

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T004 Strojírenská technologie – technologie
obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Trvanlivost nástroje při frézování slitiny Inconel 718

Autor: **Vojtěch VOZÁR**

Vedoucí práce: **Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**

Akademický rok 2016/2017

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta strojní
Akademický rok: 2016/2017

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

Jméno a příjmení: **Bc. Vojtěch VOZÁR**
Osobní číslo: **S15N0101P**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie - technologie obrábění**
Název tématu: **Trvanlivost nástroje 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 vlastního experimentu
4. Zhodnocení výsledků
5. Závěr

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

Seznam odborné literatury:

- MAJERÍK, J. a ŠANDORA, J. Nové progresívne nástroje a metody technológie obrábania 1. vydanie. 2012. 213 s. ISBN 978-80-8075-515-7
- SKÁLOVÁ, J., KOUTSKÝ, J., MOTYČKA, V. Nauka o materiálech, 2008. 110s. Západočeská univerzita v Plzni
- Grzesik. Wit., Advanced machining process of metallic materials, Oxford, 2008, ISBN 978-0-08-044534-2
- Juneja, B.L., Fundamentals of Metal Cutting and Machine Tools, New Age International, ISBN 978-81-224-1467-7
- Staněk, Jiří, Metodika zpracování a úprava diplomových (bakalářských) prací, Západočeská univerzita, 2005, ISBN 80-7043 363-9

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

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2016**
Termín odevzdání diplomové práce: **2. června 2017**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



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

V Plzni dne 19. října 2016

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: 2. června 2017

.....
podpis autora

Autorská práva

Podle Zákona o právu autorském č.35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17 a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledků bakalářské práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků, nebo jakékoliv nakládání s nimi možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Poděkování

Na tomto místě chci poděkovat vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Miroslavu Zetkovi, Ph.D. za jeho rady, připomínky, odborné vedení a celkovou pomoc, která přispěla k vypracování této práce. Dále pak Tomášovi Bakšovi za podporu při navrhování a provádění experimentu.

V neposlední řadě děkuji své rodině za podporu v průběhu celého studia.

Vojtěch Vozár

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Vozár	Jméno Vojtěch	
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 při frézování slitiny Inconel 718		

FAKULTA	Strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2017
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	74	TEXTOVÁ ČÁST	50	GRAFICKÁ ČÁST	24
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	<p>Diplomová práce se zabývá frézováním slitiny Inconel 718. V teoretické části se píše o materiálu a vlivu stylu obrábění na konečný výsledek. Ve druhé části je proveden experiment, který se snaží odhalit nejlepší nastavení řezných podmínek pro obrábění této slitiny.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	<p>Frézování, slitina, Inconel 718, trvanlivost, experiment, opotřebení, chlazení</p>

SUMMARY OF BACHELOR THESIS

AUTHOR	Surname Vozár	Name Vojtěch	
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	Cutting tool life when milling Inconel 718 alloy		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KTO	SUBMITTED IN	2017
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	74	TEXT PART	50	GRAPHICAL PART	24
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This thesis is focused on milling of Inconel 718 alloy. The theoretical part is focused on the material and the influence of the machining style on the final result. In the second part we can find an experiment. It is trying to find out the best cutting conditions for the machining of this alloy.
KEY WORDS	Milling, alloy, Inconel 718, cutting tool life, experiment, tool wear, cooling

Obsah

1	Úvod.....	11
2	Rozbor současného stavu	12
2.1	Obráběný materiál - Inconel 718	12
2.1.1	Chemické složení	12
2.1.2	Mechanické vlastnosti	13
2.1.3	Použití.....	13
2.1.4	Obrobitelnost materiálu	14
2.1.5	Řezný materiál.....	15
2.1.6	Použití procesní kapaliny	18
2.1.7	Vliv tvaru VBD	21
2.1.8	Otupení břitů	22
2.2	Doporučené řezné podmínky	23
2.3	Vzorce pro výpočty	25
3	Návrh a realizace vlastního experimentu	26
3.1	Varianty obrábění	26
3.1.1	Varianta 1	26
3.1.2	Varianta 2	27
3.1.3	Varianta 3	27
3.2	Etapy experimentu	28
3.2.1	S předfrézováním	28
3.2.2	Bez předfrézování	29
3.2.3	Plný počet břitů	29
3.2.4	Procesní kapalina.....	29
3.3	Vyměnitelná břitová destička	30
3.4	Testovací frézy	30
3.5	Stroj	32
3.5.1	Upnutí obrobku	32
3.6	Měřicí stanice	33
3.7	Naměřené hodnoty.....	34
3.7.1	Trvanlivost + objem odebraného materiálu	34
3.7.2	Průběh nárůstu opotřebení.....	36
4	Zhodnocení výsledků	38
4.1	S předfrézováním.....	38
4.2	Bez předfrézování	39
4.3	Chlazení	39
4.4	Frézování s plně osazenou frézou.....	40
4.5	Hodnocení třísek.....	42
4.5.1	Modely třísek.....	42
4.5.2	Hmotnost třísek	42
4.5.3	Foto třísek.....	43
4.6	Opotřebení břitů.....	44
4.7	Shrnutí	45
5	Závěr.....	46
6	Zdroje	47
6.1	Seznam literatury	47
6.2	Seznam tabulek.....	48
6.3	Seznam obrázků.....	49

6.4	Seznam grafů	50
7	Přílohy	51
7.1	Naměřené hodnoty + foto opotřebení + grafy průběhu opotřebení	51
7.1.1	S předfrézováním.....	51
7.1.2	Bez předfrézování	61
7.1.3	Plný počet břitů	69
7.1.4	Použití procesní kapaliny	71

Přehled použitých zkratk a symbolů

Symbol	Jednotka	Název
σ	[mm]	tolerance
D	[mm]	velký průměr
d	[mm]	malý průměr
x_s	[mm]	Středová úchylka
v_c	[m/min]	řezná rychlost
n	[min ⁻¹]	otáčky vřetene
v_f	[mm/min]	posuvová rychlost
f_z	[mm]	posuv na zub
f_n	[mm]	posuv na otáčku
z_{eff}	[-]	počet efektivních břitů
α_r	[°]	úhel opásání
a_p	[mm]	hloubka řezu
a_e	[mm]	šířka řezu
h_m	[mm]	průměrná tloušťka třísky
h_{ex}	[mm]	maximální tloušťka třísky
η	[%]	účinnost
k_c	[N/mm ²]	měrná řezná síla
$k_{c1.1}$	[N/mm ²]	měrná řezná síla v závislosti na $a_p=1\text{mm}$ a $a_e=1\text{mm}$
Q	[cm ³ /min]	velikost úběru materiálu
P_c	[kW]	výkon vřetene
P_{mot}	[kW]	výkon motoru
M_c	[N/m]	kroučící moment
VBD		vyměnitelná břitová destička
VB	[mm]	opotřebení na hřbetu
VB _C	[mm]	opotřebení v oblasti špičky nástroje
VB _B	[mm]	opotřebení přímé části ostří - průměrné
VB _{Bmax}	[mm]	opotřebení maximální
KB _B	[mm]	šířka žlábků na čele
VB _N	[mm]	opotřebení ve formě vrubu
KT _B	[mm]	hloubka žlábků na čele
r_ϵ	[mm]	poloměr zaoblení špičky nástroje
HRSA		High Resistance Super Alloys
HRC		zkouška tvrdosti dle Rockwella
HV10		zkouška tvrdosti dle Vickerse

1 Úvod

Technologický pokrok je pevně spjatý nejen s novými myšlenkami a pohledy na danou problematiku, ale také s vlastní realizovatelností projektu. Ta dnes v mnohdy neomezeném rozpočtu závisí pouze na existenci vhodného materiálu a zvládnutí technologie vlastního opracování.

Jedním z materiálů s velmi zajímavými vlastnostmi je Inconel 718. Řadí se do skupiny těžkoobrobitelných materiálů. Vyniká svojí vysokou pevností za nízkých i vysokých teplot, korozivzdorností ve velmi náročných podmínkách a nízkou teplotní vodivostí. Díky těmto parametrům našel svoje uplatnění jako materiál součástí vystavených extrémnímu zatížení při nejnáročnějších aplikacích. Příkladem jsou části spalovacích turbín, plechové díly letadel, či součásti raketoplánů. S jeho nasazením jako materiálu pro výroby je nutno řešit technologické postupy k dosažení optimálního řezného výkonu. V současnosti je obrábění Inconelu 718 konvenčními metodami velký problém z hlediska hospodárnosti. Hledání vhodných parametrů a zvýšení produktivity obrábění tohoto materiálu bylo podnětem k zadání experimentu.

Diplomová práce se zabývá vlivem nastavení jednotlivých parametrů na trvanlivost vyměnitelné břitové destičky. Byly zvoleny 3 varianty nastavení řezných podmínek, které se vzájemně porovnávaly.

Prvotně bylo důležité zjistit základní informace o obráběném materiálu. Popsání stěžejních vlastností napomůže předvídat chování při obrábění. Zkušenosti předchozích výzkumníků popsané v odborné literatuře jsou nápomocné při výběru vhodného materiálu VBD. Jednotlivé materiály mají své klady i zápory. Jde o výběr přijatelného kompromisu. Při obrábění dochází ke vzniku opotřebení, které je také nutno identifikovat. Mezi poslední body teoretické části patří shrnutí doporučeného nastavení řezných podmínek, úhlů nastavení a vliv použití procesní kapaliny.

Druhá část práce se věnuje samotným variantám obrábění a etapám experimentu. Jsou zde popsány použité nástroje, VBD a přístroje použitých při experimentu. Důležité je i sepsání naměřených výsledků.

Třetí část pojednává o výsledcích. Posuzuje se zde vliv jednotlivých řezných parametrů a způsobů obrábění při rovinném frézování kruhovou vyměnitelnou břitovou destičkou.

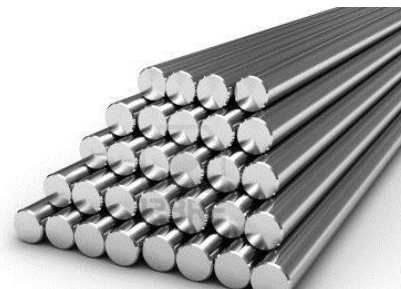
Poslední kapitola se věnuje shrnutí výsledků a teorií vzniklých při vyhodnocování experimentu. Dále se zde popisuje celkový pohled na práci a stupeň splnění vstupních požadavků při zadání práce.

2 Rozbor současného stavu

2.1 Obráběný materiál - Inconel 718

(W.Nr. 2.4668; UNS N07718)

Materiál patří do skupiny ISO S, tedy mezi žáruvzdorné superslitiny. Tato skupina obsahuje vysokolegované oceli a slitiny na bázi niklu, kobaltu a titanu. Hlavními znaky superslitiny Inconel 718 je vysoká žárupevnost, žáruvzdornost, značná únavová pevnost a rozměrová stálost. Obecně u těchto materiálů často dochází k nalepování na břit a následnému tvoření nárůstku. Ten může ovlivňovat kvalitu obrobené plochy. Při obrábění se tyto materiály mechanicky zpevňují a vzniká velké množství tepla. Obrábění je obecně velmi obtížné a trvanlivost břitu nízká. Při zahřátí materiálu na vysokou teplotu se na povrchu tvoří stabilní oxidický povlak, který funguje jako ochranná vrstva. Díky tvoření této vrstvy je umožněno použití materiálu při extrémních teplotách, tlacích a v silně oxidačních prostředích. Odolává například i kyselině solné. Pevnost je stabilní u velkého rozmezí teplot.



