

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N0715A270011 Obrábění, aditivní
technologie a zabezpečování kvality

Studijní specializace: Bez specializace

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Inovace vnitřního systému chlazení vrtacích nástrojů s využitím 3D
tisku**

Autor: Bc. Ladislav TUŠL

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

Akademický rok 2023/2024

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Ladislav TUŠL**
Osobní číslo: **S22N0010P**
Studijní program: **N0715A270011 Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality**
Téma práce: **Inovace vnitřního systému chlazení vrtacích nástrojů s využitím 3D tisku**
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

Zásady pro vypracování

- Úvod
- Rozbor současného stavu
- Návrh a realizace vlastního řešení
- Zhodnocení dosažených výsledků
- Závěr

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

Seznam doporučené literatury:

- ŠTULPA, Miloslav. *Technologie obrábění: CNC soustružení, frézování, vrtání: pro praxi*. Praha: Grada publishing, 2022. ISBN 978-80-271-2883-9.
- GIBSON, Ian. *Additive Manufacturing Technologies Third Edition*. Third Edition. Springer Nature Switzerland, 2020. ISBN 9783030561260.
- HEINRICH, Grote Karl. *Springer Handbook of Mechanical Engineering*. 2nd Edition. Springer Nature Switzerland, 2021. ISBN 9783030470340.

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

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

Datum zadání diplomové práce: **16. října 2023**
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2024**

L.S.

Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.
děkan

Doc. Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě 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 diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval panu doc. Ing. Miroslavu Zetkovi, Ph.D. za jeho ochotu, čas a přínosné rady poskytované v průběhu vedení této diplomové práce. Současně bych chtěl poděkovat panu Ing. Tomáši Bakšovi za množství doporučení a připomínek, poskytnutých ke zpracování této diplomové práce.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Bc. Tušl	Jméno Ladislav	
STUDIJNÍ PROGRAM	N0715A270011 Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Zetek, Ph.D.	Jméno Miroslav	
PRACOVÍŠTĚ	ZČU - FST - KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Inovace vnitřního systému chlazení vrtacích nástrojů s využitím 3D tisku		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2024
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	100	TEXTOVÁ ČÁST	66	GRAFICKÁ ČÁST	34
---------------	-----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS	Diplomová práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V rámci teoretické části je nahlédnuto do problematiky vnitřního systému chlazení vrtacích nástrojů s využitím elektronických informačních zdrojů. Poznatky při rozboru současného stavu dané problematiky jsou zdrojem informací pro praktickou část diplomové práce. V rámci praktické části diplomové práce byly realizovány jednotlivé dílčí kroky s využitím znalostí, získaných v průběhu studia a z teoretické části diplomové práce, které vedly k dosažení cíle diplomové práce.
KLÍČOVÁ SLOVA	Testování, Měření dat, Vyhodnocování dat, Výpočetní simulace, Vyhodnocení simulace, Vývoj variant, Konstrukce variant

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Bc. Tušl	Name Ladislav		
STUDY PROGRAMME	N0715A270011 Machining, additive technology and quality ensuring			
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Zetek, Ph.D.	Name Miroslav		
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO			
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable	
TITLE OF THE WORK	Innovation of the internal cooling system of drilling tools using 3D printing			

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KTO	SUBMITTED IN	2024
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	100	TEXT PART	66	GRAPHICAL PART	34
----------------	-----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION	The diploma thesis is divided into a theoretical and a practical part. As part of the theoretical part, there is an insight into the issue of the internal system of cooling drilling tools with the use of electronic information sources. Findings from the analysis of the current state of the issue are a source of information for the practical part of the thesis. Within the practical part of the diploma thesis, individual sub-steps were implemented using the knowledge acquired during the study and from the theoretical part of the diploma thesis, which led to the achievement of the goal of the diploma thesis.
KEY WORDS	Testing, Data measurement, Data evaluation, Computational simulation, Simulation evaluation, Variant development, Design variants

Obsah

Přehled použitých zkratk a symbolů.....	9
Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	13
1 Úvod.....	14
2 Rozbor současného stavu	15
2.1 Uvedení do problematiky	15
2.2 Charakteristika technologie vrtání.....	15
2.3 Analýza vybraných článků	17
2.3.1 Úprava hřbetní plochy a její dopad na chlazení	17
2.3.1.1 Návrh experimentu.....	17
2.3.1.2 Úpravy nástrojů před experimentem.....	17
2.3.1.3 Simulační část - výsledky	18
2.3.1.4 Experimentální část - výsledky	19
2.3.1.5 Závěrečné vyhodnocení	21
2.3.2 Chování procesní kapaliny při vrtání materiálu Inconel 718	22
2.3.2.1 Návrh experimentu.....	22
2.3.2.2 Výsledky výpočetních simulací proudění (CFD)	22
2.3.2.3 Závěrečné vyhodnocení	24
2.3.3 Úprava hřbetu nástroje pro zvýšení výkonnosti při vrtání niklových slitin	24
2.3.3.1 Úprava hřbetních ploch.....	24
2.3.3.2 Nastavení experimentu.....	25
2.3.3.3 Vyhodnocení CFD simulací.....	26
2.3.3.4 Vyhodnocení experimentálního obrábění	26
2.3.3.5 Závěrečné vyhodnocení	28
2.4 Nejdůležitější poznatky z rešerše	28
3 Návrh a realizace vlastního řešení.....	29
3.1 Dlouhodobá zkouška řezivosti.....	29
3.2 Výpočetní simulace proudění CFD	31
4 Zhodnocení dosažených výsledků.....	34
4.1 Vyhodnocení dílčích úkonů dlouhodobé zkoušky řezivosti.....	34
4.1.1 Opotřebenění břitu	34
4.1.2 Řezné síly	41
4.1.3 Průměry vyvrtaných otvorů.....	43

4.1.4	Měření průměrů na stroji Zoller genius 3.....	44
4.1.5	Kruhovitost a válcovitost	46
4.1.6	Drsnost	49
4.2	Vyhodnocení výpočetní simulace proudění CFD.....	50
4.3	Vývoj nových variant nástrojů	54
4.4	Sumární zhodnocení dosažených výsledků	61
5	Závěr.....	63
	Seznam použitých zdrojů	64
	PŘÍLOHA č. 1.....	i
	Opotřebení VBD	i
	PŘÍLOHA č. 2.....	x
	Řezné síly	x
	PŘÍLOHA č. 3.....	xix
	Průměry otvorů.....	xix
	PŘÍLOHA č. 4.....	xxii
	Kruhovitost, válcovitost	xxii
	PŘÍLOHA č. 5.....	xxix
	Drsnost povrchu	xxix
	PŘÍLOHA č. 6.....	xxxiii
	Výpočetní simulace proudění CFD	xxxiii

Přehled použitých zkratk a symbolů

DP	Diplomová práce
FST	Fakulta strojní
KTO	Katedra technologie obrábění
BP	Bakalářská práce
MQL	Minimum quality of lubrication
CFD	Computational fluid dynamics
STL	Standard Triangle Language
CAD	Computer aided design
VBD	Vyměnitelná břitová destička
CSV	Comma Separated Values
RTI	Regionální technologický institut

Seznam obrázků

Obr. 1: Aplikace vnitřního systému chlazení u vrtáku firmy Sandvik Coromant [7]	15
Obr. 2: Využití CFD simulace proudění u hlavňového vrtáku [11].....	16
Obr. 3: Aplikace experimentálního obrábění v návaznosti na CFD simulaci [3]	16
Obr. 4: Tvarové drážky na hřbetech nástrojů	17
Obr. 5: Rozložení tepla na řezné hraně [3].....	18
Obr. 6: Znázornění rychlostí proudění při objemovém průtoku 1l/min [3]	18
Obr. 7: Výsledné teploty (vlevo) a průměrná teplota (vpravo) v blízkosti hlavní řezné hrany při objemovém průtoku 1 l/min [3]	19
Obr. 8: Maximální šířka opotřebení (VBmax) v závislosti na dráze vrtání [3]	19
Obr. 9: Hodnoty krouticího momentu a posuvové síly [3]	20
Obr. 10: Hodnoty drsnosti povrchu vrtu Rz a Rmax [3].....	20
Obr. 11: Hodnocení průměru vrtu, kruhovitosti a soustřednosti [3]	21
Obr. 12: Rychlosti proudění kapaliny s využitím CFD simulace [11].....	22
Obr. 13: Alicona Infinite Focus G5 [16]	22
Obr. 14: Vytvoření 3D modelu vyhlazené třísky pro CFD simulace [11]	23
Obr. 15: CFD simulace s uvažováním třísek [11].....	23
Obr. 16: CFD simulace v odvodňovací drážce [11].....	24
Obr. 17: Standartní nástroj a dvě upravené varianty hřbetu nástroje [24]	24
Obr. 18: Druhá varianta úpravy hřbetu nástroje (Gen. 2) [24].....	25
Obr. 19: CFD simulace proudění pro Standartní nástroj a dvě upravené varianty [24].....	26
Obr. 20: Vývoj opotřebení v závislosti na dráze vrtání [24].....	26
Obr. 21: Vývoj opotřebení u nástrojů Gen. 1 a Gen. 2 [24].....	27
Obr. 22: Porovnání břitů u nástrojů Gen. 1 a Gen. 2 [24].....	27
Obr. 23: Dynamometr Kistler 9272 se sklíčidlem.....	29
Obr. 24: Pětiosé frézovací centrum DMU 65 monoBlock [1]	30
Obr. 25: Pracovní prostor stroje při experimentu.....	30
Obr. 26: Zkušební váleček pro měření řezných sil.....	30
Obr. 27: Znázornění řezného procesu pro CFD simulaci.....	31
Obr. 28: Doména kapaliny (vlevo) a síť konečných prvků (vpravo)	31
Obr. 29: Zachycování průtočného množství kapaliny nástrojem.....	32
Obr. 30: Měření průtočného množství kapaliny nástrojem.....	32
Obr. 31: KEYENCE VHX-6000 [20]	34
Obr. 32: Výňatek řezných podmínek pro skupinu P (oceť) [19]	35
Obr. 33: Zničená vnější VBD.....	35

Obr. 34: Zničená vnitřní VBD.....	36
Obr. 35: Spletence na nástroji	36
Obr. 36: Proměnlivý posuv v průběhu vrtání	37
Obr. 37: Hřbet vnější VBD Ref. nástroje po 10 otvorech	38
Obr. 38: Čelo vnější VBD Ref. nástroje po 10 otvorech.....	38
Obr. 39: Zahlčení nástroje $\varnothing 2,9$	39
Obr. 40: Vyhodnocení opotřebení VBB po dlouhodobé zkoušce řezivosti	40
Obr. 41: Graf posuvové síly Ref. nástroje po 10 otvorech.....	41
Obr. 42: Maximální hodnota krouticích momentů u všech variant nástrojů.....	41
Obr. 43: Maximální hodnota posuvových sil u všech variant nástrojů	42
Obr. 44: Maximální hodnota radiálních sil u všech variant nástrojů	42
Obr. 45: Použité pomůcky pro měření	43
Obr. 46: Měření průměru zkušebního vzorku	43
Obr. 47: Graf \varnothing otvorů jednotlivých variant nástrojů.....	44
Obr. 48: Univerzální měřicí stroj Zoller genius 3 [1]	44
Obr. 49: Hodnota naměřeného průměru nástroje 1:1 ze stroje Zoller.....	45
Obr. 50: kruhoměr Taylor Hobson Talyrond 585 Lt.....	46
Obr. 51: Protokol z měření kruhovitosti pro Ref. nástroj.....	46
Obr. 52: Graf kruhovitosti otvorů po vyvrtání Ref. nástrojem.....	47
Obr. 53: Graf aritmetického průměru kruhovitosti	47
Obr. 54: Válcovitost desátého otvoru po vyvrtání nástrojem 1:1	48
Obr. 55: Graf válcovitosti.....	48
Obr. 56: 3D souřadnicový měřicí stroj CMM Carl Zeiss Prismo 7 Navigator [23].....	49
Obr. 57: Průměrná aritmetická úchylka Ra po 10 otvorech [μm]	49
Obr. 58: Průměrná aritmetická úchylka Ra po 300 otvorech [μm]	50
Obr. 59: Proudnice domény procesní kapaliny nástrojem Ledvinka	50
Obr. 60: Proudnice procesní kapaliny v oblasti řezné zóny nástroje Ledvinka	51
Obr. 61: Kontury velikosti absolutní rychlosti procesní kapaliny u dna díry	51
Obr. 62: Kontury velikosti absolutní rychlosti procesní kapaliny šest desetin milimetru nad dnem díry.....	52
Obr. 63: Kontury velikosti absolutní rychlosti procesní kapaliny dvanáct desetin milimetru nad dnem díry.....	52
Obr. 64: Kontury velikosti absolutní rychlosti procesní kapaliny dva milimetry nad dnem díry	53
Obr. 65: Vektory rychlosti procesní kapaliny u dna díry	53
Obr. 66: Vektory rychlosti procesní kapaliny šest desetin milimetru nad dnem díry	54

Obr. 67: Nástroj Ledvinka (vlevo), nástroj Ledvinka 2 (vpravo)	54
Obr. 68: Kontrola kolizí chladicích kanálů s konstrukčními prvky nástroje Ledvinka 2	55
Obr. 69: Varianta nástroje Ledvinka 3	55
Obr. 70: Kontrola kolizí chladicích kanálů s konstrukčními prvky nástroje Ledvinka 3	56
Obr. 71: Varianta nástroje Ledvinka 4	56
Obr. 72: Kontrola kolizí chladicích kanálů vůči sobě u varianty Ledvinka 4.....	57
Obr. 73: Varianta nástroje Ledvinka 5	57
Obr. 74: Kontrola kolizí středového chladicího kanálu s lůžky VBD	57
Obr. 75: Varianta nástroje Ledvinka 6	58
Obr. 76: Kontrola kolizí chladicích kanálů vůči sobě u varianty Ledvinka 6.....	58
Obr. 77: Oblast vstupu procesní kapaliny do chladicích kanálů	59
Obr. 78: Oblast vstupu procesní kapaliny do chladicích kanálů nástroje Ledvinka 4	60
Obr. 79: Upravená oblast vstupu procesní kapaliny do chladicích kanálů nástroje Ledvinka 4	60
Obr. 80: Nejlepší varianta nástroje Ledvinka 4.....	62

Seznam tabulek

Tab. 1: Parametry nástroje a řezné podmínky [3]	17
Tab. 2: Parametry nástroje a řezné podmínky [11]	22
Tab. 3: Parametry nástroje a řezné podmínky [24]	25
Tab. 4: Zadané hodnoty a výsledná rychlost procesní kapaliny	33
Tab. 5: Okrajové podmínky pro CFD simulaci	33
Tab. 6: Prvotní řezné podmínky pro dlouhodobou zkoušku řezivosti	35
Tab. 7: Stabilní řezné podmínky pro dlouhodobou zkoušku řezivosti.....	37
Tab. 8: Rozhodovací tabulka opotřebení.....	40
Tab. 9: Porovnání stroje Zoller s hodnotami průměrů děr	45
Tab. 10: Tabulka objemových průtoků jednotlivých navržených variant.....	59

1 Úvod

Vrtání je technologie třískového obrábění, která je ve výrobním cyklu nepostradatelná při výrobě průchozích, či neprůchozích otvorů různých rozměrů. Při vrtání vzniká obrovské množství tepla, které má vysoký dopad na opotřebení břitu nástroje vlivem vysokého teplotního zatížení. Z tohoto důvodu je potřeba místo řezu dostatečně chladit s využitím procesní kapaliny. Místo řezu je však schováno v díře a procesní kapalina je tak nejhodněji dopravitelná skrze nástroj pomocí vnitřního systému chlazení. Procesní kapalina má významný vliv na trvanlivost nástroje. DP se bude zabývat inovací vnitřního systému chlazení pomocí 3D tisku kovů pro optimální přivedení procesní kapaliny do místa řezu.

DP přinese lepší, inovativní metody vnitřního systému chlazení, které mohou být zdrojem prodloužení trvanlivosti nástroje. Tím, že bude dosaženo prodloužení trvanlivosti nástroje, náklady spojeny s obráběním budou nižší a nástroj bude déle využit.

Při práci bude postupováno v duchu metodiky, která je standardně vyučována na KTO FST. Nejprve bude kapitola, věnována rozboru současného stavu. Tato kapitola má zajistit hlubší pochopení dané problematiky a načerpání vědomostí, zúročených v praktické části DP. K dosažení očekávaného výsledku budou použity experimentální a simulační metody, společně se získanými vědomosti během studia.

Cílem DP je nalezení návrhu inovativního řešení vnitřního systému chlazení vrtacího nástroje, které bude podloženo vyhodnocením experimentálních a simulačních metod.

2 Rozbor současného stavu

2.1 Uvedení do problematiky

Tato DP navazuje a bude volným pokračováním výzkumu BP, která byla úspěšně obhájena v roce 2022. [1]

V rámci DP bude nejprve analyzován současný stav s využitím elektronických informačních zdrojů (teoretická část DP). Tyto poznatky budou podkladem při zpracování praktické části DP. Ta bude tvořit podstatnou část DP a jejím obsahem budou návrhy variant řešení, jejich realizace, experimentální testování a vyhodnocení.

2.2 Charakteristika technologie vrtání

Vrtání je považováno za nejsložitější výrobní proces, v porovnání s ostatními technologiemi třískového obrábění. Při vrtání vzniká velké množství tepla, zejména při obrábění těžkoobrobitelných materiálů (niklová slitina Inconel 718), které má významný vliv na způsob deformace a snižuje životnost nástroje vlivem velkého teplotního zatížení břitu. Chladicí schopnost metody MQL není tak účinná, jako záplavové chlazení, které odvádí největší množství tepla. Místo řezu se nachází v díře a dopravení procesní kapaliny je obtížné. Tento problém lze vyřešit s použitím nástrojů s vnitřním systémem chlazení (Obr. 1). [2], [3], [4], [5], [6]



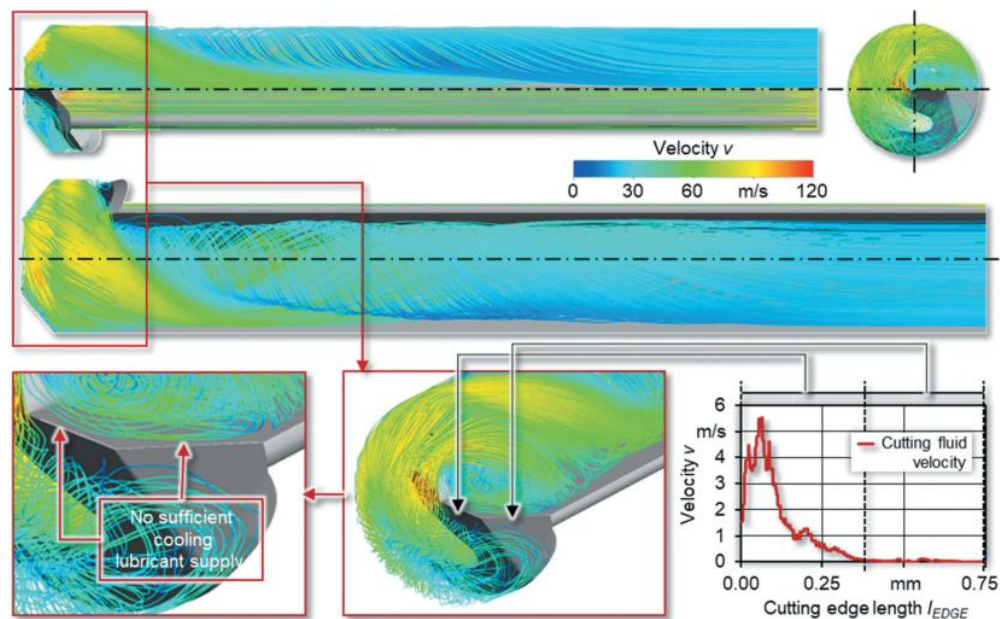
Obr. 1: Aplikace vnitřního systému chlazení u vrtáku firmy Sandvik Coromant [7]

Procesní kapalina musí zajistit dostatečné chlazení a mazání, které má příznivý vliv na zvýšení životnosti nástroje. Jejím dalším úkolem je správný odvod třísek a tím zaručit spolehlivost procesu.[8], [9], [10]

Pokud není nástroj dostatečně zásoben procesní kapalinou, dochází k brzkému selhání nástroje, kterému je potřeba se vyvarovat. Vrtání je závislé na použití procesní kapaliny, procesní kapalina se stává další z proměnných, vedle stroje, nástroje, obrobku a řezných podmínek. [4], [10], [11],

Neopomenutelnými aspekty procesní kapaliny je regulace výrobních nákladů a šetrnost k životnímu prostředí. Řešení těchto dvou aspektů je však dlouhého charakteru. [2]

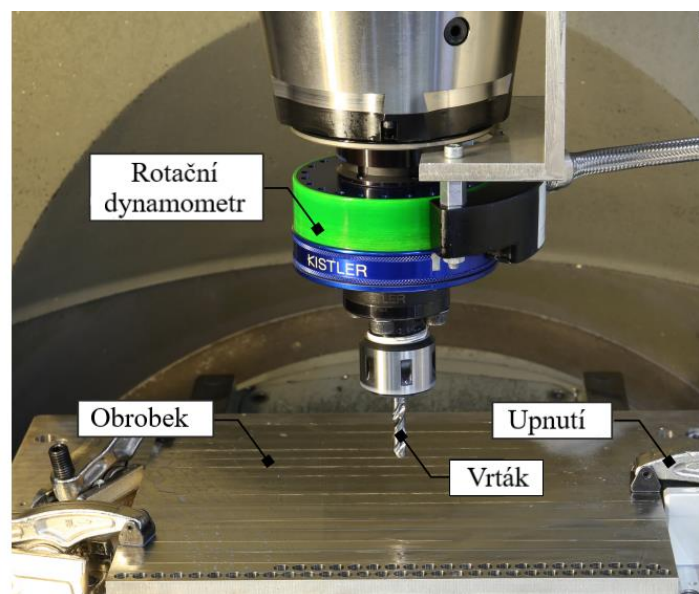
Vzhledem k nepřístupnosti místa řezu při vrtání, nelze analyzovat chování procesní kapaliny a dostatečné zásobení nástroje procesní kapalinou tak nelze ověřit. Pro optimalizaci vnitřního systému chlazení je potřeba aplikovat výpočtové simulace proudění CFD (Obr. 2). [12], [10], [11], [13], [5], [14]



Obr. 2: Využití CFD simulace proudění u hlavňového vrtáku [11]

Díky CFD simulacím je umožněno nahlédnout do místa řezu a přímo analyzovat účinky procesní kapaliny. Tyto analyzované výsledky ze simulace lze využít při optimalizaci přívodu procesní kapaliny do místa řezu při vrtání. CFD simulace výrazně přispívají k hlubšímu pochopení interakcí v místě řezu. [11], [13], [5], [15]

Z CFD simulací jsou získávány cenné informace, které jsou základem pro další zkoumání. Z tohoto důvodu je vhodná kombinace CFD s experimentálním obráběním (Obr. 3). [4], [13], [3]



Obr. 3: Aplikace experimentálního obrábění v návaznosti na CFD simulaci [3]

2.3 Analýza vybraných článků

V této části DP budou shrnuty informace z vybraných článků, které se zabývají vnitřním systémem chlazení vrtacích nástrojů a chováním procesní kapaliny.

2.3.1 Úprava hřbetní plochy a její dopad na chlazení

2.3.1.1 Návrh experimentu

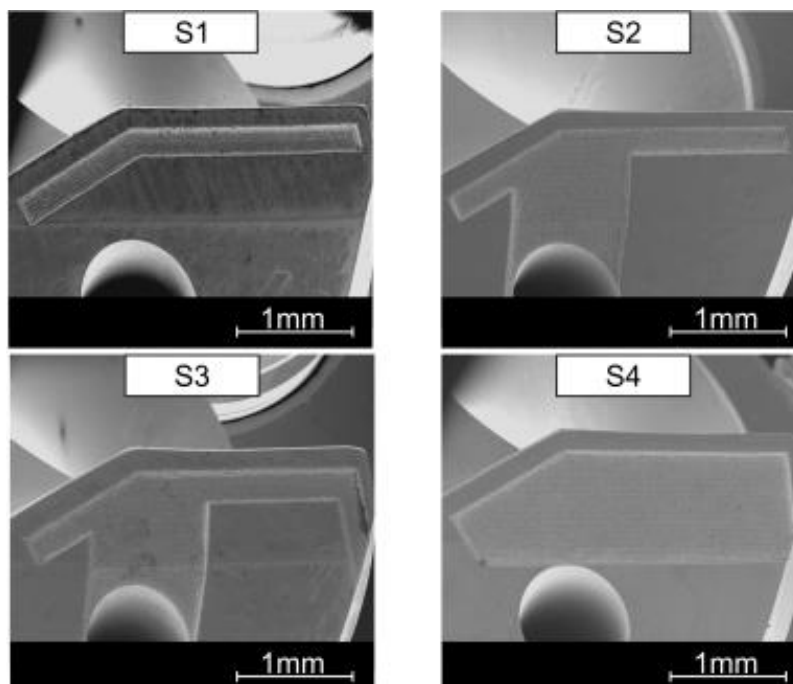
Tato práce byla rozdělena na simulační a experimentální část. Jednotlivé parametry a řezné podmínky, použité při experimentu jsou znázorněny v Tab. 1.

Tab. 1: Parametry nástroje a řezné podmínky [3]

Parametry nástroje a řezné podmínky	
Průměr nástroje d [mm]	8
Průměr kanálu d_c [mm]	1
Hloubka děr [mm]	24
Materiál obrobku	Inconel 718
Řezná rychlost v_c [m/min]	20
Posuv na otáčku f_{ot} [mm/ot]	0,09
Objemový průtok Q_v [l/min]	1

2.3.1.2 Úpravy nástrojů před experimentem

Na základě nízké, až nulové rychlosti proudění kapaliny v blízkosti hlavní řezné hrany, u standardního nástroje, byly hřbetní plochy nástrojů opatřeny tvarovými drážkami za pomoci laseru. Tyto drážky o hloubce 55 μm jsou vzdálené 150 μm od hlavního ostří (Obr. 4). [3]

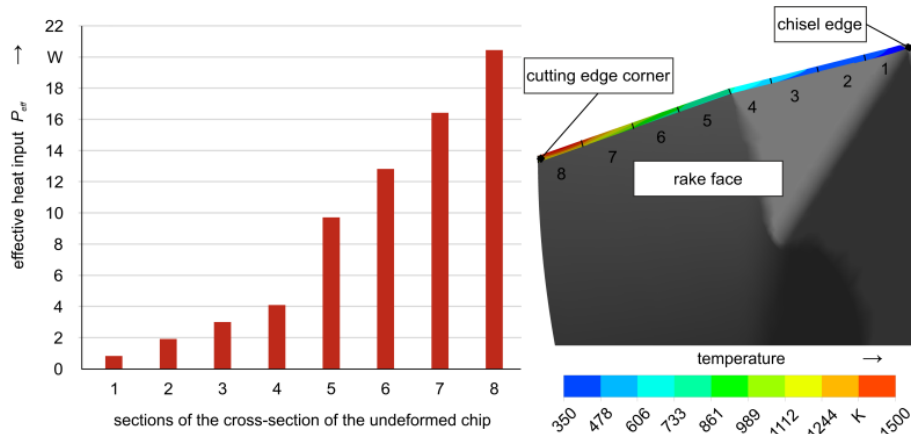


Obr. 4: Tvarové drážky na hřbetech nástrojů

Drážka S1 kopíruje tvar hlavní řezné hrany, pro zlepšení rychlosti kapaliny v dané oblasti. Drážka S2 je doplněna o korýtko, vedoucí z výstupu chladicího kanálu. S3 má drážku protaženou pro odvedení více kapaliny do šroubovitě drážky vrtáku. U S4 je snižena celá plocha od hlavního řezné hrany až ke kanálu (Obr. 4). [3]

2.3.1.3 Simulační část - výsledky

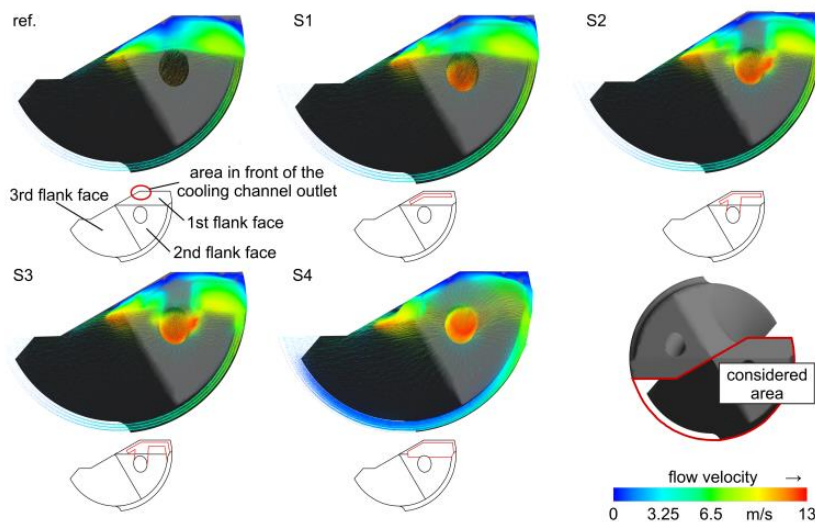
Interakce tekutina – struktura znázorňuje rozložení tepla na řezné hraně nástroje, při rozdělení na jednotlivé segmenty (Obr. 5).



Obr. 5: Rozložení tepla na řezné hraně [3]

Teplu roste se vzdáleností od hrotu vrtáku směrem ke špičce se vzrůstající řeznou rychlostí, která je nejvyšší na obvodu vrtáku (Obr. 5). [3]

Díky simulacím lze pozorovat rychlosti proudění kapaliny v oblasti hřbetu u referenčního, neupraveného vrtáku (ref.) a u upravených vrtáků S1, S2, S3 a S4 (Obr. 6).

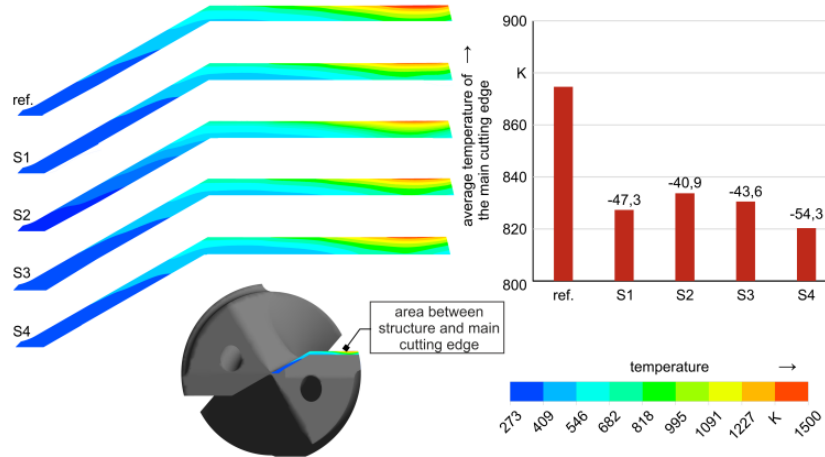


Obr. 6: Znázornění rychlostí proudění při objemovém průtoku 1 l/min [3]

Ze simulací je patrné, že s pomocí drážek S1, S2 a S3 se zvýšila rychlost proudění v oblasti hlavní řezné hrany a také v oblasti špičky nástroje, oproti ref. nástroji. Mezi úpravami S2 a S3 nelze pozorovat nějaké významné rozdíly, ovšem oproti S1 se podařilo snížit rychlost mezi chladicím kanálem a hlavní řeznou hranou. [3]

Díky úpravě S4 je procesní kapalina nejrovnoměrněji rozložena v oblasti hřbetu v porovnání s ostatními vrtáky. Ve srovnání s ref. vrtákem je zvýšena rychlost před výstupem chladicího kanálu a v oblasti špičky nástroje se podařilo eliminovat mrtvé zóny (Obr. 6). [3]

Výsledné teploty mezi hlavní řeznou hranou a drážkami jsou zobrazeny na Obr. 7 (vlevo). Průměrná teplota na hlavní řezné hraně je zobrazena na Obr. 7 (vpravo).

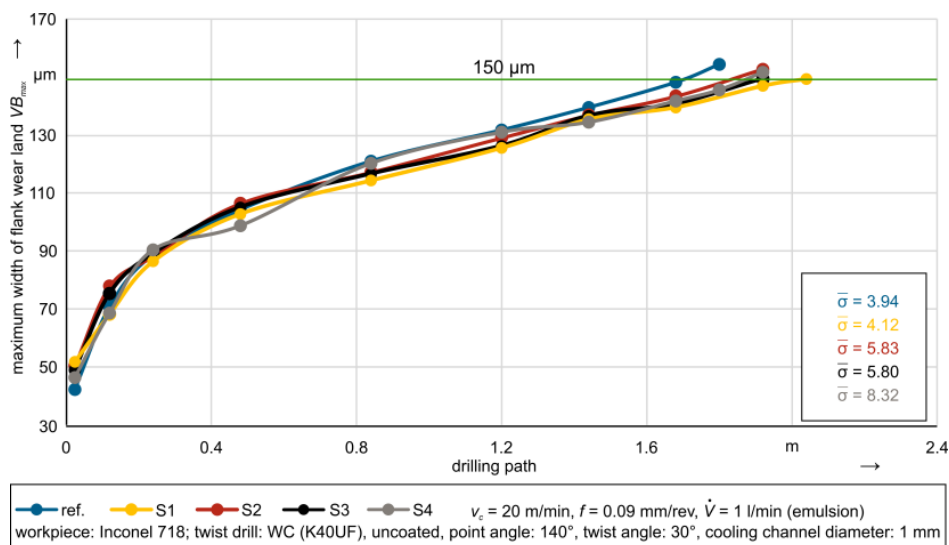


Obr. 7: Výsledné teploty (vlevo) a průměrná teplota (vpravo) v blízkosti hlavní řezné hrany při objemovém průtoku 1 l/min [3]

Všechny úpravy snižují teplotu ve srovnání s ref. nástrojem. Úpravou S1 se teplota nejvíce sníží v oblasti špičky nástroje. Úprava S2 nejvýrazněji snižuje teploty v blízkosti hrotu nástroje. Rozložení teplot u S3 je podobné, jako u S1 s mírně vyššími teplotami u špičky nástroje. Úprava S4 má nejnižší teploty před výstupem chladicího kanálu. Průměrná teplota je oproti ref. nástroji snížena přibližně o 47 K u S1, 41 K u S2. Úprava S3 vykazuje snížení teploty oproti ref. nástroji přibližně o 44 K. Nástroj S4 dosahuje nejvyššího snížení průměrné teploty oproti ref. nástroji o 54 K (Obr. 7). [3]

2.3.1.4 Experimentální část - výsledky

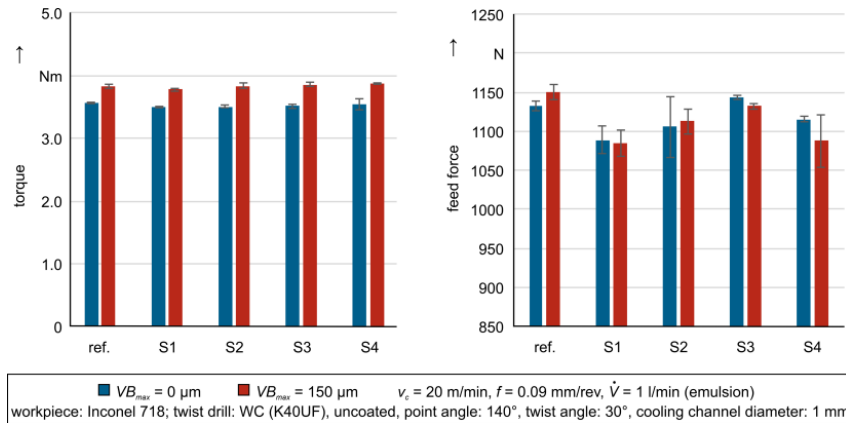
Na Obr. 8 je znázorněn graf maximální šířky opotřebené plochy hřbetu (VB_{max}) v závislosti na dráze vrtání.



