

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B0715A270013 Strojní inženýrství

Studijní specializace: Strojírenská technologie – technologie obrábění

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Zvýšení produktivity výroby otvorů nástroji s VBD vyrobených 3D tiskem

Autor: **Ladislav TUŠL**

Vedoucí práce: **Doc. Ing. Miroslav ZETEK, Ph.D.**

Akademický rok 2021/2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2021/2022

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Ladislav TUŠL**  
Osobní číslo: **S21B0044P**  
Studijní program: **B0715A270013 Strojní inženýrství**  
Specializace: **Strojírenská technologie-technologie obrábění**  
Téma práce: **Zvýšení produktivity výroby otvorů nástroji s VBD vyrobených 3D tiskem**  
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

## Zásady pro vypracování

1. Úvod
2. Rozbor současného stavu
3. Návrh a realizace vlastního řešení
4. Závěr

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**  
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- BIAN, Linkan, Nima SHAMSAEI a John M. USHER. *Laser-based additive manufacturing of metal parts : modeling, optimization, and control of mechanical properties*. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2018. ISBN 978-1-4987-3998-6.
- CHUA, Chee Kai. *3D printing and additive manufacturing : principles and applications*. New Jersey: World Scientific, 2015. ISBN 978-981-4571-41-8.
- ASTAKHOV, Viktor P. *Drills : science and technology of advanced operations*. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis, 2014. ISBN 978-1-4665-8434-1.
- BRYCHTA, Josef. *Progresivní technologie v obrábění a NC programování obráběcích strojů*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3522-8.
- KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**  
Katedra technologie obrábění

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Tomáš Bakša**  
Regionální technologický institut

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2021**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **27. května 2022**

L.S.

---

**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 práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

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

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval panu doc. Ing. Miroslavu Zetkovi, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce, cenné rady a odborný dohled. Mé poděkování patří též panu Ing. Tomáši Bakšovi za trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování bakalářské práce věnoval.

## ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Tušl	<b>Jméno</b> Ladislav	
<b>STUDIJNÍ PROGRAM</b>	Strojní inženýrství B0715A270013		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Doc. Ing. Zetek, Ph.D.	<b>Jméno</b> Miroslav	
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU – FST – KTO		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Zvýšení produktivity výroby otvorů nástroji s VBD vyrobených 3D tiskem		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KTO	<b>ROK ODEVZD.</b>	2022
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	51	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	51	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS</b>	Teoretická část bakalářské práce se zaměřuje na výzkum v oblasti chladičích kanálů řezných nástrojů a na úpravu řezné části vrtacích nástrojů. Pro inspiraci a zamyšlení je nahlédnuto do sortimentu světových strojírenských firem, zabývajících se výrobou řezných nástrojů. Cílem praktické části bakalářské práce byl konstrukční návrh vrtacího nástroje a návrh různých typů chladičích kanálů, jejich výroba a testování.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>	Vrták s VBD, Konstrukce, Chladičí kanál, Aдитivní výroba, Obrábění

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	<b>Surname</b> Tušl	<b>Name</b> Ladislav		
<b>STUDY PROGRAMME</b>	Mechanical Engineering B0715A270013			
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname (Inclusive of Degrees)</b> Doc. Ing. Zetek, Ph.D.	<b>Name</b> Miroslav		
<b>INSTITUTION</b>	ZČU – FST – KTO			
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>	
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Increase in productivity of hole production by using tools with indexable inserts made by 3D printing			

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KTO	<b>SUBMITTED IN</b>	2022
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	51	<b>TEXT PART</b>	51	<b>GRAPHICAL PART</b>	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION</b>	The theoretical part of the bachelor's thesis focuses on research in the field of cooling channels of cutting tools and on the modification of the cutting part of drilling tools. For inspiration and reflection, is viewed at the range of global engineering companies engaged in the production of cutting tools. The aim of the practical part of the bachelor's thesis was the construction plan of the drilling tool and construction plan of other variants with different cooling systems, their production and testing.
<b>KEY WORDS</b>	Drill with indexable inserts, Construction, Cooling channel, Additive manufacturing, Machining

## Obsah

Přehled použitých zkratk a symbolů	9
Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	12
1 Úvod	13
2 Rozbor současného stavu	14
2.1 Technologie vrtání	14
2.1.1 Kinematika vrtání	14
2.1.2 Vnitřní přívod procesní kapaliny	15
2.1.3 Vnější přívod procesní kapaliny	15
2.2 Vliv konstrukce chladicího kanálu na kvalitu vrtu	15
2.2.1 Vyhodnocení opotřebení VBmax na dráze vrtání	16
2.2.2 Hodnocení kvality otvoru	17
2.3 Zlepšení řezného výkonu za pomoci mikrodrážek	19
2.3.1 Velikost vrtací síly	19
2.3.2 Trvanlivost nástroje	20
2.3.3 Tvar třísek	20
2.3.4 Opotřebení nástroje	21
2.4 Poznatky od firem	23
2.4.1 Tlak a průtok procesní kapaliny	23
2.4.2 Problémy s tvorbou třísky	24
2.4.3 Nový typ chladicího kanálu od firmy Gühring a Mapal	25
2.4.3.1 Gühring	25
2.4.3.2 Mapal	25
3 Návrh a realizace vlastního řešení	26
3.1 Uvedení do problematiky	26
3.1.1 Výběr referenčního nástroje	26
3.1.2 Návrh variant řešení	27
3.2 Zhotovení první varianty	27
3.2.1 Reverzní inženýrství	27
3.2.2 Konstrukce modelu vrtáku	29
3.2.3 Konstrukce modelu vrtáku, upraveného pro 3D tisk a následné obrábění	30
3.2.4 Přípravení dat a samotný 3D tisk	32
3.2.5 Obrábění	36
3.3 Opětovné zhotovení první varianty společně s dalšími variantami	37
3.3.1 Úprava modelu pro 3D tisk	37
3.3.2 Konstrukce variant chladicích kanálů	38
3.3.2.1 Varianta s větším průměrem chladicího kanálu (2,9 mm)	38
3.3.2.2 Varianta s trojúhelníkovými chladicími kanály	39
3.3.2.3 Varianta s kapovitými tvary chladicích kanálů	39
3.3.3 Samotný 3D tisk	40
3.3.4 Obrábění	42
3.4 Testování funkčnosti vrtáků	44



3.4.1	Výběr variant pro testování	44
3.4.2	Výběr parametrů a řezných podmínek	45
3.4.3	Příprava materiálu, určeného k testování	45
3.4.4	Průběh testu a jeho výsledek	45
4	Závěr	49
	Zdroje	50

## Přehled použitých zkratk a symbolů

D	Průměr vrtáku
HP	Vrták s upravenou hřbetní plochou
ČP	Vrták s upravenou čelní plochou
VB	Šířka opotřebení hřbetu
REF	Referenční nástroj
SEM	Snímací, elektronový mikroskop
EDS	Energeticky disperzní rentgenová spektroskopie
VBD	Vyměnitelná břitová destička
BP	Bakalářská práce
1:1	Označení identického vrtáku v porovnání s referencí
RTI	Regionální technologický institut
CAD	Computer aided design (Počítačová podpora v konstruování)
LTO	Laboratoř technologie obrábění

## Seznam obrázků

Obr. 1: Šroubovitý vrták [4].....	14
Obr. 2: Kinematika vrtání [5].....	14
Obr. 3: Vnitřní přívod procesní kapaliny [7].....	15
Obr. 4: Vnější přívod procesní kapaliny [7].....	15
Obr. 5: Podmínky výstupu chladicího kanálu [6] .....	16
Obr. 6: Maximální opotřebení (VBmax) na dráze vrtání [6].....	17
Obr. 7: Drsnost povrchu RZ a Rmax v závislosti na stavu opotřebení a typu vrtacího nástroje [6] .....	18
Obr. 8: Kruhovitost a průměr vrtu v závislosti na podmínkách výstupu chladicího kanálu [6] .....	18
Obr. 9: Vrták s upravenou čelní plochou (a) a vrták s upravenou hřbetní plochou (b) [9].....	19
Obr. 10: Vrtací síly při řezné rychlosti 62,8 m/min [9].....	19
Obr. 11: Křivky opotřebení nástrojů [9].....	20
Obr. 12: Měření stoupání třísek [9].....	20
Obr. 13: Tvary třísek při řezné rychlosti 62,8 m/min [9] .....	21
Obr. 14: SEM mikrofotografie a EDS analýza plochy čela referenčního nástroje [9].....	21
Obr. 15: SEM mikrofotografie a EDS analýza plochy čela u nástroje ČP [9].....	22
Obr. 16: SEM mikrofotografie hřbetní plochy u referenčního nástroje [9] .....	22
Obr. 17: SEM mikrofotografie hřbetní plochy nástroje HP [9] .....	23
Obr. 18 Průtok chladicí kapaliny [8].....	23
Obr. 19: Tlak chladicí kapaliny [8] .....	24
Obr. 20: Pěchování dlouhých třísek [8] .....	24
Obr. 21: Pěchování krátkých třísek [8] .....	24
Obr. 22: Vrták RT 100 TRIGON od firmy Gühring [13] .....	25
Obr. 23: Vrták QTD INDEXEABLE INSERT DRILL od firmy Mapal [16] .....	25
Obr. 24: Referenční nástroj od firmy Innotool.....	26
Obr. 25: Použitá VBD SHLT060204N-PH [18] .....	27
Obr. 26: Základní rozměry vrtáku [18] .....	27
Obr. 27: Měřicí stroj Zoller genius 3 – hala RTI .....	28
Obr. 28: Skenování geometrie vrtáku .....	28
Obr. 29: Základ vrtáku .....	29
Obr. 30: Vytváření drážek, lůžek a vrcholu vrtáku .....	29
Obr. 31: Konstrukce upínací části a chladicích kanálů vrtáku (dokončení).....	30
Obr. 32: Znázornění přídavků na obrábění .....	30

Obr. 33: Vlevo skutečný tvar vnějšího lůžka z čelního a bočního pohledu, vpravo s přídávky bez upínacího průměru .....	31
Obr. 34: Tvorba podpory dosedací plochy s odstraněním zápichu .....	31
Obr. 35: Tvorba upínacího čepu.....	32
Obr. 36: Prověření tisknutelnosti v programu Magics .....	33
Obr. 37: Platforma.....	33
Obr. 38: Ustavení modelů na platformu.....	34
Obr. 39: 3D tiskárna EOS M290 – laboratoř RTI.....	34
Obr. 40: Vyhodnocení doby tisku .....	35
Obr. 41: Znázornění vrtáků po 3D tisku (vlevo) a po žihání (vpravo).....	35
Obr. 42: Univerzální hrotová bruska URS 500 N – brusárna RTI.....	36
Obr. 43: Vrtáky po broušení.....	37
Obr. 44: Vlevo původní model pro 3D tisk, vpravo upravený.....	38
Obr. 45: Vrták 1:1 vlevo, vrták s větším průměrem chladicích kanálů vpravo .....	38
Obr. 46: Skica profilu trojúhelníkového kanálu a výsledná třetí varianta vrtáku .....	39
Obr. 47: Skica profilu kapsovitého kanálu a výsledná čtvrtá varianta vrtáku.....	40
Obr. 48: Ustavení modelů na platformu s použitím ohrádky.....	40
Obr. 49 Platforma s vrtáky po 3D tisku .....	41
Obr. 50: Vrtáky po tepelném zpracování, připraveny na obrábění .....	41
Obr. 51: Vrtáky po broušení.....	42
Obr. 52: Opticko-skenovací zařízení IFM G4 – laboratoř RTI.....	42
Obr. 53: Zjišťování stoupání závitu .....	43
Obr. 54: Obráběcí centrum DMU 65 monoBLOCK – Vědeckotechnický park v Plzni [17]..	43
Obr. 55: Vrtáky po obrobení a zbylé tři neobrobené vrtáky .....	44
Obr. 56: Testované vrtáky .....	44
Obr. 57: Materiál, připravený pro obrábění .....	45
Obr. 58: Jedna ze tří variant vrtáku, připravená na test.....	46
Obr. 59: Výsledek testu.....	46
Obr. 60: Drsnoměr Mahr MarSurf LD 120 – laboratoř KTO .....	47
Obr. 61: Měření drsnosti u poslední díry vyvrtané vrtákem 1:1 .....	48
Obr. 62: Porovnání třísek .....	48

## Seznam tabulek

Tab. 1: Řezné podmínky .....	45
Tab. 2: Výsledky testu.....	47

## 1 Úvod

V současné době jsou řezné nástroje při samotném obrábění vystavovány čím dál tím vyšším nárokům, které jsou úzce spjaty s výslednou kvalitou obráběné součásti. V hromadné výrobě hraje velice důležitou roli čas, který je potřeba zkrátit na minimum. Tento požadavek, má tedy za následek potřebu co nejrychlejšího obrobění součásti, a tudíž použití velice kvalitního nástroje. S rostoucími požadavky na nástroje, roste i požadavek na výrobu řezných nástrojů. Vývoj řezných nástrojů a současně i jejich výroba se zdá být velice zajímavou oblastí pro zpracování závěrečné práce.

Teoretická část bakalářské práce slouží k rozšíření informací v oblasti řezných nástrojů. Čtenáři je nejprve přiblížena technologie vrtání. Následně jsou zde popsány zajímavé výsledky výzkumu, týkající se optimalizace tvaru chladicích kanálů, pro vnitřní přívod procesní kapaliny a drobné úpravě řezné části vrtacích nástrojů. V poslední řadě je nahlédnuto do vývojové tendence světových strojírenských firem, zabývajících se výrobou řezných nástrojů.

Podstatnou část bakalářské práce tvoří její praktická část. V tomto případě je zaměřena na konstrukci vrtacího nástroje a jeho dalších alternativ. Prvotní etapa výroby vrtacích nástrojů byla s použitím technologie 3D tisku kovů. Tato technologie musela být při samotné konstrukci vrtáků zohledněna. Následovaly další způsoby výroby, spadající do technologií třískového obrábění. Na závěr byla ověřena funkčnost vrtacích nástrojů.