Obr. 1 Inconel 718[23]

Historie slitin Inconelu se píše od roku 1940, kdy byl vyvinut výzkumným týmem v anglickém Herefordu. Slitina byla tvořena za účelem použití v proudových motorech, ale díky svým jedinečným vlastnostem se rozšířila i do dalších odvětví průmyslu. Samotný název Inconel je registrovanou obchodní značkou firmy Special Metals Corporation, která sídlí v Americe. [3][22]

2.1.1 Chemické složení

Inconel 718 má největší zastoupení niklu a chromu. Důležitou složkou je niob. Za vysokých teplot dochází u oceli a hliníku k poklesu pevnosti. Niob tvoří s niklem sloučeninu Ni_3Nb . Tato sloučenina s podobou kubických krystalů zvyšuje teplotní odolnost a snižuje objemovou roztažnost. Molybden a měď zvyšují korozní odolnost. Inconel obsahuje malé množství uhlíku. Jeho přítomnost je nežádoucí, jelikož spolu s dalšími prvky tvoří karbidové sloučeniny, které by zhoršovaly požadované vlastnosti. Jejich shlukování po hranicích zrn by mělo za následek snížení mechanické odolnosti za vyšších teplot. Zároveň by se snížila korozivzdornost. [3][22]

Přesné procentní zastoupení jednotlivých prvků v tabulce níže.

Prvek	Zastoupení [%]	Prvek	Zastoupení [%]
Ni	50-55	Al	0,65-1,15
Cr	17-21	Ti	0,3
Fe	Zbytek	Si	0,35
Mo	2,8-3,3	C	0,08
Nb	4,75-5,5	S	0,015
Co	1	P	0,015
Mn	0,35	B	0,006
Cu	0,2-0,8		

Tab. 1 Chemické složení Inconelu 718 [23]

2.1.2 Mechanické vlastnosti

Inconel 718 má velmi vysokou pevnost a to i za extrémních teplot – jak vysokých, tak i nízkých. Hodnotu tvrdosti ovlivňuje způsob tepelné úpravy. Žihání vykáže hodnotu tvrdosti kolem 23 HRC. Vytvrzováním se tvrdost může zvednout až na hodnotu 44 HRC. Výjimečnou vlastností Inconelu je korozní odolnost za vysokých teplot způsobená vznikem vrstvy oxidů na povrchové vrstvě. [3][22]

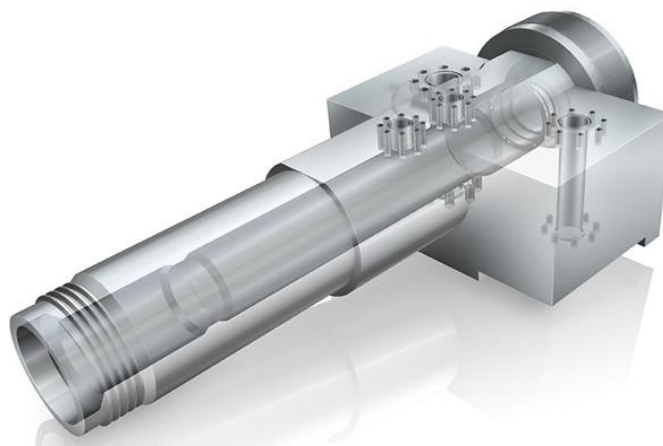
Konkrétní hodnoty mechanických vlastností v tabulce níže.

Vlastnost	Hodnota
Pevnost v tahu	1310 Mpa
Mez kluzu	1110 Mpa
Modul pružnosti v tahu	206 Gpa
Modul pružnosti ve smyku	77,2 Gpa
Tvrdost (HV10)	420
Tvrdost (HRC)	36
Hustota	8,19 g/cm ³
Teplota tavení	1260-1336 °C
Teplná vodivost	11,2 W/mK
Použitelnost	-280 – +800°C

Tab. 2 Mechanické vlastnosti Inconelu 718 [23]

2.1.3 Použití

Vlastnosti Inconelu 718 umožňují jeho využití v nejrůznějších odvětvích. Svoji nedílnou součást našel v leteckém průmyslu, kde se používá na části motoru a turbín. Automotiv jej využívá pro součásti turbodmychadel a ventilů. V lékařství jej lze použít na výrobu implantátů, jako jsou kyčelní klouby, výztuhy použité při komplikovaných zlomeninách, nebo jako materiál zubních implantátů. Dalšími příklady použití jsou díly v kosmickém a ropném průmyslu, vysoce korozivní a speciální aplikace, části spalovacích motorů, plynové turbíny, těsnění, čerpadla, výfukové systémy, kotle spaloven, pouzdra, nebo nádrže raket na tuhá paliva. [3][22]



Obr. 2 Inconel 718 - Oil industry[5]

2.1.4 Obrobitelnost materiálu

Inconel patří mezi těžce obrobitelné materiály. Klasické konvenční metody mají problémy kvůli nepříznivým mechanickým vlastnostem materiálu. U Inconelu dochází po oddělení třísky k zpevňování obrobené vrstvy. Ta se současně plasticky deformuje. Pokud je materiál obráběn s nízkou hloubkou řezu a_p , břit je velmi namáhán a následkem je rychlé otupení. Doporučuje se tedy minimalizovat počet přejezdů za použití tvrdého nástroje.

Velkou roli hraje tepelná úprava obrobku. Například normalizační žihání přispívá k lepší obrobitelnosti.

Vysoké opotřebení břitu je také způsobeno vysokými teplotami, které jsou následkem nízké tepelné vodivosti materiálu a vysoké pevnosti materiálu. Na břit působí velmi vysoké řezné síly, které dosahují hodnot přesahující hranici 3000 N/mm^2 . Přítomnost částic karbidů ve struktuře materiálu má za následek zvyšování abrazivního otěru. V kombinaci s nízkou tepelnou vodivostí dosahují teploty řezání hodnot přesahujících 1150°C .

Vhodné je proto použití chlazení. Procesní kapalina má několik kladných vlastností. Výrazně ochlazuje nástroj, obrobek a třísku. Dále zlepšuje mazací schopnosti. Negativním vlivem procesní kapaliny může být, při určité teplotě, tvorba skvrn na obrobeném povrchu. Tyto skvrny musí být odstraněny pomocí čistících prostředků. Nezbytné je tento krok provést před tepelným zpracováním součásti. Samotný způsob chlazení ovlivňuje například i velikost povrchového napětí obrobku. Při obrábění „na sucho“ je hloubka vrstvy, ve které vzniká povrchové napětí, až o polovinu nižší, než při chlazení kapalinou. Osvědčilo se použití velkého objemu kapaliny při velkých tlacích. Jako nejlepší volba se zdá použití kryogenního chlazení. To dosahuje nejlepších výsledků při současném chlazení nástroje i obrobku. Výrazně se zvyšuje pevnost

Volbu řezných parametrů je nutné upravit již podle zvoleného polotovaru. Je nutné si uvědomit, jestli se jedná o válcovaný polotovar, odlitek nebo výkovek. Jednotlivé typy mají rozdílné vlastnosti. Výkovky se vyznačují vyšší zrnitostí struktury. Volí se zde vyšší řezná rychlost a nižší posuv na zub. Hodnota posuvu se pohybuje kolem $0,1 \text{ mm/zub}$. Výkovek má jemnozrnnou strukturu, která docílí vyšší pevnosti. Řezná rychlost se oproti předchozí variantě snižuje a zvyšuje se hodnota posuvové rychlosti. Touto úpravou se docílí vyšší trvanlivosti nástroje, při zachování vyššího objemu odebraného materiálu. Válcovaný polotovar je ze všech možností nejlépe obrobitelný. Takto připravený polotovar má nejlepší vliv na hodnotu opotřebení břitové destičky.

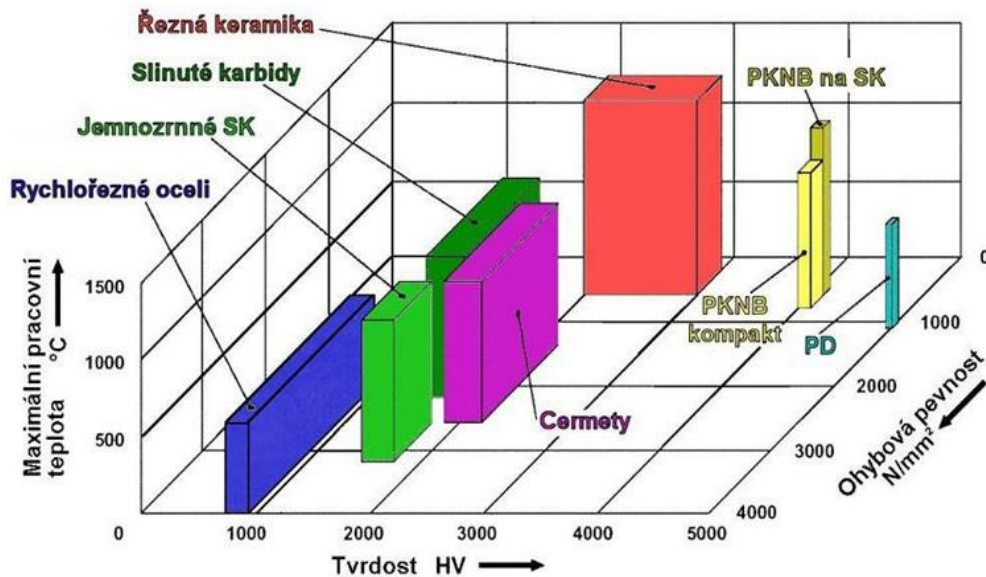
Vysoké hodnoty mechanických vlastností se také promítají při výběru obráběcího stroje. V porovnání s obráběním klasických uhlíkových ocelí je zde potřeba vyššího výkonu. To je dáno značným řezným odporem materiálu. Namáhání stroje lze korigovat nastavením parametrů obrábění. Nastavením hloubky a šířky řezu, posuvové rychlosti a geometrie nástroje je potřeba docílit maximální hodnoty nepřesahující možnosti stroje. Je třeba dávat pozor hlavně u použití břitových destiček ze slinutého karbidu a nastavení nižších otáček. Tam je potřeba značný kroučící moment M_c . Z toho důvodu je nutné kontrolovat u frézky nejen hodnotu maximálního výkonu vřetene, ale také kroučící moment v závislosti na otáčkách. Přetížený stroj může mít negativní vliv na konstantní tloušťku třísky a stabilitu obrábění.

Při obrábění těžkoobrobitelných materiálů je potřeba zajistit přesný řez nástroje. Nekonstantní zatížení VBD vede ke špatně odhadnutelnému průběhu opotřebení řezné hrany nástroje. Takový proces představuje riziko v podobě nepředvídaného selhání VBD a případného poškození kvality obráběné plochy. [4][22][3][9]

2.1.5 Řezný materiál

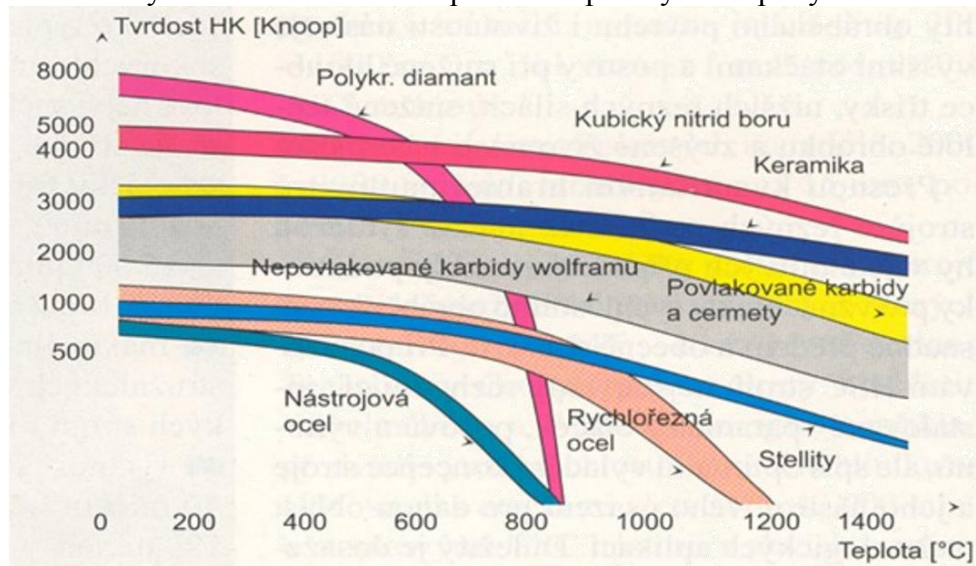
Výběr řezného materiálu je velmi důležitý z hlediska trvanlivosti břitu. Je nutné vzít v úvahu vlastnosti obráběného materiálu. V případě slitiny Inconel 718 je hlavní požadavek na vysokou pevnost hrany, teplotní odolnost, houževnatost a chemickou stabilitu. Důležitá je i odolnost vůči opotřebení z důvodu obsahu tvrdých vměstků v materiálu.