Obr. 8: Maximální šířka opotřebení (VB_{max}) v závislosti na dráze vrtání [3]

Dle grafu (Obr. 8) je průběh opotřebení pro všechny varianty, včetně referenčního nástroje analogický. Nicméně při dosažení dráhy 1,4 m se opotřebení ref. nástroje odchyľuje od upravených nástrojů a dosahuje vyšších hodnot opotřebení při kratší dráze. Nejvýraznější zvýšení životnosti nástroje je docíleno nástrojem S1 o cca 21 % ve srovnání s ref. Nástroje S2 a S3 zvyšují životnost o 11 % a 17 %. Nástroj S4 zvyšuje životnost o 13 %. Vzhledem k tomu, že použité řezné podmínky byly u všech variant nástrojů stejné, lze tyto hodnoty prodloužení životnosti nástrojů přisuzovat ke zlepšeným podmínkám proudění procesní kapaliny vlivem drážek S1 – S4. [3]

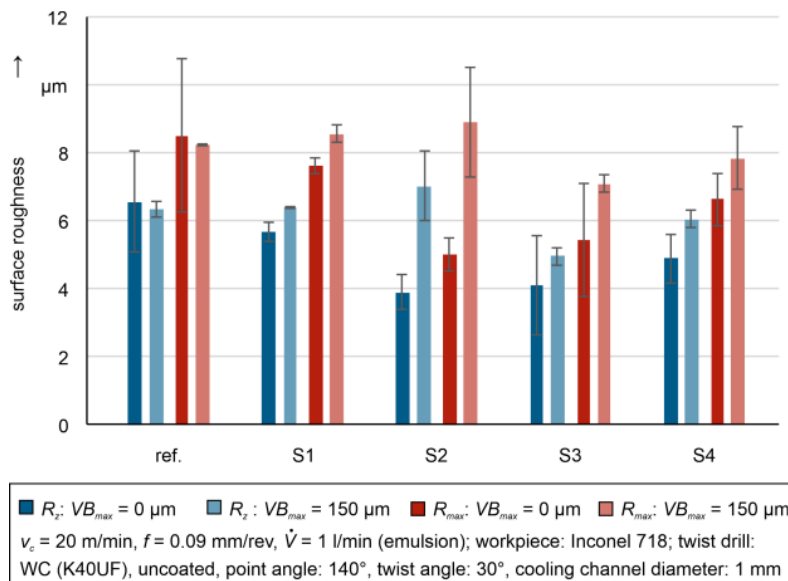
Na Obr. 9 jsou grafy znázorňující hodnoty krouticího momentu (vlevo) a posuvové síly (vpravo).



Obr. 9: Hodnoty krouticího momentu a posuvové síly [3]

Při zvýšeném opotřebení lze pozorovat nárůst točivého momentu o 7 % až 10 % vůči neopotřebovaným nástrojům. V závislosti na konstrukci nástroje (ref. a S1 – S4) nelze však identifikovat žádné významné rozdíly (max. 2 %). Nelze rozpoznat žádný systematický dopad hodnoty opotřebení na velikost posuvové síly (max. 3 %), rovněž nelze rozpoznat dopad konstrukce nástroje (ref. a S1 – S4) na posuvové síly (max. 4 %). [3]

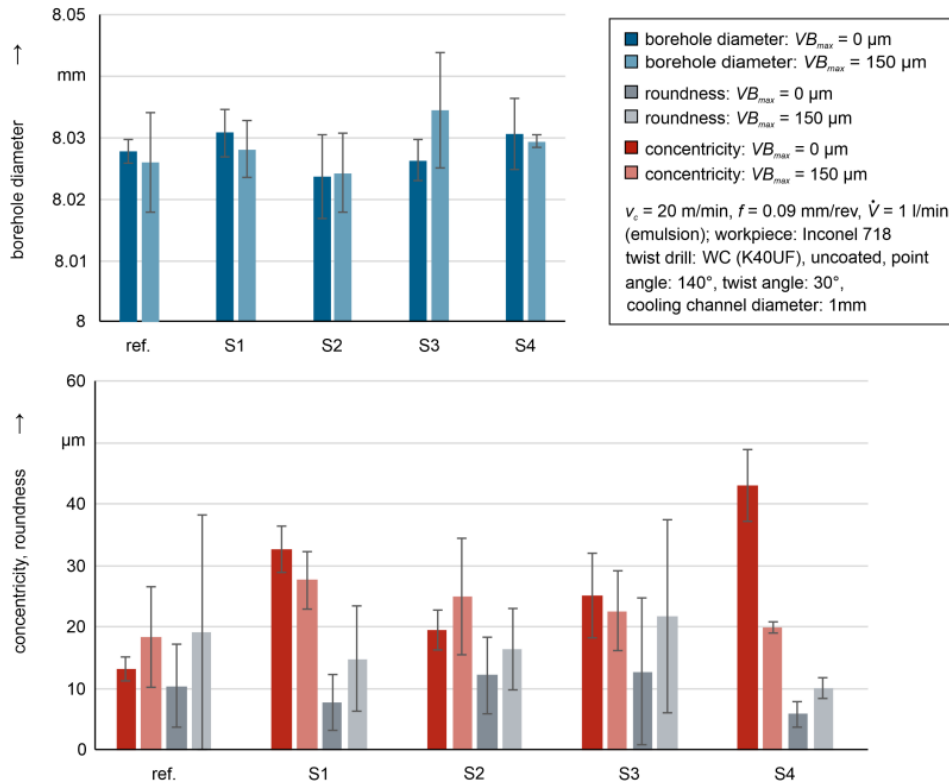
Graf na Obr. 10 znázorňuje hodnoty drsnosti povrchu vrtu R_z a R_{max} v závislosti na opotřebení pro jednotlivé varianty nástrojů.



Obr. 10: Hodnoty drsnosti povrchu vrtu R_z a R_{max} [3]

U modifikovaných nástrojů S1 – S4 lze pozorovat rostoucí drsnost povrchu s rostoucím opotřebením. Ref. nástroj nevykazuje žádné rozdíly pro oba stavy opotřebenění. V neopotrebovaném stavu lze u všech upravených nástrojů pozorovat nižší stavy opotřebenění oproti ref. U nástroje S1 jsou patrné nejmenší rozdíly drsnosti vůči ref. Nástroj S2 má nejnižší hodnoty drsnosti při $VB_{max} = 0 \mu\text{m}$, ale při $VB_{max} = 150 \mu\text{m}$ jsou hodnoty o cca $1 \mu\text{m}$ nad ref. S3 vykazuje nižší hodnoty drsnosti pro R_z a R_{max} ve srovnání s ref. Při $VB_{max} = 0 \mu\text{m}$ jsou hodnoty R_z nižší o cca $2,5 \mu\text{m}$ a při $VB_{max} = 150 \mu\text{m}$ o cca $1,5 \mu\text{m}$ ve srovnání s ref. S4 má nižší hodnoty drsnosti R_z a R_{max} pro obě hodnoty opotřebenění v maximálním rozsahu $1,5 \mu\text{m}$ vůči ref. (Obr. 10). [3]

Jako hlediska, určující kvalitu vrtu byly hodnoceny průměr vrtu (Obr. 11 nahoře), kruhovitost a soustřednost (Obr- 11 dole) v závislosti na opotřebenění u jednotlivých variant nástrojů. U měření průměru vrtu nelze vyvodit systematický vliv jednotlivých variant při hodnotách opotřebenění. Hodnoty kruhovitosti se zvyšují s rostoucím opotřebením. S4 dosahuje nejlepších hodnot kruhovitosti vůči ref. Odchylka soustřednosti S4 je však oproti ostatním vrtákům při $VB_{max} = 0 \mu\text{m}$ výrazně zvýšená, ale při $VB_{max} = 150 \mu\text{m}$ se soustřednost významně neliší od ostatních variant. S3 dosahuje mírně vyšších hodnot kruhovitosti vůči ref. [3]



Obr. 11: Hodnocení průměru vrtu, kruhovitosti a soustřednosti [3]

2.3.1.5 Závěrečné vyhodnocení

Vlivem úpravy hřbetních ploch nástroje se podařilo prodloužit životnost nástroje až o 21%. Hodnoty krouticích momentů a posuvových sil, stejně tak hodnoty vykazující kvalitu vyvrtaných otvorů a drsností nelze považovat za významné, protože mezi nimi není žádný systematický dopad. [3]

2.3.2 Chování procesní kapaliny při vrtání materiálu Inconel 718

Experiment se zabývá analýzou chování procesní kapaliny při vrtání jednobřítým nástrojem, s využitím CFD simulací proudění. Do simulací jsou zahrnuty i třísky materiálu obrobku. [11]

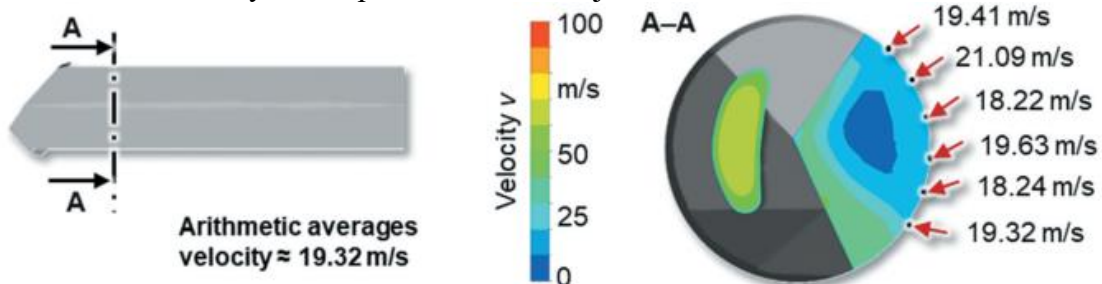
2.3.2.1 Návrh experimentu

Tab. 2: Parametry nástroje a řezné podmínky [11]

Parametry nástroje a řezné podmínky	
Průměr nástroje d [mm]	2
Hloubka děr [mm]	4
Materiál obrobku	Inconel 718
Řezná rychlost v_c [m/min]	30
Posuv na otáčku f_{ot} [mm/ot]	0,008
Tlak kapaliny p [bar]	100

2.3.2.2 Výsledky výpočetních simulací proudění (CFD)

V rovině řezu A-A jsou znázorněny velikosti rychlostí v jednotlivých místech odvodňovací drážky u jednobřitého nástroje pro hluboké vrtání, s využitím CFD simulace (Obr. 12). Průměrná hodnota rychlosti proudění v drážce je 19,32 m/s. [11]



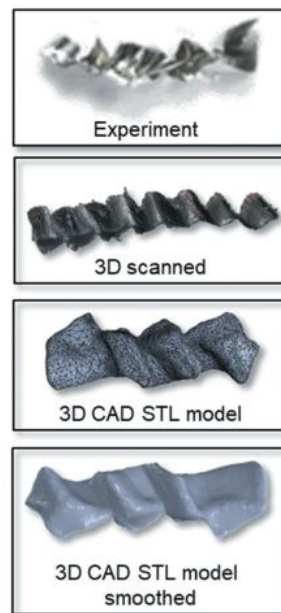
Obr. 12: Rychlosti proudění kapaliny s využitím CFD simulace [11]

Pro realizaci CFD simulace s využitím třísek byli třísky naskenovány pomocí zařízení Alicona Infinite Focus G5 (Obr. 13). [11]



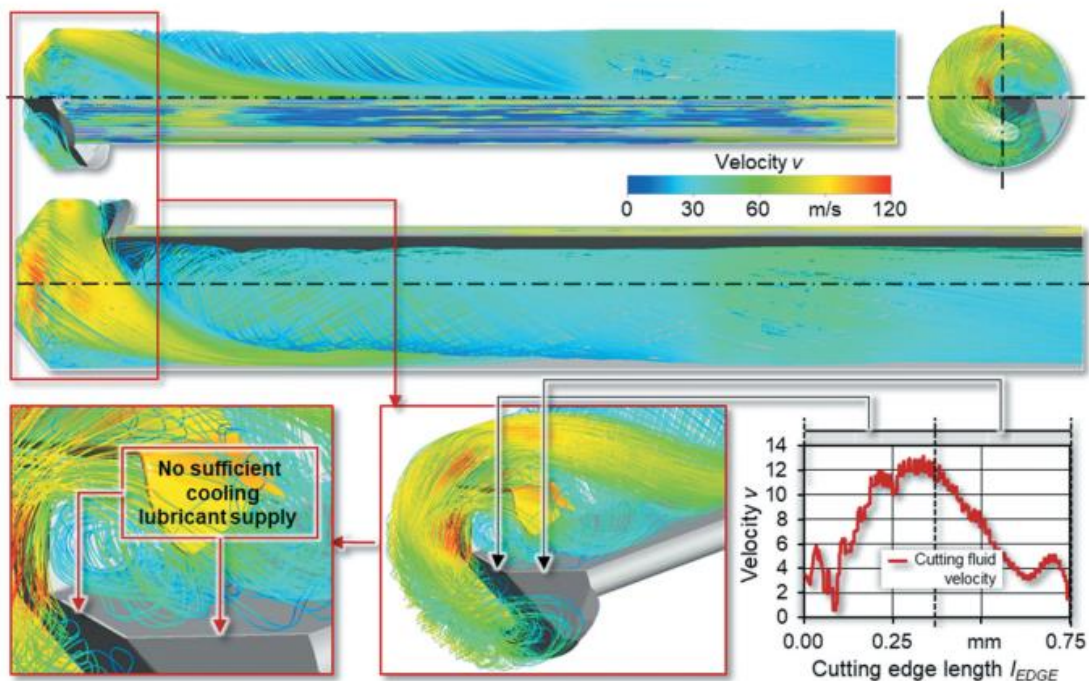
Obr. 13: Alicona Infinite Focus G5 [16]

Naskenovaná data třísek z experimentů byla transformována do formátu STL a následně vyhlazena (Obr. 14). [11]



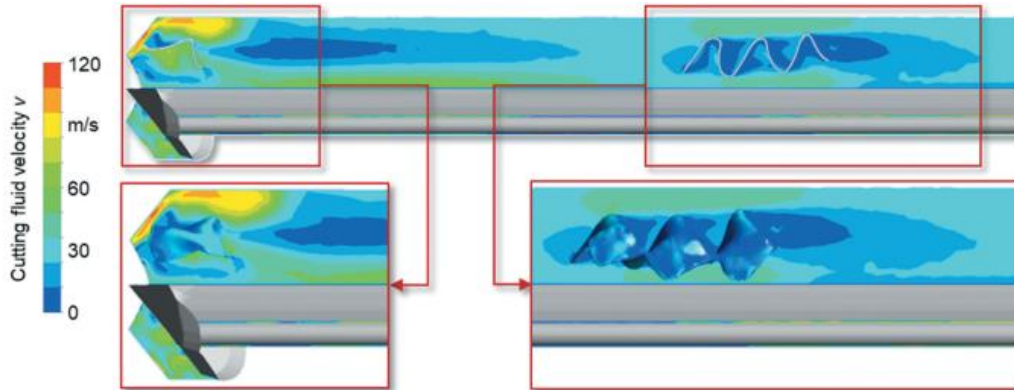
Obr. 14: Vytvoření 3D modelu vyhlazené třísky pro CFD simulace [11]

Obr. 15 znázorňuje rychlost proudění procesní kapaliny při tlaku 100 barů, ve formě proudnic, s uvažováním třísek, pomocí CFD simulace proudění. Dle simulace je maximální rychlost kapaliny v oblasti hlavního ostří pouze 13 m/s. V místech hrotu a špičky nástroje klesne rychlost kapaliny téměř na nulu a na ostří tak vznikají nedostatečně chlazená místa. [11]



Obr. 15: CFD simulace s uvažováním třísek [11]

Při odvádění třísek drážkou klesá rychlost kapaliny v oblasti třísky až na 0 m/s. Tyto „mrtvé zóny“ mohou generovat problémy ve správném odvodu třísek, které mohou vést k zaseknutí třísky, vibracím, nebo dokonce zlomení nástroje (Obr. 16). [11]



Obr. 16: CFD simulace v odvodňovací drážce [11]

2.3.2.3 Závěrečné vyhodnocení

Výsledky simulací poskytují informace o chování procesní kapaliny přímo ve skryté oblasti místa řezu s uvažováním třísek. Třísky byly vytvořeny na základě 3D skenů z předchozích experimentů. [11]

Je patrné, že třísky ovlivňují rychlost i směr proudění procesní kapaliny. Při tlaku 100 barů není hlavní ostří nástroje dostatečně chlazeno a třísky nejsou odváděny s dostatečnou rychlostí. Aby bylo vrtání dostatečně spolehlivé, je zapotřebí co nejkratší tříska, která bude snadno transportována z místa řezu s využitím procesní kapaliny. [11]

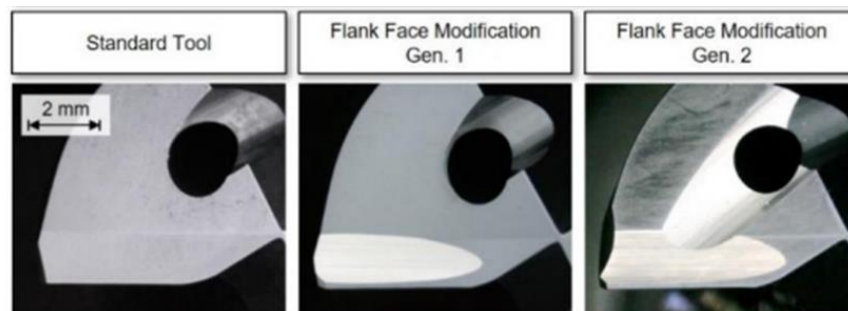
Simulační metody jsou zdrojem dalších poznatků o procesu vrtání, které jsou experimentálně nepřístupné a umožňují propojení s experimentem. [11]

2.3.3 Úprava hřbetu nástroje pro zvýšení výkonnosti při vrtání niklových slitin

Vlivem obrábění niklových slitin (Inconel 718) vzniká velké množství tepla. V tomto článku jsou provedeny úpravy hřbetu monolitních nástrojů z důvodu zlepšení chlazení nástroje. [24]

2.3.3.1 Úprava hřbetních ploch

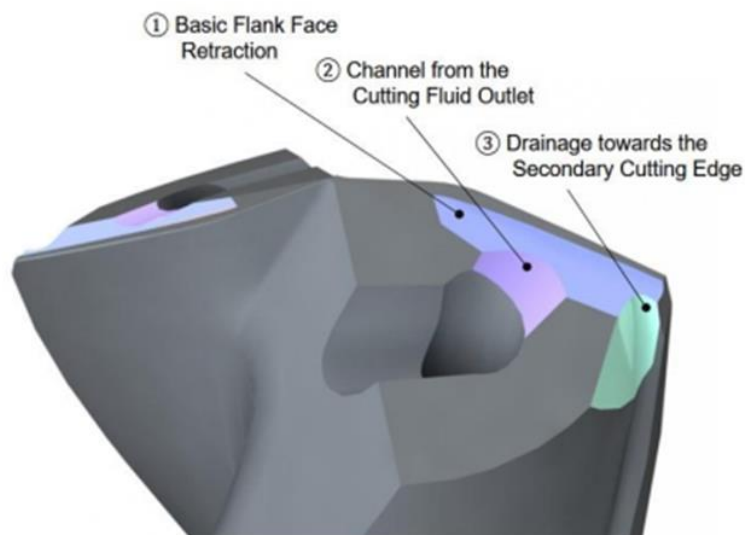
Na Obr. 17 jsou znázorněny úpravy hřbetních ploch nástrojů, vytvořené pomocí technologie broušení na brusce Schuette 305 micro s použitím diamantových brusných kotoučů. [24]



Obr. 17: Standartní nástroj a dvě upravené varianty hřbetu nástroje [24]

Úprava nástroje (Gen. 1) spočívá ve vytvoření drážky na hřbetní ploše, za řeznou hranou o hloubce 70 μm . Předpokladem této úpravy je zlepšení chlazení v oblasti hlavní řezné hrany. [24]

Druhá varianta úpravy hřbetu nástroje (Gen. 2) je oproti první variantě (Gen. 1) kromě drážky za hlavní řeznou hranou doplněna o dva přidavné žlaby na hřbetě nástroje. Pro lepší znázornění jsou úpravy nástroje Gen. 2 zobrazeny na Obr. 18. [24]



Obr. 18: Druhá varianta úpravy hřbetu nástroje (Gen. 2) [24]

První žlab (2) slouží k transportu procesní kapaliny mezi výstupním otvorem chladicího kanálu a vytvořenou drážkou za hlavní řeznou hranou (1). Druhý žlab (3) odvádí kapalinu směrem ke špičce nástroje a vedlejšímu ostří. [24]

2.3.3.2 Nastavení experimentu

Parametry nástroje a řezné podmínky jsou znázorněny v Tab. 3. Před experimentálním obráběním byly provedeny CFD simulace proudění.

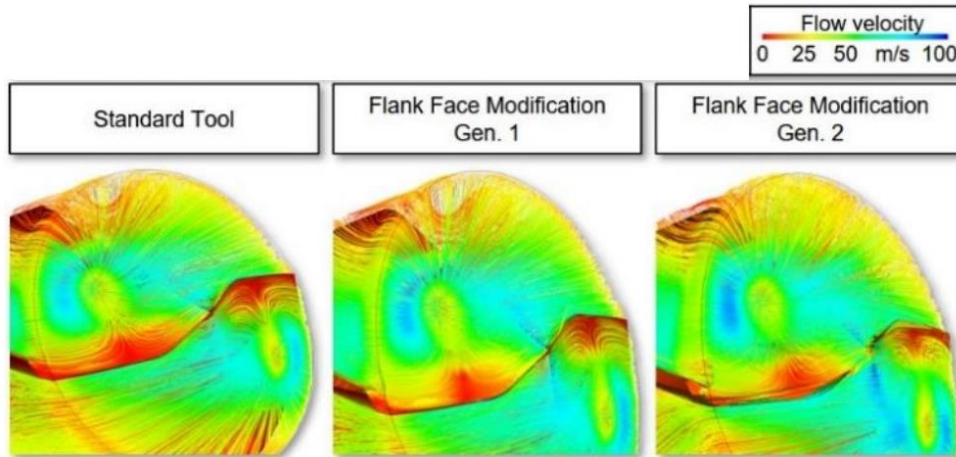
Tab. 3: Parametry nástroje a řezné podmínky [24]

Parametry nástroje a řezné podmínky	
Průměr nástroje d [mm]	14
Hloubka děr [mm]	42
Materiál obrobku	Inconel 718
Řezná rychlost v_c [m/min]	45
Posuv na otáčku f_{ot} [mm/ot]	0,14
Tlak kapaliny p [bar]	55

Protože při řezné rychlosti 35 m/min byl mírný nárůst opotřebení. Byla řezná rychlost nástroje zvýšena na 45 m/min s kombinací posuvové rychlosti 0,14 mm/ot, z důvodu progresivnějšího opotřebení nástroje. [24]

2.3.3.3 Vyhodnocení CFD simulací

Proudění kapaliny v místě řezu vlivem úprav hřbetních ploch nástrojů (Gen. 1 a Gen. 2) bylo vyhodnoceno pomocí CFD simulace proudění s využitím softwaru ANSYS CFX. Výsledky simulací jednotlivých nástrojů a jejich následné porovnání je znázorněno na Obr. 19. [24]

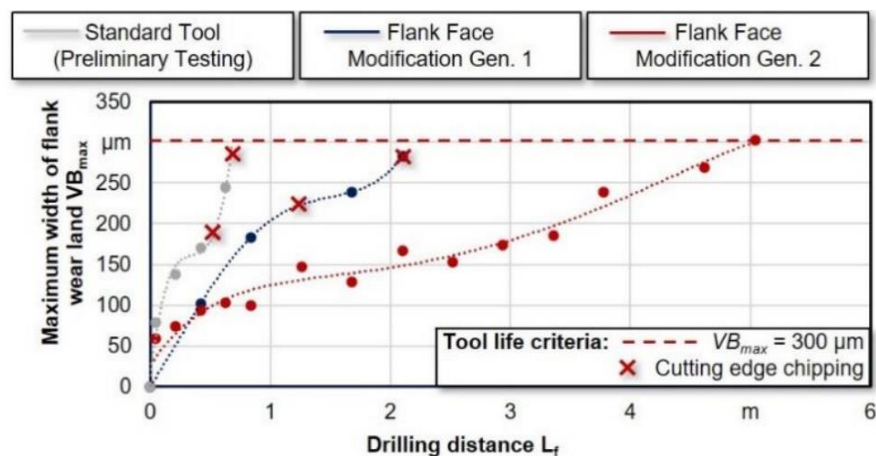


Obr. 19: CFD simulace proudění pro Standartní nástroj a dvě upravené varianty [24]

Simulace ukazují, že rychlost procesní kapaliny při výstupu z chladicích kanálů je přibližně 80 až 100 m/s. Dle CFD simulace, dochází u Standartního nástroje k vysokému poklesu velikosti rychlostí procesní kapaliny téměř na hodnoty 0 m/s v oblasti hlavní řezné hrany. Při první modifikaci nástroje (Gen. 1) je kapalina lépe a blíže dopravena k řezné hraně a odvod tepla je efektivnější. Řezná kapalina se však nedostane k rohům, do oblasti špičky nástroje a vznikají zde slabá místa. Druhá úprava nástroje (Gen. 2) s přídatnými žlabky poskytuje výrazné zlepšení proudění, vlivem nasměrování procesní kapaliny až do oblastí špičky nástroje. To vede k vyšším rychlostem kapaliny ve slabých místech břitu nástroje a proces chlazení se stává ještě efektivnějším. [24]

2.3.3.4 Vyhodnocení experimentálního obrábění

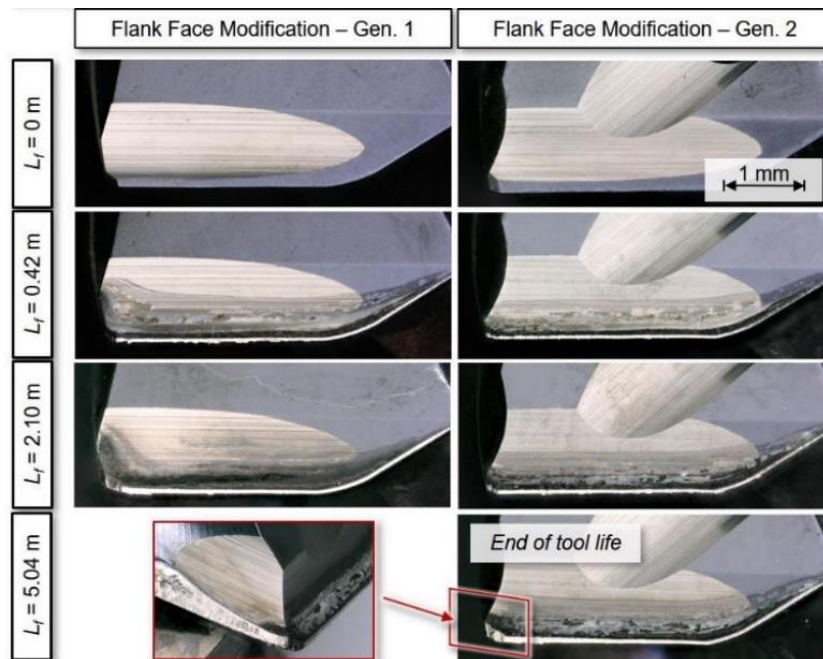
Dosažení kritické hodnoty opotřebení VB_{max} stanovené na hodnotu 300 μm v závislosti na dráze vrtání u Standartního nástroje a dvou modifikací (Gen. 1 a Gen. 2) je zobrazeno na Obr. 20. [24]



Obr. 20: Vývoj opotřebení v závislosti na dráze vrtání [24]

U Standartního nástroje je důsledkem krátké životnosti nástroje a vysokého nárůstu opotřebení, vylamování rohu břitu nástroje. První modifikace nástroje (Gen. 1) výrazně prodlužuje křivku opotřebení nástroje a zvyšuje se tím vzdálenost použití nástroje. Avšak u nástroje Gen. 1 také dochází k vylamování rohu břitu nástroje. Vylamování břitů u popsaných nástrojů se změní s použitím druhé modifikace nástroje Gen. 2. Tento nástroj dosáhne kritické hodnoty opotřebení $VB_{max} = 300 \mu\text{m}$ při celkové délce vrtání 5,1 m (Obr. 20). [24]

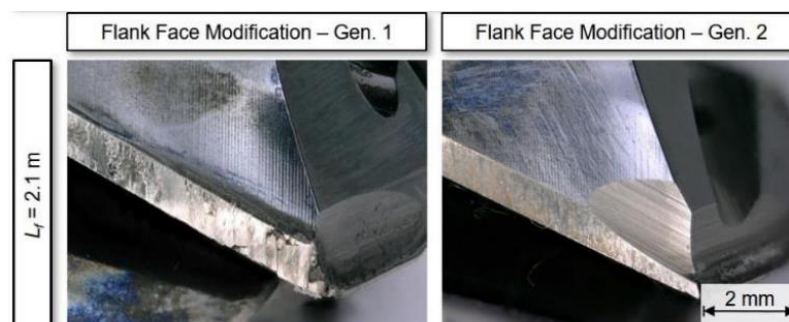
Znázornění opotřebení hřbetu nástroje u modifikovaných variant (Gen. 1 a Gen. 2) představuje Obr. 21. Snímky ukazují, že přídatný žlab v rohu břitu u nástroje Gen. 2 snižuje zbytky spálené procesní kapaliny. [24]



Obr. 21: Vývoj opotřebení u nástrojů Gen. 1 a Gen. 2 [24]

Spálená procesní kapalina v rohu břitu u nástroje Gen. 1 brání odtékání další procesní kapaliny a tím vzniká více připálených zbytků kapaliny. Odvodňovací žlab u nástroje Gen. 2 tedy vede k lepšímu proudění kapaliny a tím i chlazení. [24]

Při pohledu na špičky břitů u nástrojů Gen. 1 a Gen. 2 na Obr. 22, vykazuje špička nástroje Gen. 1 zbytky obrobeného materiálu, který se natavil na nástroj vlivem vyšších teplot. Oproti tomu špička druhé varianty nástroje Gen. 2 je bez zbytků obrobeného materiálu. Tyto rozdíly lze přisuzovat lepšímu chladičímu účinku v oblasti špičky u nástroje Gen. 2, vlivem odvodňovacího žlabu. [24]



Obr. 22: Porovnání břitů u nástrojů Gen. 1 a Gen. 2 [24]

2.3.3.5 Závěrečné vyhodnocení

V tomto článku byly provedeny úpravy hřbetních ploch nástroje (Obr. 17) z důvodu lepšího přívodu řezné kapaliny k hlavní řezné hraně a podél řezné hrany ke špičce nástroje. Tyto úpravy byly nejprve zkoumány s využitím CFD simulací proudění (Obr. 19) a následně byly experimentálně testovány. [24]

Simulace i experimentální testování ukázaly, že ke zvýšení řezné rychlosti dochází podél řezné hrany a zejména v oblasti špičky nástroje. [24]

Toto tvrzení dokládá i nižší množství spálené řezné kapaliny v oblasti hlavní řezné hrany (Obr. 21) a absence nataveného materiálu na špičce nástroje (Obr. 22). Kromě toho nedocházelo u nástroje Gen. 2 k vylamování špičky nástroje, což mělo za následek výrazné prodloužení životnosti nástroje, na rozdíl od Standardního nástroje a nástroje Gen. 1 (Obr. 20). [24]

2.4 Nejdůležitější poznatky z rešerše

Při rozboru současného stavu oblasti vnitřního systému chlazení vrtacích nástrojů byly zjištěny cenné informace.

Vrtání je nejsložitější výrobní proces, při kterém vzniká velké množství tepla. Teplo významně ovlivňuje životnost břitu nástroje, vlivem vysokého teplotního zatížení, které vede k rychlému opotřebení břitu. Břit nástroje je potřeba zásobit procesní kapalinou a teplo odvést. Místo řezu je skryto v otvoru, a proto je vhodné dopravit procesní kapalinu pomocí vnitřního systému chlazení nástroje. Chování procesní kapaliny se však kvůli skrytému místu řezu nedá vyšetřit. Lze však využít výpočtových simulací proudění CFD a díky poznatkům ze simulací lze proces chlazení zdokonalit a experimentálně ověřit. Spojení CFD simulací s experimentem je žádoucí. Rychlost kapaliny se výrazně snižuje v blízkosti hlavní řezné hrany, přičemž směrem ke špičce nástroje klesá téměř k nulovým hodnotám. Právě v těchto místech vzniká největší množství tepla a břit není dostatečně chlazen ani při tlaku sto barů procesní kapaliny.

3 Návrh a realizace vlastního řešení

Obsahem této kapitoly bude praktická část DP. Postupně bude ukázáno vlastní řešení zvoleného tématu v přímé návaznosti na BP [1].

Výstupem BP byla výroba všech čtyř variant vrtacích nástrojů. Následovalo testování funkčnosti referenčního nástroje (Ref.), nástroje analogického k referenčnímu (1:1) a nástroje s trojúhelníkovým tvarem chladicích kanálů (Trigon). Testované varianty splnily funkčnost. [1]

Pro nalezení nástroje s nejvyšším potenciálem vnitřního systému chlazení ze všech vytvořených variant, bylo potřeba podrobit všechny nástroje dlouhodobé zkoušce řezivosti, v rámci které by zároveň proběhlo ověření funkčnosti zbylých dvou netestovaných variant vrtacích nástrojů, kterými jsou nástroj s větším průměrem chladicího kanálu 2,9 mm ($\varnothing 2,9$) oproti Ref. nástroji s průměrem chladicího kanálu 2,5 mm a nástroj s ledvinkovitým tvarem chladicího kanálu (Ledvinka). Z tohoto důvodu byla dlouhodobá zkouška řezivosti uskutečněna jako prvotní činnost praktické části DP, v přímé návaznosti na výstupy z BP.

Dle vyhodnocení dlouhodobé zkoušky řezivosti byl z hlediska experimentálního testování nalezen nástroj s největším potenciálem vnitřního systému chlazení, který má dopad na prodloužení trvanlivosti břitu. Tento nástroj byl dále podroben výpočtové simulaci proudění CFD, pro podrobnější analýzu účinků vnitřního systému chlazení v řezné zóně. Na základě experimentu a šetření CFD simulace byl proveden vývoj nových variant nástrojů s důmyslnějším systémem vnitřního chlazení.

3.1 Dlouhodobá zkouška řezivosti

Při testování funkčnosti vrtáků v rámci BP byl zvolen materiál obrobku ČSN 41 2050. Tento materiál se vyznačuje dobrou obrobitelností 13 b a pro testování funkčnosti je vhodný.[1]

V případě dlouhodobé zkoušky řezivosti bylo cílem u nástrojů dosáhnout stanovené hodnoty limitního opotřebení VB_{Blim} a nástroje otestovat při obtížnějších řezných podmínkách. Pro testování byl zvolen materiál obrobku ČSN 41 5142.6. Tento materiál ve stavu zušlechťeno na dolní pevnost dosahuje obrobitelnosti 11 b, což je v porovnání s obrobitelností u materiálu ČSN 41 2050 o dva řády horší obrobitelnost, a proto byl pro experiment vhodnou volbou.

