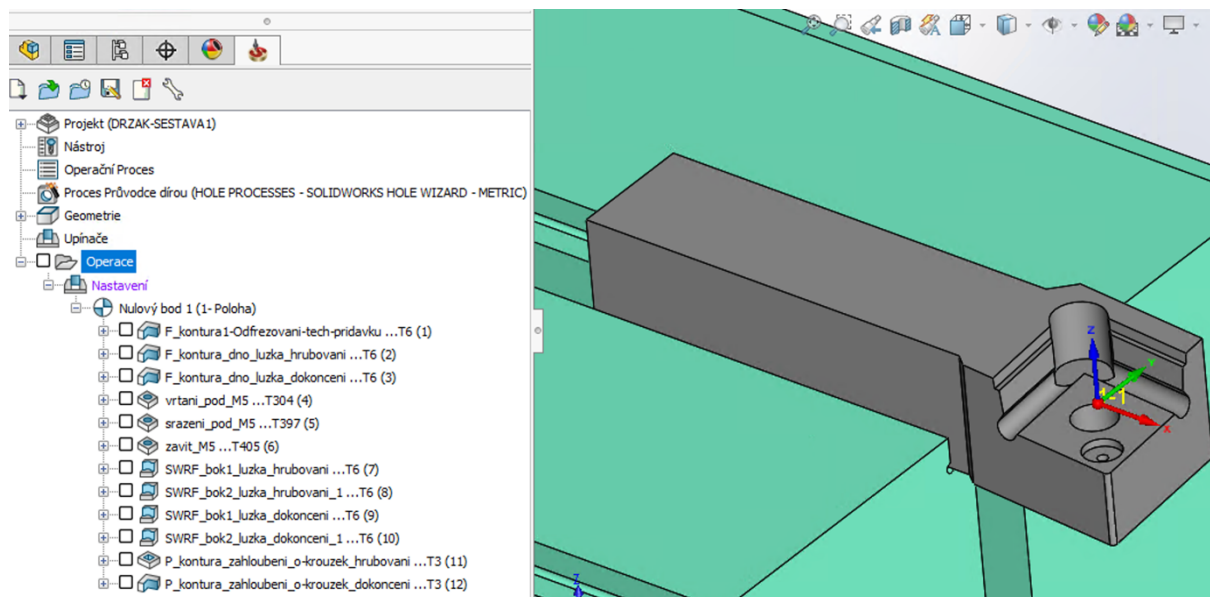
Polotovar nožového držáku vyrobený pomocí aditivní technologie bylo potřeba před použitím dokončit třískovým obráběním. V první fázi se jednalo o rovinné broušení dosedací a horní plochy nožového držáku, tak aby výsledný rozměr činil požadovaných 12 mm. Druhou fází pak bylo obrobení zbývajících přídavek na 5osé frézce.

V prvních třech operacích byly dokončeny zbývající plochy upínací části držáku. Boční plochy byly obrobeny čelní frézou o průměru $\varnothing 50$ mm s poloměrem zaoblení špičky 2 mm. Použití frézy s tímto zaoblením špičky, zajišťuje dostatečně plynulý přechod (bez koncentrátoru napětí) mezi upínací a lůžkovou částí držáku. Následně byla dokončena zadní plocha upínací části bokem monolitní frézy o průměru $\varnothing 12$ mm.

Nyní mohlo následovat upnutí nástroje za boční plochy a dokončení lůžka pro VBD. Pozice obrobku v osách X a Y byla zaměřena obrobkovou sondou pomocí válcového technologického přídávku. Pozice v ose Z je určena horní broušenou plochou polotovaru. Následující obráběcí program byl vytvořen v softwaru SolidCAM a obrábění probíhalo na stroji DMU 40 eVo linear.

Tabulka 14 – Přehled operací dokončení lůžka pro VBD

Operace	Nástroj	Řezná rychlost	Posuv
Odstranění technologického přídávku	Fréza D5 r0.05 L13 z4	200 m/min	0,07 mm/z
Hrubování dna lůžka	Fréza D5 r0.05 L13 z4	150 m/min	0,05 mm/z
Dokončení dna lůžka	Fréza D5 r0.05 L13 z4	200 m/min	0,03 mm/z
Vrtání pod M5	Vrták D4.2	100 m/min	0,06 mm/z
Sražení pod M5	Záhlubník D6 x 90	56 m/min	0,1 mm/z
Závitování M5	Závitník M5	120 ot/min	0,8 mm/ot
Hrubování šikmých stěn bokem nástroje	Fréza D5 r0.05 L13 z4	150 m/min	0,04 mm/z
Dokončení šikmých stěn bokem nástroje	Fréza D5 r0.05 L13 z4	200 m/min	0,02 mm/z
Hrubování zahloubení pro o-kroužek	Fréza D3 r0.05 L12 z4	169 m/min	0,03 mm/z
Dokončení dna zahloubení pro o-kroužek	Fréza D3 r0.05 L12 z4	169 m/min	0,02 mm/z



Obrázek 66 – Screenshot z programu pro dokončení držáku VBD ze softwaru SolidCAM



Obrázek 67 – Obrobený držák VBD

3.11.4 Dokončení VBD

Proces dokončení břitových destiček probíhal na třech strojích. V první řadě byla čela VBD a jejich dosedací plochy zbrušeny na rovinné brusce. Drhou fází procesu dokončení bylo obrobění otvoru pro upínací šroub a odebrání materiálu na špičce odpovídajících variant VBD na frézce. Následující fází procesu byly úpravy jednotlivých variant VBD před finální operací. Jednalo se o připájení řezných břitů (varianty B a E) a laserové zpracování řezné části čela (varianty A, C a D). Dále byly dokončeny hřbety a čela VBD na 5osé brusce. V posledním kroku pak byly vybrané VBD omlety s použitím zařízení OTEC DF 3.

3.11.4.1 Rovinné broušení

VBD byly broušeny po skupinách o stejné požadované výšce. V první operaci byly VBD upnuty na magnetický stůl za čelní plochy a broušeny byly jejich dosedací plochy, tak aby byly odstraněny zbytky podpor a vznikla rovinná plocha. Následně byly VBD upnuty za dosedací plochy a čela byla zbroušena na požadovaný rozměr. U variant A a C byl na čele ponechán přídavek 0,1 mm pro případné finální dokončení. Poslední operací bylo zbroušení dosedacích ploch na finální rozměr.



Obrázek 68 – Obroušená čela VBD (varianta E)

3.11.4.2 Dokončení na frézce

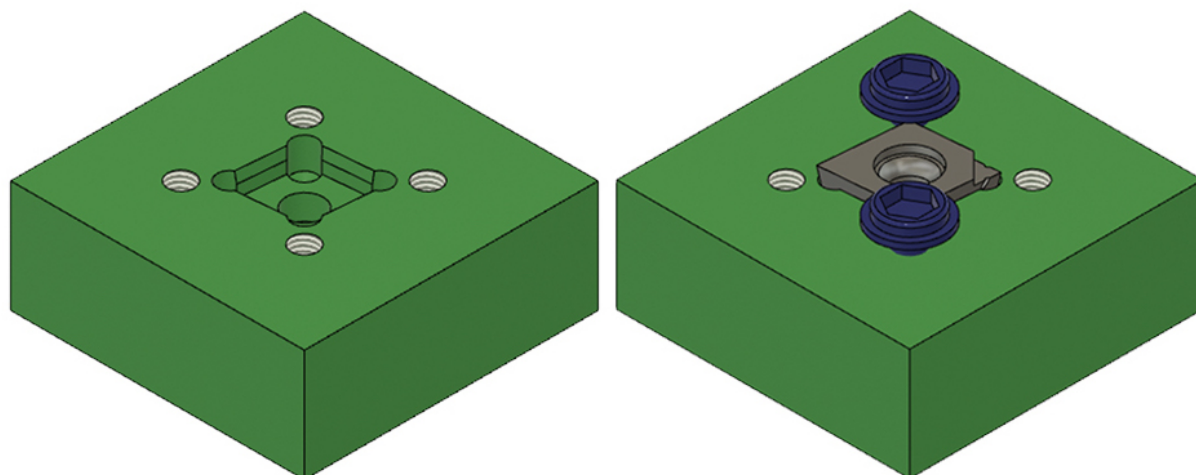
Druhým krokem procesu bylo frézování zahlabení na špičce VBD u variant B, D a E a dokončení otvoru pro upínací šroub pomocí speciálního záhlubníku u všech variant. Nejprve však bylo potřeba zajistit upnutí VBD do stroje, které je řešeno pomocí přípravku.

3.11.4.2.1 Přípravek pro upnutí VBD

Pro realizaci rychlého a spolehlivého upnutí VBD při jejich obrábění na frézovacím centru DMU 40 eVo linear byl vytvořen ocelový přípravek.

3.11.4.2.1.1 Konstrukce přípravku

Podoba VBD po rovinném broušení byla vtisknuta do kostky vhodných rozměrů, tak aby plocha čela VBD byla 1 mm nad horní plochou kostky. Následovalo odlehčení rohů vzniklého otvoru dírami o průměru $\varnothing 4,2$ mm. Střed lůžka byl odlehčen otvorem o průměru $\varnothing 5,8$ mm, tak aby byl při zaměřování kusu dostatek prostoru pro dotek obrobkové sondy. Odlehčení pro dosedací plochu VBD bylo vyřešeno odebráním šikmých stěn, tak aby vznikly 2 mm vysoké stěny svírající se dnem lůžka úhel 90° . Pro připevnění obrobku byly vytvořeny 4 díry pro šroub M5 v takové vzdálenosti od hrany, aby bylo možné VBD přitáhnout pomocí šroubů ISO 7380FL. V posledním kroku byly boční stěny, určené pro dosednutí hřbetů VBD odsazeny o 0,02 mm, tímto byl otvor zvětšen a mělo by být zaručeno ideální dosednutí všech kusů.



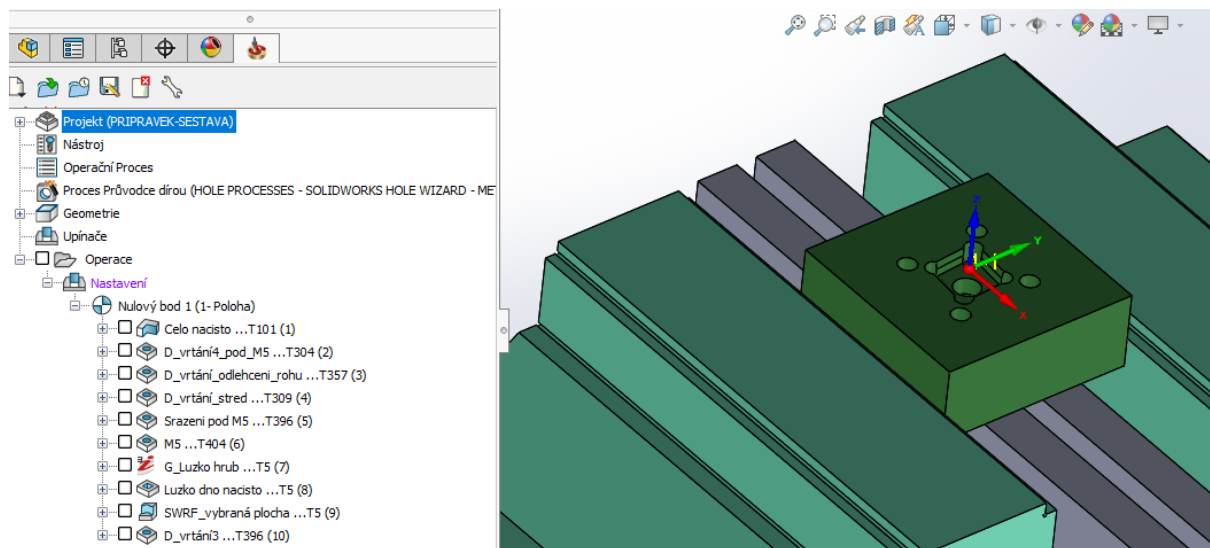
Obrázek 69 – Navržený přípravek pro dokončení VBD

3.11.4.2.1.2 Výroba přípravku

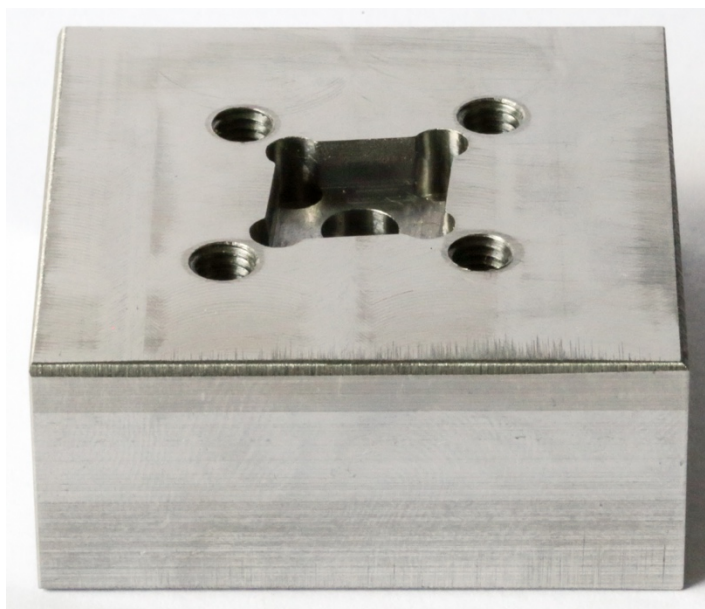
Program pro výrobu přípravku byl připraven v softwaru SolidCAM a je určen pro uplatnění na stroji DMU 40 eVo linear. Jako polotovar byla zvolena zúhlovaná kostka z oceli C45 o rozměrech 47x47x21 mm.

