

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA v PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

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

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Trvanlivost nástroje s VBD při frézování slitiny Inconel 718

Autor: **Bc. Václav Schorník**
Vedoucí práce: **Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**

Akademický rok 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Václav SCHORNÍK**
Osobní číslo: **S13N0074P**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie - technologie obrábění**
Název tématu: **Trvanlivost nástroje s VBD při frézování slitiny Inconel 718**
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Úvod
2. Rozbor současného stavu
3. Návrh a realizace experimentu
4. Vyhodnocení a sumarizace výsledků
5. Závěr

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah pracovní zprávy: **50 - 70 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

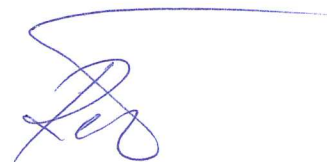
- **Staněk, Jiří, Metodika zpracování a úprava diplomových (bakalářských) prací, Západočeská univerzita, 2005, ISBN 80-7043-363-9**
- **SOVA, F. Technologie obrábění a montáže. Plzeň : VŠSE, 1989.**
- **Shaw, Milton Clayton, Metal cutting principles, Oxford University Press, 2005, ISBN 0-19-514206-3**
- **Juneja, B.L., Fundamentals of Metal Cutting and Machine Tools, New Age International, ISBN 978-81-224-1467-7**
- **HUMÁR, A.: Materiály pro řezné nástroje, MM publishing, s.r.o., Praha 2008, ISBN 978-80-254-2250-2**

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

Datum zadání diplomové práce: **20. října 2014**
Termín odevzdání diplomové práce: **22. května 2015**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



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

V Plzni dne 20. října 2014

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

Tato diplomová práce vznikla za podpory GA ZČU při řešení projektu SGS-031-201 s názvem „Výzkum a vývoj pro inovace v oboru strojírenská technologie – technologie obrábění“ a projektu "Regionální technologický institut", registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0093

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce, panu Ing. Miroslavu Zetkovi, PhD. za odborné vedení a cenné rady při zpracování této diplomové práce. Velké díky patří mému konzultantovi Ing. Tomášovi Bakšovi za veškerou pomoc při řešení a zpracování diplomové práce. Poděkování patří také Oldřichu Pavelkovi ml. a Ing. Lubošovi Kroftovi za jejich pomoc při provádění experimentů. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině za velkou podporu v průběhu celého studia.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Schorník	Jméno Václav
STUDIJNÍ OBOR	2303T004 / Strojírenská technologie - technologie obrábění	
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Zetek, Ph.D.	Jméno Miroslav
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KTO	
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Trvanlivost nástroje s VBD při frézování slitiny Inconel 718	

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2015
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	58	TEXTOVÁ ČÁST	48	GRAFICKÁ ČÁST	10
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS	Tato práce je zaměřena na trvanlivost nástroje s VBD při frézování slitiny Inconel 718. Je rozdělena na dvě hlavní části. První část je zaměřena na teoretické informace o procesu frézování dané slitiny. Druhá část se zabývá praktickými experimenty, které jsou zaměřeny na trvanlivost tří VBD s různou povrchovou úpravou a dále na vliv směru přívodu technologické kapaliny k VBD na její trvanlivost. Je zde rovněž popsána analýza řezných sil a opotřebení.
KLÍČOVÁ SLOVA	Inconel 718, frézování, opotřebení, trvanlivost, řezná rychlost

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Schorník	Name Václav
FIELD OF STUDY	2303T004 Manufacturing Processes - Technology of Metal Cutting	
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Zetek, Ph.D.	Name Miroslav
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO	
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	The Cutting Tool Life When the Inconel 718 Alloy is Machined	

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KTO	SUBMITTED IN	2014
----------------	---------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	58	TEXT PART	48	GRAPHICAL PART	10
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION	<p>This thesis is focused on the cutting tool life, when the Inconel 718 is machined. There are two main parts. The first part is focused on the theoretical information about the milling process of the Inconel 718. The second part is focused on the real tests of the three inserts with different modification of the surface layer. These inserts were tested in two cutters. In the second part is also test, which is focused on the influence of the supplying of the processing liquid to the insert. The analysis of the cutting forces and tool wear is also described.</p>
KEY WORDS	Inconel 718, milling, tool wear, cutting tool life, cutting speed

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	10
1 ÚVOD	11
2 ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU	12
2.1 OBRÁBĚNÝ MATERIÁL	12
2.1.1 <i>Obrobitelnost.....</i>	13
2.1.2 <i>Nároky na obráběcí stroje</i>	14
2.1.3 <i>Možnosti zvyšování trvanlivosti nástroje řezným prostředím</i>	14
2.2 POUŽITELNÉ NÁSTROJE.....	20
2.2.1 <i>Řezné nástroje ze slinutých karbidů</i>	20
2.2.2 <i>Vyměnitelné břitové destičky z řezné keramiky.....</i>	22
2.2.3 <i>Řezné nástroje z kubického nitridu bóru</i>	22
2.3 OPOTŘEBENÍ VZNIKAJÍCÍ PŘI FRÉZOVÁNÍ SLITINY INCONEL 718	23
2.4 DOPORUČENÍ KE STRATEGII OBRÁBĚNÍ	24
2.4.1 <i>Úhel nastavení hlavního ostří κ_r</i>	25
2.4.2 <i>Tloušťka třísky</i>	25
2.4.3 <i>Shrnutí</i>	26
2.5 JAKOST OBROBENÉ PLOCHY PŘI FRÉZOVÁNÍ INCONELU 718	27
2.5.1 <i>Faktory ovlivňující zbytková napětí při obrábění slitiny Inconel 718</i>	28
2.5.2 <i>Vliv druhu VBD a řezného prostředí na drsnost obrobené plochy</i>	29
3 NÁVRH A REALIZACE EXPERIMENTU	30
3.1 NAVRŽENÉ KOMPONENTY PRO PROVEDENÍ EXPERIMENTŮ	30
3.2 EXPERIMENT	34
3.2.1 <i>Použité technické vybavení.....</i>	35
3.2.2 <i>Volba řezných podmínek</i>	37
3.2.3 <i>Rozbor trvanlivosti nástroje s VBD ze tří různých materiálů</i>	38
3.2.4 <i>Rozbor trvanlivosti nástroje s VBD při různých režimech chlazení</i>	41
4 VYHODNOCENÍ A SUMARIZACE VÝSLEDKŮ	51
4.1 PŘÍNOS NAVRŽENÉ METODIKY OBRÁBĚNÍ	54
5 ZÁVĚR	55
6 ZDROJE.....	57

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Způsoby směřování technologické kapaliny [9].....	15
Obrázek 2 Porovnání metod PVD a CVD [15].....	20
Obrázek 3 Tenká vrstva metoda CVD [15].....	21
Obrázek 4 Tenká vrstva metoda PVD [15].....	21
Obrázek 5 Porovnání vzhledu opotřebení VBD z ŘK s a bez chlazení [15].....	22
Obrázek 6 Vrub na hlavním ostří [15].....	23
Obrázek 7 Vliv úhlu nastavení hlavního ostří na styčnou délku řezné hrany [9].....	23
Obrázek 8 Plastická deformace řezné hrany [15].....	24
Obrázek 9 Opotřebení - odloupení části břitu [15].....	24
Obrázek 10 Ilustrace závislosti úhlu κ_r na a_p [15].....	25
Obrázek 11 Vliv a_e a pozice nástroje na tloušťku třísky na výstupu z řezu [15].....	25
Obrázek 12 A Doporučený vstup nástroje do materiálu B vstup břitu do materiálu [15].....	26
Obrázek 13 Nevhodné směřování kanálu pro přívod TK na čelo VBD - běžně používaný nástroj.....	31
Obrázek 14 3D sken lůžka VBD.....	32
Obrázek 15 Diferenční analýza, výsledná plocha vymezující lůžko VBD.....	32
Obrázek 16 Model navržené frézy, polotovar frézy po soustružení.....	33
Obrázek 17 Navržená nástrčná fréza.....	33
Obrázek 18 A Snímek z průběhu obrábění B Snímek z obrábění navržené čelní frézy.....	34
Obrázek 19 Fotografie použitých VBD, tvar jejich řezné hrany.....	35
Obrázek 20 A Etalonová fréza [17] B Upínací trn SK 40 [18].....	36
Obrázek 21 A Multicheck PC 500 [22] B Soustava doplňujícího vybavení pro měření sil.....	36
Obrázek 22 A MCV 750A [23] B DMG MORI DMU 65 monoBLOCK® [24].....	37
Obrázek 23 A Opotřebení VBD 1 B Opotřebení VBD 3.....	39
Obrázek 24 Opotřebení VBD - zleva VBD 2 _N , VBD 3 _N , VBD 1 _N	40
Obrázek 25 Opotřebení 150 μm - chlazení z čela - A.....	42
Obrázek 26 Opotřebení 150 μm - chlazení ze hřbetu - B.....	42
Obrázek 27 Opotřebení 150 μm - kombinace přívodu TK na hřbet a čelo VBD - C.....	43
Obrázek 28 Měřicí zařízení Infinite Focus G4 [19].....	46
Obrázek 29 Řez neopotřebovanou řeznou hranou VBD.....	46
Obrázek 30 Řez opotřebovanou řeznou hranou VBD při frézování za sucha.....	47
Obrázek 31 Řez opotřebovanou řeznou hranou VBD při přívodu chlazení B.....	47
Obrázek 32 Řez opotřebovanou řeznou hranou VBD při přívodu chlazení A.....	48
Obrázek 33 Řez opotřebovanou řeznou hranou VBD při přívodu chlazení C.....	49
Obrázek 34 Diferenční analýza - neopotřebovaná řezná hrana/opotřebovaná řezná hrana – přívod C.....	49
Obrázek 35 Diferenční analýza - neopotřebovaná řezná hrana/opotřebovaná řezná hrana - přívod B.....	50
Obrázek 36 Diferenční analýza - neopotřebovaná řezná hrana/opotřebovaná řezná hrana - přívod A.....	50

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**Zkratky použité v textu**

CNC	Computer numerical controlled (číslicové řízení pomocí počítače)
INC	Inconel 718
SK	Slinutý karbid
PVD	Physical Vapour Deposition
CVD	Chemical Vapour Deposition
SIALON	Silicon, Aluminium, Oxygen, Nitrogen
CBN	Cubic Boron Nitride – Kubický nitrid bóru
ŘK	Řezná keramika
ZN	Zbytková napětí
TK	Technologická kapalina
VBD	Vyměnitelná břitová destička

Symboly použité v textu

a_p	Axiální hloubka řezu	[mm]
R_a	Střední aritmetická úchylka profilu	[μm]
κ_r	Úhel nastavení hlavního ostří	[°]
a_e	Radiální hloubka řezu	[mm]
r_e	Zaoblení řezné hrany nástroje	[mm]
v_f	Posuvová rychlost	[mm/min]
v_c	Řezná rychlost	[m/min]
f_z	Posuv na zub	[mm]
f_{ot}	Posuv na otáčku	[mm]
h_e	Ekvivalentní tloušťka třísky	[mm]
h_{ex}	Tloušťka třísky na výstupu z řezu	[mm]
p	Vnitřní tlak technologické kapaliny	[MPa]
Π	Koncentrace technologické kap.	[%]

1 Úvod

Slitina Inconel 718 poskytuje výborné mechanické vlastnosti za relativně vysokých teplot. To je jeden z důvodů, proč je stále více využívána při výrobě tepelně namáhaných konstrukcí.

Obrábění této slitiny je velmi náročné vzhledem k problémům, které při něm nastávají. Vlivem vysoké pevnosti za tepla, relativně vysoké tvrdosti společně s abrazivním účinkem chromu a sklonem ke zpevňování dochází u tohoto materiálu při obrábění k extrémnímu opotřebení nástrojů a tím i k malé produktivitě obrábění. Řezný odpor této slitiny je velmi vysoký, a proto je potřeba nasazení výkonných strojů pro docílení efektivního procesu řezání. Vzhledem k extrémnímu teplu vznikajícím v místě řezu je často využívána relativně nízká řezná rychlost. Nízká řezná rychlost společně s velkým řezným odporem pak vyvolává problém s dodávaným krouticím momentem na vřetení stroje za nízkých otáček. Je pak potřeba kontrolovat závislost krouticího momentu nebo příkonu vřetene stroje na jeho otáčkách pro zajištění dostatečné rezervy stroje. Jelikož je tento materiál velmi drahý, musí být dobře promyšlen tok třísek od stroje k recyklaci. Při obrábění těchto materiálů je při použití vyměnitelných břitových destiček (VBD) ze slinutých karbidů potřeba intenzivního chlazení. Jinak je proces obrábění velmi neekonomický vzhledem k malé trvanlivosti nástrojů.

Cílem této práce je shrnutí problematiky frézování slitiny Inconel 718, posouzení trvanlivosti nástroje s VBD ze slinutých karbidů s různými druhy tenkých vrstev. Dále posouzení vhodnosti návrhu chladicího modulu pro nástrčné frézy, který by měl zajistit efektivní chlazení hřbetu VBD.

2 Rozbor současného stavu

2.1 Obráběný materiál

Jedná se o vytvrditelnou super slitinu na bázi niklu a chromu. Vykazuje vysokou mez pevnosti při tečení za vysokých teplot až do 700 °C, korozivzdornost do 980 °C. Dále vysokou pevnost za vysokých i nízkých teplot (-253 °C) a dobrou svařitelnost. Všechny tyto vlastnosti významně ovlivňují proces obrábění (většinou však negativně). Tato super slitina se používá zejména ve spalovacích turbinách, raketových a proudových motorech, v namáhaných částech kryogenních nádrží, v částech nástrojů pro protlačování za tepla apod. [1], [2]. V tabulce 1 lze vidět chemické složení zmiňované slitiny a v tabulce 2 pak vybrané mechanické vlastnosti, které jsou významně ovlivněny tepelným zpracováním.

Ni ¹	50.00 - 55.00	%	Si	max. 0.35	%
Cr	17.00 - 21.00	%	Cu	max. 0.30	%
Fe	Zbytek		C	max. 0.08	%
Nb ²	4.75 - 5.50	%	P	max. 0.015	%
Mo	2.80 - 3.30	%	S	max. 0.015	%
Ti	0.65 - 1.15	%	B	max. 0.006	%
Al	0.20 - 0.80	%	¹ Plus Co		
Co ³	max. 1.00	%	² Plus Ta		
Mn	max. 0.35	%	³ Pokud je stanoveno		

Tabulka 1: Chemické složení slitiny Inconel 718 [2]

Teplota [°C]	23	650	23	21	200	430	540	650	760
Mez pevnosti v tahu [MPa]	1375	1100	930	1450	1365	1316	1275	1160	765
Mez pružnosti R _{p0,2} [MPa]	1100	980	480	1206	1120	1075	1070	1030	760
Prodloužení do porušení [%]	25	18	45	22	20	19	18	19	27
Tvrdost [HRC, HRB]	260 _{HRB}		91 _{HRB}	42-44	-	-	40-41	40-41	33-34
Typ tepelného zpracování	A		B	C					
Precipitačně vytvrzeno	A		Tepelné zpracování						
Žiháno 980 °C	B								
Žiháno 980 °C, stárnu - 720/620 °C	C								

Tabulka 2: Vybrané mechanické vlastnosti slitiny Inconel 718 [3] [4] [5]

V základní podobě tento materiál vykazuje tři intermetalické precipitační fáze a to γ' - Ni₃(Al, Ti) v kubickém uspořádání, γ'' - Ni₃Nb v tetragonálním uspořádání a fáze δ - Ni₃Nb v orthombickém uspořádání. Fáze γ' a γ'' precipitují při teplotách mezi 600 a 900 °C, přičemž vytvářejí jemné částice, které jsou základem pro precipitační vytvrzování této slitiny. Ačkoli je δ fáze termodynamicky stabilnější než γ'' , dojde před její zdlouhavou precipitací při cca

900 °C k precipitaci fáze γ'' . Vzhledem k tomu, že jsou obě fáze založeny na prvku Nb, je precipitace fáze δ spojena s úbytkem fáze γ'' . Vzhledem k morfologii fáze δ nedochází díky její přítomnosti k významnému vytvrzení materiálu, naopak kvůli zmiňovanému úbytku fáze γ'' dochází ke snížení efektu vytvrzení. Dále je přítomnost fáze δ nežádoucí, protože zvyšuje náchylnost k tvorbě trhlin za tepla. Nicméně mírný podíl této fáze vede ke zpomalení hrubnutí zrna během tepelného zpracování a dále ke zvýšení odolnosti materiálu proti lomům na hranicích zrn při tečení. [6]

2.1.1 Obrobitelnost

Při obrábění daného materiálu je třeba určit, zda se jedná o výkovek, odlitek či válcovaný polotovár. Výkovky mají jemnozrnější strukturu, což vede k vyšší pevnosti. Při jejich obrábění je pak třeba snížit řeznou rychlost v_c a zvýšit posuv na zub f_z . Tím se dosáhne dobré trvanlivosti řezného nástroje a relativně vysokého úběru materiálu. U odlitků je třeba aplikovat přesný opak a to vyšší v_c a nižší f_z (0,1 mm tloušťka třísky). Odlitky mají velmi špatnou obrobitelnost. Při jejich obrábění se velmi výrazně projevuje abrazivní opotřebením a vruby na nástroji. S válcovaným polotovarem se lze vypořádat nejjednodušeji. [7] Následující faktory jsou zodpovědné za špatnou obrobitelnost tohoto materiálu. Velká výhoda INC je pevnost za vysokých teplot, ta se ovšem negativně projevuje právě při jeho obrábění. Při jeho obrábění dochází k samozpevnění vlivem plastické deformace. Vysoce abrazivní karbidické částice obsažené v jeho mikrostruktuře zvyšují abrazivní otěr. Špatná tepelná vodivost může vést až k řezné teplotě 1200 °C na čele nástroje.

Super slitiny na bázi niklu mají vysokou chemickou afinitu k velkému množství řezných materiálů, a proto se zvyšuje difúzní otěr. Adheze způsobuje mikro svary na řezném nástroji a má významný vliv na vznik vrubů, stejně tak i na změny na čele nástroje, protože dochází k odtrhávání materiálu. Kvůli vysoké pevnosti dosahují řezné síly výrazných hodnot, přičemž mohou způsobit vibrace, které ovlivňují kvalitu obrobené plochy.

Celkově je obtížnost obrábění určena dvěma problémy a to nízkou trvanlivostí nástroje a poškozením obrobeného povrchu. Generování tepla a plastická deformace nastávající během obrábění ovlivňuje kvalitu obrobené plochy a mikrostrukturu slitiny. Také ovlivňuje zbytková napětí. Zbytková napětí jsou generována i plastickou deformací bez přívodu tepla. Teplo a deformace způsobují vznik trhlin a změny v mikrostruktuře, stejně jako velké rozdíly v tvrdosti. Zbytková napětí mají vliv na mez únavy daných obrobků. Jsou také zodpovědná za rozměrovou nestabilitu, která může vést k problémům při montáži sestav. Je jim tedy nutné věnovat velkou pozornost. Hlavní parametry řezného procesu jako je metoda obrábění, řezná

rychlost, posuv, hloubka řezu, geometrie nástroje a způsob chlazení musí být zvažovány pro dosažení adekvátní trvanlivosti nástroje a jakosti obrobeného povrchu. [8]

2.1.2 Nároky na obráběcí stroje

Pro frézování materiálů jako je INC, je potřeba volit stroje s vyšším výkonem než pro frézování uhlíkových ocelí a to zejména z důvodu vyššího řezného odporu. Obecně je potřebný výkon stroje dán vlastnostmi obráběného materiálu, tj. řezným odporem, nastavením řezných podmínek - a_e ; a_p ; v_f , průměrnou tloušťkou třísky a geometrií nástroje. Při obrábění daného materiálu za použití VBD ze slinutých karbidů však vyvstává problém s potřebou vysokého krouticího momentu M_c při malých otáčkách nástroje. Proto nelze volit stroje pro obrábění těchto materiálů pouze dle maximálního výkonu, ale také dle závislosti M_c na otáčkách n . V případě nedostatečného výkonu v daných otáčkách pak hrozí kolísání tloušťky třísky, které může zavinit nestabilitu řezného procesu.