Základní rozdělení materiálů dle jejich tvrdosti, ohybové pevnosti a maximální pracovní teploty na grafu níže.



Graf 1 Graf použitelnosti řezných materiálů [15]

Velké rozdíly tvrdosti materiálu lze pozorovat při zvýšení teploty.



Graf 2 Vliv závislosti tvrdosti materiálu na teplotě [16]

Z rozdělení lze uvažovat za vhodné materiály pro řezný břit - slinuté karbidy, řeznou keramiku a kubický nitrid bóru. Rychlořezná ocel má nízkou hodnotu tvrdosti. Z toho důvodu by byla trvanlivost nástroje velmi nízká. Polykrystalický diamant také není možno použít z důvodu obsahu železa Fe ve struktuře materiálu. Vysoká afinita uhlíku k železu by byla příčinou rychlé degradace řezné hrany.

2.1.5.1 SK – Slinutý karbid

Slinuté karbidy jsou vyráběny pomocí práškové metalurgie. Vynikají hodnotou modulu pružnosti, ohybové pevnosti a lomové houževnatosti. Díky těmto vlastnostem je lze použít i pro těžké hrubování s přerušovaným řezem a obrábění s nastavením vysokých posuvových rychlostí.

Mezi základní stavební prvky tohoto materiálu patří karbidy těžkých kovů – titanu, tantalu, wolframu a kobaltu ve funkci pojiva. [4][22]

Vlastnosti jednotlivých karbidů:

- **TiC – karbid titanu**

Zajišťuje chemickou stálost za vysokých teplot a zaručuje vysokou tvrdost. Na druhou stranu zvyšuje křehkost, roztažnost a snižuje pevnost v ohybu. Zhoršuje také tepelnou vodivost.

- **TaC – karbid tantalu**

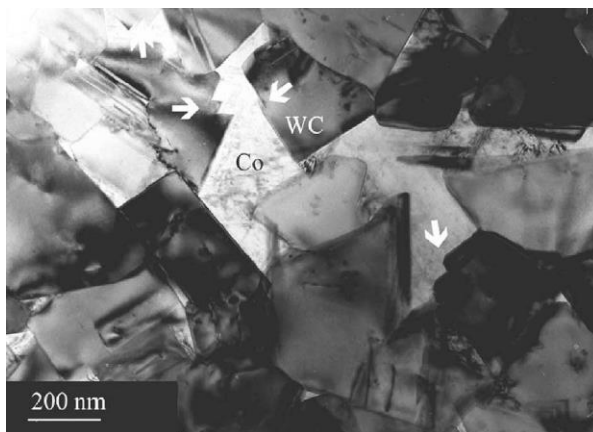
Podobné vlastnosti jako u karbidu titanu. Jeho výhodou je zjemňování struktury slinutého karbidu.

- **WC – karbid wolframu**

Wolfram zvyšuje tvrdost za extrémních teplot, odolnost vůči opotřebení a chemickou stálost.

- **Co – Kobalt**

Kobalt plní funkci pojiva. Jeho nemožnost tvořit karbidy je využito při tvorbě síťové struktury pojiva mezi jednotlivými tvrdými zrny karbidů. Zvýšený obsah kobaltu ve slinutém karbidu má za následek vyšší pevnost a tažnost, ale naopak nižší tvrdost.



Obr. 3 Struktura SK [17]

Slinuté karbidy je vhodné povlakovat za účelem zlepšení jejich vlastností. Jednotlivé generace povlakování se liší v počtu a tloušťce jednotlivých vrstev.

V současné době se pro nanášení používají převážně dvě metody. První z nich je CVD – Chemical Vapour Deposition. Ta používá k depozici směs tvořenou reaktivními plyny, jako jsou $TiCl_3$, $AlCl_3$ a CH_4 . směs je zahřívána na teplotu kolem $1000^\circ C$. Druhou metodou je PVD – Physical Vapour Deposition. Dle názvu lze předpokládat, že se jedná o metodu, která se opírá o fyzikální principy. Využívá odpařování nebo odprašování materiálů v povlaku, následné ionizaci a nanesení na plochu nástroje. Mezi takto nanášené prvky patří titan, hliník, křemík nebo chrom. [4][22]

2.1.5.2 Řezná keramika

Řezná keramika má velmi vysokou hodnotu odolnosti proti otěru a tvrdost i za velmi vysokých teplot. Nevýhodou je poměrně velká křehkost. Ta může způsobit praskliny v materiálu při nestabilním řezu, ať se jedná o mechanickou nebo teplotní nestabilitu. Jakékoliv rázy jsou nepřijatelné. Dochází jimi k vyštipování řezné hrany.

Existuje mnoho tříd řezné keramiky. Každá z nich se snaží vylepšit určitou vlastnost.

- **Oxidová keramika**

Základ tvoří oxid hlinitý Al_2O_3 a oxid zirkoničitý ZrO_2 , který zvyšuje odolnost vůči tvorbě prasklin. Chemická stabilita je na vysoké úrovni, ale teplotní šoky dobře nezvládá.

- **Smíšená keramika**

Výztuha je tvořena částicemi karbidy, či karbonitridů. Následkem je zlepšení hodnoty tepelné vodivosti a houževnatosti.

- **Výztuha whiskery**

Whiskery karbidu křemíku SiC_w – monokrystaly křemíku mají velmi pozitivní vliv na finální vlastnosti. Rapidně narůstá houževnatost celku, čímž je možno použít chladicí kapalinu, aniž by docházelo k trhlinám. Nejvíce se tato keramika používá při obrábění niklu a jeho slitin.

- **Keramika z nitridu křemíku (Si_3N_4)**

Další skupina, která má díky obsahu krystalů podlouhlého tvaru schopnost zvýšení tuhosti se současnou vysokou houževnatostí. Třídy s obsahem nitridu křemíku se používají při obrábění šedé litiny. Jejich nasazení při obrábění ostatních materiálů je omezeno nízkou chemickou stabilitou.

- **Sialon**

$SiAlON$ jsou třídy keramiky, které zaručují pevnost v kombinaci se značnou chemickou stálostí. Pevnost je tvořena sítí nitridu křemíku.

Pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů je doporučeno použití sialonových tříd. Základním předpokladem k dobrému výsledku obrábění je však samotné nastavení řezných podmínek a drah při obrábění. Důležitá je vysoká v_c z důvodu odpevnění povrchové vrstvy Inconelu. Pokud bude obrábění dobře nastaveno a nebudou při přejezdech vznikat vibrace, tak bude vhodnější použití řezné keramiky. V opačném případě je lepší vybrat slinutý karbid. [4][22]



Obr. 4 Řezná keramika [18]

2.1.5.3 CBN – Kubický nitrid bóru

Kubický nitrid bóru je po diamantu nejtvrďší řezný materiál. Mezi jeho přednosti patří velmi vysoká pevnost, odolnost vůči opotřebením a dále má vysokou hodnotu tepelné vodivosti. Houževnatost je nízká.

Zvyšování houževnatosti se provádí pomocí vmíchávání kovového pojiva. Obsah CBN se v těchto případech pohybuje v rozmezí 85-100% CBN. Keramické pojivo s obsahem CBN v rozmezí 40-65% zvyšuje odolnost vůči chemickému otěru.

Vyměnitelnou břitovou destičku vždy tvoří hrot z kubického nitridu bóru, který je připájen na nosič. Ten je většinou tvořen slinutým karbidem.

Nevýhodou tohoto typu řezného materiálu je jeho pořizovací cena a náchylnost vůči vibracím. Ty mohou být způsobeny špatným stylem obrábění nebo například dlouhým vyložení nástroje.

CBN nachází využití hlavně u dokončovacích operací tvrzených ocelí. [4][22]



Obr. 5 VBD s CBN [19]

2.1.6 Použití procesní kapaliny

Podle zákona zachování energie musí být spotřebovaná energie přeměněna. V případě obrábění je hlavním výsledkem tvorba tepla. Chlazení slouží ke snížení hodnoty této veličiny v místě řezu. Teplo negativně ovlivňuje jak nástroj a obrobek, ale také upínací mechanismus. Pokles tepla vede ve většině případů k prodloužení trvanlivosti nástroje. Hlavním faktorem tohoto je zmírnění difuzního opotřebením nástroje. To má na svědomí nízká teplotní vodivost Inconelu. Centrum soustředění tepelné energie je v místě řezu. Energie se v důsledku vlastností materiálu není schopna přenést do třísky. Chladicí kapalina tedy má za hlavní úkol odvod tepelné energie. Dalšími pozitivy je odvod třísek.

Negativním faktorem u použití chladicí kapaliny je stránka ekologie. Látky jsou povětšinou škodlivé a nelze je vypouštět do přírody. Recyklace je velmi nákladná a představuje vícenásobky, které se promítají do výsledné ceny obrábění. Při frézování těžkoobrobitelných materiálů je její spotřeba vysoká a je tedy vhodné hledat další způsoby, jak se vyhnout její potřebě, nebo alespoň snížit její objem na minimální hodnotu.

Vhodná je tepelná úprava obrobku před procesem obrábění. Dobře zvoleným předehřátím materiálu lze zmírnit zpevňování povrchové vrstvy a tím prodloužit životnost nástroje. Předehřátí lze uskutečnit pomocí plasmového hořáku nebo laseru. Při teplotách přesahujících 750°C dochází k výraznému poklesu meze kluzu, meze kluzu a pevnosti ve smyku. Nejdůležitější je však snížení zpevňování povrchové vrstvy. Předehřátí má významný vliv jak na řezné síly, tak na kvalitu obrobenej plochy. Drsnost obrobenej plochy je nižší. [3][4][22]

Obráběním za sucha se eliminují rizika spojené s použitím chladicí kapaliny. Není potřeba použití zařízení proti úniku kapaliny do podloží a odstraní se možnost poškození zdraví pracovníka.

Druhy chlazení:

- MQL – Minimal quantity lubrication
- Vysokotlaké chlazení
- Stlačený vzduch
- Kryogenní chlazení

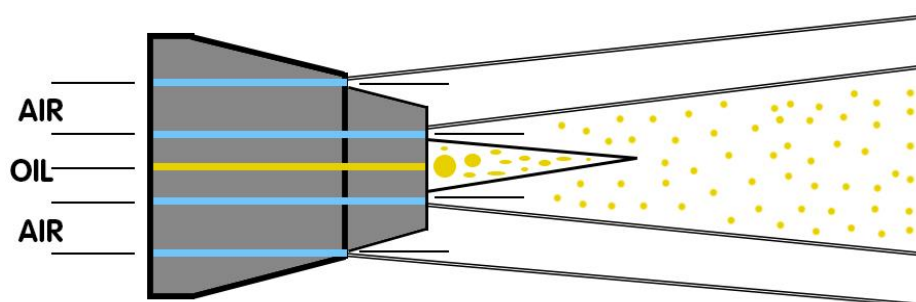
2.1.6.1 MQL – Minimum quantity lubrication

Chlazením s použitím minimálního množství maziva lze nazvat proces, při kterém je spotřeba nižší, než 50ml/min. Kapalina je dovedena k místu řezu ve formě aerosolové mlhy rozptýlené pomocí vysokého tlaku vzduchu nebo jiného plynu, která zajistí chlazení a odvod třísek. Důležitým faktorem pro výběr tohoto způsobu chlazení je výběr kapaliny. Ta musí být výrobcem testována na toxikologickou nezávadnost. Mezi hlavní zastupitele těchto maziv lze označit estery, mastné alkoholy a oleje na přírodní bázi. Přínos této technologie byl zaznamenán u všech druhů obrábění. Oleje se velmi rychle odpařují a tím pádem odvádí množství tepla.