Tabulka 15 – Přehled operací pro výrobu přípravku

Operace	Nástroj	Řezná rychlost	Posuv
Srovnání čelní plochy	Fréza D20 r2 L10 z3	250 m/min	0,15 mm/z
Vrtání pod M5	Vrták D4.2	100 m/min	0,05 mm/z
Vrtání odlehčení rohů	Vrták D4.2	100 m/min	0,05 mm/z
Vrtání odlehčení středu	Vrták D5.8	100 m/min	0,06 mm/z
Sražení pod M5	Záhlubník D12 x 90	56 m/min	0,1 mm/z
Závitování M5	Závitník M5	120 ot/min	0,8 mm/ot
Hrubování lůžka (iMachining)	Fréza D4 r0.05 L11 z4	170 m/min	5490 mm/min
Dokončení dna lůžka	Fréza D4 r0.05 L11 z4	200 m/min	0,03 mm/z
Frézování šikmých stěn bokem nástroje	Fréza D4 r0.05 L11 z4	200 m/min	0,03 mm/z
Sražení odlehčení ve středu	Záhlubník D12 x 90	56 m/min	0,1 mm/z



Obrázek 70 – Screenshot z programu pro výrobu přípravku ze softwaru SolidCAM



Obrázek 71 – Dokončený přípravek pro upnutí VBD

3.11.4.2.2 Záhlučník pro obrobení otvoru pro šroubek

Pro zajištění přesného a opakovatelného upnutí břitové destičky bylo potřeba dokončit díru pro šroubek ve VBD. Pro dokončení byl vytvořen speciální nástroj s kuželovou řeznou částí. Přičemž jeho úhel (44°) je shodný s úhlem kuželu na použitých upínacích šroubech od výrobce Iscar. Tento speciální záhlučník je opatřen čtyřmi zuby ve šroubovici a vybroušen ze slinutého karbidu. Přesné rozměry vyrobeného nástroje, které jsou důležité pro volbu správné hloubky obrábění, byly změřeny na zařízení Zoller Genius 3s.

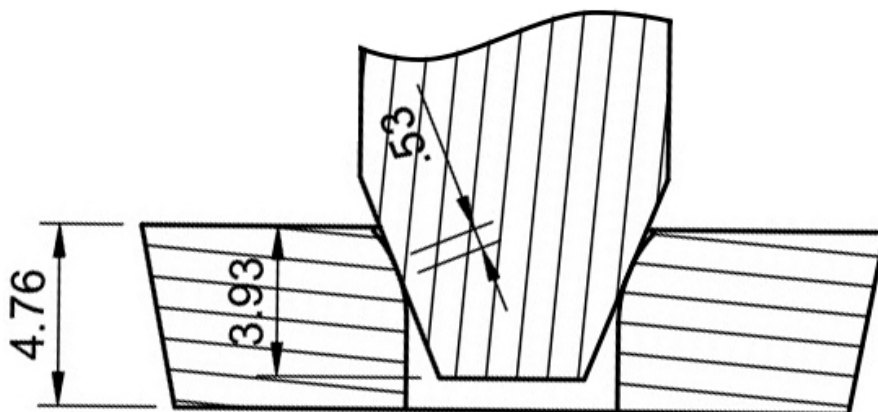


Obrázek 72 – Výsledná podoba nástroje

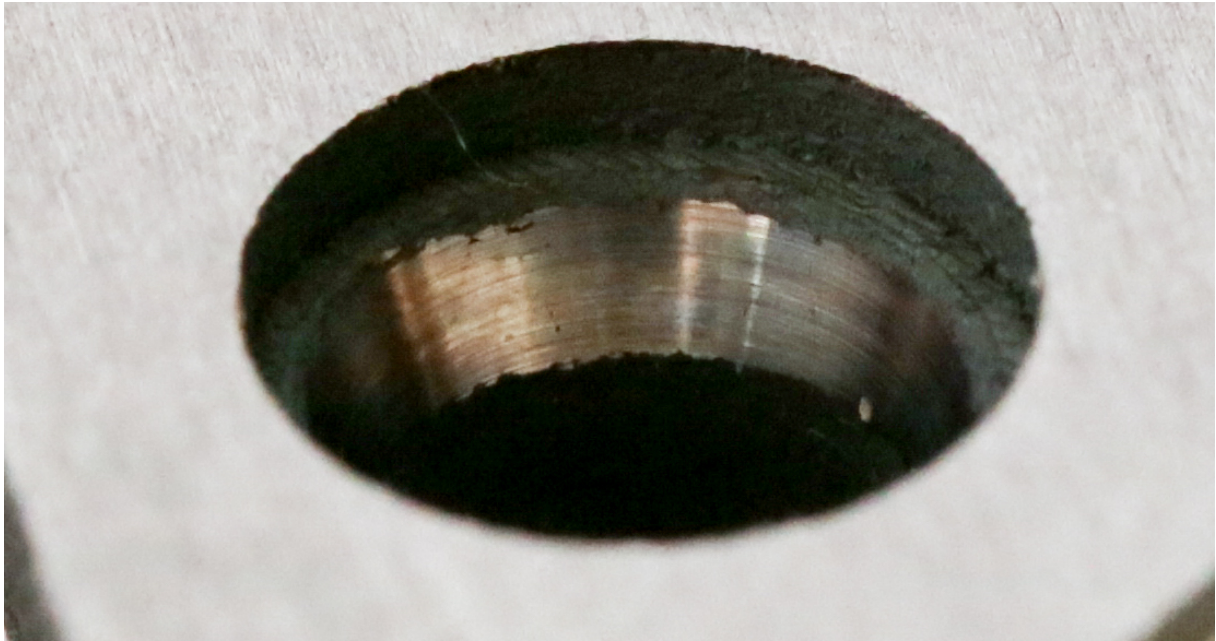
3.11.4.3 Obrábění VBD

Břitové destičky byly postupně upínány do přípravku. Každý kus byl zaměřen pomocí obrobkové sondy, přičemž jako reference byla použita válcová část otvoru pro šroubek. Následovalo dokončení místa pro dosednutí šroubku. Hloubka obrábění byla zvolena, tak aby v otvoru vnikla kuželová plocha o výšce přibližně 0,5 mm (například pro VBD o výšce 4,76 mm tak byla zvolena hloubka 3,93 mm). Po zkouškách na prvních kusech bylo zjištěno, že pro tuto operaci jsou vhodné následující podmínky:

- Otáčky – 1500 ot/min
- Posuvová rychlost – 200 mm/min
- Výdrž na maximální hloubce – 2 s



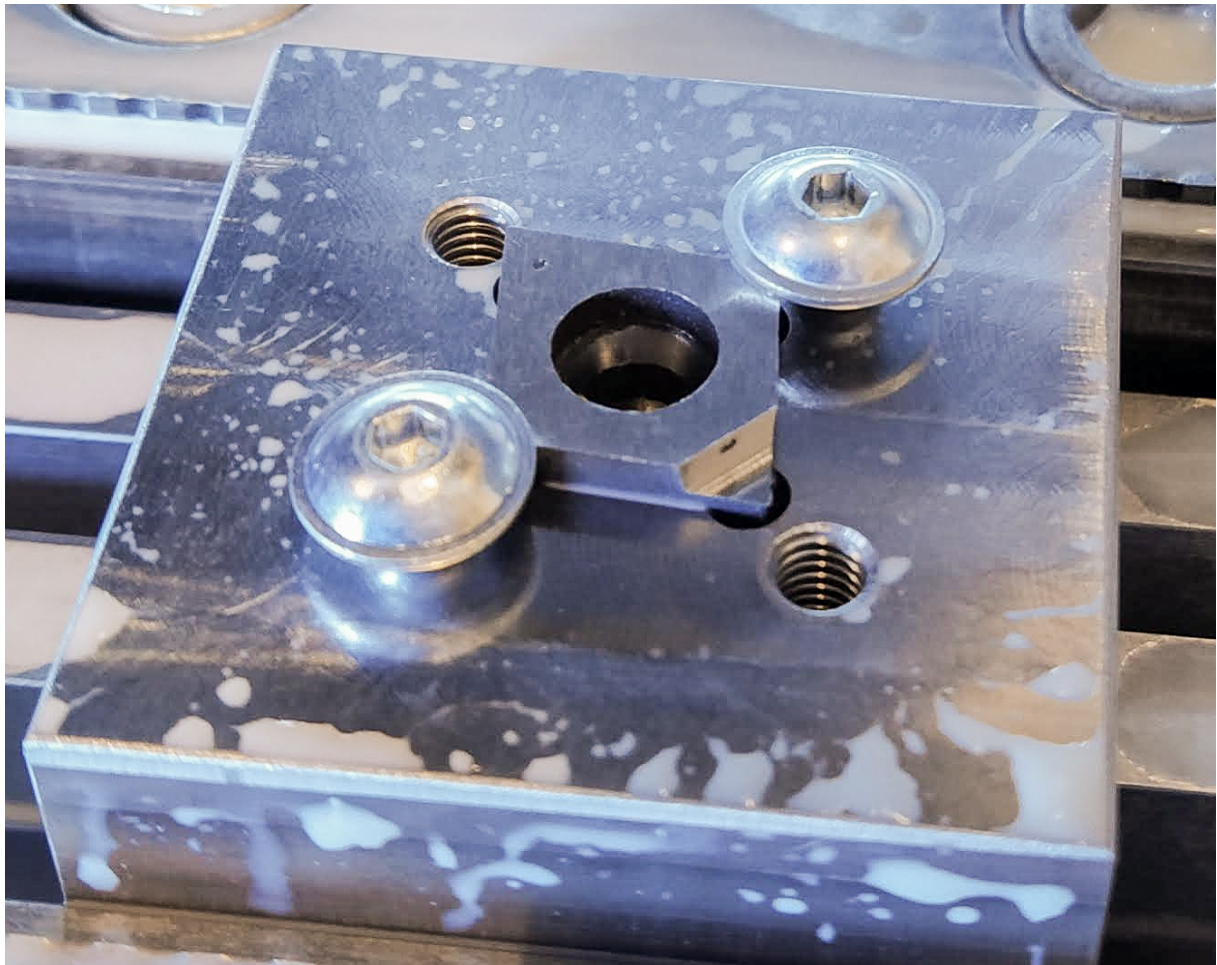
Obrázek 73 – Návrh zahloubení VBD o výšce 4,76 mm



Obrázek 74 – Detail výsledného zahloubení u VBD varianty B

U variant B, D a E následovalo odebrání materiálu na špičce nástroje. Tato operace byla realizována monolitní frézou ze slinutého karbidu o průměru $\varnothing 4$ mm při těchto řezných podmínkách:

- Řezná rychlost – 200 m/min
- Posuv – 0,04 mm/z pro hrubování a 0,02 mm/z pro dokončení
- Hloubka řezu – 0,15 mm pro hrubování a 0,05 mm pro dokončení



Obrázek 75 – VBD (varianta E) těsně po obrobení

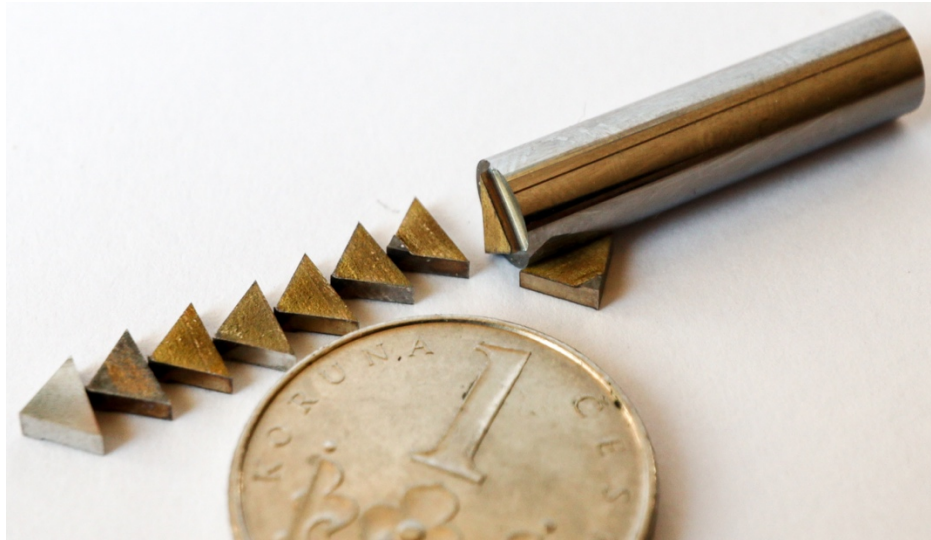
3.11.4.4 Pájení řezných břitů

Řezné břity pro varianty B a E byly vytvořeny z válcového roubíku ze slinutého karbidu s označením CTS20D od společnosti Ceratizit. Jedná se o submikronový substrát, který je podle výrobce vhodný pro obrábění slitin na bázi niklu.

3.11.4.4.1 Příprava polotovarů břitů

Z válcového roubíku byl nejprve na brusce ANCA MX7 vybroušen hranol o výšce 15 mm s trojúhelníkovou základnou pasující do vybrání pro řezný břit ve VBD s dostatečným přídavkem. Tento hranol byl následně elektroerozivně nařezán na plátky o výšce 1,3 mm. Finální výška břitů po broušení bude přibližně 1 mm. Přídavek 0,3 by tak měl být dostatečný pro obroušení vrstvy, která může po elektroerozivním řezání potenciálně obsahovat mikro trhliny. [47] Dosedací plochy těchto plátků byly začištěny na diamantovém brousku, kvůli zajištění

spojení pájky se substrátem a jejich zadní hrany sraženy diamantovým pilníkem, tak aby ideálně dosedly do připraveného lůžka ve VBD.