## 2 Rozbor současného stavu

### 2.1 Technologie vrtání

Vrtání se řadí mezi technologie třískového obrábění, které slouží pro zhotovení děr do plného nebo již předvrtaného (předlitého, předlisovaného, předkovaného) materiálu pomocí nástroje, který se nazývá vrták. [1] "

Jedním z důležitých faktorů u vrtání je to, zda se jedná o průchozí či slepou díru. Průchozí díry jsou z hlediska výroby méně komplikované než díry slepé, jelikož u slepé díry je třeba brát v potaz několik faktorů, kterými jsou – hloubka dané díry, tvar dna díry, odstranění třísek ze dna díry. [1]

Vrtání se zpravidla uskutečňuje v konečné fázi výroby. Z tohoto důvodu je vrtání považováno za rozhodující, protože cena součásti výrazně stoupla následkem předchozích úkonů. Případný kolaps vrtacího nástroje, který je používán na hranici svých možností, může mít fatální následky na výsledné součásti. [2][3]



Obr. 1: Šroubovitý vrták [4]

#### 2.1.1 Kinematika vrtání

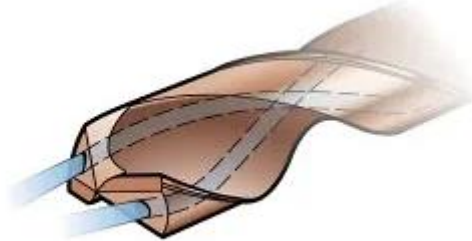
Kinematika vrtání se skládá z kombinace dvou řezných pohybů – hlavní řezný pohyb a vedlejší řezný pohyb. Hlavní řezný pohyb je rotační a vykonává ho nástroj (vrták), v některých případech vykonává hlavní řezný pohyb obrobek (soustružení). Vedlejší řezný pohyb je posuvný (axiální posuv) a vykonává ho opět nástroj. [1]



Obr. 2: Kinematika vrtání [5]

### 2.1.2 Vnitřní přívod procesní kapaliny

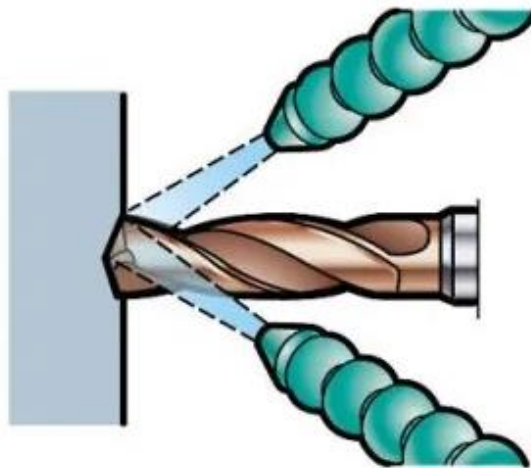
Vrtací proces probíhá uvnitř obrobku (v díře), což ztěžuje poskytnutí dostatečného množství chladicí kapaliny do místa řezu. Z tohoto důvodu se nejčastěji používají vrtáky ze slinutého karbidu s vnitřními chladicími kanály. [6]



Obr. 3: Vnitřní přívod procesní kapaliny [7]

### 2.1.3 Vnější přívod procesní kapaliny

V případě, že jsme omezeni pouze na vnější chlazení, doporučuje se vrtání omezit pouze na malé hloubky děr ( $1,5 \times D$ ), při správném utváření třísek. Trysky umístíme tak, aby byli co nejlépe souosé s vrtákem. [7], [8]



Obr. 4: Vnější přívod procesní kapaliny [7]

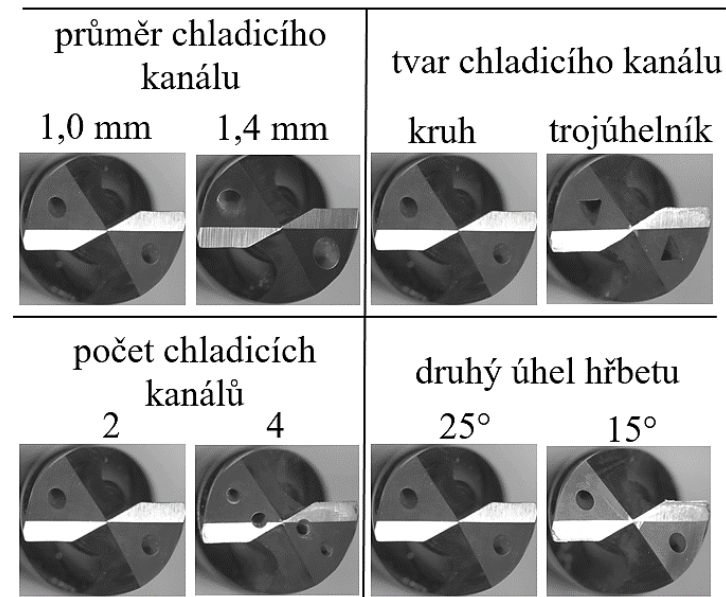
## 2.2 Vliv konstrukce chladicího kanálu na kvalitu vrtu

Následující stránky budou věnovány výzkumu, který provedli Daniel Müller, Andreas Lange, Benjamin Kirsch a Jan C. Aurich. Jejich výzkum se zaměřoval na konstrukci chladicího kanálu společně s druhým úhlem hřbetu a následný dopad na životnost vrtacího nástroje. [6]



Pro porovnání bylo zvoleno těchto pět typů vrtáků:

1. Referenční vrták s druhým úhlem hřbetu  $25^\circ$ , průměrem chladicího kanálu 1 mm a vzdáleností od osy chladicích kanálu k ose vrtáku 5,2mm.
2. Vrták s chladicím kanálem o větším průměru 1,4mm.
3. Vrták se sníženým druhým úhlem hřbetu  $15^\circ$ .
4. Vrták se čtyřmi chladicími kanály.
5. Vrták s chladicími kanály trojúhelníkového tvaru. [6]



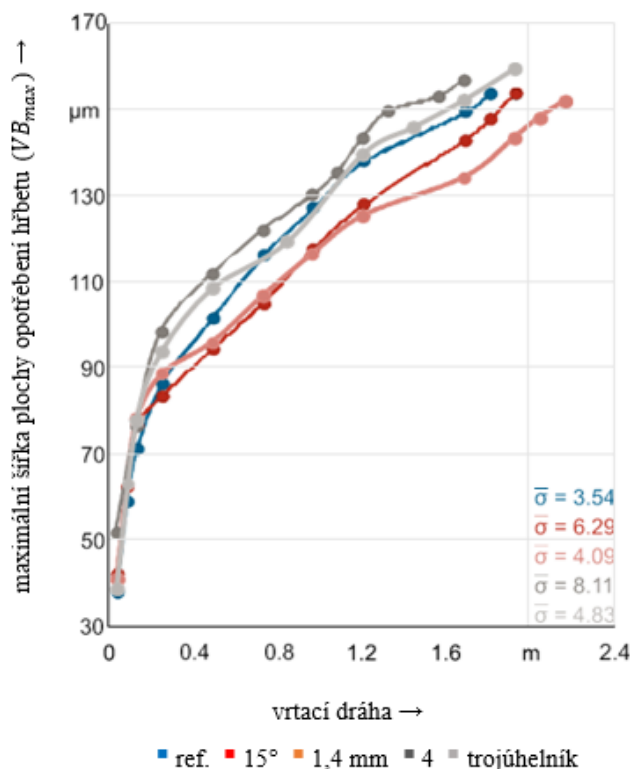
Obr. 5: Podmínky výstupu chladicího kanálu [6]

### 2.2.1 Vyhodnocení opotřebení $VB_{max}$ na dráze vrtání

Po stanovené  $VB_{max} = 150 \mu\text{m}$  dosáhl vrták s průměrem chladicího kanálu 1,4 mm nejvyššího prodloužení trvanlivosti nástroje o 23 % ve srovnání s referenčním nástrojem. Vrták s druhým úhlem hřbetu  $15^\circ$  prodlužuje životnost nástroje o 11 %. [6]

Naproti tomu vrták se čtyřmi chladicími kanály zkracuje trvanlivost v porovnání s referenčním nástrojem o 20 % a vrták s chladicími kanály ve tvaru trojúhelníka má o 13 % kratší trvanlivost. [6]

Výsledky maximální šířky otěrové plochy hřbetu na dráze vrtání jsou znázorněny na Obr. 6. [6]



Obr. 6: Maximální opotřebení ( $VB_{max}$ ) na dráze vrtání [6]

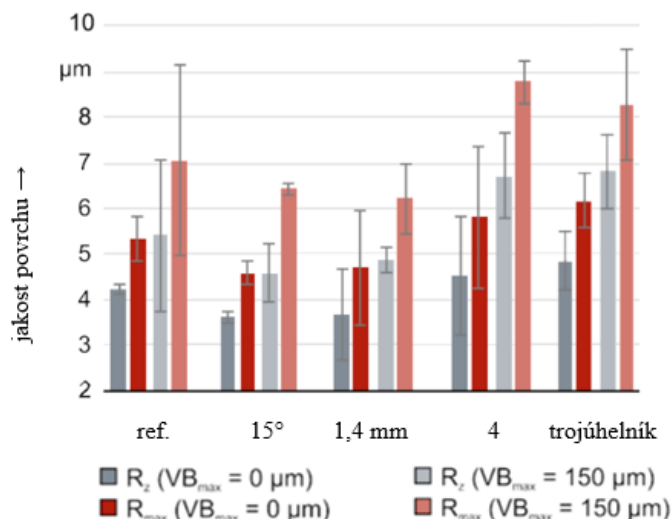
## 2.2.2 Hodnocení kvality otvoru

Při zjišťování jakosti povrchu byla stanovena průměrná drsnost povrchu ( $R_Z$ ) a maximální drsnost povrchu ( $R_{max}$ ). Obr. 7 znázorňuje drsnosti povrchu  $R_Z$  a  $R_{max}$  jak v neopotřebovaném stavu, tak v opotřebovaném stavu ( $VB_{max}$ ) pro jednotlivé typy vrtáků. Je patrné, že s rostoucím opotřebováním roste drsnost povrchu. [6]

Vrták s druhým úhlem hřbetu  $15^\circ$  a vrták se zvětšenými chladicími kanály 1,4 mm vykazují nejnižší hodnoty drsnosti povrchu pro obě podmínky opotřebování. V opotřebovaném i neopotřebovaném stavu vykazují obě varianty oproti referenčnímu nástroji rozdíly pro  $R_Z$  v rozmezí  $0,6 \mu m$  a pro  $R_{max}$  v rozmezí  $0,7 \mu m$ . Tyto hodnoty drsnosti povrchu mohou být způsobeny zlepšeným chladicím mazáním. [6]

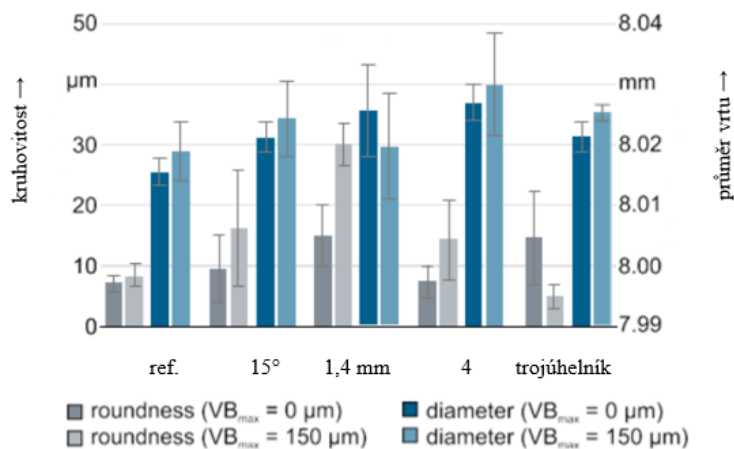
Varianta se čtyřmi chladicími kanály vykazuje vyšší drsnost povrchu  $R_Z$  a  $R_{max}$  než referenční nástroj pro oba stavy opotřebování. Pro  $R_Z$  jsou hodnoty navýšeny v rozmezí  $0,3 \mu m$  pro neopotřebovaný stav, a ještě zvýšeny o cca  $2,2 \mu m$  pro opotřebovaný stav. [6]

Vrták s trojúhelníkovými chladicími kanály má také vyšší drsnost než reference. V neopotřebovaném stavu jsou hodnoty  $R_Z$  cca  $0,7 \mu m$  a při  $VB_{max} = 150 \mu m$  jsou v rozmezí  $2,2 \mu m$ . Tyto vyšší hodnoty drsnosti povrchu lze opět vysvětlit zhoršeným chladicím mazáním ve srovnání s referencí. [6]



Obr. 7: Drsnost povrchu  $R_z$  a  $R_{max}$  v závislosti na stavu opotřebení a typu vrtacího nástroje [6]

Obr. 8 ukazuje kvalitu vrtu určenou vyhodnocením kruhovitosti a průměru vrtu v závislosti na podmínkách výstupu chladicího kanálu. Hodnoty kruhovitosti a hodnoty průměru mají tendenci se s rostoucím opotřebením zvyšovat. Varianta s trojúhelníkovými chladicími kanály však vykazuje lepší kruhovitost v opotřebovaném stavu a vrták se zvětšenými chladicími kanály 1,4 mm vykazuje lepší přesnost průměru vrtu v opotřebovaném stavu. Z grafu můžeme vidět, že zvětšený průměr chladicího kanálu 1,4 mm vede k nejvyšším odchylkám kruhovitosti pro oba stavy opotřebení a varianta se čtyřmi chladicími kanály vykazuje největší odchylky průměru vrtu pro oba stavy opotřebení. [6]



Obr. 8: Kruhovitost a průměr vrtu v závislosti na podmínkách výstupu chladicího kanálu [6]

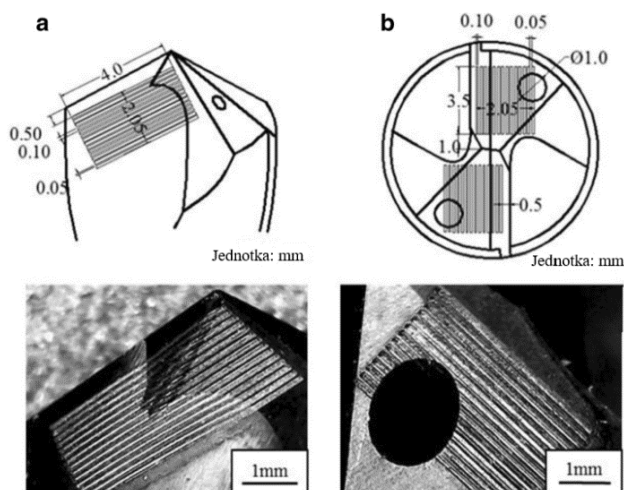
Bylo zjištěno, že podmínky výstupu chladicího kanálu mají vliv na životnost vrtáků. Zvětšením průměru chladicího kanálu 1,4 mm a zmenšením druhého úhlu hřbetu 15° došlo ke zvýšení životnosti vrtáků. Dále vrtáky s větším průměrem chladicího kanálu a zmenšeným druhým úhlem hřbetu vykazovaly tendenci mít nejnižší drsnosti vrtu. Funkčnost vrtů z hlediska kruhovitosti a průměru vrtu s ohledem na pozorované rozdíly nelze považovat za významnou. [6]

Závěrem výzkumu je doporučení používat co největší chladicí kanály a nejmenší druhý úhel hřbetu s ohledem na geometrii vrtáku pro zvýšení životnosti nástroje. [6]

## 2.3 Zlepšení řezného výkonu za pomoci mikrodrážek

Následující podkapitola byla věnována pokusu na dvou upravených vrtacích nástrojích s vnitřním chlazením, který provedli Dalin Guo, Xuhong Guo, Kedong Zhang, Yadong Chen, Chichi Zhou a Liwu Gai. [9]

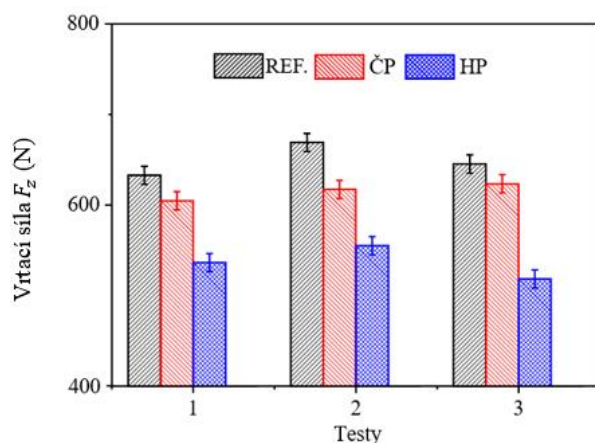
U prvního vrtáku byly vyrobeny mikrodrážky na čelní ploše a u druhého na hřbetní ploše, výsledné údaje z těchto dvou upravených vrtáků byly porovnány s referenčním nástrojem. Pro lepší představu, jsou rozměry mikrodrážek u vrtáku na čelní ploše a u vrtáku na hřbetní ploše znázorněny na Obr. 9. [9]