Přesnost nástroje v axiálním i radiálním směru je naprosto stěžejní pro zajištění konstantního zatížení, plynulého procesu obrábění a prevence proti nečekanému selhání některé z vyměnitelných břitových destiček. [7]

2.1.3 Možnosti zvyšování trvanlivosti nástroje řezným prostředím

Energie spotřebovaná během procesu obrábění INC je z velké části přeměněna na teplo. Nasazení různých metod chlazení je pak určeno pro odebrání tepla z obrobku, nástroje a upínacích přípravků, čímž by se měla zvýšit trvanlivost nástroje. Oproti obrábění bez chlazení by měla být vyšší trvanlivost způsobena hlavně nižším difúzním opotřebením nástroje, za které je zodpovědná velmi malá tepelná vodivost INC. Nejvyšších teplot je dosaženo právě v místě rozhraní tříska/nástroj, přičemž není umožněn efektivní odvod tepla například do třísky. Velmi důležitou úlohou systémů chlazení je tedy odvod tepla z místa řezu, odplavování třísek a při správném složení kapaliny pak ochrana obrobku proti korozi. [8] Chlazení je při frézování zmiňovaného materiálu doporučováno vyjma případů, kdy je k frézování použita VBD z řezné keramiky.

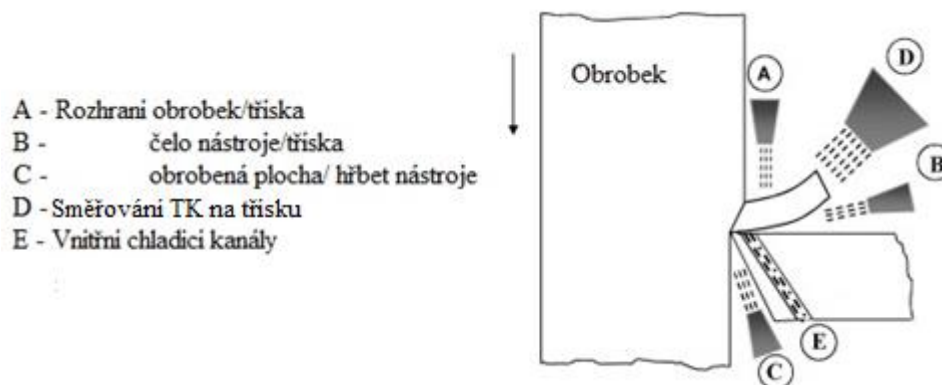
Díky zvýšené pozornosti na životní prostředí a zdravotní rizika se však vlády uchylují k nařízení redukce množství používané technologické kapaliny. Při obrábění zmiňovaného materiálu je spotřeba technologické kapaliny velmi vysoká. Kromě samotných nákladů na technologickou kapalinu, jsou tu ještě náklady spojené s jejím odstraňováním a úpravou jí samotné. Výrobci se tedy snaží přecházet na obrábění za sucha pro snížení dopadu na životní prostředí a snížení nákladů na obrábění. [8]

Obrábění za sucha má následující výhody – nepřináší rizika, jako je únik kapalin do spodních vod, dopady na lidské zdraví, respirační potíže a alergie. Dále snižuje energetickou náročnost procesu na čištění jak výrobku, tak i vzniklých třísek. [8]

Ke zvýšení trvanlivosti může rovněž přispět opačný přístup v podobě obrábění s předehřevem, kdy dochází k odpevnění materiálu a k částečnému snížení deformačního zpevnování. Tento efekt může při volbě správného řezného materiálu zajistit vyšší trvanlivost vlivem menšího opotřebení způsobeného zpevněnou vrstvou – vrubu ve výšce axiální hloubky řezu. [8]

2.1.3.1 Vysokotlaké chlazení

Jednou z možných cest zlepšení procesu frézování zmiňovaného materiálu je vysokotlaké chlazení. U vysokotlakých systémů, kde tlak dosahuje stovek barů, je zjevný velmi velký nárůst trvanlivosti nástroje. Při vysokotlakém chlazení dochází k intenzivnější výměně tepla v rozhraní třísky/nástroj než při konvenčním chlazení a tím se více sníží teplota řezání. Při vysokotlakém chlazení je třeba zajistit směřování paprsku kapaliny do rozhraní mezi třískou a čelem nástroje – viz obr. 1 - varianta B. Dochází pak k lepšímu odvodu třísky z místa řezu, ke snížení tření třísky o čelo nástroje a tím ke snížení teploty řezání. [9]

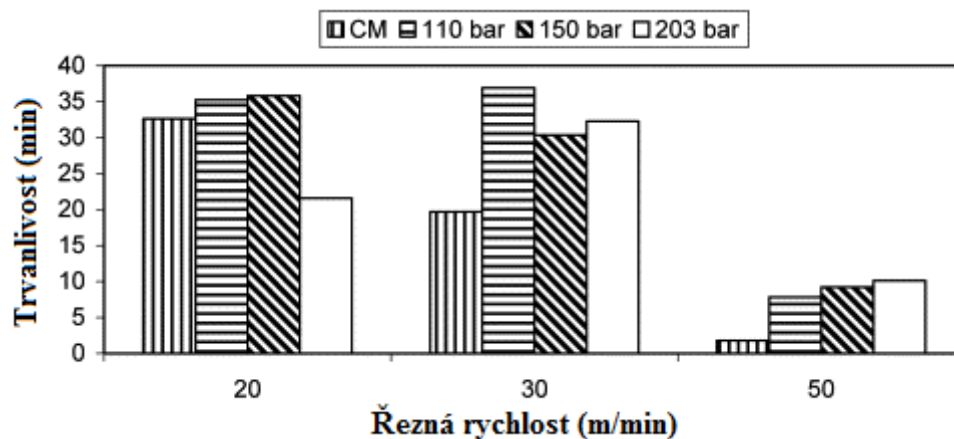


Obrázek 1 Způsoby směřování technologické kapaliny [9]

Pokud je však proud kapaliny zaměřen nepřesně mimo rozhraní čela nástroje a třísky (viz obr. 1 varianta A) nelze očekávat velké zlepšení trvanlivosti a to zejména díky tepelným rázům, které mohou vést až ke snížení trvanlivosti nástroje oproti obrábění za sucha. Tyto tepelné rázy vznikají tak, že se nástroj v cyklech extrémně prohřeje v řezu a poté je zchlazen. Tento efekt nevzniká při plynulém chlazení, tedy pokud je kapalina správně zaměřena do zmiňovaného rozhraní. Standardní směřování kapaliny na třísku (viz obr.1 varianta D) vede

k vypařování kapaliny v oblasti primární plastické deformace, která poté brání přísunu další chladné kapaliny. Tím dochází k extrémnímu snížení chladicího efektu. [9]

Při vysokotlakém chlazení je třeba najít optimální řezné podmínky a to hlavně z hlediska poměru řezné rychlosti k tlaku chladicí kapaliny. Tento poměr je důležitý z důvodu erozního působení natlakované chladicí kapaliny na nástroj a dále proto, že existuje určitá hodnota kritického tlaku pro danou řeznou rychlost, jehož překročení již nepřináší snížení teploty, ale může zapříčinit vyšší opotřebení břitu erozním působením vysoce natlakované TK. [10], [11], [12]

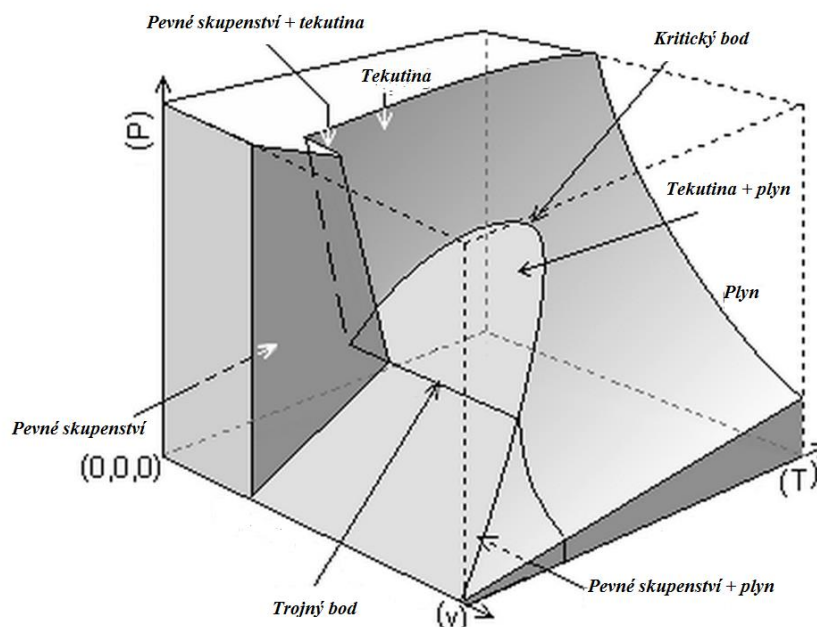


Graf 1 Trvanlivost při frézování slitiny Inconel 718 při různých tlacích TK při $f_{ot} = 0,25$ mm/ot - nesousledné frézování [10]

Na grafu 1 je možné vidět výsledek experimentu, který tuto myšlenku potvrzuje. Nicméně vyvstává otázka, proč se zvyšuje trvanlivost oproti nižší řezné rychlosti 20 m/min. Mohlo by to být způsobeno tím, že při obrábění je třeba zajistit určitou pracovní teplotu nástroje. Pod ní je nástroj křehký, a tím by mohl být snadněji poškozen.

To, že zvýšení tlaku nad jeho určitou mez nepřináší snížení teploty, může být připisováno kritickému toku tepla. [12] Jak je známo, var kapaliny je charakterizován čtyřmi fázemi s různým koeficientem přestupu tepla. První fází je volná konvekce s poměrně malým koeficientem přestupu tepla. Druhá fáze je charakterizována vznikem bublin páry, které svým pohybem v kapalině (dvě fáze) vyvolávají intenzivní výměnu tepla a to až do maxima, kdy dochází k nejvyššímu možnému tepelnému toku. Po této fázi nastává tranzitivní var, při kterém již klesá množství přeneseného tepla. Poslední fáze, při které je množství přeneseného tepla nejmenší, je charakterizována parním polštářem, zabraňujícím efektivnímu přenosu tepla. [11]

Tím, jak je tlak zvyšován do jeho kritické hodnoty (překročení kritického bodu), zřejmě dochází k intenzivnějšímu proplachování míst, která za nižšího tlaku vykazovala v daném místě tranzitivní var, který byl poté díky termodynamickým podmínkám nahrazen nukleačním varem. Nicméně je možné, že v místě blízko ostří nástroje již není možné odstranit parní polštář a dochází pak k ustálení teploty i při vyšším tlaku kapaliny. Kapalina se v tomto místě hůře střídá s chladnou kapalinou kvůli omezenému prostoru. Společně s horší výměnou kapaliny a vysokou teplotou v místě řezu zde tedy zřejmě vzniká parní polštář, který již nelze odstranit vyšším tlakem kapaliny z důvodu přechodu kritického bodu (cca 374 °C, 22,14 MPa - voda), za nímž již není možné dosáhnout požadovaného dvoufázového složení kapalně fáze – jak je možné vidět na grafu 2. [11]



Graf 2 Fázový diagram vody [21]

Dalším důležitým aspektem při vysokotlakém chlazení je hloubka řezu. Pro lehčí odvod třísky při vysokém tlaku je pro kapalinu jednodušší odlomit třísku menší tloušťky, nicméně ji nelze příliš snižovat právě kvůli náchylnosti INC k deformačnímu zpevnění. [11]

Při volbě malé axiální hloubky řezu je generováno relativně menší teplo. Při vstupu řezné kapaliny do rozhraní třísky/ nástroj (obr. 1 varianta B) dojde ke krátkému blánovitému varu a poté přejde k bublinovému varu (nukleačnímu varu), kdy dojde k zintenzivnění pohybu kapaliny v oblasti řezu a k turbulizaci laminární vrstvy v blízkosti nástroje a odřezávaného materiálu. Tímto dojde ke zvýšení koeficientu prostupu tepla a tedy k intenzivní výměně tepla. V případě, že bude hloubka řezu příliš velká, generované teplo bude příliš vysoké a tlak

technologické kapaliny bude konstantní, při malé hloubce řezu dojde opět ke vzniku parního polštáře, kdy se významně sníží chladicí efekt. [11]

2.1.3.2 MQL chlazení

Již dlouhou dobu je známo, že pokud není řezná kapalina správně zlikvidována, může to negativně ovlivnit životní prostředí. Obsluha strojů pak může být kvůli kontaktu s řeznou kapalinou vystavena závažným kožním problémům, dále různým přežívajícím bakteriím a jiným nepříznivým vlivům. Jednou z možností odstranění těchto problémů může být tzv. čisté obrábění. Tento koncept je definován jako obrábění s minimálním množstvím technologické kapaliny nebo jako obrábění s využitím kapalin šetrnějších k životnímu prostředí. MQL technologie využívá velmi malého množství vody a oleje. Tato emulze je pak dodávána do místa řezu pomocí stlačeného proudu vzduchu či jiných plynů. Dobrých výsledků bylo dosaženo hlavně u broušení, frézování a soustružení. Výhoda spočívá v mazacích účincích oleje velmi blízko u místa řezu. Snížení teploty je pak zajištěno stlačeným vzduchem a jeho částečným odpařováním. Díky odpařování mazadla (oleje) je odvedeno velmi velké množství tepla. Díky této technologii je pak možné zaznamenat významné omezení navařování třísek na nástroj. Metoda MQL je využívána především při malých posuvech a vysokých řezných rychlostech. Při této metodě chlazení je hlavní nevýhodou vznikající mlha. Vdechování této mlhy obsluhou by bylo velmi nebezpečné. Tento problém lze řešit výkonným odsáváním. [13]

Volba plynu, který dopravuje emulzi k řezné hraně je rovněž velmi důležitá. Z experimentů soustružení INC vyplývá, že argon je pro danou aplikaci nevhodný a to zejména kvůli své nízké tepelné vodivosti a tepelné kapacitě, která vede k vyšším teplotám v místě řezu. Proto se k těmto účelům využívá spíše vzduch. Zvýšení tlaku chladicího média při využití metody MQL nemusí vždy přinést zvýšení trvanlivosti nástroje a jakosti obrobené plochy. Při experimentech, kdy se tlak média zvyšoval z 0,4 MPa na 0,6 MPa docházelo ke snížení trvanlivosti nástroje. Tento jev je připisován významnější oxidaci tenké vrstvy vlivem přívodu většího množství kyslíku ze vzduchu. [14]

2.1.3.3 Kryogenní chlazení

Kryogenní chlazení je efektivní pro zajištění nižší teploty, než je ta, při které dochází ke změkčení materiálu nástroje. Tato technologie je nasazována zejména v oblasti broušení, kde vzniká velké teplo, které v případě, že není kontrolováno, může vést k poškození obrobku - zbytková napětí, trhliny apod. Jako chladicí médium je většinou používán tekutý dusík, protože je relativně levný a šetrný k životnímu prostředí. Nelze jej ale recyklovat.

Metoda spočívá v aplikaci daného média tryskou k potřebnému místu. Intenzita chlazení je natolik vysoká, že lze očekávat významné snížení opotřebení vznikajícího kvůli vysokým teplotám, ale i nárůst řezných sil oproti konvenčnímu chlazení. Je tomu tak kvůli zvýšení tvrdosti obráběného materiálu nízkou teplotou a díky nemožnosti odpevnění obráběného materiálu. [13]

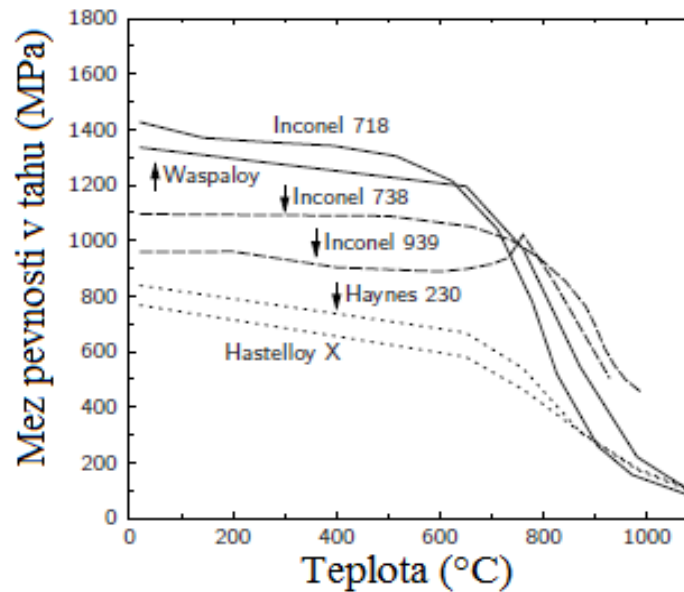
2.1.3.4 Chlazení stlačeným vzduchem

Podstatou této metody je zchlazení suchého vzduchu na cca $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ po němž následuje jeho přivedení k místu řezu tryskou, která svým tvarem zajistí adiabatickou expanzi. Vzduch má pak teplotu cca $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tato metoda se výborně osvědčila při frézování INC nástrojem ze slinutého karbidu s TiAlN tenkou vrstvou při $v_c = 90\text{ m/min}$, kdy došlo k výraznému nárůstu trvanlivosti. Nicméně metoda není použitelná na vyšší řezné rychlosti, protože se již stlačený vzduch nedostane do rozhraní tříska/nástroj. [8]

2.1.3.5 Frézování s předehřevem

Jedním z dalších možných přístupů k obrábění této superslitiny z pohledu zvýšení objemu odebraného materiálu, trvanlivosti nástroje a kvality obrobeného povrchu je obrábění s předehřevem. K předehřívání lze použít například laser či plasmu, kdy je po prohřátí INC nad $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ významně snížena mez kluzu. Rovněž dochází ke snížení tvrdosti, pevnosti ve smyku a hlavně ke snížení deformačního zpevnování INC. Při aplikaci této metody jsou řezné síly mnohem nižší, stejně tak jako drsnost povrchu. Při použití této metody je eliminováno opotřebení v podobě vrubu – to je hlavní benefit této metody, nicméně kvůli vyšší teplotě třísky oproti konvenčnímu obrábění je zvýšeno opotřebení hřbetu. [8]

Na grafu 3 lze vidět závislost meze pevnosti v tahu INC na teplotě v porovnání s ostatními niklovými slitinami. U INC lze pozorovat velmi významný skok na mezi pevnosti v tahu v rozmezí teplot $600 - 800\text{ }^{\circ}\text{C}$.



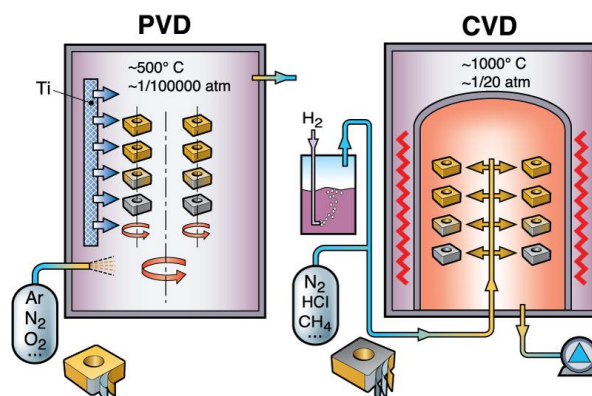
Graf 3 Závislost meze pevnosti v tahu na teplotě - Inconel 718 a ostatní [20]

2.2 Použitelné nástroje

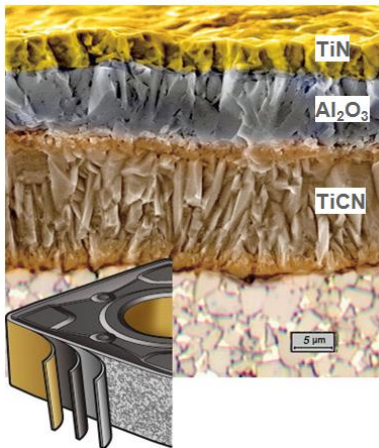
Požadované vlastnosti řezného materiálu jsou následující: dobrá odolnost proti opotřebení z důvodu přítomnosti tvrdých částic ve struktuře INC a dále schopnost odolávat tepelným rázům vznikajícím díky cyklům významného nárůstu teploty na řezné hraně (který je pro INC charakteristický) a jejího rychlého sražení chladícím médiem. Důležitá je rovněž chemická stabilita, vysoká pevnost a tvrdost za vysokých teplot z již zmiňovaných důvodů.