Obrázek 76 – Připravené polotovary řezných břitů

3.11.4.4.2 Proces pájení

Pro pájení řezných břitů byla použita pájka Ternalloy 444 a tavidlo F16 od výrobce Saldflux. Připojované povrchy byly nejprve očištěny mechanicky diamantovým pilníkem a poté chemicky pomocí odmašťovače na automobilové brzdy Würth – UNI RAPID. Následně bylo na odpovídající povrchy nanесeno tavidlo a břit byl volně vložen do připraveného lůžka. Poté bylo započato rovnoměrné zahřívání dílů plynovým hořákem Rothenberger – ROFIRE Piezo 1950 s propan-butanovou kartouší MULTIGAS 300 na teplotu 675 – 735°C a při dosažení požadované teploty byla přidána pájka. Díl byl ještě asi 1 minutu prohříván, tak aby pájka vyplnila celý spoj. Negativním efektem procesu pájení bylo snížení tvrdosti nosiče z oceli na 35 HRC.



Obrázek 77 – Proces pájení břitu ze slitutého karbidu



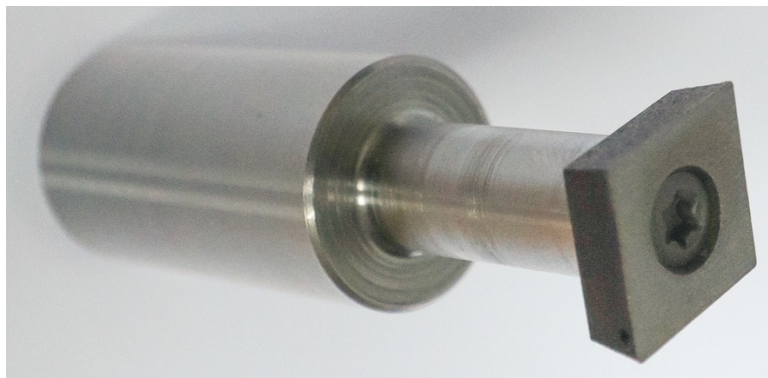
Obrázek 78 – Variant B s připájeným břitem ze slinutého karbidu

3.11.4.5 Dokončení hřbetů na 5 osé brusce

Posledním krokem procesu dokončení VBD bylo obrobení hřbetů a čel. Tyto operace byly provedeny na brusce ANCA MX7, která je určena pro výrobu nástrojů a disponuje pěti souvisle řízenými osami.

3.11.4.5.1 Upnutí VBD do stroje

Upínání obrobků do brusky ANCA MX7 je řešeno pomocí kleštinového upínače. Stroj je tedy připraven pro upínání válcových dílů, přičemž požadovaná tolerance upínací části je h6. Pro upnutí VBD tedy musel být vytvořen vhodný přípravek (viz Obrázek 79). Jedná se o ocelovou hřídel s upínací částí broušenou mezi hroty na rozměr $\varnothing 20\text{h6}$. Odpovídající čelo přípravku je opatřeno závitem M5 pro upnutí VBD a pro zajištění kolmosti s osou upínače bylo zbroušeno přímo na stroji ANCA MX7. Konstrukce tohoto přípravku by měla zajišťovat dostatečně pevné i tuhé upnutí VBD pro jejich finální broušení. Konstrukce i technologický postup výroby přípravku rovněž zaručují vyhovující souosost mezi upínacím otvorem VBD a osou kleštinového upínače. Tato skutečnost je podstatná, jelikož na ose kleštinového upínače leží střed souřadnicového systému. Výraznější deviace by tedy způsobila, že upínací otvor nebude ležet ve středu VBD s dostatečnou přesností.

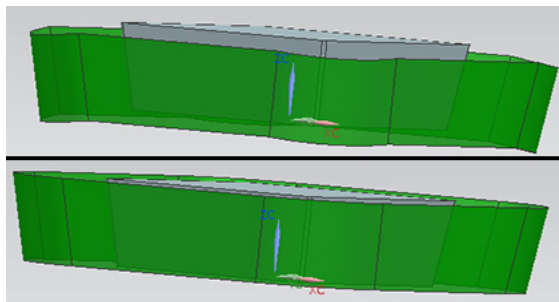


Obrázek 79 – Přípravek pro upínání VBD do stroje ANCA MX7

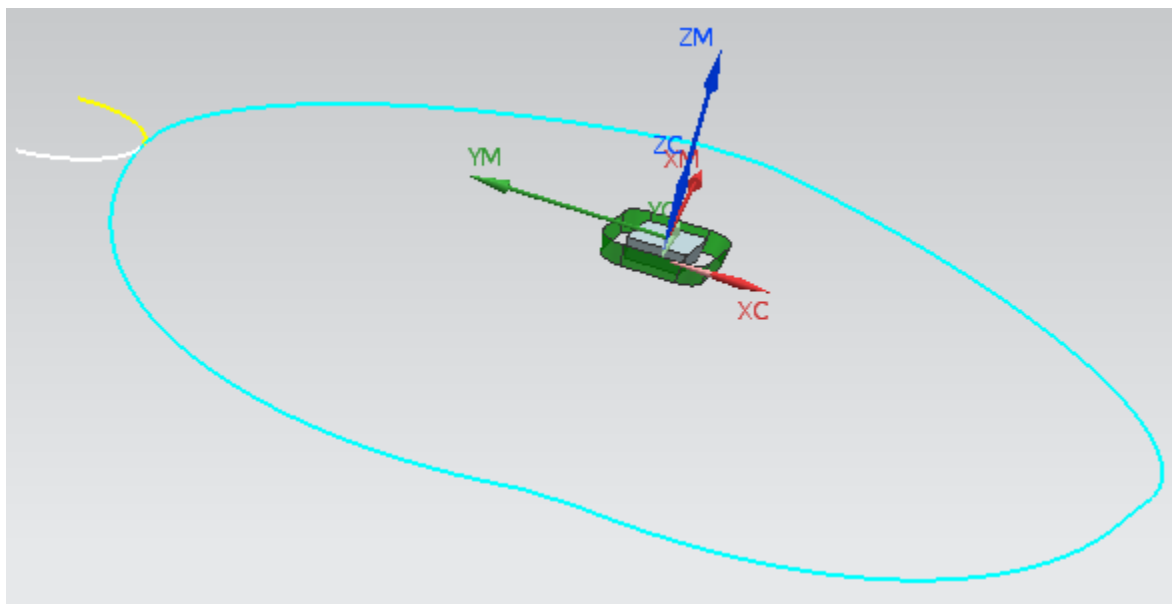
3.11.4.5.2 Tvorba výrobního programu

Jelikož výrobce stroje poskytuje postprocessor pro software Simens NX, tak byla nástrojová dráha kopírující finální povrch hřbetu VBD vytvořena právě v tomto softwaru.

Pro tvorbu dráhy byla použita operace *Variable contour*. Tato operace vyžaduje tzv. řídicí plochu (na obrázcích zelenou barvou), která je odsazena od plochy broušené a je nezbytná pro generování nástrojových drah. Jako stěžejní pro správné generování drah se ukázalo, že hranice této plochy musí být tvořeny rovinami, které leží na čelní a dosedací ploše VBD (viz Obrázek 80).



Obrázek 80 – Původní podoba řídicí plochy vytvořené odsazením od plochy broušené (nahore) a upravená řídicí plocha (dole)



Obrázek 81 – Nástrojová dráha vytvořená v programu Simens NX

Následně byly definovány další potřebné parametry operace jako například směr obrábění nebo podoba nájezdu a odjezdu kotouče. Poté byl program vygenerován pomocí postprocessoru *anca_tx7_5-axis_metric_v1.0* a přenesen do softwaru iGrind, jenž je používán pro volbu rezných parametrů a vytvoření výrobního programu. V tomto softwaru byly rovněž vytvořeny operace pro broušení čel některých variant VBD. Pro broušení hřbetů VBD z oceli MS1 byly zvoleny následující podmínky:

- Nástroj – SiC – DIA PRAHA 100x10x20 C49 80 K 9 V
- Řzná rychlost – 25 m/s
- Posuvová rychlost – 50 mm/min

- Radiální hloubka řezu – 0,1 mm
- Axiální hloubka řezu – 4,76 až 6,76 mm v závislosti na variantě VBD

Pro VBD s připájeným břitem ze slinutého karbidu byly zvoleny následující podmínky:

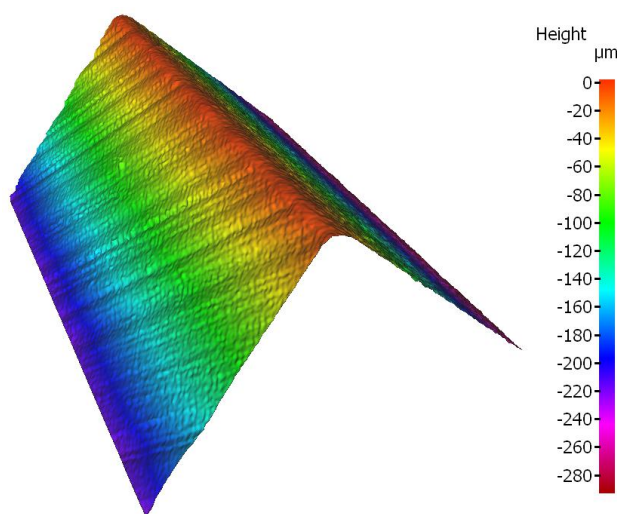
- Nástroj – Diamant – DIA PRAHA 1A1 D100 T10 X3 H32 D0641510
- Řezná rychlost – 20 m/s
- Posuvová rychlost – 50 mm/min
- Radiální hloubka řezu – 0,1 mm
- Axiální hloubka řezu – 4,76 až 6,76 mm v závislosti na variantě VBD

3.11.4.5.3 Proces obrábění

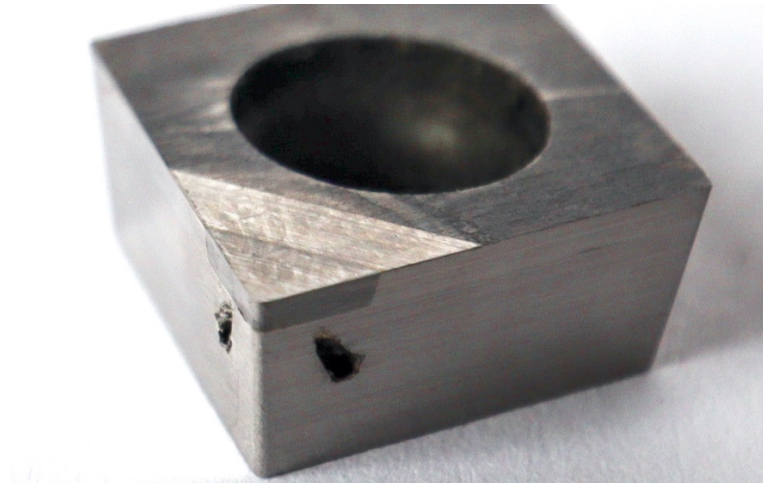
Upnutí obrobku do stroje probíhalo pomocí přípravku popsaného výše. Pro zajištění definovaného natočení v souřadnicovém systému stroje však musela být správná hrana VBD vyrovnána pomocí číselníkového úchylkoměru rovnoběžně s osou X. Toto řešení je pro experimentální kusovou výrobu vyhovující, pro větší množství kusů by však bylo vhodné vytvořit přípravek s jednoznačně definovaným a opakovatelným systémem upínání VBD. Po obroušení byl výsledek obrábění ověřen na měřicím přístroji Zoller Genius 3s.

3.11.4.6 Omílání VBD

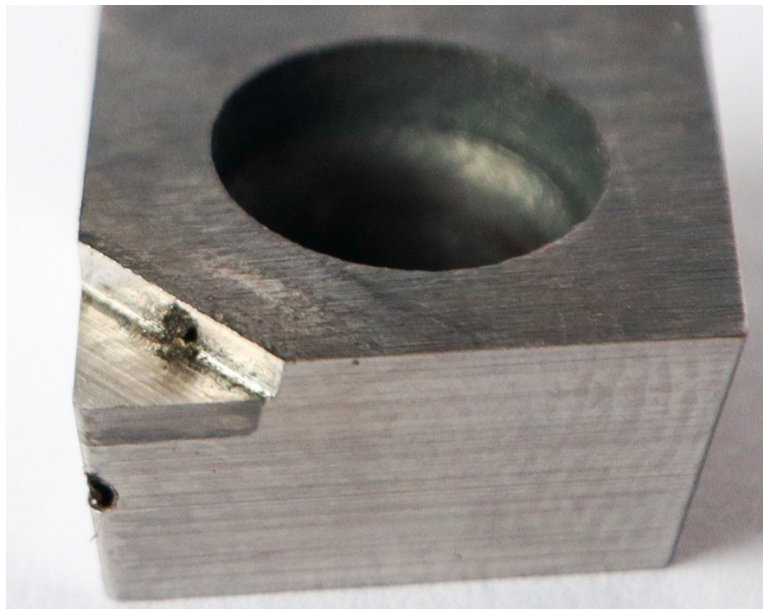
Poslední operací bylo omletí břitových destiček, tak aby poloměr zaoblení ostří dosáhl hodnoty 15 μm s použitím zařízení OTEC DF 3. Byl použit cyklus dlouhý 16,5 min a médium OTEC HSC 1/300. Měření geometrie ostří probíhalo na opticko-skenovacím mikroskopu IFM G4.