Za nevýhodu tohoto typu chlazení lze označit nutnost velmi dobrého odsávacího zařízení. Vznikající mlhu lze snadno vdechnout, což by při delším vystavení mohlo způsobit zdravotní potíže.

Nejčastějším plynem používaným k rozptýlení chladiva je vzduch. Jeho tlak není přímo úměrný zlepšování mazacích schopností, prodloužení trvanlivosti nástroje a kvalitě obrobenej plochy. Při určitých tlacích může docházet k poklesu trvanlivosti, což může být následkem zvýšené oxidace vrstvy při přívodu vyššího objemu kyslíku.

Tato metoda se používá hlavně při nižších posuvech a vyšších řezných rychlostech. [3][4][22]



Obr. 6 Tryska pro MQL [7]

2.1.6.2 Vysokotlaké chlazení

Vysokotlaké chlazení je nejrozšířenějším způsobem chlazení při procesech obrábění. První zmínky o tom to typu chlazení sahají až do 60. let minulého století. Jedná se o vstřikování množství kapaliny velmi vysokým tlakem. Ten může dosahovat řádu stovek barů. Řeší se tím opět odvod třísek, snižuje se teplota břitu a obrobku a mazání. Metoda má

dobrý vliv na zvýšení trvanlivosti nástroje a snižuje poškození povrchu obrobku, či řezné hrany VBD při odchodu třísek. Eliminace těchto faktorů má za následek zlepšení kontroly řezného procesu a řízení procesu obrábění.

V současnosti je valná většina strojů vybavena touto technologií již v základním balíčku stroje.

Použití vyššího tlaku při chlazení opět není zárukou lepšího výsledku obrábění. Je nutné volit parametry pro jednotlivé nástroje zvlášť a volit podmínky na míru. Vždy není potřeba zaručit co nejvyšší rychlost odebírání materiálu. Konkrétním nastavením jednotlivých nástrojů dosáhneme optimálního výsledku obrábění v poměru mezi objemem odebraného materiálu, trvanlivostí a kvalitou obrobenej plochy. [8][3][4][22]



Obr. 7 Vysokotlaké chlazení [22]

2.1.6.3 Stlačený vzduch

Při této metodě je jako médium použit chlazený nebo mražený suchý vzduch. Jako první krok se řadí zchlazení vzduchu, ten se poté přivádí pomocí trysky do oblasti obrábění. Tryska má speciální tvar, díky kterému po vyústění vzduchu proběhne adiabatická expanze, při které se vzduch ještě více ochladí.



Obr. 8 Trysky na studený vzduch [13]

2.1.6.4 Kryogenní chlazení

Kryogenní chlazení je využíváno hlavně u obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Zajišťuje držení teploty břitu pod hodnotou mechanického změkčení materiálu a tím prodlužuje trvanlivost.

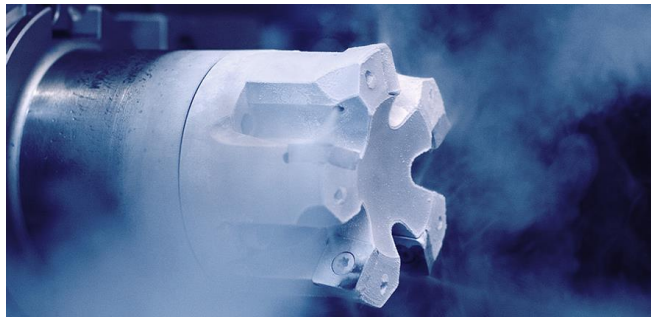
Jako chladicí médium se používá tekutý dusík. Experimentálně se osvědčilo chlazení čela VBD před utvařečem třísky jednou tryskou, ostří nástroje pomocí druhé trysky a současném chlazení obrobku.

Zkoumání tohoto typu obrábění potvrdilo zpevnění materiálu VBD při jeho podchlazení. Životnost se z toho důvodu zvýšilo až pětinasobně. Současně se zlepšila kvalita povrchu, ale to bylo následkem nižšího opotřebení řezné hrany.

Podchlazení nástroje zapříčiní i snížení tření mezi VBD a obrobkem.

Řezné síly se u určitých materiálů snižují a u jiných zase zvyšují. Vše závisí na zvolení řezných podmínek a zvoleném materiálu.

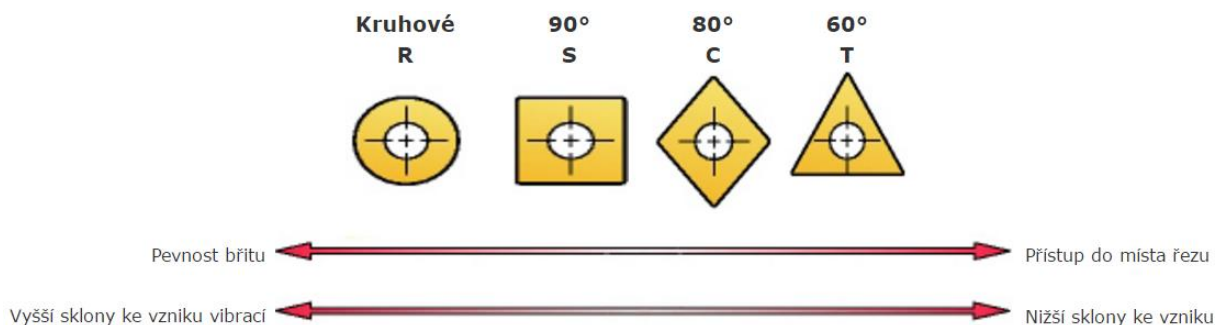
Samotný tekutý dusík není ekologicky závadný, ale nelze jej recyklovat podobně jako chladicí kapalinu. V současné době se používá hlavně v procesech broušení. [3][4][22]



Obr. 9 Kryogenní chlazení nástroje [14]

2.1.7 Vliv tvaru VBD

Samotný výběr tvaru vyměnitelné břitové destičky je velmi důležitým krokem ke zdárnému výsledku obrábění. Jednotlivé tvary mají svá specifika a hodí se pro určité využití. Jeden typ je vhodný pro těžké hrubovací operace a vyniká svojí pevností a jiný zase umožňuje nejlepší přístup do řezu při jemném frézování. Jednotlivé tvary nesou svá omezení. Dobrý přístup do místa řezu znamená současně snížení pevnosti řezné hrany. [6]



Obr. 10 Tvary VBD [6]

Vyšší hodnota úhlu špičky má za následek nárůst pevnosti břitu, je možno zvýšit posuvovou rychlost, břit je schopen vydržet vyšší řezné síly, ale má sklony ke vzniku vibrací.

Nižší hodnota úhlu špičky VBD naopak snižuje pevnost břitu a snáší dobře pouze nižší řezné síly. Mezi výhody těchto destiček patří lepší přístup do místa řezu a utlumené sklony ke vzniku vibrací.

Kruhové VBD vynikají pevností svojí hrany. Při vyšších hodnotách a_p mají vyšší odolnost, než jiné typy. Tím pádem je vhodné jejich nasazení při obrábění těžkoobrobitelných materiálů skupiny ISO S nebo u povrchů s navařenými tvrdými vrstvami. Jejich výhodou také představuje velký počet řezných hran na břitovou destičku a plynulý záběr břitu.[6]

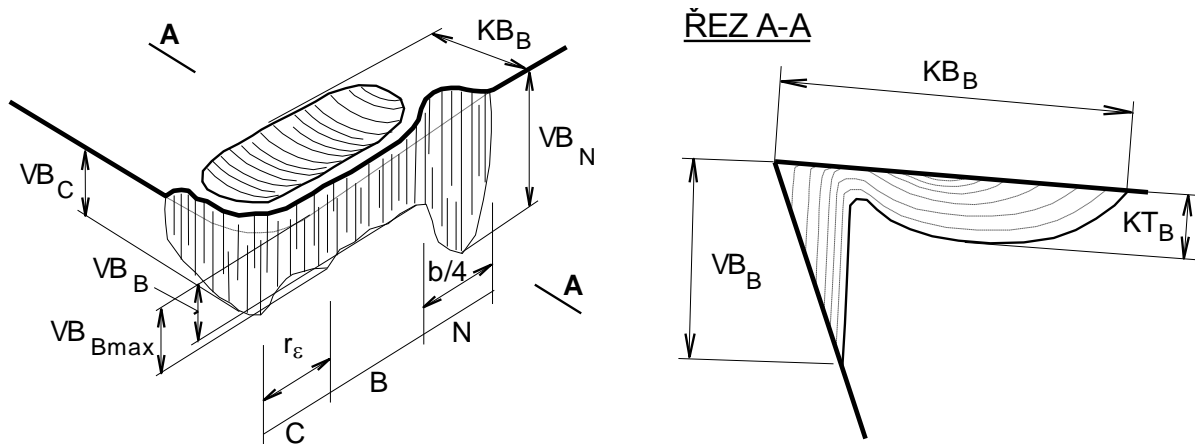
2.1.8 Otupení břitu

Silová a tepelná interakce mezi břitem nástroje a materiálem obrobku působí negativně na povrchové vrstvy břitu nástroje a mění jeho tvar.

Obecně vníká opotřebení působením třech namáhání:

- 1) Otěrem – oblast kontaktu břitu s obrobkem
- 2) Plastickou deformací břitu – nastává při extrémním teplotním a mechanickém zatížení břitu
- 3) Křehkým lomem – břit se vylomí v důsledku silového přetížení způsobeného dynamickými silami při přerušovaném řezu, či vibracemi. [20]

Na obrázku níže lze vyčíst značení jednotlivých typů opotřebení v závislosti na jejich umístění na břitu.



Obr. 11 Opotřebení řezného nástroje [20]

- VB .. opotřebení na hřbetu
- VB_C .. opotřebení v oblasti špičky nástroje
- VB_B .. opotřebení přímé části ostří - průměrné
- VB_{Bmax} .. opotřebení maximální
- KB_B .. šířka žlábků na čele
- VB_N .. opotřebení ve formě vrubu
- KT_B .. hloubka žlábků na čele
- r_ε... poloměr zaoblení špičky nástroje

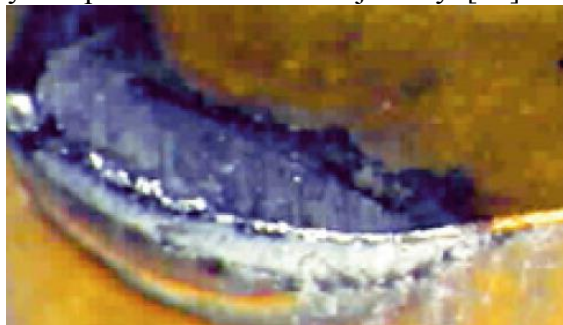
2.1.8.1 Opotřebení – Inconel 718

Slitina Inconel 718 a její charakteristické deformační zpevňování má nejčastěji za následek vrubové opotřebení na hlavním ostří a plastickou deformaci. Vrub vzniká v důsledku zpevnění při obrábění. Jeho pozice odpovídá velikosti hloubky řezu a_p . Vrub lze pozorovat i na vedlejším ostří. Jeho vznik v této oblasti je zapříčiněn chemickým otěrem. Toto opotřebení má vliv na výslednou kvalitu obrobenej plochy.