2.2.1 Řezné nástroje ze slinutých karbidů

Nástroje z SK jsou stále hojně používány pro obrábění INC. Doporučená řezná rychlost v_c je kvůli nárůstu a dalším zmiňovaným problémům velmi nízká – v řádech desítek m/min. Optimálně pak kolem 30 m/min. Na nástroje ze SK bývají většinou nanášeny tenké vrstvy metodou PVD či CVD. Na obr. 2 je možné vidět určité porovnání mezi danými metodami a na obr. 3, 4 pak příklady typických CVD a PVD tenkých vrstev. [15]



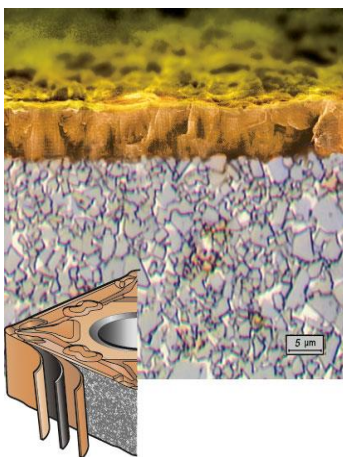
Obrázek 2 Porovnání metod PVD a CVD [15]



- Vrstva TiCN poskytuje hřbetu nástroje vysokou odolnost proti opotřebení díky dobré adhezi k substrátu
- Vrstva Al_2O_3 tvoří chemickou a tepelnou bariéru, tím brání plastické deformaci břitu
- TiN je pak užito pro jednodušší detekci opotřebení a pro vylepšení vzhledu břitu [15]

Obrázek 3 Tenká vrstva metoda CVD [15]

Celkově tvoří metoda CVD tlustší vrstvu než metoda PVD, je odolnější proti abrazi a tepelnému zatížení. Přilnutí tenké vrstvy k substrátu je pak vyšší než u metody PVD. Je však potřeba vyšší teploty (většinou kolem $850\text{ }^\circ\text{C}$ – $1000\text{ }^\circ\text{C}$). Pro CVD metodu je oproti PVD možné použít vyšší řeznou rychlost a větší tloušťku třísky. Stabilita procesu obrábění je u tenké vrstvy CVD vyšší. [15]



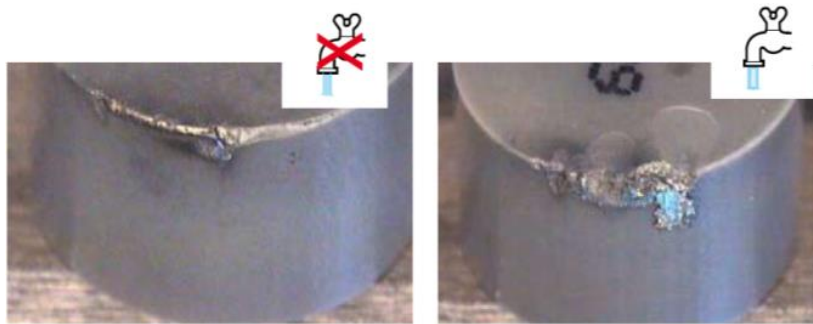
- Díky tenké vrstvě TiAlN dojde k velkému nárůstu odolnosti proti opotřebení hřbetu nástroje
- Vzhledem menší tloušťce tenké vrstvy cca $3\text{--}6\text{ }\mu\text{m}$ je řezná hrana ostřejší – výhoda pro menší hloubku řezu při dokončování.
- Tenká vrstva vytvořená metodou PVD je poněkud houževnatější než CVD

Obrázek 4 Tenká vrstva metoda PVD [15]

Zásadním rozdílem mezi PVD a CVD metodou je pak vznik tlakových zbytkových napětí na povrchu břitu nástroje u metody PVD a tahových u metody CVD. Díky tlakovým napětím dojde ke zvýšení houževnatosti tenké vrstvy. U metody CVD pak tahová napětí vedou k větší křehkosti tenké vrstvy. [15]

2.2.2 Vyměnitelné břitové destičky z řezné keramiky

V závislosti na typu jsou nástroje na bázi keramiky velmi často využívány k obrábění materiálů, jako je INC. Vykazují vysokou odolnost proti opotřebení a dále velmi vysokou tvrdost za vysokých teplot. Jejich nevýhoda spočívá hlavně ve vysoké křehkosti a náchylnosti k trhlinám při nestabilních podmínkách (tepelné rázy apod.). Na obr. 5 pak lze vidět porovnání vzhledu opotřebení VBD z řezné keramiky bez a s chlazením. Pro snížení teploty řezání lze použít již zmiňovanou metodu MQL, která to dokáže bez výrazných tepelných rázů.



Obrázek 5 Porovnání vzhledu opotřebení VBD z ŘK s a bez chlazení [15]

Dále je pak vhodná kompozitní oxidická keramika – zpevněná monokrystaly křemíku SiC, tzv. whiskery, které jsou uloženy v matrici Al_2O_3 (jemnozrnná struktura). S whiskery lze dosáhnout vyšší houževnatosti. Jejich známou vlastností je rovněž nízká pevnost v tahu a vysoká pevnost v tlaku. Velkou výhodou je pak i jejich vysoká chemická odolnost. Whiskery jsou zde i pro obranu proti šíření mikrotrhlin v matrici. Tato keramika je vhodná zejména pro výkovky. Pro obrábění INC je vhodná i neoxidická (nitridická) ŘK na bázi nitridu křemíku Si_3N_4 . Vhodná je pak třída s přísadami jako je MgO, Al_2O_3 v modifikaci β tzv. SIALON.

Pro využití keramiky je nutné brát v úvahu její vysokou křehkost – hlavně při programování dráhy nástroje. Dále je potřeba dodržet úhel κ_r do 45° . Řezná rychlost by měla být co nejvyšší pro odpevnění INC. Pro zachování stálosti řezného materiálu by se pak měla pohybovat kolem 250 m/min. [15]

2.2.3 Řezné nástroje z kubického nitridu bóru

Velmi dobré vlastnosti CBN v podobě vysoké tvrdosti, odolnosti proti opotřebení, chemické stability a tepelné vodivosti předurčují tento materiál při dodržení doporučených řezných podmínek k produktivnímu obrábění materiálů jako je INC.

Při obsahu CBN $>80\%$ v materiálu nástroje je většinou použito kovové pojivo, které zajišťuje vyšší houževnatost oproti nižšímu obsahu CBN, kdy je většinou používáno pojivo keramické. Tento celek pak vykazuje větší odolnost proti opotřebení. Pro frézování nástroji z

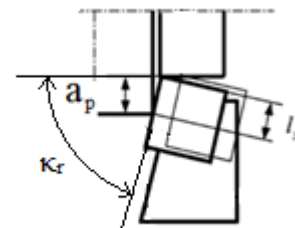
CBN je pak doporučena pozitivní geometrie a stabilní proces obrábění s minimálním přerušováním řezu. Pokud je použito chlazení, musí být aplikováno tak, aby nedocházelo k tepelným rázům na nástroji. Řezné rychlosti jsou doporučovány ve stovkách m/min (300-400 m/min). Opotřebení nástrojů z tohoto materiálu je většinou dáno řeznými podmínkami a mikrogeometrií. Při středních a vyšších řezných rychlostech většinou vzniká opotřebení ve formě kráteru na čele, zatímco při nižších řezných rychlostech vzniká opotřebení hřbetu. [15]

2.3 Opotřebení vznikající při frézování slitiny Inconel 718

Při obrábění INC vzniká nejčastěji opotřebení v podobě vrubu na hlavním ostří v axiální hloubce řezu a_p – viz obr. 6. Toto opotřebení je časté kvůli deformačnímu zpevnování INC během obrábění. Pro snížení tohoto opotřebení je vhodné volit menší úhel $\kappa_r = 45^\circ$ z důvodu menších řezných sil oproti $\kappa_r = 60^\circ$ +. Kromě menších řezných sil je generované teplo při řezném procesu distribuováno přes větší délku řezné hrany. Tento efekt, který lze pozorovat na obr. 7 snižuje velikost vrubu a prodlužuje trvanlivost nástroje. Dále je vhodné volit pozitivní geometrii břitu. Rovněž záleží na stavu obráběného materiálu. Nejmenší vrub se vytváří při obrábění válcovaných polotovarů, největší pak při frézování odlitků. Vrub se vyskytuje spíše u nástrojů z řezné keramiky.



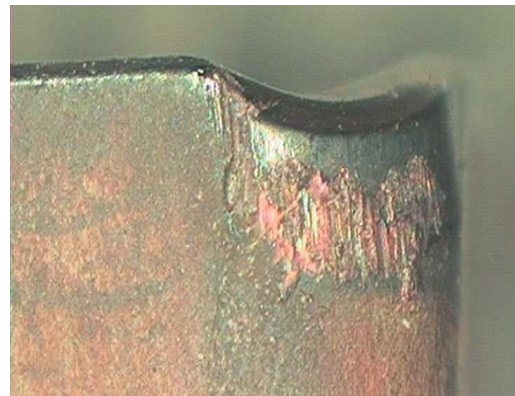
Obrázek 6 Vrub na hlavním ostří [15]



Obrázek 7 Vliv úhlu nastavení hlavního ostří na styčnou délku řezné hrany [9]

Vrub se ovšem vyskytuje i na vedlejším ostří v místě, kde vychází ze záběru. Toto opotřebení vzniká většinou z důvodu přítomnosti chemického otěru a má vliv na výslednou kvalitu obrobenej plochy. Pro předejití je doporučeno volit ochranu řezného nástroje pomocí Al_2O_3 .

Kromě vrubu se rovněž vyskytuje opotřebení v podobě plastické deformace – viz obr. 8. Ta je způsobena vysokou teplotou a tlakem na řezný nástroj. Z toho důvodu je nutná vysoká tvrdost při vyšších teplotách. [15]



Obrázek 8 Plastická deformace řezné hrany [15]

Při obrábění INC lze narazit i na opotřebení v podobě odloupení části břitu – viz obr. 9. Toto opotřebení nastává zejména v případech, kdy není proces obrábění stabilní a to hlavně z hlediska vibrací. Stability procesu lze dosáhnout vyšším počtem zubů v záběru a zásadami uvedenými dále. [15]



Obrázek 9 Opotřebení - odloupení části břitu [15]

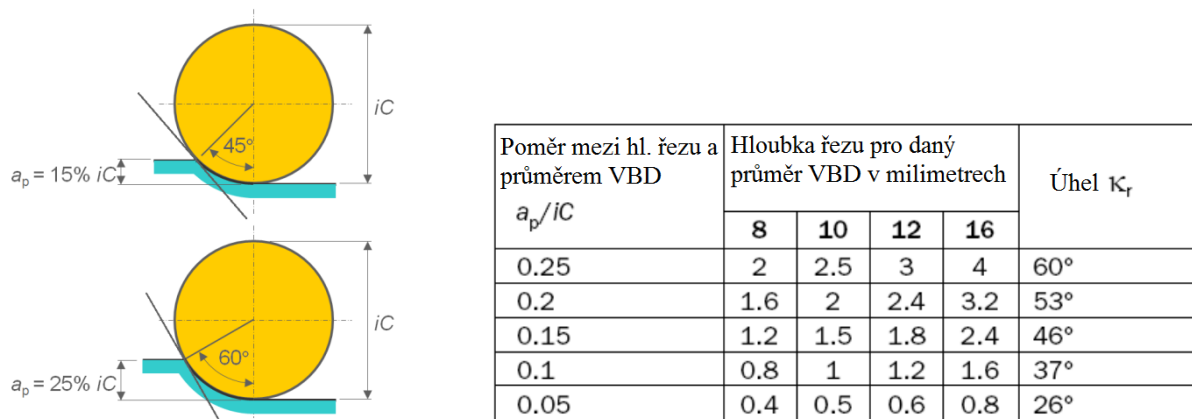
2.4 Doporučení ke strategii obrábění

Obecně je doporučováno volit spíše sousledné frézování pro získání co nejmenší tloušťky třísky na výstupu z materiálu a tím i menší možnost ulpívání třísek na břitu. Nesousledné frézování rovněž zvyšuje míru zpevnění obrobeného povrchu. Nicméně při frézování s nástroji z ŘK je vhodné volit frézování nesousledné z důvodu snížení rázů, na které je ŘK velmi náchylná. Dále je vhodné volit co nejvíce zubů v záběru pro zajištění stabilního procesu řezání bez výrazných rázů. Posuv na zub by měl být volen relativně vyšší pro zajištění doporučené ekvivalentní tloušťky třísky h_e , kterou lze nalézt pro většinu nástrojů určených na tuto aplikaci. [15]

2.4.1 Úhel nastavení hlavního ostří κ_r

Pro produktivní frézování rovinných ploch je nutné dodržovat požadavek na úhel nastavení hlavního ostří κ_r do 45° , přičemž je při použití kruhových VBD tímto požadavkem limitována axiální hloubka řezu a_p . Při nedodržení doporučení a zvýšení κ_r nad 60° dochází k výraznému nárůstu řezných sil a opotřebení ve formě vrubu.

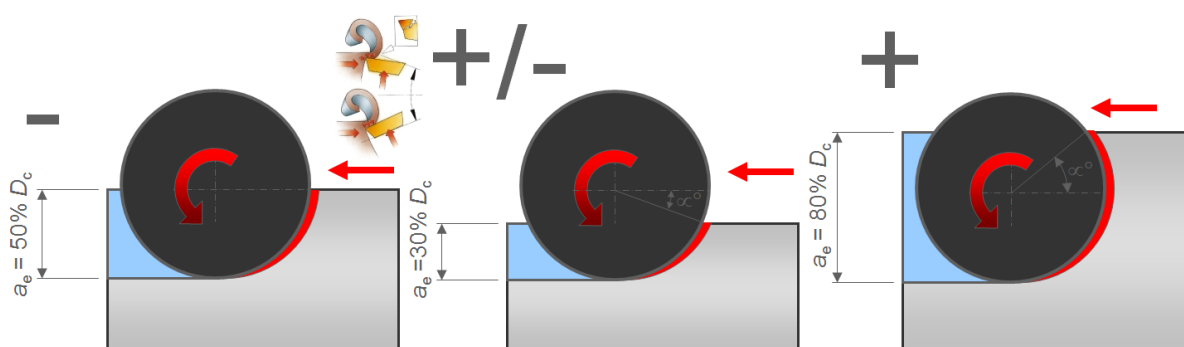
Tento problém lze vidět na obr. 10. Je zde dále uvedena tab. 3, která dává přehled o závislosti úhlu κ_r na průměru VBD a a_p . [15]



Obrázek 10 Ilustrace závislosti úhlu κ_r na a_p [15] Tabulka 3 Závislost úhlu κ_r na průměru VBD a a_p [15]

2.4.2 Tloušťka třísky

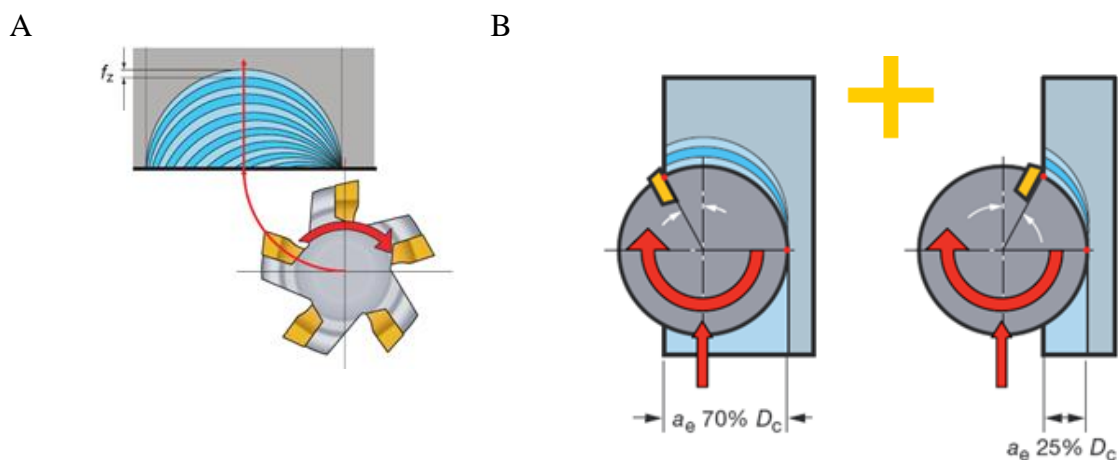
Zásadní vliv na trvanlivost nástroje má také radiální hloubka řezu a_e a její pozice oproti obráběné ploše. S měnící se pozicí nástroje a velikostí a_e se mění tloušťka třísky h_{ex} na výstupu z řezu, což je vidět na obr. 11. Hodnota h_{ex} pak limituje použitelný posuv na zub.



Obrázek 11 Vliv a_e a pozice nástroje na tloušťku třísky na výstupu z řezu [15]

Při první a druhé variantě dochází ke změně z tlakového namáhání VBD na tahové. Tato změna vede k extrémnímu nárůstu opotřebení oproti poslední variantě, kdy je tloušťka třísky na výstupu relativně menší.

K tomuto problému se váže i nájezd frézy do záběru. Výborně lze redukovat h_{ex} pomocí nájezdu tzv. rolováním viz obr. 12 A. Je ale třeba zachovat myšlenku co nejmenší tloušťky třísky na výstupu, což znamená, že nelze rolovat z druhé strany proti směru hodinových ručiček, ale pouze zobrazovaným postupem. Kromě snížení h_{ex} tento nájezd do záběru přináší i snížení vibrací. Rovněž je také důležitá hodnota tloušťky třísky na vstupu do materiálu. Příliš malá či nulová vede ke zpevňování obráběného materiálu. Optimálně je pak vhodné volit průběh obrábění dle obrázku 12 B. Vlevo je varianta pro nejvyšší objemový úběr materiálu, vpravo pro zvýšení posuvu na zub při snižování tloušťky třísky. Není vhodné aplikovat souměrné frézování z důvodu nárůstu h_{ex} .



Obrázek 12 A Doporučený vstup nástroje do materiálu B vstup břitu do materiálu [15]

Při frézování s šířkou záběru a_e rovnou průměru nástroje dochází k většímu tepelnému zatížení nástroje. Nejlepší volbou je pak tenká vrstva CVD díky své stálosti. Při volbě a_e menší než 25% (jak je znázorněno např. na obr. 12 vpravo) dochází ke kratšímu kontaktu břitu nástroje s obrobkem a je pak možné zvýšit řeznou rychlost. Zde se díky možné ostřejší geometrii dobře uplatní tenká vrstva PVD. Celkově je vhodné volit stálé zatížení nástroje a minimalizovat výjezdy z řezu. [15]

2.4.3 Shrnutí

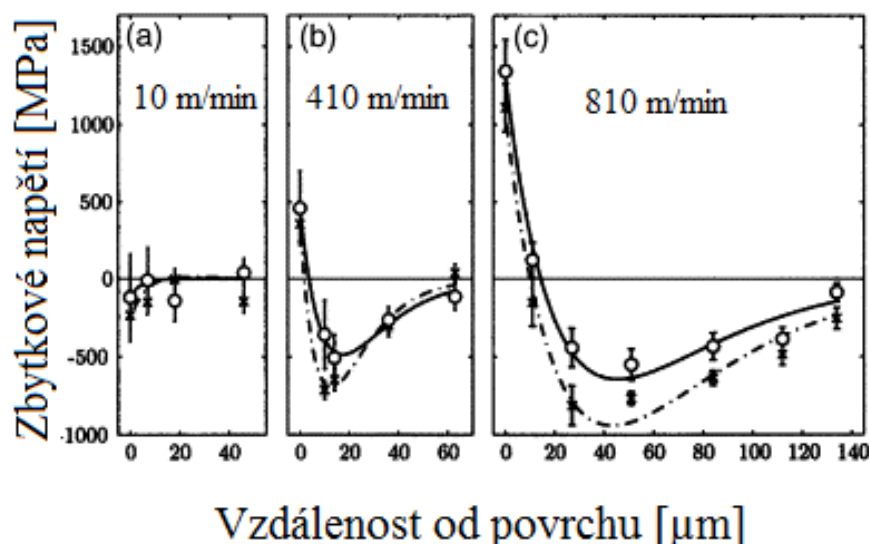
Do velké míry tedy určuje trvanlivost nástroje přístup programátora CNC stroje, jeho znalosti a také možnosti daného programovacího nástroje. Některé z dnes dostupných NC modulů mají implementované velmi užitečné funkce dovolující nasazení obráběcích strategií, které by v dřívějších dobách byly buď neznámé nebo neaplikovatelné pro svoji složitost. S rostoucími požadavky na jakost obrobenej plochy, trvanlivost nástrojů a produktivity obrábění musí být alespoň tato základní doporučení dodržena.