Obr. 9: Vrták s upravenou čelní plochou (a) a vrták s upravenou hřbetní plochou (b) [9]

### 2.3.1 Velikost vrtací síly

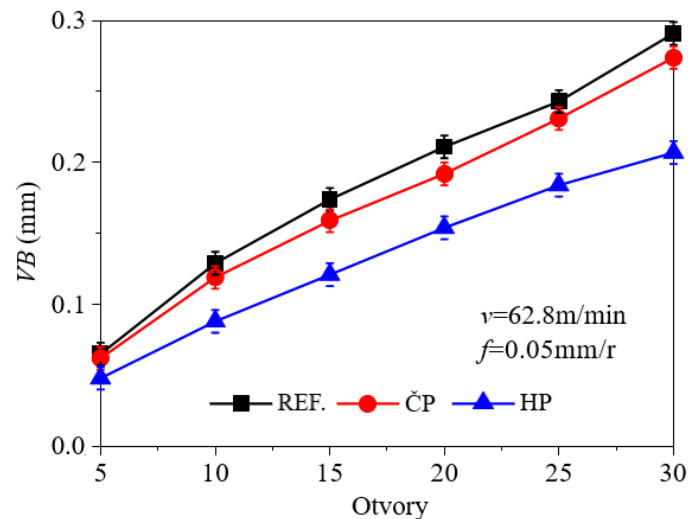
Změření vrtací síly bylo provedeno pro každý nástroj třikrát, při rychlosti 62,8 m/min. U vrtáku HP se povedlo snížit vrtací sílu o 11,6 %, u vrtáku ČP o 5,55 % v porovnání s referencí (viz. Obr. 10). [9]



Obr. 10: Vrtací síly při řezné rychlosti 62,8 m/min [9]

### 2.3.2 Trvanlivost nástroje

U nástroje ČP byla velikost opotřebení při řezné rychlosti 62,8 m/min o trochu pomalejší ve srovnání s referenčním nástrojem. Vrták HP dopadl o poznání lépe, navíc křivka opotřebení má téměř konstantní charakter, jak je vidět na Obr. 11. Za povšimnutí stojí, že s rostoucím počtem vrtaných děr roste i hodnota opotřebení VB. Trvanlivost nástroje HP je ve srovnání s referencí snížena až o 28,87 %. [9]

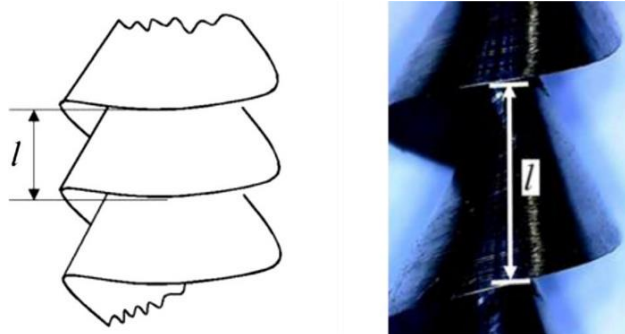


Obr. 11: Křivky opotřebení nástrojů [9]

### 2.3.3 Tvar třísek

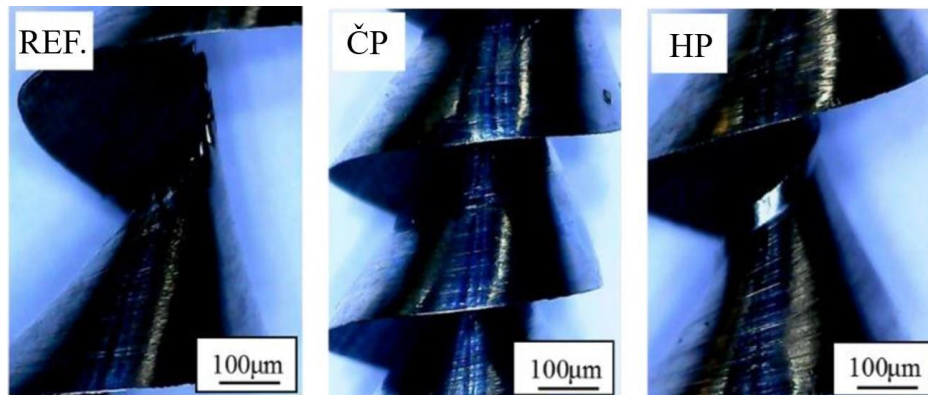
Třísky vzniklé při vrtání řeznou rychlostí 62,8 m/min referenčním a HP nástrojem se namotávaly na nástroj, kdežto u nástroje ČP se třísky dobře lámaly a odcházeli po čele z místa řezu. [9]

Stoupání třísek bylo zjištěno velice jednoduchou metodou, znázorněnou na Obr. 12. [9]



Obr. 12: Měření stoupání třísek [9]

Referenční vrták vytvářel při obrábění třísky s největším stoupáním. U vrtáku HP drážky na hřbetě nepatrně pomohli a stoupání se tak snížilo. Nejlépe na tom byl však vrták ČP, u kterého mikro drážky na čele nástroje výrazně pomohli snížit stoupání třísky. Pro znázornění je přiložen Obr. 13. [9]

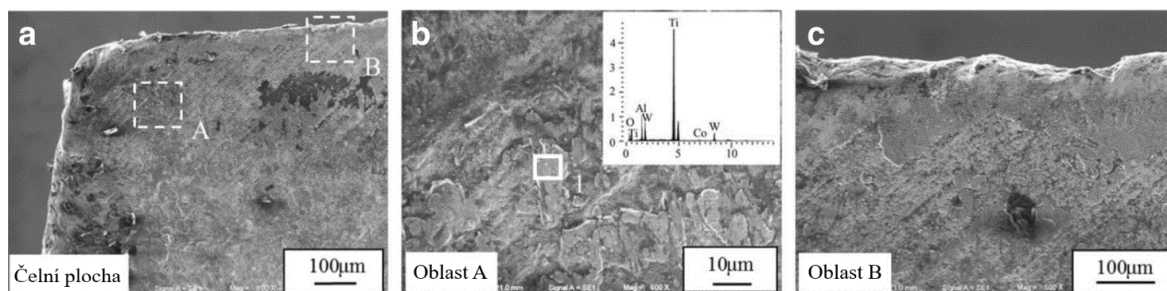


Obr. 13: Tvary třísek při řezné rychlosti 62,8 m/min [9]

### 2.3.4 Opotřebení nástroje

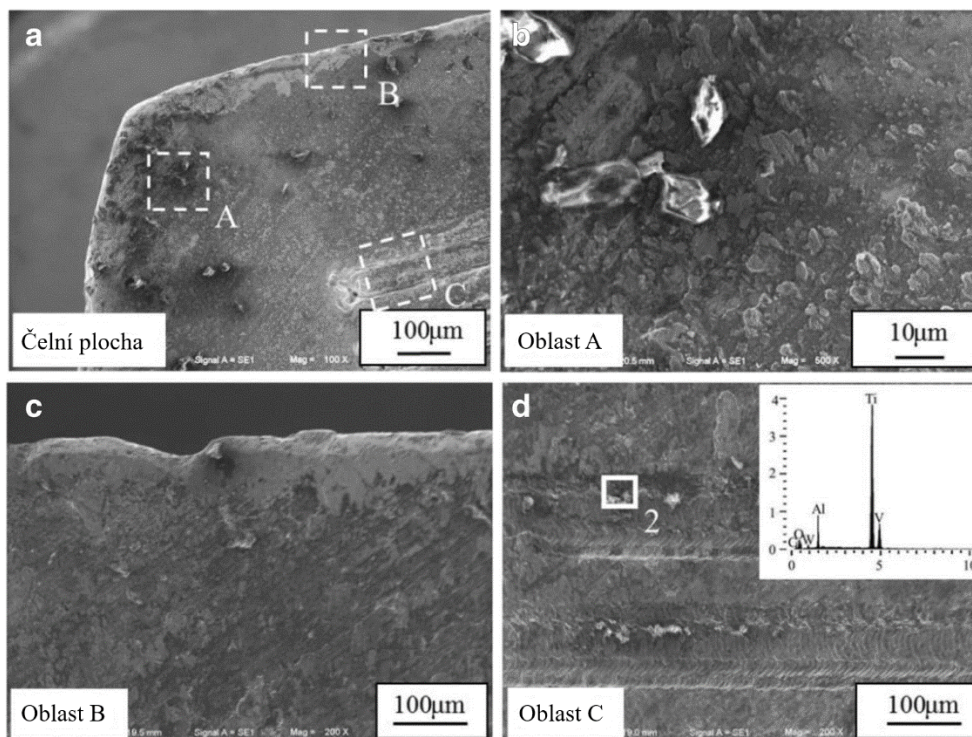
Pro zjištění opotřebení nástroje bylo využito snímacího elektronového mikroskopu (SEM) a energeticky disperzní rentgenové spektroskopie (EDS). [9]

Obr. 14 znázorňuje snímky čela u referenčního vrtáku po 30 otvorech při rychlosti 62,8 m/min. Při pozorování snímku SEM (Obr. 14a) bylo zjištěno, že plocha čela byla do značné míry poškozena množstvím adhezí. EDS analýza složení byla použita ve zvětšené, poškozené oblasti A v bodě 1 (Obr. 14b). Výsledky ukázaly značné ulpívání obráběného materiálu, které vede k následnému trhání a odlupování čelní plochy. Zvětšení oblasti B (Obr. 14c) ukázalo velké mikro úlomky na hlavním břitu způsobeny ulpíváním třísek obrobku a jejich odtrháváním. [9]



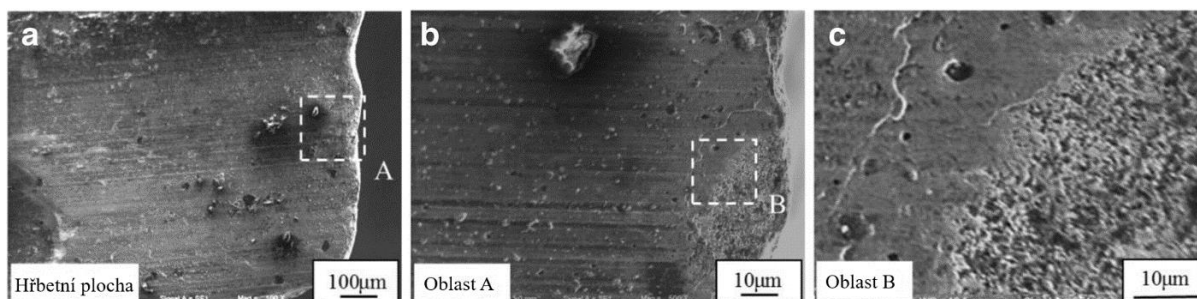
Obr. 14: SEM mikrofotografie a EDS analýza plochy čela referenčního nástroje [9]

Obr. 15 ukazuje snímky čela u nástroje ČP po 30 obrobených otvorech rychlostí 62,8 m/min. Dle Obr. 15a je patrné, že opotřebení nástroje, ve srovnání s referencí je mírnější. Opotřebovaná oblast A (Obr. 15b) ukazuje pouze lehké natržení čela. Nástroj ČP na rozdíl od reference vykazuje dobrou odolnost proti přilepení. Na zvětšeném snímku v oblasti B (Obr. 15c) bylo vidět malé vydrolení na hlavním řezném břitu. Z analýzy složení EDS v bodě 2 ve zvětšené oblasti s mikrodrážkou (C) je patrné, že mikrodrážky zachytili tvrdé brusivo a tím chrání čelo před poškrábáním (Obr. 15d). Nástroj ČP tedy vyniká velice dobrou odolností proti opotřebení. [9]



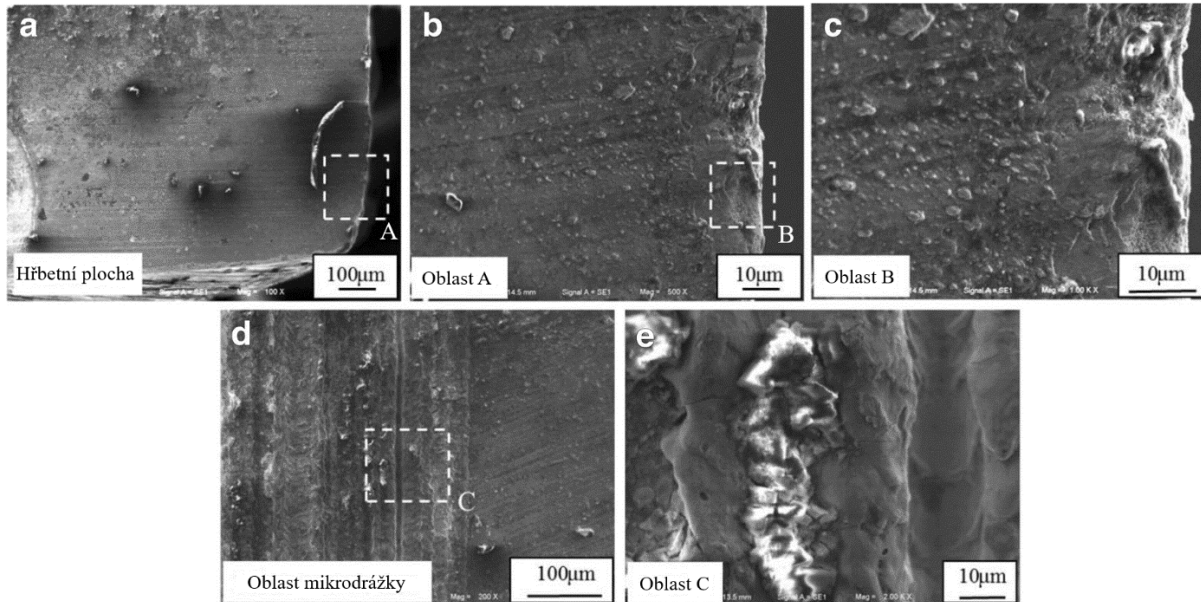
**Obr. 15: SEM mikrofotografie a EDS analýza plochy čela u nástroje ČP [9]**

Opotřebení na hřbetní ploše u referenčního nástroje po 30 dířích řeznou rychlostí 62,8 m/min je znázorněno na Obr. 16. Při pohledu na hlavní řeznou hranu (Obr. 16a) je vidět poškození a zvlnění řezné hrany. Obr. 16b ukazuje, že základní materiál nástroje byl odtržen, při zvětšení odtržené oblasti (Obr. 16c) je zjištěno, že odtržení způsobuje vysokou drsnost povrchu. [9]



**Obr. 16: SEM mikrofotografie hřbetní plochy u referenčního nástroje [9]**

Na Obr. 17 je znázorněné opotřebení hřbetní plochy u nástroje HP. Hlavní řezná hrana nástroje HP je v porovnání s referenčním nástrojem daleko méně opotřebena (Obr. 17a, 17b). K odtržení základního materiálu dochází jen ojediněle, což vede k nižší jakosti povrchu (Obr. 17c). Na Obr. 17d je znázorněna oblast s mikrodrážkou. Při zvětšení oblasti (Obr. 17e) je znázorněno opotřebení na okraji drážky, z čehož plyne, že drážky u nástroje HP zachycují jemné brusivo a tím snižují poškození hřbetní plochy, podobně jako u nástroje ČP. [9]