Z materiálu ČSN 41 5142.6 byla jako obrobek pro testování navržena deska o rozměrech 210x210x87 mm pro vrtání z obou stran, která byla přišroubována ke stolu pomocí zápusťných šroubů a T drážek v upínacím stole. Vedle desky byl umístěný čtyř složkový dynamometr Kistler 9272 se sklíčidlem, pro měření posuvové síly, radiální síly a krouticího momentu nástroje. Do sklíčidla dynamometru byl upnut vzorový váleček. [17]



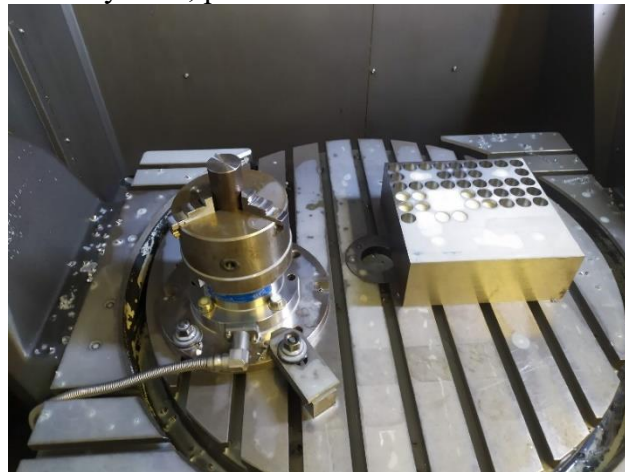
Obr. 23: Dynamometr Kistler 9272 se sklíčidlem

Dlouhodobá zkouška řezivosti, probíhala, na pětiosém frézovacím centru DMU 65 monoBlock od společnosti DMG Mori, s pracovními rozměry stroje 650x650 mm a maximálními otáčkami 18000 ot/min. [18]



Obr. 24: Pětiosé frézovací centrum DMU 65 monoBlock [1]

Na Obr. 25 je již znázorněn pracovní prostor stroje. Fotografie byla pořízena při výměně válečku, právě po měření řezných sil, při dlouhodobé zkoušce řezivosti.



Obr. 25: Pracovní prostor stroje při experimentu

Vpravo je upnuta deska, která je téměř z celé své plochy provrtána z důvodu cíleného opotřebenosti testovaného nástroje a brzy byla otočena na druhou, stranu pro další testování. Vlevo je upnut dynamometr s válečkem pro měření řezných sil při obrábění. Průměr válečků byl třicet pět milimetrů a délka čtyřicet devět milimetrů.

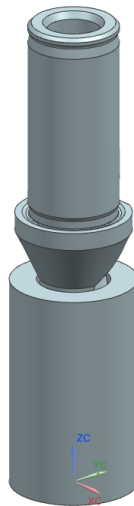


Obr. 26: Zkušební váleček pro měření řezných sil

3.2 Výpočetní simulace proudění CFD

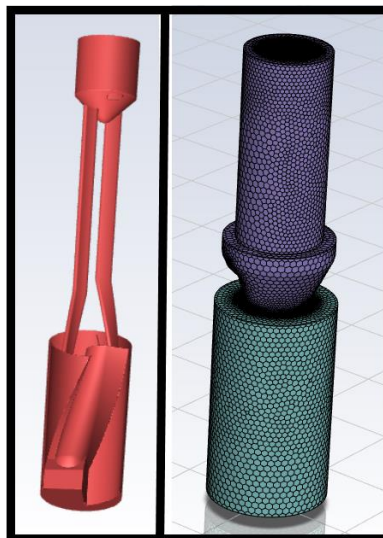
Z důvodu nepřístupnosti řezné zóny a postrádání informací o chování procesní kapaliny v zóně řezání byla provedena CFD simulace proudění. Tato simulace byla provedena pro nástroj s největším potenciálem, pomocí softwaru Ansys Fluent.

Aby se dala simulace provést, bylo potřeba vytvořit model, který by co nejlépe odpovídal řeznému procesu nástroje a obrobku. Na Obr. 27 je nástroj, umístěný do otvoru. Jedná se o sestavu nástroje a válečku s dírou, která byla vytvořena pomocí CAD softwaru NX siemens. Tato vytvořená sestava velice vhodně představuje řezný proces a bude dobrým základem pro vytvoření CFD simulace. Zároveň se jedná o tzv. tvarové okrajové podmínky pro vytvoření CFD simulace.



Obr. 27: Znázornění řezného procesu pro CFD simulaci

Dále bylo potřeba vytvořit doménu kapaliny, kterou tvoří procesní kapalina. Doména kapaliny je dělena na vstup, kanály a výstup. V poslední řadě byla součást převedena na síť konečných prvků. (Obr. 28)



Obr. 28: Doména kapaliny (vlevo) a síť konečných prvků (vpravo)

Před spuštěním výpočtu simulace bylo nutno zadat fyzikální počáteční podmínky. Pro zjištění rychlosti procesní kapaliny v chladicích kanálech byl zrealizován jednoduchý experiment.

Cílem experimentu, bylo změřit objemový průtok procesní kapaliny za určitou časovou jednotku. Toho bylo docíleno pomocí upnutí nástroje do vřetena stroje a umístění vhodné nádoby pod nástroj, pro zachycení procesní kapaliny. K tomu výborně posloužil prázdný kanystr od procesní kapaliny, u kterého mohl být nástroj zaveden přímo do hrdla, a tím bylo zamezeno jakémukoliv vystříknutí procesní kapaliny mimo nádobu, které by hrozilo v případě použití kbelíku (Obr. 29).



Obr. 29: Zachycování průtočného množství kapaliny nástrojem

Při spuštění čerpadla procesní kapaliny pro vnitřní chlazení byla v rámci časového úseku patnácti vteřin zachycována procesní kapalina do kanystru (Obr. 29). Následně bylo čerpadlo vypnuto a objemové (průtočné) množství procesní kapaliny bylo změřeno s využitím litrového odměrného válce (Obr. 30).



Obr. 30: Měření průtočného množství kapaliny nástrojem

Po zjištění objemového průtoku za časový úsek patnácti vteřin, byla hodnota přepočítána do základních jednotek. Následně byla spočítána rychlost procesní kapaliny nástrojem, pomocí vzorce:

$$v = \frac{Q_v}{S} \text{ [m/s]}$$

Kde:

Q_v je objemový průtok [m^3/s] a
 S je průtočná plocha [m^2]

Hodnoty pro výpočet rychlosti a výsledná rychlost jsou znázorněny v Tab. 4.

Tab. 4: Zadané hodnoty a výsledná rychlost procesní kapaliny

Objemový průtok Q_v [m^3/s]	$0,2933 * 10^{-3}$
Plocha dvou chladicích kanálů S [m^2]	$8,4954 * 10^{-6}$
Rychlost procesní kapaliny nástrojem v [m/s]	34,5

Po experimentu byly známy všechny fyzikální okrajové podmínky a mohly být nadefinovány do simulace. Jejich hodnoty jsou znázorněny v Tab. 5.

Tab. 5: Okrajové podmínky pro CFD simulaci

Objemový průtok [m^3/s]	$0,2933 * 10^{-3}$
Vstupní rychlost procesní kapaliny [m/s]	1,8
Výstupní rychlost procesní kapaliny [m/s]	34,5
Hustota kapaliny [kg/m^3]	990
Kinematická viskozita kapaliny [m^2/s]	$41,9 * 10^{-6}$
Vstupní teplota procesní kapaliny [K]	298,15
Výstupní relativní tlak [Pa]	0
Referenční tlak [Pa]	101 325
Rychlost otáčení nástroje [rad/s]	380

Nakonec byl spuštěn výpočet simulace pro nástroj, který trval čtyřiaadvacet hodin, při využití plného výkonu počítače.

4 Zhodnocení dosažených výsledků

V této kapitole DP budou vyhodnocena data, která byla naměřena v průběhu dlouhodobé zkoušky řezivosti a po dlouhodobé zkoušce řezivosti. Vyhodnocená data budou shrnuta pro nalezení nástroje s nejvyšším potenciálem vnitřního systému chlazení, který má dopad na prodloužení trvanlivosti břitu. Další téma této kapitoly, bude věnováno objasnění výsledků z CFD simulace proudění, vytvořené pro nástroj s nejvyšším potenciálem. Tyto výsledky budou vstupními podklady dalšího inovativního vývoje.

4.1 Vyhodnocení dílčích úkonů dlouhodobé zkoušky řezivosti

V průběhu dlouhodobé zkoušky řezivosti byly měřeny řezné síly při obrábění a opotřebení břitu VBD, po dlouhodobé zkoušce řezivosti byl měřen průměr otvorů, kruhovitost, válcovitost a drsnost.

4.1.1 Opotřebení břitu

Z teorie obrábění se dá opotřebení břitu měřit vícero metodami. Jedna z nich je měření rozměru opotřebení na hřbetě (VB_B). K měření opotřebení VBD byl použit mikroskop KEYENCE VHX-6000 s objektivem, který poskytoval maximálním zvětšení 150x (Obr. 31).



Obr. 31: KEYENCE VHX-6000 [20]

Opotřebení břitu, je úzce svázáno s trvanlivostí břitu. Trvanlivost je dána časem T , po který je břit schopen obrábět až do stavu úplného opotřebení, nebo stanovení maximální hodnoty opotřebení VB_{Blim} . T se nemusí měřit jen časem, ale i celkovou vzdáleností vrtání nebo počtem provedených operací.

Před spuštěním experimentu a měřením opotřebení a řezných sil, bylo potřeba stanovit řezné podmínky. Na začátku experimentu byla řezná rychlost a posuv na otáčku stanoveny dle katalogu doporučených řezných podmínek přímo od výrobce (Obr. 32).

ISO	Material	Condition	Tensile Strength RM (N/mm ²)	Hardness (HB)	Matl No.	Cutting Speed Vc (SFM)	Feed vs Drill Dia. (Drill Length 2XD, 3XD, 4XD* & 5XD*)					
							.500 - .594	.625 - .813	.843 - 1.063	1.094 - 1.312	1.343 - 1.625	1.687 - 2.000
							IPR (inches/rev)					
P	Non-Alloy Steel & Cast Steel, Free Cutting Steel	<0.25% C	420	125	1	800-1000	.002 - .004	.0025 - .004	.0025 - .005	.003 - .005	.003 - .006	.0035 - .0065
		>= 0.25% C	650	190	2	800-1000	.002 - .004	.0025 - .004	.0025 - .005	.003 - .005	.003 - .006	.0035 - .0065
		<0.55% C	850	250	3	500-800	.002 - .004	.003 - .006	.004 - .007	.005 - .0085	.005 - .0095	.005 - .010
		>= 0.55% C	750	220	4	800-1000	.002 - .004	.003 - .006	.004 - .007	.005 - .0085	.005 - .0095	.005 - .010
	Low Alloy Steel & Cast Steel (less than 5% alloying elements)	Quenched & Tempered	1000	300	5	600-800	.002 - .004	.003 - .006	.004 - .007	.005 - .0085	.005 - .0095	.005 - .010
		Annealed	600	200	6	500-800	.002 - .004	.003 - .0055	.004 - .007	.005 - .0085	.005 - .009	.005 - .0095
		Quenched & Tempered	930	275	7	400-700	.002 - .005	.003 - .006	.004 - .007	.005 - .008	.006 - .009	.0065 - .010
			1000	300	8	400-600	.002 - .005	.003 - .006	.004 - .007	.005 - .008	.006 - .009	.0065 - .010
			1200	350	9	300-550	.002 - .005	.003 - .006	.004 - .007	.005 - .008	.006 - .009	.0065 - .010
		High Alloy Steel, Cast Steel & Tool Steel	Annealed	680	200	10	400-600	.002 - .005	.003 - .006	.004 - .007	.005 - .008	.006 - .009
	Quenched & Tempered		1100	325	11	400-550	.002 - .005	.003 - .006	.004 - .008	.005 - .009	.006 - .0095	.0065 - .010

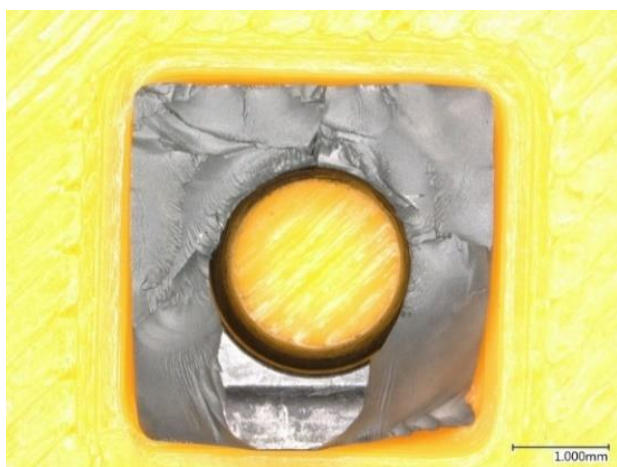
Obr. 32: Výňatek řezných podmínek pro skupinu P (ocel) [19]

Z intervalu doporučených řezných podmínek dle katalogu výrobce (Obr. 32) byly zvoleny střední hodnoty řezné rychlosti a posuvu na otáčku. Prvotní řezné podmínky pro experiment jsou zobrazeny v Tab. 6.

Tab. 6: Prvotní řezné podmínky pro dlouhodobou zkoušku řezivosti

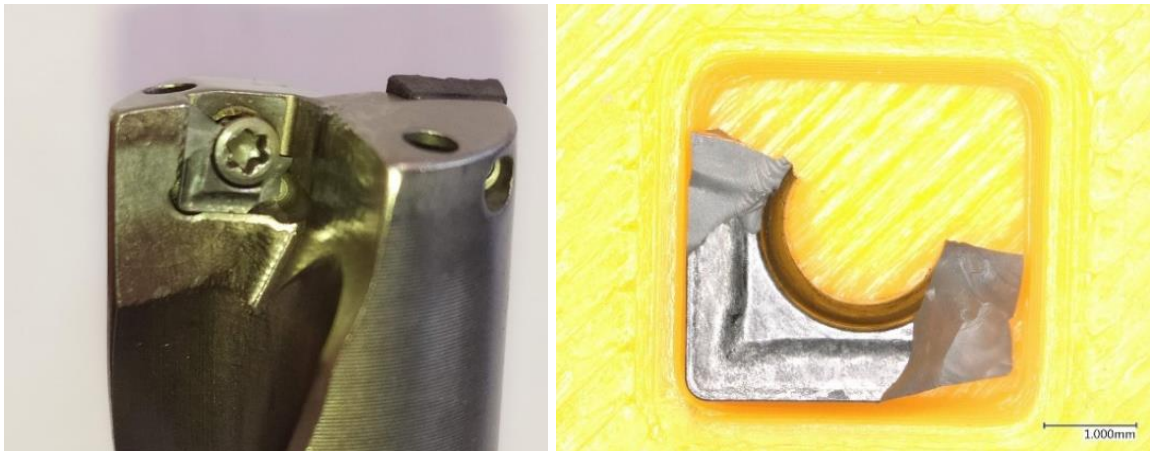
Parametry nástroje a řezné podmínky	
Průměr nástroje d [mm]	20
Hloubka děr [mm]	40
Materiál obrobku	ČSN 41 5142.6
Označení VBD	SPMG 060204 DG TT9030
Řezná rychlost v_c [m/min]	200
Posuv na otáčku f_{ot} [mm/ot]	0,1
Procesní kapalina	Vasco 6000
Tlak kapaliny p [bar]	40

První nástroj, testován při těchto řezných podmínkách, byl Ref. Při vrtání čtyřicáté díry došlo k destrukci vnější a vnitřní VBD. Z vnější VBD se odštíply tři ze čtyř břitů (Obr. 33 vlevo). Po sundání VBD z vrtáku pro pozorování na mikroskopu odpadl poslední břit (Obr. 33 vpravo).



Obr. 33: Zničená vnější VBD

Vnitřní VBD se rozletěla na více kousků v pracovním prostoru stroje. V lůžku zůstal jediný kousek VBD, díky upínacímu šroubku (Obr. 34). Tělo nástroje i lůžka zůstaly naštěstí nepoškozeny.



Obr. 34: Zničená vnitřní VBD

Po usazení nových VBD byla řezná rychlost společně s posuvem na otáčku opětovně voleny, pro nalezení optimálních řezných podmínek. Při posuvu na otáčku od nejnižší krajní hodnoty intervalu až do střední hodnoty (0,08 mm/ot – 0,12 mm/ot) dle katalogu, při řezné rychlosti 120 m/min docházelo k vytváření dlouhých špon. Tyto dlouhé špony se postupně namotávaly na nástroj a vytvářeli spletnce, které jsou nežádoucí.



Obr. 35: Spletnce na nástroji

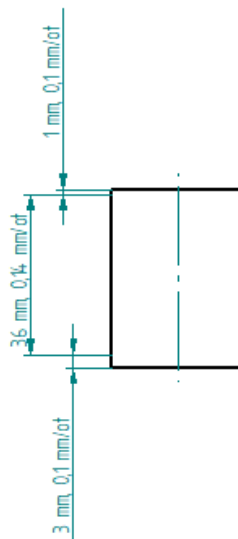
Vytváření dlouhých špon bylo zapříčiněno nízkou posuvovou rychlostí, při které nástroj nestíhal lámat špony. Při hodnotách posuvu 0,14 mm/ot, 0,15 mm/ot a 0,16 mm/ot se již tvořili krátké lámané špony a tyto tři hodnoty posuvu již byly z hlediska utváření třísek vhodné. Řezná rychlost byla zvýšena ze 120 m/min na 180 m/min, při které však se všemi třemi zmiňovanými hodnotami posuvu vznikali vibrace. Snížení řezné rychlosti na 160 m/min při všech třech zmiňovaných hodnotách posuvu vibracím nepomohlo. Nakonec byly řezné podmínky stanoveny na hodnotách, znázorněných v Tab. 7.

Tab. 7: Stabilní řezné podmínky pro dlouhodobou zkoušku řezivosti

Parametry nástroje a řezné podmínky	
Průměr nástroje d [mm]	20
Hloubka děr [mm]	40
Materiál obrobku	ČSN 41 5142.6
Řezná rychlost v_c [m/min]	150
Posuv na otáčku f_{ot} [mm/ot]	0,14
Procesní kapalina	Vasco 6000
Tlak kapaliny p [bar]	40

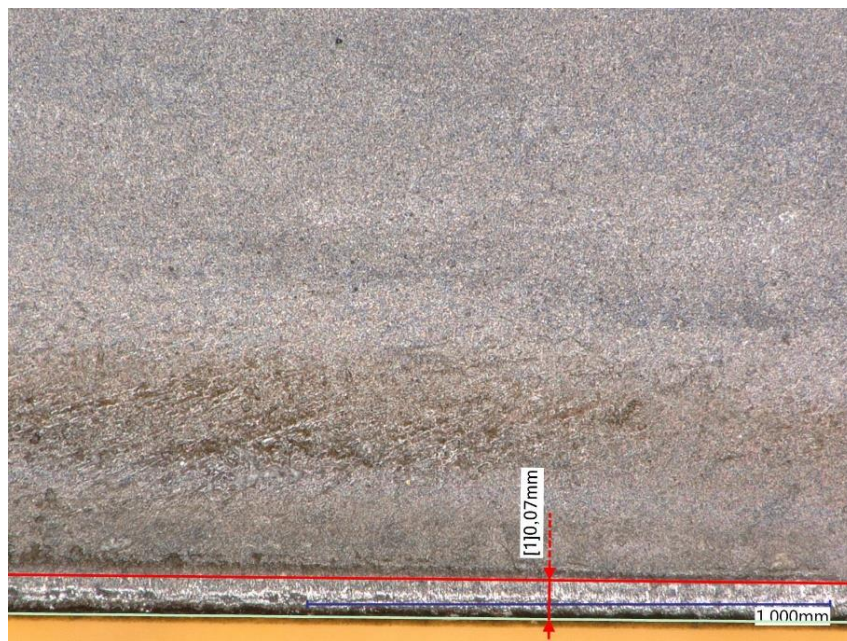
Při těchto řezných podmínkách (Tab. 7), ze všech otestovaných kombinací posuvové a řezné rychlosti, vykazoval nástroj nejlepší podmínky pro obrábění, projevující se stabilitou řezu bez vibrací a vhodným utvářením krátkých třísek.

V průběhu vrtání otvoru nebyl posuv stále stejný, ale byl proměnlivý. Jeho hodnoty se měnily na začátku a u dna otvoru. Změna rychlosti na začátku měla umožnit nástroji stabilnější zavrtání do materiálu. U dna díry měla změna posuvu docílit lepšího odvodu všech třísek (Obr. 36). [21]



Obr. 36: Proměnlivý posuv v průběhu vrtání

Po stanovení optimálních řezných podmínek (Tab. 7) byl nejprve testován Ref. nástroj. Maximální hodnota opotřebení byla stanovena na $VB_{Blim} = 150 \mu m$. První vizuální kontrola břitu pod mikroskopem KEYENCE u vnější a vnitřní VBD proběhla po deseti vyvrtaných otvorech. Vzhledem k tomu, že vnější VBD byla více zatěžována vlivem vyšší obvodové rychlosti oproti vnitřní VBD, byla hodnota opotřebení VB_B měřena na vnější VBD. Na Obr. 37 je znázorněn hřbet u vnější VBD Ref. nástroje s naměřenou hodnotou opotřebení $VB_B = 70 \mu m$.



Obr. 37: Hřbet vnější VBD Ref. nástroje po 10 otvorech

Při pohledu na čelo vnější VBD Ref. nástroje je patrný nárůstek obrobeneho materiálu.
(Obr. 38)



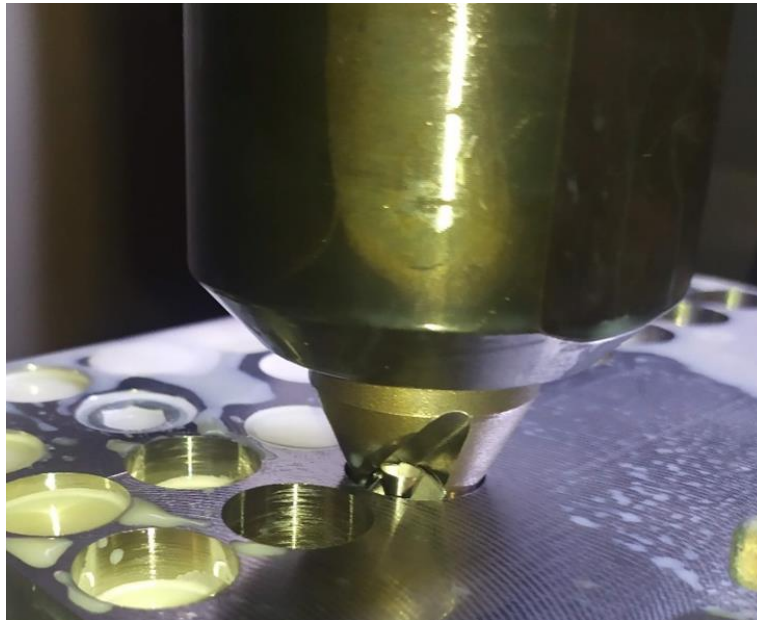
Obr. 38: Čelo vnější VBD Ref. nástroje po 10 otvorech

Po změření opotřebení byly VBD upnuty zpět do lůžek těla nástroje a dlouhodobá zkouška řezivosti pokračovala s pravidelným přerušováním pro vizuální kontrolu VBD. Skeny opotřebení vnějších VBD jsou k dispozici v Příloze č. 1. Po sto šedesáté díře byla opět změřena hodnota opotřebení na hřbetě u vnější VBD Ref. nástroje, která dosahovala hodnoty $VB_B = 100 \mu m$, zároveň se již objevilo teplotní pole. Na čele vnější VBD Ref. nástroje se po sto šedesáti otvorech výrazně zvětšila oblast nárůstku a objevilo se množství trhlinek. Vzhledem k nedosažené stanovené hodnotě maximálního opotřebení $VB_{Blim} = 150 \mu m$ se pokračovalo v dlouhodobé zkoušce řezivosti.

Hřbetní plocha vnější VBD Ref. nástroje byla opět vizuálně zkontrolována po třech stech otvorch. Ačkoliv se hodnota opotřebení od sto šedesáté díry nezměnila a zůstala na hodnotě $VB_B = 100 \mu m$, jsou vidět větší trhliny oproti vnějšímu hřbetu VBD Ref. nástroje po sto šedesáti dírách. Čelo vnější VBD Ref. nástroje po třech stech otvorch, vykazuje mnohem větší množství trhlín, než čelo po sto šedesáti dírách. Ačkoliv se nepodařilo dosáhnout stanovené hodnoty limitního opotřebení $VB_{Blim} = 150 \mu m$, bylo testování Ref. nástroje ukončeno z důvodu, že se nástroj s VBD nacházel ve 2. fázi lineárního opotřebování nástroje, a tedy pomalého nárůstu hodnoty opotřebení VB_B .

Po Ref. nástroji byl testován nástroj 1:1 a nástroj Ledvinka. Testování probíhalo ve shodných intervalech přerušení pro vizuální kontrolu VBD, jako u Ref. nástroje. Oběma typům nástrojů se podařilo vyvrtat tři sta děr, jako u Ref. nástroje. Nutno podotknout, že nástroj Ledvinka nebyl před dlouhodobou zkouškou testován z hlediska funkčnosti.

Při testování nástroje $\varnothing 2,9$ docházelo k vysokým vibracím, ihned po zavrtání nástroje do materiálu. Vibrace byly způsobeny hlčením drážek třískami. U dna díry byly vibrace tak vysoké, že došlo k sepnutí senzorů pro bezpečné zastavení vřetena stroje.

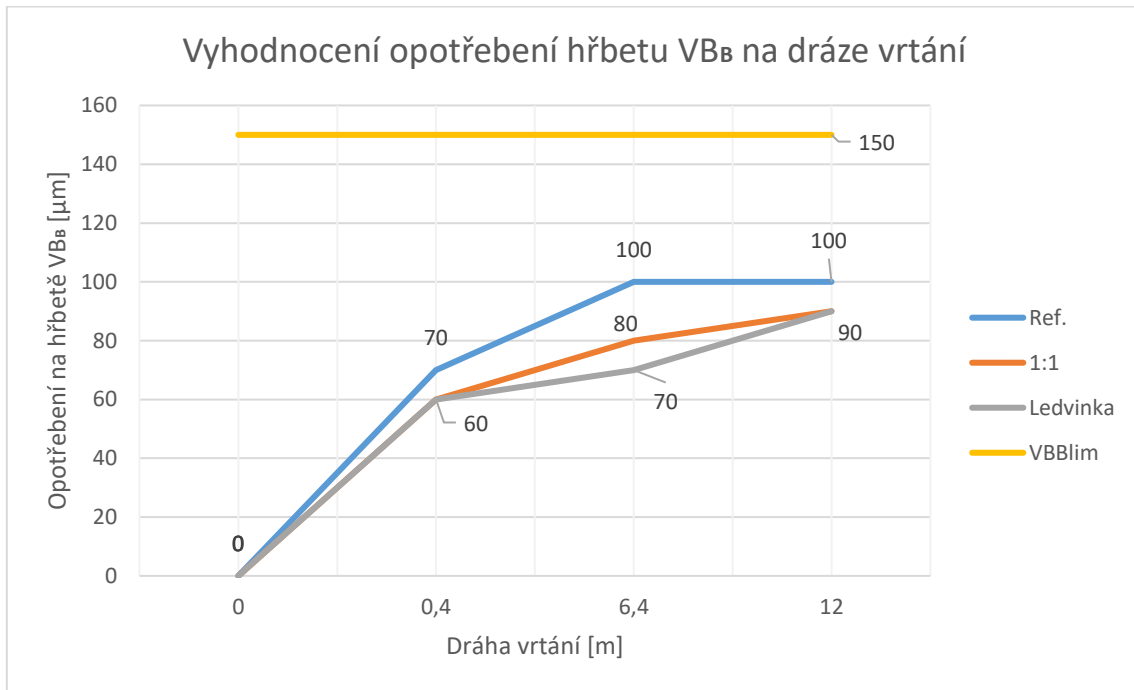


Obr. 39: Zahlcení nástroje $\varnothing 2,9$

Na Obr. 39 je znázorněno zahlcení nástroje $\varnothing 2,9$, který byl vlivem vysokých vibrací zastaven. Je možné si všimnout špon, které zůstaly v drážce.

Nástroj Trigon vykazoval problém stejného charakteru a také u něj došlo vlivem vibrací k zastavení vřetena stroje. Jelikož měly tyto dvě varianty nástrojů problém s odvodem třísky, byla nastavena prodleva u dna díry na jednu sekundu, aby měly nástroje větší prostor vyvést třísky z místa řezu. Nástroj $\varnothing 2,9$ opět zastavil vlivem vibrací vřeteno stroje a nemohl být tedy použit pro testování dlouhodobé zkoušky řezivosti. Nástroji Trigon prodleva zřejmě pomohla, jelikož vyvrtal pět děr v řadě, bez zastavení vřetena stroje. Přesto byly vibrace tak vysoké, že nebyl pro testování dlouhodobé zkoušky řezivosti použit, stejně jako nástroj $\varnothing 2,9$.

Na Obr. 40 je znázorněn graf, vyjadřující závislost hodnoty opotřebení VB_B na dráze vrtání u nástrojů, které se podařilo otestovat v rámci dlouhodobé zkoušky řezivosti.



Obr. 40: Vyhodnocení opotřebení VB_B po dlouhodobé zkoušce řezivosti

Z grafu je patrné, že maximální hodnoty opotřebení $VB_{Blim} = 150 \mu\text{m}$ nedosáhl, po dvanácti metrech vrtání (tři sta otvorech) žádný nástroj. Nejnižší hodnoty opotřebení dosáhl shodně nástroj 1:1 a nástroj Ledvinka, přičemž nástroj Ledvinka dosahoval degresivnějšího nárůstu opotřebení do druhé fáze lineárního opotřebování. Z těchto výsledků lze předpokládat, že nástroj Ledvinka dopadl nejlépe.

Protože se při vizuální kontrole vnějších VBD u všech třech testovaných typů nástrojů vyskytovalo na hřbetě teplotní pole s defekty a na čele se vyskytoval nárůstek, společně s defekty a navařeným materiálem, budou tyto druhy opotřebení zahrnuty do celkového vyhodnocení trvanlivosti a opotřebení VBD. V Tab. 8 jsou jednotlivé typy opotřebení u jednotlivých nástrojů ohodnoceny kritérii od jedné (nejlepší) do tří (nejhorší).

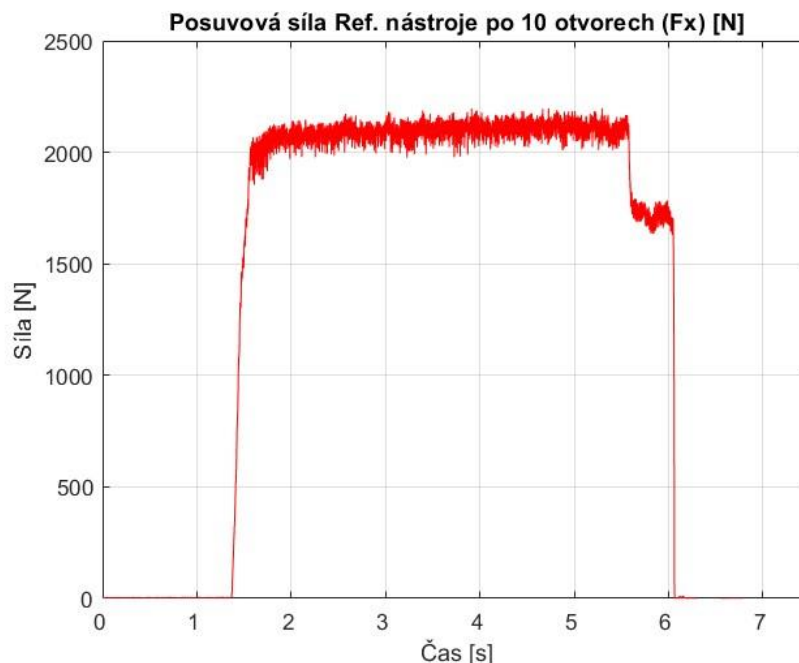
Tab. 8: Rozhodovací tabulka opotřebení

	Ref.	1:1	Ledvinka
Teplovní pole	3	2	1
Defekty na hřbetě	2	1	3
Výmol na čele	3	2	1
Defekty na čele	1	3	2
Suma	9	8	7

Dle rozhodovací tabulky (Tab. 8) vyšel nástroj Ledvinka jako nejlepší, jelikož měl nejnižší hodnotu celkového součtu kritérií u všech typů opotřebení.

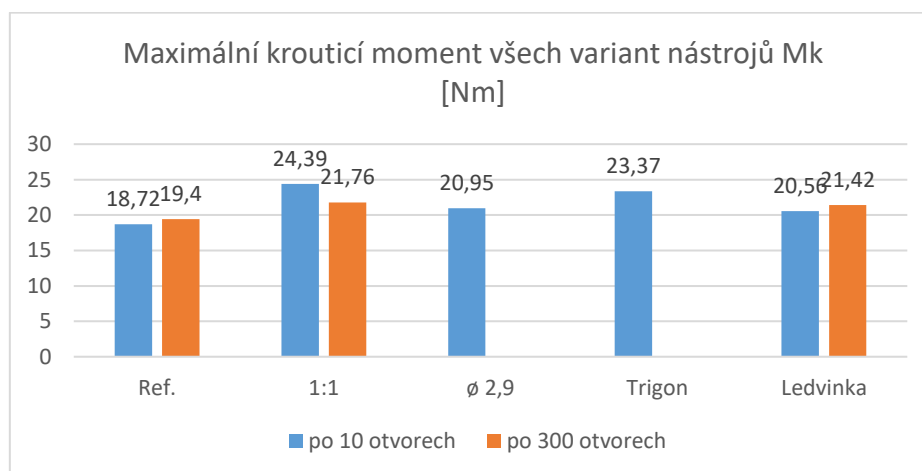
4.1.2 Řezné síly

Naměřená data z dynamometru Kistler, obsahující hodnoty posuvové síly, radiální síly a krouticího momentu, byly ve formátu CSV. Z těchto dat bylo potřeba vytvořit grafy a provést vyhodnocení. K tomu byl použit software Matlab. Na Obr. 41 je znázorněn graf posuvové síly Ref. nástroje po deseti otvorech, vytvořený v programu Matlab.