2.5 Jakost obrobené plochy při frézování Inconelu 718

Snaha o snižování hmotnosti konstrukčních prvků vyráběných ze zmiňované slitiny vede k vyšším nárokům na její únavovou pevnost, která je silně ovlivněna procesem obrábění. S ohledem na odolnost proti korozi je jasné, že integrita povrchu je hlavní faktor, který má významný vliv na šíření únavových lomů.

Hlavním problémem je pak například přehřátí či spálení povrchu, nerovnosti povrchu, makro a mikro trhliny, kavity, mikro-defekty jako jsou například vměstky, distorze struktury, fázové změny, tahová zbytková napětí apod.

Zbytková napětí významně ovlivňují únavovou pevnost materiálu. Vysoká tahová zbytková napětí vznikající při obrábění materiálů se sklonem k deformačnímu zpevnování vedou k velkému poklesu únavové pevnosti. Tlaková napětí vedou naopak k růstu únavové pevnosti. Tepelné zatížení povrchu vede k tahovým napětím a mechanické zatížení povrchu pak více k tlakovým napětím. Tento jev je možné pozorovat na grafu 4. Je zde vidět průběh zbytkového napětí ve vzdálenosti několika desítek μm od povrchu po obrábění při podmínkách blízcím se ortogonálnímu řezání. Při nejmenší rezné rychlosti 10 m/min dochází k menšímu tepelnému zatížení obrobku – převládá zde spíše mechanické zatížení, zatímco při rezné rychlosti 810 m/min je viditelné poměrně vysoké tahové napětí vlivem vyššího tepelného zatížení. [8]



Graf 4 Průběh zbytkového napětí ve vrstvě materiálu při podmínkách ortogonálního řezání [8]

Účinek zbytkových napětí je nejvíce znatelný při aplikaci velkých cyklických napětí, kdy nemá materiál čas pro jejich uvolnění.

Kromě únavové pevnosti je zbytkovými napětími ovlivněna i rozměrová přesnost obrobených dílců, která je problémem zejména při montáži sestav. V porovnání s např. nízkouhlíkovou ocelí a slitinou Ti – 6Al – 4V je INC výrazně náchylnější k rozměrové nestabilitě. Byly provedeny testy, které tento fenomén potvrzují. Za stejných řezných podmínek byly dílce ze zmiňovaných materiálů obrobeny a následně změřeny. Po 220 hodinách bylo opět provedeno měření a dílec z INC vykazoval největší změnu rozměru. Tento jev však nelze pozorovat u ostatních niklových super slitin. Dle literatury je tento problém způsoben přítomností γ " fáze ve struktuře. [8]

2.5.1 Faktory ovlivňující zbytková napětí při obrábění slitiny Inconel 718

Významný vliv na velikost a průběh zbytkových napětí má tvar VBD. Obecně kruhové VBD vytvářejí spíše tlaková ZN, zatímco hranaté tahové – ovšem pouze při použití chlazení.

V případě frézování za sucha se vytvářejí jak kruhové, tak hranaté VBD tahová napětí. Je to způsobeno tím, jak je materiál těsně u povrchu extrémně prohřátý a více protažený oproti základnímu materiálu (mez kluzu materiálu je vysokou teplotou významně snížena). Proto se povrch rozpíná a vytváří tak tahové zbytkové napětí. [16]

Geometrie břitu má také vliv na ZN. Pozitivní geometrie vede spíše k tahovým povrchovým napětím a negativní geometrie pak k tlakovým napětím a to zejména díky vyšší plastické deformaci. Nicméně se díky vyšší plastické deformaci zvyšuje i teplota v okolí břitu, čímž dochází za určitých podmínek k přechodu na tahová zbytková napětí.

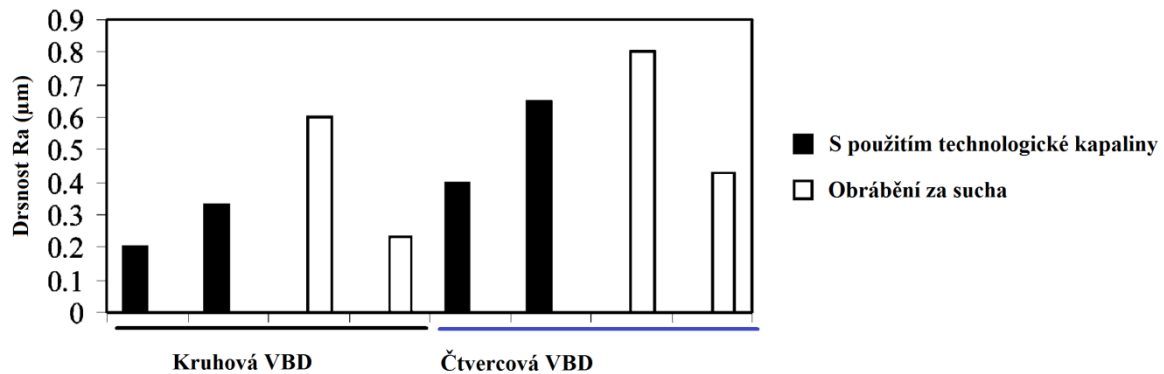
Kromě tvaru a geometrie VBD je rovněž důležitá i preparace řezné hrany. Ostrá řezná hrana vytváří spíše tahové napětí a to jak při obrábění za sucha, tak i při obrábění za mokra. Při použití leštěné či sražené řezné hrany vznikají většinou tlaková zbytková napětí. Tento jev lze jednoduše vysvětlit tím, že při obrábění obrobku vyměnitelnou břitovou destičkou s ostrou řeznou hranou nedochází k významnému stlačení (vneseení tlakového napětí do povrchu) obráběné plochy oproti použití sražené či leštěné řezné hrany.

Hlavním úkolem preparace řezné hrany je pak změna smykových sil na tlakové, které zajistí vyšší odolnost břitu proti odlamování. [16]

Zaoblení špičky břitu (u hranatých VBD) má také vliv na druh a velikost zbytkových napětí. Menší zaoblení přináší spíše tlaková ZN oproti vyšším hodnotám zaoblení 1,2-1,6 mm, která produkují tahová ZN. Nicméně toto tvrzení popírá již řečený mechanický princip – méně ostrá geometrie znamená vyšší tlakové ZN.

V tomto případě je však třeba brát v úvahu špatnou tepelnou vodivost INC. Vzhledem k větší styčné ploše u více zaoblené VBD dochází k většímu tření, a tím pak ke vzniku tepla. Tepelný vliv pak přináší tahová napětí a jeho účinek je vyšší než účinek mechanický. [16]

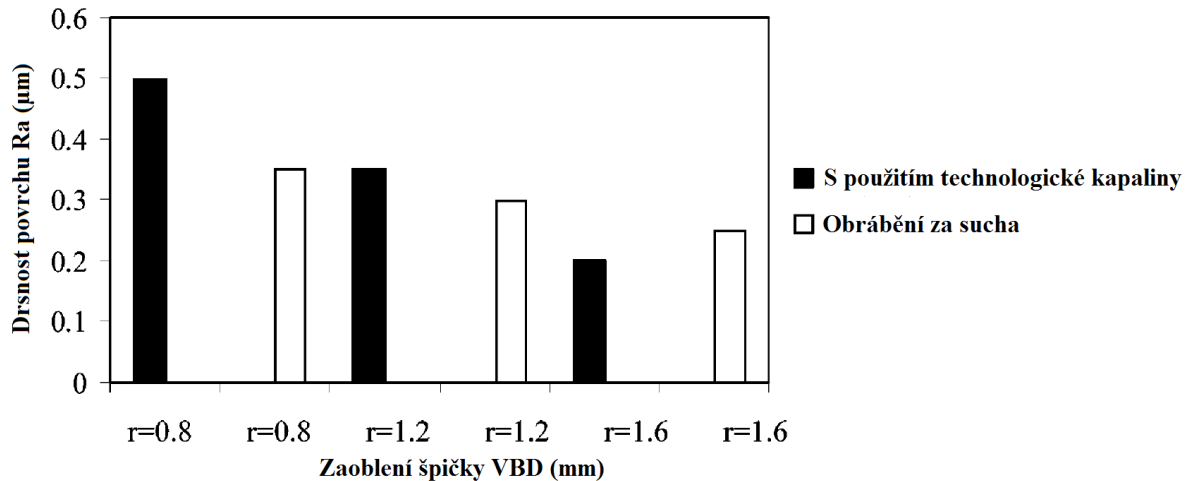
2.5.2 Vliv druhu VBD a řezného prostředí na drsnost obrobené plochy



Graf 5 Závislost drsnosti R_a na typu VBD – soustružení Inconel 718: $v_c=60$ m/min, $f_{ot}=0,1$ mm, $a_p=0,5$ mm [16]

Obecně vytváří kruhové VBD povrch o lepší jakosti díky tomu, že mají větší kontaktní délku oproti hranatým VBD. Tím se pak snižuje výška výstupků zbývajících po průchodu nástroje – výsledkem je menší drsnost obrobené plochy. Na grafu 6 je možné vidět závislost drsnosti R_a na tvaru VBD při soustružení, přičemž je zde zahrnuto obrábění za sucha i při použití technologické kapaliny. Kruhová VBD měla pozitivní úhel čela s leštěnou řeznou hranou a čtvercová pak negativní s ostrou řeznou hranou. V porovnání s frézováním se do jakosti obrobené plochy musí zahrnout přerušovaný řez, ale pro sledování vlivu tvaru VBD je možné použít i data získaná z experimentů soustružení. Kromě tvaru samotné VBD má na jakost obrobené plochy významný vliv i preparace řezné hrany. Leštěná řezná hrana by pak měla vytvářet povrch lepší jakosti v porovnání s ostrou a sraženou řeznou hranou. Horší jakost obrobené plochy při obrábění ostrou řeznou hranou zřejmě souvisí s částečným vylamováním břitu při vstupu do záběru a během obrábění. Leštěná řezná hrana, která má mírné zaoblení, je proti těmto jevům lépe chráněna. Podobného efektu je dosaženo i u sražené řezné hrany.

V grafu 6 je možné vidět závislost drsnosti R_a na radiusu špičky VBD opět při soustružení INC. Může zde být pozorován i vliv použití technologické kapaliny. Lepší drsnost povrchu při obrábění za sucha lze přisuzovat rozptýlenému nárůstku po obrobené ploše díky vyšší teplotě. Při použití technologické kapaliny je povrch chladnější a nedochází pak k vyhlazení povrchu nárůstkem. [16]



Graf 6 Závislost drsnosti povrchu Ra na radiusu špičky VBD při soustružení INC – sražená řezná hrana; řezné podmínky - viz popis grafu 5 [16]

3 Návrh a realizace experimentu

Tato kapitola je zaměřena na ověření informací z teoretické části a dále na účinek chlazení hřbetu VBD včetně kombinací různých režimů přívodu technologické kapaliny k VBD. Pro provedení experimentální části této práce bylo nutné navrhnout některé komponenty.

3.1 Navržené komponenty pro provedení experimentů

K tomu aby se mohla efektivně oplachovat plocha hřbetu, bylo třeba vytvořit speciální modul, který dokáže zajišťovat dávkování technologické kapaliny do potřebných míst i při frézování. Vzhledem k tomu, že je připravována právní ochrana návrhu, nebude v této práci uveden popis daného modulu, ale pouze účinky a přínosy či nevýhody.

Od aplikace technologické kapaliny na hřbet VBD lze očekávat nárůst trvanlivosti VBD díky snížení teploty v místě tření mezi hřbetem VBD a obrobenou plochou. Dále by mělo být dosaženo lepší kontroly zbytkových napětí, a to zejména tahových, která by měla být snížena kvůli menšímu vnesenému teplu do obrobené plochy.

Kromě přívodu TK na hřbet VBD je velmi důležité směrování TK pod třísku, tedy do rozhraní čelo VBD/tříska, jak je to možné vidět na obr. 1, kap. 2.1.3.1 vysokotlaké chlazení. Po zhlédnutí konstrukce několika nástrčných fréz bylo zjištěno, že je směrování TK ze zmiňovaného hlediska nevyhovující - většinou je TK směřována na třísku.

Tento jev lze vidět na obr. 13. Fotografie je pořízena tak, aby byla kolmo k ose kanálu pro přívod technologické kapaliny na VBD. Z tohoto důvodu byl navržen nástroj, který má upravené směřování TK více pod třísku.



Obrázek 13 Nevhodné směřování kanálu pro přívod TK na čelo VBD - běžně používaný nástroj

Ke konstrukci nástroje bylo nejdříve nutné vytvořit odpovídající lůžko pro VBD. Nejedná se totiž o pouhý negativ daného VBD. Vzhledem k použitým VBD v experimentech bylo naskenováno lůžko běžně používaného nástroje a to pomocí opticko – skenovacího zařízení IFM G4. Výstupem byl model ve formátu STL – lze vidět na obr. 14.

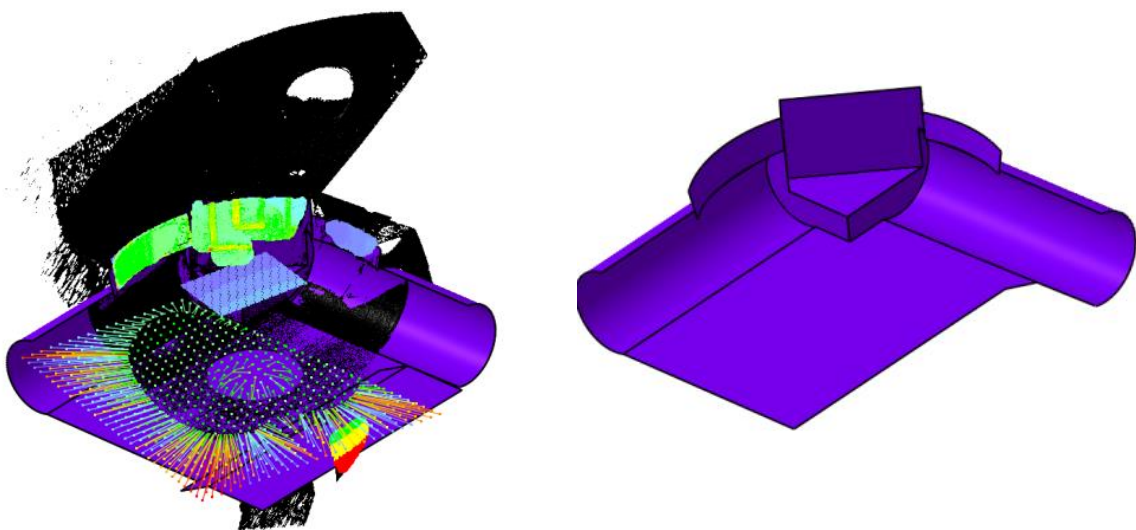
S tímto „mrtvým“ modelem nelze pracovat standardním způsobem. Nelze například sledovat jednotlivé hrany a uchopit plochy modelu. Proto byly použity řezy daným modelem, z nichž je možné získat upravitelné křivky, které lze využít pro získání ploch.

Správnost vytvořených ploch je však potřeba ověřit. Odchylka vymodelovaných ploch od naskenovaného STL modelu byla určena pomocí diferenční analýzy. Diferenční analýza pak vytváří barevnou mapu s vyznačením míry odchylky pomocí barevné škály. Po optimalizaci ploch dle diferenční analýzy nebyly chyby větší než 0,01 mm. Ukázka diferenční analýzy je patrná z obrázku 15 vlevo.

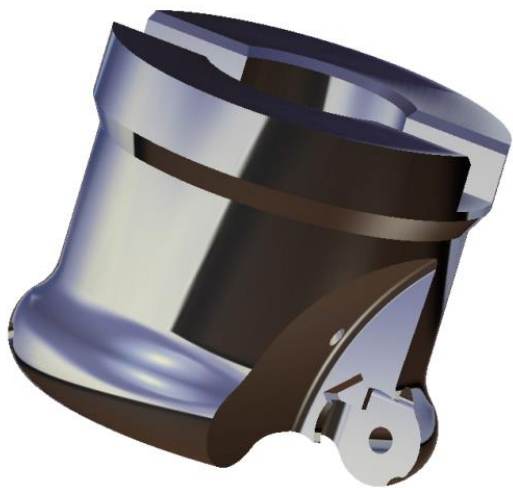
**Obrázek 14 3D sken lůžka VBD**

Uváděná diferenční analýza zobrazuje porovnání zásadních bočních opěrných ploch a spodní části lůžka k navrženým plochám. Červené pruhy na dně lůžka jsou způsobeny nastavením vytvořené plochy charakterizující dno lůžka, která přesahuje přes spodní plochu modelu a vytváří tak dojem nesprávného usazení. Dále je tedy důležité sledovat oblast nad dnem lůžka, kde se vyskytuje pouze zelená barva (na pravé opěrné ploše pak modrá), signalizující správné ustavení a tvar.

Požadovaným výsledkem je pak plocha určující lůžko pro VBD, která je patrná z obrázku 15 vpravo. Tato plocha byla následně uzavřena do tělesa, jehož objem byl odečten od objemu navrženého tělesa nástroje.

**Obrázek 15 Diferenční analýza, výsledná plocha vymežující lůžko VBD**

Těleso nástroje bylo konstruováno s ohledem na velikost VBD a na možnost upínání na trny pro nástrčné frézy, které jsou běžně dostupné. Navržený model frézy lze vidět na obr. 16 vlevo.



Obrázek 16 Model navržené frézy, polotovar frézy po soustružení

Dle výkresové dokumentace byl vyhotoven soustružnický polotovar, který lze vidět na obr. 16 vpravo. Polotovar po soustružení byl poté obroben na 5-ti osém frézovacím centru do finálního tvaru frézy, jejíž fotografie pořízena při měření radiálního házení je na obr. 17.

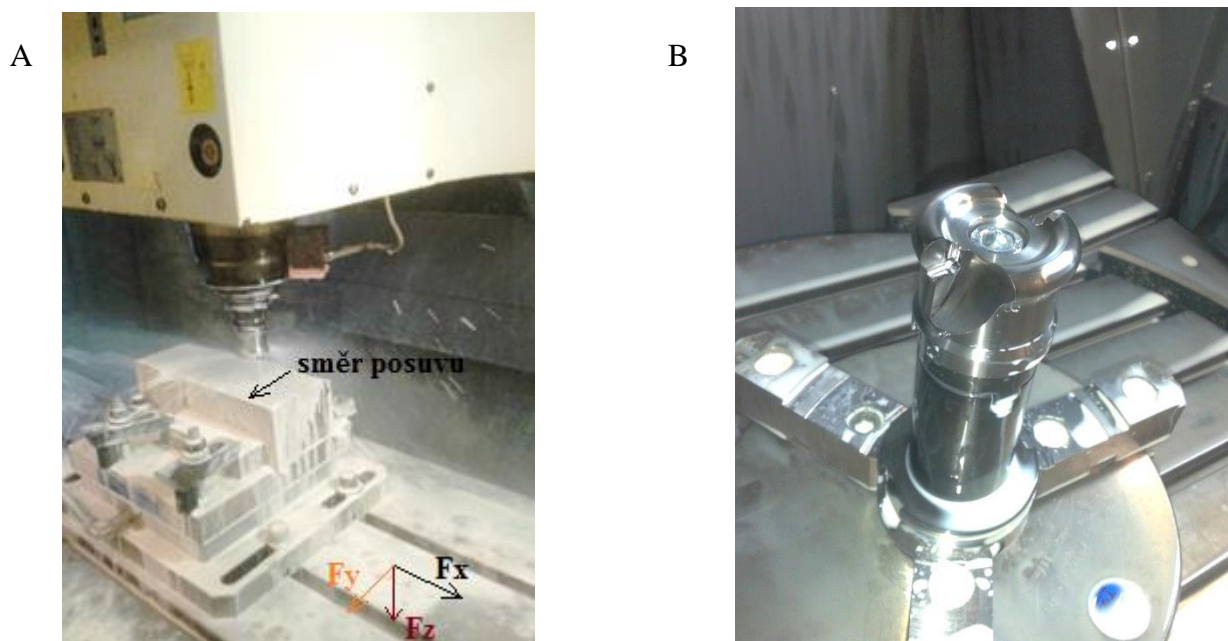


Obrázek 17 Navržená nástrčná fréza

3.2 Experiment

Experiment je zaměřen na porovnání trvanlivosti řezného nástroje při různých režimech chlazení. Dále na změny trvanlivosti nástroje při použití různých řezných materiálů. Během experimentu jsou sledovány řezné síly, opotřebení hřbetu VBD a trvanlivost.