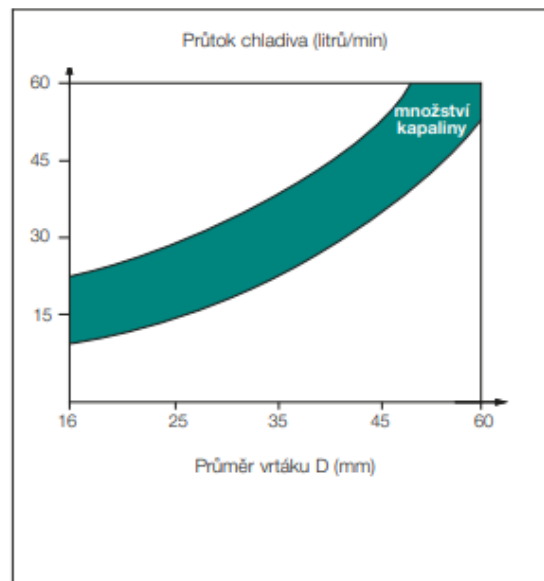


Obr. 17: SEM mikrofotografie hřbetní plochy nástroje HP [9]

## 2.4 Poznatky od firem

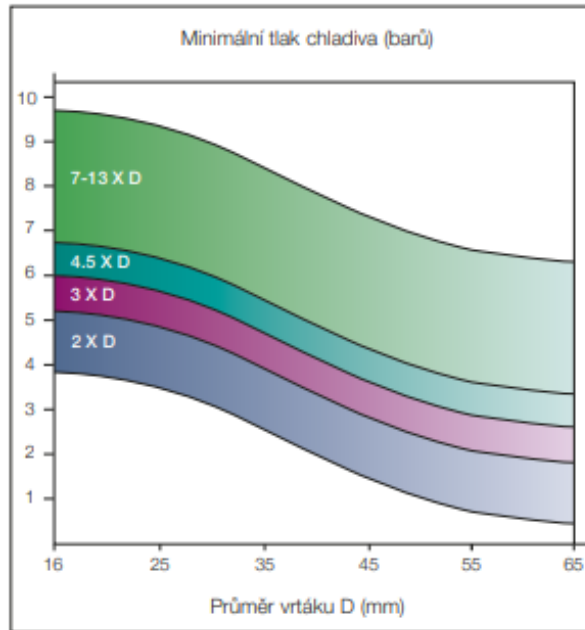
### 2.4.1 Tlak a průtok procesní kapaliny

Následující dva grafy (Obr. 18, 19) znázorňují výběr hodnoty tlaku a průtoku procesní kapaliny v závislosti na průměru vrtáku.



Obr. 18 Průtok chladicí kapaliny [8]



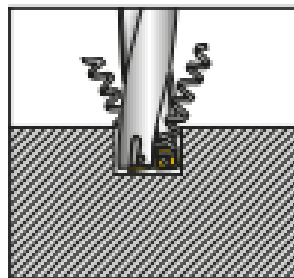


Obr. 19: Tlak chladicí kapaliny [8]

Firma Iscar uvedla, že: „Pro speciální vrtáky více než 4 x D se doporučuje použít vysoký tlak chladicí kapaliny 15–70 barů.“ [8]

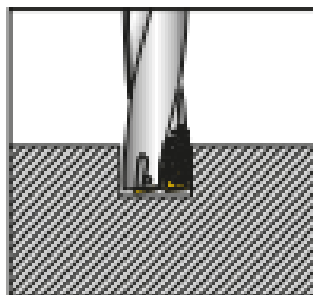
#### 2.4.2 Problémy s tvorbou třísky

Vznikání dlouhých třísek při vrtání je nežádoucí, jelikož třísky mohou poškodit díru. Pokud nepomůže změna rezných podmínek, je doporučeno použít přerušovaný cyklus.



Obr. 20: Pěchování dlouhých třísek [8]

Pokud se v díře pěchují krátké třísky, lze tento problém odstranit zvýšením tlaku a průtoku chladicí kapaliny.



Obr. 21: Pěchování krátkých třísek [8]

## 2.4.3 Nový typ chladicího kanálu od firmy Gühring a Mapal

### 2.4.3.1 Gühring

Firma Gühring se zabývá výrobou obráběcích nástrojů. V současné době má již dlouholetou tradici s pobočkami po celém světě, včetně České republiky. [11]

Na svých stránkách představuje vrtací nástroj RT 100 TRIGON s trojúhelníkovými chladicími kanály. Tento typ chladicích kanálů má za následek zvýšení objemového průtoku chladicí kapaliny, díky zvýšení průřezu chladicího kanálu, které lépe snižuje teploty v okolí hlavního břitu a nástroj je tak lépe chlazen. Ačkoliv je zvýšen průřez chladicího kanálu, stabilita vrtáku je zachována. [12]

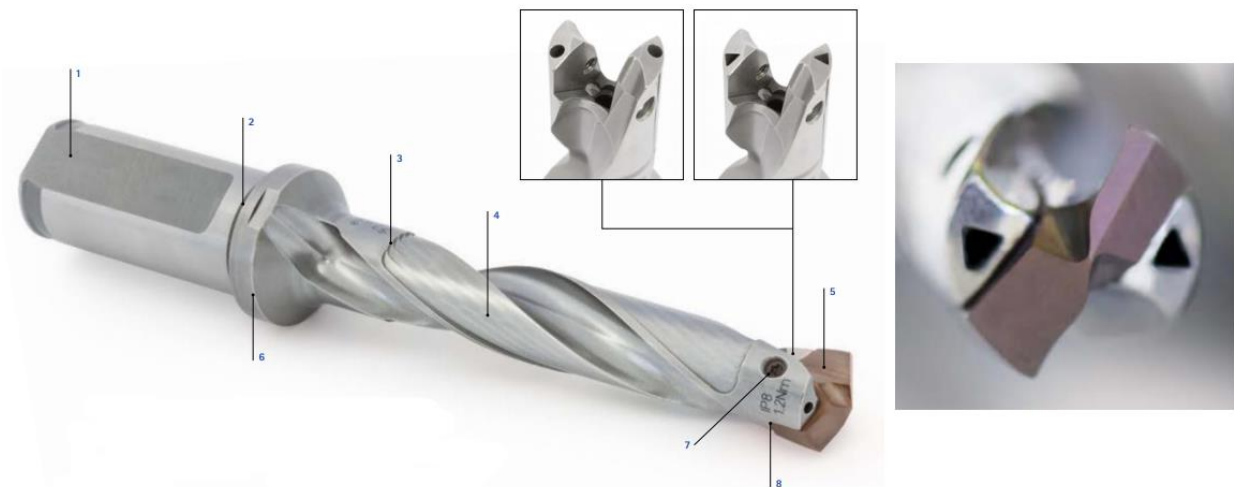


Obr. 22: Vrták RT 100 TRIGON od firmy Gühring [13]

### 2.4.3.2 Mapal

Mapal je další firma, která u jednoho, ze svých vrtacích nástrojů využívá trojúhelníkové chladicí kanály. Tato světová firma má své dceřiné společnosti v 25 zemích světa, nevyjímaje České republiky. Soustředí se na výrobu nástrojů pro obrábění a inovace v oblasti automobilového a leteckého průmyslu. [14], [15]

Nástroj, využívající trojúhelníkové chladicí kanály, nese název QTD INDEXEABLE INSERT DRILL. Tento šroubovitý vrták s vyměnitelnou řeznou špičkou zaujme velmi dobrou tvorbou třísky a spolehlivým odvodem třísky. [16]



Obr. 23: Vrták QTD INDEXEABLE INSERT DRILL od firmy Mapal [16]

### 3 Návrh a realizace vlastního řešení

Tato kapitola bude věnována praktické části bakalářské práce. V jednotlivých podkapitolách bude představeno vlastní řešení dané problematiky.

#### 3.1 Uvedení do problematiky

Praktická část bakalářské práce byla zaměřena na výzkum a vývoj vrtacích nástrojů s VBD s využitím kovové aditivní výroby a možnosti přívodu procesní kapaliny upraveným systémem chlazení. Na samotném počátku byl vybrán referenční vrtací nástroj, na základě, kterého se odrazily následující varianty řešení.

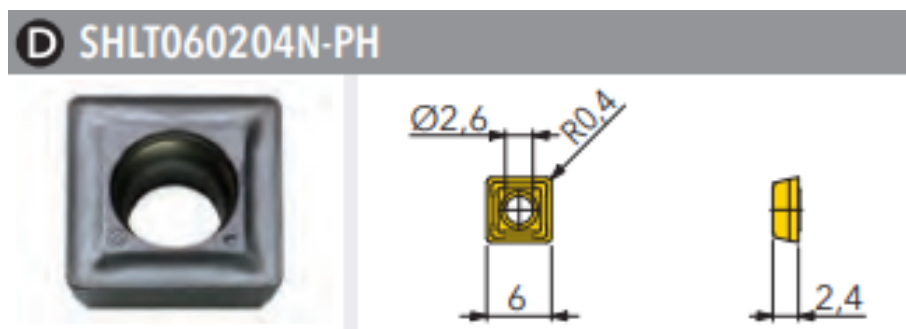
##### 3.1.1 Výběr referenčního nástroje

Jako referenční nástroj byl zvolen vrták od firmy s názvem Innotool (Innovative Tooling). Jedná se o společnost se sídlem v Německu, která se soustředí na výrobu obráběcích nástrojů, především pak na frézy s VBD a vrtáky pro krátké hloubky děr s VBD. [10]



Obr. 24: Referenční nástroj od firmy Innotool

Vrták nese označení BS.020.007 a je kompatibilní s třemi typy VBD čtvercového tvaru. Používá se na vrtání děr s maximální hloubkou  $2xD$ . Nástroj je opatřen kruhovými chladicími kanály. Pro experiment byla z těchto tří čtvercových VBD použita VBD s označením SHLT060204N-PH. Jedná se o univerzální VBD vhodnou k obrábění oceli, korozivzdorné oceli, litiny a tepelně odolných slitin. [18]



Obr. 25: Použitá VBD SHLT060204N-PH [18]

### 3.1.2 Návrh variant řešení

Varianty řešení byly zvoleny na základě teoretických poznatků, zpracovaných v kap. 2.2 a 2.4, vztahujících se k danému problému a jejich následné konzultace s vedoucím práce.

První variantou bylo vytvoření identického vrtáku s referenčním, který byl vytištěn a obroběn. Cílem této varianty bylo, ověření všech konstrukčních prvků nástroje tak, aby byla potvrzena funkčnost vlastní konstrukce.

Následující tři varianty byly navrženy a realizovány až v samotném průběhu BP. U těchto tří variant se jednalo o úpravu pouze jediných prvků na vrtacím nástroji a těmi byly chladicí kanály pro přívod procesní kapaliny.

Celkem byly tedy navrženy čtyři varianty.

## 3.2 Zhotovení první varianty

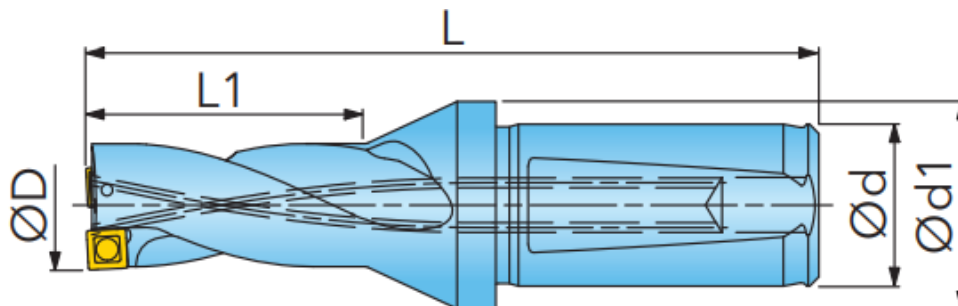
Jak už zaznělo výše, první variantou byl pokus o vytvoření identického vrtáku (1:1) s referenčním nástrojem. Tento proces lze pro lepší přehlednost rozdělit do následujících kroků:

1. Reverzní inženýrství
2. Konstrukce modelu vrtáku
3. Konstrukce modelu vrtáku, upraveného pro 3D tisk, a pro obrábění
4. Příprava dat a samotný 3D tisk
5. Obrábění

Jednotlivé kroky budou nyní detailně rozebrány.

### 3.2.1 Reverzní inženýrství

Aby bylo možné vrták vyrobit, je zapotřebí nejprve zjistit jeho tvar a rozměry. Základní rozměry vrtáku se podařilo zjistit z katalogu firmy Innotool (Obr. 26).



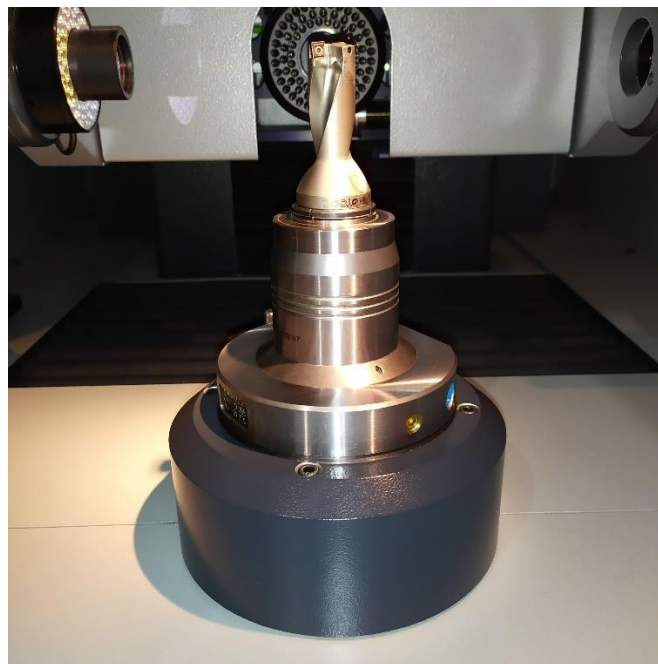
Obr. 26: Základní rozměry vrtáku [18]

Vzhledem k tomu, že rozměry z katalogu jsou pro konstrukci vrtáku absolutně nedostačující, bylo nutno použít metodu tzv. reverzního inženýrství. Jedná se o zpětnou analýzu, na základě, které byly zjištěny důležité rozměry a podklady pro konstrukci nástroje.

Pro naskenování geometrie vrtáku byl použit univerzální měřicí stroj pro řezné nástroje Zoller genius 3. Tento stroj je na hale RTI k dispozici již od roku 2015.



Obr. 27: Měřicí stroj Zoller genius 3 – hala RTI



Obr. 28: Skenování geometrie vrtáku

### 3.2.2 Konstrukce modelu vrtáku

Vrták a všechny jeho ostatní varianty byly zkonstruovány pomocí CAD programu NX od firmy Siemens. Mezi další, známé softwary podobného typu patří např. Catia, Creo Parametric, Autodesk Inventor, SolidWorks a Solid Edge.