Obrázek 82 – Sken ostří VBD ze zařízení IFM G4



Obrázek 83 – Dokončená VBD – varianta B



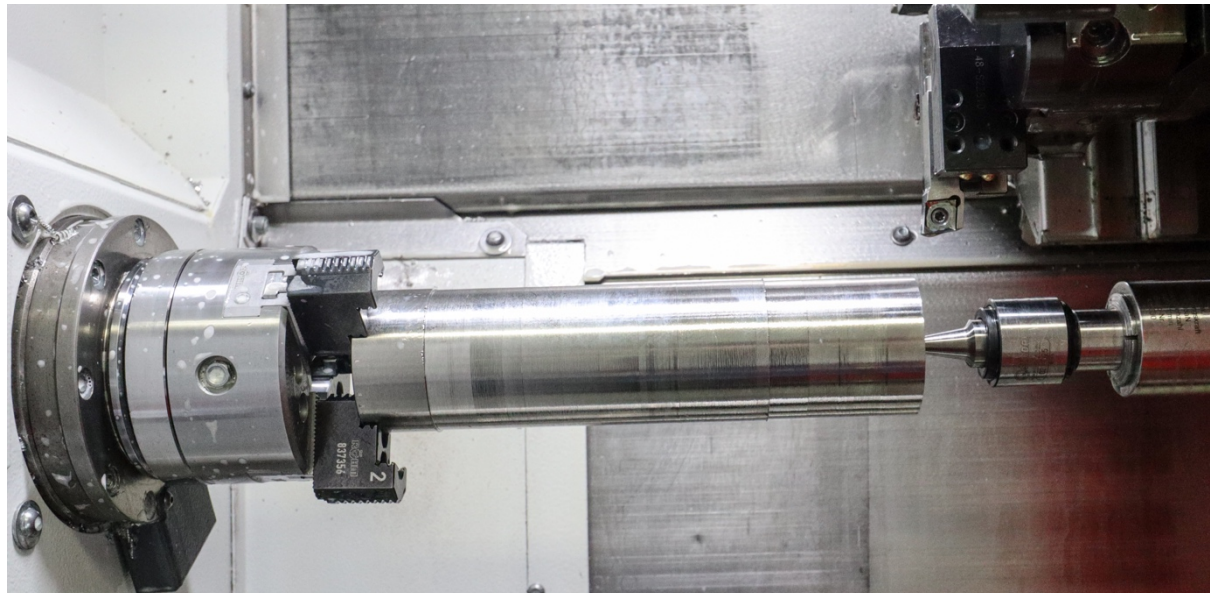
Obrázek 84 – Dokončená VBD – varianta E

3.12 Testování řezného nástroje

Po kompletním dokončení řezného nástroje následovalo jeho testování, které bylo prováděno na variantách břitových destiček B a E. U těchto variant se totiž předpokládá největší pravděpodobnost přínosu při potenciálních aplikacích v průmyslové praxi. Cílem testování bylo ověřit vliv navrhnutého systému chlazení na trvanlivost nástroje. Z důvodu poměrně značné pracnosti výroby navrhnutých VBD při současném výrobním postupu byly pro účely testování vybrány referenční VBD od výrobce Iscar.

3.12.1 Obráběný materiál

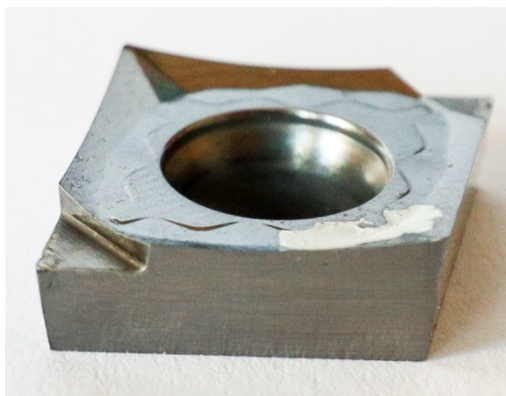
Obráběným polotovarem byla kruhová tyč o průměru $\varnothing 57,6$ mm a délce 220 mm ze slitiny Inconel 718. Tento polotovar byl precipitačně vytvrzen, výsledná pevnost R_m udávaná výrobcem je 1227 MPa a tvrdost 39 HRC. Materiálový list je možné nalézt v příloze.



Obrázek 85 – Obrobek upnutý ve stroji EMCO MAXXTURN 25

3.12.2 Referenční VBD

Jako referenční VBD byl zvolen výrobek Iscar CCGT 120404-AS IC20. Jedná se o VBD ze slinutého karbidu bez tenké vrstvy, kterou je podle výrobce možno použít pro obrábění žárupevných materiálů (skupina ISO S). VBD je však originálně opatřena poměrně výraznou geometrií na čele. Tato geometrie tedy byla zbroušena na stroji ANCA MX7, tak aby se řezná část VBD co nejvíce podobala testovaným variantám. Poloměr zaoblení špičky originální VBD je 0,4 mm, ale velikost tohoto poloměru směrem od čela klesá. Této skutečnosti bylo využito, čelo VBD bylo zbroušeno o 1,61 mm aby výsledný rádius špičky byl 0,2 mm stejně jako u testovaných VBD. Poslední operací bylo omletí VBD na hodnotu zaoblení ostří 15 μm .



Obrázek 86 – Referenční VBD s upravenou geometrií čela

3.12.3 Metodologie testování

Zjištění přínosu systému chlazení bude ověřeno porovnáním VBD s tímto systémem s VBD chlazenou standardním vnějším chlazením. Jelikož je výroba VBD opatřených systémem chlazení

při současném technologickém postupu poměrně pracná, tak pro řezání s vnějším chlazením byla jako referenční zvolena VBD bez tenké vrstvy od výrobce Iscar. Jelikož je třída slinutého karbidu ze které je referenční VBD vyrobena určena, stejně jako třída slinutého karbidu, ze které jsou vyrobeny řezné břity VBD s vnitřním chlazením, pro obrábění žárupevných slitin, tak bylo předpokládáno, že rozdílnost substrátů nebude příliš velká a nebude mít extrémní vliv na trvanlivost. Tvrdost substrátu CTS20D použitého pro pájené břity je 1600 HV30 přičemž tvrdost substrátu referenčních VBD je 1640 HV20. [48], [49]

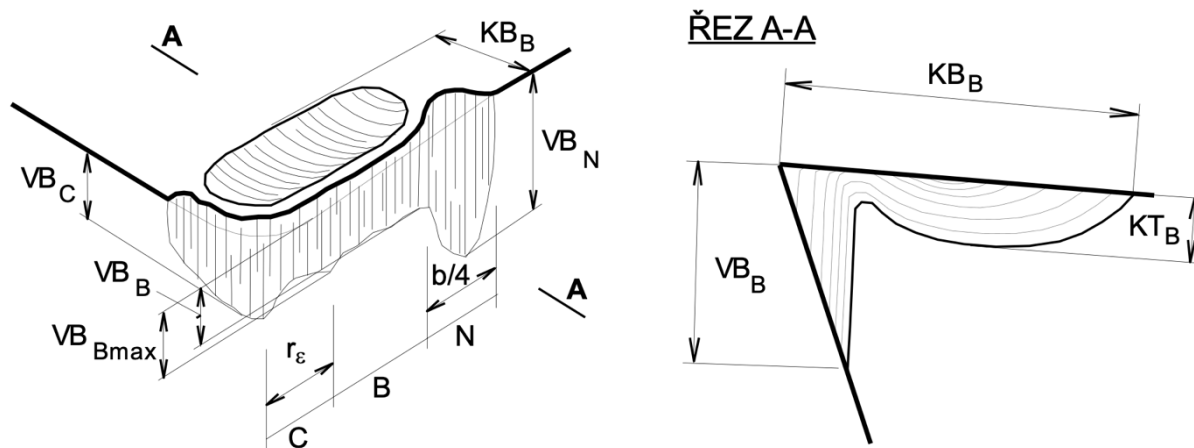
Tato referenční VBD byla testována jako první a sloužila k nalezení optimálních řezných podmínek, vhodného kritéria opotřebení a samozřejmě trvanlivosti v testovaném materiálu při použití standardního vnějšího chlazení. Při těchto podmínkách by tedy měl jedinou výraznou proměnnou být rozdílný systém chlazení řezné hrany a jeho případný vliv na průběh opotřebení tedy poměrně prokazatelný.

Prvotní pre-experiment s referenčními VBD ukázal, že na hřbetu se tvoří opotřebení typické pro obrábění slitiny Inconel 718, tedy výrazné opotřebení v blízkosti maximální hloubky řezu, a bude ideální sledovat opotřebení VB_N s kritériální hodnotou 0,3 mm (viz Obrázek 87 a Obrázek 88) a tedy nalézt čas v řezu pro dosažení zvoleného opotřebení ($t_{0,3}$). Při pre-experimentu byly zároveň nalezeny vhodné podmínky pro realizaci testování:

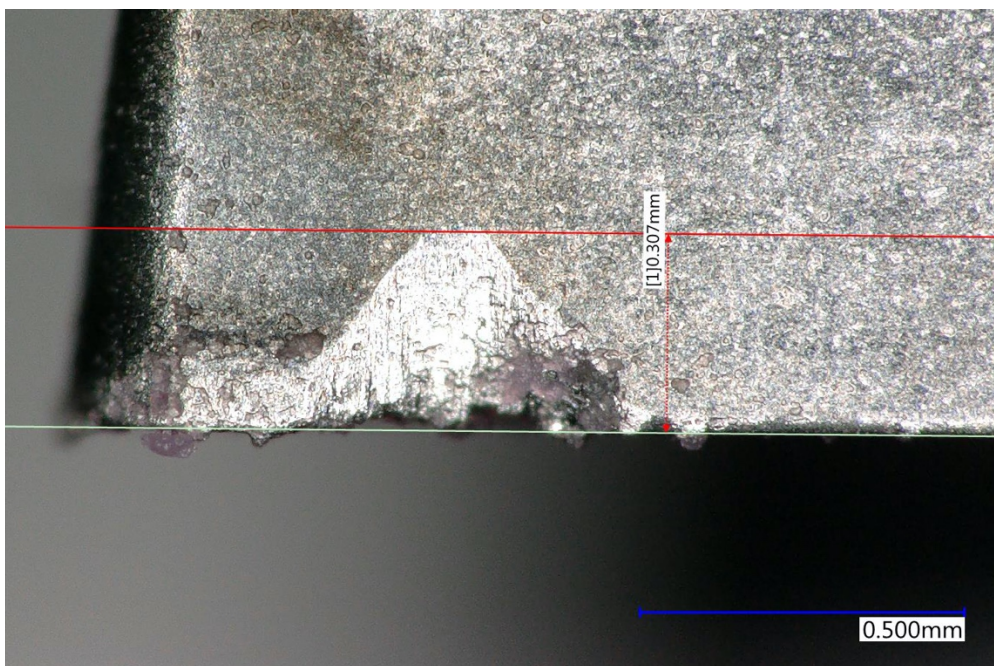
- Řezná rychlost (v_c) – 20 m/min
- Hloubka řezu (a_p) – 0,5 mm
- Otáčkový posuv (f_{ot}) – 0,15 mm/ot
- Délka přejezdu (l_m) – 15 mm

Tyto podmínky zajišťovaly poměrně lineární opotřebování referenční VBD a možnost pořízení dostatečného počtu náměrů. Podmínky tedy byly zafixovány pro všechny varianty VBD a hlavní proměnnou tak byl použitý systém chlazení.

Nalezení času pro dosažení kritériálního opotřebení bylo provedeno pomocí aritmetického zprůměrování výsledků jednotlivých VBD. Výsledky výrazně se lišící z definovatelných důvodů byly však předem eliminovány.



Obrázek 87 – Kótování otupení nástroje dle ISO [22]



Obrázek 88 – Referenční VBD po dosažení kritériálního opotřebení

3.12.4 Testování a vyhodnocení referenční VBD

Chlazení referenční VBD bylo zajištěno standardním způsobem z trysek držáku VDI16. Byly provedeny celkem tři měření, přičemž první z nich bylo s největší pravděpodobností ovlivněno povrchem obrobku, který byl zřejmě významně deformačně zpevněn vlivem předchozího obrábění u výrobce polotovaru. Po eliminaci prvního výsledku je tedy průměrná doba pro dosažení kritériálního opotřebení 4,3 minuty.