Plastická deformace je způsobena velmi vysokou teplotou v místě řezu a tlakem na řeznou hranu. VBD s nižší pevností za vysokých teplot se takto deformuje vždy. [21]



Obr. 12 Vrbové opotřebení [21]



Obr. 13 Plastická deformace [21]

Třetím druhem opotřebení, se kterým se často lze setkat při obrábění Inconelu je vylupování břitu a části čela. Vzniká hlavně při použití keramické břitové destičky, na kterou působí vibrace nebo další nestability procesu obrábění. Břit se postupně odlupuje po malých částech, čímž vzniká nová ostrá řezná hrana. Tento proces se neustále opakuje. Zvýšení tohoto jevu lze zaregistrovat při navyšování hodnoty posuvové rychlosti. Při hrubování toto opotřebování nehraje velkou roli, ale při procesu dokončování, kdy je kladen velký důraz na kvalitu povrchu by vznikaly problémy a je nutno upravit řezné podmínky nebo změnit materiál VBD. Pomůže však snížení posuvové rychlosti, hloubky řezu, úhlu opásání a nastavení optimální dráhy nástroje. Důležité je kontrolovat dráhu řezu hlavně v oblastech rohů.



Obr. 14 Vylamování břitu [21]

2.2 Doporučené řezné podmínky

Nastavení řezných podmínek u konkrétního nástroje jsou velmi důležité pro konečný výsledek. Existují obecná doporučení pro volbu, ale žádné z nich plně nezaručuje nejlepší výsledek. Roli hraje celá řada faktorů.

Kvůli nízké tepelné vodivosti a vysokému řeznému odporu se doporučuje používání chlazení.

- **Souslednost obrábění**

Literatura doporučuje použití sousledného obrábění při obrábění slinutým karbidem. Tímto způsobem se získá minimální hodnota tloušťky třísky na konci záběru a zamezí se tím nalepování materiálu na břit. U řezné keramiky je však vhodné použití nesousledného frézování z důvodu předejití vzniku rázů a narušování křehkého břitu.

- **Řezná rychlost**

Nastavení řezné rychlosti je problematické kvůli nízkému rozpětí optimálního intervalu. Při vyšších rychlostech je břit velmi tepelně a silově namáhán a dochází k rychlému opotřebení na hřbetu. Při nižší rychlosti se vytváří nárůstek, který je opět velmi negativní. Doporučuje se používat řeznou rychlost kolem hodnoty 50m/min.

- **Šířka řezu**

Šířka řezu ovlivňuje silové zatížení břitu velkým dílem. Při záběru přesahující poloměr nástroje působí na břit značné teplo a je potřebné kvalitní povlakování nástroje. Při nižších hodnotách šířky řezu je možno zvyšovat posuv na zub, jelikož je VBD v řezu kratší čas a břit se lépe chladí.

- **Hloubka řezu**

Hloubku je nutno volit tak, aby se odebíral materiál pod zpevněnou povrchovou vrstvou. Doporučuje se zároveň nepřesahovat hodnotu $\alpha_r=45^\circ$. Vyšší hodnota má za následek velmi výrazný nárůst řezných sil a opotřebení ve formě vrubu.

- **Posuv**

Posuv opět udává, jak bude břit zatížen. Při vysokých hodnotách dochází k rychlé degradaci břitu. Naopak velmi malý posuv také není doporučován kvůli deformačnímu zpevňování materiálu. Průměrně se volí kolem hodnoty 0,1mm/zub.

U těžkoobrobitelných nástrojů je velmi důležité nastavení řezných podmínek, ale také vhodně řešeny dráhy nástroje při programování stroje. S navyšováním tvrdosti obráběného materiálu narůstají požadavky na přesnější nastavení celého systému. Parametry se volí podle vstupních požadavků. Rozdíly nalezneme při obrábění zaměřeném na velikost úběru a při dokončovacím obrábění, kdy je důraz kladen na kvalitu obrobené plochy.

2.3 Vzorce pro výpočty

Pro výpočty nastavení řezných podmínek byly použity základní vzorce pro frézování z tabulky níže.

Parametr	Vzorec	Jednotky
Řezná rychlost	$v_c = \frac{D * \pi * n}{1000}$	[m/min]
Otáčky vřetene	$n = \frac{v_c * 1000}{D * \pi}$	[min ⁻¹]
Posuvová rychlost	$v_f = f_z * z * n$	[mm/min]
Posuv na zub	$f_z = \frac{v_f}{z * n}$	[mm]
Posuv na otáčku	$f_n = \frac{v_f}{n}$	[mm]
Velikost úběru materiálu	$Q = \frac{a_e * a_p * v_f}{1000}$	[cm ³ /min]
Měrná řezná síla	$k_c = h_m^{-m_c} * k_{c1,1}$	[N/mm ²]
Průměrná tloušťka třísky	$h_m = f_z * \sqrt{\frac{a_e}{D}}$	[mm]
Výkon vřetene	$P_c = \frac{a_e * a_p * v_c * k_c}{60 * 10^6}$	[kW]
Výkon motoru	$P_{mot} = \frac{P_c}{\eta}$	[kW]

Tab. 3 Vzorce pro frézování[12]

v_c .. řezná rychlost

D .. průměr frézy

v_f .. posuvová rychlost

z .. počet zubů

a_e .. šířka řezu

a_p .. hloubka řezu

m_c .. nárůst měrné síly

k_c .. měrná řezná síla

$k_{c1,1}$.. měrná řezná síla měrná řezná síla v závislosti na $a_p=1\text{mm}$ a $a_e=1\text{mm}$

η .. účinnost

n .. otáčky

Q .. Objem odebraného materiálu

h_m .. střední tloušťka třísky

P_c .. výkon vřetene

P_{mot} .. výkon motoru

3 Návrh a realizace vlastního experimentu

3.1 Varianty obrábění

Experiment se zaměřil na testování rovinného frézování. Pro testování se použily tři varianty nastavení řezných podmínek. Jednotlivé varianty měly hodnoty určitých parametrů fixní a další se měnily dle konkrétních vstupních požadavků. Změna velikosti parametrů řezných podmínek u jednotlivých variant nastávala pouze na základě proměny průměru řezného nástroje.

3.1.1 Varianta 1

Varianta číslo 1 má pevně nastavenou řeznou rychlost, hloubku řezu a posuv na zub. Mění se zde šířka řezu, otáčky nástroje a úhel opásání. Řezné podmínky jsou zvoleny tak, aby byla zachována konstantní délka oblouku. Hodnota úběru materiálu klesá se zvětšujícím se průměrem nástroje.

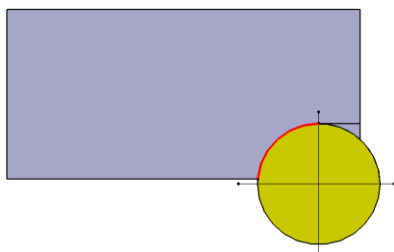
Soupis všech parametrů u jednotlivých průměrech:

(Žlutě zvýrazněné buňky označují parametr s proměnlivou hodnotou)

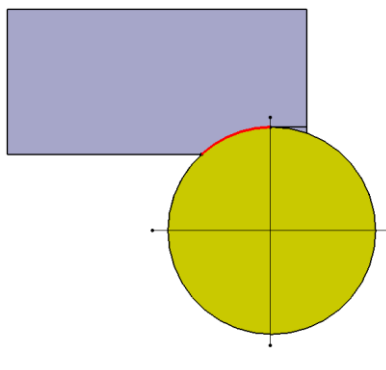
	Varianta 1		
	D = 50 mm	D = 100 mm	D = 121,76 mm
v_c [m/min]	40	40	40
v_f [m/min]	51	25	21
a_p [mm]	2	2	2
a_e [mm]	22,82	13,14	10,95
f_z [mm]	0,2	0,2	0,2
n [-]	255	127	105
Úhel opásání Ψ [°]	85	42,5	34,9
Q [cm ³ /min]	2,33	0,68	0,46

Tab. 4 Parametry – Varianta 1

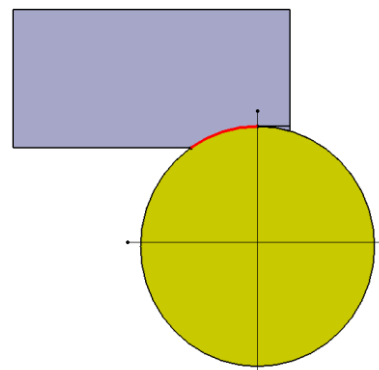
Základní hodnota délky oblouku byla určena dle nejmenšího nástroje průměru 50mm. Při úhlu opásání 85° je hodnota délky oblouku 37,1mm. Na obrázcích níže je zvýrazněna červenou barvou. U všech variant je tedy šířka řezu menší, než poloměr nástroje.



Obr. 17 D50 Varianta 1



Obr. 16 D100 Varianta 1



Obr. 15 D121,76 Varianta 1

3.1.2 Varianta 2

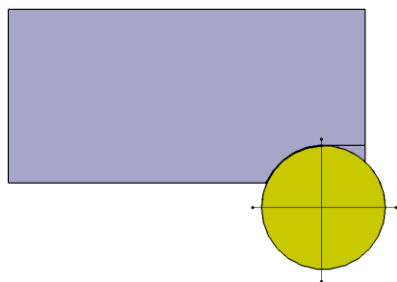
U druhé varianty se mění nastavení řezných parametrů dle konstantní šířky řezu. Ta je zde pevně nastavena na stejnou hodnotu, jako 30% průměru frézy. Úhel opásání je tedy vždy 66,42°. Mezi další neměnné parametry patří řezná rychlost, hloubka řezu a posuv na zub. Hodnota úběru materiálu zůstává u všech průměrů konstantní.

Soupis všech parametrů u jednotlivých průměrů:
(Žlutě zvýrazněné buňky označují parametr s proměnlivou hodnotou)

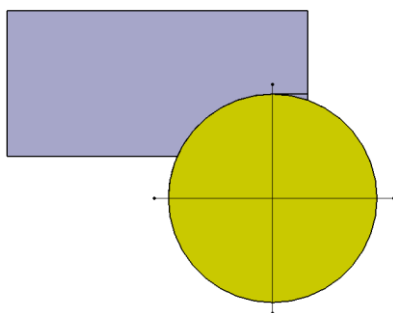
	Varianta 2		
	D = 50 mm	D = 100 mm	D = 121,76 mm
v_c [m/min]	40	40	40
v_f [m/min]	51	25	21
a_p [mm]	2	2	2
a_e [mm]	15	30	36,53
f_z [mm]	0,2	0,2	0,2
n [-]	255	127	105
Úhel opásání Ψ [°]	66,42	66,42	66,42
Q [cm ³ /min]	1,53	1,53	1,53

Tab. 5 Parametry – Varianta 2

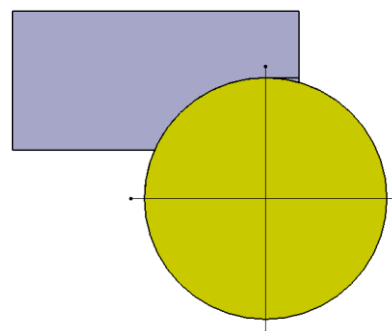
Opět je u všech variant šířka řezu menší, než hodnota poloměru.