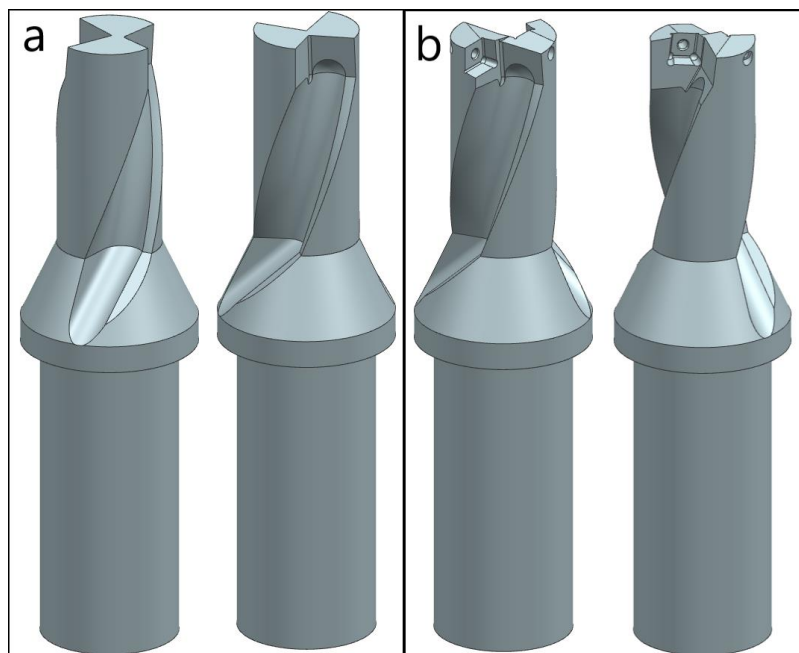
Detailně popsat a vysvětlit celou konstrukci vrtáku v programu NX by mohlo být předmětem další práce, a proto bude velice výrazně zestručněno.

Na počátku byl vytvořen jakýsi základ (tělo) vrtáku.



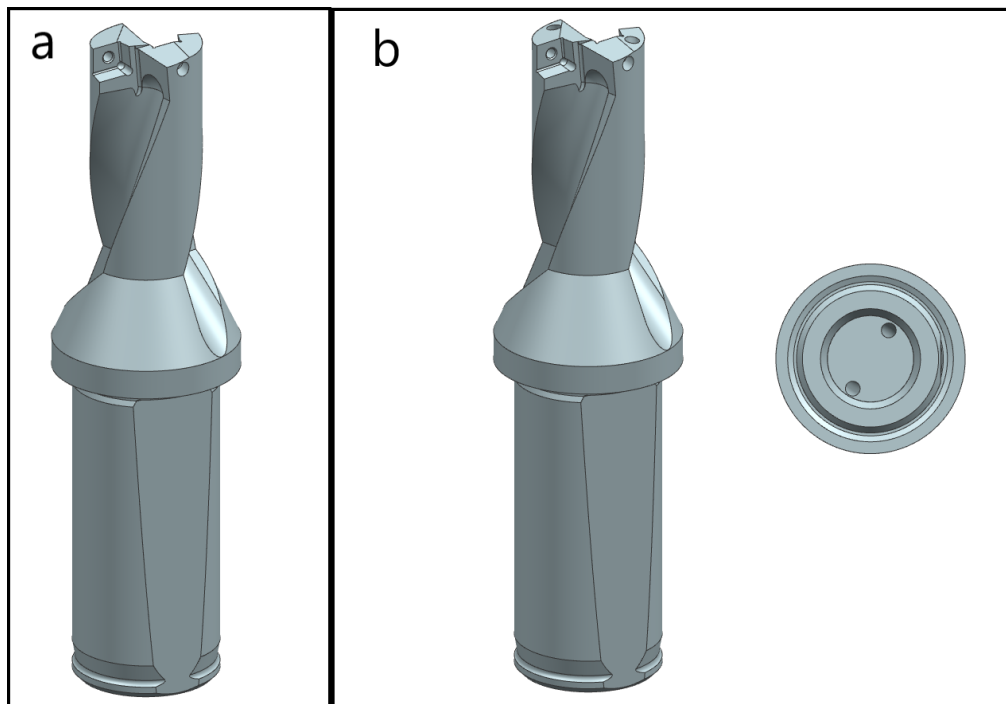
Obr. 29: Základ vrtáku

Následně byl z těla odebírán materiál a vrták postupně vznikal. Nejprve byly vytvořeny drážky pro odvod třísek (Obr. 30a). Poté byl vymodelován vrchol vrtáku s lůžky pro upnutí vnější a vnitřní VBD (Obr. 30b).



Obr. 30: Vytváření drážek, lůžek a vrcholu vrtáku

Zbývalo vymodelovat upínací část (stopku) vrtáku (Obr. 31a) a na závěr bylo třeba vymodelovat chladicí kanály pro vnitřní přívod procesní kapaliny (Obr. 31b). Vrták byl hotový.

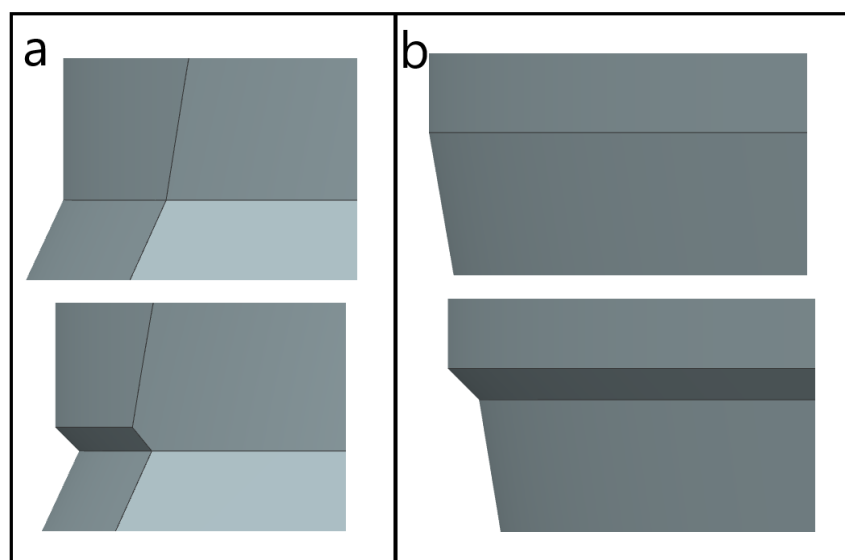


Obr. 31: Konstrukce upínací části a chladicích kanálů vrtáku (dokončení)

### 3.2.3 Konstrukce modelu vrtáku, upraveného pro 3D tisk a následné obrábění

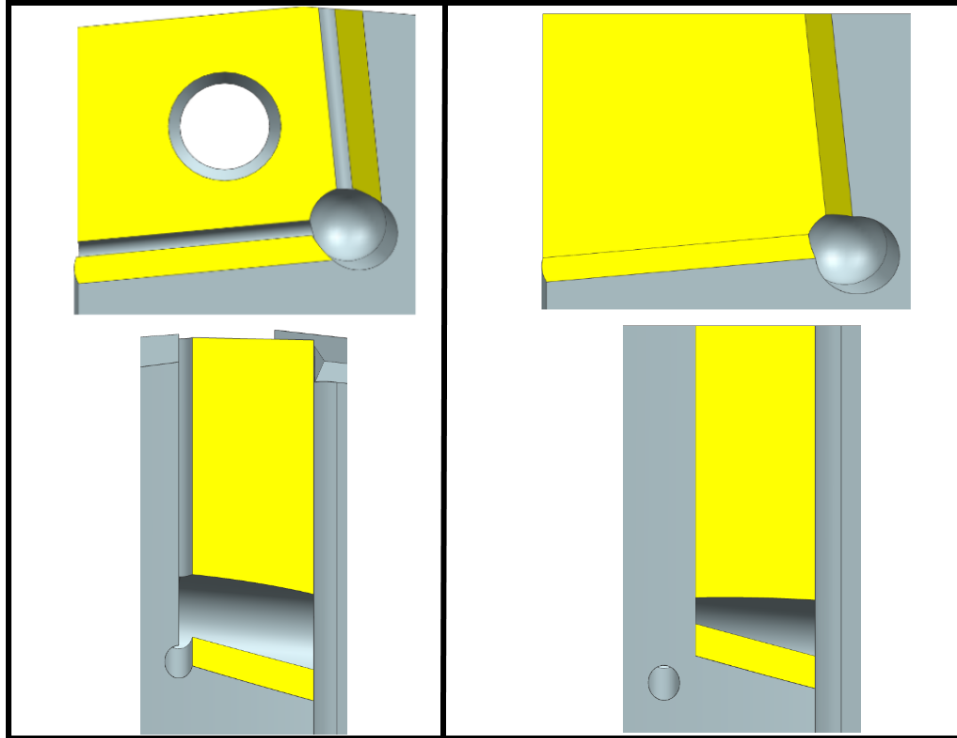
Po dokončení modelu vrtáku, bylo zapotřebí jej upravit, případně doplnit o podpory, aby se dal vytisknout na 3D tiskárně. Zároveň se vrták musel zvětšit o přídávky na obrábění u funkčních ploch. Aby bylo možné vrták obrobít, musel se doplnit o konstrukční prvky, za které byl při obrábění upnut.

Přídavkem na obrábění byl zvětšen řezný (Obr. 32a) a upínací průměr (Obr.32b) vrtáku a byl stanoven na 0,5 mm na průměr.



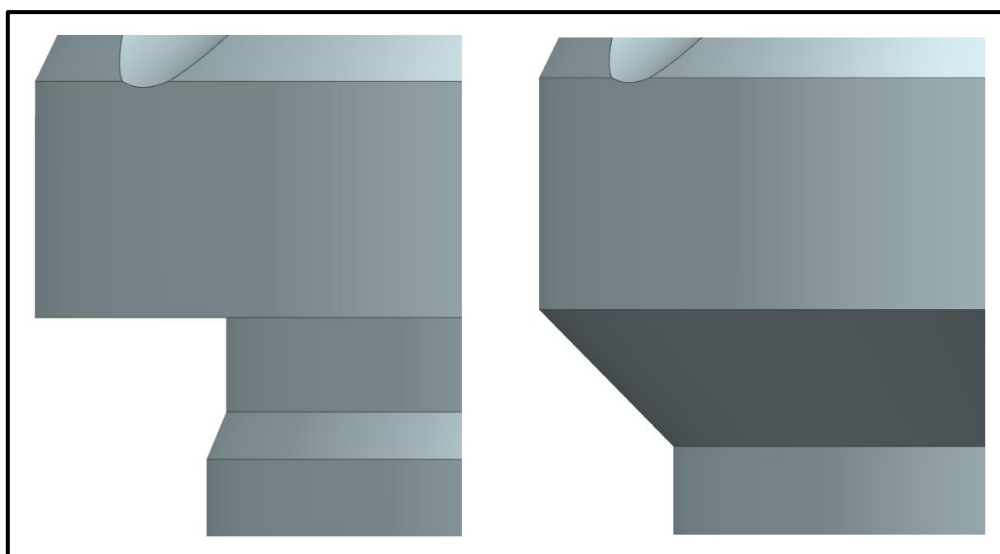
Obr. 32: Znázornění přídávků na obrábění

Aby byly VBD správně umístěny a upnuty, bylo zapotřebí opatřit přídávky dosedací plochy pro VBD (lůžka). Přídávky byly stanoveny na 0,5 mm na každou plochu. Rozdílu po vytvoření přídavek si můžeme všimnout právě proto, že došlo k zakrytí některých děr pro odlehčení. Upínací otvor se závitem pro upnutí VBD byl odstraněn a vytvořen obráběním. Plochy, které byly opatřeny přídávkem jsou pro lepší přehlednost zvýrazněny žlutou barvou (Obr. 33).



**Obr. 33: Vlevo skutečný tvar vnějšího lůžka z čelního a bočního pohledu, vpravo s přídávky bez upínacího průměru**

Dosedací plocha, při největším průměru vrtáku, kterou vrták dosedl na upínač byla z hlediska tisknutelnosti opatřena podporou. Tím byl zakryt zápich, proto byl odstraněn a zhotoven při samotném obrábění.

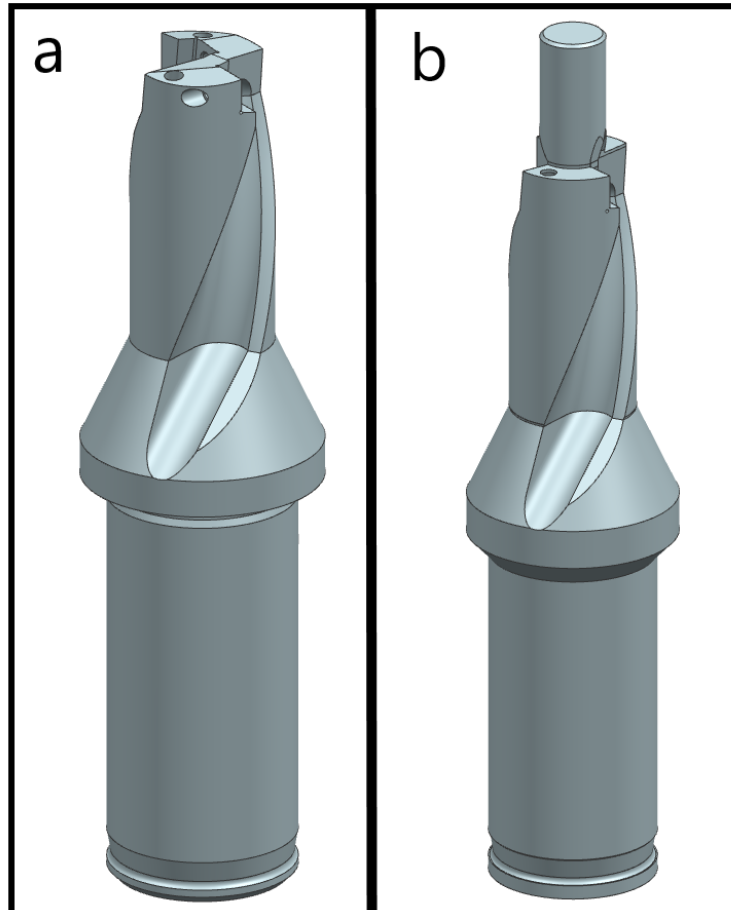


**Obr. 34: Tvorba podpory dosedací plochy s odstraněním zápichu**



Poslední úpravou, kterou vrták prošel, bylo doplnění o konstrukční prvek pro obrábění. Jednalo se o upínací čep, umístěný na vrcholu vrtáku a souosý s osou vrtáku. Vrchol vrtáku byl zarovnan a opatřen přídávkem. Následně byl vymodelován upínací čep (Obr. 35b). Za tento čep, mohl být vrták upnut mezi hroty při broušení.

Obr. 35 pro lepší přehlednost znázorňuje rozdíl mezi skutečným modelem vrtáku (Obr. 35a) a modelem vrtáku, upraveným pro 3D tisk (Obr. 35b).



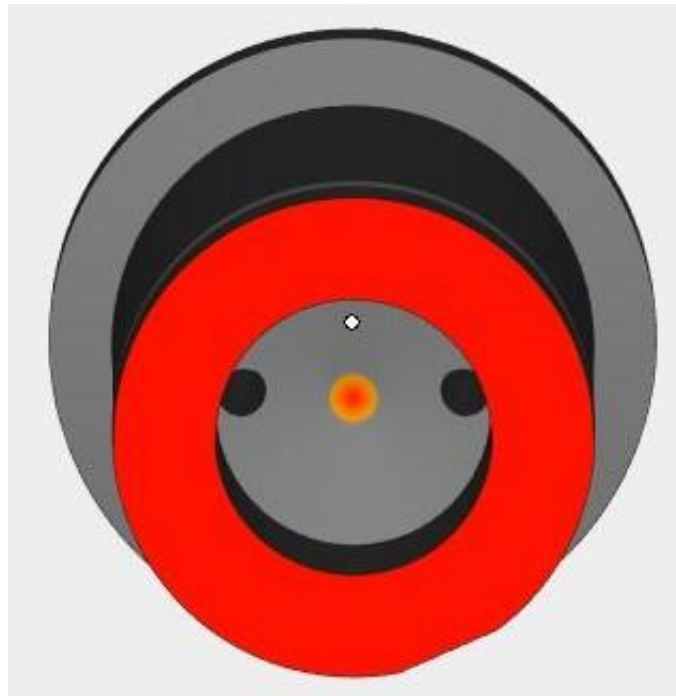
Obr. 35: Tvorba upínacího čepu

### 3.2.4 Přípravení dat a samotný 3D tisk

Ačkoliv byl model vrtáku již připraven pro tisk, bylo zapotřebí jej prověřit, zda je tisknutelný, ustavit na platformu a nastavit procesní parametry. Tento proces se odborně nazývá Příprava dat pro tisk.