Tabulka 16 – Záznam průběhu opotřebení referenčních VBD

n	VBD 1		VBD 2		VBD 3	
	t [min]	VB _N [mm]	t [min]	VB _N [mm]	t [min]	VB _N [mm]
1	0,91	0,13	0,89	0,13	0,89	0,113
2	1,81	0,21	1,78	0,18	1,78	0,162
3	2,72	0,28	2,67	0,19	2,67	0,219
4	3,14	0,3	3,56	0,227	3,55	0,286
5			4,45	0,3	4,44	0,307
t _{0,3} [min]	3,1		4,45		4,15	
∅ t _{0,3} [min]	4,3					

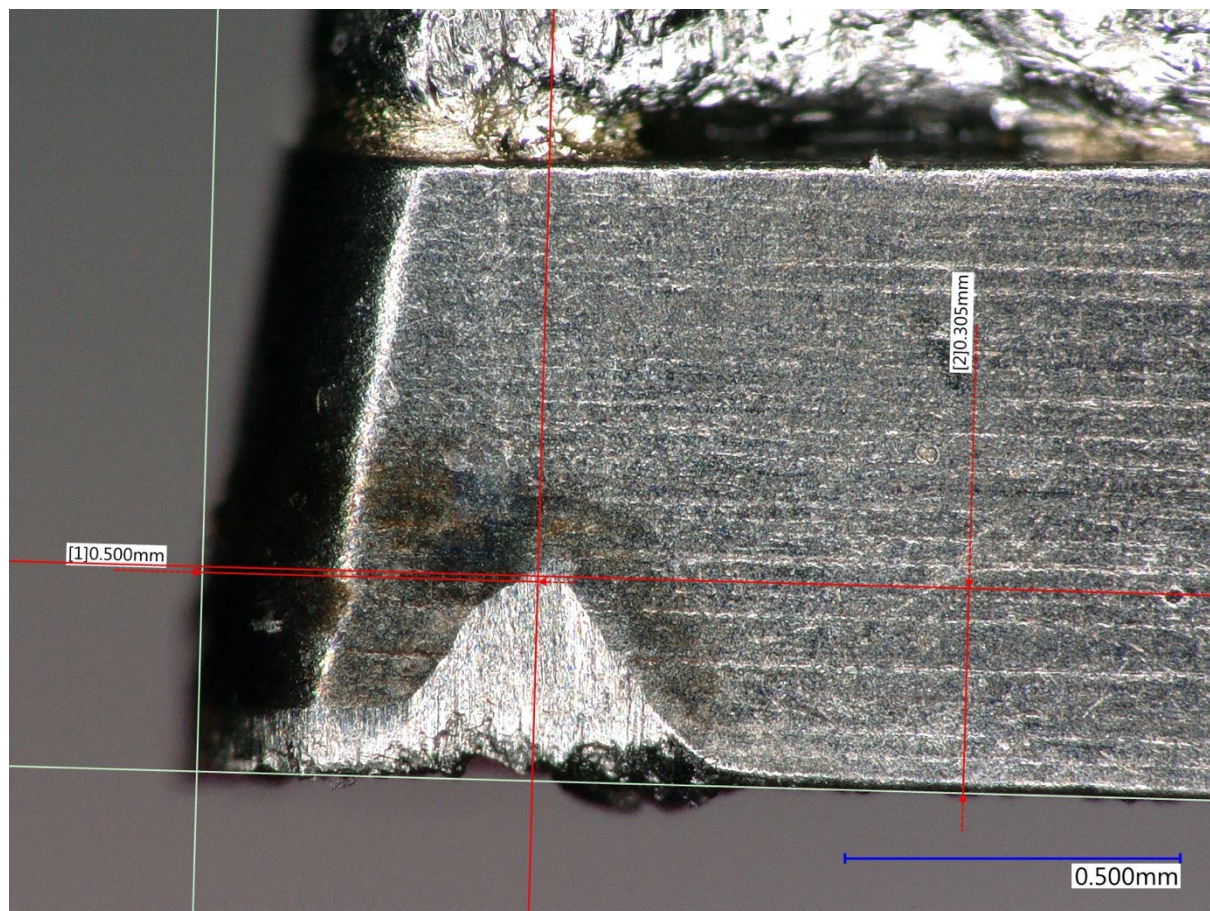
3.12.5 Testování a vyhodnocení varianty B

Varianta B je vybavena chladicími kanálky pouze na hřbetu nástroje, proto byla na držáku VDI16 zaslepena pouze jedna tryska pro chladicí médium a druhá nasměrována na čelo nástroje. Tato varianta byla tedy chlazená standardním způsobem z čela a systémem vnitřních kanálků ze hřbetu.

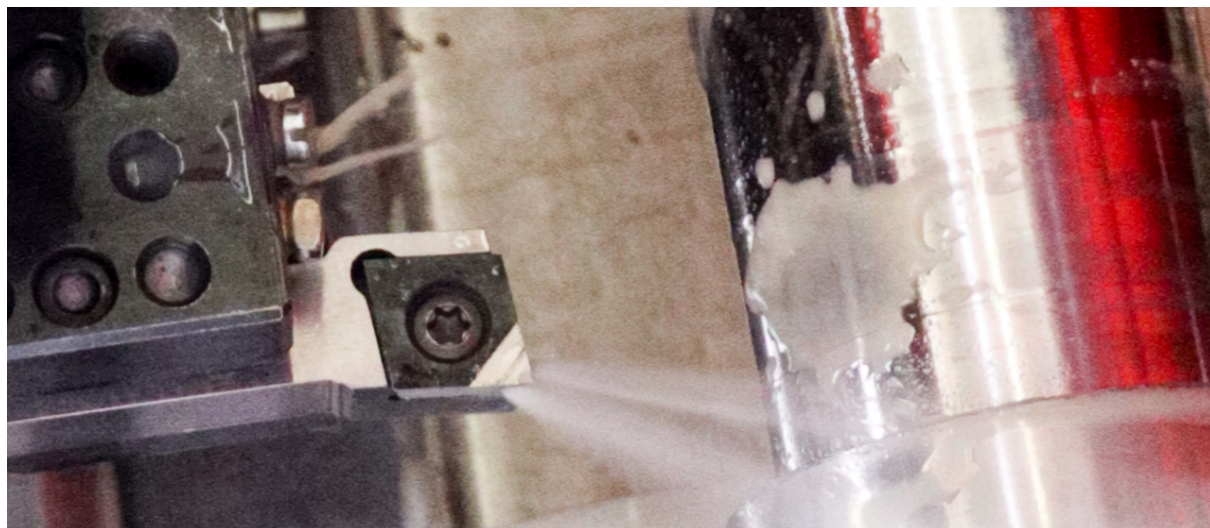
Životnost při použití této varianty je **zvýšena o 93%** vůči referenční VBD. Průběh opotřebení první testované VBD byl pravděpodobně negativně ovlivněno vibracemi způsobenými nedostatečným podepřením obrobku opěrným hrotem. Opotřebení třetí testované VBD bylo nejspíš negativně ovlivněno vyštípnutím ostří v oblasti za hodnotou maximální hloubky řezu.

Tabulka 17 – Záznam průběhu opotřebení VBD varianty B

n	VBD 1		VBD 2		VBD 3	
	t [min]	VB _N [mm]	t [min]	VB _N [mm]	t [min]	VB _N [mm]
1	0,79	0,083	0,78	0,074	0,76	0,072
2	1,59	0,114	1,56	0,109	1,53	0,106
3	2,38	0,149	2,34	0,126	2,29	0,151
4	3,18	0,181	3,11	0,132	3,05	0,156
5	3,97	0,224	3,89	0,158	3,82	0,175
6	4,77	0,261	4,67	0,182	4,58	0,217
7	5,56	0,268	5,45	0,214	5,34	0,23
8	6,36	0,278	6,23	0,243	6,10	0,242
9	7,15	0,286	7,01	0,262	6,87	0,287
10	7,94	0,305	7,79	0,271	7,63	0,306
11			8,57	0,274		
12			9,34	0,275		
13			10,11	0,317		
t _{0,3} [min]	7,74		9,81		7,38	
∅ t _{0,3} [min]	8,31					



Obrázek 89 – VBD 1 (varianta B) při dosažení kritériálního opotřebení



Obrázek 90 – VBD varianty B při spuštěném chlazení

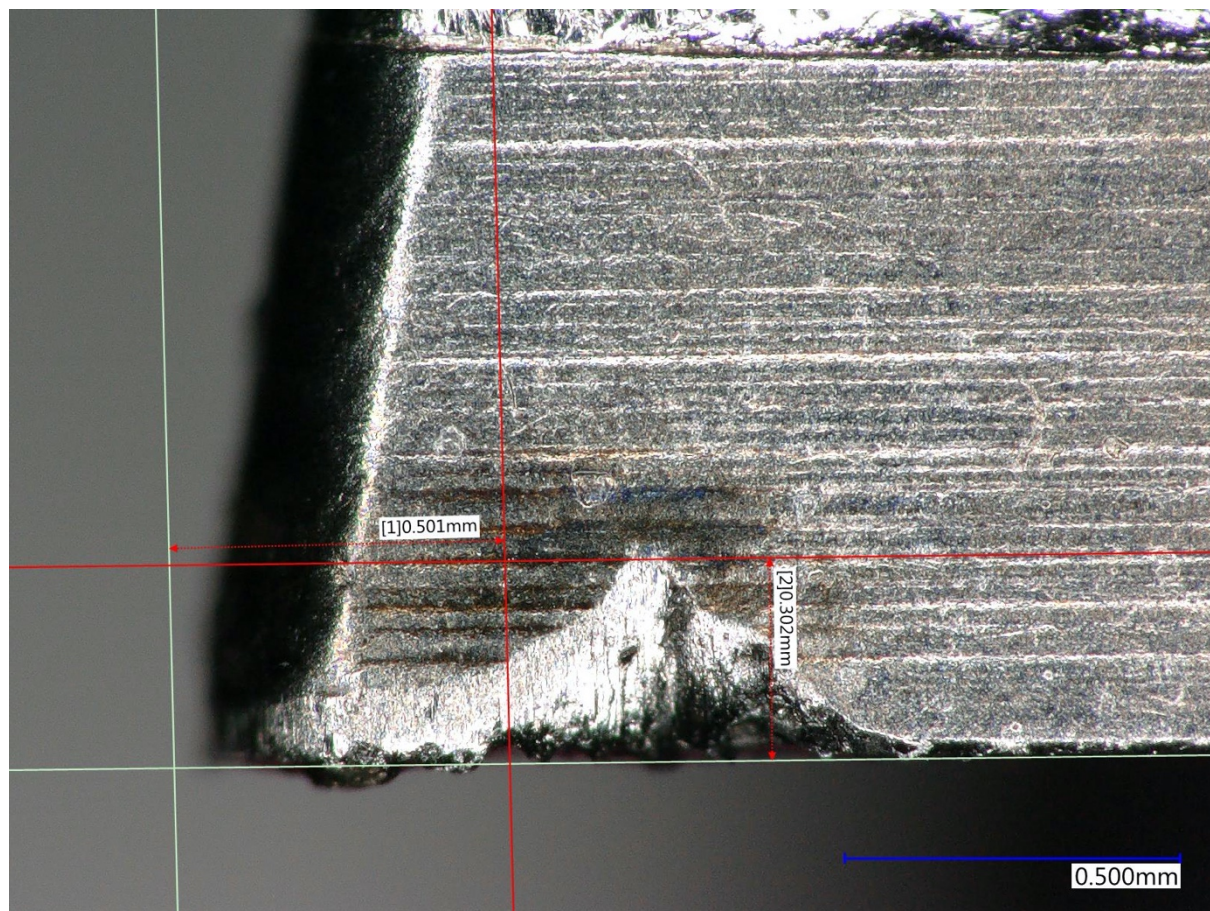
3.12.6 Testování a vyhodnocení varianty E

Jelikož je varianta E vybavena chlazením čela i hřbetu, tak pro její testování byly v držáku VDI16 zaslepeny obě chladicí trysky (viz Obrázek 93). Chlazení rezného břitu tedy bylo zajišťováno pouze systémem kanálek nástroje.

Výsledky měření VBD 2 byly eliminovány, jelikož při předposledním přejezdu došlo k výraznému vylomení břitu v okolí maximální hloubky řezu a tento fakt s největší pravděpodobností zapříčinil skokový nárůst opotřebení. Po zprůměrování zbývajících hodnot bylo zjištěno, že životnost při použití této varianty byla **zvýšena o 170%** vůči referenční VBD.

Významně negativním efektem použití této koncepce systému chlazení bylo ucpávání čelní trysky pro chladicí médium třískou (viz Obrázek 94), toto pochopitelně významně snižuje průtok chladicího média a tím i účinnost chlazení. Nejméně ve čtyřech případech tříška prošla celým čelním chladicím kanálkem ve VBD a musela být ručně odstraněna. Tento jev by měl být eliminován modifikací geometrie nástroje, použitím utvařeče třísky nebo významným zvýšením tlaku chladicí kapaliny.

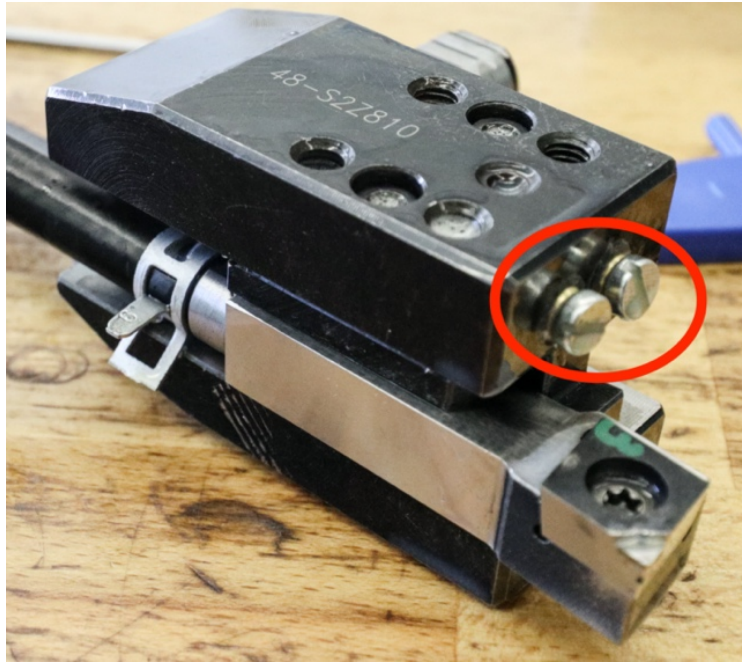
n	VBD 1		VBD 2 – vylomení britu		VBD 3	
	t[min]	VB _N [mm]	t[min]	VB _N [mm]	t[min]	VB _N [mm]
1	0,86	0,085	0,84	0,069	0,83	0,075
2	1,71	0,134	1,68	0,113	1,65	0,128
3	2,57	0,148	2,52	0,133	2,48	0,161
4	3,43	0,158	3,37	0,164	3,30	0,183
5	4,29	0,187	4,21	0,182	4,13	0,21
6	5,14	0,203	5,03	0,199	4,95	0,213
7	6,00	0,221	5,86	0,258	5,78	0,23
8	6,86	0,23	6,69	0,317	6,61	0,245
9	7,70	0,236			7,43	0,25
10	8,54	0,264			8,24	0,26
11	9,38	0,266			9,05	0,273
12	10,22	0,271			9,86	0,287
13	11,07	0,276			10,67	0,301
14	11,91	0,287				
15	12,75	0,302				
t _{0,3} [min]	12,65		6,45		10,6	
∅ t _{0,3} [min]	11,63					