Obr. 41: Graf posuvové síly Ref. nástroje po 10 otvorech

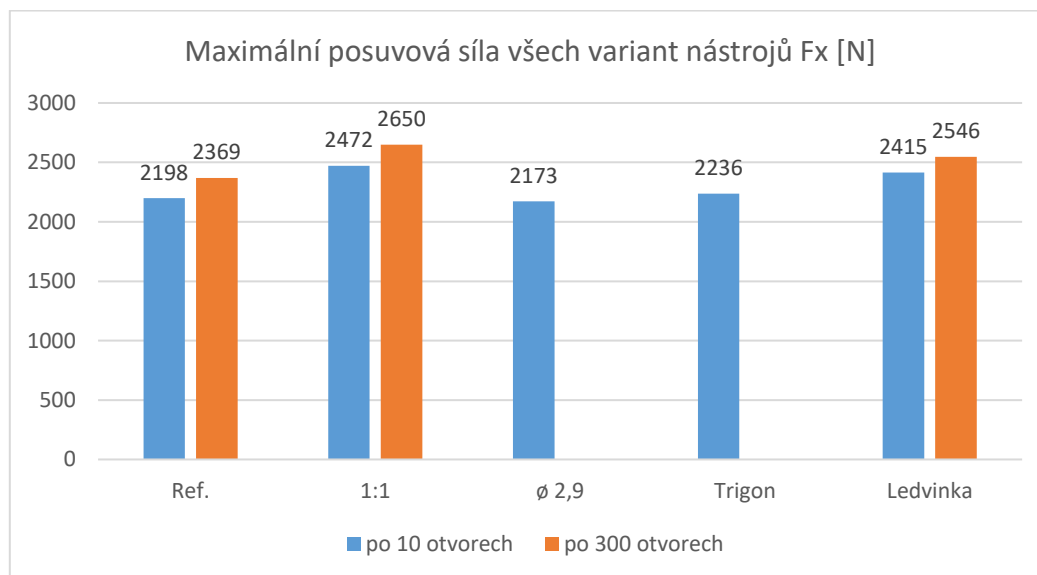
Zbylé grafy hodnot posuvové síly, radiální síly a krouticího momentu jsou k dispozici v Příloze č. 2. Nutno podotknout, že vlivem zastavení vřetena u nástroje $\varnothing 2,9$ a Trigon z důvodu vysokých vibrací, se bohužel nepodařilo změřit radiální složku řezné síly. Radiální složka řezné síly u těchto dvou nástrojů pravděpodobně překročila maximální rozsah nastavené hodnoty měření dynamometru, a proto nebyla zaznamenána. Ze všech grafů, vytvořených v programu Matlab (Příloha č. 2), byla vyhodnocena maximální hodnota posuvové síly, radiální síly a krouticího momentu. Na Obr. 42 je znázorněn sloupcový graf maximálních hodnot krouticích momentů.



Obr. 42: Maximální hodnota krouticích momentů u všech variant nástrojů

Nejnižší hodnotu krouticího momentu představuje Ref. nástroj po deseti otvorech a nejvyšší hodnotu představuje nástroj 1:1 po deseti otvorech. Je třeba zmínit, že maximální hodnota ze sloupcového grafu u nástroje $\varnothing 2,9$ a Trigon je ve skutečnosti maximální hodnota z oblasti, kdy bylo vrtání ještě stabilní. Ve skutečnosti byla maximální hodnota krouticího momentu, v oblasti zastavení vřetena, a dosáhla hodnoty $39,75 \text{ Nm}$ u nástroje $\varnothing 2,9$ a $27,63 \text{ Nm}$ u nástroje Trigon.

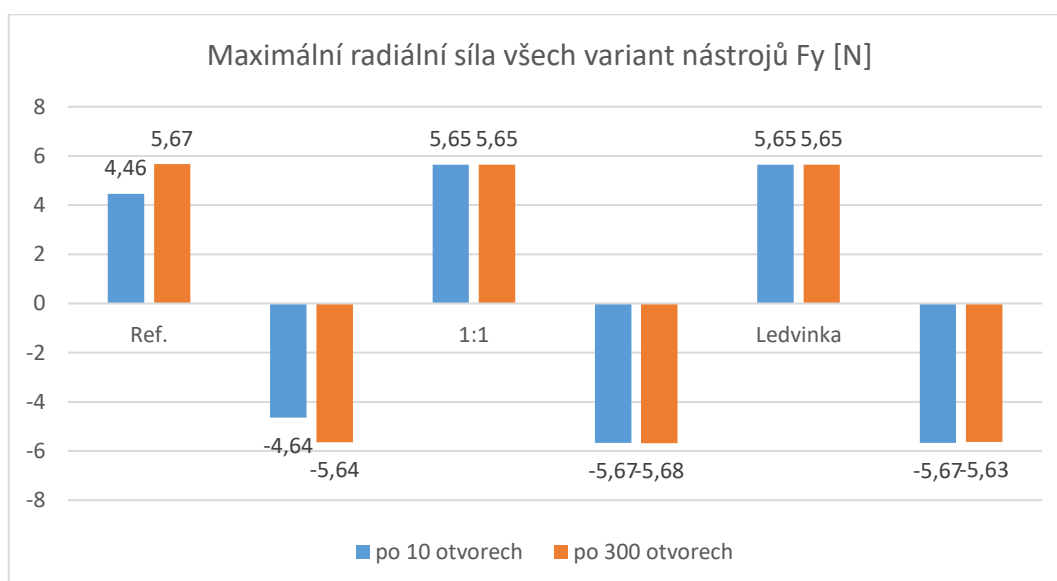
Obr. 43 znázorňuje graf maximálních hodnot posuvových sil.



Obr. 43: Maximální hodnota posuvových sil u všech variant nástrojů

Minimální hodnoty posuvové síly dosáhl nástroj $\varnothing 2,9$ po deseti otvorech ve stabilní oblasti řezu před zastavením vřetena. Maximální hodnoty posuvové síly dosáhl nástroj 1:1 po třech stech otvorech. Maximální hodnota posuvové síly v oblasti zastavení vřetena byla 3520 N u nástroje $\varnothing 2,9$ a 2471 N u nástroje Trigon.

Poslední měřenou složkou byla radiální síla nástroje. Její hodnoty jsou znázorněny v grafu (Obr. 44).



Obr. 44: Maximální hodnota radiálních sil u všech variant nástrojů

Z grafu lze vyčíst, že hodnoty maximálních radiálních sil se u všech nástrojů kromě Ref., na začátku i na konci experimentu shodují a dosahují velice nízkých hodnot kolem pěti a půl Newtonů. Zároveň se shodují i s maximálními hodnotami v opačném směru, z čehož vyplývá, že se nástroje během vrtání chovají správně a negenerují příliš velké množství radiální síly. Celkově jsou hodnoty radiálních sil u všech tří nástrojů stejné, s výjimkou Ref. nástroje po deseti otvorech, kdy je hodnota nižší o jeden Newton, což nelze považovat za významné.

4.1.3 Průměry vyvrtaných otvorů

Po dlouhodobé zkoušce řezivosti, bylo potřeba proměřit průměry vyvrtaných otvorů. Údaje o hodnotách průměrů vyvrtaných otvorů vypovídají o tom, s jakou přesností a odchylkou od předepsaného rozměru nástroj obrábí. Pokud se průměr otvoru liší od předepsaného ve vyšších rádech, než je tolerance. Jedná se o chybu nástroje, která mohla vzniknout při výrobě.

Průměry otvorů byly změřeny v metrologické laboratoři na KTO FST. V této laboratoři je stálá teplota 20°C. Průměry otvorů byly měřeny pomocí tří dotykového dutinoměru u zkušebních válečků s vyvrtanými otvory po deseti a třech stech otvorech. Před samotným měřením bylo měřidlo, společně se zkušebními vzorky přeneseny do laboratoře metrologie, kde byly ponechány čtyřicet hodin, aby jejich teplota dosáhla okolní teploty 20°C, vhodné pro měření. Na Obr. 45 je znázorněn již zmiňovaný tří dotykový dutinoměr s kalibračním kroužkem, jeden ze zkušebních válečků a teploměr, pro neustálý přehled o aktuální teplotě v průběhu měření.



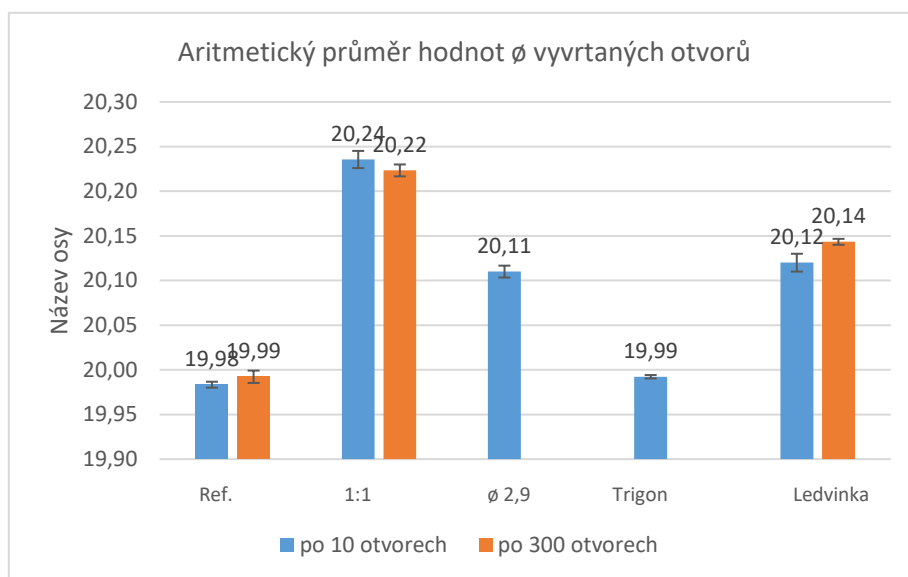
Obr. 45: Použité pomůcky pro měření

Měření průměrů otvorů bylo prováděno ve třech polohách. V každé poloze byl tří dotykový dutinoměr pootáčen o 120° a měření bylo prováděno znovu. Celkem byla každá poloha otvoru změřena třikrát. Obr. 46 znázorňuje měření průměru otvoru u válečku.



Obr. 46: Měření průměru zkušebního vzorku

Vzhledem k tomu, že hodnoty průměrů se v polohách díry výrazně neměnily (Příloha č. 3), byl ze všech naměřených hodnot vypočten aritmetický průměr.



Obr. 47: Graf \varnothing otvorů jednotlivých variant nástrojů

Z grafu je patrné, že otvory vyvrtané nástrojem 1:1 jsou o více jak dvě desetiny milimetru větší, než otvory vyvrtané Ref. nástrojem. Tuto odchylku nástroje 1:1 od Ref. nástroje lze přisuzovat nepřesnostem, vzniklým při obrábění lůžek VBD. Ačkoliv se nástroje \varnothing 2,9 a Trigon nepodařilo otestovat vlivem vysokých vibrací a hlčení drážek, hodnoty rozměrů otvorů se zdají být nejpřesnější v porovnání s Ref. Nástroj Ledvinka má hodnoty průměrů děr o více jak desetinu milimetru větší než Ref.

4.1.4 Měření průměrů na stroji Zoller genius 3

Průměry nástrojů všech variant byly proměřeny na univerzálním měřícím stroji pro řezné nástroje Zoller genius 3. Toto měření bylo provedeno z důvodu získání dat, pro korelaci s hodnotami průměrů vyvrtaných děr.




Obr. 48: Univerzální měřící stroj Zoller genius 3 [1]

Obr. 49 znázorňuje zkušební protokol pro změřenou hodnotu průměru nástroje 1:1 ze stroje Zoller genius 3.

Zkušební protokol 1 / 1

»genius Standard« 19.9.2022

Uživatel zoller 13:36:52



Ident-č. _____

Ozn. Vrták D20 - 1:1

Komentář _____

Zkušební technik _____

Stupeň	Výsledek	Modad.hodn.	H. tol.	Skut.hodn.	řzd.hodn.	Tolerance
1	Průměr			20,128		

Obr. 49: Hodnota naměřeného průměru nástroje 1:1 ze stroje Zoller

Hodnoty měření pro všechny varianty nástroje, včetně Ref. byly přepsány do přehledné tabulky (Tab. 9). K těmto hodnotám byly pro porovnání připsány hodnoty z měření průměrů děr.

Tab. 9: Porovnání stroje Zoller s hodnotami průměrů děr

	Průměry děr po 10 otvorech	Průměry děr po 300 otvorech	Zoller genius 3
Ref.	19,98	19,99	19,9
1:1	20,24	20,22	20,13
ø 2,9	20,11		20,02
Trigon	19,99		19,93
Ledvinka	20,12	20,14	19,98

Při porovnání hodnot dle Tab. 9 jsou hodnoty ze stroje Zoller nižší, než hodnoty průměrů o několik setin milimetru. U nástroje Ledvinka je rozdíl o něco vyšší a dosahuje hodnot vyšších jak deset setin milimetru. Vzhledem k tomu, že jsou rozdíly mezi hodnotami průměrů a hodnotami ze stroje Zoller u všech nástrojů, kromě nástroje Ledvinka podobné. Lze konstatovat, že průměry děr jsou změřeny správně. Odchylna u nástroje Ledvinka mohla být způsobena drobnou chybou při měření.

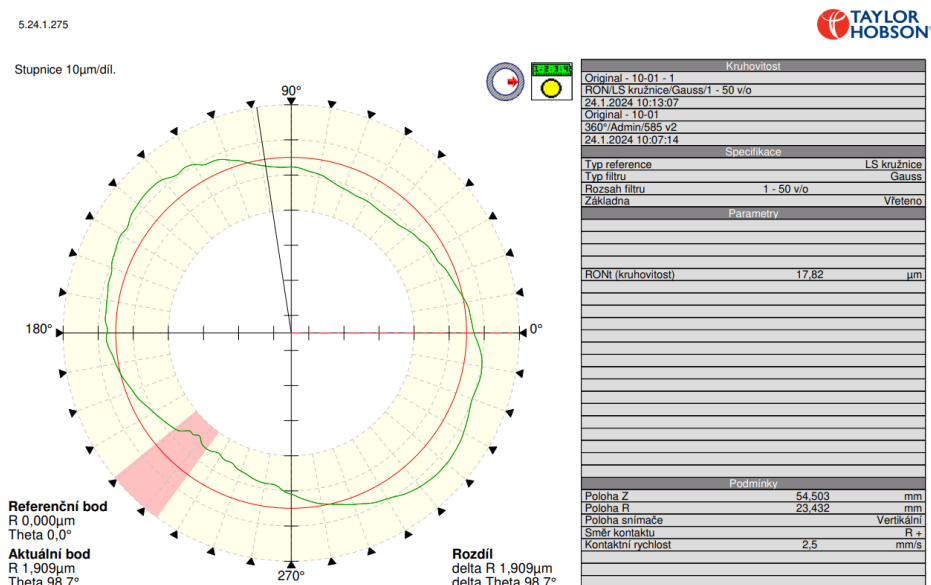
4.1.5 Kruhovitost a válcovitost

Měření kruhovitosti a válcovitosti bylo provedeno v metrologické laboratoři na KTO FST. Metrologická laboratoř má ve výbavě vysoce přesný kruhoměr Taylor Hobson Talyrond 585 Lt (Obr. 50).



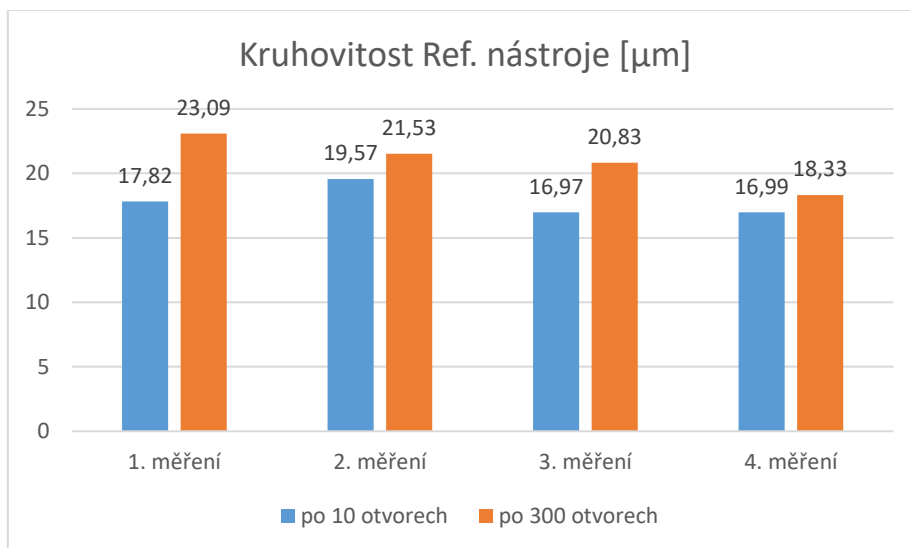
Obr. 50: kruhoměr Taylor Hobson Talyrond 585 Lt

Měření kruhovitosti otvorů bylo provedeno ve čtyřech polohách, mezi kterými byla vzdálenost přibližně deset milimetrů. Na Obr. 51 je znázorněn protokol z měření kruhovitosti otvoru, vyvrtaném Ref. nástrojem v první poloze.



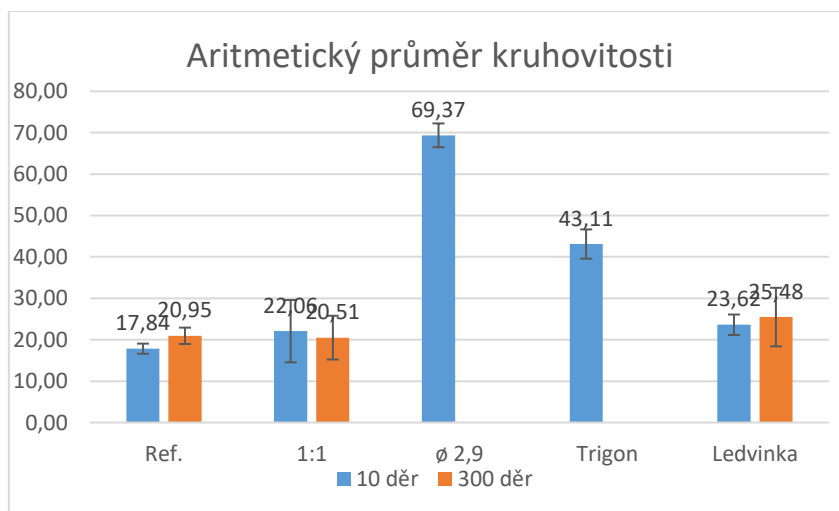
Obr. 51: Protokol z měření kruhovitosti pro Ref. nástroj

Obr. 52 znázorňuje sloupcový graf z měření kruhovitosti pro Ref. nástroj.



Obr. 52: Graf kruhovitosti otvorů po vyvrtání Ref. nástrojem

Hodnoty kruhovitosti v jednotlivých polohách u otvorů, vyvrtanými ostatními nástroji nelze považovat za významné, protože mezi hodnotami není žádný systematický dopad (Příloha č. 4). Z tohoto důvodu byl vypočten aritmetický průměr ze všech čtyř poloh měření a zanesen do grafu (Obr. 53).



Obr. 53: Graf aritmetického průměru kruhovitosti

Dle grafu hodnota kruhovitosti otvoru po nástroji ø 2,9 mm výrazně převyšuje ostatní hodnoty kruhovitosti. Otvor vyvrtán pomocí nástroje Trigon dosahuje také vysoké kruhovitosti, více než dvojnásobné oproti Ref. Tyto vysoké hodnoty kruhovitosti u otvorů po nástrojích ø 2,9 a Trigon jsou úzce svázány s vysokými vibracemi u těchto dvou nástrojů, vzniklých při testování a naznačují, že nástroje trpí vysokou házivostí. Mezi hodnotami kruhovitosti po deseti a třech stech otvorech nelze spatřit nějaký pravidelný dopad.

Na kruhoměru byla změřena i válcovitost. Kruhoměr změří kruhovitost ve více polohách otvoru a z naměřených hodnot kruhovitosti dokáže mezi jednotlivými polohami vyhodnotit odchylku válcovitost vůči dokonalému válci. Obr. 54 znázorňuje válcovitost otvoru po vyvrtání nástrojem 1:1.

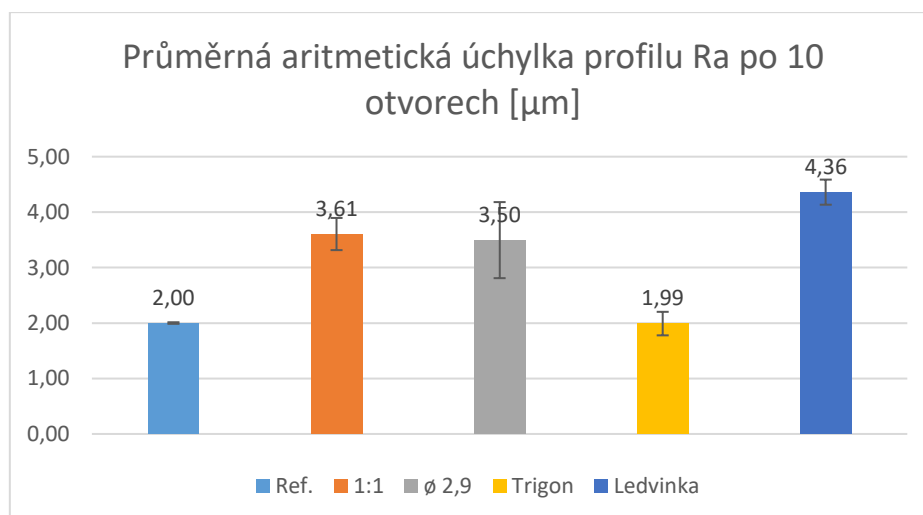
4.1.6 Drsnost

Drsnost povrchu byla změřena v laboratoři dílenské metrologie na RTI. Tato laboratoř je akreditovaná zkušební laboratoř dle standardu ČSN EN ISO/IEC 17025:2018. Laboratoř je vybavena 3D souřadnicovým měřícím strojem CMM Carl Zeiss Prismo 7 Navigator. [22]



Obr. 56: 3D souřadnicový měřící stroj CMM Carl Zeiss Prismo 7 Navigator [23]

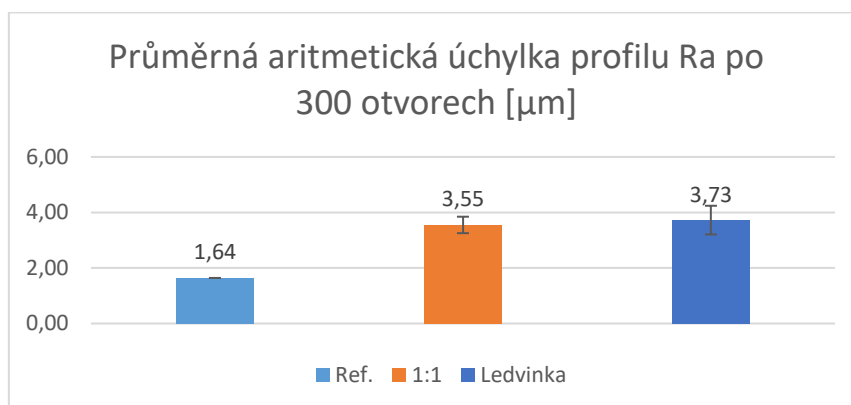
Na Obr. 57 je znázorněn graf naměřených hodnot průměrné aritmetické úchylky profilu R_a po deseti otvorech u každého typu nástroje. Z grafu je patrné, že Ref. nástroj, společně s nástrojem Trigon dosahují nejnižších a téměř stejných hodnot drsnosti profilu. Nástroj Ledvinka dosahuje nejvyšších hodnot drsnosti profilu. Nástroj 1:1 dosahuje podobných hodnot, jako nástroj $\varnothing 2,9$.



Obr. 57: Průměrná aritmetická úchylka R_a po 10 otvorech [μm]

Obr. 58 znázorňuje graf naměřených hodnot průměrné aritmetické úchylky profilu R_a po třech stech otvorech u nástrojů, které dokončili testování.

Z grafu je vidět, že hodnoty drsností se u Ref. nástroje, nástroje 1:1 a nástroje Ledvinka snížili oproti hodnotám drsnosti po deseti otvorech. To je způsobeno zaběhnutím úplně nových VBD, kdy se geometrie břitu lehce přizpůsobila řeznému procesu a VBD se dostaly do 2. fáze lineárního opotřebování.

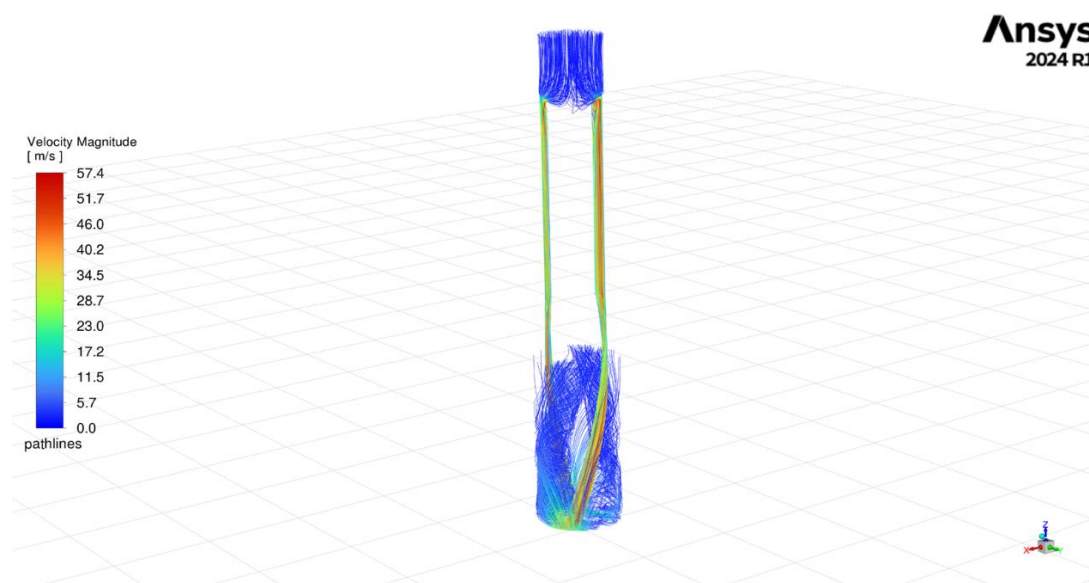


Obr. 58: Průměrná aritmetická úchylka Ra po 300 otvorech [µm]

Do Přílohy č. 5 jsou přiloženy ještě hodnoty kvadratické úchylky profilu R_q , celková výška profilu R_t a průměrná hodnota R_z ze všech R_t . Ačkoliv hodnota drsnosti těchto hodnot (R_q , R_t a R_z) u některých nástrojů po třech stech otvorech mírně převyšuje hodnoty po deseti otvorech, na rozdíl od R_q . Jsou tyto rozdíly tak malé, že nevzbuzují žádný mimořádný jev. Celkově hodnoty drsnosti, jak po deseti, tak po třech stech otvorech odpovídají předpokladům a nejsou původcem nějakého mimořádného jevu, který by stál za hlubším zamyšlením.

4.2 Vyhodnocení výpočetní simulace proudění CFD

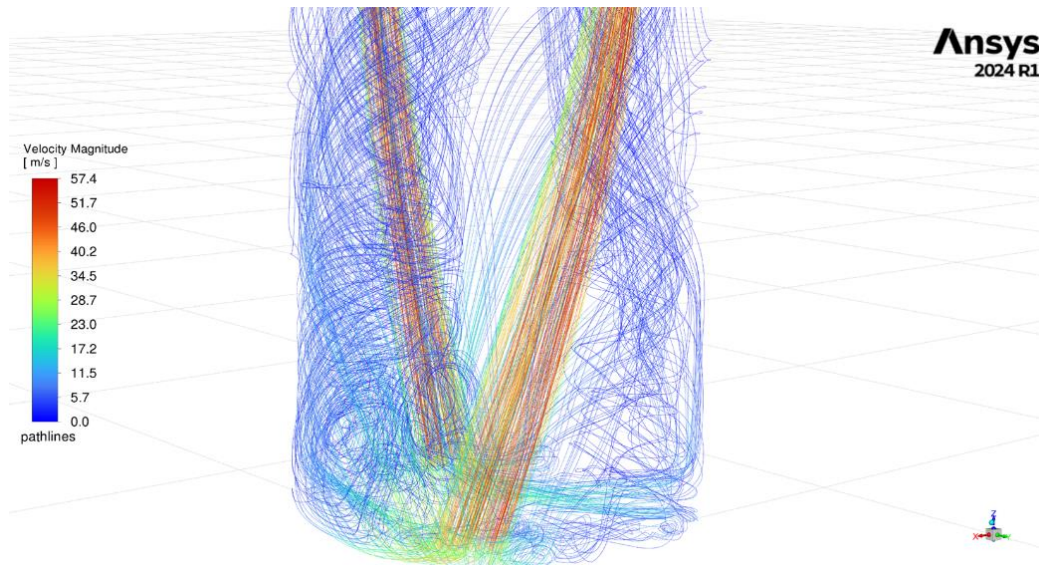
Po dokončeném výpočtu CFD simulace proudění pro nástroj Ledvinka, byly nejprve vyhodnoceny proudnice. Proudnice jsou vektorové čáry, vektorového pole okamžitých rychlostí. Na Obr. 59 jsou znázorněny proudnice celé domény procesní kapaliny nástrojem Ledvinka. Velikost rychlosti procesní kapaliny definuje barevné spektrum jednotlivých proudnic, ke kterému jsou přiřazeny hodnoty rychlosti kapaliny dle stupnice vlevo.



Obr. 59: Proudnice domény procesní kapaliny nástrojem Ledvinka

Rychlost kapaliny se dle barevného spektra výrazně zvyšuje na vstupu do chladicích kanálů, ve kterých dosahuje rychlost hodnot až 57,4 m/s.

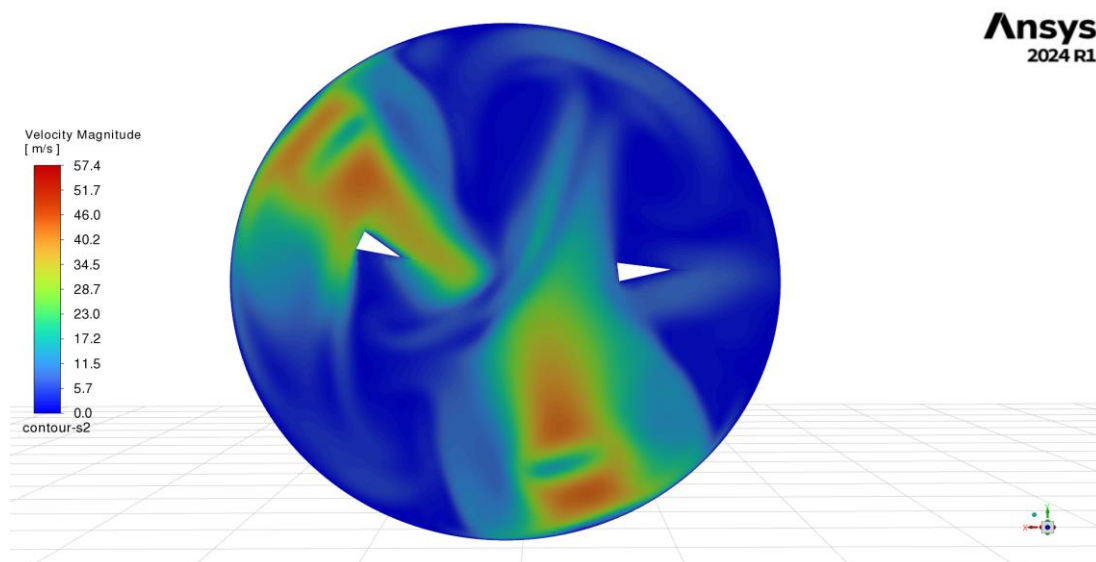
Obr. 60 vzniknul přiblížením oblasti řezné zóny předchozího Obr. 59. Je vidět, že rychlost procesní kapaliny se při výstupu z kanálů do oblasti řezné zóny snížila na hodnoty 34,5 m/s a při jejím transportu do oblasti drážek na odvádění třísek rychlost klesla až k minimálním hodnotám.



Obr. 60: Proudnice procesní kapaliny v oblasti řezné zóny nástroje Ledvinka

Při pohledu na proudnice v oblasti řezné zóny (Obr. 60) je patrné, že se bude jednat o turbulentní proudění, jelikož proudnice jdou ve spirále, zvedají se a mění svůj směr.

Na Obr. 61 jsou znázorněny kontury velikosti absolutní rychlosti procesní kapaliny u dna díry. Kontury velikosti absolutní rychlosti poskytují dobré informace o místech, kde dochází ke zrychlování, nebo zpomalování procesní kapaliny.

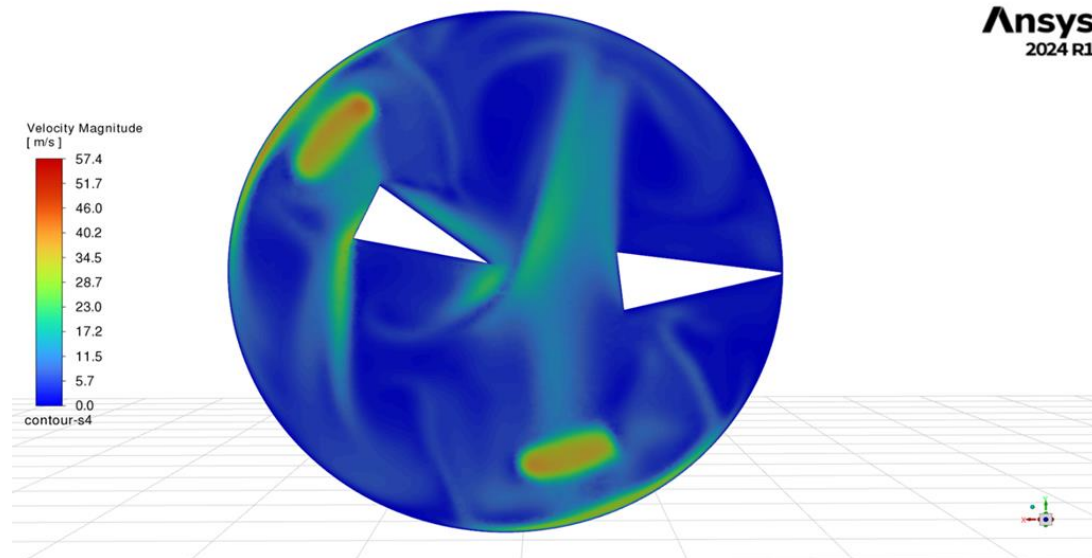


Obr. 61: Kontury velikosti absolutní rychlosti procesní kapaliny u dna díry

Z Obr. 61 je vidět, že při výstupu procesní kapaliny z chladicích kanálů jsou nejvyšší hodnoty rychlostí směrem do středu nástroje.

Vnitřní VBD je velice dobře chlazena, jelikož výstup chladicího kanálu je umístěn v její blízkosti. Vnější VBD je chlazena méně, protože výstup kanálu byl z konstrukčních důvodů umístěn dál od VBD a rychlost kapaliny se tak při cestě k vnějším VBD snížila. Maximální rychlost kapaliny u dna je 46 m/s.

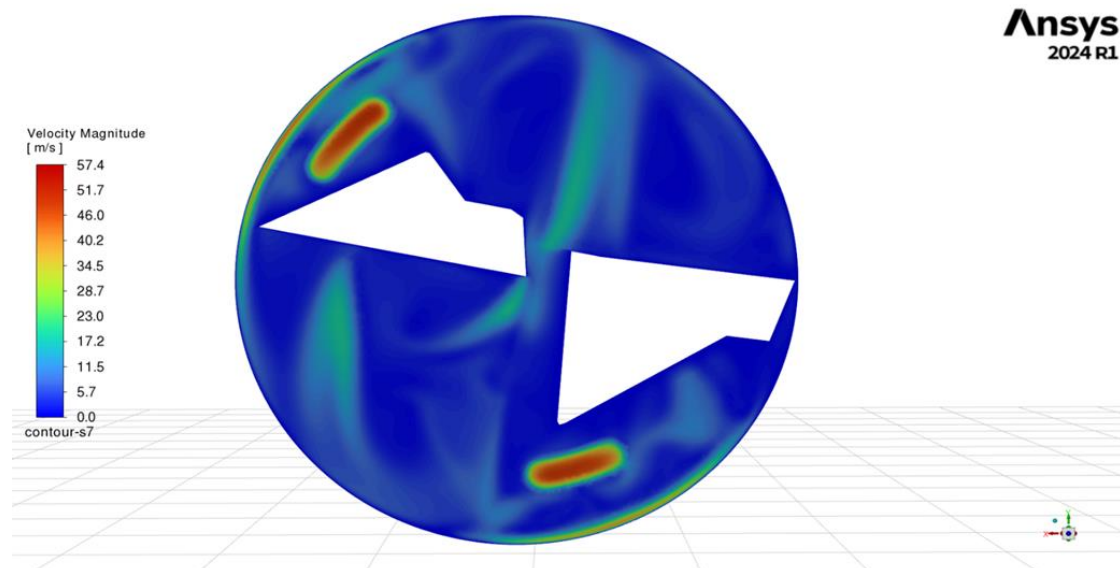
Kontury velikosti rychlostí v řezu, vzdáleném šest desetin milimetru od dna díry. Jsou zobrazeny na Obr. 62.