K přípravě dat pro tisk se používá program Materialise Magics od společnosti Materialise. Tento program umožňuje např. tvorbu podpor, prověření tisknutelnosti a změnu tloušťky stěny.

Při prověření tisknutelnosti program vyhodnotí model a plochy, které jsou problematické vybarví od žluté po červenou barvu. Můžeme si všimnout, že spodní plocha vrtáku (Obr. 36) je celá zbarvená červenou barvou, to samozřejmě nevádí, jelikož touto plochou bude vrták ustaven na platformu a odtud se začne tisknout. Uvnitř stopky, v oblasti vstupu procesní kapaliny do chladicích kanálů je ve středu malý bod, který je také zbarven (Obr. 36). Toto místo tiskárna vytisknout dokáže, ovšem s horší jakostí povrchu, kterou můžeme vzhledem k funkčnosti vrtáku zanedbat. Model je tedy tisknutelný.



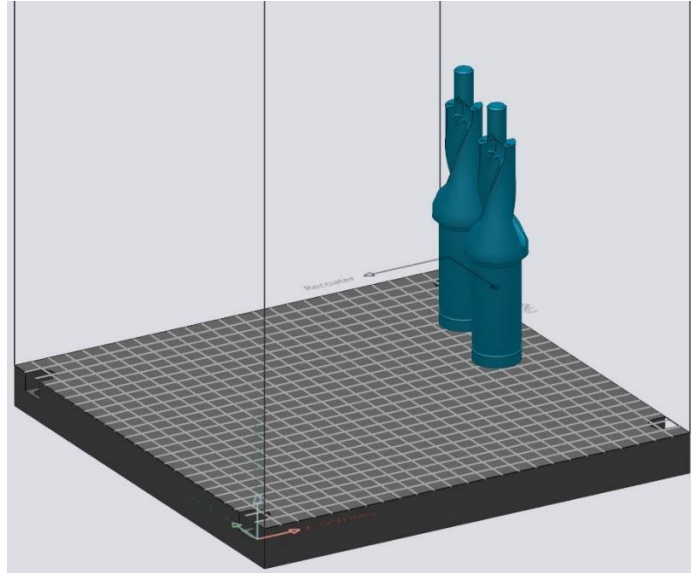
**Obr. 36: Prověření tisknutelnosti v programu Magics**

Dalším krokem je ustavení modelu na platformu. Platforma je čtvercová deska o rozměrech 250x250x35 (mm), váží přibližně 20 kg a je vyrobena z nástrojové oceli. Pro upnutí do 3D tiskárny je opatřena čtyřmi otvory. Platforma je normalizovaná.



**Obr. 37: Platforma**

K ustavení modelu na platformu byl využit program Eosprint 2. Jedná se o software, který umožňuje optimalizovat procesní parametry pro 3D tisk na strojích pro aditivní výrobu od firmy EOS. Mezi tyto parametry se řadí výkon laseru, rychlost skenování laseru, tloušťka vrstvy. Příprava dat pro tisk pomocí programu Eosprint 2 se zpravidla provádí v návaznosti na přípravu dat v programu Materialise Magics. Vrták byl vytisknut po dvou kusech (Obr. 38).



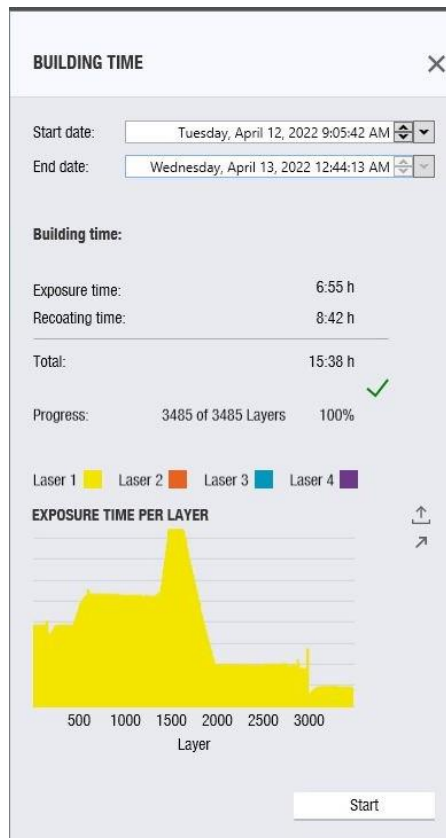
**Obr. 38: Ustavení modelů na platformu**

Po ustavení modelů na platformu a nastavení procesních parametrů jsou data pro tisk kompletně připravena. Zbývá tedy připravit 3D tiskárnu a importovat do ní připravená data.



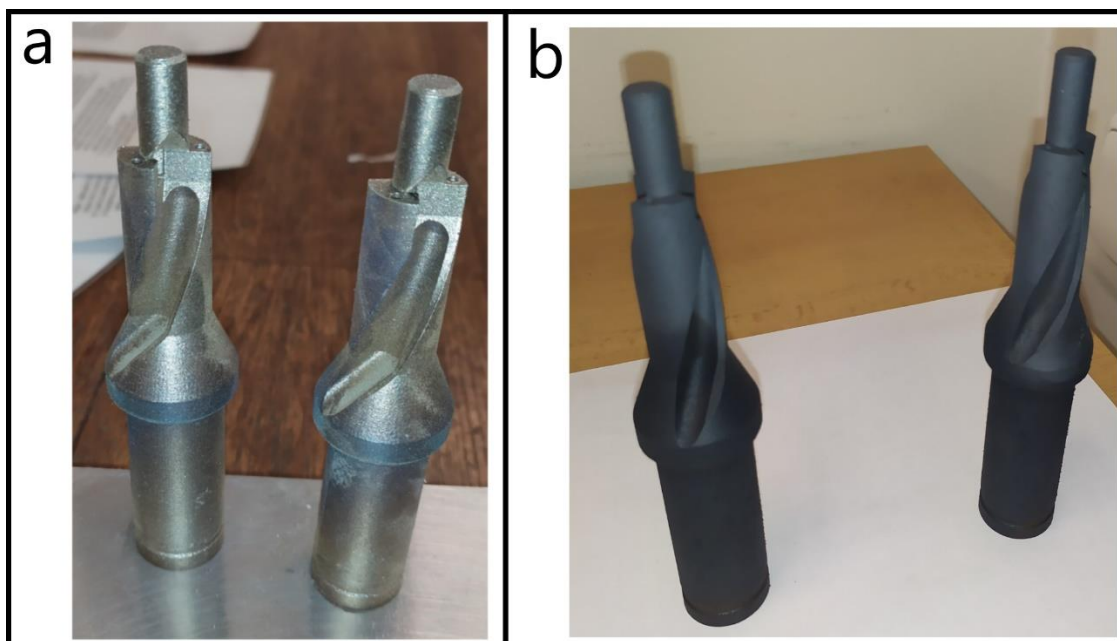
**Obr. 39: 3D tiskárna EOS M290 – laboratoř RTI**

Když jsou data naimportována do tiskárny, tiskárna dokáže vyhodnotit přibližnou dobu tisku (Obr. 40), následuje spuštění procesu.



Obr. 40: Vyhodnocení doby tisku

Po ukončení 3D tisku byly vrtáky s platformou vyjmuty z tiskárny (Obr. 41a) a přesunuty do pece, kde proběhlo rozpouštěcí žihání při teplotě 820°C. Rozpouštěcím žiháním bylo dosaženo homogenní struktury a odstranění vnitřního pnutí po 3D tisku.



Obr. 41: Znázornění vrtáků po 3D tisku (vlevo) a po žihání (vpravo)

### 3.2.5 Obrábění

První obráběcí operace u vrtáků, která následovala po 3D tisku, bylo broušení na kulato, na univerzální hrotové brusce Bernardo URS 500 N. Tuto brusku, najdeme na RTI v brusírně, spadající pod laboratoř technologie obrábění (LTO).



**Obr. 42: Univerzální hrotová bruska URS 500 N – brusírna RTI**

Z hlediska zajištění válcovitosti a sousosti u funkčních ploch bylo nutné po 3D tisku zbrousit řezný a upínací průměr vrtáků na požadovaný rozměr.

Při broušení bylo zjištěno, že vrchol vrtáků oproti upínacímu průměru vykazuje radiální házení. Tato nepřesnost byla pravděpodobně vytvořena při samotném 3D tisku, pouhým okem však nerozpoznatelná. S takto velkým házením vrtáků se předem nepočítalo a tudíž přídatky 0,5 mm na průměr nemohly být zdaleka dostatečně velké na to, aby byly broušením pokryty nepřesnosti a funkční plochy vrtáků byly vůči ose sousé. Po následující konzultaci s programátory a obráběči RTI bylo rozhodnuto, že vrtáky budou vytištěny znovu, společně s dalšími variantami.

Házení vrtáků zapříčinilo, že některé plochy řezného průměru nebyly vůbec zbroušeny. Těchto ploch si můžeme všimnout z Obr. 43.



Obr. 43: Vrtáky po broušení

### 3.3 Opětovné zhotovení první varianty společně s dalšími variantami

Jak již bylo zmíněno výše, variantu vrtáku 1:1 bylo nutné vytisknout znovu, společně s dalšími variantami.

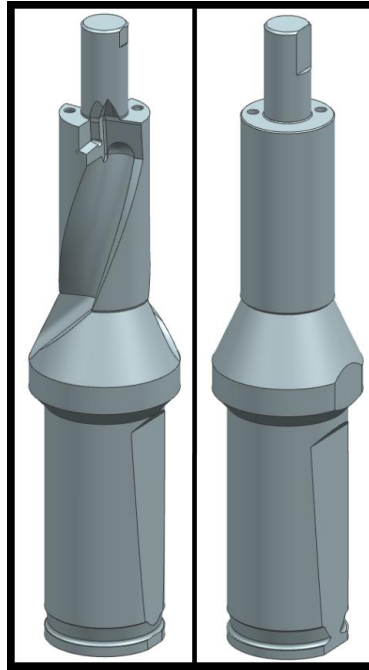
#### 3.3.1 Úprava modelu pro 3D tisk

Vzhledem ke zkušenostem z předchozího tisku vrtáků, byly provedeny některé úpravy na modelu, před tím, než byl opět vytisknut. Jelikož zde opět hrozila možnost, že by vrtáky házely, byly zvětšeny přídavky na broušení, aby byly dostatečně velké na odstranění házivosti. Přídavek na rezný průměr byl z 0.5 mm na průměr stanoven na 1 mm na průměr. Přídavek na upínací průměr byl z 0.5 mm na průměr upraven na 0,7 mm na průměr.

Protože bylo zapotřebí docílit správný odvod třísky z místa řezu, bylo rozhodnuto, že šroubovice vrtáku bude kvůli lepší jakosti povrchu obrobena.

Lůžka pro upnutí VBD musela být správně umístěna, aby byla zajištěna geometrie bříty. Při případném házení vrtáku by bylo komplikované je obrobit, proto nebyla předtisknuta.

Model vrtáku byl tedy od původního modelu značně pozměněn. Řezná část byla v podstatě tvořena pouze válcem s otvory pro přívod procesní kapaliny. Rozdíl původního modelu pro 3D tisk a současného modelu pro 3D tisk je možno spatřit na Obr. 44.



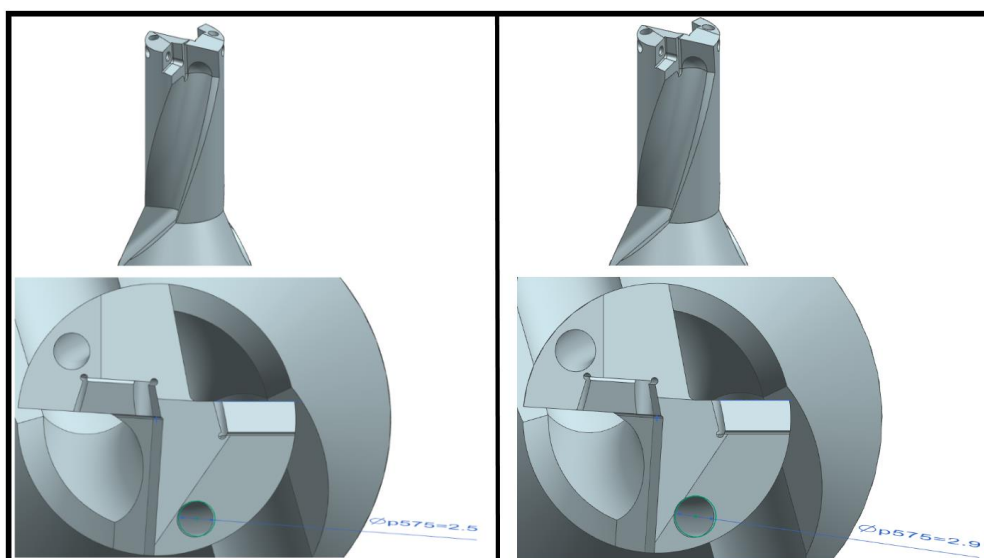
Obr. 44: Vlevo původní model pro 3D tisk, vpravo upravený

### 3.3.2 Konstrukce variant chladicích kanálů

Po úpravě modelu pro 3D tisk bylo zapotřebí vymyslet a vymodelovat nové varianty chladicích kanálů pro přívod procesní kapaliny.

#### 3.3.2.1 Varianta s větším průměrem chladicího kanálu (2,9 mm)

Na základě poznatků z teoretické části BP, přišel jako první nápad zvětšit průměr chladicích kanálů. Referenční nástroj a varianta vrtáku 1:1 mají průměr chladicích kanálů 2,5 mm u druhé varianty se zvětšeným průměrem chladicího kanálu byl průměr chladicího kanálu zvětšen o pouhé 4 desetiny milimetru, tedy na 2,9 mm. Na Obr. 45 je vidět rozdíl mezi vrtákem 1:1 a vrtákem s větším průměrem chladicích kanálů. Na první pohled je rozdíl minimální. Pro lepší názornost jsou přiloženy kóty s označením průměru chladicích kanálů.