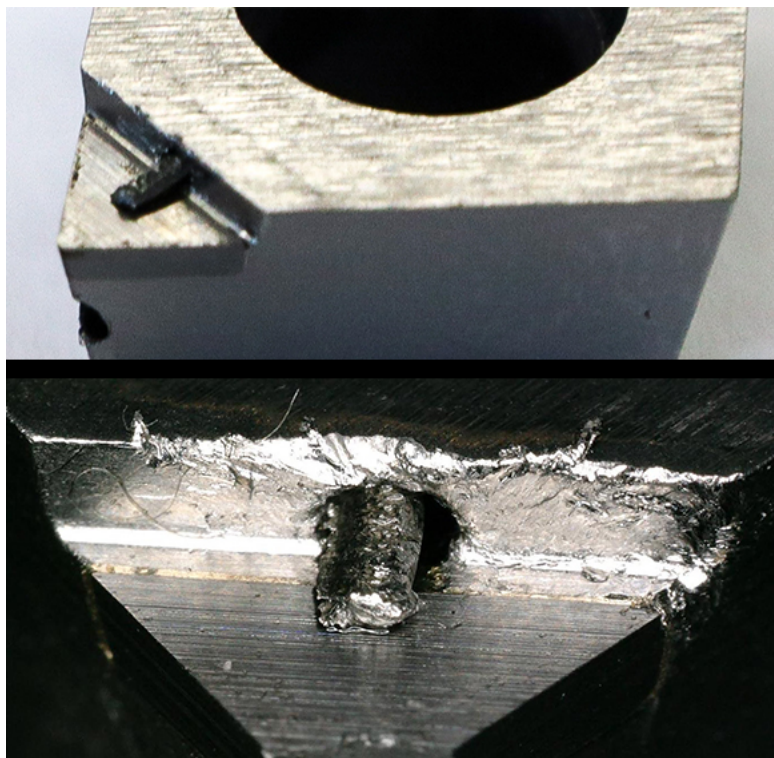
Obrázek 91 – VBD 1 (varianta E) při dosažení kritériálního opotřebení



Obrázek 92 – VBD varianty E při spuštěném chlazení



Obrázek 93 – Soustružnický nůž upnutý v držáku VDI16 se zaslepenými chladicími tryskami (zvýrazněno červeně)



Obrázek 94 – Čelní chladicí tryska ucpaná třískou

4 Zhodnocení výsledků

Testování prokázalo výrazný přínos navrhovaného systému chlazení pro životnost VBD při měření opotřebenosti VB_N , který je podrobně popsán v předchozích kapitolách. Zároveň však bylo zjištěno několik výrazných nedostatků navržených VBD a tedy potřeba tyto prvotní prototypy dále vyvíjet, tak aby jejich využití v průmyslové praxi bylo možné. Mezi nejzásadnější poznatky vycházející z experimentů patří:

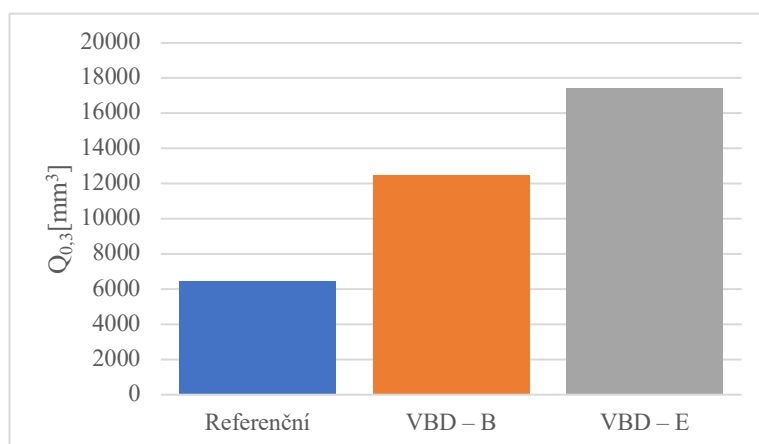
- Použití o-kroužku pro zatěsnění spoje mezi držákem a VBD se pro aplikaci na stroji EMCO MAXXTURN 25 ukázalo jako nepotřebné. Obrobené plochy, lůžko a dosedací plochy VBD, poskytovaly dostatečnou těsnost.
- Nosič řezné části vyrobený z materiálu MS1 při pájení řezné části ztrácí svou tvrdost. V průběhu obrábění je proto opotřebováván odcházející třískou. Tato skutečnost by mohla výrazně omezit možnosti opětovného použití nosiče. Při dalším vývoji by tak bylo vhodné zajistit dostatečnou tvrdost nosiče. Zvýšení tvrdosti by navíc rovněž mělo minimalizovat vznik otřepů při finálním broušení hřbetů VBD.
- Varianta E se ukázala jako velmi výhodná z hlediska odolnosti proti opotřebenosti ovšem jejím velkým nedostatkem je ucpávání čelního kanálku odcházející třískou. Toto by v budoucnu mohlo být eliminováno použitím vyššího tlaku chladicí kapaliny nebo modifikací geometrie nástroje.

Názorné porovnání všech tří VBD je v tabulce a grafu níže, přičemž pro porovnání byla použita průměrná hodnota životnosti. Množství odebraného materiálu při dosažení opotřebenosti VB_N 0,3 mm bylo vypočítáno podle následujícího vzorce.

$$Q_{0,3} = 1000 \cdot v_c \cdot a_p \cdot f_{ot} \cdot t_{0,3} \text{ [mm}^3\text{]} \text{ [50]}$$

Tabulka 18 – Porovnání testovaných VBD

Nástroj	$t_{0,3}$ [min]	$Q_{0,3}$ [mm ³]
Referenční	4,3	6451
VBD – B	8,31	12465
VBD – E	11,63	17438



Graf 1 – Porovnání množství odebraného materiálu

5 Závěr

Tato práce byla zaměřena na konstrukci, výrobu a testování řezného nástroje pro soustružení s použitím 3D tisku. Nástroje, který bude přínosný oproti v současné době běžné dostupným řešením, a to při použití na co nejširším strojovém parku. Práce je dále zacílena na slitinu Inconel 718, jejíž obrábění v současné době stále skýtá poměrně značný potenciál pro zlepšení. Nosnou tézí bylo v tomto případě zvýšení efektivity chlazení řezné hrany, která je při obrábění tohoto materiálu velmi intenzivně namáhána, s využitím aditivní technologie pro výrobu nástroje. Předpokládaným vhodným řešením tohoto problému bylo použití chladicích kanálek s ústím směřovaným na řeznou hranu a umístěným do její těsné blízkosti. Tato konstrukce by pak teoreticky měla zajišťovat skutečně intenzivní chlazení v kritické oblasti, a to i v případě strojů bez vysokotlakého chlazení.

Po vytvoření uspokojivého designu bylo potřeba zvolit a vypracovat vhodný technologický postup pro zhotovení nástroje. Tento postup samozřejmě začínal aditivní výrobou polotovarů VBD i držáku, které byly poté dokončeny pomocí třískového obrábění. Varianty VBD vyrobené pouze z nástrojové oceli pak sloužily především pro ověření koncepce kvůli jejich případné budoucí aditivní výrobě z jiného řezného materiálu. Varianty VBD (označené jako B a E, viz kapitola 3.9.2), použité pro řezné zkoušky, byly opatřeny břitem ze slinutého karbidu. Jednotlivé varianty VBD se od sebe liší především umístěním ústí chladicích kanálek a jejich trajektorií. Proces výroby tohoto prototypového nástroje vyžadoval využití celé řady výrobních zařízení a v některých případech i vytvoření výrobních programů. Mimo jiné bylo pro dokončování využito 5osé frézovací centrum, 5osá nástrojářská bruska nebo elektroerozivní drátová řezačka.

Poslední fází práce bylo praktické ověření teoretických předpokladů, tedy zjištění přínosu systému chladicích kanálek na životnost nástroje. Experiment byl prováděn na polotovaru z materiálu Inconel 718 ve vytvrzeném stavu a pro účely porovnání byly vybrány upravené VBD ze slinutého karbidu bez tenké vrstvy od výrobce Iscar. Na měřicím mikroskopu bylo u všech testovaných vzorků pozorováno opotřebení na hřbetě nástroje (VB_N) vždy po ujetí dráhy 15 mm. Řezné podmínky byly konstantní pro všechny testované VBD. Výsledky experimentu ukázaly, že navržený systém chlazení má výrazný pozitivní vliv na životnost nástroje. Tyto poznatky tak ukazují potenciál nástroje s navrhovaným systémem chlazení pro zvýšení životnosti, a tedy dávají motivaci k dalšímu vývoji nástroje. Pro využití v praxi by totiž tento soustružnický nůž musel být značně modifikován, a to například aplikací tenké vrstvy nebo vytvořením efektivnějšího výrobního postupu.

Výsledky této práce splňují zvolené cíle a mohou sloužit jako odrazový můstek pro vytvoření nástroje s využitím aditivních technologií, který zvýší efektivitu obrábění žárupevných slitin.

6 Seznam použité literatury

- [1] Specialmetals.com, „Inconel alloy 718“. [Online]. Dostupné z: https://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/inconel_alloy_718.pdf. [Viděno: 06-lis-2019]
- [2] Nickelinstitute.org, „Machining nickel alloys“. [Online]. Dostupné z: https://www.nickelinstitute.org/media/1719/machiningnickelalloys_11008_.pdf. [Viděno: 01-čer-2020]
- [3] Y. B. Guo, „Uncertainty Analysis of Tool Wear and Surface Roughness in End Milling“, prezentováno v ASME 2013 International Manufacturing Science and Engineering Conference collocated with the 41st North American Manufacturing Research, roč. 2013, doi: <https://doi.org/10.1115/MSEC2013-1245>.
- [4] D. G. Thakur, „Machinability investigation of Inconel 718 in high-speed turning“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, roč. 2009, č. 45, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-009-1987-x>.
- [5] I. Zetková, „Problematika výroby strojních kovových součástí 3D tiskem“, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojí, Plzeň, 2017 [Online]. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/handle/11025/28412?mode=full>
- [6] EOS GmbH, „EOS Materials Metal Portfolio Overview“. [Online]. Dostupné z: https://cdn0.scrvt.com/eos/caf948a1836f247e/203f5993059d/EOS_materials_table_overview_M_en_WEB.pdf. [Viděno: 19-pro-2019]
- [7] EOS GmbH, „EOS MaragingSteel MS1“. 29-led-2020 [Online]. 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-m280_m290_400w_material_data_sheet_05-14_en.pdf. [Viděno: 29-led-2020]
- [8] I. Zetková, „Problematika výroby strojních kovových součástí 3D tiskem“, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojí, Plzeň, 2017 [Online]. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/handle/11025/28412?mode=full>. [Viděno: 07-čer-2020]
- [9] Crucible Design Ltd., „Design guidelines for Direct Metal Laser Sintering (DMLS)“. 06_01-2020 [Online]. Dostupné z: <https://www.crucibledesign.co.uk/images/uploaded/guides/bs7000-part-2-a-management-guide-download-original.pdf>. [Viděno: 01-čer-2020]
- [10] EOS GmbH, „Školící materiály - EOS basic training“.
- [11] B. Redwood, F. Schoffer, a B. Garret, *The 3D printing handbook*. 3D hubs B.V., 2018.
- [12] amfg.ai, „How Topology Optimisation and 3D Printing Unlock New Design Opportunities“. [Online]. Dostupné z: <https://amfg.ai/2018/04/19/topology-optimisation-additive-manufacturing/?cn-reloaded=1>. [Viděno: 01-čer-2020]
- [13] Renishaw plc., „Industrial applications of Renishaw metal additive manufacturing technology“, *renishaw.com*. [Online]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/en/industrial-applications-of-renishaw-metal-additive-manufacturing-technology--15256>. [Viděno: 01-čer-2020]
- [14] C. Emmelmann, D. Herzog, a J. Kranz, „10 - Design for laser additive manufacturing“, in *Laser Additive Manufacturing*, M. Brandt, Ed. Woodhead Publishing, 2017, s. 259–279 [Online]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081004333000105>
- [15] W. Leventon, „Less support is a good thing—when 3D printing“, *thefabricator.com*. [Online]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/additivereport/article/additive/less-support-is-a-good-thingwhen-3d-printing>. [Viděno: 02-čer-2020]