Obr. 18 D50 Varianta 2



Obr. 19 D100 Varianta 2



Obr. 20 D121,76 Varianta 2

3.1.3 Varianta 3

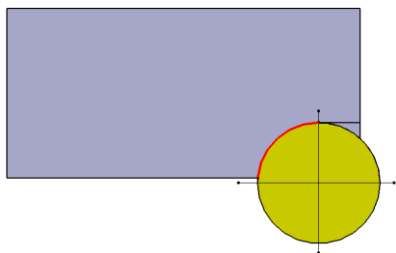
Poslední varianta má konstantní plochu třísky při zachování délky oblouku. Je to tedy kombinace varianty číslo 1 a nového hlediska. Mění se šířka řezu, posuv na zub, otáčky nástroje a úhel opásání. Neměnné tedy zůstávají řezná rychlost a hloubka řezu. Hodnota úběru materiálu klesá se zvyšujícím se průměrem.

Soupis všech parametrů u jednotlivých průměrů:
(Žlutě zvýrazněné buňky označují parametr s proměnlivou hodnotou)

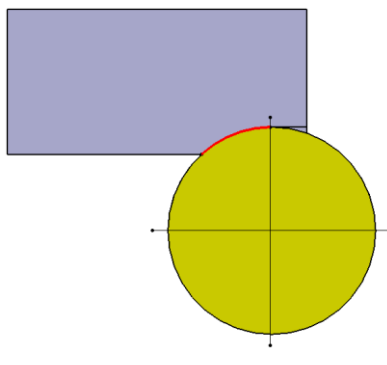
	Varianta 2		
	D = 50 mm	D = 100 mm	D = 121,76 mm
v_c [m/min]	40	40	40
v_f [m/min]	51	37	37
a_p [mm]	2	2	2
a_e [mm]	22,82	13,14	10,95
f_z [mm]	0,2	0,295	0,348
n [-]	255	127	105
Úhel opásání Ψ [°]	85	42,5	34,9
Q [cm ³ /min]	2,32	0,98	0,8

Tab. 6 Parametry – Varianta 3

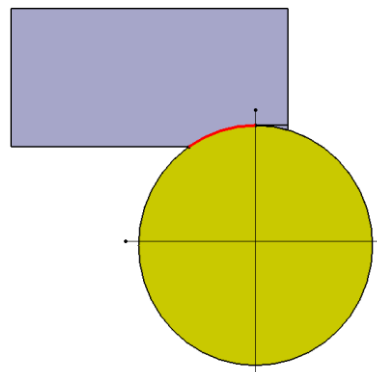
Opět je u všech variant šířka řezu menší, než hodnota poloměru. Základní délka oblouku a plocha třísky se určila stejná jako u průměru 50mm, varianta 1. Většina parametrů tedy zůstala stejná jako u první varianty. V závislosti na konstantní ploše třísky se měnila velikost posuvu na zub. Průměr 50mm má tedy totožné nastavení řezných podmínek, jako stejný průměr u varianty 1.



Obr. 21 D50 Varianta 3



Obr. 22 D100 Varianta 3



Obr. 23 D121,76 Varianta 3

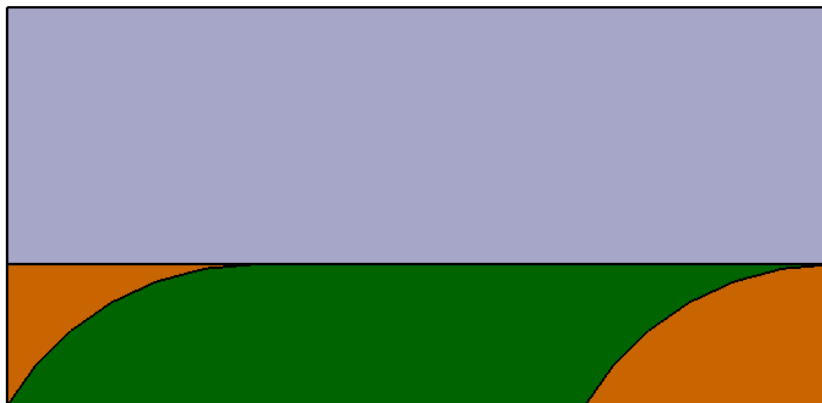
3.2 Etapy experimentu

Experiment probíhal ve více etapách. Proměnlivými faktory byly: tvar obrobku, způsob chlazení, počet břitů. U jednotlivých nastavení byly provedeny testy pomocí 3 průměrů fréz a 3 variant řezných nastavení – viz kapitola 3.1.

3.2.1 S předfrézováním

První testování bylo specifické odstraněním plochy obrobku, ve které nástroj nebyl v řezu svým maximální šířkou řezu a úhlem opásání. Pomocí jiné řezné hrany se tedy odstraňoval začátek a konec přejezdu. Délka této části se měnila dle průměrů nástroje a šířky řezu. Simuloval se tím řez v nekonečně dlouhém obrobku. Při tomto frézování nebylo použito žádné chlazení. Měřilo se opotřebení u všech variant a průměrů.

Na obrázku níže jsou zvýrazněny oranžovou barvou oblasti, které byly odebrány a zeleně plocha, na které byla testovací destička v řezu.



Obr. 24 Obráběná plocha - S předfrézováním

3.2.2 Bez předfrézování

Další nastavení se opět týkalo stylu dráhy nástroje. V tomto případě se zvolila klasická dráha - bez před a dofrézování. Obrobek se obráběl v celé délce. Opět nebylo použito žádné chlazení. Opět se měřilo opotřebení u všech variant a průměrů.

Na obrázku níže je opět zeleně zvýrazněna plocha, na které byla testovací destička v řezu. V tomto případě se jedná o celou délku obrobku a šířku záběru.



Obr. 25 Obráběná plocha - Bez předfrézování

3.2.3 Plný počet břitů

Ve třetí etapě se použila stejná dráha středu nástroje jako v předchozím případě. Nebylo použito žádné chlazení. Nástroj však byl osazen maximálním počtem vyměnitelných břitových destiček. Testovala se pouze varianta číslo 2 – záběr rovný 30% průměru nástroje a u středního a největšího průměru nástroje. Tato varianta má nastavení, které splňovalo podmínku záběru 2 břitů v řezu ve stejný okamžik.

3.2.4 Procesní kapalina

Poslední nastavení zachovalo dráhu nástroje v celé délce obrobku a přidalo chlazení procesní kapalinou. Proud kapaliny měl tlak 40 barů a byl tvořen směsí vody a emulze. Proud kapaliny byl směřován na čelo VBD. Testování proběhlo u všech variant, ale pouze s průměrem nástroje 100mm.

3.3 Vyměnitelná břitová destička

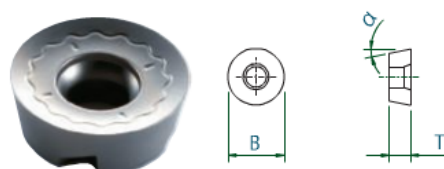
Výrobce: OSG
Označení: PHOENIX RPTH1204M8EN-SM
XC5040



Obr. 26 Loga OSG [1]

Jedná se o kvalitní vyměnitelnou břitovou destičku japonské firmy OSG Corporation určené pro obrábění materiálů skupiny S, tedy žáruvzdorné materiály a nerezové oceli. Může být použita při suchém i mokřém obrábění. Základ tvoří tvrdý karbid, plášť je odolný vůči oxidaci a má dobré kluzné vlastnosti. Průměr kruhové destičky je 12 mm, tloušťka 4,76 mm a úhel hřbetu 11°. Maximální počet natočení destičky je 8.

VBD má povlak tvořený nitridem titanu (TiN) a diboranem (TiB₂) o celkové tloušťce 4 μm. Nitrid titanu je velmi rozšířená vrstva zlaté barvy, která má mikrotvrdot 20-25 GPa a dobrou adhezi i elasticitu. Povlak se používá u většiny aplikací. Diboran má žlutošedou barvu, vyšší tvrdost a zvětšený koeficient tření. Snáší lépe vyšší pracovní teploty – až 800°C.



Designation	No. of Cutting Edges	Insert Size		
		B (mm)	T (mm)	α
RPHW10T3MOSN	8	10	3.97	11°
RPHW10T3MOEN	8			
RPHT10T3MOEN-GL	8			
RPHT10T3MOEN-SM	4			
RPHT10T3M8EN-SM	8			
RPHT10T3MOFN-NM	8			
RPMT10T3M8EN-HR	8			
RPHW1204MOSN	8			
RPHW1204MOSN	8			
RPHT1204MOEN-GL	8			
RPHT1204MOEN-SM	4			
RPHT1204M8EN-SM	8			
RPHT1204MOFN-NM	8			
RPMT1204M8EN-HR	8			

Obr. 27 VBD [1]

3.4 Testovací frézy

Při testování byly použity tři průměry hlavy frézy – 50; 100; 121,76 mm. U všech průměrů byl použit stejný typ upínače – HSK-A63 s příčnou unášecí drážkou. Fréza je u tohoto typu přitažena pomocí šroubu ze spodní strany.

Délka nástrojů a ověření hodnoty průměru nástrojů byly provedeny pomocí univerzálního měřicího zařízení Zoller Genius 3.

Při valné většině experimentů byly hlavy frézy, z ekonomického důvodu, osazeny pouze jedním břitem.

Fréza – Ø50mm

Nejmenší fréza je průměru 50mm. Má 4 lůžka pro VBD průměru 12mm. Fréza má kanálky pro vnitřní chlazení, které směřují na čelo břitové destičky. Tělo frézy bylo vytvořeno na zakázku pro laboratoře Západočeské univerzity.

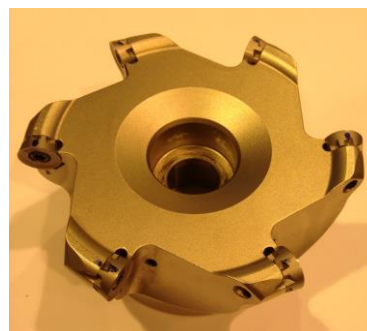


Obr. 28 Fréza 50mm

Fréza – Ø100mm

Označení PRC12R100M32- 6

Druhá testovací fréza tovární výroby má průměr 100mm. Výrobce je firma OSG. Na tuto frézu lze nasadit 6 břitových destiček. Opět je zde umožněno vnitřní chlazení s ostřikováním čela VBD. Maximální otáčky výrobce stanovil na hodnotu $n_{\max} = 6350 \text{ min}^{-1}$.



Obr. 29 Fréza 100mm

Fréza – Ø121,76mm

Číslo českého patentu: 306748

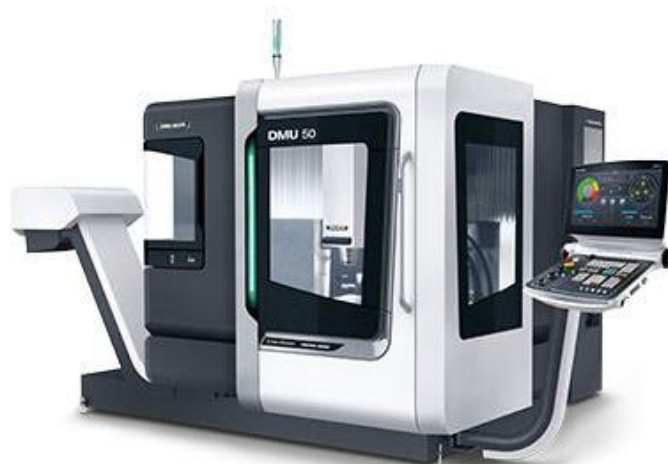
Poslední a zároveň největší fréza má průměr 121,76mm. Jedná se o experimentální frézu, která byla navržena výzkumnými pracovníky Regionálního technologického institutu na Západočeské univerzitě v Plzni a vytištěna pomocí 3D tiskárny. Vyznačuje se jedinečnou konstrukcí, která se zcela odlišuje od v současné době vyráběných fréz. Lze do ní upnout 6 vyměnitelných břitových destiček. Vnitřní chlazení je nasměrováno do dvou směrů. Fréza má, v porovnání se standardní OSG průměru 100mm, citelně nižší hmotnost. Tato skutečnost má kladný vliv při roztáčení vřetena stroje a velmi usnadňuje manipulaci. Nevýhodou je nižší tuhost nástroje.