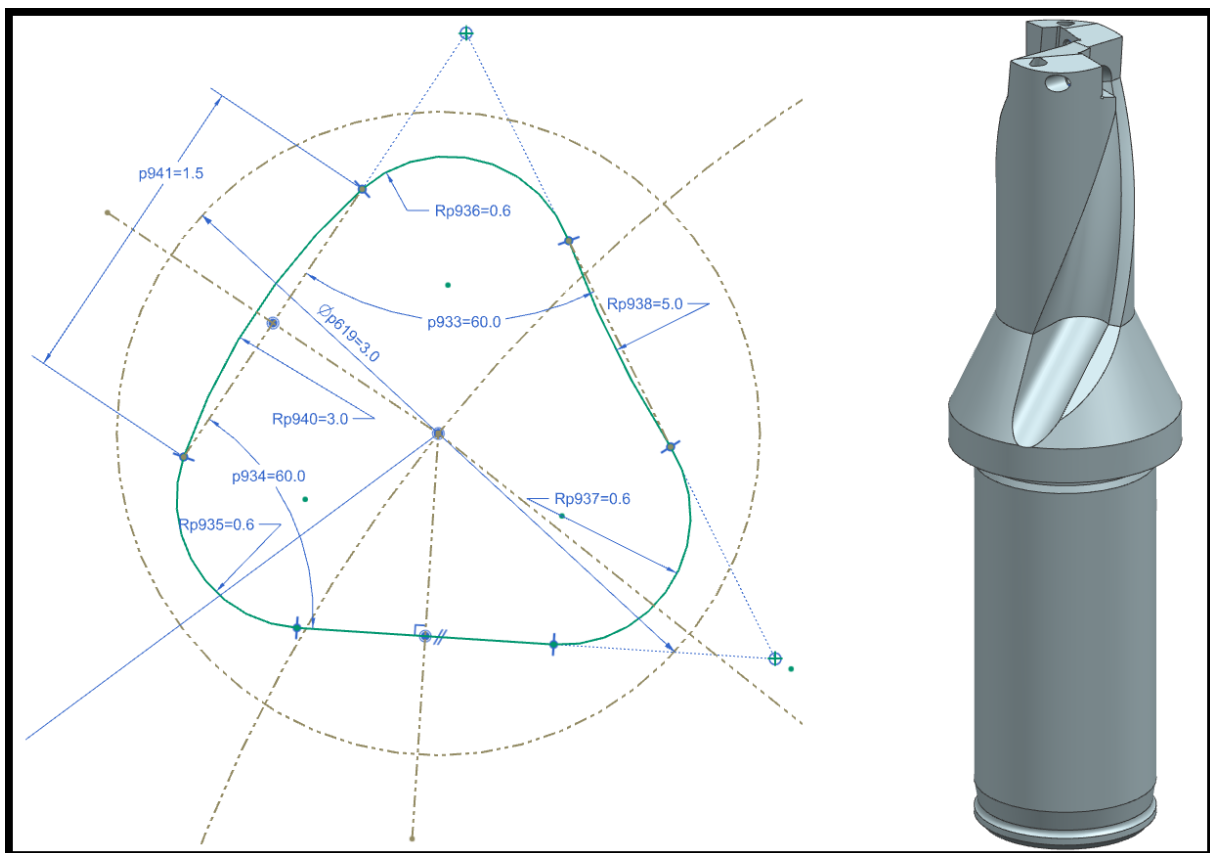


Obr. 45: Vrták 1:1 vlevo, vrták s větším průměrem chladicích kanálů vpravo

### 3.3.2.2 Varianta s trojúhelníkovými chladicími kanály

Další variantou, nabízející se dle informací z BP byla vymyslet konstrukci vrtáku s trojúhelníkovým tvarem chladicích kanálů. Na základě Obr. 22 v teoretické části BP je možno si všimnout, že profil chladicích kanálů u vrtáku RT 100 TRIGON není pravidelný rovnostranný trojúhelník, ale jakýsi polygon se zaoblenými rohy a lehce zaoblenými dvěma stěnami. Tento polygon bylo potřeba vymodelovat i v programu NX.

Nejprve se vycházelo z rovnostranného trojúhelníku a poté byly postupně zaoblovány všechny rohy a dvě stěny, aby vznikl tvar, který co nejvíce odpovídal profilu chladicích kanálů u vrtáku RT 100 TRIGON. Na Obr. 46 můžeme vidět hotovou skicu profilu chladicího kanálu, vytvořenou v programu NX a výslednou třetí variantu vrtáku s trojúhelníkovými chladicími kanály.



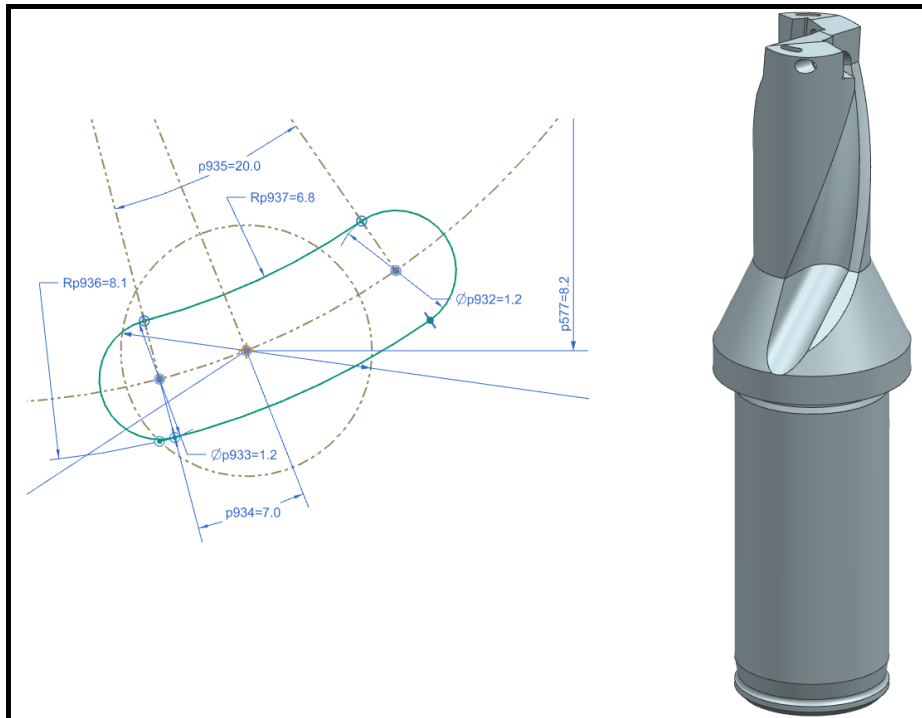
Obr. 46: Skica profilu trojúhelníkového kanálu a výsledná třetí varianta vrtáku

### 3.3.2.3 Varianta s kapsovitými tvary chladicích kanálů

Poslední varianta vrtáku s novým typem chladicího kanálu nevyplývala ze znalostí z teoretické části BP, její prvotní nápad přišel na základě konzultace s vedoucím práce.

Konečný tvar profilu chladicího kanálu postupně vznikl, až při samotné konstrukci skici v programu NX. Skica chladicího kanálu byla vytvořena spojením dvou kružnic o stejném průměru, od sebe vzdálených o určitý úhel, tím vznikla jakási kapsa a poslední tvar chladicího kanálu byl hotový (Obr. 47).



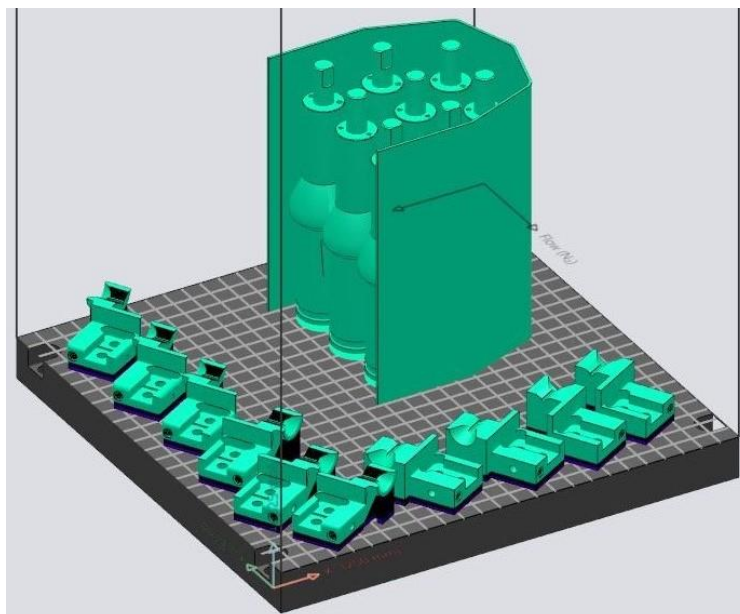


Obr. 47: Skica profilu kapsovitého kanálu a výsledná čtvrtá varianta vrtáku

### 3.3.3 Samotný 3D tisk

Při 3D tisku byly vytisknuty všechny čtyři varianty chladicích kanálů opět dvakrát jako v předchozím případě. To z toho důvodu, že mohou vzniknout problémy při obrábění a vrták se znehodnotí. Díky tisku dvou kusů je v záloze ještě jeden stejný typ vrtáku.

Na Obr. 48 si můžeme všimnout ustavení modelů na platformu. Při tisku vyšších součástí, hrozí při vedení nanášecího břitu rozechvění součástí, proto byly modely ohraničeny ohrádkou. Vzhledem k využitelnosti celé platformy, byly k vrtákům přidány další součásti pro tisk, které však s BP nesouvisí.



Obr. 48: Ustavení modelů na platformu s použitím ohrádky

Následovalo spuštění stroje, po 3D tisku byla platforma vyjmuta z 3D tiskárny (Obr. 49).



**Obr. 49 Platforma s vrtáky po 3D tisku**

Po ukončení 3D tisku byly vrtáky přesunuty do pece na tepelné zpracování (stejný postup, jako v předchozím případě).



**Obr. 50: Vrtáky po tepelném zpracování, připraveny na obrábění**

### 3.3.4 Obrábění

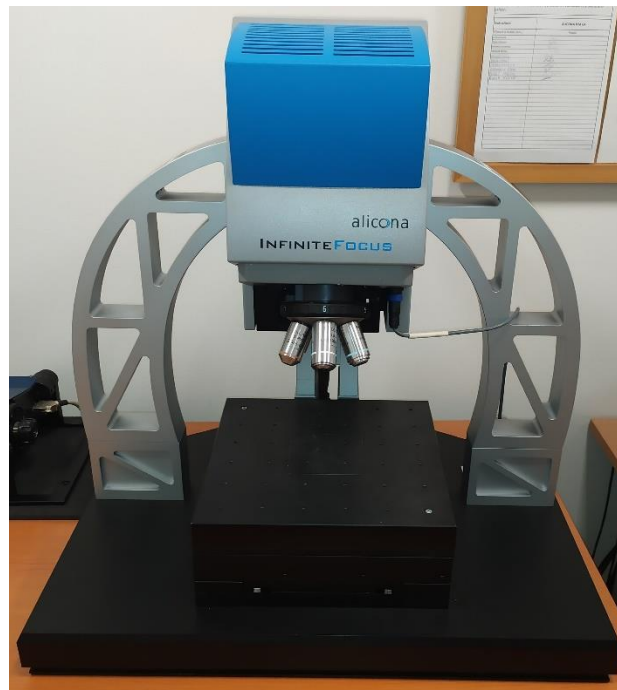
Po 3D tisku a tepelném zpracování byly vrtáky opět broušeny na stejném stroji (Obr. 42), jako předchozí vrtáky.



**Obr. 51: Vrtáky po broušení**

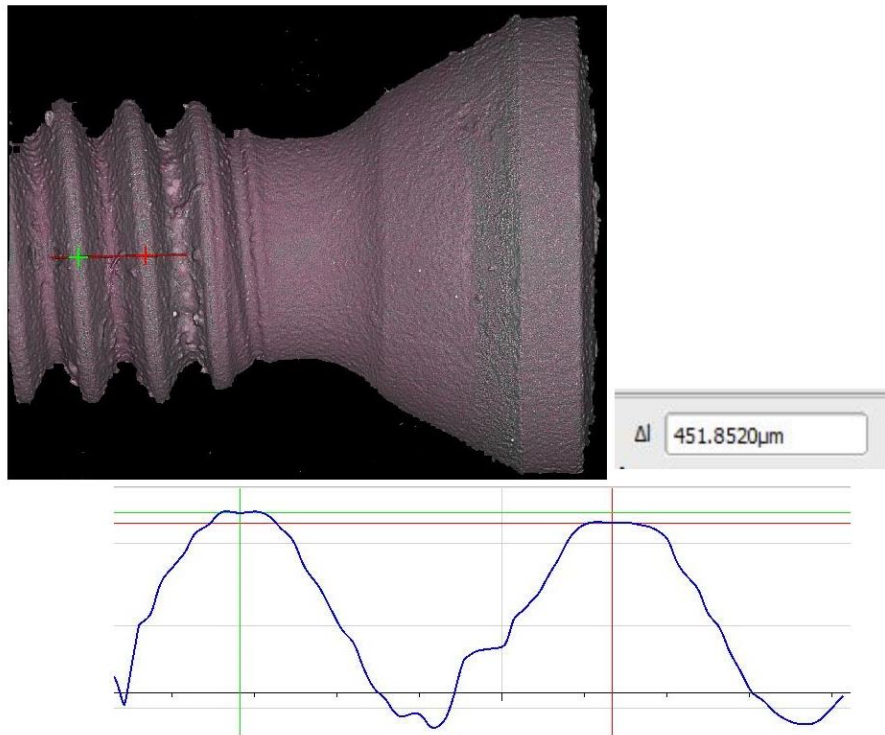
Po broušení následovalo frézování šroubovic vrtáků, pro odvod třísek. Dále bylo zapotřebí ofrézovat vrchol vrtáku, včetně odstranění upínacího čepu. Nakonec bylo zapotřebí vyfrézovat lůžka, opatřena závitovým otvorem pro upnutí VBD.

Ještě, než mohlo být obrábění provedeno, bylo zapotřebí zjistit přesné stoupání závitu (M2, 2), který sloužil pro upnutí VBD. Po nenalezení této informace na internetu, ani nezjištění informace po konzultaci s výrobcem, se nabízelo zjistit stoupání závitu na upínacím šroubu pomocí opticko-skenovacího zařízení IFM G4 (Obr. 52).



**Obr. 52: Opticko-skenovací zařízení IFM G4 – laboratoř RTI**

Po naskenování šroubu a změření stoupání závitu (0,45 mm) bylo zjištěno, že se jedná o závit (M2,2 x 0,45), který odpovídá nejnovějším normám. Zjišťování stoupání závitu je znázorněné na Obr. 53.



Obr. 53: Zjišťování stoupání závitu

Následovalo, již zmíněné obrábění na univerzálním pěti-osém obráběcím centru od společnosti DMG MORI (Obr. 54).



Obr. 54: Obráběcí centrum DMU 65 monoBLOCK – Vědeckotechnický park v Plzni [17]

Vzhledem ke zdárnému obrobení alespoň jednoho vrtáku ze dvou, které měli stejný tvar chladicího kanálu, náročnosti obráběcího procesu, časové vytíženosti stroje a závěrečnému testování jen některých typů vrtáků, bylo rozhodnuto, že není potřeba obrobít všech osm vrtáků. Mezi vrtáky, které nebyly obrobeny, patří vrták s trojúhelníkovým typem chladicích kanálů, vrták s velkým průměrem chladicích kanálů a vrták 1:1 (Obr. 55).



Obr. 55: Vrtáky po obrobení a zbylé tři neobrobené vrtáky

### 3.4 Testování funkčnosti vrtáků

Po finálním zhotovení vrtáků, bylo nutné zjistit, zda vrtáky vůbec fungují (zda vytvářejí otvory). K testování posloužilo opět univerzální, pěti-osé obráběcí centrum (Obr. 54).

#### 3.4.1 Výběr variant pro testování

Pro testování vrtáků, v rámci BP byl zvolen originální vrták, vrták 1:1 a vrták s trojúhelníkovými chladicími kanály (Obr. 56).