- [16] S. HENDRIXSON, „Additive Manufacturing Makes Subtractive Cutting Tools“, *additivemanufacturing.media*. [Online]. Dostupné z: <https://www.additivemanufacturing.media/articles/additive-manufacturing-makes-subtractive-cutting-tools>. [Viděno: 02-čer-2020]
- [17] MAPAL Dr. Kress KG, „Drilling, Boring, Countersinking“. [Online]. Dostupné z: https://www.mapal.com/fileadmin/mapal_ftp/Blaetterkataloge/index.html?catalog=MAPAL-Drilling-Boring-Countersinking&lang=en_GB#page_216. [Viděno: 02-čer-2020]
- [18] Sandvik Coromant, „Lightweight CoroMill® 390 produced using additive manufacturing reduces vibration in long-overhang milling“, *sandvik.coromant.com*. [Online]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com:443/en-gb/news/press_releases/pages/lightweight-coromill-390-produced-using-additive-manufacturing-reduces-vibration-in-long-overhang-milling.aspx. [Viděno: 02-čer-2020]
- [19] A. Humár, „TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 1. část“. [Online]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1441/jaro2011/DT3MK_STR3/um/TI_TO-1cast.pdf. [Viděno: 07-čer-2020]
- [20] MITSUBISHI MATERIALS Corporation, „FUNCTION OF TOOL FEATURES FOR TURNING – RAKE ANGLE“. [Online]. Dostupné z: http://www.mitsubishicarbide.com/en/technical_information/tec_turning_tools/tec_hsk-t/tec_hsk-t_technical/tec_turning_rake_angle. [Viděno: 07-čer-2020]
- [21] J. Fulemová, „Studie problematiky zvyšování řezivosti nástroje při frézování feritickomartenzitické oceli P91“, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojí, Plzeň [Online]. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/28407/1/Disertacni_prace_Fulemova.pdf. [Viděno: 07-čer-2020]
- [22] J. Řehoř, „TEORIE OBRÁBĚNÍ“. [Online]. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/CoursewarePortlets2/DownloadDokumentu?id=63025>. [Viděno: 07-čer-2020]
- [23] Obrabenikovo.cz, „Uhlíková ocel k zušlechťování a povrchovému kalení – 12 050“. [Online]. Dostupné z: <http://media0.obrabenikovo.cz/files/media0:571926fc1f8f5.pdf.upl/12050.pdf>. [Viděno: 07-čer-2020]
- [24] D. G. Thakur, B. Ramamoorthy, a L. Vijayaraghavan, „Study on the machinability characteristics of superalloy Inconel 718 during high speed turning“, *Materials & Design*, roč. 30, č. 5, s. 1718–1725, kvě. 2009, doi: 10.1016/j.matdes.2008.07.011.
- [25] L. Dvořák, „Rozhodující je použití efektivního chlazení“, *mmspektrum.com*. [Online]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/rozhodujici-je-pouziti-efektivniho-chlazení.html>. [Viděno: 07-čer-2020]
- [26] Sandvik Coromant, „Použití řezné kapaliny a chlazení při soustružení“, *sandvik.coromant.com*. [Online]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com:443/cs-cz/knowledge/general-turning/pages/how-to-apply-coolant-and-cutting-fluid-in-turning.aspx>. [Viděno: 07-čer-2020]
- [27] MM Průmyslové spektrum, „Kryogenické frézování těžkoobrobitelných materiálů“, *mmspektrum.com*. [Online]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/novinka/kryogenicke-frezovani-tezkoobrobitelnych-materialu.html>. [Viděno: 07-čer-2020]
- [28] A. Humár, „MATERIÁLY PRO ŘEZNÉ NÁSTROJE“. [Online]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf. [Viděno: 10-led-2020]

- [29] A. Kříž a M. Kesl, „HODNOCENÍ KVALITY TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ NÁ-STROJOVÝCH OCELÍ". [Online]. Dostupné z: <https://www.opi.zcu.cz/download/kvalita.pdf>. [Viděno: 07-čer-2020]
- [30] ISCAR ČR s.r.o., „IC806 SUMO TEC PVD for Inconel 718", *www.iscar.com*. [On-line]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/Products.aspx/countryid/6/ProductId/5392>. [Viděno: 07-čer-2020]
- [31] C. Y. Hsu, Y. Y. Lin, W. S. Lee, a S. P. Lo, „Machining characteristics of Inconel 718 using ultrasonic and high temperature-aided cutting", *Journal of Materials Processing Technology*, roč. 198, č. 1, s. 359–365, bře. 2008, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.07.015.
- [32] M. Aruna, „Design Optimization of Cutting Parameters when Turning Inconel 718 with cermet inserts", *World Journal of Engineering and Technology*, roč. 6, s. 812–815, led. 2012.
- [33] „Řezná keramika - Moderní a produktivní způsob obrábění žárovzdorných slitin", s. 8.
- [34] Sandvik Coromant, „Nástrojové materiály", *sandvik.coromant.com*. [Online]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com:443/cs-cz/knowledge/materials/pages/cutting-tool-materials.aspx>. [Viděno: 08-čer-2020]
- [35] A. Kříž, „Tenké vrstvy". [Online]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf. [Viděno: 06-lis-2019]
- [36] R. Báčová, „Dokonalé povrchy rezných nástrojů", *mmspektrum.com* [Online]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/dokonale-povrchy-reznych-nastroju.html>. [Viděno: 07-lis-2019]
- [37] VÚHŽ a.s., „NANÁŠENÍ POVLAKŮ TECHNOLOGIÍ PVD, PACVD A CVD". [Online]. Dostupné z: <https://www.vuhz.cz/povlaky-pvd-pacvd-a-cvd/technologie>. [Viděno: 11-lis-2019]
- [38] Y. Kamata a T. Obikawa, „High speed MQL finish-turning of Inconel 718 with different coated tools", *Journal of Materials Processing Technology*, roč. 192–193, s. 281–286, říj. 2007, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.04.052.
- [39] F. Plánička, „Produktivní vrtání Inconelu 718", *mmspektrum.com*. [Online]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/produktivni-vrtani-inconelu-718.html>. [Viděno: 07-čer-2020]
- [40] M. Kumar, „Powerful Marketing Tips For Business", *Online Marketing Expert*. [Online]. Dostupné z: <http://omexpert.com/internet-marketing/powerful-marketing-tips-for-business/>. [Viděno: 08-čer-2020]
- [41] EMCO GmbH, „MAXXTURN 25". [Online]. Dostupné z: https://www.emco-world.com/fileadmin/user_upload/_Group/Brochures_PDFs/PDFs_Drehen/MAXX-TURN/MT25/CNC_lathe_Maxxturn_01.pdf. [Viděno: 21-čer-2020]
- [42] ISCAR ČR s.r.o., „ISCAR Cutting Tools - Metal Working Tools - SCLCR/L : 3600847 - SCLCL 1212F-09". [Online]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/eCatalog/item.aspx?cat=3600847&fnum=337&mapp=IS&app=20&GFSTYP=M&isoD=1>. [Viděno: 21-čer-2020]
- [43] ISCAR ČR s.r.o., „ISCAR Cutting Tools - Metal Working Tools - ISO soustružení - Vnější držáky s úh. nast. 95° na kosočtvercové destičky 80° - CCMT/CCGT-SM". [Online]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/eCatalog/Family.aspx?fnum=867&mapp=IS&app=20&GFSTYP=M&fr=1&rel=I&rcat=3600847&item2>

=&ssOrder=&loc=&IC=&Pos=. [Viděno: 21-čer-2020]

[44] ISCAR ČR s.r.o., „ISCAR Cutting Tools - Metal Working Tools - CCMT/CCGT-SM : 5566756 - CCMT 120404-SM". [Online]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/eCatalog/item.aspx?cat=5566756&fnum=867&mapp=IS&app=20&GFSTYP=M&isoD=1>. [Viděno: 21-čer-2020]

[45] Rubena a. s., „TĚSNICÍ PRVKY". [Online]. Dostupné z: https://www.dimensor.cz/editor/image/eshop_menu/dbf_file_8.pdf. [Viděno: 16-čer-2020]

[46] VSK Profi, s. r. o., „Hadice pro benzín Fuel Profi - VSK Profi". [Online]. Dostupné z: <https://www.vskprofi.cz/katalog/hadice-pro-benzin-fuel-profi>. [Viděno: 16-čer-2020]

[47] S. H. Lee a X. Li, „Study of the surface integrity of the machined workpiece in the EDM of tungsten carbide", *Journal of Materials Processing Technology*, roč. 139, č. 1, s. 315–321, srp. 2003, doi: 10.1016/S0924-0136(03)00547-8.

[48] R. Wrtheim, „New Directions in Cutting Tool Materials and Machining Options" [Online]. Dostupné z: <https://slideplayer.com/slide/10297191/>. [Viděno: 01-čvc-2020]

[49] CERATIZIT S.A., „Carbide grades", *Ceratizit.com*. [Online]. Dostupné z: <https://www.ceratizit.com/en/products/rods-preforms/carbide-grades/>. [Viděno: 01-čvc-2020]

[50] Sandvik Coromant, „Výpočtové vztahy a definice pro všeobecné soustružení", *sandvik.coromant.com*. [Online]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com:443/cs-cz/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/general-turning.aspx>. [Viděno: 02-čvc-2020]

PŘÍLOHA č. 1

Materiálový list obráběného materiálu – Inconel 718

WTE POWERSTEEL s.r.o
 Pražská 449
 Kostelec nad Čer. Lesy
 281 63

Západočeská univerzita v Plzni
 Univerzitní 8
 306 14 PLZEŇ

**CERTIFICATE
 OF CONFORMITY**

Certificate No: **18982**

	017971-4-1	Requirements
	Z-718-00000540	Alloy 718 Solution Annealed Aged Machined 57.150mm Dia Bar. 1000mm cut length.
	P015172	
Purchase Order	2114/0163/15	
Part Reference	21 1009	Specifications
Cast Number	603557	NACEMR0175 REV: 2009(E)
Melt Practice	VMMAR	
Incoming Certificate	984556	Shipped 1 EA

Chemical Analysis

C %	Si %	Mn %	P %	S %	Al %	B %	Bi %	Ca %
0.020	0.06	0.08	0.008	<.001	0.50	0.0037	<.00003	0.0002
Co %	Cr %	Cu %	Fe %	Mg %	Mo %	Ni %	Pb %	Se %
0.20	18.32	0.06	18.52	0.0021	2.88	53.02	<.0003	<.0003
Ti %	NbTa %							
0.97	4.90							

Combined Element Codes

NbTa: Nb+Ta

Mechanical Properties

Tensile Tests	Results	Units	Temp	Specification	Location	Direction	Tested On
0.2% PS	903	MPa	20 degC			Longitudinal	
UTS	1227	MPa					
Elongation	29	%					
Reduction of Area	46	%					

Gauge Length 2 inches

Impact Tests	Results	Units	Temp	Specification	Location	Direction	Test Type
Absorbed Energy	115 107 112	Joules	-75 degF			Longitudinal	Charpy V-notch energy
Lateral Expansion	1.143 1.092 1.143	mm					
Shear	30 30 30	%					

Hardness Tests	Results	Units	Specification	Location	Performed On
Rockwell C	39 37 39	HRC	ASTM E18		

Hardness Test Records, In accordance with NACE MR0175/ISO 15156, Furnace Charts, Mill Cert, Grain Size 3.0, Macro Examination No worse than severity A for all 4 classes, Forge Reduction 38:1, Micrograph Images 100X & 500X, Duplex Grains No topological duplex grains as per ASTM E1181, Deleterious Phases Free from continuous networks of secondary phases, acicular delta phase and laves phase, No Weld Repair, Micro Examination 100X & 500X

Heat Treatments

Heat treatment performed on Batch

Monitoring Method: Heatsink Thermocouple, Solution Annealed 1032 degC 1.5 Hours, Water Quench, Aged 782 degC 7 Hours, Air Cool

**VERIFIED TRUE
 COPY OF
 ORIGINAL MILL
 CERTIFICATE

 SIGNED**

WTE PowerSteel s.r.o.
 Pražská 449, 281 63 Kostelec n. Č. l.
 IČ: 29147450, DIČ: CZ29147450
 Email: info@powersteel.eu

PŘÍLOHA č. 2

Informace o řezném materiálu – Slinutý karbid CTS20D

Carbide: Grades

Composition and Properties

CERATIZIT grade code	ISO code	U.S. code	Binder [m %]	Density [g/cm ³]	Hardness HV30	Hardness HRA	Transverse rupture strength		K _{IC} * (Shetty)
							[MPa]	[psi]	[MPa*m ^{1/2}]

Ultrafine grades

CTU08L	K10	C-2	4.2	15.05	2200	95.2	3700	536.600	8.4
TSF22	K10 – K20	C-2	8.2	14.55	1930	93.7	4400	638.800	9.2
TSF44	K10 – K20	C-2	12.0	14.10	1730	92.7	4600	667.000	9.8

Submicron grades

CTS12D	K05 – K10	C-3	6.0	14.80	1820	93.1	3600	522.100	9.3
CTS15D	K10 – K30	C-3	7.5	14.70	1750	92.8	3700	536.000	9.5
CTS18D	K20 – K40	C-2	9.0	14.55	1590	91.9	3650	529.400	10.7
CTS20D	K20 – K40	C-2	10.0	14.38	1600	91.9	4000	580.100	10.4
CTS25D	K20 – K40	C-2	12.5	14.13	1540	91.5	4300	623.700	11.8
CTS30D	K30 – K40	C-2	15.0	13.84	1400	90.4	4300	623.700	13.2
CTS20Z	K20 – K40	C-2	10.0	14.50	1590	91.9	3700	536.000	9.4
CTS24Z	K20 – K40	C-2	12.0	14.10	1570	91.7	4000	580.100	11.3

Fine grades

CTF12E	K15	C-2	6.0	14.95	1620	92.1	2200	319.100	9.9
CTF25E	K30 – K40	C-2	12.5	14.15	1300	89.5	3500	507.600	15.0
CTF12A	K15	C-2	6.0	15.00	1630	92.1	2600	377.000	10.2

Cermet grade

CTF28T	K05 – K10	C-2	14.1	6.40	1580	91.8	2000	290.100	8.5
--------	-----------	-----	------	------	------	------	------	---------	-----

Grain size classification

Average grain size [μm]	Classification	CERATIZIT code
< 0.2	nano	N
0.2 – < 0.5	ultrafine	U
0.5 – < 0.8	submicron	S
0.8 – < 1.3	fine	F
1.3 – < 2.5	medium	M
2.5 – < 6.0	coarse	C
> 6.0	extra-coarse	E

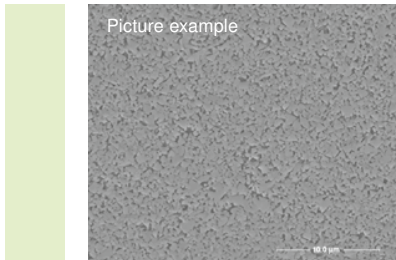
The classification of carbides according to grain size corresponds to the recommendations of the Powder Metallurgy Association. The standard ISO codes for carbides which were developed for fine to medium grain sizes no longer correspond to today's state of the art. In order to choose the correct grades, only the application data are relevant.