Obr. 62: Kontury velikosti absolutní rychlosti procesní kapaliny šest desetin milimetru nad dnem díry

V místě, vzdáleném šest desetin milimetru od dna díry, v oblasti VBD už je rychlost snížena na maximální hodnoty 28 m/s.

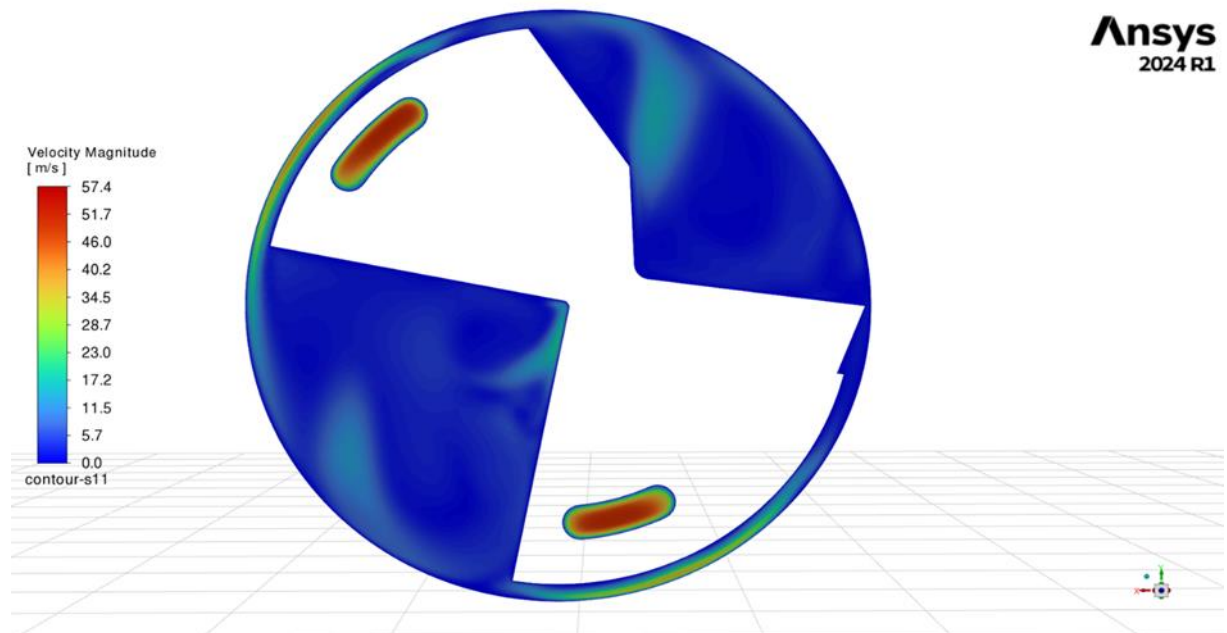
V místě, které je od dna díry vzdáleno dvanáct desetin milimetru, kdy kapalina přichází do styku s tělem nástroje (Obr. 63), dosahuje maximální rychlost kapaliny hodnot 17,2 m/s.



Obr. 63: Kontury velikosti absolutní rychlosti procesní kapaliny dvanáct desetin milimetru nad dnem díry

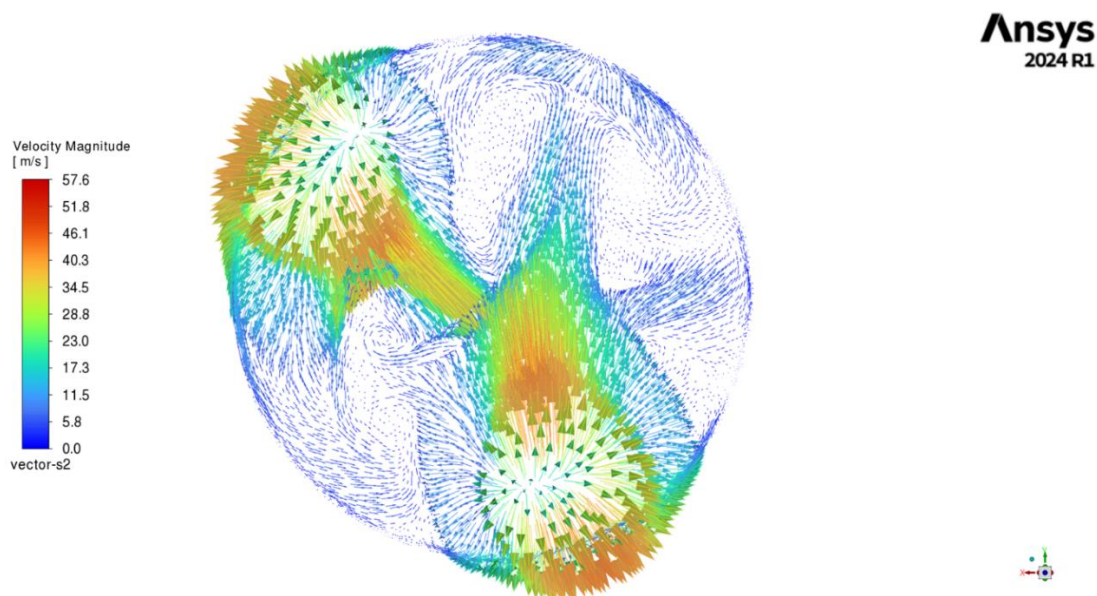
Těchto hodnot rychlosti už však dosahuje pouze v malých oblastech a okolní hodnoty rychlostí už jsou velmi nízké, kolem 5,7 m/s.

Dva milimetry od dna díry (Obr. 64), už se rychlosti kapaliny ve všech oblastech blíží k nízkým hodnotám (5,7 m/s).



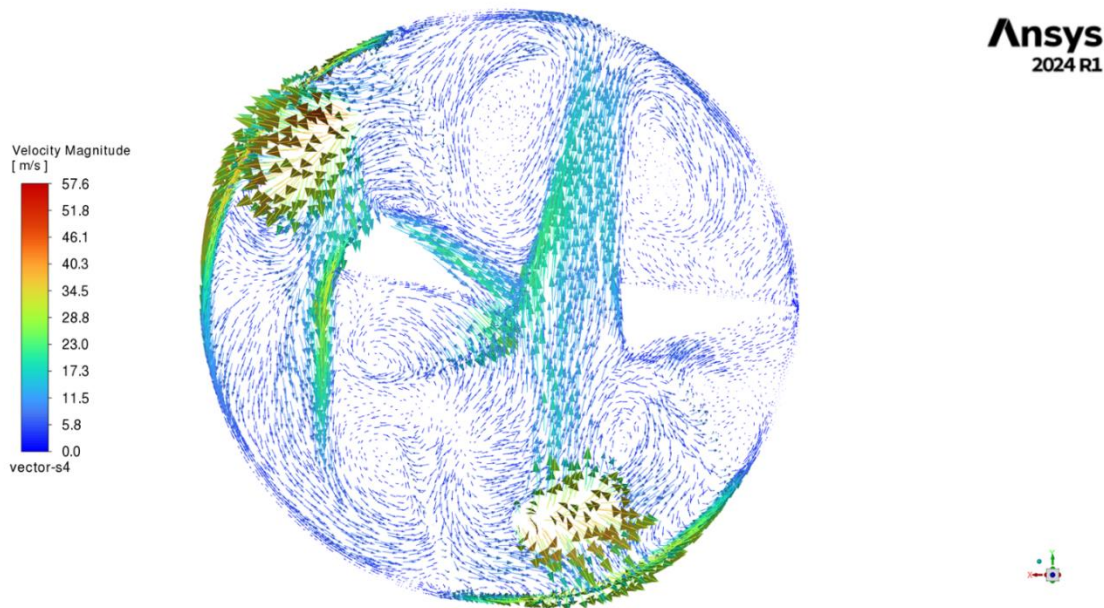
Obr. 64: Kontury velikosti absolutní rychlosti procesní kapaliny dva milimetry nad dnem díry

Obr. 65 znázorňuje vektory rychlosti procesní kapaliny u dna díry. Tento obrázek lépe vystihuje chování procesní kapaliny, protože zde můžeme kromě velikosti rychlostí vidět i směry proudění procesní kapaliny. Velikost rychlosti procesní kapaliny je dána jak barvou, tak velikostí jednotlivých vektorů rychlosti.



Obr. 65: Vektory rychlosti procesní kapaliny u dna díry

Na rozdíl od kontur velikosti absolutních rychlostí procesní kapaliny si zde můžeme všimnout vzniku velkého množství vírů, s různou orientací a velikostí. Velikost i orientace vírů se s rostoucí výškou ode dna otvoru mění (Obr. 66)



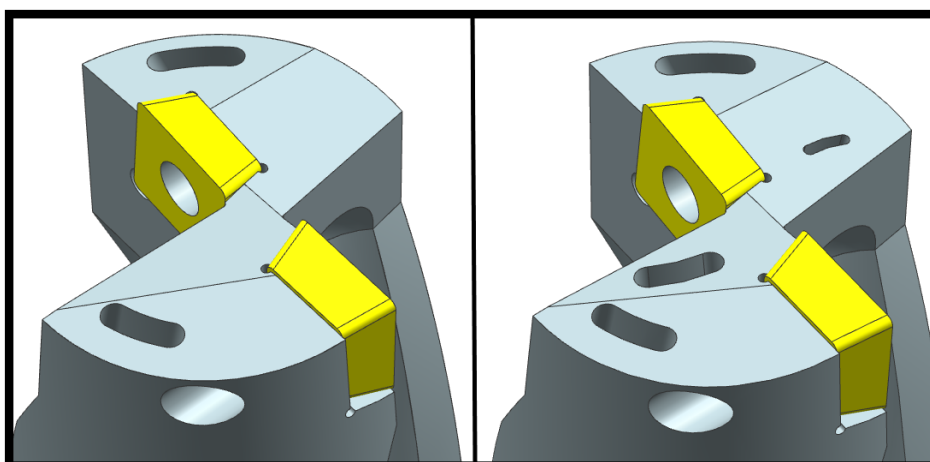
Obr. 66: Vektory rychlosti procesní kapaliny šest desetín milimetru nad dnem díry

Některé víry se spojí v jeden a v některých místech se vytvoří další menší víry. Toto chování procesní kapaliny ukazuje, že se jedná o turbulentní proudění.

4.3 Vývoj nových variant nástrojů

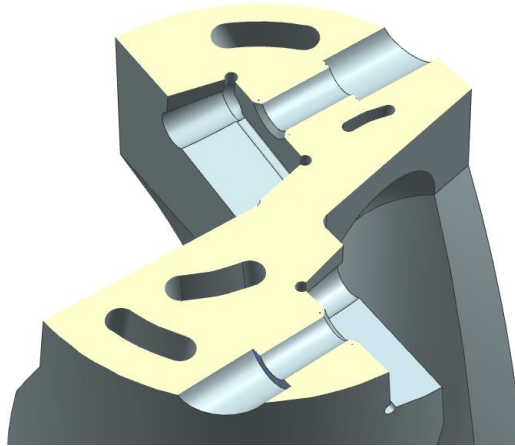
Na základě výsledků z CFD simulace proudění byl proveden vývoj nových variant vrtacích nástrojů. Nové varianty pramenily z nástroje Ledvinka, jelikož v něm byl dle výsledků z experimentu nejvyšší potenciál vnitřního systému chlazení s dopadem na prodloužení trvanlivosti bříty. Dle CFD simulace proudění rychlost kapaliny na výstupu z kanálů rychle ztrácí svou rychlost, kterou nabere uvnitř kanálu. Než se kapalina dostane k VBD, dojde k výraznému poklesu její rychlosti a břit VBD tak není dostatečně chlazen. Z tohoto důvodu byl záměr dostat do řezné zóny co největší objemové množství procesní kapaliny, a výstupy kanálů umístit co nejblíže k VBD. Konstrukce nových variant nástrojů byla provedena s využitím CAD programu NX Siemens.

Ledvinka 2 byl první navržený nástroj. Jednalo se o modifikaci nástroje Ledvinka, rozšířenou o dva přidavné chladicí kanály ve tvaru ledvinky (Obr. 67).



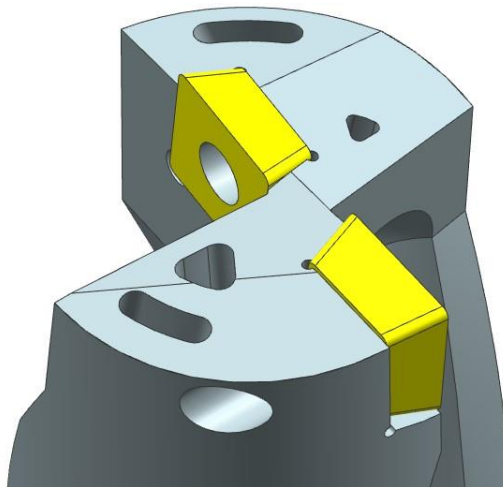
Obr. 67: Nástroj Ledvinka (vlevo), nástroj Ledvinka 2 (vpravo)

Chladicí kanál, umístěný za vnitřní VBD přicházel do kolize s upínacím šroubkem a nedařilo se jej přivést do místa řezu. Aby bylo místo využito, byl chladicí kanál zmenšen, aby byl prostor zaplněn a objemový průtok procesní kapaliny byl zvýšen. Chladicí kanál vedle vnější VBD se podařilo přivést do místa řezu při zachování jeho velikosti. Za neustálé kontroly kolizí chladicích kanálů při konstrukci se podařilo vytvořit nástroj Ledvinka 2.



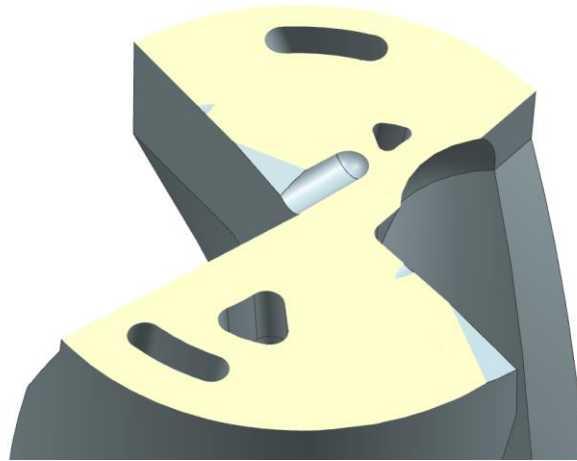
Obr. 68: Kontrola kolizí chladicích kanálů s konstrukčními prvky nástroje Ledvinka 2

Nástroj Ledvinka 3 byl upravenou variantou profilů přídavných chladicích kanálů nástroje Ledvinka 2 (Obr. 69).



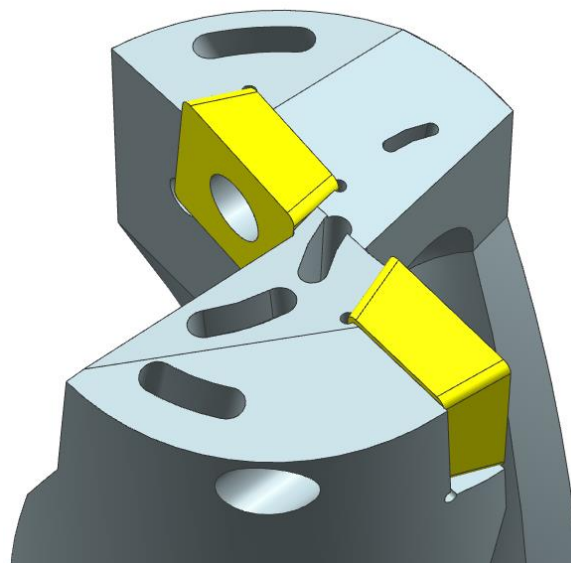
Obr. 69: Varianta nástroje Ledvinka 3

Místo ledvinkových profilů byly použity profily ve tvaru trojúhelníka, využitě u nástroje Trigon. Chladicí kanál za vnitřní VBD musel být opět zmenšen, aby se nedostal do kolize z důvodu omezeného prostoru mezi šroubkem, lůžkem VBD a drážkou pro odvádění třísek. Chladicí kanál vedle vnější VBD se podařilo přivést do místa řezu, aniž by musela být upravena jeho velikost. Tato varianta nástroje Ledvinka 3 byla vhodnou porovnávací variantou pro předchozí variantu nástroje Ledvinka 2.



Obr. 70: Kontrola kolizí chladicích kanálů s konstrukčními prvky nástroje Ledvinka 3

Aby bylo místo řezu zásobeno ještě větším množstvím procesní kapaliny, započala realizace myšlenky vytvoření další varianty nástroje. Pro umístění chladicího kanálu se nabízelo místo zbylého prostoru ve středu nástroje. Návrh této varianty se značně komplikoval z důvodu minimálního prostoru, který zbyval v těle nástroje. Chladicí kanál přicházel do kolize nejen s konstrukčními prvky nástroje ale i s ostatními chladicími kanály. Nakonec se návrh nové varianty nástroje Ledvinka 4 povedlo zrealizovat. V průběhu návrhu byly kontrolovány kolize při zachování velikosti chladicího kanálu pro co možná největší přivedení objemového množství procesní kapaliny (Obr. 71).



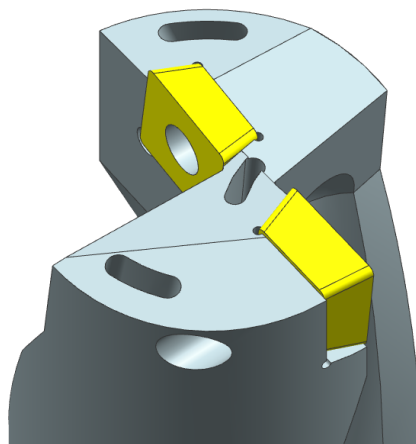
Obr. 71: Varianta nástroje Ledvinka 4

Nástroj Ledvinka 4 je rozšířenou variantou nástroje Ledvinka 2 o středový chladicí kanál. Chladicí kanál umístěný ve středu nástroje varianty Ledvinka 4 byl vhodně veden tělem nástroje, aby mohla být zachována jeho velikost pro maximální chladicí účinek procesní kapaliny.



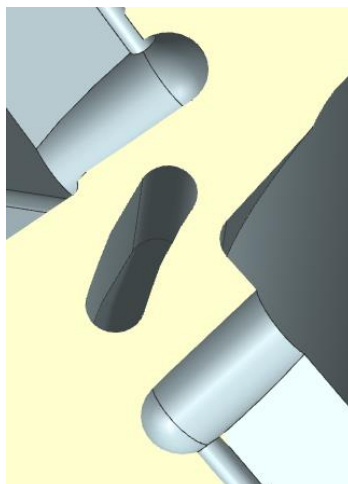
Obr. 72: Kontrola kolizí chladicích kanálů vůči sobě u varianty Ledvinka 4

Varianta nástroje Ledvinka 5 byla vytvořena odstraněním přídavných kanálů, vytvořených u varianty Ledvinka 2 a ponechání středového kanálu, vytvořeného pro variantu nástroje Ledvinka 4 (Obr. 73).



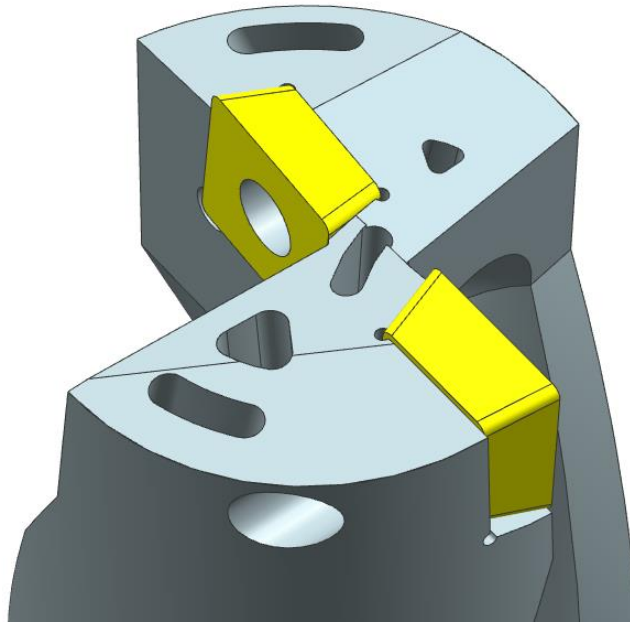
Obr. 73: Varianta nástroje Ledvinka 5

Tato varianta byla vytvořena s cílem rozšíření nástroje Ledvinka pouze o středový kanál.



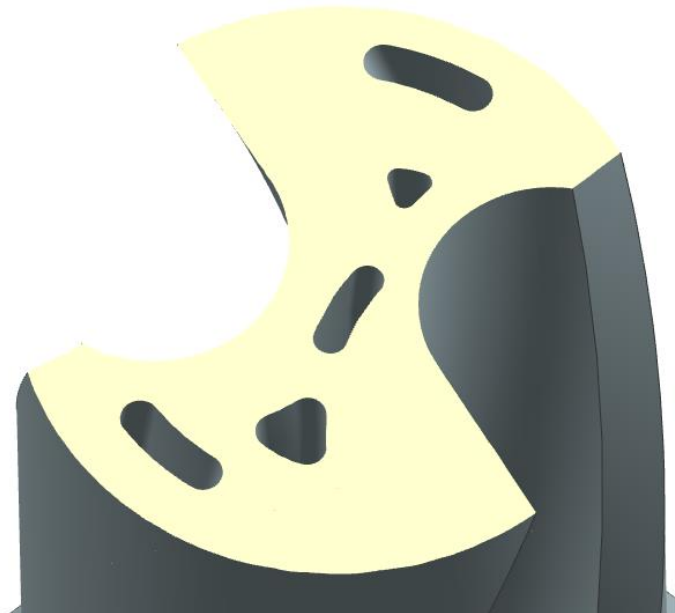
Obr. 74: Kontrola kolizí středového chladicího kanálu s lůžky VBD

Poslední varianta nástroje Ledvinka 6 je zobrazena na Obr. 75.



Obr. 75: Varianta nástroje Ledvinka 6

Jedná se o rozšířenou variantu nástroje Ledvinka 3, doplněnou o středový chladicí kanál. Při konstrukci varianty Ledvinka 6 se změnou profilů chladicích kanálů musel upravit přívod procesní kapaliny do místa řezu, aby nevznikla kolize mezi chladicími kanály.



Obr. 76: Kontrola kolizí chladicích kanálů vůči sobě u varianty Ledvinka 6

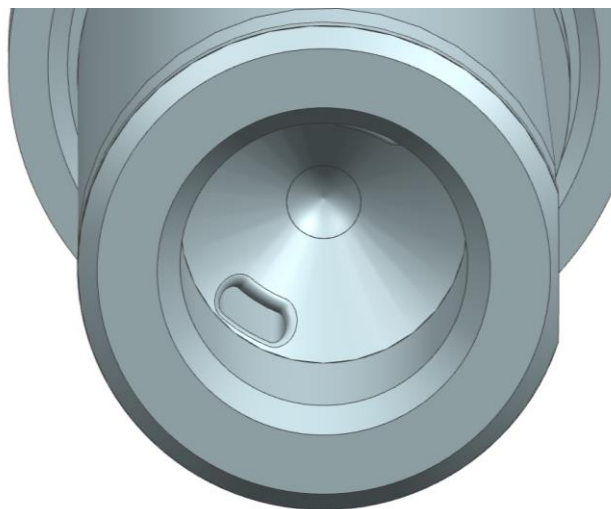
Po návržení všech nových variant byly spočítány objemové průtoky, aby bylo zjištěno, která varianta dopraví do místa řezu největší množství procesní kapaliny. Při výpočtu byla zanedbána měnící se rychlost v průřezech chladicích kanálů a všechny výpočty byly spočítány pro rychlost procesní kapaliny nástrojem Ledvinka 34,5 m/s.

Tab. 10: Tabulka objemových průtoků jednotlivých navržených variant

Varianta nástroje	Průtočná plocha S [m ²]	Objemový průtok Q _v [m ³ /s]
Ref.	9,817 * 10 ⁻⁶	3,387 * 10 ⁻⁴
Ledvinka	8,495 * 10 ⁻⁶	2,931 * 10 ⁻⁴
Ledvinka 2	1,376 * 10 ⁻⁵	4,747 * 10 ⁻⁴
Ledvinka 3	1,356 * 10 ⁻⁵	4,678 * 10 ⁻⁴
Ledvinka 4	1,801 * 10 ⁻⁵	6,213 * 10 ⁻⁴
Ledvinka 5	1,274 * 10 ⁻⁵	4,4 * 10 ⁻⁴
Ledvinka 6	1,78 * 10 ⁻⁵	6,14 * 10 ⁻⁴

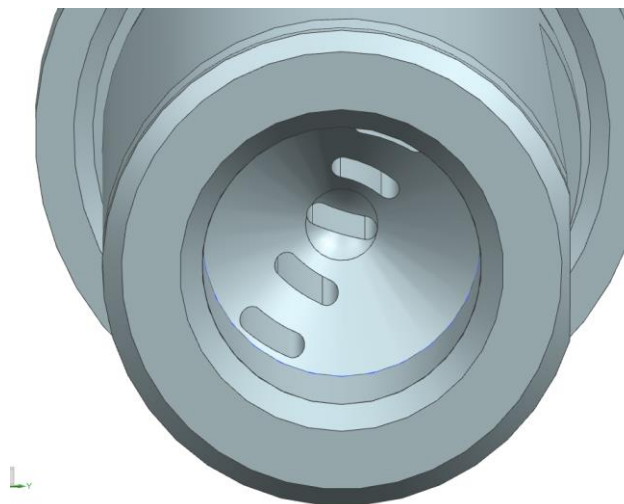
Dle předpokladů dopadl nejlépe nástroj Ledvinka 4, který dosahuje nejvyššího počtu chladicích kanálů, a tedy nejvyšších hodnot objemových průtoků. Lze tedy předpokládat, že tato varianta má nejvyšší potenciál, jelikož je do místa řezu schopna dopravit největší množství procesní kapaliny.

Při vývoji nových variant vnitřního systému chlazení byla věnována pozornost oblasti vstupu procesní kapaliny do chladicích kanálů nástroje (Obr. 77).



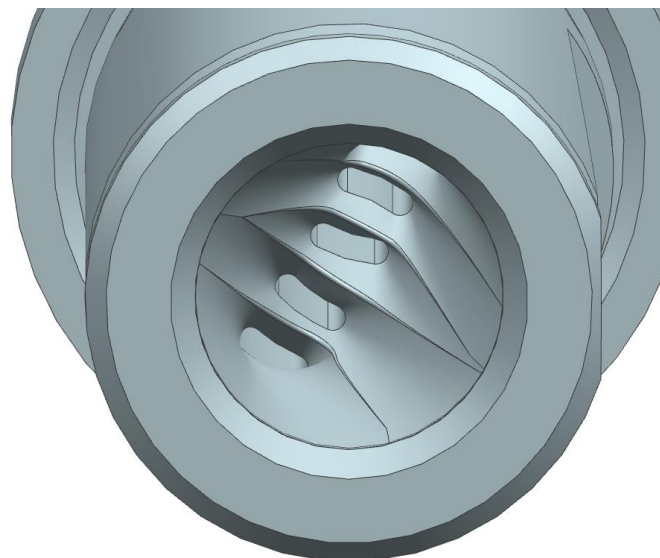
Obr. 77: Oblast vstupu procesní kapaliny do chladicích kanálů

Tato oblast se s příchodem nových variant rozšířila o nové vstupní otvory do nových chladicích kanálů.



Obr. 78: Oblast vstupu procesní kapaliny do chladicích kanálů nástroje Ledvinka 4

Aby byla procesní kapalina vhodně nasměrována do jednotlivých chladicích kanálů. Byla oblast vstupu procesní kapaliny upravena pro všechny nově vytvořené varianty.



Obr. 79: Upravená oblast vstupu procesní kapaliny do chladicích kanálů nástroje Ledvinka 4

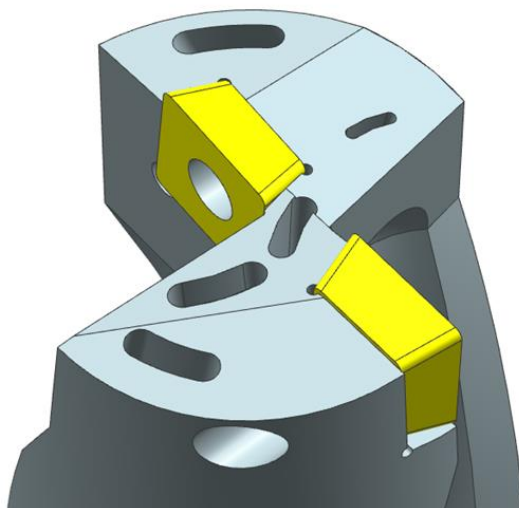
4.4 Sumární zhodnocení dosažených výsledků

Díky úpravě vnitřního systému chlazení se podařilo prodloužit životnost nástroje 1:1 a nástroje Ledvinka o 10 % vůči Ref. nástroji, přičemž nástroj Ledvinka dopadl ještě lépe z hlediska postupného vývoje opotřebení. Při celkovém součtu kritériálních opotřebení dosáhl nástroj Ledvinka nejnižší hodnoty a vzešel tak jako nejlepší testovaná varianta z tohoto ohledu. Nástroj 1:1 dosahuje vyšších hodnot krouticího momentu, než Ref. nástroj. Vzhledem k tomu, že konstrukce nástroje 1:1 je identická k Ref. nástroji, kvalita výroby není stejná jako Ref. nástroj vlivem rozdílných hodnot krouticích momentů. Nicméně hodnoty krouticích momentů nástroje Ledvinka jsou nižší o 16 %, než hodnoty krouticích momentů nástroje 1:1, což lze přisuzovat lepšímu vnitřnímu systému chlazení nástroje Ledvinka. Nižší hodnoty posuvových sil u nástroje $\varnothing 2,9$ a Trigon nelze považovat za důležité, protože se nástrojům nepodařilo vyvrtat celý otvor. Výsledky z naměřených radiálních sil vykazují u všech nástrojů vysokou míru stability a nejeví se tak v tomto ohledu něco co by stálo za hlubším bádáním.

Hodnoty průměrů se nejvíce odchylojí od Ref. nástroje u nástroje 1:1 a to o více jak dvě desetiny milimetru. Naopak nástroj Trigon vrtá přesné rozměry děr. Nepřesnosti vyvrtaných děr lze přisuzovat nepřesné výrobě lůžek. Hodnoty kruhovitosti u nástroje $\varnothing 2,9$ a Trigon jsou výrazně vyšší oproti ostatním variantám a vysoké vibrace vzniklé při experimentu mohou být původcem právě těchto vysokých hodnot kruhovitosti. Nástroj Ledvinka a 1:1 dosahují naopak velice pozitivních výsledků z porovnání s Ref. nástrojem. Hodnoty válcovitosti jsou souvztažné s hodnotami kruhovitosti. Vzhledem k tomu, že se ale u nástroje 1:1 a u nástroje Ledvinka hodnoty válcovitosti odchylojí od Ref. nástroje, na rozdíl od hodnot kruhovitosti, lze brát hodnoty válcovitosti jako druhořadé, jelikož hodnoty kruhovitosti byly měřeny ve čtyřech polohách otvoru. Hodnoty drsnosti po deseti otvorech jsou protichůdné s hodnotami kruhovitosti, protože nástroj Trigon dosahuje podobných hodnot jako Ref. nástroj a nástroj $\varnothing 2,9$ dosahuje podobných hodnot jako nástroj 1:1, ačkoliv nástroj $\varnothing 2,9$ a Trigon vykazovali vysokou míru kruhovitosti a házivosti. Drsnost povrchu po třech stech otvorech lze považovat za pravdivou, jelikož je její hodnota u nástroje 1:1 a Ledvinka podobná a u Ref. nástroje odlišná od těchto dvou variant. To lze přisuzovat k odlišnému materiálu těla Ref. nástroje od nástroje 1:1 společně s nástrojem Ledvinka.

Na základě celkového vyhodnocení dlouhodobé zkoušky řezivosti byl nástroj Ledvinka vyhodnocen jako nástroj s nejvyšším potenciálem vnitřního systému chlazení majícím dopad na trvanlivost břítu, a proto u něj byla provedena výpočetní simulace proudění CFD. Nástroj $\varnothing 2,9$ a Trigon nebyli kvůli vysokým vibračním zařazeny do experimentu.

Dle výpočetní simulace proudění jsou vektory rychlostí procesní kapaliny, při opouštění chladicího kanálu směřovány do středu nástroje. Rychlost procesní kapaliny se rychle snižuje. Vývoj nových variant nástrojů měl zajistit dopravení většího objemového množství procesní kapaliny do místa řezu, které mělo být podpořeno vhodným umístěním výstupů chladicích kanálů co nejbližší k VBD, pro zajištění dostatečné rychlosti procesní kapaliny u hlavního ostří a špičky břítu nástroje. Jako nástroj s nejlepším systémem vnitřního chlazení se jeví varianta Ledvinka 4, která zvyšuje objemové množství dopravované procesní kapaliny do místa řezu vůči nástroji Ledvinka o 112 %.



Obr. 80: Nejlepší varianta nástroje Ledvinka 4

5 Závěr

Inovace vnitřního systému chlazení vrtacích nástrojů s využitím 3D tisku kovů je velice zajímavé téma. Tato technologie umožňuje vytvářet vnitřní dutiny různých tvarů. Díky této technologii je umožněno inovovat vnitřní systém chlazení vrtacích nástrojů pro dosažení vyšších hodnot trvanlivosti břitu.

DP bylo věnováno velké množství času a úsilí, které vedlo k dosažení cíle DP. Jednotlivé dílčí kroky mají logickou návaznost a navzájem se ospravedlňují.

Cíl DP byl splněn. Bylo provedeno experimentální testování všech variant nástrojů. Při testování a po testování byla naměřena data, která byla patřičně vyhodnocena. Cílem měření a vyhodnocování těchto dat, bylo nalezení varianty s nejvyšším potenciálem vnitřního systému chlazení s dopadem na prodloužení trvanlivosti břitu. U této varianty bylo provedeno simulační šetření, které odhalilo informace o chování procesní kapaliny, skryté v místě řezu.

Na základě varianty s nejvyšším potenciálem vnitřního systému chlazení s dopadem na prodloužení trvanlivosti břitu a výpočetní simulace proudění pro odhalení informací o chování procesní kapaliny v místě řezu, byl proveden návrh nových variant nástrojů. Z těchto navržených variant byla nalezena potenciálně nejlepší varianta, která umožňuje dopravení nejvyššího objemového množství procesní kapaliny do místa řezu, které je umocněno vhodným polohováním výstupu chladicích kanálů.

V rámci budoucího výzkumu stávající DP práce je doporučeno provést výpočetní simulace proudění pro nově navržené varianty nástrojů, a výsledky simulací porovnat s již vytvořenou simulací v rámci této DP. V dalším kroku se nabízí navrhnout a provést experiment dlouhodobé zkoušky řezivosti, naměřit a vyhodnotit data v korelaci se simulacemi, a závěrečnou sumarizaci dosažených výsledků s cílem nalezení nejlepší varianty nástroje.