Obrábění bylo realizováno na vzorku slitiny Inconel 718 upnutého na stole obráběcího stroje. Na obrázku 18 A lze vidět snímek z průběhu obrábění včetně upnutí vzorku (osy dynamometru byly sjednoceny s osami stroje). Vzorek byl upnut přes dvě diagonálně umístěné upínky k dynamometru typu Kistler 9255A. Kromě upínek byly použity dvě příložky pro zamezení pohybu v ose Y a dále dva čepy pro zvýšení tuhosti upnutí. Dynamometr byl pak upevněn na stole obráběcího centra pomocí šroubů a upínek. Pro zajištění rovnoměrných materiálových vlastností byl zhotoven metalografický rozbor, z jehož výsledků nebyly zjištěny významné odchylky od standardní struktury INC.



Obrázek 18 A Snímek z průběhu obrábění B Snímek z obrábění navržené čelní frézy

K obrábění byly použity tři druhy kruhových VBD, které měly různé povrchové úpravy. První část experimentu byla provedena pomocí dvou nástrojů. K obrábění byl nejprve použit komerční nástroj, který byl zvolen jako etalon. Vůči němu se pak porovnávaly hodnoty trvanlivosti VBD při použití navrženého nástroje, který měl upravené směřování kanálů pro přívod technologické kapaliny. Na obrázku 18 B lze vidět snímek z obrábění navrženého nástroje (nástrčná čelní fréza). Zajištění správné funkce navrženého nástroje při využití všech třech povrchových úprav VBD bylo zásadní pro zkoumání vlivu směru přívodu TK k VBD.

Druhá část experimentu je totiž zaměřena na vliv přívodu TK k řezné hraně VBD na její trvanlivost (při využití navrženého nástroje a modulu pro přívod TK na hřbet VBD). V této části se kromě směru přívodu TK měnil i její tlak.

3.2.1 Použité technické vybavení

Jak bylo zmíněno, k obrábění vzorku INC byly použity vyměnitelné břitové destičky, které lze vidět na obr. 19. Jedná se o VBD určené pro obrábění superslitin jako je Inconel 718. VBD 1 je opatřena CVD tenkou vrstvou se složením TiN-Ti(CN)-Al₂O₃-Ti(BN) o tloušťce 6 μm. Na VBD 2 je rovněž nanese CVD vrstva se složením TiN-TiB₂ s menší tloušťkou 4 μm. Obě tenké vrstvy vykazují tvrdost 89,3 HRA. VBD 3 je pak VBD 1 se speciální úpravou povrchu. Všechny VBD byly opatřeny jedním druhem utvařeče třísky. Na obr. 19 vpravo pak lze vidět tvar řezné hrany, přičemž úhel hřbetu $\alpha_o = 11^\circ$ a úhel čela v ortogonální rovině $\gamma_o = 15^\circ$. Velmi malá fazeta v nejvyšším bodě řezné hrany by měla vést k nižším řezným silám při současném zajištění dostatečné pevnosti ostří. Pro přehlednost značení jednotlivých VBD lze v tabulce 5 vidět popis použitých VBD.



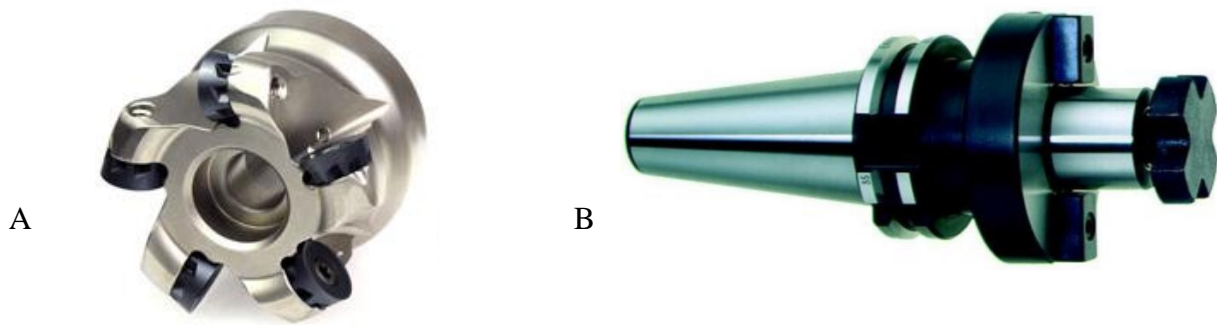
Obrázek 19 Fotografie použitých VBD, tvar jejich řezné hrany

Nástroj	Označení VBD	Tenká vrstva	Tloušťka tenké vrstvy
Etalonový nástroj	VBD1 _E	TiN-Ti(CN)-Al ₂ O ₃ -Ti(BN)	6 μm
	VBD2 _E	TiN-TiB ₂	4 μm
	VBD3 _E	TiN-Ti(CN)-Al ₂ O ₃ -Ti(BN) + úprava	X μm
Navržený nástroj	VBD1 _N	TiN-Ti(CN)-Al ₂ O ₃ -Ti(BN)	6 μm
	VBD2 _N	TiN-TiB ₂	4 μm
	VBD3 _N	TiN-Ti(CN)-Al ₂ O ₃ -Ti(BN) + úprava	X μm

Tabulka 4 Popis a značení použitých VBD

VBD1_E označuje VBD1 upnutou v etalonovém nástroji, index N pak znamená upnutí v navrženém nástroji.

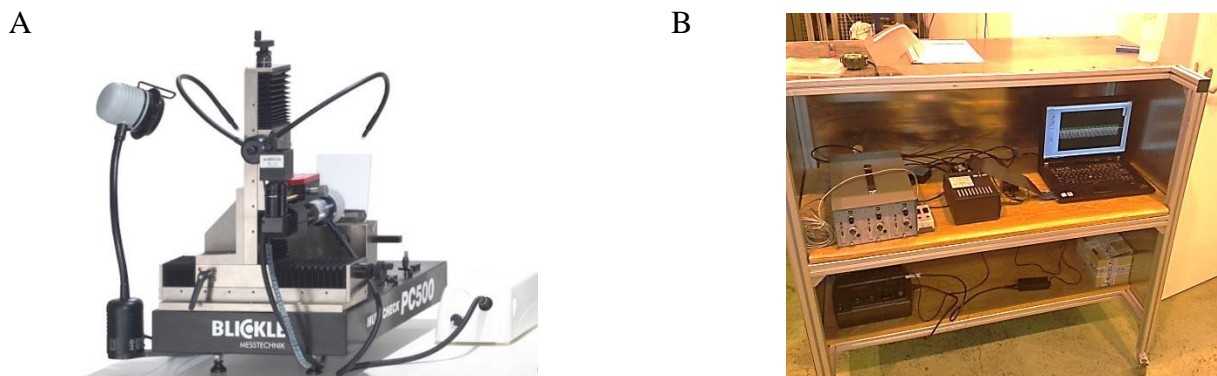
Vyměnitelné břitové destičky byly tedy upnuty do čelních nástrčných fréz. Na obr. 20 A lze vidět etalonovou frézu o průměru 50 mm.



Obrázek 20 A Etalonová fréza [17] B Upínací trn SK 40 [18]

Upnutí nástrojů bylo realizováno pomocí upínače pro frézy s příčnou unášecí drážkou - DIN 69871 s kuželem SK40 viz obr. 20 B. Tento upínač je konstrukčně upraven pro přívod technologické kapaliny středem nástroje.

K měření opotřebení byl použit optický mikroskop Multicheck PC 500 viz obr. 21 A. Pro měření byl zvolen objektiv zajišťující zvětšení 120x. Toto zvětšení umožňovalo efektivní měření opotřebení a zároveň sledování jeho změn. K měření opotřebení bylo rovněž použito opticko-skenovací zařízení IFM G4.



Obrázek 21 A Multicheck PC 500 [22] B Soustava doplňujícího vybavení pro měření sil

Pro měření řezných sil byl použit piezoelektrický dynamometr Kistler 9255C s potřebným vybavením. Konfigurace příslušenství k vlastnímu dynamometru je možné vidět na obr. 21 B.

K obrábění daného vzorku INC byla použita dvě frézovací obráběcí centra a to MCV 750A viz. obr. 22 A a DMG MORI DMU 65 monoBLOCK viz. obr. 22 B. Tyto dva stroje byly voleny zejména z důvodu využití různé velikosti tlaku technologické kapaliny p a za účelem ověření vlivu tuhosti stroje na trvanlivost.



Obrázek 22 A MCV 750A [23] B DMG MORI DMU 65 monoBLOCK® [24]

3.2.2 Volba řezných podmínek

Řezné podmínky byly navrženy dle předchozích zkušeností s obráběním niklových super slitin a dále dle katalogu výrobce použitých VBD. Zvolené řezné podmínky jsou uvedeny v tabulce 4.

		Hodnota
Řezná rychlost	v_c [m/min]	20
Posuv na zub	f_z [mm]	0,18
Radiální hloubka řezu	a_e [mm]	21,4; 10,3
Axiální hloubka řezu	a_p [mm]	0,5
Úhel nastavení hlavního ostří	K_r [°]	24
Vnitřní tlak technologické kapaliny	p [bar]	20,40
Koncentrace technologické kap.	Π [%]	6,5

Tabulka 5 Volené řezné podmínky, nastavení řezného prostředí

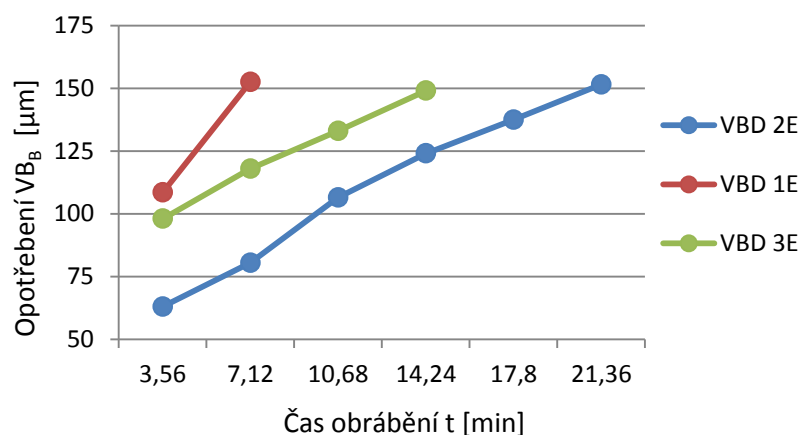
Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.4, kromě řezných podmínek mají významný vliv na trvanlivost řezného nástroje záběrové podmínky. Dle doporučení bylo tedy použito sousledné frézování a najíždění do záběru po radiusu kvůli zajištění co nejmenší možné tloušťky třísky h_{ex} na výstupu ze záběru. Radiální hloubka řezu byla v druhé části experimentu volena tak, aby odpovídala doporučeným 25 % průměru řezného nástroje. Vzhledem k tomu, že účelem této části diplomové práce je i ověření informací z rešerše, byla v první části experimentu zvolena a_e tak, aby odpovídala poloměru nástroje, což je v podstatě nejhorší varianta, která může nastat. Vzhledem k hloubce řezu 0,5 mm byla rovněž zajištěna odpovídající velikost úhlu $K_r < 45^\circ$. Tlak technologické kapaliny byl měněn kvůli zjištění jeho vlivu na trvanlivost řezného nástroje. Je ale třeba poznamenat, že vzhledem k nízké řezné rychlosti nelze očekávat extrémní tepelné zatížení a tudíž zde technologická kapalina slouží spíše k mazání – tedy ke snižování tření mezi třískou a nástrojem.

3.2.3 Rozbor trvanlivosti nástroje s VBD ze tří různých materiálů

Jak již bylo řečeno, pro porovnání etalonového a navrženého nástroje byly provedeny testy prokazující shodu či jen mírnou odchylku v trvanlivosti VBD. Daný test probíhal při řezných podmínkách uvedených v kapitole 3.2.2 - tab. 5, přičemž tlak technologické kapaliny p byl nastaven na 20 bar. Nevhodná a_e pak zřejmě povede k rychlejšímu otupení VBD z důvodu větší tloušťky třísky na vstupu do záběru a dále kvůli většímu množství odebraného materiálu za čas. Tento fakt by však neměl mít významný vliv na posouzení funkce navrženého nástroje. Technologická kapalina byla směřována pouze na čelo, tak jak je tomu standardně.

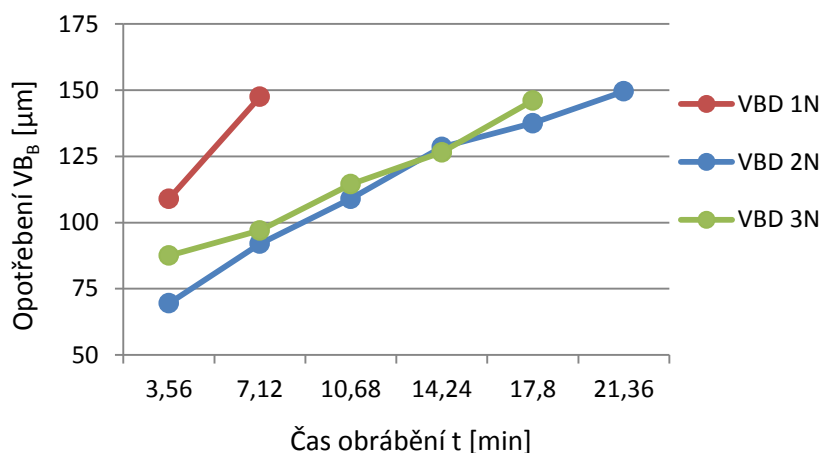
Nejvyšší trvanlivost v etalonovém nástroji vykazovala VBD 2_E se slabší tenkou vrstvou. Tento jev lze pozorovat na grafu 7, kde je znázorněna závislost velikosti opotřebení na čase obrábění. Velmi překvapivá byla nízká trvanlivost VBD 1_E, která oproti VBD 3_E vykazovala nižší trvanlivost. Tento efekt lze zřejmě přisuzovat změněné geometrii VBD a dále ovlivnění napjatosti povrchu VBD 3_E. Tento jev nebyl dále zkoumán, protože dané výsledky vykazoval po opakování měření jak etalonový, tak i navržený nástroj.

Z průběhu opotřebení VBD 2_E bylo určeno jako limitní $VB_{B \text{ lim}} = 150 \mu\text{m}$ z důvodu, že při dalším pokračování frézování již nedocházelo k výraznějšímu nárůstu opotřebení na hřbetu VBD, ale spíše na čele VBD, kde není možné s daným vybavením efektivně sledovat jeho změny. Při příliš velkém limitním opotřebení by pak mohlo dojít k destrukci VBD, což bylo nepřijatelné.



Graf 7 Závislost velikosti opotřebení na čase obrábění při použití etalonového nástroje

Porovnání závislosti opotřebení na čase obrábění při využití navrženého nástroje lze provést na grafu 8. Celkově se dané hodnoty od etalonového nástroje příliš neliší.

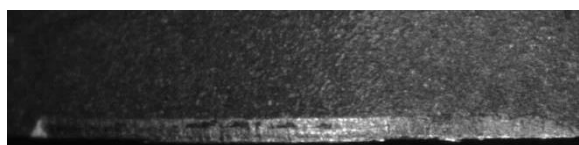


Graf 8 Závislost opotřebení na čase obrábění při použití navrženého nástroje

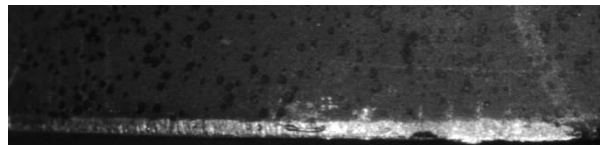
Je však nutné poznamenat, že při použití navrženého nástroje dochází ke zvýšení trvanlivosti VBD 3 o 3,56 min oproti etalonovému nástroji. Tento jev by mohl být způsoben mírně odlišnou orientací kanálů, které směřovaly více na řeznou hranu. VBD 2 tedy opět dosahuje nejvyšší trvanlivosti oproti VBD 1 a VBD 3. Po prvním přejezdu byla VBD 3 opotřebena o 11 μm méně než v etalonovém nástroji. U ostatních VBD nebyl rozdíl tak významný.

Na obr. 23 lze vidět opotřebení VBD 1_N a VBD 3_N po prvním přejezdu, tedy po 3,56 min. Je vidět velmi výrazný rozdíl zejména ve střední části opotřebení. U VBD 3_N i u VBD 1_N lze rovněž pozorovat drobný nárůstek.

A



B



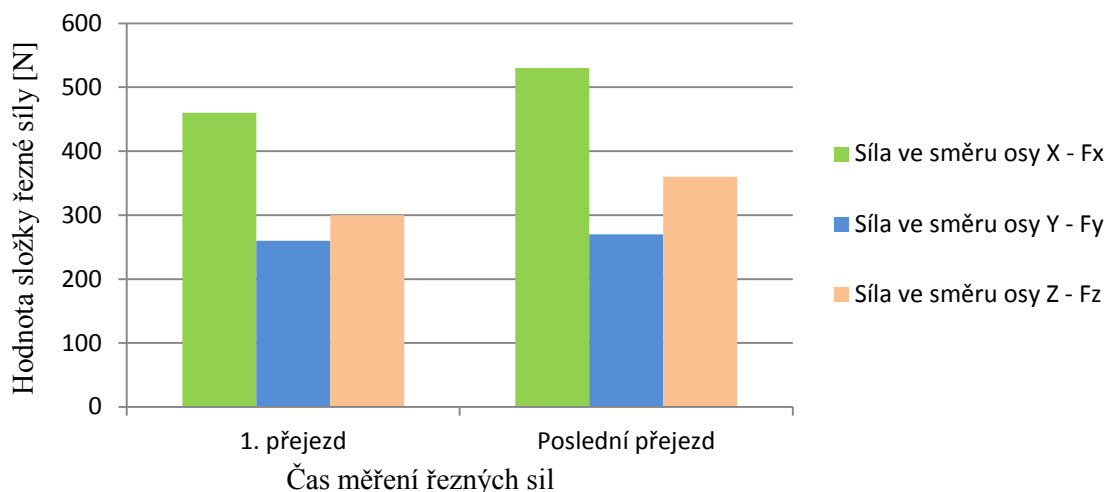
Obrázek 23 A Opotřebení VBD 1 B Opotřebení VBD 3

Opotřebení rostlo v podstatě lineárně s časem, se skokem po prvním přejezdu, kdy došlo k rychlému otupení VBD. Tento jev lze vidět na obr. 24, kde jsou seřazeny fáze otupování po jednotlivých přejezdech. V případě chlazení z čela, které bylo použito při tomto experimentu, je vždy v pravé části všech opotřebení vidět výraznější výstupek (viz obr. 24), který je zřejmě způsoben nedostatečným chlazením a mazáním v oblasti hřbetu VBD. Tento fakt bude probrán v další fázi experimentu.



Obrázek 24 Opatření VBD - zleva VBD 2_N, VBD 3_N, VBD 1_N

Řezné síly byly během obrábění konstantní s tím, že při nízkém opotřebení na začátku byly nižší než po delším čase v řezu. Tento jev lze vidět na grafu 9, kde je závislost řezných sil na čase v řezu - při prvním a posledním přejezdu s VBD 2_N (poslední tzn., při němž bylo dosaženo opotřebení 150 μm). Největší nárůst sil lze pozorovat u síly ve směru osy X - F_x , kde je nárůst téměř 70 N. Nárůst síly ve směru osy Z - F_z je téměř 60 N. Tento efekt vzniká tím, jak se mění tvar řezné hrany s opotřebováním.



Graf 9 Hodnoty složek řezné síly v závislosti na čase měření

Závěrem lze tedy usuzovat, že VBD s nejvyšší trvanlivostí při $V_{B=150}$ μm je VBD 2, která v obou nástrojích vykazuje trvanlivost 21,36 min. Je tomu tak zřejmě díky velmi odolné tenké vrstvě, která zajistila ochranu substrátu před abrazivním opotřebováním vlivem pevnosti a tvrdosti INC. Velmi malou trvanlivost - 7,12 min vykazuje VBD 1 oproti trvanlivosti 17,8 min a 14,24 min, kterých dosáhla VBD 3.

Navržený nástroj je vzhledem k výsledkům použitelný k dalšímu testu i díky vyšší trvanlivosti, kterou v něm vykazuje VBD 3.