Comment:

1. The data in this table are typical material parameters. We reserve the right to modify the data due to technical progress or due to further development within our company.
2. K_{IC}*: The measured critical tension intensity factors (K_{IC}) depend to a high degree on the sample geometry and sample preparation. A direct comparison with parameters which have been determined by means of a different method is therefore not admissible.

Grade Description

Ultrafine grades

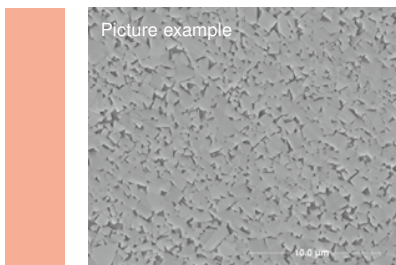


CTU08L: grade with a typical grain size of 0.2 µm for the machining of materials with a hardness > 65 HRC. Thanks to the high wear resistance also excellent suitability for abrasive fiber composite materials.

TSF22: grade for HSC machining of tempered steels with a hardness of > 60 HRC and abrasive aluminium alloys.

TSF44: grade for HSC machining of tempered steels up to 60 HRC, suitable for micro- and finishing tools and for a variety of materials.

Submicron grades



CTS12D: grade for machining aluminium alloys, fiber-reinforced plastics (carbon-fiber and glass-fiber reinforced), composite materials, graphite; particularly suitable for diamond coating.

CTS15D: grade for machining grey cast iron, tempered cast iron, non alloyed steel, non-ferrous metals and plastics.

CTS18D: grade for high-performance machining of steel, stainless steel and the machining of difficult to machine materials, for example titanium or Inconel.

CTS20D: grade for the universal machining of alloyed and non alloyed steels, titanium alloys and nickel-based alloys. Improved toughness ensures a reduced risk of ruptures on the cutting edges.

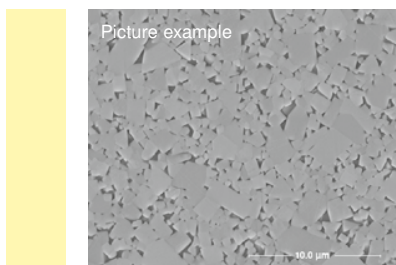
CTS25D: grade with high toughness for the machining of difficult materials and under unfavorable conditions.

CTS30D: grade with very high toughness for difficult machining conditions.

CTS20Z: grade for rotating solid carbide tools. For machining stainless steels, acid and heat-resistant steels, chromium alloyed steels, nickel & cobalt alloyed steels, titanium alloys, non ferrous metals, plastics.

CTS24Z: grade for improved machining of titanium alloys and stainless steels as well as increased drilling performance in alloy steels.

Fine grain grades

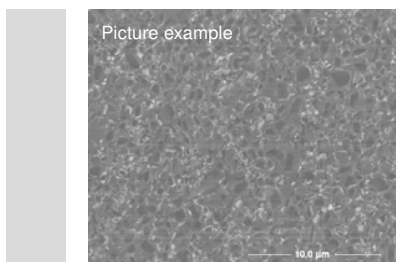


CTF12E: grade for gun drills with an adapted relation between hardness and toughness. Suitable also for diamond-coated solid carbide tools.

CTF25E: grade for the production of PCD tools and tool shanks. The increased cobalt content and the coarser grain improve brazability while increasing fracture toughness.

CTF12A: grain grade for solid carbide tools with diamond coating. Excellent suitability for the machining of graphite and aluminum with a high silicon content.

Cermet



CTF28T: grade particularly for the finish machining of steel. Thanks to high oxidation resistance and low tendency to stick it is particularly suitable for the production of uncoated reamers.

Change of generations in the field of submicron grades

The growing demands in the field of precision tools have led us to develop the CTS grade line with newly adapted binder compositions, which convincingly demonstrate improved toughness and increased heat resistance.

show higher transverse rupture strength and increased resistance to edge chipping.

From April 2013 on we will be steadily upgrading our stock program of rods and preforms to the new grade CTS20D!

CTS20D – the universal one

The new carbide grade CTS20D successfully unites and improves upon the tried and tested properties of MG18 and TSM33. Practical tests show that carbide rods in CTS20D

CTS20D	
Cobalt content:	10%
Hardness:	1600 HV30
Transverse rupture strength:	> 4000 MPa
K _{IC} :	10.4
Grain size:	0.7 μm

MG18	
Cobalt content:	10%
Hardness:	1660 HV30
Transverse rupture strength:	> 3700 MPa
K _{IC} :	9.4
Grain size:	0.7 μm

TSM33	
Cobalt content:	10%
Hardness:	1590 HV30
Transverse rupture strength:	> 3700 MPa
K _{IC} :	9.4
Grain size:	0.7 μm

- Improved toughness thanks to adaptation of binder composition
- Increased transverse rupture strength
- Optimized hardness

PŘÍLOHA č. 3

Materiálový list oceli – EOS MaragingSteel MS1

Material data sheet

EOS MaragingSteel MS1

EOS MaragingSteel MS1 is a steel powder which has been optimized especially for processing on EOSINT M systems.

This document provides information and data for parts built using EOS MaragingSteel MS1 powder (EOS art.-no. 9011-0016) on the following system specifications:

- EOSINT M 270 Installation Mode *Standard*
with PSW 3.3 or 3.4 and default job MS1_020_default.job or MS1_040_default.job
- EOSINT M 270 Dual Mode
with PSW 3.5 and EOS Original Parameter Set MS1_Surface 1.0 or MS1_Performance 2.0
- EOSINT M 280
with PSW 3.5 and EOS Original Parameter Set MS1_Performance 1.0 or MS1_Speed 1.0

Description

Parts built in EOS MaragingSteel MS1 have a chemical composition corresponding to US classification 18% Ni Maraging 300, European 1.2709 and German X3NiCoMoTi 18-9-5. This kind of steel is characterized by having very good mechanical properties, and being easily heat-treatable using a simple thermal age-hardening process to obtain excellent hardness and strength.

Parts built from EOS MaragingSteel MS1 are easily machinable after the building process and can be easily post-hardened to more than 50 HRC by age-hardening at 490 °C (914 °F) for 6 hours. In both as-built and age-hardened states the parts can be machined, spark-eroded, welded, micro shot-peened, polished and coated if required. Due to the layerwise building method, the parts have a certain anisotropy, which can be reduced or removed by appropriate heat treatment - see Technical Data for examples.

Material data sheet

Technical data

General process data

Typical achievable part accuracy [1]	
- small parts (< 80 x 80 mm)	approx. $\pm 20 \mu\text{m}$ approx. $\pm 0.8 \times 10^{-3}$ inch
- large parts	approx. $\pm 50 \mu\text{m}$ approx. ± 0.002 inch
Age hardening shrinkage [2]	approx. 0.08 %
Min. wall thickness [3]	approx. 0.3 - 0.4 mm approx. 0.012 - 0.016 inch
Surface roughness (approx.) [4]	
- as manufactured	
MS1 Surface (20 μm)	R_a 4 μm ; R_z 20 μm R_a 0.16×10^{-3} inch, R_z 0.78×10^{-3} inch
MS1 Performance (40 μm)	R_a 5 μm ; R_z 28 μm R_a 0.19×10^{-3} inch, R_z 1.10×10^{-3} inch
MS1 Speed (50 μm)	R_a 9 μm ; R_z 50 μm R_a 0.47×10^{-3} inch, R_z 2.36×10^{-3} inch
- after shot-peening	R_a 4 - 6.5 μm ; R_z 20 - 50 μm R_a 0.16 - 0.26×10^{-3} inch R_z 0.78 - 1.97×10^{-3} inch
- after polishing	R_z up to < 0.5 μm R_z up to < 0.02×10^{-3} inch (can be very finely polished)

Material data sheet

Volume rate [5]

- Parameter set MS1_Surface 1.0 / default job MS1_020_default.job (20 µm layer thickness)	1.6 mm ³ /s (5.8 cm ³ /h) 0.35 in ³ /h
- Parameter set MS1_Performance 2.0 / default job MS1_040_default.job (40 µm layer thickness)	3 mm ³ /s (10.8 cm ³ /h) 0.66 in ³ /h
- Parameter set MS1_Performance 1.0 / for M 280 / 400 W (40 µm layer thickness)	4.2 mm ³ /s (15.1 cm ³ /h) 0.92 in ³ /h
- Parameter set MS1_Speed 1.0 / for M 280 / 400 W (50 µm layer thickness)	5.5 mm ³ /s (19.8 cm ³ /h) 1.21 in ³ /h

- [1] Based on users' experience of dimensional accuracy for typical geometries, as built. Part accuracy is subject to appropriate data preparation and post-processing, in accordance with EOS training.
- [2] Ageing temperature 490 °C (914 °F), 6 hours, air cooling
- [3] Mechanical stability is dependent on geometry (wall height etc.) and application
- [4] Due to the layerwise building, the surface structure depends strongly on the orientation of the surface, for example sloping and curved surfaces exhibit a stair-step effect. The values also depend on the measurement method used. The values quoted here given an indication of what can be expected for horizontal (up-facing) or vertical surfaces.
- [5] Volume rate is a measure of build speed during laser exposure of hatched areas. The total build speed depends on the average volume rate, the recoating time (related to the number of layers) and other geometry- and machine setting-related factors.

Material data sheet

Physical and chemical properties of parts

Material composition	Fe (balance) Ni (17 - 19 wt-%) Co (8.5 - 9.5 wt-%) Mo (4.5 - 5.2 wt-%) Ti (0.6 - 0.8 wt-%) Al (0.05 - 0.15 wt-%) Cr, Cu (each \leq 0.5 wt-%) C (\leq 0.03 wt-%) Mn, Si (each \leq 0.1 wt-%) P, S (each \leq 0.01 wt-%)
Relative density	approx. 100 %
Density	8.0 - 8.1 g/cm ³ 0.289 - 0.293 lb/in ³

Material data sheet

Mechanical properties of parts at 20 °C (68°F)

	As built	After age hardening [2]
Tensile strength [6]		min. 1930 MPa min. 280 ksi
- in horizontal direction (XY)	typ. 1100 ± 100 MPa typ. 160 ± 15 ksi	typ. 2050 ± 100 MPa typ. 297 ± 15 ksi
- in vertical direction (Z)	typ. 1100 ± 100 MPa typ. 160 ± 15 ksi	
Yield strength (Rp 0.2 %) [6]		min. 1862 MPa min. 270 ksi
- in horizontal direction (XY)	typ. 1050 ± 100 MPa typ. 152 ± 15 ksi	typ. 1990 ± 100 MPa typ. 289 ± 15 ksi
- in vertical direction (Z)	typ. 1000 ± 100 MPa typ. 145 ± 15 ksi	
Elongation at break [6]		min. 2 %
- in horizontal direction (XY)	typ. (10 ± 4) %	typ. (4 ± 2) %
- in vertical direction (Z)	typ. (10 ± 4) %	
Modulus of elasticity [6]		
- in horizontal direction (XY)	typ. 160 ± 25 GPa typ. 23 ± 4 Msi	typ. 180 ± 20 GPa typ. 26 ± 3 Msi
- in vertical direction (Z)	typ. 150 ± 20 GPa typ. 22 ± 3 Msi	
Hardness [7]	typ. 33 - 37 HRC	typ. 50 - 56 HRC
Ductility (Notched Charpy impact test)	typ. 45 ± 10 J	typ. 11 ± 4 J

[6] Tensile testing according to ISO 6892-1:2009 (B) Annex D, proportional test pieces, diameter of the neck area 5mm (0.2 inch), original gauge length 25mm (1 inch).

[7] Rockwell C (HRC) hardness measurement according to EN ISO 6508-1 on polished surface. Note that measured hardness can vary significantly depending on how the specimen has been prepared.

Material data sheet

Thermal properties of parts

	As built	After age hardening [2]
Thermal conductivity	typ. $15 \pm 0.8 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ typ. $104 \pm 6 \text{ Btu in/(h ft}^2 \text{ }^\circ\text{F)}$	typ. $20 \pm 1 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ typ. $139 \pm 7 \text{ Btu in/(h ft}^2 \text{ }^\circ\text{F)}$
Specific heat capacity	typ. $450 \pm 20 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ typ. $0.108 \pm 0.005 \text{ Btu/(lb }^\circ\text{F)}$	typ. $450 \pm 20 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ typ. $0.108 \pm 0.005 \text{ Btu/(lb }^\circ\text{F)}$
Maximum operating temperature		approx. $400 \text{ }^\circ\text{C}$ approx. $750 \text{ }^\circ\text{F}$

Abbreviations

typ.	typical
min.	minimum
approx.	approximately
wt	weight

Notes

The data are valid for the combinations of powder material, machine and parameter sets referred to on page 1, when used in accordance with the relevant Operating Instructions (including Installation Requirements and Maintenance) and Parameter Sheet. Part properties are measured using defined test procedures. Further details of the test procedures used by EOS are available on request. Unless otherwise specified, the data refer to the default job MS1_040_default.job or the equivalent parameter set MS1_Performance 2.0. The corresponding data for the default job MS1_020_default.job or the equivalent parameter set MS1_Surface 1.0 are approximately the same except where otherwise specified.

The data correspond to our knowledge and experience at the time of publication. They do not on their own provide a sufficient basis for designing parts. Neither do they provide any agreement or guarantee about the specific properties of a part or the suitability of a part for a specific application. The producer or the purchaser of a part is responsible for checking the properties and the suitability of a part for a particular application. This also applies regarding any rights of protection as well as laws and regulations. The data are subject to change without notice as part of EOS' continuous development and improvement processes.

EOS[®], EOSINT[®] and DMLS[®] are registered trademarks of EOS GmbH.

© 2011 EOS GmbH – Electro Optical Systems. All rights reserved.