Seznam použitých zdrojů

- [1] TUŠL, Ladislav. *Zvýšení produktivity výroby otvorů nástroji s VBD vyrobených 3D tiskem*. Online. 2022. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/handle/11025/48871>. [cit. 2024-03-17].
- [2] ZHU, Zhaoju; SUN, Xinhui; GUO, Kai; SUN, Jie a LI, Jianfeng. *Recent Advances in Drilling Tool Temperature: A State-of-the-Art Review*. Online. 2022. Dostupné z: <https://cjme.springeropen.com/articles/10.1186/s10033-022-00818-w>. [cit. 2024-03-17].
- [3] MÜLLER, Daniel; KIRSCH, Benjamin a AURICH, Jan C. *Influence of flank face structuring on cooling, tool lifetime and borehole quality when drilling inconel 718: Physical simulations and experimental validation*. Online. 2021. Dostupné z: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85106867999&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&sid=6eb4d81f1e7eabc158792d00bba00541&sot=b&sdt=b&s=TITLE-ABS-KEY%28cooling+AND+channels+AND+tool+drilling%29&sl=39&sessionSearchId=6eb4d81f1e7eabc158792d00bba00541>. [cit. 2024-03-18].
- [4] OEZKAYA, Ekrem; MICHEL, Sebastian a BIERMANN, Dirk. *Chip formation simulation and analysis of the mechanical loads during micro single-lip deep hole drilling of Inconel 718 with varying cooling lubricant pressure*. Online. 2021. Dostupné z: https://link.springer.com/article/10.1007/s11740-021-01021-x?utm_source=getftr&utm_medium=getftr&utm_campaign=getftr_pilot. [cit. 2024-03-18].
- [5] BIERMANN, Dirk; TUREK, Stefan; WOLF, Tobias a FAST, Michael. *Simulation und Optimierung der KSS-Strömung zur Reduzierung der thermischen Werkzeugbelastung bei der diskontinuierlichen Bohrbearbeitung von Inconel 718*. Online. 2020. Dostupné z: https://flusimpro.isf.maschinenbau.tu-dortmund.de/tp04_isf_ls3/. [cit. 2024-03-18].
- [6] JOHNS, Adam; MERSON, Eleanor; ROYER, Raphael; THOMPSON, Harvey a SUMMERS, Jonathan. *A Numerical Investigation of Through-Tool Coolant Wetting Behaviour in Twist-Drilling*. Online. 2018. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/325617419_A_Numerical_Investigation_of_Through-Tool_Coolant_Wetting_Behaviour_in_Twist-Drilling. [cit. 2024-03-18].
- [7] *Video: Jaké jsou výhody vnitřního chlazení?* Online. 2019. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/video-jake-jsou-vyhody-vnitriho-chlazení/>. [cit. 2024-03-18].
- [8] OEZKAYA, Ekrem; BAUMANN, Andreas; EBERHARD, Peter a BIERMANN, Dirk. *Analysis of the cutting fluid behavior with a modified micro single-lip deep hole drilling tool*. Online. 2022. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755581722000694?via%3Dihub>. [cit. 2024-03-21].
- [9] BAUMANN, Andreas; OEZKAYA, Ekrem; BIERMANN, Dirk a EBERHARD, Peter. *Geometry modifications of single-lip drills to improve cutting fluid flow*. Online. 2022. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-022-09400-z>. [cit. 2024-03-21].

- [10] FRITSCHING, Udo; BUSS, Lizoel; TONN, Teresa; SCHUMSKI, Lukas a GAKOVI, Jurgen a další. *Flow Visualisation and Evaluation Studies on Metalworking Fluid Applications in Manufacturing Processes—Methods and Results*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2227-9717/11/9/2690>. [cit. 2024-03-21].
- [11] OEZKAYA, Ekrem; BAUMANN, Andreas; MICHEL, Sebastian; SCHNABEL, Dirk a EBERHARD, Peter a další. *Cutting fluid behavior under consideration of chip formation during micro single-lip deep hole drilling of Inconel 718*. Online. 2022. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/02286203.2022.2042057?src=getftr>. [cit. 2024-04-04].
- [12] OEZKAYA, Ekrem; MICHEL, Sebastian a BIERMANN, Dirk. *Experimental and computational analysis of the coolant distribution considering the viscosity of the cutting fluid during machining with helical deep hole drills*. Online. 2022. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40436-021-00383-w>. [cit. 2024-04-05].
- [13] BAUMANN, Andreas; OEZKAYA, Ekrem; SCHNABEL, Dirk; BIERMANN, Dirk a EBERHARD, Peter. *Cutting-fluid flow with chip evacuation during deep-hole drilling with twist drills*. Online. 2021. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0997754621001023#fig6>. [cit. 2024-04-05].
- [14] BIERMANN, D.; BLEICHER, F.; HEISEL, U.; KLOCKE, F. a MÖHRING, H. - C. a další. *Deep hole drilling*. Online. 2018. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850618301550#fig0220>. [cit. 2024-04-05].
- [15] OEZKAYA, E.; IOVKOV, I. a BIERMANN, D. *Fluid structure interaction (FSI) modelling of deep hole twist drilling with internal cutting fluid supply*. Online. 2019. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850619300046?pes=vor#fig0015>. [cit. 2024-04-05].
- [16] EMS Metrology. *ALICONA - INFINITE FOCUS G5*. Online. Dostupné z: <https://www.ems-benelux.com/produits/infinite-focus-g5>. [cit. 2024-05-14].
- [17] KATEDRA TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ. *Siloměrné vybavení katedry*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.kto.zcu.cz/cs/Department/Utilities/>. [cit. 2024-05-17].
- [18] REGIONÁLNÍ TECHNOLOGICKÝ INSTITUT. *LABORATOŘ TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.rti.zcu.cz/cs/Laboratory/Machining-technology.html>. [cit. 2024-05-17].
- [19] INGERSOLL CUTTING TOOLS. *Operating Guidelines*. Online. 2024. Dostupné z: https://www.ingersoll-imc.com/product-family/36920#!OperatingGuidelines_HtmlContent. [cit. 2024-05-18].
- [20] KEYENCE. *DIGITAL MICROSCOPE*. Online. 2024. Dostupné z: https://www.keyence.com/landing/microscope/digital_microscope_vhx6000.jsp. [cit. 2024-05-18].
- [21] *Demo of the World's longest short hole drill – CoroDrill® DS20 4-7xD* [video] Sandvik Coromant, 2019

[22] REGIONÁLNÍ TECHNOLOGICKÝ INSTITUT. LABORATOŘ DÍLENSKÉ METROLOGIE. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.rti.zcu.cz/cs/Laboratory/Metrology.html>. [cit. 2024-05-20].

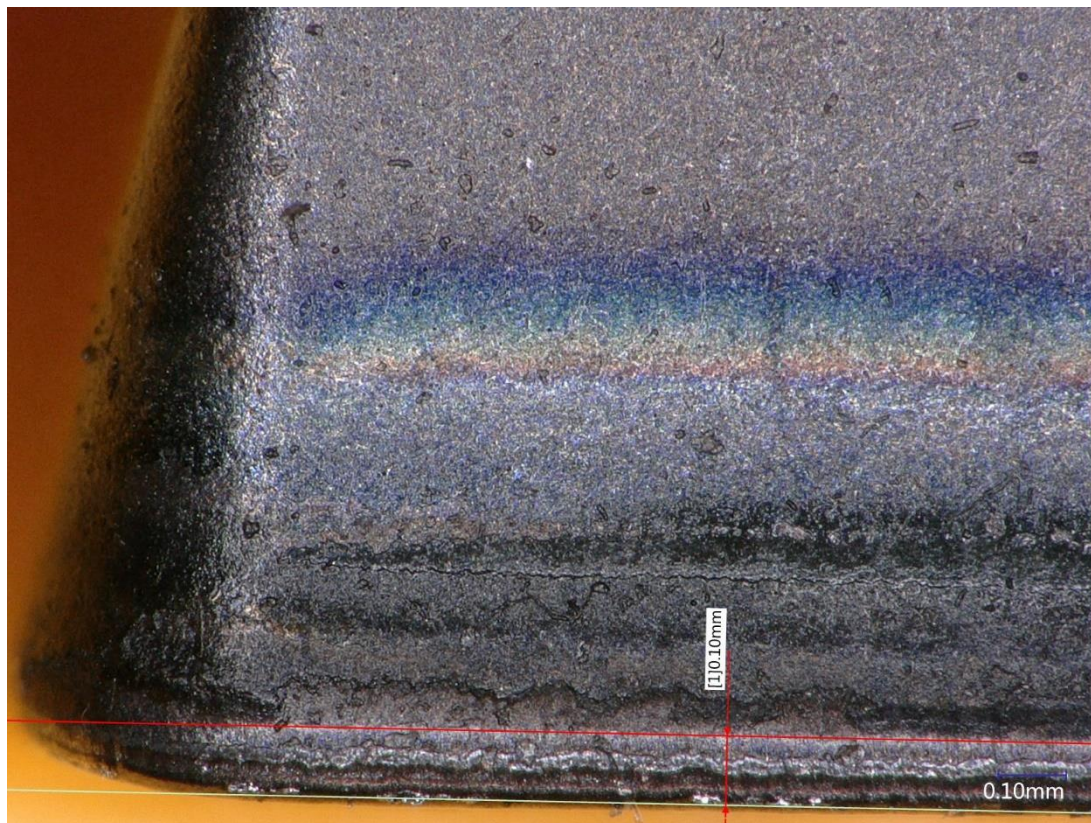
[23] MSI VIKING. ZEISS PRISMO navigator Bridge-Type CMM Machines. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.msi-viking.com/ZEISS-PRISMO-navigator-Bridge-Type-CMM-Machines>. [cit. 2024-05-20].

[24] BÜCKER, Milan; OEZKAYA, Ekrem; HENSLER, Ulf a BIERMANN, Dirk. A New Flank Face Design Leading to an Improved Process Performance when Drilling High-Temperature Nickel-Base Alloys. Online. 2020. Dostupné z: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3722782. [cit. 2024-05-21].

PŘÍLOHA č. 1

Opotřebení VBD

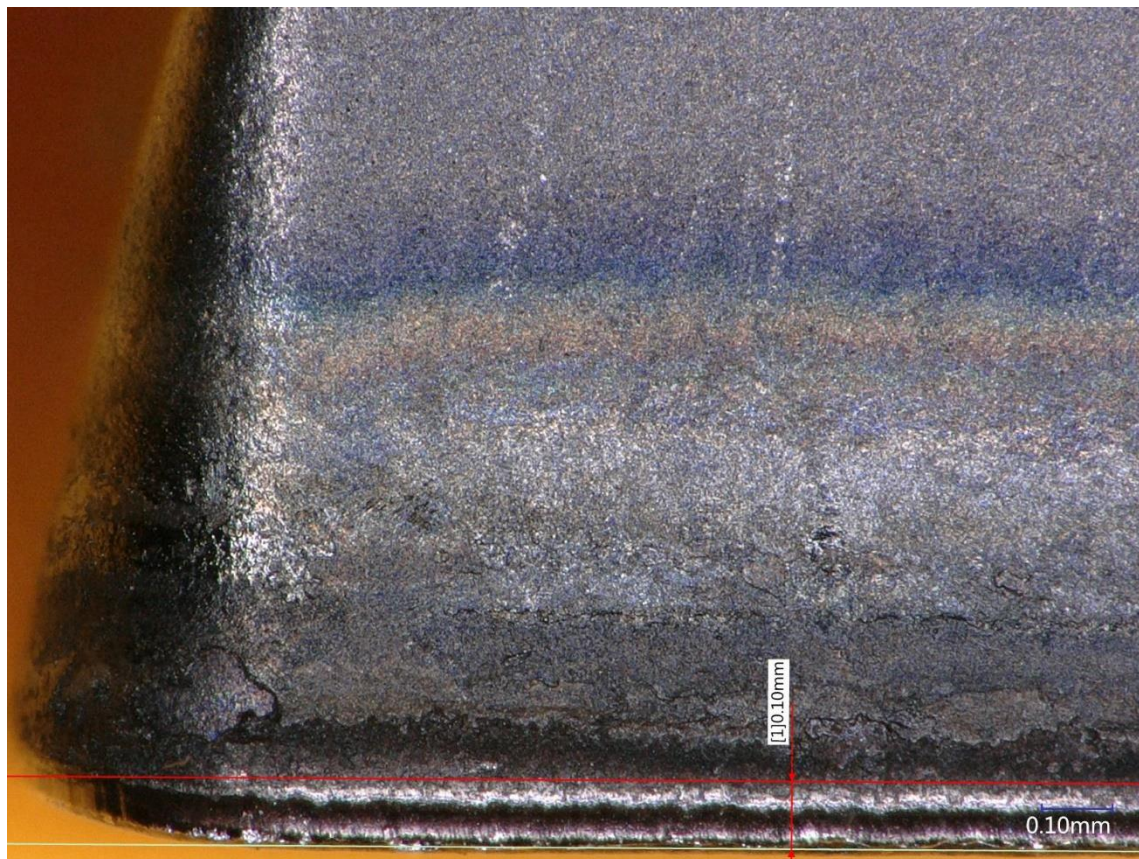
Hřbet vnější VBD Ref. nástroje po 160 otvorech



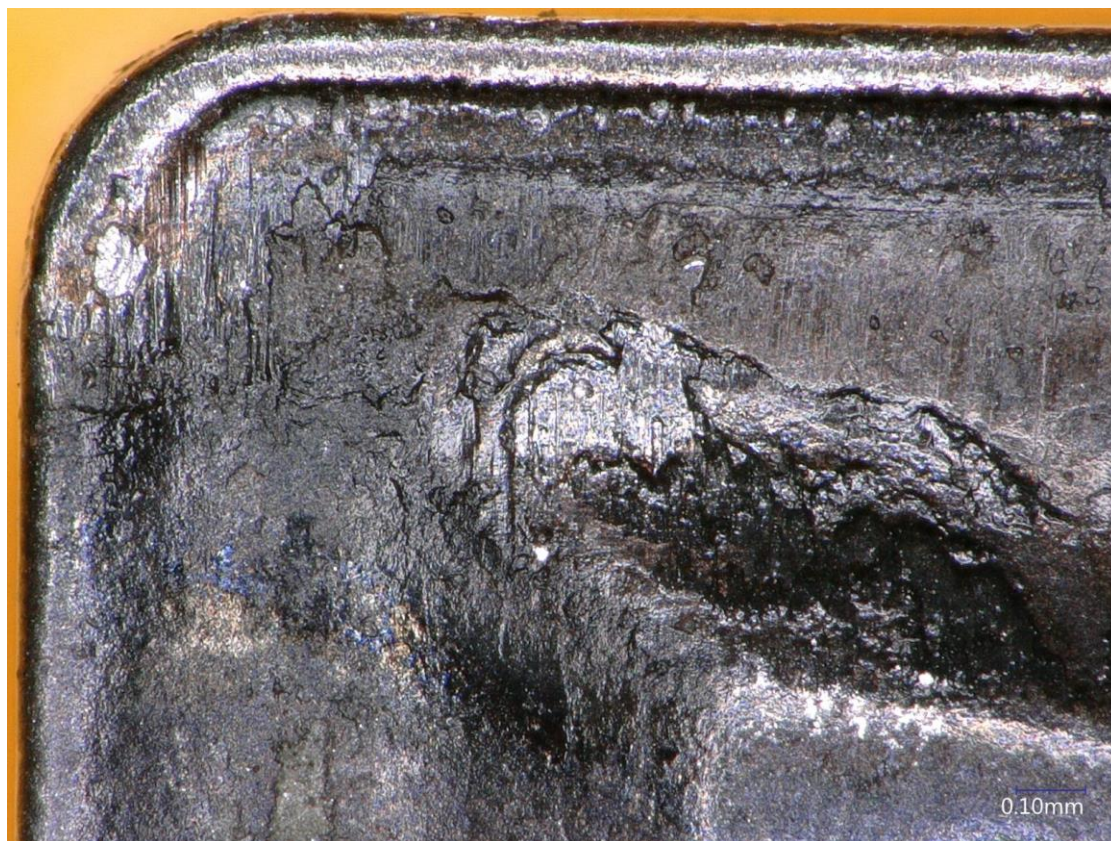
Čelo vnější VBD Ref. nástroje po 160 otvorech



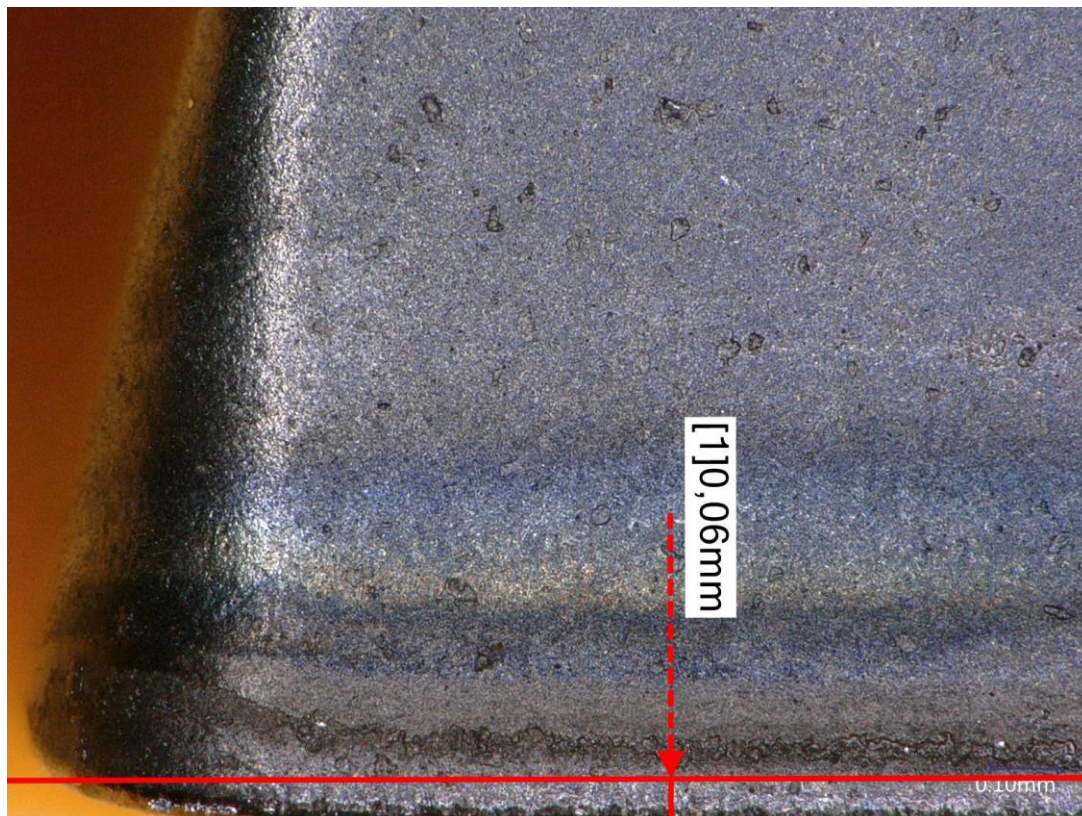
Hřbet vnější VBD Ref. nástroje po 300 otvorech



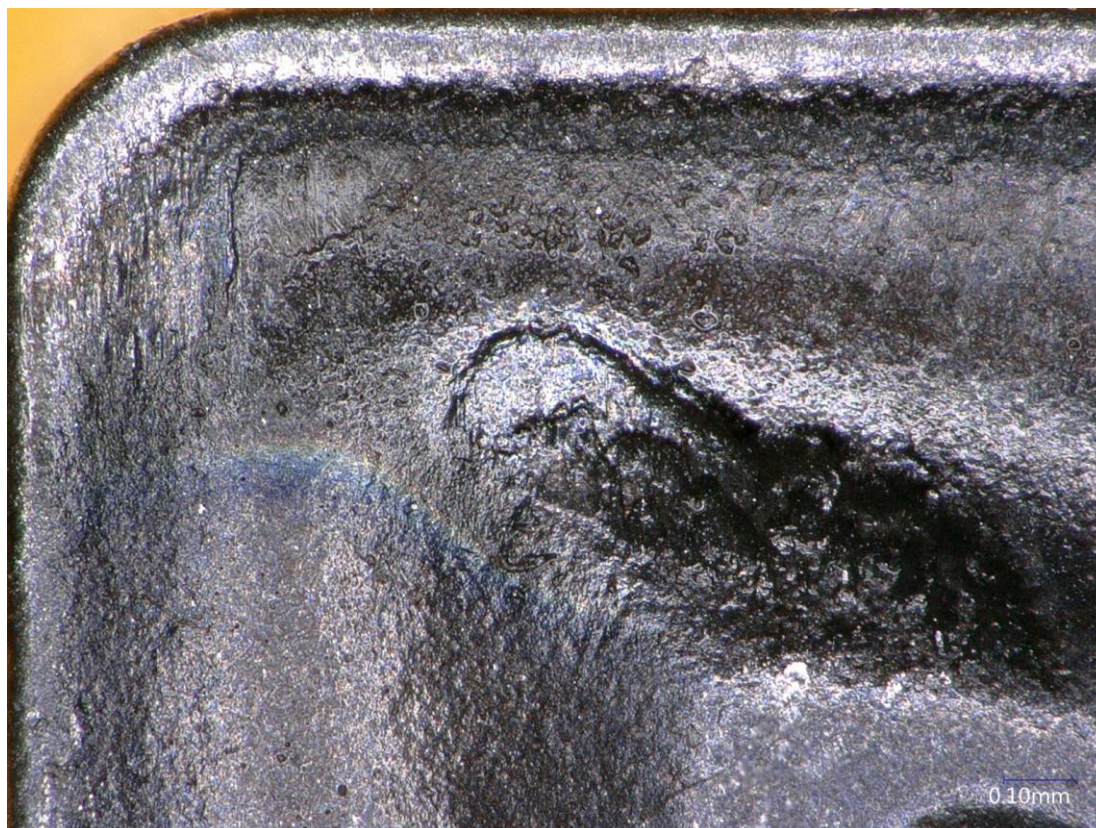
Čelo vnější VBD Ref. nástroje po 300 otvorech



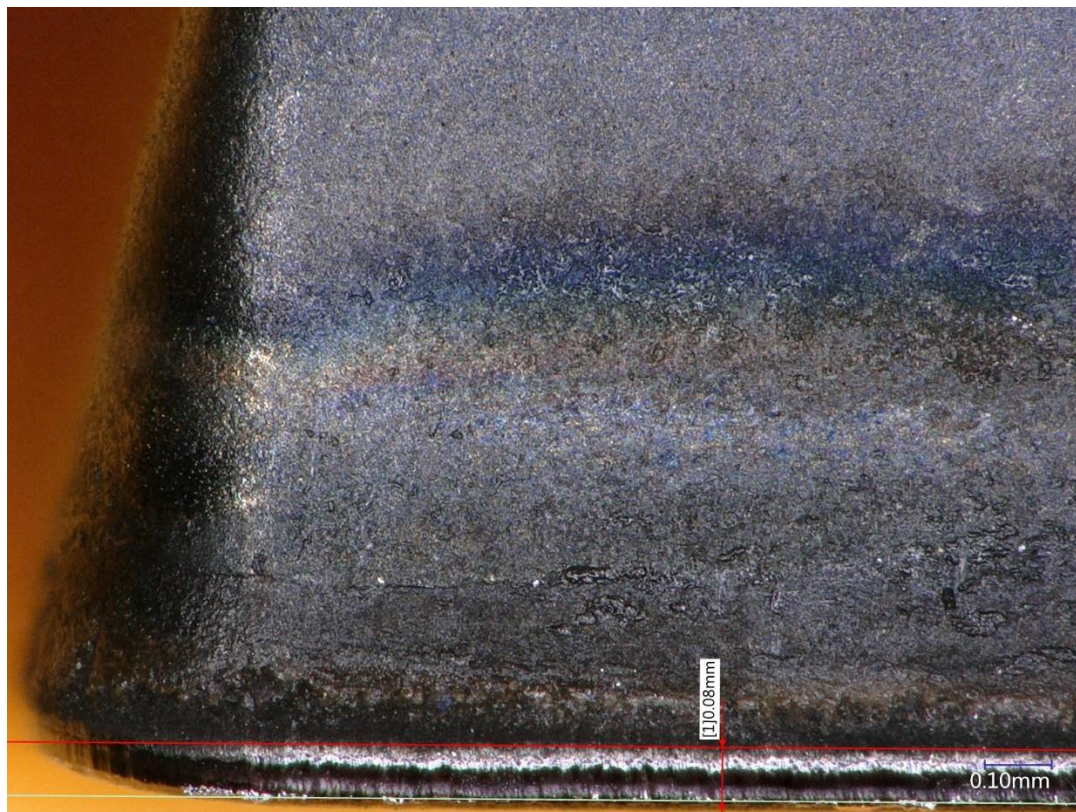
Hřbet vnější VBD nástroje 1:1 po 10 otvorech



Čelo vnější VBD nástroje 1:1 po 10 otvorech



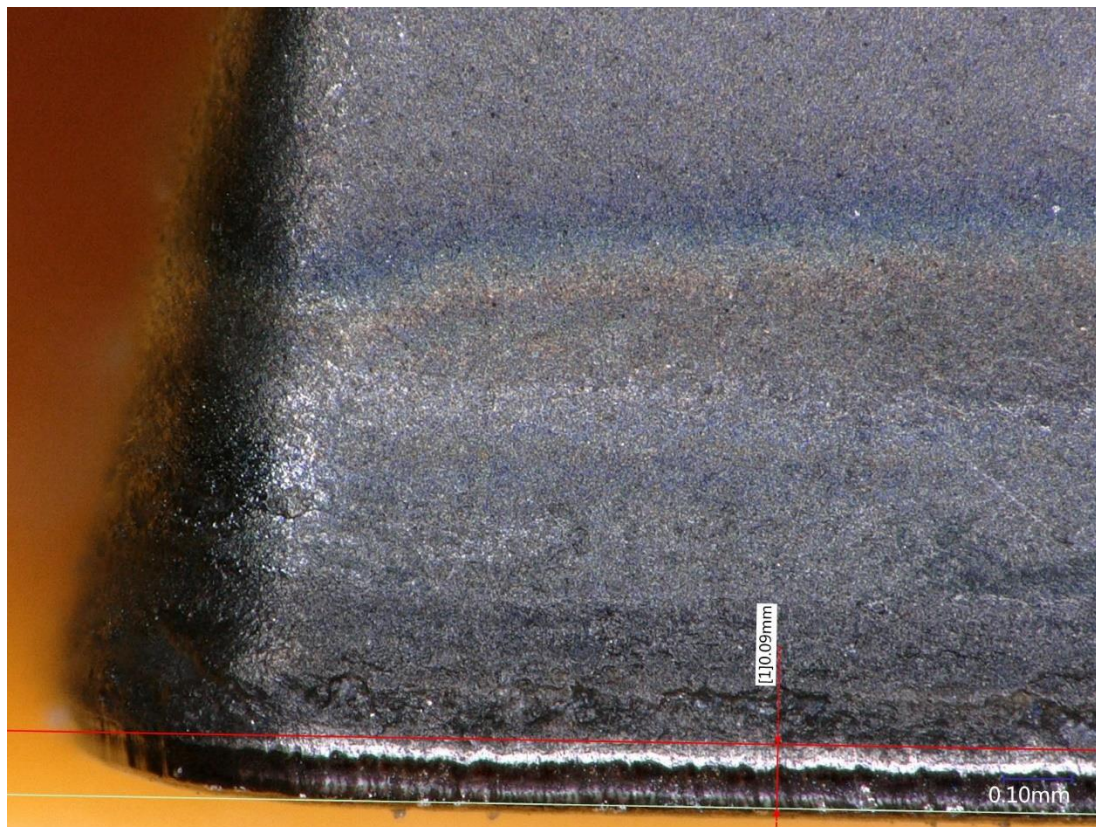
Hřbet vnější VBD nástroje 1:1 po 160 otvorech



Čelo vnější VBD nástroje 1:1 po 160 otvorech



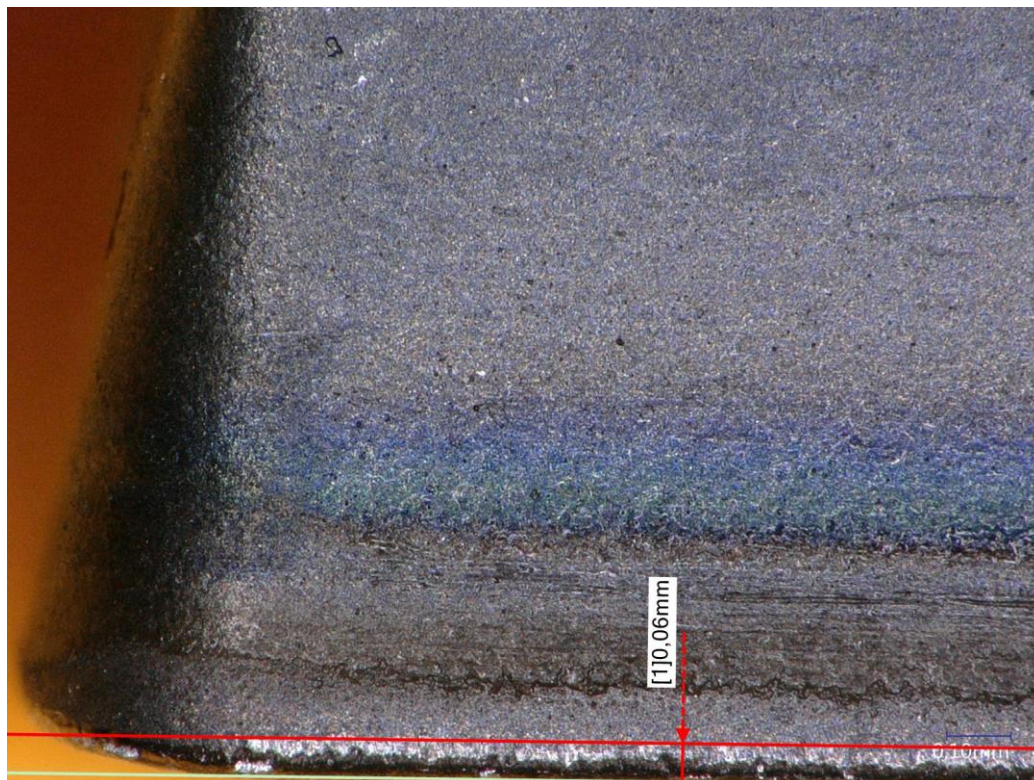
Hřbet vnější VBD nástroje 1:1 po 300 otvorech



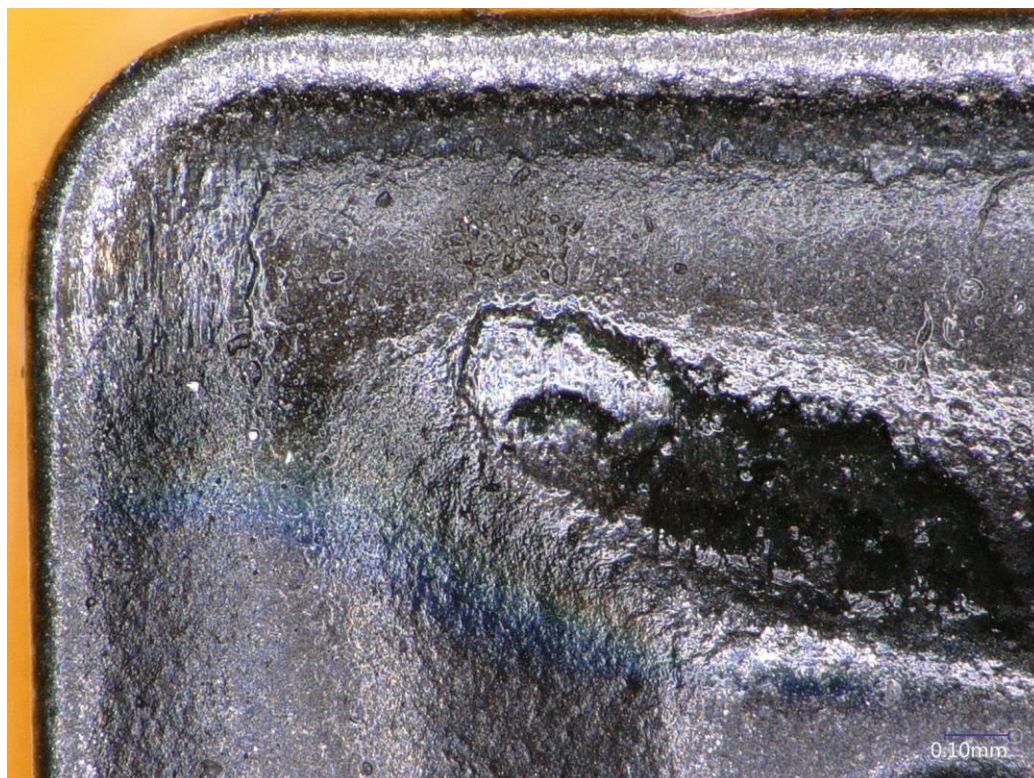
Čelo vnější VBD nástroje 1:1 po 300 otvorech



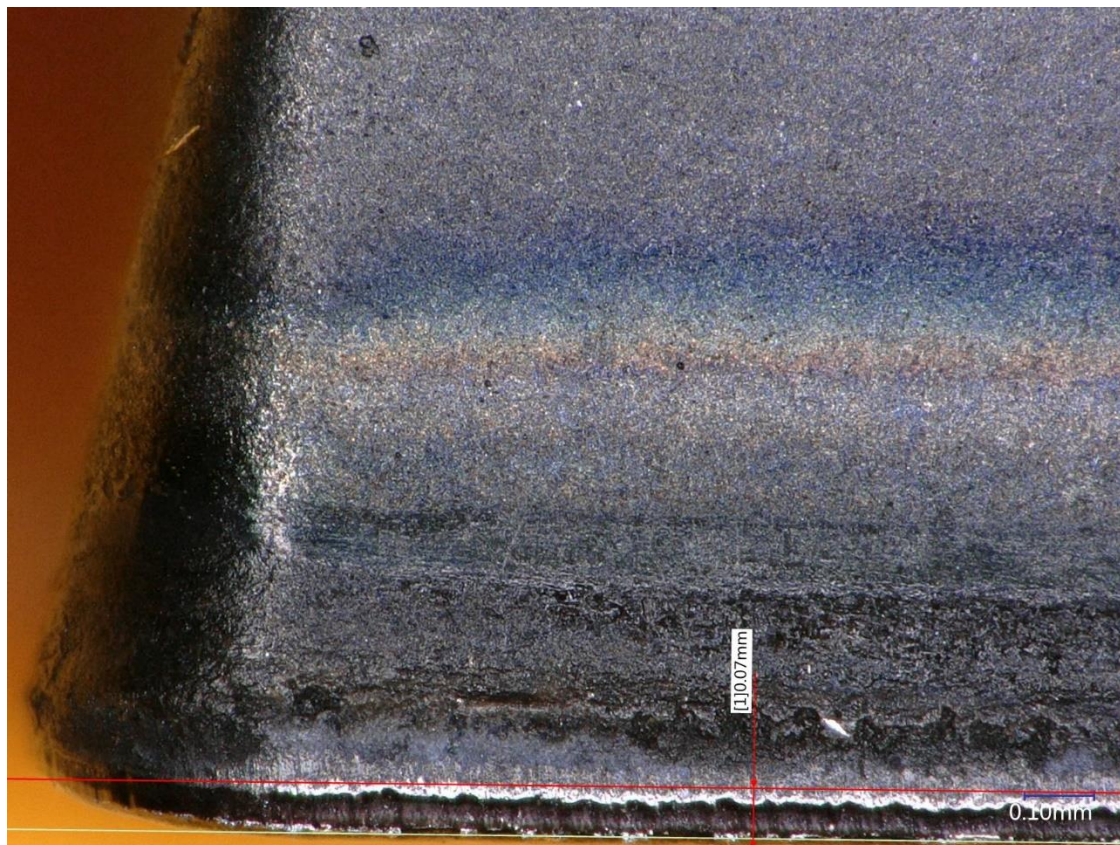
Hřbet vnější VBD nástroje Ledvinka po 10 otvorech