3.2.4 Rozbor trvanlivosti nástroje s VBD při různých režimech chlazení

Tato část experimentu je zaměřena na zjištění závislosti trvanlivosti VBD na směru přívodu technologické kapaliny k řezné hraně. Při tomto experimentu byla využita VBD 2, která v předchozím testu vykazovala nejvyšší trvanlivost.

Kromě směru přívodu TK se měnil i její tlak. Nejprve byly provedeny testy při tlaku 20 bar a 40 bar. Poté byl tlak snížen na 10 bar. Snížení tlaku ovšem nepřineslo zaznamenanou změnu opotřebení. Varianta $p=10$ bar již nebyla dále zkoumána.

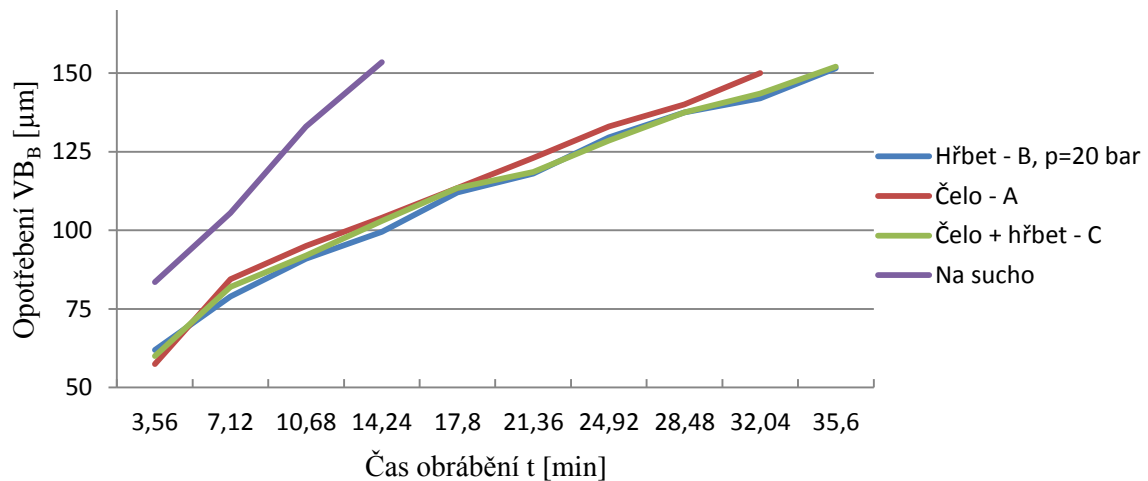
Při testech různých režimů chlazení již bylo dodrženo doporučení $a_e = 25\%$ z průměru nástroje a lze tedy očekávat nárůst trvanlivosti oproti prvnímu testu. Opotřebení bylo měřeno opět na optickém mikroskopu Multicheck PC 500 pro zpřesnění bylo dále využito měření na opticko – skenovacím mikroskopu Infinite Focus G4 od firmy Alicona. Hodnoty konečného opotřebení budou následně srovnávány dle těchto hodnot. Vzhledem ke správnému nastavení řezného procesu bylo limitního opotřebení dosaženo v intervalech po násobku 3,56 min, což byla doba řezu při jednom přejezdu. Hodnoty konečného opotřebení se pak liší v rádech μm ($150 \mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$). Pro přehlednost bude v textu používáno značení jednotlivých variant přívodu technologické kapaliny k řezné hraně VBD dle tabulky 6.

Přívod technologické kapaliny	Na čelo	Na hřbet	Kombinace A+B
Označení v textu	A	B	C

Tabulka 6 Značení variant přívodu technologické kapaliny k VBD

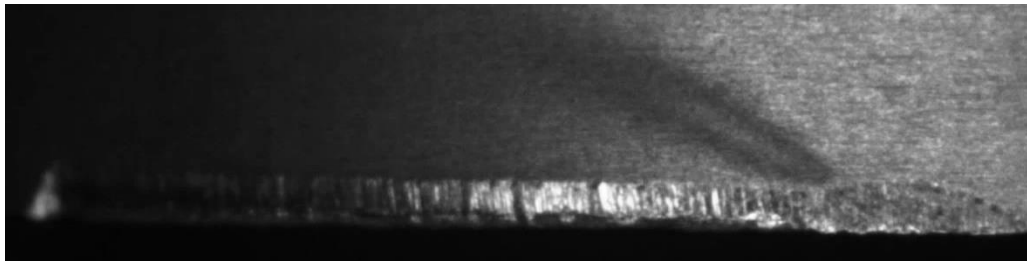
V grafu 10 lze pozorovat změnu trvanlivosti nástroje v závislosti na režimu chlazení. Vzhledem k výsledkům lze konstatovat, že přívod B a C, tedy hřbet a kombinace vede k vyšší trvanlivosti VBD než konvenční chlazení z čela - A. Rozdíl trvanlivosti 3,56 min se projevuje v cca 10 % zvýšení trvanlivosti VBD oproti konvenčnímu přívodu technologické kapaliny A. Lze očekávat, že při vyšších řezných rychlostech bude využití přívodu B a C vykazovat ještě větší zvýšení trvanlivosti.

Velmi důležitý je i poznatek, že při zmenšení radiální šířky řezu a_e z 50 % D_c na 25 % dochází k významnému zvýšení trvanlivosti ve všech variantách přívodu TK. Z grafu 10 lze usuzovat, že při frézování na sucho dochází k extrémnímu opotřebení během velmi krátké doby. Trvanlivost VBD je pak poloviční oproti použití chlazení při jakémkoli režimu jeho přívodu. S chlazením je průběh závislosti v podstatě shodný až na poslední přejezd při využití přívodu B a C. Je nutné konstatovat, že měření opotřebení VBD probíhalo vždy po 3,56 min v řezu.



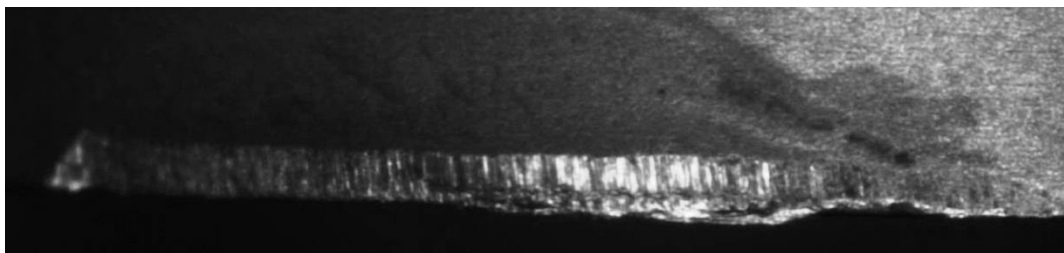
Graf 10 Závislost trvanlivosti VBD na režimu chlazení při p= 20 bar

Kromě změny trvanlivosti VBD s jiným druhem přívodu chlazení je rovněž potřeba sledovat změny formy opotřebení a řezných sil. Při přívodu chlazení A - když p= 20 bar lze pozorovat významnější opotřebení v místě, kde se VBD tře o již obrobený povrch. Tento jev lze vidět na obr. 25 vpravo.



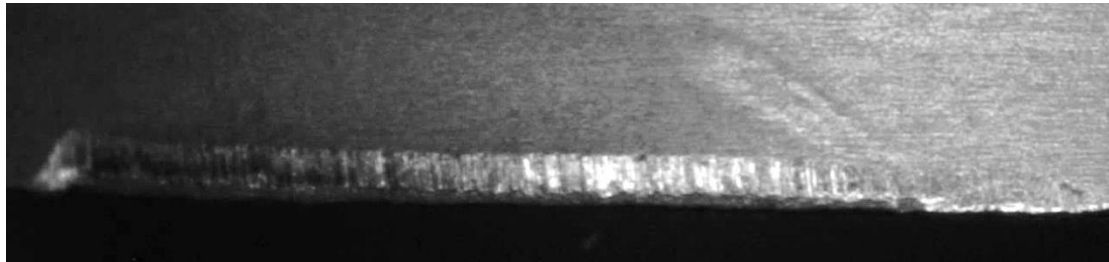
Obrázek 25 Opotřebení 150 μm - chlazení z čela - A

Při použití přívodu chlazení B je možné sledovat vzniklý nárůstek na řezné hraně a určitý úbytek materiálu VBD – lze vidět na obr 26. Nárůstek by mohl mít vliv jak na drsnost a přesnost obrobené plochy, tak i na trvanlivost nástroje. Absence chlazení z čela pak tedy zřejmě vede ke vzniku nárůstku, nicméně je poměrně významně eliminováno opotřebení zmiňované na obr. 25.



Obrázek 26 Opotřebení 150 μm - chlazení ze hřbetu - B

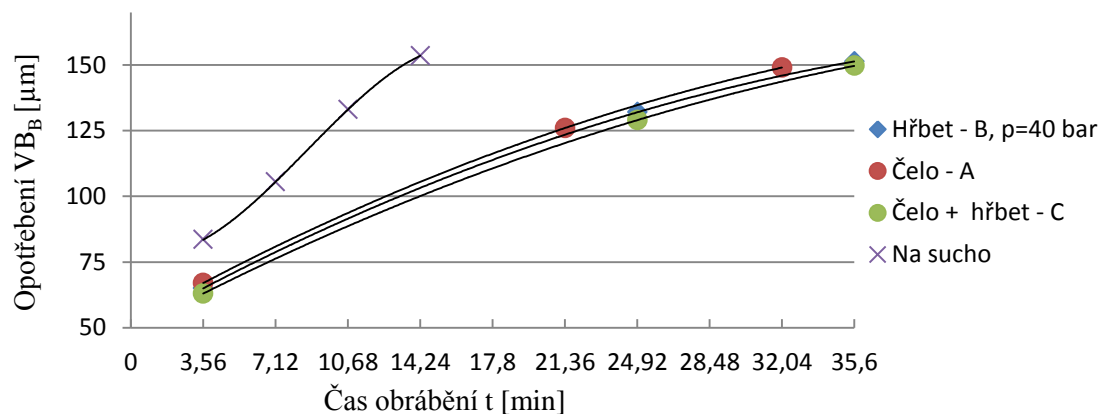
Přívod chlazení C – tedy kombinace A+B vede k eliminaci obou typů opotřebení. Tento fakt lze usuzovat z obr. 27. Přívod chlazení C je tedy výhodný i z hlediska zajištění rovnoměrného průběhu opotřebení na řezné hraně.



Obrázek 27 Opotřebení 150 μm - kombinace přívodu TK na hřbet a čelo VBD - C

Na grafu 11 je možné sledovat průběh závislosti opotřebení na čase v řezu při různých režimech chlazení, když $p = 40$ bar.

Zvýšení tlaku z 20 bar na 40 bar nepřineslo výrazné zvýšení trvanlivosti VBD. Tento jev lze přisuzovat velmi malé řezné rychlosti, která vedla spíše k vyššímu abrazivnímu opotřebení. Při vyšší v_c by zřejmě převládalo opotřebení spojené s velmi vysokými teplotami v místě řezu (difúzní a chemický otěr), u něhož lze změnou tlaku TK docílit zvýšení trvanlivosti VBD. Technologická kapalina v testovaném případě tedy slouží spíše k mazání, tedy ke snižování tření v oblastech jeho vzniku. Vzhledem k časové a finanční náročnosti byly jednotlivé závislosti konstruovány pomocí tří bodů, přičemž čas posledního měření (při kterém bylo dosaženo VB_{lim}) byl odhadnut pomocí průběhu opotřebení z experimentu při $p = 20$ bar. Odhad byl správný, a tak se naměřené hodnoty opotřebení při posledním měření rovnají $150 \mu\text{m} \pm 4 \mu\text{m}$. Pro porovnání je zde rovněž uveden průběh opotřebení při frézování na sucho. Celkové výsledky jsou v podstatě shodné s experimentem při $p = 20$ bar. Nejvyšší trvanlivost vykazovala VBD při přívodu chlazení B a C. Nasazení přívodu chlazení B a C je tedy vhodné a opět přináší zvýšení trvanlivosti.

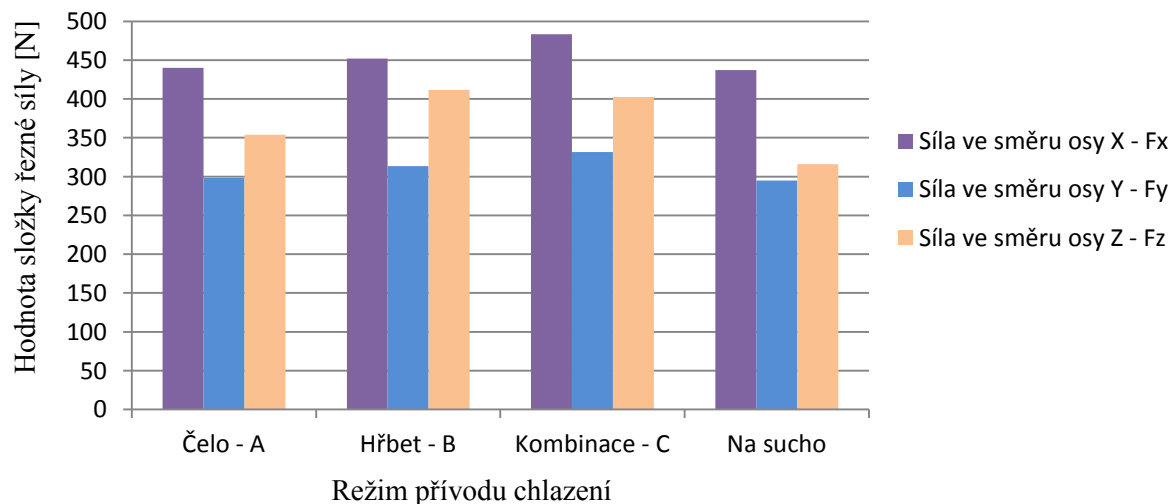


Graf 11 Závislost trvanlivosti VBD na režimu chlazení při $p = 40$ bar

Jak již bylo zmíněno, je důležité sledovat i tvar opotřebení. V případě zvýšení tlaku došlo k výraznému omezení rozdílů ve tvarech opotřebení oproti $p=20$ bar. Tvar opotřebení je u všech variant chlazení v podstatě stejný. Tento fakt je velice důležitý pro návrh řezného prostředí z hlediska jakosti obrobeného povrchu a předvídatelnosti opotřebení VBD, která může kromě drsnosti ovlivnit i přesnost obrábění.

3.2.4.1 Rozbor řezných sil při různých režimech chlazení

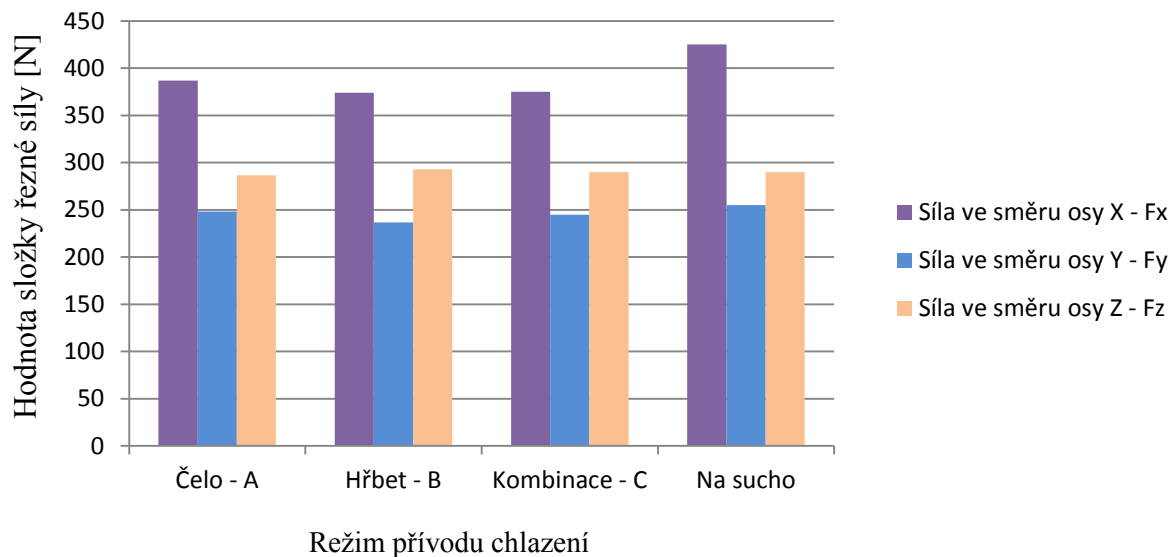
V části experimentu, kde je zkoumán vliv režimu chlazení na trvanlivost nástroje se rovněž sledovaly řezné síly. V grafu 12 je možné sledovat průběh řezných sil při $p=40$ bar s označením příslušného režimu chlazení. Sledované řezné síly jsou naměřené při posledním přejezdu tj. kdy $VB_B = VB_{Blim}$.



Graf 12 Závislost velikosti složek řezné síly na režimu chlazení

Nejvyšších hodnot dosahuje složka ve směru osy X. Nejnižších hodnot nabývá složka ve směru osy Y. Z grafu 12 je patrné, že nejvyšších hodnot řezných sil bylo dosaženo při použití přívodu chlazení B a C. Mohlo by se zdát, že je to chyba chladicího systému. Tento problém je však s největší pravděpodobností způsoben tím, že na rozdíl od chlazení čela - A a obrábění za sucha musela VBD provést ještě další přejezd k dosažení VB_{Blim} . Tento fakt vede k problému se sledováním opotřebení na čele VBD, které je jistě výrazněji ovlivněno delší dobou v řezu než měřená ploška na hřbetu. Zkoumání opotřebení na čele s použitím optického mikroskopu Multicheck PC 500 není efektivní. Proto bude muset následovat analýza jinou metodou měření.

To, že za zvýšením řezné síly stojí rozdílné opotřebení na čele vzniklé jinou dobou řezu, potvrzuje i nejvyšší nárůst složky řezné síly ve směru osy Z. Ten je největší při použití přívodu chlazení B a C (po 10 přejezdech). Nárůst síly ve směru osy Z je zřejmě spojen s otupováním na čele – tedy se znegativněním geometrie VBD. Tento jev bude podrobněji zkoumán v následující kapitole.



Graf 13 Závislost velikosti složek řezné síly na režimu chlazení

Graf 13 je zaměřen na složky řezných sil po prvním přejezdu. Záměrně je řazen až po předchozím výkladu, protože ve své podstatě částečně dokazuje přínos přívodu chlazení B a C oproti přívodu chlazení A či obrábění za sucha. Složky řezné síly jsou logicky oproti poslednímu přejezdu menší. Je možné vidět pokles řezných sil u variant přívodu chlazení B a C. Síly v ose X a Y vykazují nižší hodnoty u zmiňovaných režimů chlazení. Rozdíly však nejsou markantní. Opotřebení se po prvním přejezdu dle grafu 10 téměř neliší, proto nelze očekávat extrémní rozdíly. Síla ve směru osy Z je téměř neovlivněna režimem chlazení, což je fakt, který bude rovněž rozebrán v následující kapitole. V první části experimentu – z grafu 9 je možné pozorovat vyšší hodnoty složek řezné síly a to kvůli větší radiální hloubce řezu, která vede k větší tloušťce třísky na vstupu do materiálu.