Obr. 30 Fréza 121,76mm

3.5 Stroj

Testování probíhalo na lineárním frézovacím centru DMG MORI DMU 40 eVo linear. Stroj byl ve výborném technickém stavu.



Obr. 31 DMG MORI DMU 40 eVo linear

Parametr	Hodnota
Pracovní prostor	400x400x375mm
Software	Heidenhein iTNC 530
Maximální hmotnost obrobku	250kg
Počet pozic pro náhradní nástroje	30
Otáčky motoru	18000/24000
Točivý moment	87Nm
Posuvová rychlost - pracovní	50m/min
Posuvová rychlost – rychloposuv	80m/min
Rozměry stroje (š x h x v)	1970x2730x2480mm
Otočný stůl	ANO
Chlazení vzduchem / kapalinou	ANO
Separátor oleje/emulze	ANO

Tab. 7 Parametry stroje[25]

3.5.1 Upnutí obrobku

Obrobek byl upnut do mechanického svěráku Roemheld Hilma Stark Trigo SCS 120. Maximální upínací síla svěráku je 40000N.

Čelisti svěráku svíraly obrobek za výšku 15mm. Přesné zaměření polohy vůči stroji bylo zaměřeno pomocí měřicí sondy upnuté do vřetena stroje.



Obr. 32 Svěrák - pravá strana



Obr. 33 Svěrák - levá strana

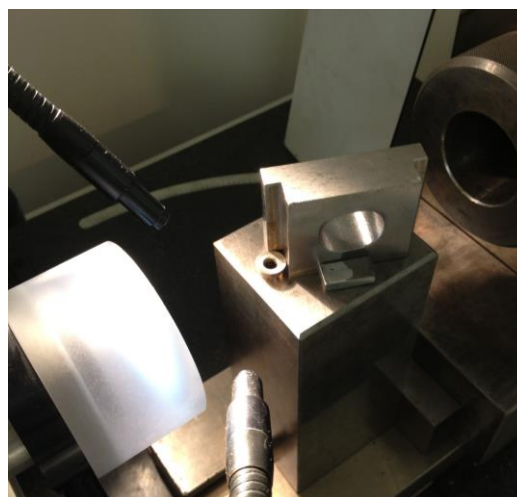
3.6 Měřicí stanice

Měření opotřebení VBD bylo realizováno na optickém měřicím zařízení Multicheck PC500 (MC-PC500) německého výrobce Blickle. Přístroj je vybaven barevnou CCD kamerou, která umožňuje několik nastavení zvětšení (15x, 75x, 120x). Kamera je propojena s počítačem, kde se ve speciálním programu vyhodnocují snímky. Bezdotykově se tedy určí přesná hodnota opotřebení.

Základ přístroje tvoří granitová deska, na které je otočný upínač pro skupinu upínačů HSK A63. Ten bohužel nevyhovoval našim požadavkům, a proto byl z broušených těles a silných magnetů vytvořen měřicí stůl přesně na míru. Zajistil přesnou polohu vyměnitelné břitové destičky při opakovaných měřeních.



Obr. 35 Blickle Multicheck PC500



Obr. 34 přípravek pro měření

3.7 Naměřené hodnoty

Měření vyměnitelné břitové destičky probíhalo vždy po první přejezdu a dále dle intenzity degradování řezné hrany. Nejprve se VBD očistila pomocí modelíny, poté se přešlo k procesu měření na mikroskopu. Snímek pořízený kamerou se vyhodnotil v programu „Blickle GmbH – Multicheck“ a uložil se pro možnou následnou kontrolu a hodnocení. Toto měření probíhalo průběžně od začátku obrábění až po dosažení kritické hodnoty opotřebení na VBD. Díky těmto datům lze vytvořit grafy, které zobrazí průběh zvyšování opotřebení v závislosti na počtu přejezdů.

3.7.1 Trvanlivost + objem odebraného materiálu

3.7.1.1 S předfrézováním

Trvanlivost [min]:

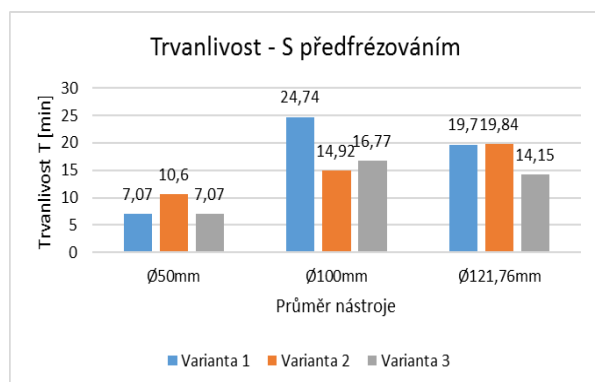
	Ø50	Ø100	Ø121,76
Varianta 1	7,07	24,74	19,7
Varianta 2	10,6	14,92	19,84
Varianta 3	7,07	16,77	14,15

Tab. 8 Hodnoty - Trvanlivost - S předfrézováním

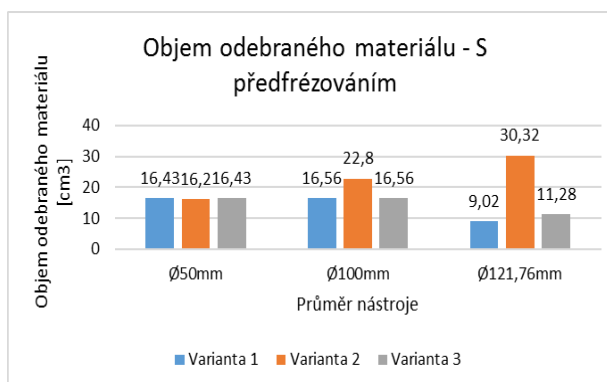
Objem odebraného materiálu [cm³]:

	Ø50	Ø100	Ø121,76
Varianta 1	16,43	16,56	9,02
Varianta 2	16,2	22,8	30,32
Varianta 3	16,43	16,56	11,28

Tab. 9 Hodnoty - Odebraný materiál - S předfrézováním



Graf 3 Trvanlivost - S předfrézováním



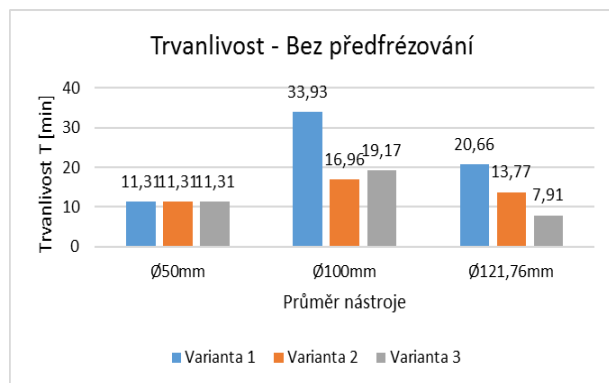
Graf 4 Objem odebraného materiálu - S předfrézováním

3.7.1.2 Bez předfrézování

Trvanlivost [min]:

	Ø50	Ø100	Ø121,76
Varianta 1	11,31	33,93	20,66
Varianta 2	11,31	16,96	13,77
Varianta 3	11,31	19,17	7,91

Tab. 10 Trvanlivost - Bez předfrézování

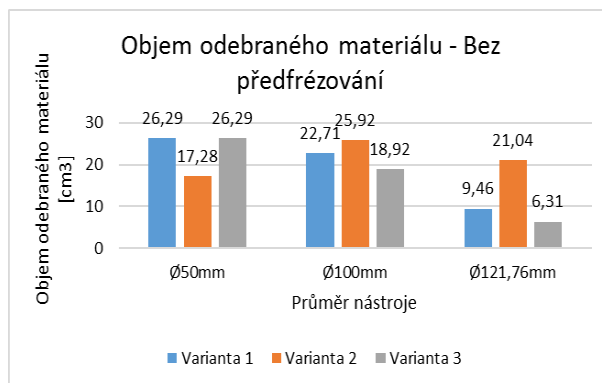


Graf 5 Trvanlivost - Bez předfrézování

Objem odebraného materiálu [cm³]:

	Ø50	Ø100	Ø121,76
Varianta 1	26,29	22,71	9,46
Varianta 2	17,28	25,92	21,04
Varianta 3	26,29	18,92	6,31

Tab. 11 Odebraný materiál - Bez předfrézování



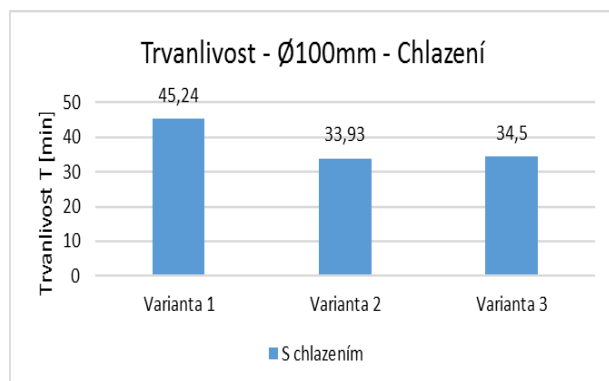
Graf 6 Objem odebraného materiálu - Bez předfrézování

3.7.1.3 Chlazení

Trvanlivost [min]:

	Ø100
Varianta 1	45,24
Varianta 2	33,93
Varianta 3	34,5

Tab. 12 Trvanlivost - Chlazení

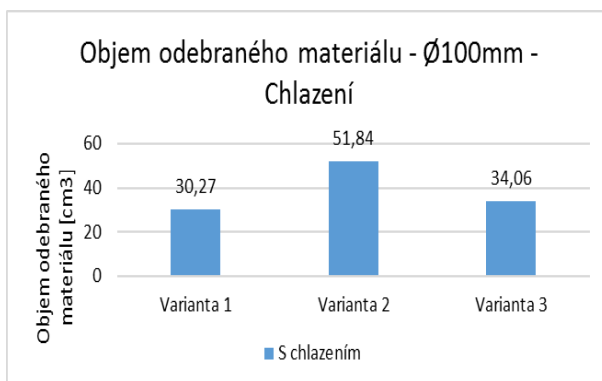


Graf 7 Trvanlivost - Chlazení

Objem odebraného materiálu [cm³]:

	Ø100
Varianta 1	30,27
Varianta 2	51,84
Varianta 3	34,06

Tab. 13 Odebraný materiál - Chlazení



Graf 8 Objem odebraného materiálu - Chlazení

3.7.1.4 Plný počet břitů

V tomto případě testy neproběhly až do dovršení hodnoty opotřebení 150 μm , ale byly ukončeny u nižších hodnot. Konkrétní velikosti jsou v tabulce pod grafy.