Čelo vnější VBD nástroje Ledvinka po 10 otvorech



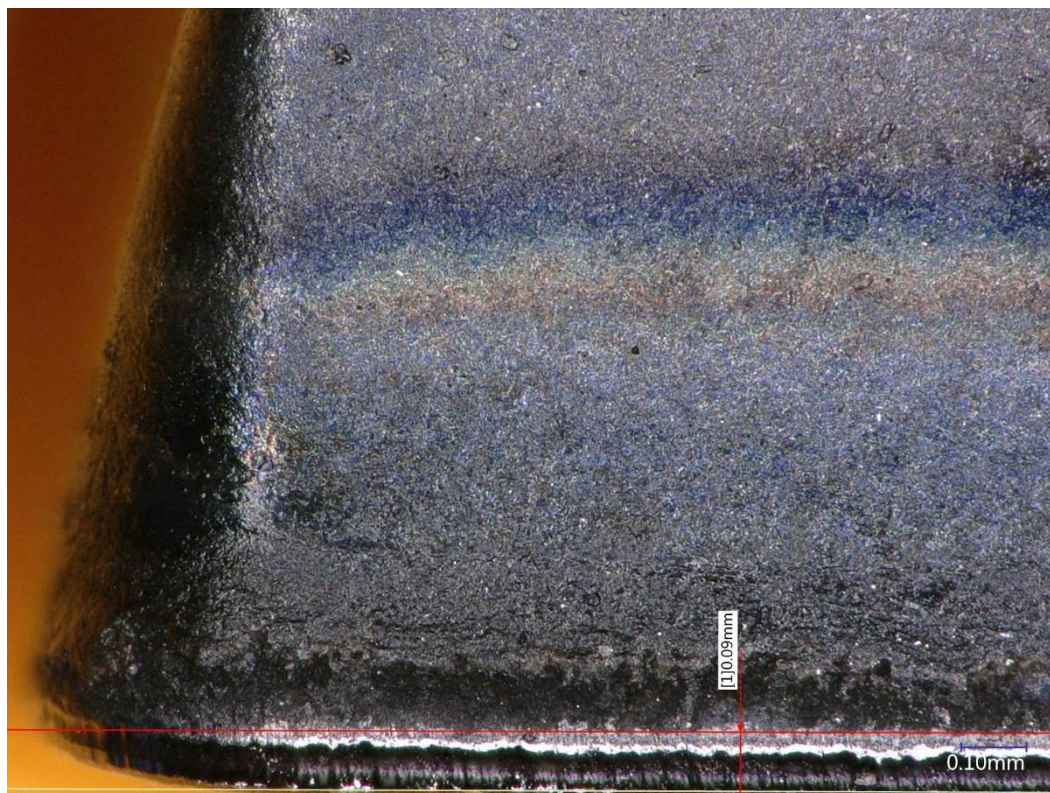
Hřbet vnější VBD nástroje Ledvinka po 160 otvorech



Čelo vnější VBD nástroje Ledvinka po 160 otvorech



Hřbet vnější VBD nástroje Ledvinka po 300 otvorech

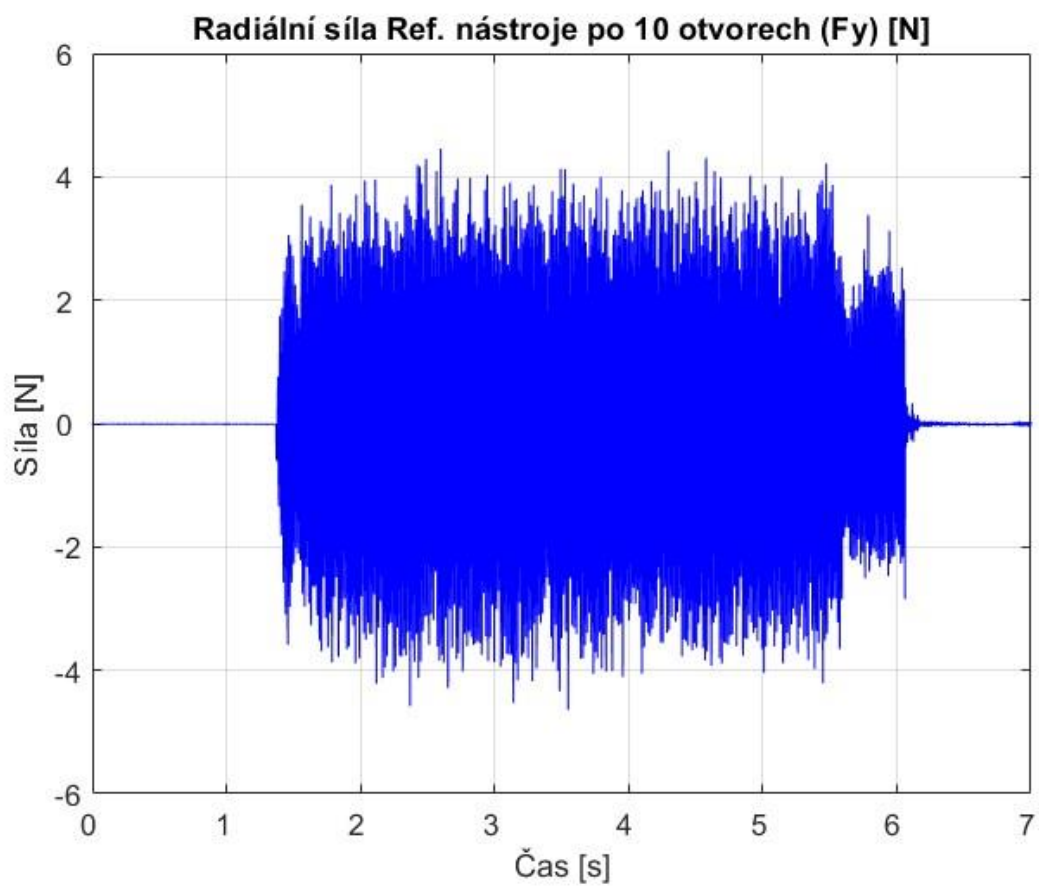
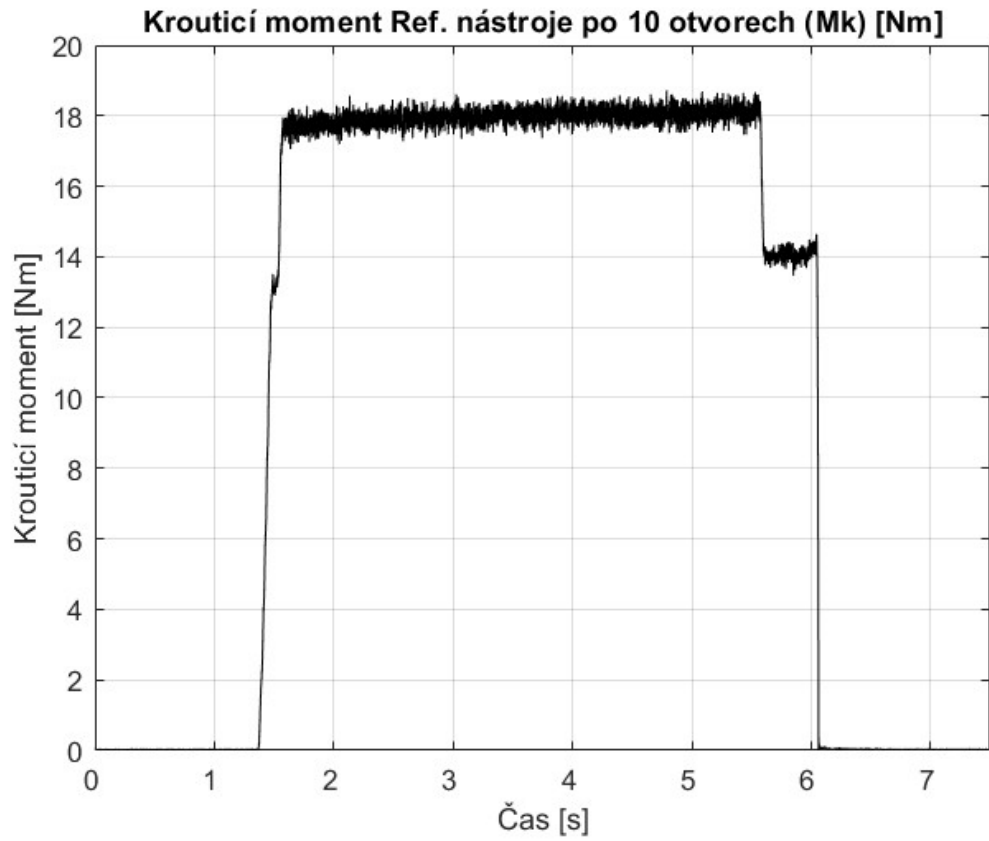


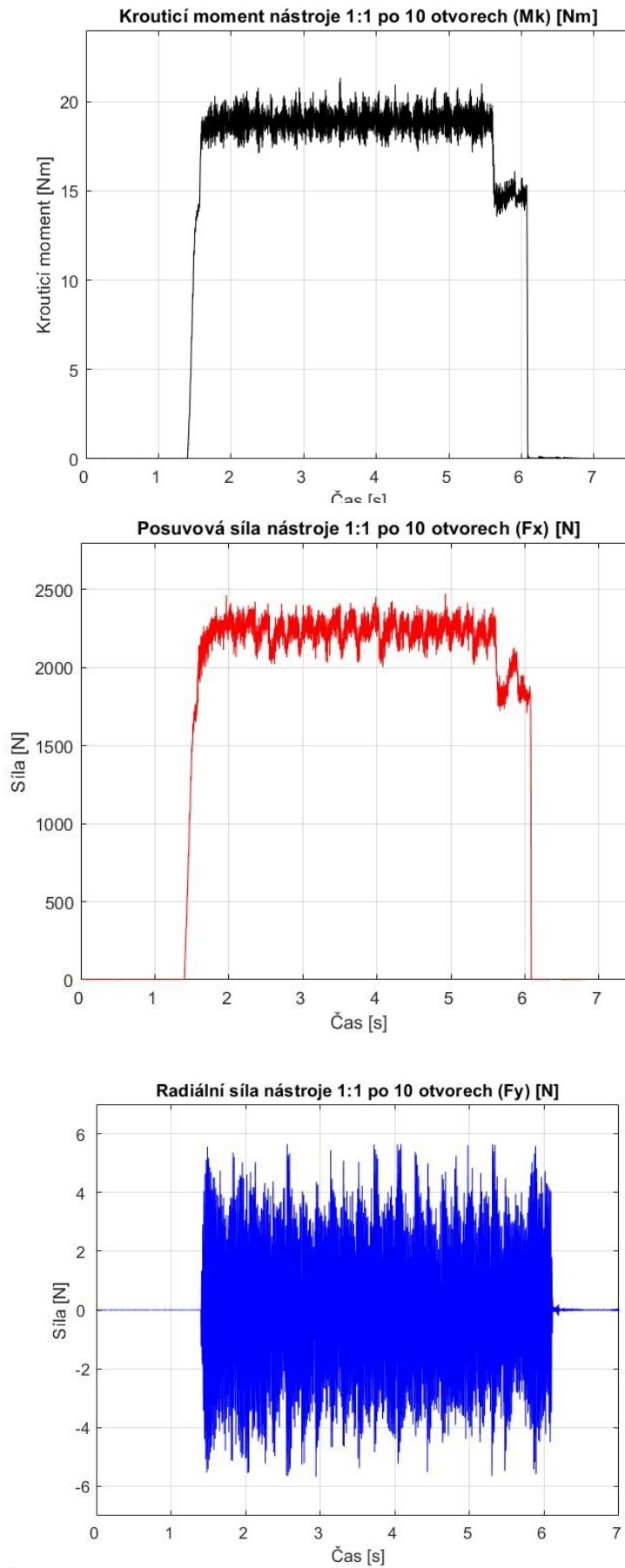
Čelo vnější VBD nástroje Ledvinka po 300 otvorech

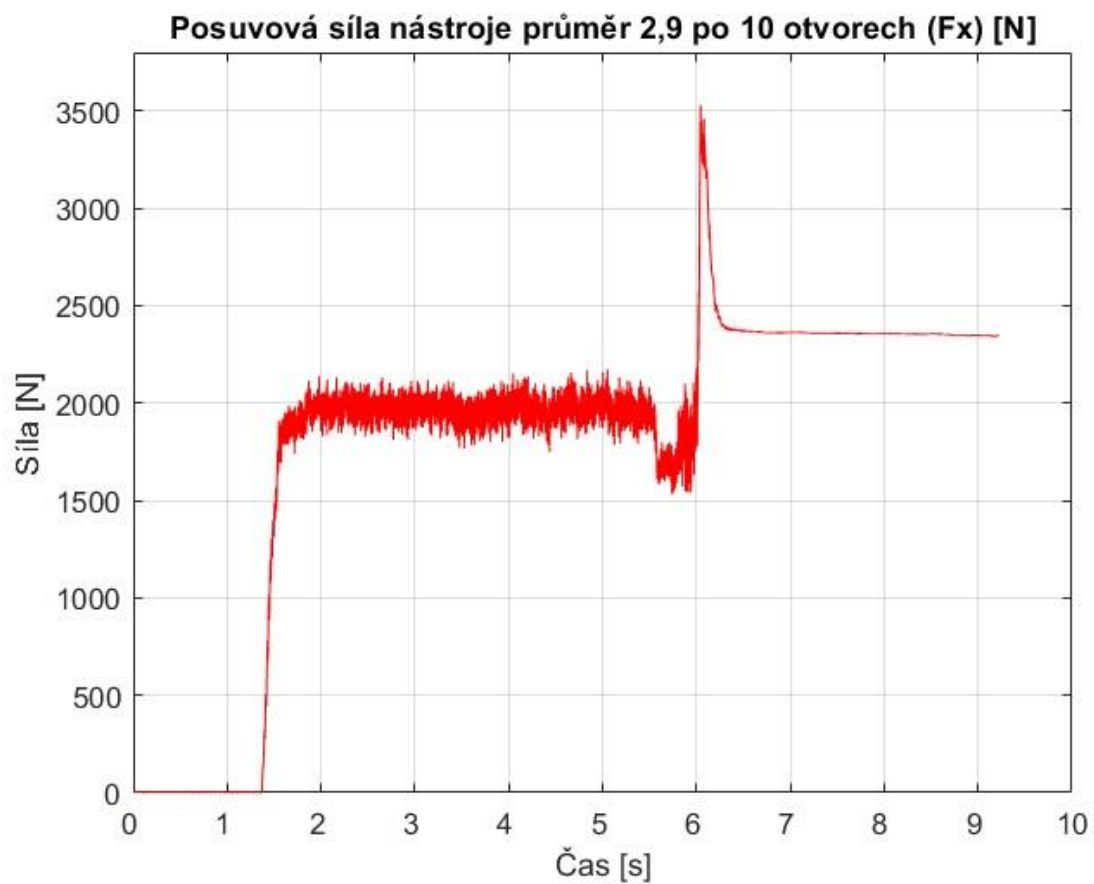
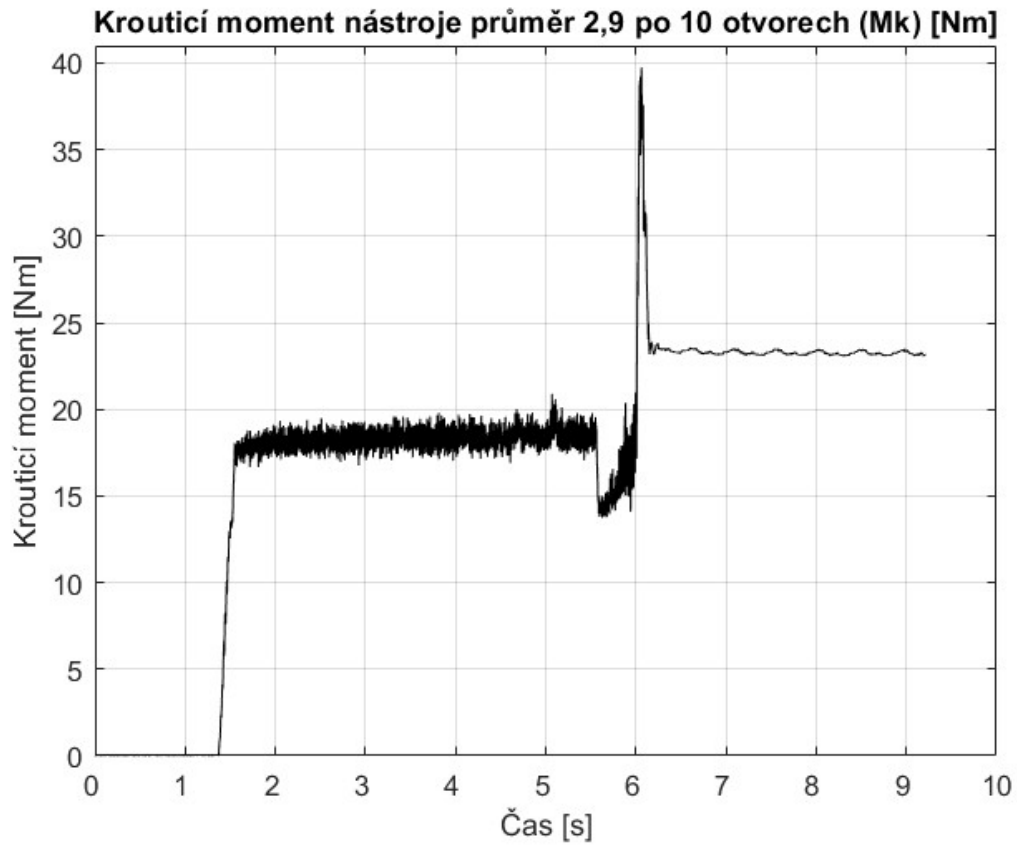


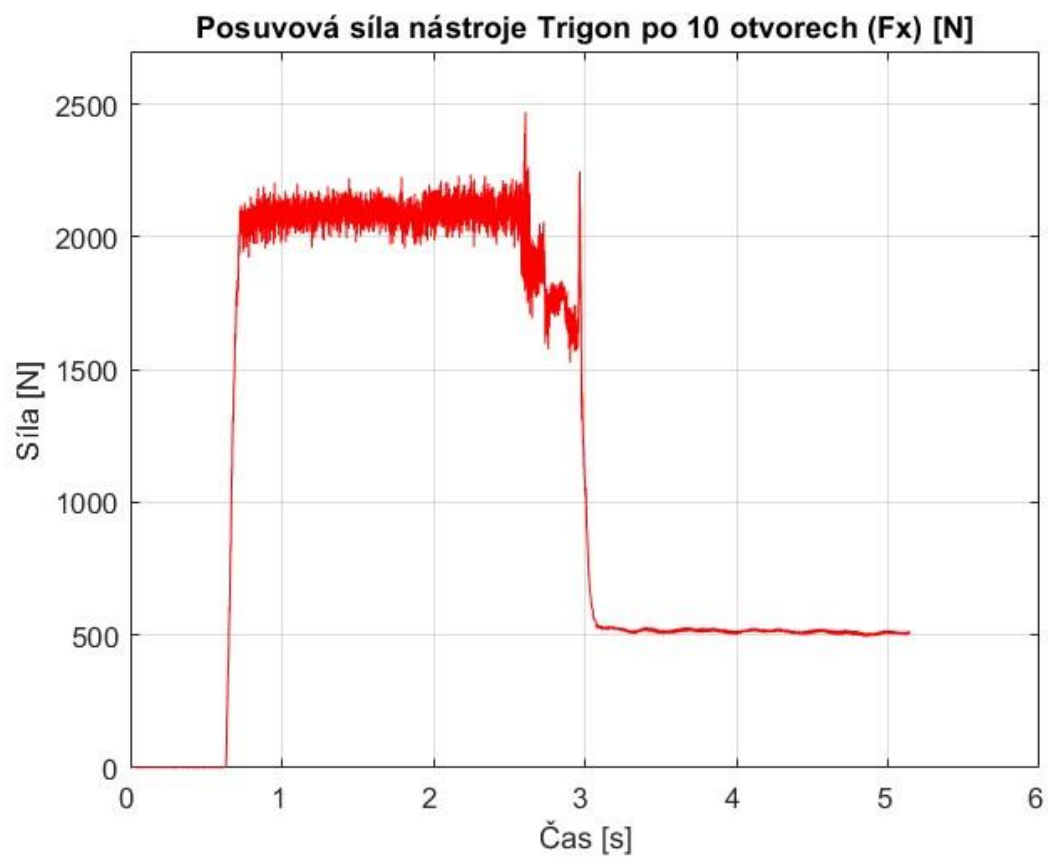
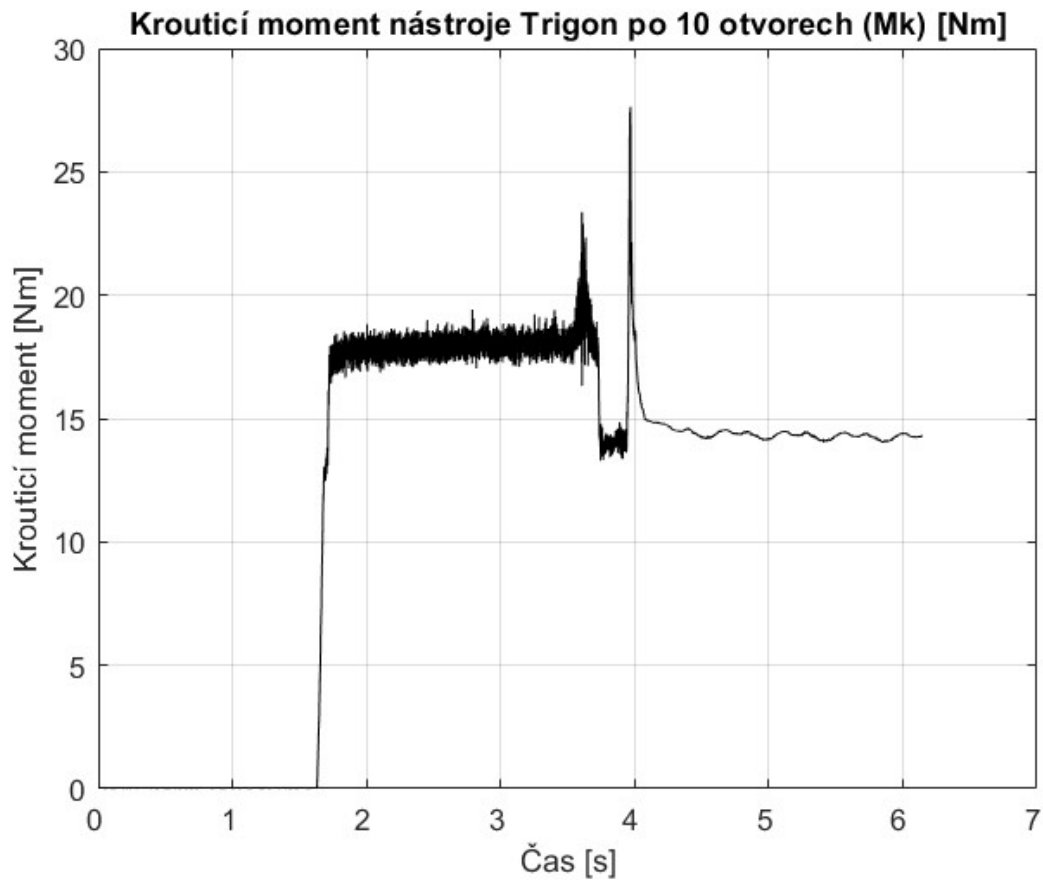
PŘÍLOHA č. 2

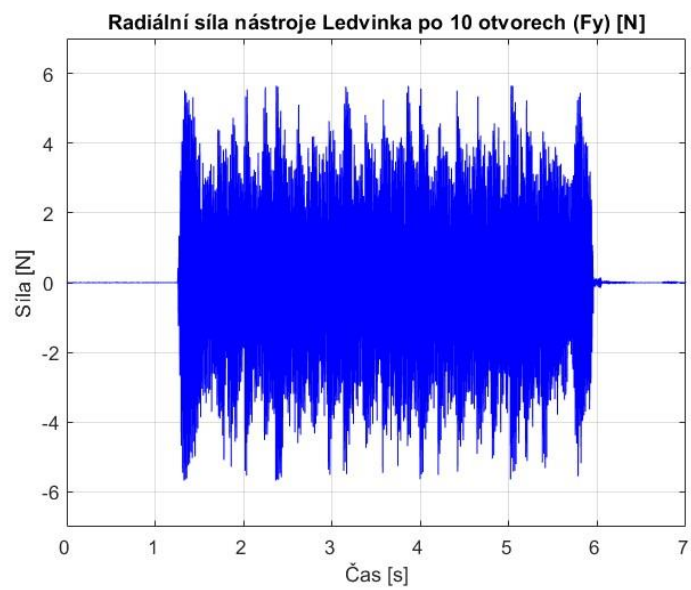
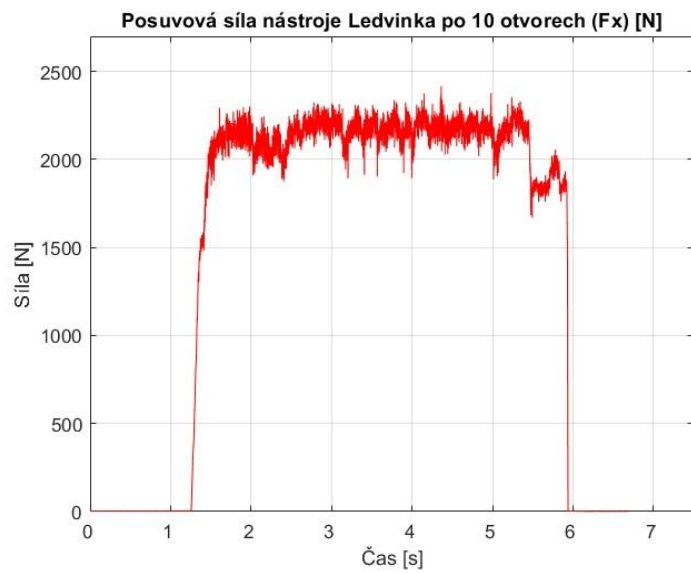
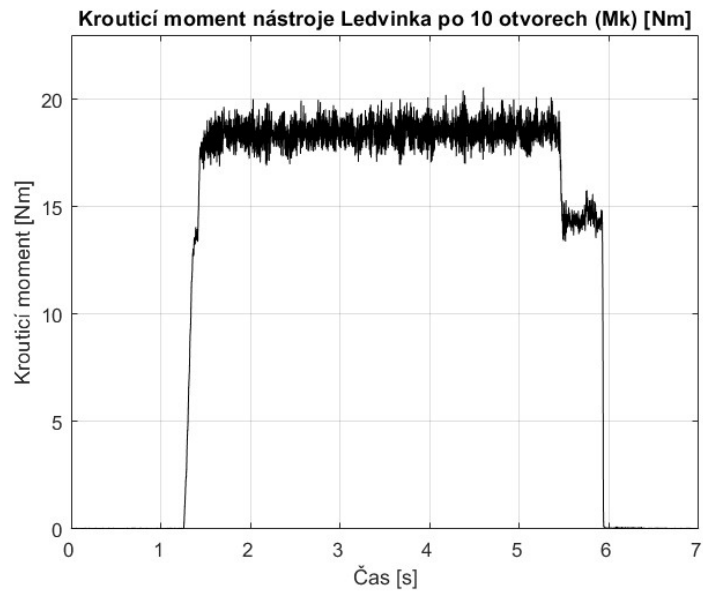
Řezné síly

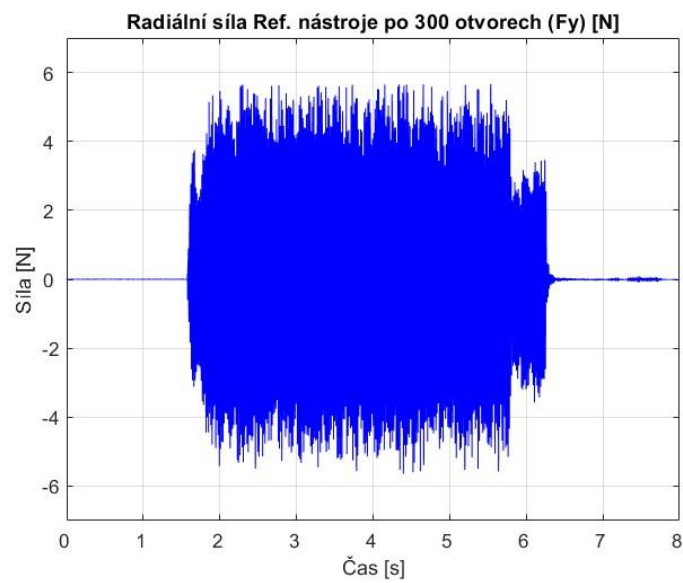
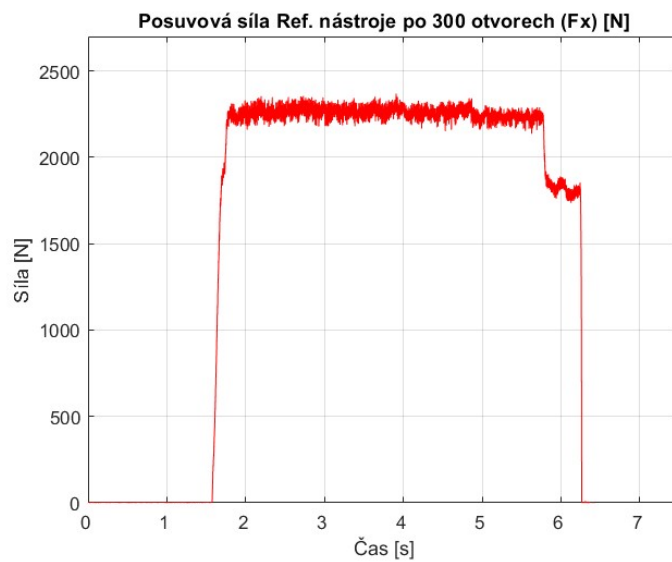
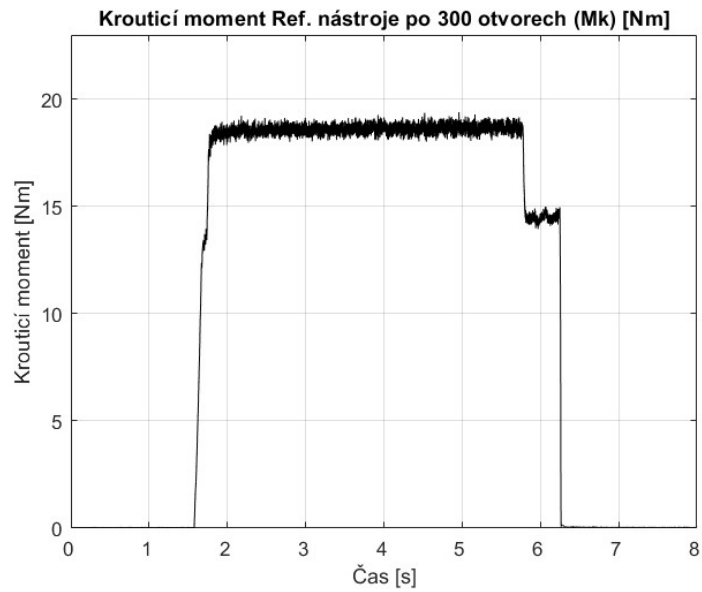


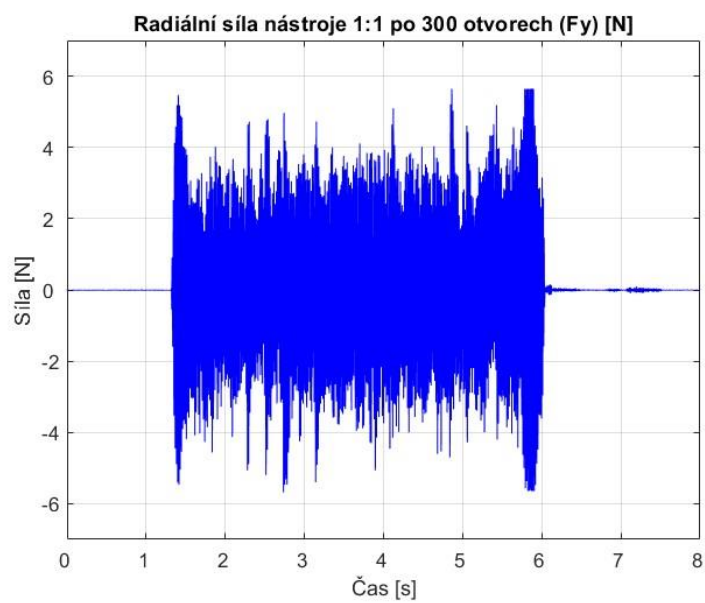
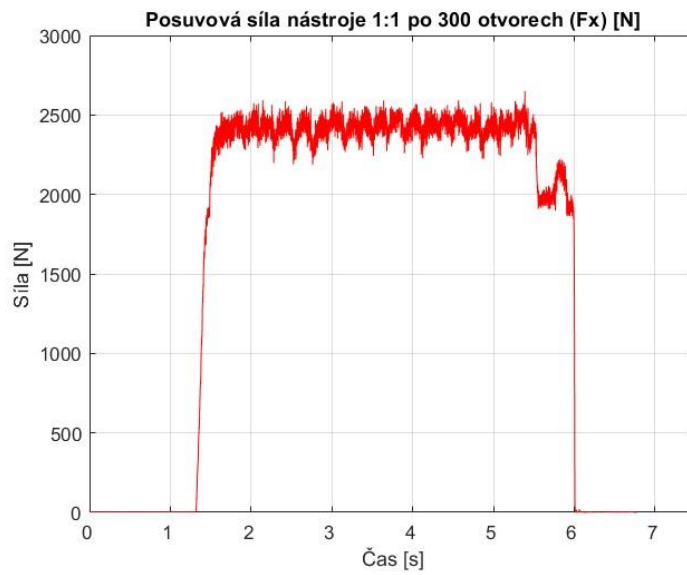
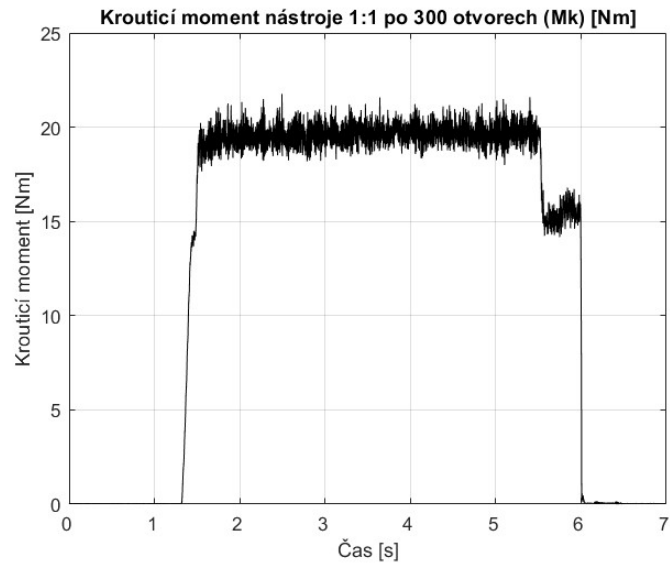