3.2.4.2 Rozbor opotřebení opticko – skenovací metodou

Jak již bylo řečeno, pro efektivní sledování opotřebení na čele VBD bylo nutné zvolit jinou metodu vyhodnocení. V daném případě byla využita opticko – skenovací metoda pomocí zařízení Infinite Focus G4 od firmy Alicona. Zmiňované měřicí zařízení lze vidět na obr. 28

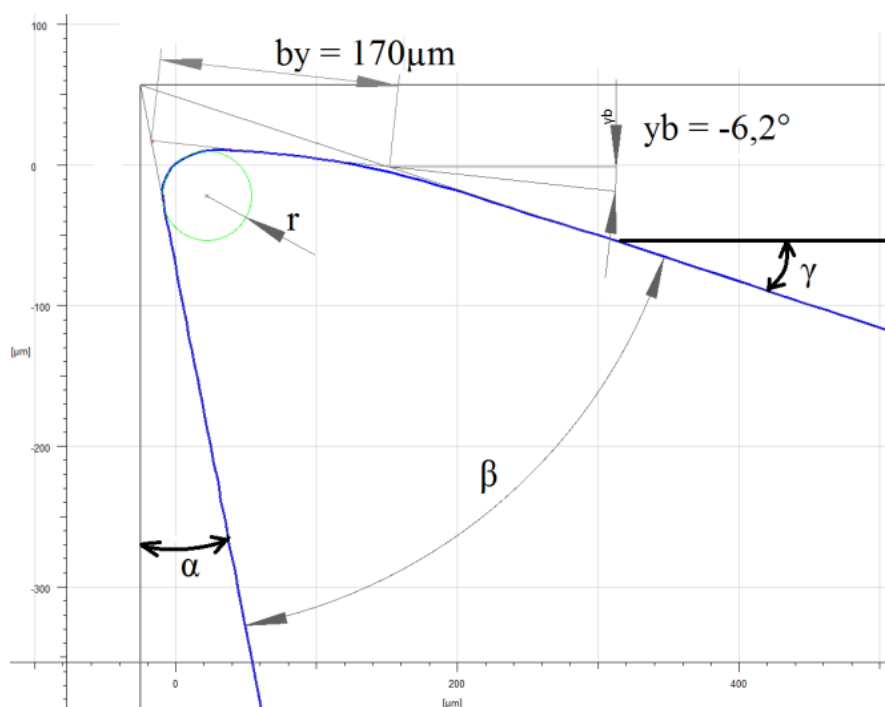


Obrázek 28 Měřicí zařízení Infinite Focus G4 [19]

Z finančních a časových důvodů byla vyhodnocena pouze varianta, při které byl tlak technologické kapaliny $p = 40$ bar.

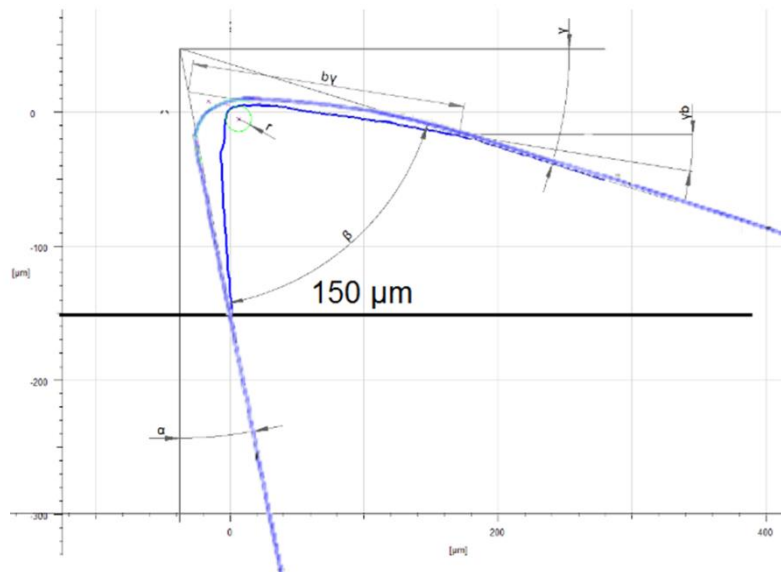
3.2.4.2.1 Vyhodnocení opotřebení metodou řezů

Na obr. 29 lze vidět řez neopotřebenou řeznou hranou VBD. Je vhodné si povšimnout parametrů b_y a y_b , které určují polohu fazety. Z řezu je patrný rádius zaoblení řezné hrany, úhel hřbetu, čela a břitu v ortogonální rovině. Sken této neopotřebované řezné hrany byl použit i pro diferenční analýzu, kdy se softwarově porovnávají povrchy opotřebené a neopotřebené řezné hrany VBD.



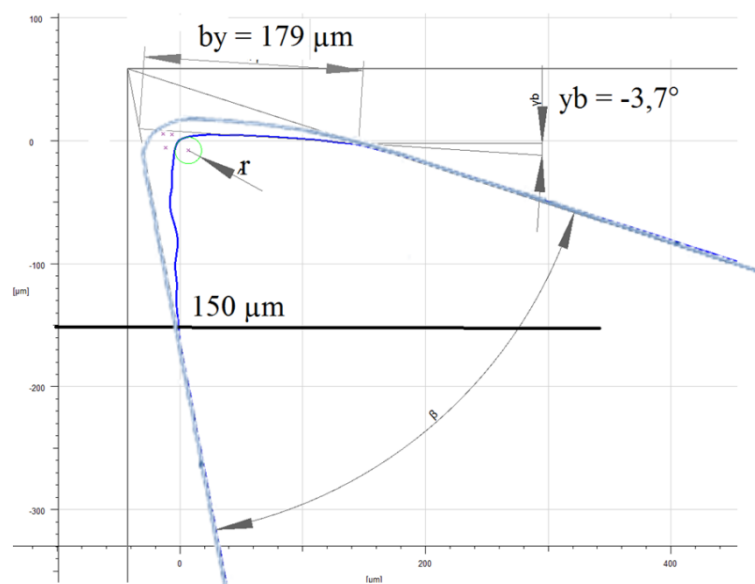
Obrázek 29 Řez neopotřebenou řeznou hranou VBD

Významné opotřebení je možné pozorovat na řezu opotřebenou řeznou hranou VBD při frézování za sucha (viz obr. 30). Největší opotřebení na čele - ve smyslu šířky opotřebení lze pozorovat právě u této varianty. Je v podstatě odstraněna fazeta viditelná na nové řezné hraně.



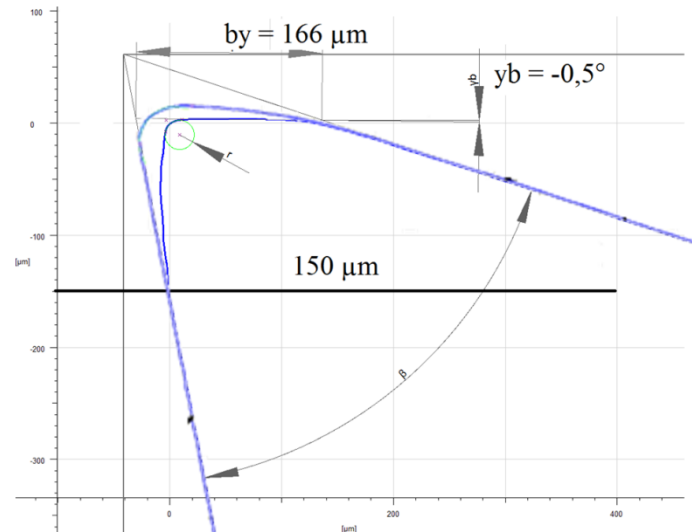
Obrázek 30 Řez opotřebenou řeznou hranou VBD při frézování za sucha

Největší opotřebení na čele při použití přívodu chlazení vykazuje varianta B, kdy byl chlazen pouze hřbet VBD. Tento fakt je logicky odvoditelný. VBD nebyla z čela nijak chlazená a mazací účinek technologické kapaliny nebyl dostatečný. Tento jev lze ověřit na obrázku 31, kde je možné vidět řez opotřebenou řeznou hranou VBD.



Obrázek 31 Řez opotřebenou řeznou hranou VBD při přívodu chlazení B

Oproti přívodu chlazení A a C lze u přívodu chlazení B posoudit i rozšíření plošky, která byla dříve fazetou o určitou hodnotu. Tento jev vede ke zvětšení parametru b_y nad jeho hodnotu u neopotřeбенé řezné hrany. Opotřeбенí na hřbetě VBD při přívodu technologické kapaliny B opět vykazuje $150 \mu\text{m}$. Tento fakt potvrzuje správnost naměřených hodnot při analýze opotřeбенí optickou metodou.

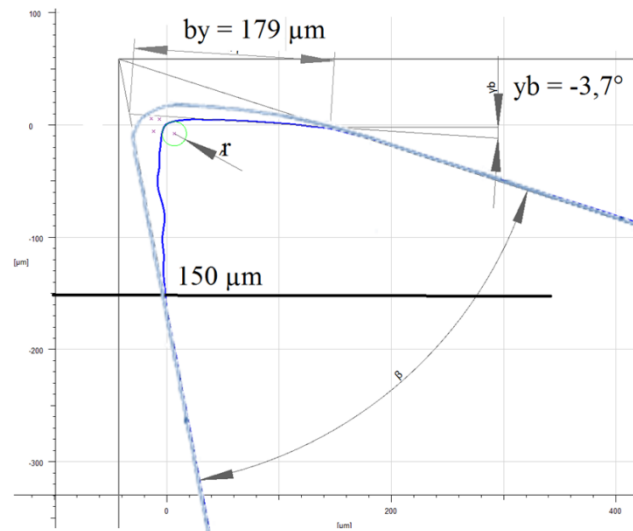


Obrázek 32 Řez opotřeбенou řeznou hranou VBD při přívodu chlazení A

Na obrázku 32 je možné sledovat řez opotřeбенou řeznou hranou při přívodu technologické kapaliny A. Čelo VBD je opotřeбенo abrazivně - bez výmolu. V porovnání s přívodem chlazení B a C je ploška na čele kratší.

Rozdíl v délce plošek na čele ale není nijak významný a lze označit daná opotřeбенí za srovnatelná i s tím, že při přívodu chlazení A bylo odfrézováno méně materiálu vzhledem k nižší trvanlivosti.

Na obr. 33 lze pak vidět řez opotřeбенou řeznou hranou VBD při využití přívodu chlazení C. Jedná se v podstatě o nejlepší variantu, která zajišťuje nižší opotřeбенí na čele VBD (oproti přívodu chlazení B) při v podstatě shodném opotřeбенí na hřbetě VBD jako u varianty přívodu A, kdy bylo odebráno méně materiálu. Je však nutné poznamenat, že na hřbetech VBD u varianty přívodu B a C je možné pozorovat opotřeбенí ve formě rýhy, které vede v podstatě po celé délce opotřeбенí.



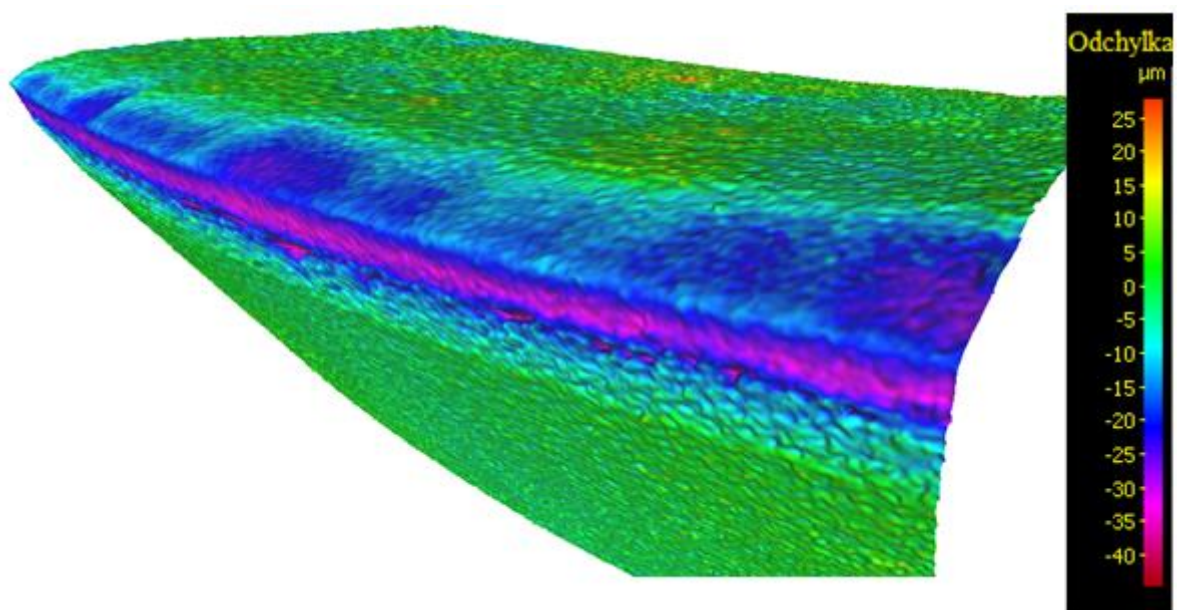
Obrázek 33 Řez opotřebenou řeznou hranou VBD při přívodu chlazení C

3.2.4.2.2 Diferenční analýza opotřebení řezné hrany VBD

Zmiňované opotřebení ve formě rýhy na hřbetě lze pozorovat na obr. 34, kde je znázorněna diferenční analýza opotřebení při přívodu chlazení C. Růžová barva na škále opotřebení ilustruje velmi dobře daný průběh rýhy.

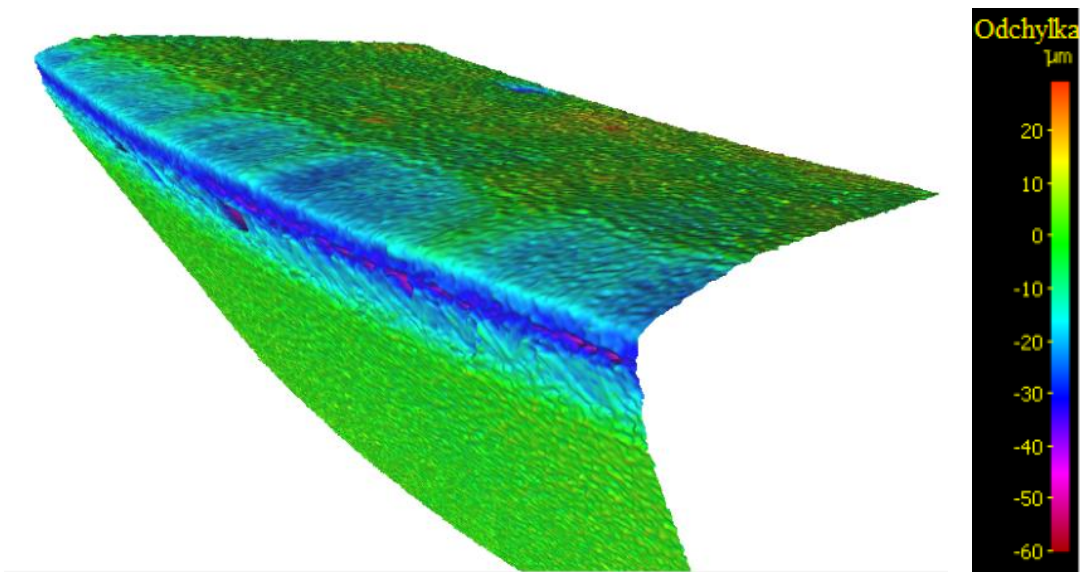
Diferenční analýzou lze sledovat opotřebení po celé jeho délce a množství odebraného materiálu z VBD. V tomto případě je objem opotřebovaného materiálu cca $0,003 \text{ mm}^3$. Ostatní varianty opotřebení nevykazují řádové odlišnosti od této varianty.

Správnost usazení neopotřebované řezné hrany do opotřebované lze posoudit barevným spektrem, vyskytujícím se v částech VBD, jež nebyly opotřebovány. Odchylka ustavení je pak $\pm 5 \mu\text{m}$.



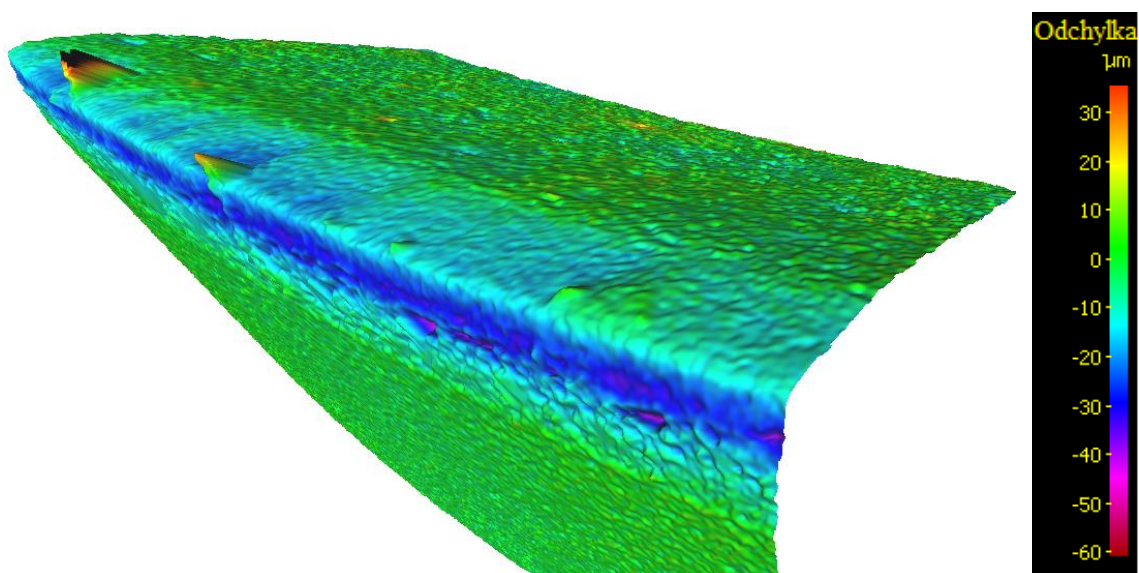
Obrázek 34 Diferenční analýza – neopotřebovaná řezná hrana/opotřebovaná řezná hrana – přívod C

Na obr. 35 pak lze vidět diferenční analýzu při přívodu chlazení B. Barevná škála je odlišná od té u přívodu chlazení C. Není zde proto příliš výrazné již zmiňované opotřebení ve formě rýhy na hřbetě VBD.



Obrázek 35 Diferenční analýza - neopotřebená řezná hrana/opotřebená řezná hrana - přívod B

Obrázek 36 ilustruje diferenční analýzu varianty přívodu chladičí kapaliny A. Opotřebení ve formě rýhy na hřbetě VBD není příliš významné. Vrcholky vyčnívající z povrchu jsou nečistoty nebo třísky ulpělé na povrchu před měřením.



Obrázek 36 Diferenční analýza – neopotřebená řezná hrana/opotřebená řezná hrana - přívod A

Objem opotřebovaného materiálu VBD při variantě přívodu chlazení B je $0,004 \text{ mm}^3$, v případě přívodu chlazení A pak $0,0029 \text{ mm}^3$.

Výsledky diferenční analýzy v podstatě potvrzují závěry vyvozené z řezů opotřebenými řeznými hranami VBD. Největší opotřebení čela lze pozorovat u varianty přívodu chlazení B. Opotřebení na hřbetech VBD je srovnatelné až na opotřebení ve formě rýhy u variant B a C. Objem opotřebeného materiálu z VBD je v podstatě shodný u všech přívodů chlazení. Tento fakt potvrzuje účinnost přívodu chlazení B a C, kdy dochází ke zvýšení trvanlivosti o 3,56 min.

3.2.4.2.3 Shrnutí vyhodnocení opotřebení pomocí opticko – skenovací metody

Hodnocení opotřebení pomocí opticko – skenovací metody potvrdilo účinnost přidavného chlazení hřbetu při frézování Inconelu 718 za daných řezných podmínek. Vzhledem k tvaru opotřebené řezné hrany lze usuzovat, že došlo k určitému znegativnění geometrie VBD, které vedlo ke zvyšování řezných sil. Vzhledem k delšímu času v řezu je patrné opotřebení ve formě rýhy na hřbetu VBD při využití přívodu chlazení B a C. Toto opotřebení zřejmě mělo vliv na zvýšení řezných sil při posledním přejezdu tak, jak je to možné pozorovat v grafu 12.

Kromě zvýšení řezných sil lze také předpokládat zvýšení tlakových zbytkových napětí vlivem vyšší plastické deformace od VBD.

Sledování opotřebení na hřbetu VBD pomocí optického mikroskopu se dle výsledků z opticko - skenovací analýzy zdá být efektivní. Při všech sledovaných variantách bylo naměřeno opotřebení $150 \pm 5 \mu\text{m}$.

4 Vyhodnocení a sumarizace výsledků

V experimentální části této práce byly popsány experimenty obrábění prováděné na vzorku z Inconelu 718. Experimenty byly prováděny za účelem zjištění závislosti trvanlivosti nástroje na materiálu VBD, na směru přívodu TK na čelo VBD a na režimu přívodu technologické kapaliny k řezné hraně VBD.

Pro zjištění závislosti trvanlivosti nástroje na směru přívodu technologické kapaliny na čelo VBD byla zkonstruována fréza, která byla následně vyrobena a použita v testech.