Obr. 56: Testované vrtáky

### 3.4.2 Výběr parametrů a řezných podmínek

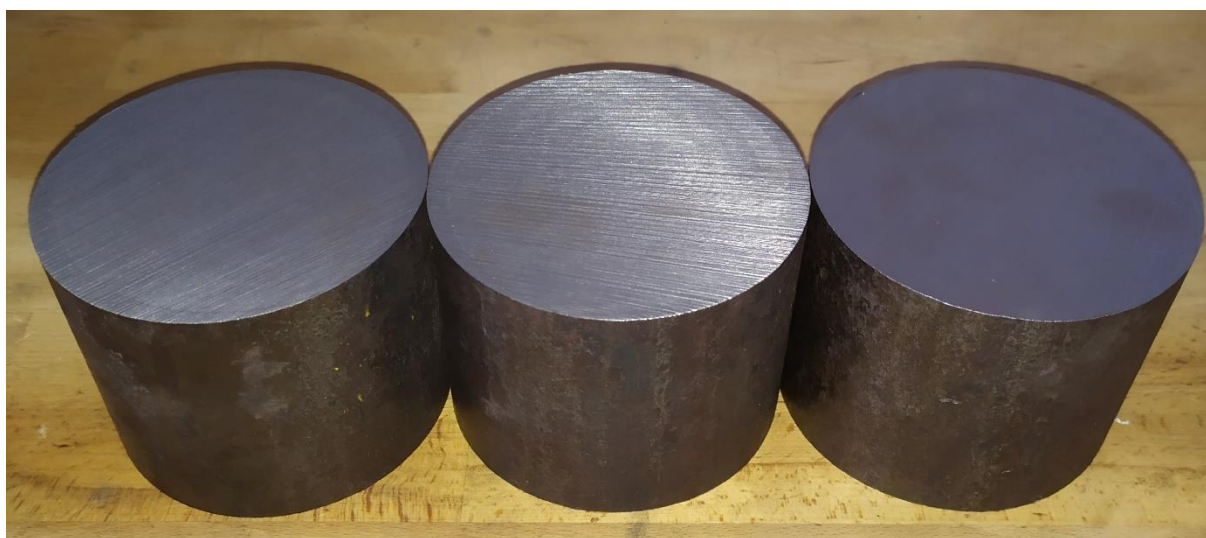
Pro každý, z testovaných vrtáků, byly zvoleny stejné parametry a řezné podmínky (Tab. 1).

Tab. 1: Řezné podmínky

Řezné podmínky	
Počet děr	15
Hloubka díry h [mm]	40
Průměr díry D [mm] (vrtáku)	20
Posuv $f_{ot}$ [mm]	0,1
Řezná rychlost $v_c$ [m/min]	90
Materiál obrobku	ČSN 12 050

### 3.4.3 Příprava materiálu, určeného k testování

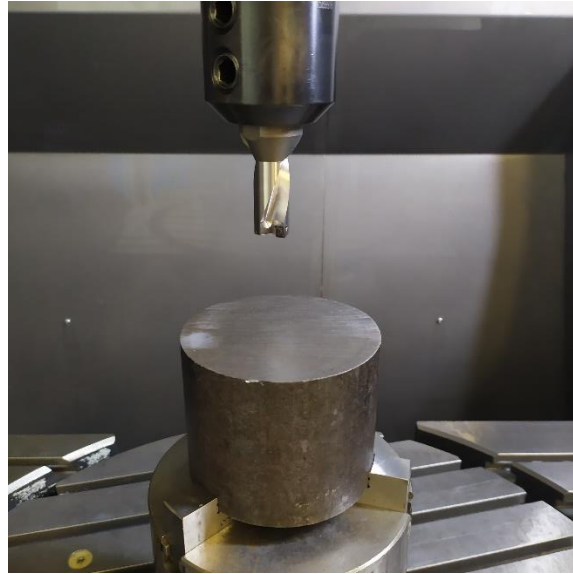
Jak již bylo řečeno (Tab.1), pro testování byl zvolen materiál ČSN 12 050. V tomto případě, byla jako polotovar k dispozici tyč o průměru 110 mm. Z této tyče, byly nařezány kratší tyče na pásové pile, o délce 85 mm. Těchto kratších tyčí bylo nařezáno celkem 6 kusů (původně bylo plánováno vrtání většího množství děr), pro test byly použity 3 kusy (Obr. 57).



Obr. 57: Materiál, připravený pro obrábění

### 3.4.4 Průběh testu a jeho výsledek

Poté mohlo následovat již zmíněné testování třech typů vrtáků. Na Obr. 58 je vidět upnutí vrtáku s trojúhelníkovými chladicími kanály do vřetena stroje a pod ním upnutí jednoho z polotovarů. Obr. 58 je pořízen těsně před spuštěním stroje, a tedy začátkem testu jednoho ze tří vrtáků.



**Obr. 58:** Jedna ze tří variant vrtáku, připravená na test

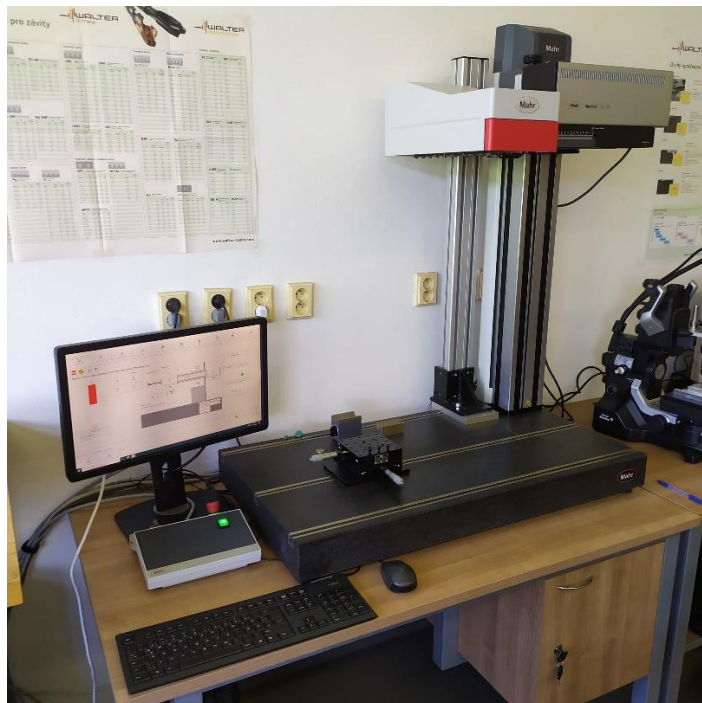
Testování funkčnosti všech tří typů vrtáků proběhlo v pořádku, žádný z vrtáků nebyl při obrábění poškozen. Všechny tři typy vrtáků vykazovaly stabilní řezné podmínky.

Obr. 59 znázorňuje výsledky zkráceného testu. Jak můžeme vidět, experiment byl nastaven tak, aby každý z nástrojů vyvrtal 15 děr. Při testování bylo po každém testu odebráno trochu třísek pro porovnání, následovalo vyčištění stroje, upnutí další varianty vrtáku, výměna polotovaru a opětovné spuštění stroje.



**Obr. 59:** Výsledek testu

Po testování proběhlo změření průměrů všech děr každého ze tří obrobků, a následně byl vypočten aritmetický průměr. Dále byla změřena kvalita povrchu u první a poslední díry. Z těchto naměřených hodnot byl opět vypočten aritmetický průměr. Výsledné hodnoty jsou zaznamenány v Tab. 2. Měření drsností všech děr, bylo provedené na drsnoměru MarSurf LD 120 od společnosti Mahr (Obr. 60).



Obr. 60: Drsnoměr Mahr MarSurf LD 120 – laboratoř KTO

Tab. 2: Výsledky testu

Výsledky testu							
Průměry děr D [mm]			Drsnost povrchu [ $\mu\text{m}$ ]				
Originál	Troj.	1:1		Originál	Troj.	1:1	
19,96	20,24	20,07	Ra	2,904	3,847	6,618	První díra
			Rz	16,549	22,413	32,469	
			Ra	3,567	3,142	5,134	Poslední díra
			Rz	22,855	19,225	27,422	

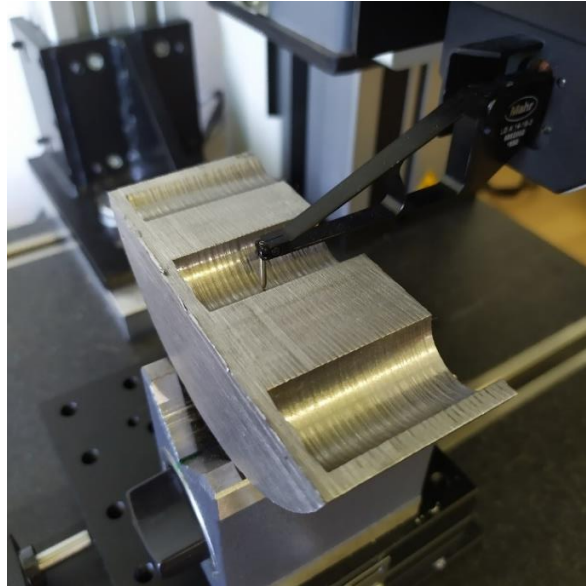
Hodnota aritmetického průměru děr u obrobků, vyvrtaných vrtákem s trojúhelníkovými chladičnými kanály, a vrtákem 1:1 se v řádu desetin liší od aritmetického průměru děr obrobku vyvrtaných originálním vrtákem. Tyto nepatrné odchylky pravděpodobně vznikly při výrobě nástroje.

První díra obrobku, vyvrtaná originálním vrtákem disponuje nejnižší drsností, a díra vyvrtaná vrtákem 1:1 disponuje nejvyšší drsností.

Podíváme-li se na poslední díru, zjistíme, že hodnoty drsností u děr, vyvrtaných vrtákem s trojúhelníkovými chladičnými kanály, a vrtákem 1:1, se oproti první díře snížily. To může být zapříčiněno tím, že VBD v průběhu vrtání lépe dosedly na lůžka a řezný proces se stabilizoval.



Zároveň stojí za povšimnutí, že drsnost u poslední díry, vyvrtané vrtákem s trojúhelníkovými chladičnými kanály, je nižší než drsnost poslední díry, vyvrtané originálním vrtákem. Zde můžeme předpokládat, že trojúhelníkový chladič kanál, vykazuje lepší chladič účinek.



Obr. 61: Měření drsnosti u poslední díry vyvrtané vrtákem 1:1

Při testu byl sledován příkon stroje, který se pohyboval bez výkyvů v rozmezí 18-23 % z maximálního výkonu stroje, což potvrzuje stabilitu řezu u všech tří vrtáků.

Při vizuální kontrole třísek, odebraných po každém obráběcím procesu, nevykazují žádný větší rozdíl a všechny tvoří člankovitý tvar, který je pro třískové obrábění vyhovující. Vlevo vidíme třísky, odebrané po vrtání originálním vrtákem, uprostřed po vrtání s vrtákem 1:1 a vpravo s vrtákem s trojúhelníkovými chladičnými kanály.



Obr. 62: Porovnání třísek

## 4 Závěr

Cíle bakalářské práce byly splněny. Podařilo se zkonstruovat vrtací nástroj, identický s originálním vrtákem. Na základě teoretických poznatků, ze kterých byly vybrány ty nejdůležitější informace, se podařilo zkonstruovat i další varianty vrtáků. Po konstrukci následovala výroba vrtacích nástrojů pomocí 3D tisku kovů a jejich závěrečné úspěšné otestování společně s vyhodnocením.

Hlavní podstatou testování vrtacích nástrojů bylo ověření jejich funkčnosti zkráceným testem. Výsledky splnily očekávání a u všech tří testovaných vrtáků se projevíly stabilní rezné podmínky, které byly doprovázeny klidným chodem stroje. Po testování byly proměřeny průměry otvorů děr, kvalita obrobeného povrchu a vizuální porovnání třísek. Naměřené výsledky jsou vstupní hodnoty pro další pokračování.

Při zamyšlení se, na možném rozšíření stávající práce a doporučení do budoucna pro další výzkum, se nabízí dokončení výroby zbylých variant, a v případě úspěšné výroby následné testování funkčnosti. Dále je nutné znovu otestovat všechny varianty, provést vyhodnocení a přesně analyzovat podstatu uvedených dílčích odlišností.

## Zdroje

- [1] BRYCHTA, Josef. *Technologie II*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-18
- [2] SANDVIK COROMANT. *Vrtání* [online]. Sandviken [cit. 2020-12-12]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/drilling/pages/default.aspx>
- [3] SANDVIK COROMANT. *Nástroje pro vrtání* [online]. Sandviken [cit. 2020-12-12]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/pages/drilling-tools.aspx>
- [4] *Monolitní karbidové vrtáky: CoroDrill 460* [online]. Sandvik Coromant [cit. 2021-12-10]. Dostupné z: [https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/corodrigill\\_460/pages/default.aspx?nodeid=2272](https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/corodrigill_460/pages/default.aspx?nodeid=2272)
- [5] *Vrtání: Plátkový vrták X-GEAR* [online]. Hradec Králové: CeraTec, 2017 [cit. 2022-01-03]. Dostupné z: <https://www.ceratec-shop.com/products/o15-5-o21-5-2xd-5xd-platkovy-vrtak-x-gear/>
- [6] MÜLLER, Daniel, et al. Tool lifetime when drilling Inconel 718 in dependence of the cooling channel design—Influence of the clearance angle, the channel diameter, number, and shape. *Procedia CIRP*, 2021, 101: 278-281.
- [7] *Rady týkající se vrtání: Užitečné návody a rady týkající se vrtání* [online]. Sandvik Coromant [cit. 2021-12-10]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/drilling/pages/drilling-tips.aspx>
- [8] *Publications: Catalogs* [online]. Iscar [cit. 2022-05-23]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/newarticles.aspx/lang/en/newarticleid/2393>
- [9] GUO, Dalin, et al. Improving cutting performance of carbide twist drill combined internal cooling and micro-groove textures in high-speed drilling Ti6Al4V. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 100.1-4: 381-389.
- [10] *INNOTOOL: Welcome to INNOTOOL!* [online]. Německo: Innovative Tooling, 2022 [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: <https://www.innotool.de/>
- [11] *O nás: Gühring je společností s bohatou tradicí a dnes je jedním z předních světových výrobců přesných nástrojů.* [online]. Na Perkách 608: Gühring, 2022 [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <https://guehring.com/cs/about-us/about-guehring-czech/>
- [12] *RT 100 TRIGON RATIO DRILLING TOOL: Innovative design for efficient cooling* [online]. [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <https://guehring.com/en/products/drilling-tools/>
- [13] *RATIO VRTACÍ NÁSTROJ RT 100 TRIGON: Inovativní design pro efektivní chlazení* [online]. [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <https://guehring.com/cs/products/drilling-tools/>
- [14] *Markets and sectors* [online]. Mapal, 2022 [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <https://mapal.com/en-int/mapal-company>
- [15] *Innovative power: Close to the customer - worldwide* [online]. Mapal, 2022 [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <https://mapal.com/en-int/mapal-company>
- [16] *New Catalogues: Bore machining* [online]. Mapal, 2022 [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <https://mapal.com/en-int/media/catalogues>

[17] *Prohlídka areálu: Fotogalerie ineriérů* [online]. Plzeň: Vědeckotechnický park Plzeň [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <http://www.vtpplzen.cz/prohlidka-arealu/prohlidka-arealu.aspx>

[18] *INNOTOOL: Catalogue* [online]. INNOTOOL, 2019 [cit. 2022-05-23]. Dostupné z: <https://www.innotool.de/catalogue>