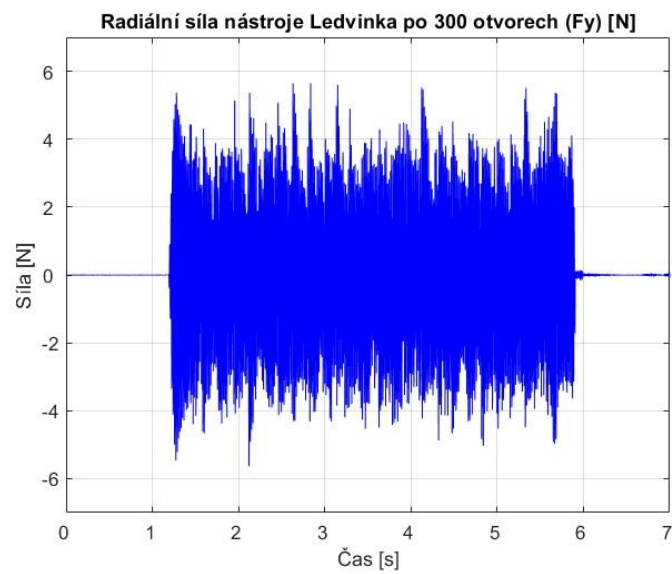
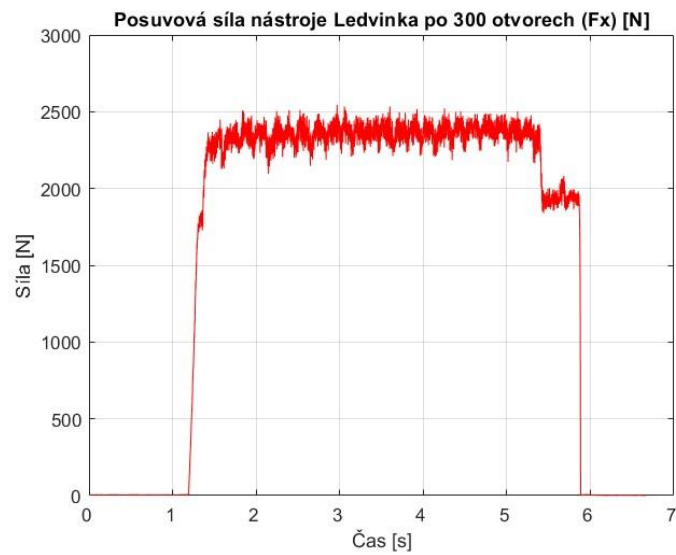
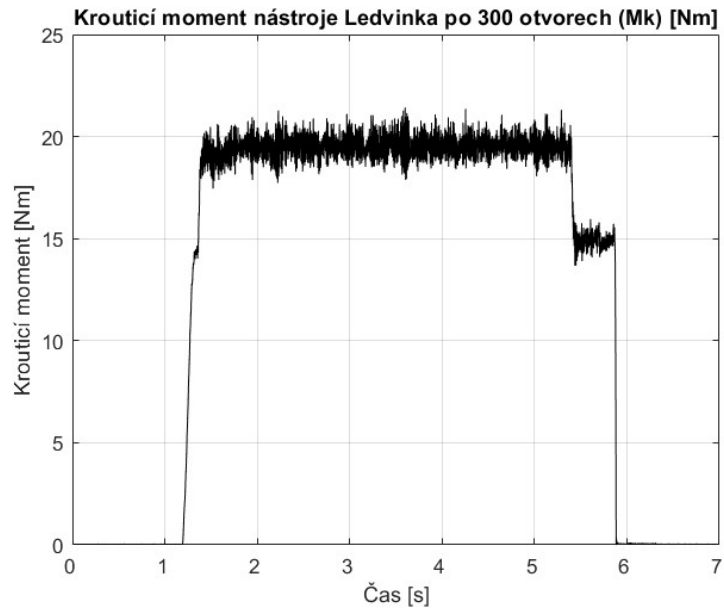






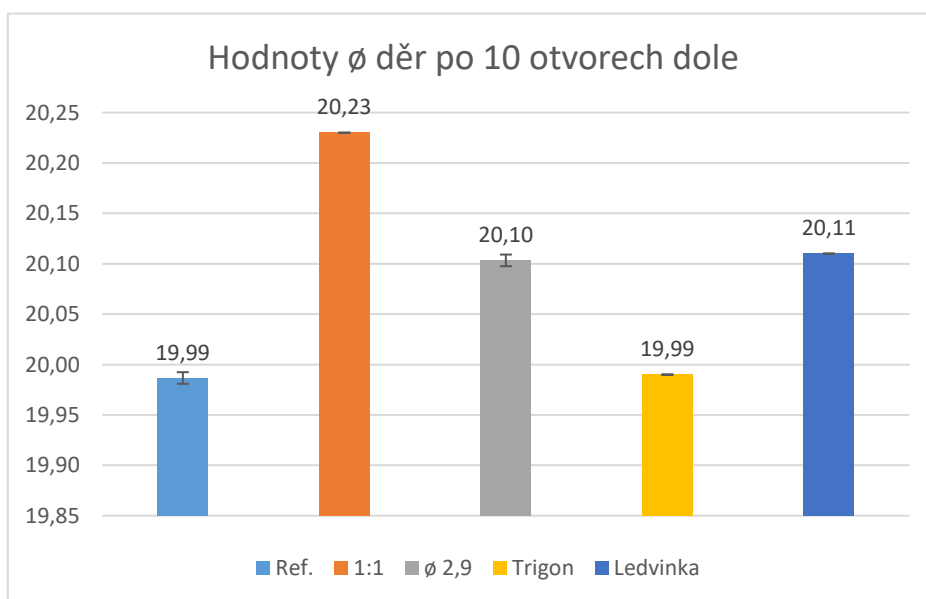
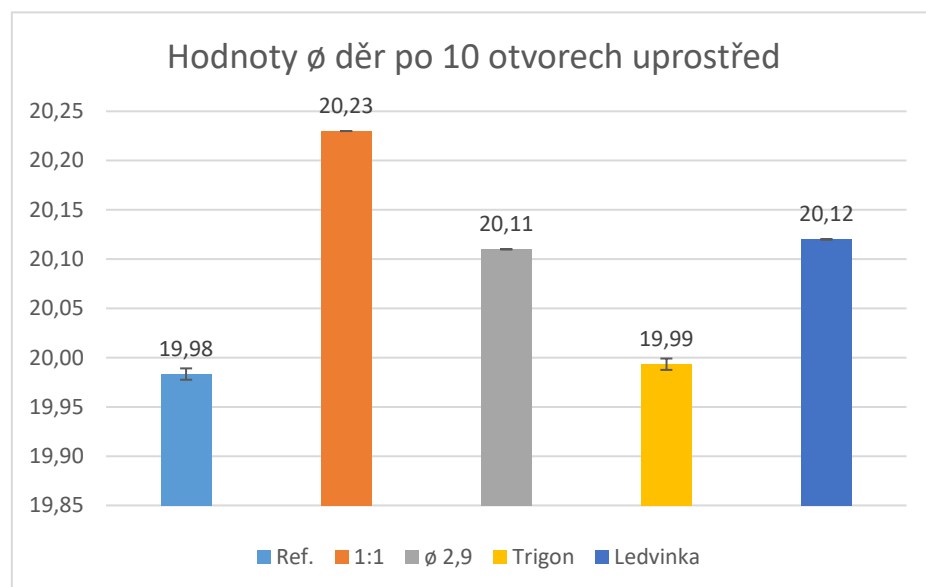
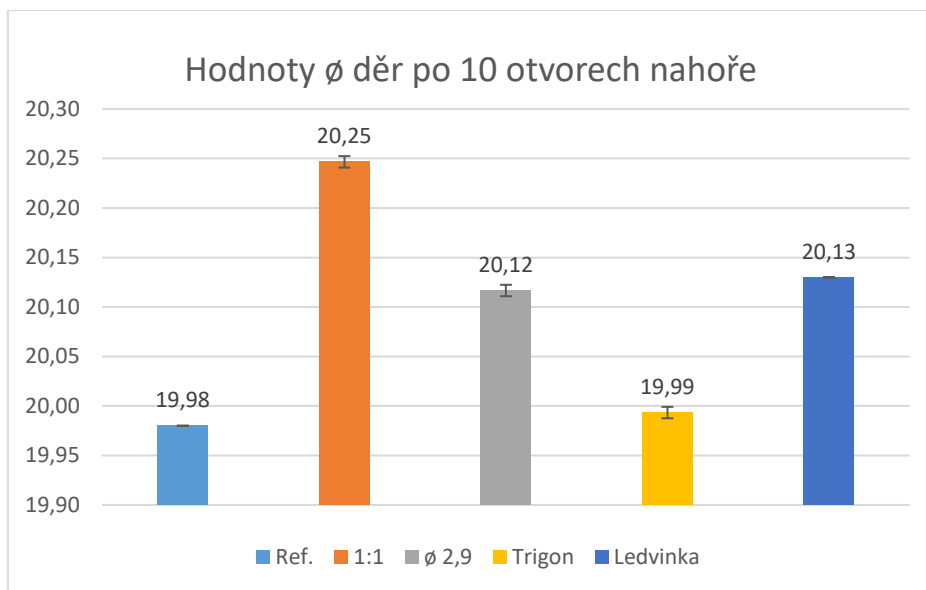


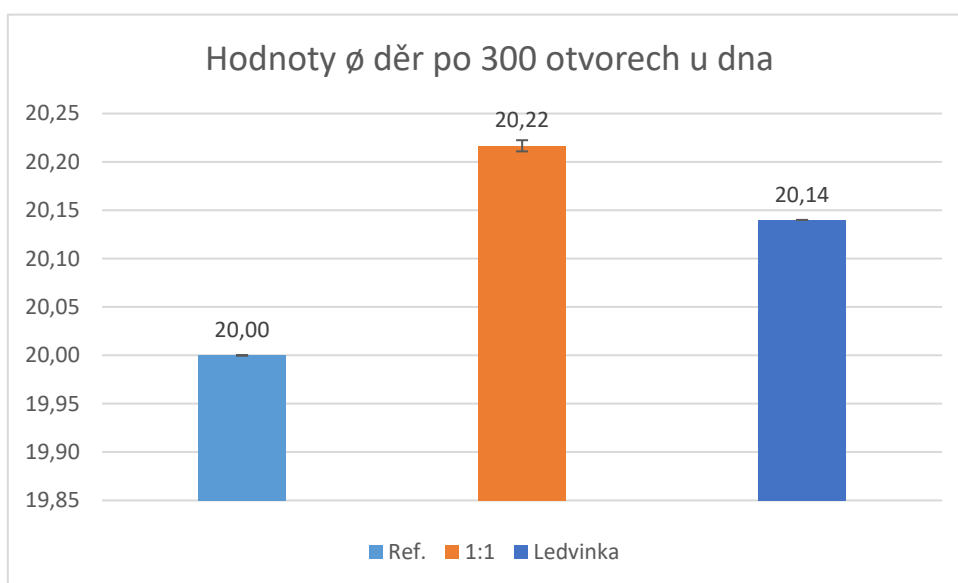
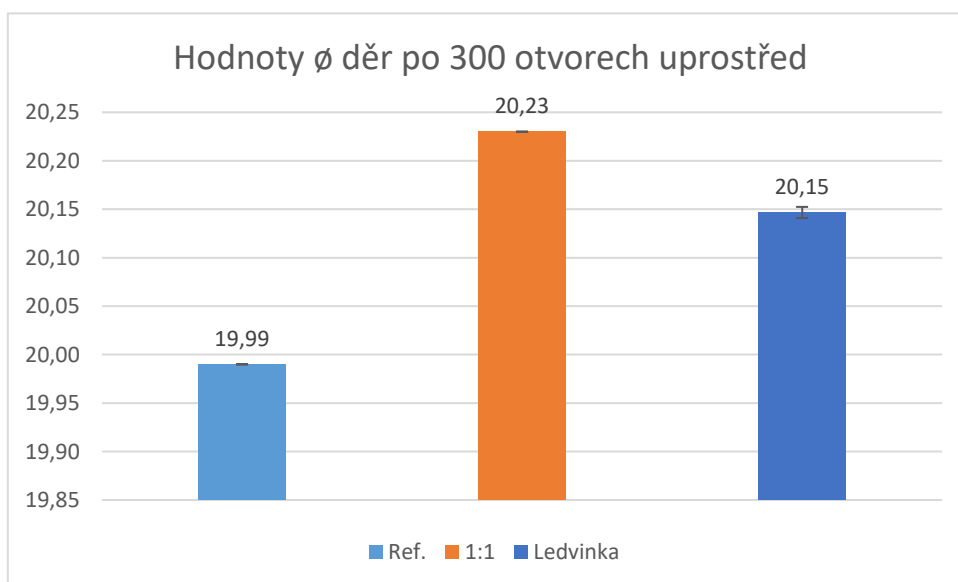
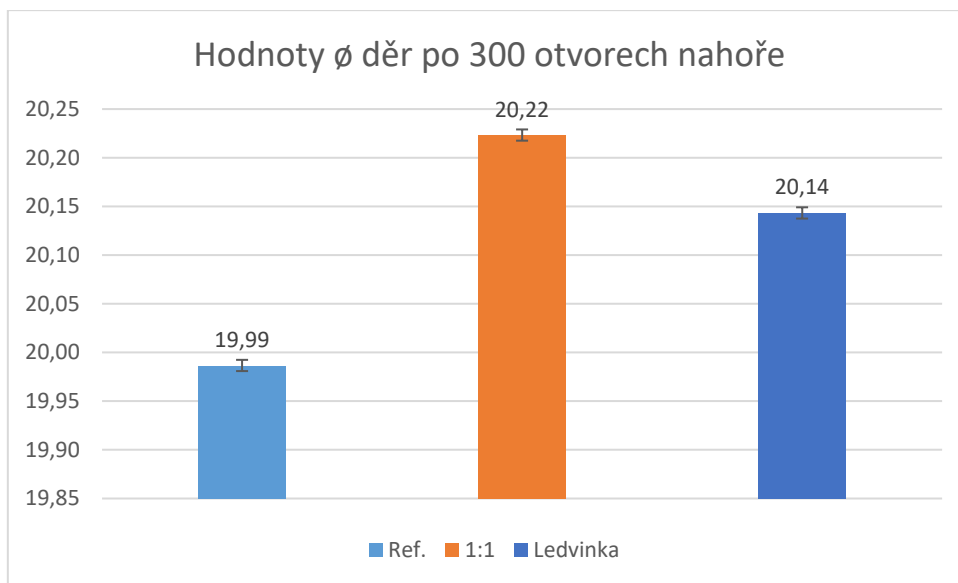




PŘÍLOHA č. 3

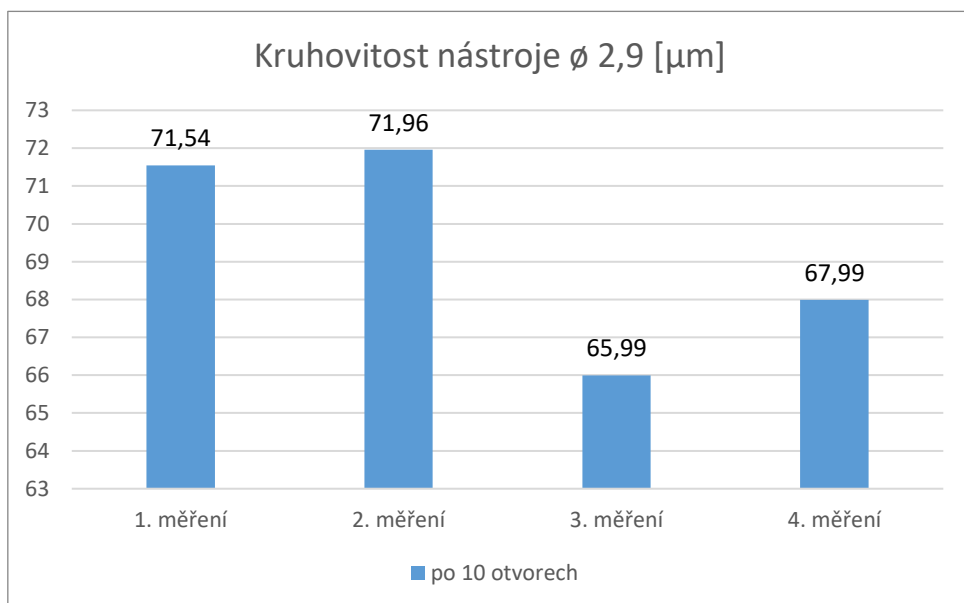
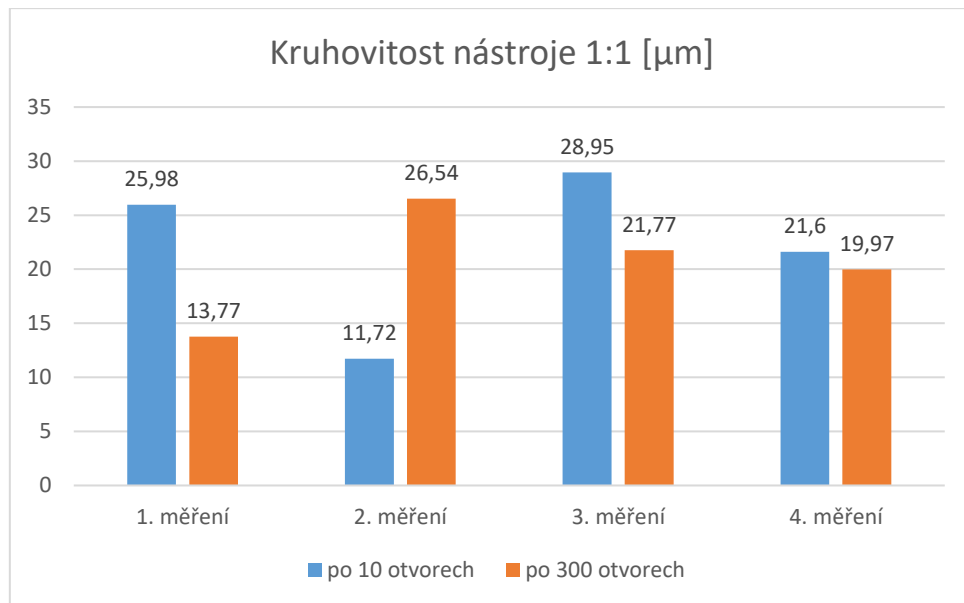
Průměry otvorů

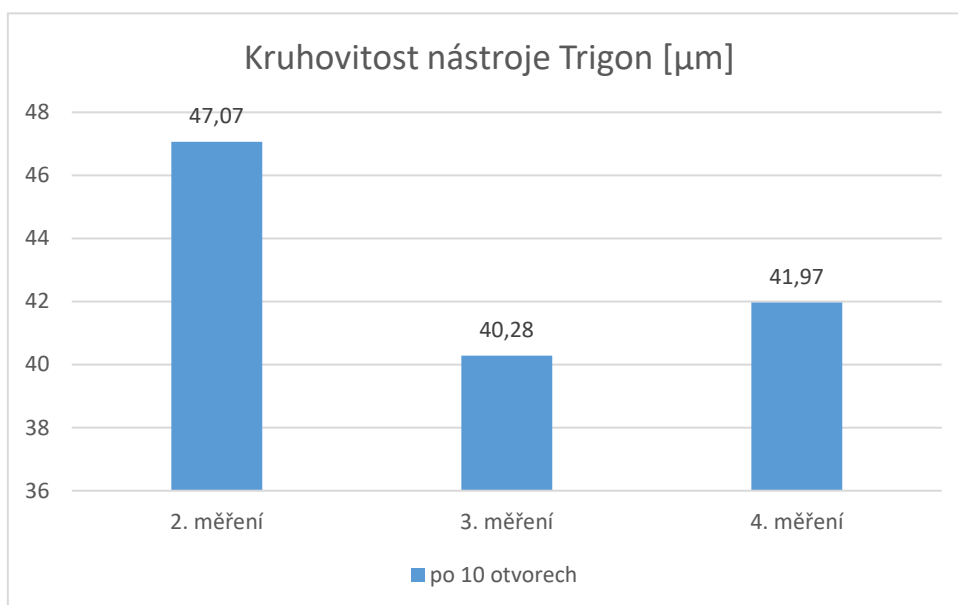
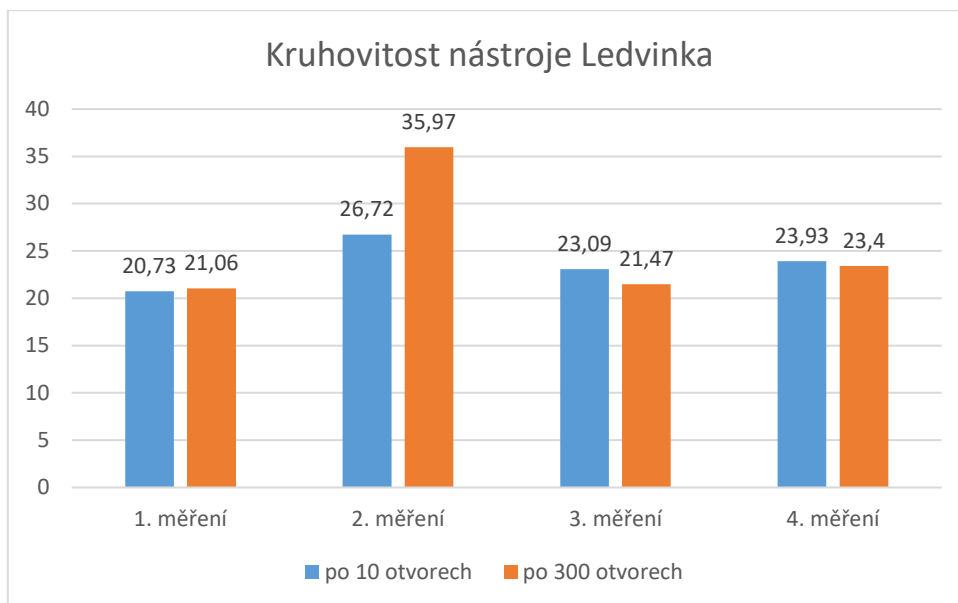




PŘÍLOHA č. 4

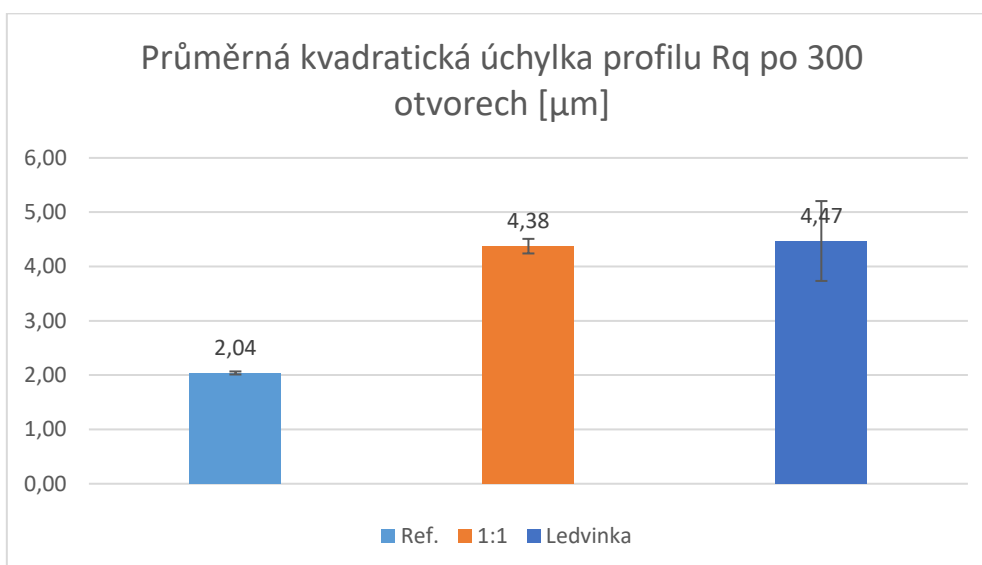
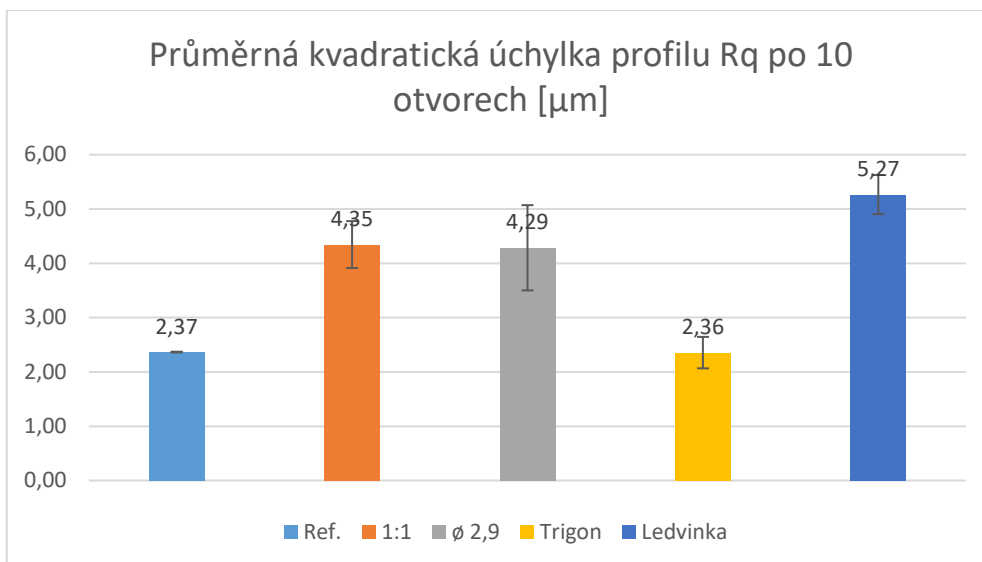
Kruhovitost, válcovitost

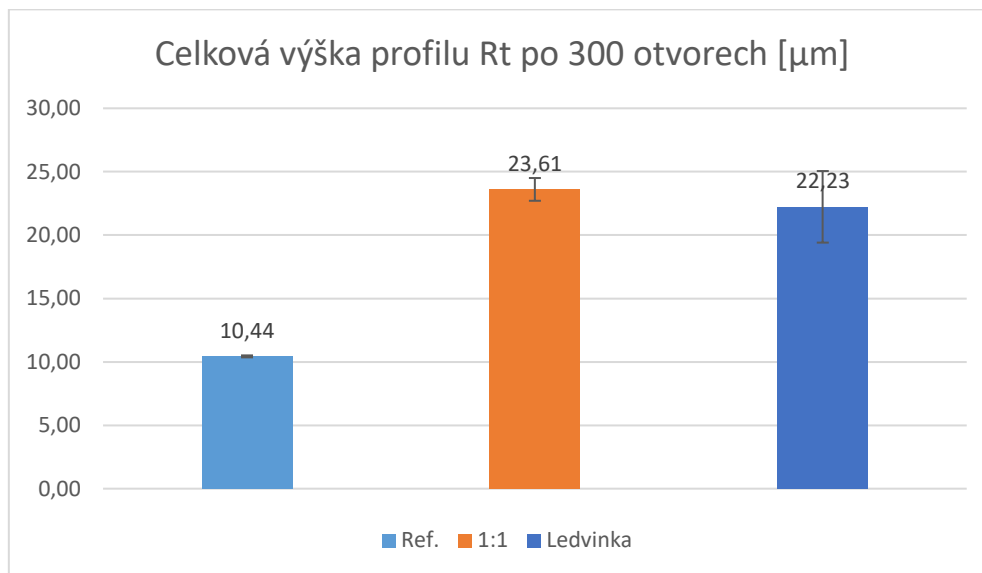
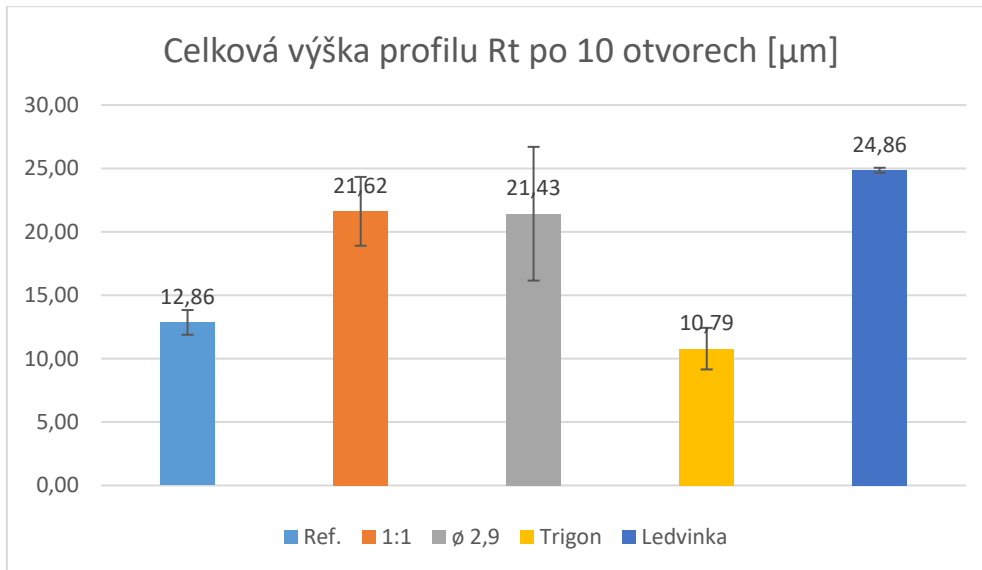


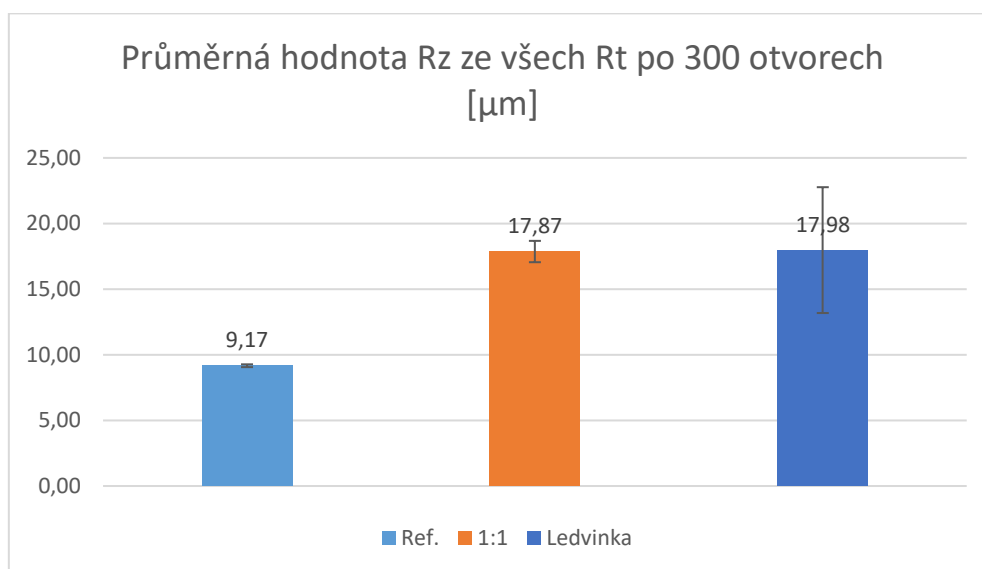
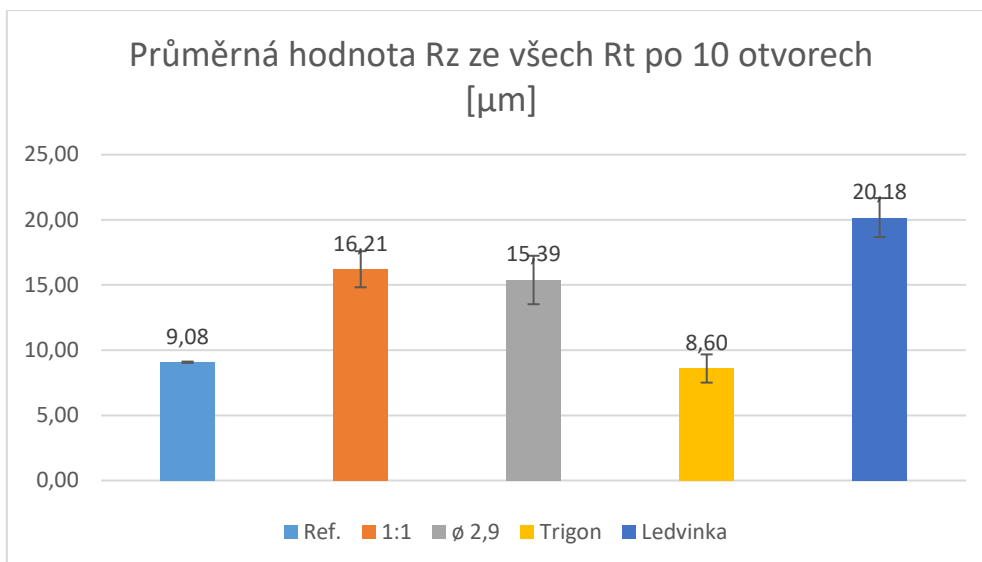


PŘÍLOHA č. 5

Drsnost povrchu



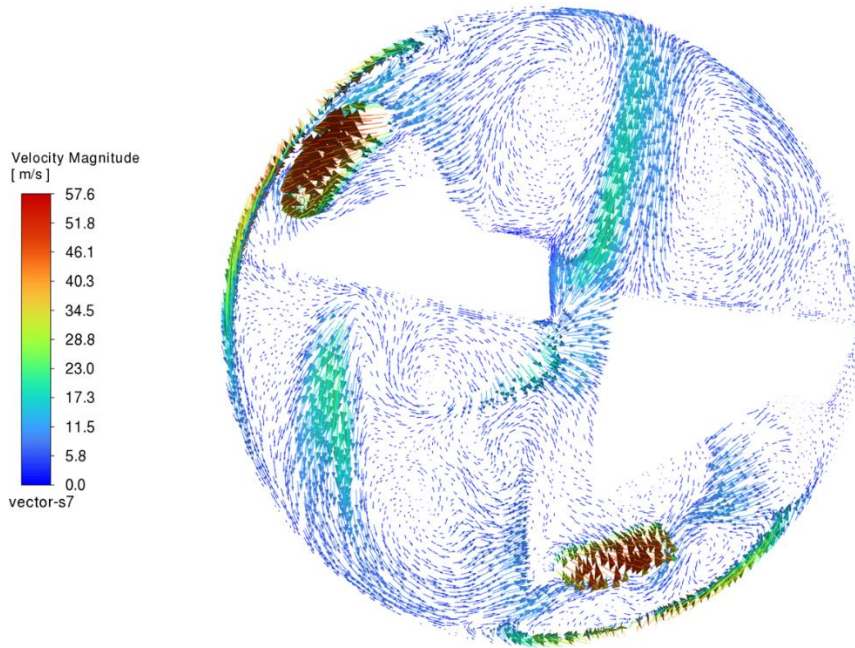




PŘÍLOHA č. 6

Výpočetní simulace proudění CFD

Vektory rychlosti procesní kapaliny dvanáct desetín milimetru nad dnem díry



Vektory rychlosti procesní kapaliny dva milimetry nad dnem díry