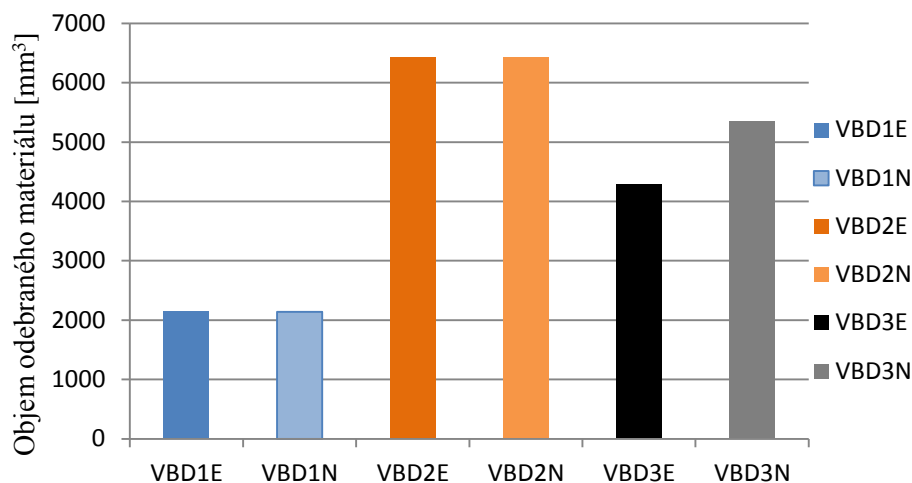
K zajištění přívodu kapaliny na hřbet VBD byl rovněž zkonstruován speciální modul pro nástrčné čelní frézy, na který je připravována právní ochrana.

Při frézování byly v danou dobu měřeny síly v příslušných osách - F_x , F_y , F_z pomocí dynamometru. Opotřebení VBD bylo měřeno na optickém mikroskopu Multicheck PC 500. Rovněž bylo využito opticko - skenovací zařízení IFM G4 pro zpřesnění naměřených hodnot na optickém mikroskopu a dále pro rozbor opotřebení na čele VBD.

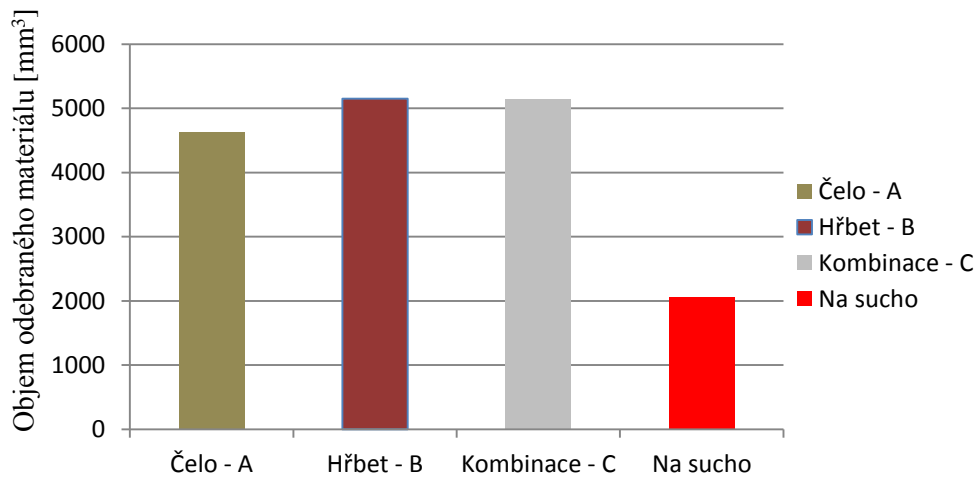
Během testování závislosti trvanlivosti VBD na jejich materiálu bylo zjištěno, že VBD 1 s tenkou vrstvou TiN-Ti(CN)-Al₂O₃-Ti(BN) má nejnižší trvanlivost, a to v jak zkonstruovaném, tak i běžně používaném nástroji. Tento fakt je zřejmě způsoben nevyhovující geometrií řezné hrany či nevhodně zvolenou tenkou vrstvou (daná VBD byla dle katalogu určena pro frézování Inconelu 718). Vyšší trvanlivost vykazovala VBD 3, která je VBD 1 opatřena speciální povrchovou úpravou. Nejvyšší trvanlivosti pak bylo dosaženo s VBD 2, jejíž tenká vrstva TiN-TiB₂ o nejmenší tloušťce zajistila dostatečnou ochranu substrátu proti jeho rychlému poničení.

Při tomto experimentu byla zvolena větší radiální hloubka řezu a_e než je doporučovaná – cca 50 % z řezného průměru nástroje namísto 25 %. Z experimentů vyplývá, že z hlediska opotřebení i velikosti řezných sil je výhodnější volit doporučovanou variantu $a_e = 25 \% D$.

Je však nutné poznamenat, že bylo odebráno jiné množství materiálu a je tedy potřeba zvažovat nasazení daných doporučení v návaznosti na požadavek na množství odebraného materiálu. Tento efekt je možné pozorovat v grafech 14 a 15, kde je množství odebraného materiálu při prvním a druhém experimentu danými VBD při určitých podmínkách přívodu technologické kapaliny na řeznou hranu. Nižší řezné síly sice zajišťují menší namáhání nástroje – VBD, ale za cenu nižší produktivity oproti využití $a_e = 50 \% D$. VBD jde na odebrání stejného množství materiálu vícekrát do záběru, což není vhodné z hlediska rychlosti jejího opotřebení.



Graf 14 Objem odebraného materiálu dle VBD a použitého nástroje - přívod TK z čela, $a_e=50\% D$



Graf 15 Objem odebraného materiálu dle přívodu TK na řeznou hranu VBD - $a_e=25\% D$

Kromě zvýšeného počtu nájezdů do materiálu by tento jev (nedostatečná trvanlivost VBD - nekompensuje nižší a_e) mohl být způsoben i nevyhovujícím posuvem na zub. V případě kdy je použita $a_e=25\% D$, je posuv oproti $a_e=50\% D$ nižší – posuv nástroje je definován ke středu nástroje, reálný je však pouze v případě $a_e=50\% D$. Při použití menší a_e je skutečný posuv na zub nižší.

Z daných grafů tedy vyplývá, že by bylo vhodné najít optimální radiální hloubku řezu vzhledem k trvanlivosti VBD a objemu odebraného materiálu. K získání optimální a_e je vhodné provést další testy, které by využily kombinaci přívodu technologické kapaliny na čelo a hřbet, přičemž by se měnila a_e a sledovala se trvanlivost.

Druhý experiment byl tedy zaměřen na zjištění závislosti trvanlivosti VBD na režimu přívodu technologické kapaliny a dále na zjištění možného přínosu zkonstruovaného chladičného modulu. Výsledky z prvního experimentu byly použity pro volbu VBD a nástroje, který byl v tomto experimentu použit. A to tedy VBD 2 ve zkonstruovaném nástroji.

Výsledky experimentu jasně deklarují, že frézování na sucho nepřináší dostatečné využití potenciálu daného VBD. Dle naměřených hodnot opotřebení je jednoznačně přínosné využití chladičného modulu, a to ať v kombinaci s přívodem chladičí kapaliny z čela nebo bez. Trvanlivost totiž stoupla o 3,56 min v obou případech oproti konvenčnímu chlazení z čela VBD.

Kromě vyšší trvanlivosti VBD má rovněž přívod technologické kapaliny na hřbet VBD pozitivní vliv na dosažení rovnoměrného opotřebení, které bylo bez jeho využití poměrně rozličné. Rovnoměrnost opotřebení je důležitá nejen pro samotnou odolnost VBD, ale i pro jakost a přesnost obrobeneho povrchu.

Měření řezných sil v tomto experimentu přineslo otázku, proč jsou při stejném VB_B rozdílné složky řezné síly. Lze předpokládat, že dochází k znegativnění geometrie VBD. Tento jev mohl být rovněž způsoben nadměrným ochlazením místa řezu, které by za určitých okolností mohlo vést až ke znemožnění jakéhokoli odpevnění obráběného materiálu zvýšenou teplotou. Vzhledem k velmi nízké řezné rychlosti je však tato hypotéza poměrně nepravděpodobná.

Při prvním přejezdu odpovídají naměřené síly předvídatelným hodnotám, tedy že jsou při využití přívodu technologické kapaliny na hřbet VBD nižší oproti obrábění bez chlazení či přívodu kapaliny na čelo VBD. Nejvyšších hodnot dosahovala síla ve směru osy X a to 350 N až 500 N. Bylo tomu tak kvůli způsobu upnutí obrobku a použité strategii obrábění.

Z výsledků experimentů nevyplývá rozdíl v trvanlivosti VBD způsobený odlišnou tuhostí použitých obráběcích strojů.

4.1 Přínos navržené metodiky obrábění

Zvýšení trvanlivosti řezného nástroje bezpochybně přináší úsporu nákladů nejen v podobě menší spotřeby VBD, ale i úsporu v čase - tedy nákladech na jejich výměnu apod. Vzhledem k tomu, že zvýšení trvanlivosti bylo dosaženo pomocí speciálního modulu, na který je vytvářena právní ochrana, není možné přesně vyčíslit možnou úsporu. Kromě jeho ceny je rovněž potřeba započítat i určitý čas a tedy i náklady na jeho seřízení. Velkým přínosem bylo otestování modulu při vyšších řezných rychlostech i u jiných materiálů a sledování úspory nákladů na objemovou jednotku odebraného materiálu.

Kromě zvýšení trvanlivosti nástroje byl dále vyroben navržený nástroj, který lze používat pro obrábění nejen niklových super-slitin, ale i jiných materiálů, k jejichž obrábění lze použít VBD, které lze upnout do navrženého nástroje.

5 Závěr

Dle zadání byla zpracována teoretická část diplomové práce, která je zaměřena na důležité vlastnosti Inconelu 718. Jsou zde shrnuty vlastnosti, které výrazně ovlivňují obrábění této slitiny. Je zde možné najít popis použitelných řezných materiálů s jejich přiřazením ke stavu struktury Inconelu 718 po různém mechanicko-tepelném zpracování. Teoretická část se rovněž zabývá shrnutím doporučení ke strategii frézování, která mohou výrazně pomoci při návrhu řezných podmínek. Poslední část je pak věnována jakosti povrchu Inconelu 718 po obrobení. Jsou zde popsány vlivy na jakost obrobené plochy z hlediska drsnosti a zbytkových napětí.

Zásadní praktická část této práce je zaměřena na trvanlivost nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami při frézování Inconelu 718. Nejprve byly zkonstruovány a následně vyrobeny komponenty, které bylo potřeba zhotovit pro provedení experimentů. Prvním důležitým konstrukčním prvkem byl modul zajišťující přívod technologické kapaliny ke hřbetu VBD. Na tento modul je nyní zahájena právní ochrana, z tohoto důvodu není v práci uveden jakýkoli popis daného modulu. Dalším zkonstruovaným prvkem je nástrčná čelní fréza s upraveným směrováním technologické kapaliny na čelo VBD. Její konstrukce obnášela multioborový přístup. Nejprve bylo zapotřebí zhotovit lůžko pro VBD. Ke konstrukci byl vytvořen model pomocí opticko-skenovacího měřicího zařízení IFM G4. Ten bylo poté potřeba zpracovat v CAD softwaru pro vytvoření ploch, které musely být následně analyzovány pomocí diferenčních analýz. Po vyhotovení lůžka byla fréza obrobená a připravena k použití v experimentální části.

Experimentální část se nejprve zaměřuje na trvanlivost tří vyměnitelných břitových destiček s různou povrchovou úpravou v závislosti na použité čelní nástrčné fréze. Z tohoto experimentu byly vyhodnoceny výsledky a byla jasně definována VBD s nejvhodnější povrchovou úpravou pro frézování Inconelu 718 za daných podmínek. Velmi překvapivě zde selhávala VBD, která byla rovněž určena pro frézování Inconelu 718. Vzhledem k výsledkům vyplynulo potvrzení předpokladu, že je vhodnější směřovat technologickou kapalinu více pod třísku a ne na třísku, jak je to u běžně používaných nástrojů.

Experimentální část se dále zabývá vlivem přívodu technologické kapaliny k řezné hraně VBD na její trvanlivost. K testům byla použita VBD, která byla z předchozího testu označena jako nejvhodnější pro frézování daného materiálu za daných podmínek. Testování probíhalo při dvou tlacích technologické kapaliny, a to při 20 a 40 barech.

Z výsledků vyplynulo, že je nejvýhodnější používat kombinaci přívodu technologické kapaliny zároveň na hřbet a čelo VBD, protože tak dochází ke zvýšení trvanlivosti o 10 % oproti přívodu technologické kapaliny pouze na čelo VBD. Kromě zvýšení trvanlivosti dochází rovněž k zrovnoměnění průběhu opotřebení. Naměřené hodnoty opotřebení byly zkontrolovány pomocí opticko-skenovacího měřicího zařízení IFM G4. Výsledky odpovídaly naměřeným hodnotám na optickém mikroskopu. Nasazení zařízení IFM G4 bylo rovněž voleno ke kontrole opotřebení na čele VBD, které bylo velmi dobře pozorovatelné a z výsledků lze usoudit, že po delším čase v řezu dochází k mírnému znegativnění geometrie VBD.

Lze předpokládat, že kromě zvýšené trvanlivosti VBD přináší přívod technologické kapaliny na hřbet VBD i určité snížení velikosti tahových zbytkových napětí a to díky efektivnějšímu ochlazování obráběné plochy. Bylo by tedy vhodné provést měření zbytkových napětí v obrobeném povrchu pro zjištění dalšího možného přínosu přívodu technologické kapaliny ze hřbetu VBD. Dále by bylo žádoucí zkoumat vliv přívodu technologické kapaliny na jakost obrobené plochy.

Rovněž by bylo vhodné provést testy zaměřené na určení optimálního poměru a_e a trvanlivosti, který by přinášel nejvhodnější kombinaci objemu odebraného materiálu při dodržení jakosti obrobené plochy.

Vzhledem k předpokladu zvýšení účinnosti navrženého modulu při vyšších řezných rychlostech by bylo přínosné provést další experimenty pro potvrzení či vyvrácení této hypotézy. Při těchto experimentech by se nemuselo jednat pouze o frézování Inconelu 718 ale i o frézování nerezových ocelí obecně.

6 Zdroje

- [1] **HpAlloy**. HpAlloy. [Online] [Citace: 9. 11. 2014]
<http://www.hpalloy.com/Alloys/descriptions/INCONEL718.html>
- [2] **BibusMetals**. BibusMetals. *BibusMetals*. [Online] [Citace: 7. 11. 2014]
<http://www.bibusmetals.cz/cs/materialy/nikl-niklove-slitiny/inconelr-alloys/inconelr-alloy-718/>
- [3] **Megamex**. Megamex. [Online] [Citace: 8. 11. 2014]
http://www.megamex.com/inconel_718.html
- [4] **MatWeb**. MatWeb Material Property Data. [Online] [Citace: 9. 11. 2014]
<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=94950a2d209040a09b89952d45086134>
- [5] **Rolledalloys**. Rolledalloys. [Online] [Citace: 8. 11. 2014]
<http://www.rolledalloys.com/alloys/nickel-alloys/718/en/>
- [6] **Saied Azadian, Liu-Ying Wei, Richard Warren**. Delta phase precipitation in Inconel 718. [Online] Materials Characterization, Volume 53, Issue 1, September 2004, Pages 7-16, ISSN 1044-5803, <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchar.2004.07.004>.
- [7] **Sandvik**. Application Guide. [Online] C-2920:034 US/01 © AB Sandvik Coromant 2010.08 [Citace: 12. 12. 2014]
<http://www.sandvik.coromant.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/technical%20guides/en-us/C-2920-034.pdf>
- [8] **D Dudzinski, A Devillez, A Moufki, D Larrouquère, V Zerrouki, J Vigneau**. A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy. [Online] International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 44, Issue 4, March 2004, Pages 439-456, ISSN 0890-6955, [http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00159-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00159-7). [Citace: 5. 10. 2014]
- [9] **Rosemar B. da Silva, Álisson R. Machado, Emmanuel O. Ezugwu, John Bonney, Wisley F. Sales**. Tool life and wear mechanisms in high speed machining of Ti-6Al-4V alloy with PCD tools under various coolant pressures. [Online] Journal of Materials Processing Technology, Volume 213, Issue 8, August 2013, Pages 1459-1464, ISSN 0924-0136 [Citace: 6. 11. 2014] <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.03.008>.
- [10] **E.O. Ezugwu, J. Bonney**. Effect of high-pressure coolant supply when machining nickel-base, Inconel 718, alloy with coated carbide tools. [Online] Journal of Materials Processing Technology, Volumes 153-154, 10 November 2004, Pages 1045-1050, ISSN 0924-0136 [Citace: 20. 11. 2014] <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.329>.
- [11] **M. Rahman, A. Senthil Kumar, M.R. Choudhury**. Identification of Effective Zones for High Pressure Coolant in Milling. [Online] CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 49, Issue 1, 2000, Pages 47-52, ISSN 0007-8506 [Citace: 10. 12. 2014]
[http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62893-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62893-5).
- [12] **C. Courbon, D. Kramar, P. Krajnik, F. Pusavec, J. Rech, J. Kopac**. Investigation of machining performance in high-pressure jet assisted turning of Inconel 718. [Online] An experimental study, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 49, Issue 14, November 2009, Pages 1114-1125, ISSN 0890-6955 [Citace: 8. 10. 2014]
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmactools.2009.07.010>.
- [13] **Ezugwu, E.O.** High speed machining of aero-engine alloys. [Online] J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng. [online]. 2004, vol.26, n.1, pp. 1-11. ISSN 1678-5878 [Citace: 15. 12. 2014]
<http://dx.doi.org/10.1590/S1678-58782004000100001>.
- [14] **Y. Kamata, T. Obikawa**. High speed MQL finish-turning of Inconel 718 with different coated tools. [Online] Journal of Materials Processing Technology, Volumes 192-193, 1

October 2007, Pages 281-286, ISSN 0924-0136 [Citace: 10. 1. 2015]

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.04.052>.

[15] **Sandvik**. [USB]. Flash HRSA. 2014. Není dostupné. [10.12. 2014].

[16] **R.M. Arunachalam, M.A. Mannan, A.C. Spowage**. Surface integrity when machining age hardened Inconel 718 with coated carbide cutting tools. [Online] International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 44, Issue 14, November 2004, Pages 1481-1491, ISSN 0890-6955 [Citace: 20. 12. 2014]

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695504001270>

[17] **Milling, indexable**. OSG, Products. [Online] [Citace: 7. 11. 2014]

http://www.osgtool.com/_branding/osgtool.com/images/products/Indexable_Milling.jpg

[18] **Toolholders**. KFH. Bartoos. [Online] [Citace: 8. 10. 2014]

http://www.bartools.hu/img/katalogus/kfh_din69871.pdf

[19] **Václav Schorník, Miroslav Zetek, Milan Daňa**. The Influence of Working Environment and Cutting Conditions on Milling Nickel – Based Super Alloys with Carbide Tools. [Online] [Citace: 3. 2. 2015]

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815005196>

[20] **Abdullah Cahit Karaoglanli, Kazuhiro Ogawa, Ahmet Türk, Ismail Ozdemir**. Thermal Shock and Cycling Behavior of Thermal Barrier Coatings (TBCs) Used in Gas Turbines. [Online] Progress in Gas Turbine Performance, 2013-06-19 [Citace: 6. 2. 2015]

<http://www.intechopen.com/books/progress-in-gas-turbine-performance/thermal-shock-and-cycling-behavior-of-thermal-barrier-coatings-tbcs-used-in-gas-turbines>

[21] **Phase, diagram**. Wikipedia. [Online] [Citace: 19. 9. 2014]

http://en.wikipedia.org/wiki/Talk%3APhase_diagram#mediaviewer/File:PvT_3D_plot_-_water.png

[22] **Multicheck**. Polimet Service. *ПОЛИМЕТ - СЕРВИС*. [Online] 2014 [Citace: 15. 10. 2014] <http://www.polimetservice.ru/multicheck-pc500g2.html>

[23] **MCV, 750**. Difak. *Difak*. [Online] 2015 [Citace: 4. 3. 2015]

<http://www.difak.cz/index.php?pid=140>

[24]. **DMU, 65MonoBlock**. Mfgnewsweb. *Manufacturing News*. [Online] [Citace: 3. 3. 2015]

<http://www.mfgnewsweb.com/archives/3/2915/General-feb12/DMG--Mori-Seiki-Offers-ULTRASONIC-65-monoBLOCK-and-LASERTEC-65-Shape.aspx>