Trvanlivost [min]:

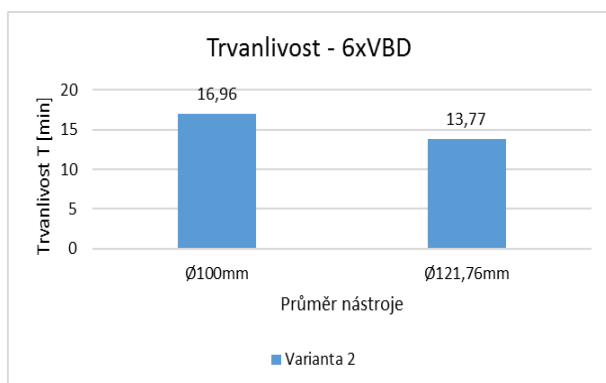
	$\text{Ø}100$	$\text{Ø}121,76$
Varianta 2	9,42	9,18

Tab. 14 Trvanlivost - 6xVBD

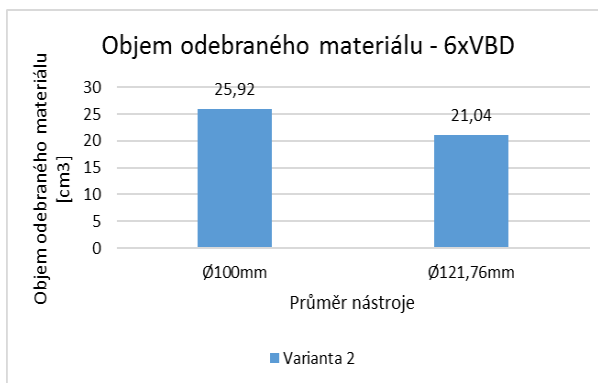
Objem odebraného materiálu [cm^3]:

	$\text{Ø}100$	$\text{Ø}121,76$
Varianta 2	25,92	21,04

Tab. 15 odebraný materiál - 6xVBD



Graf 9 Trvanlivost - 6xVBD



Graf 10 Objem odebraného materiálu - 6xVBD

Opotřebení [μm]:

	$\text{Ø}100$	$\text{Ø}121,76$
Varianta 2	111	129

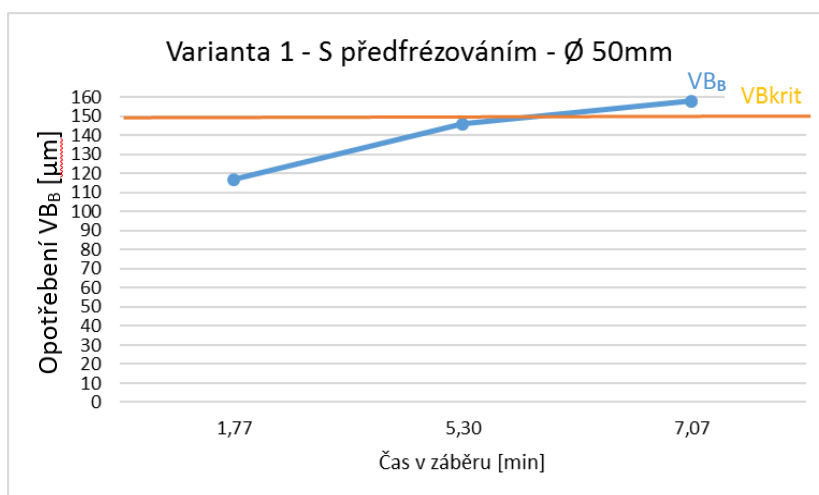
Tab. 16 Velikost opotřebení - 6xVBD

3.7.2 Průběh nárůstu opotřebení

Z naměřených hodnot byly vypracovány grafy znázorňující průběh nárůstu opotřebení v závislosti na čase frézování. Čas byl vypočítán dle počtu přejezdů a řezných podmínek. Oranžová linka znázorňuje kritickou hodnotu opotřebení, která byla stanovena na 150 μm .

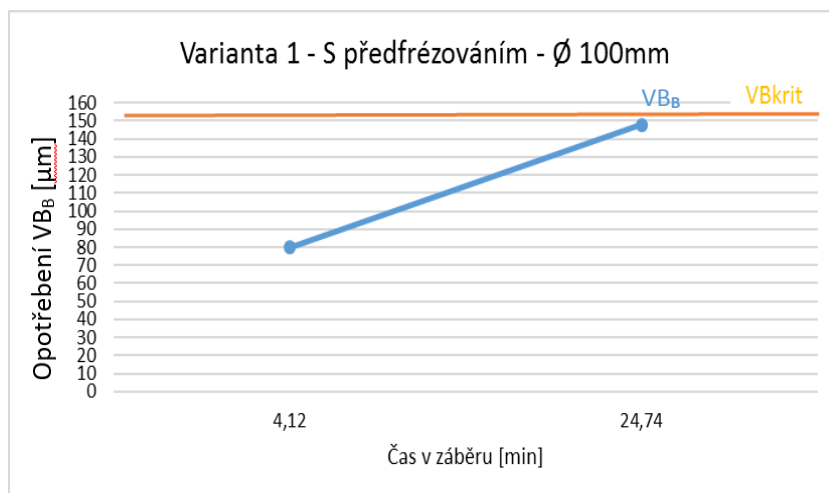
Příklady grafů pro Variantu 1 – S předfrézováním lze vidět níže. Všechny grafy jsou v příloze na konci diplomové práce.

Nárůst opotřebení – Varianta 1 – S předfrézováním - D50:



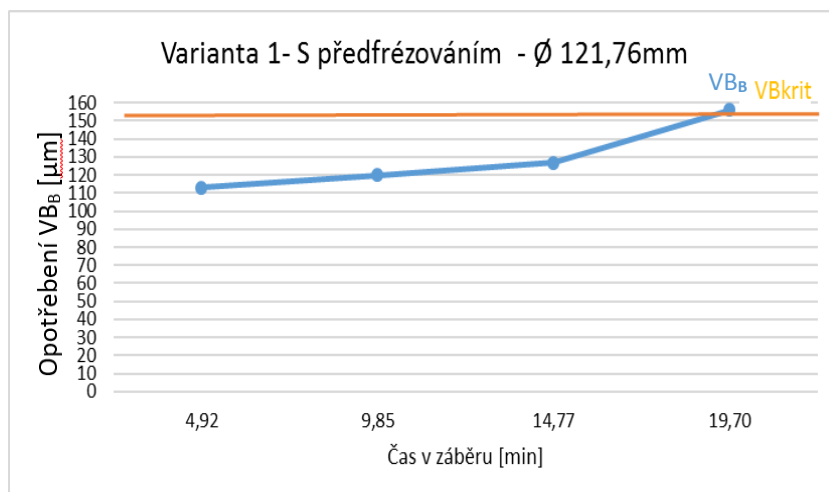
Graf 11 Průběh opotřebení - V1 D50 - S předfrézováním

Nárůst opotřebení – Varianta 1 – S předfrézováním – D100:



Graf 12 Průběh opotřebení - V1 D100 - S předfrézováním

Nárůst opotřebení – Varianta 1 – S předfrézováním – D121,76:



Graf 13 Průběh opotřebení - V1 D121,76 - S předfrézováním

4 Zhodnocení výsledků

4.1 S předfrézováním

Experiment, při kterém byla vždy odfrézována část materiálu, ve které při obrábění nebyla vyměnitelná břitová destička maximálním úhlem opásání se nejvíce osvědčila Varianta 1 – D100mm. U průměru nástroje 50mm byly u všech variant naměřeny nejnižší hodnoty trvanlivosti. Z naměřených výsledků lze předpokládat jistou souvislost mezi šířkou řezu, posuvem, úhlem opásání a průměrem nástroje.

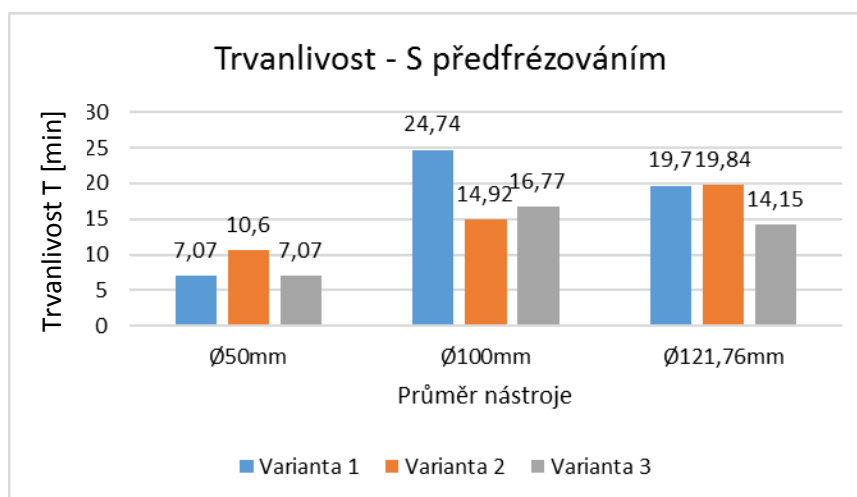
U nejmenšího průměru měla nejvyšší trvanlivost Varianta 2. Ve srovnání všech tří variant je u ní nejnižší šířka a tím i úhel opásání. Ostatní parametry jsou stejné.

Průměr nástroje 100mm vykazoval nejlepší hodnoty u Varianty 1. Ve srovnání má její nastavení řezných podmínek spolu s Variantou 3 menší šířku řezu. Oproti ní má však nižší hodnotu posuvu f_z - 0,2 oproti 0,295mm/zub. Zvyšování zubového posuvu se tedy jeví jako negativní.

U největšího průměru se u Varianty 3 potvrdila teorie o negativním vlivu zvětšování posuvu na zub nad hodnotu 0,2. Při porovnání prvních dvou variant by podle předchozích poznatků měla vycházet hůře Varianta 2. Má totiž vyšší šířku řezu. Při experimentu však dosáhly oba dva druhy nastavení podobných výsledků. Může to mít za následek mnoho faktorů jako například: nepřesnost měření, nestejnorodost materiálu VBD, či nestejnorodý materiál obrobku.

Dalším faktorem, který mohl negativně ovlivnit opotřebení testovacích destiček byla skutečnost, že v některých případech nová VBD škrtila již obrobenou plochu. To se stávalo v případech, že předchozí VBD dosáhla kritického obrobení a na dané vrstvě obrobku ještě zbývala šířka potřebná k přejezdu nové VBD. Bohužel se tato informace zaznamenala až v průběhu testování, a tak se na ni nereagovalo.

Na obrázku níže lze vidět porovnání jednotlivých variant.

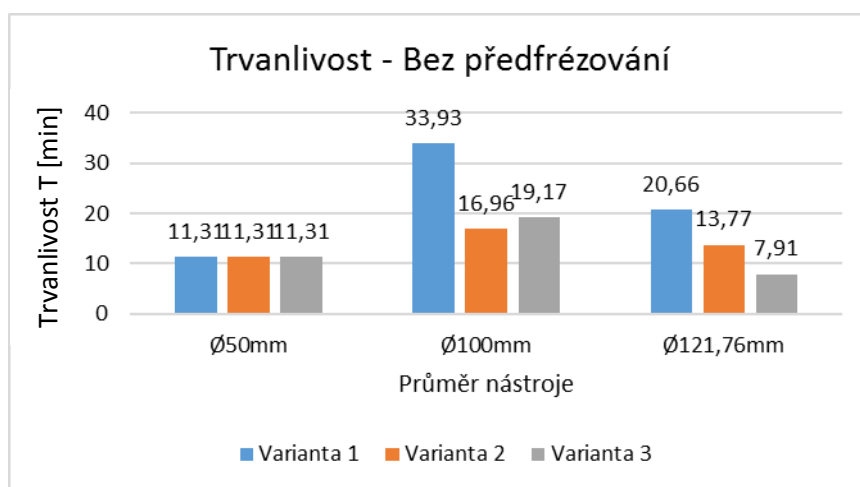


Graf 14 Trvanlivost - S předfrézováním

4.2 Bez předfrézování

U experimentu, kde dráha řezu procházela celou délkou obrobku se potvrdily hypotézy vzniklé z výsledků předchozího testování. Nejmenší průměr nástroje měl opět malou trvanlivost. U průměru 100 mm měla nejlepší výsledky Varianta 1 a zbylé dvě stejné pořadí jako u experimentu S předfrézováním. U největšího průměru vyšlo vše dle vydedukované návaznosti parametrů. Varianta 1 s menší šířkou řezu a nízkým posuvem dosáhla v porovnání nejvyšších hodnot trvanlivosti. Varianta 2 s vyšší šířkou řezu a stejným posuvem jako u předchozí varianty se umístila na druhém místě. V porovnání dopadla nejhůře Varianta 3 s velmi vysokým posuvem na zub.

Trvanlivosti opět v grafu níže.

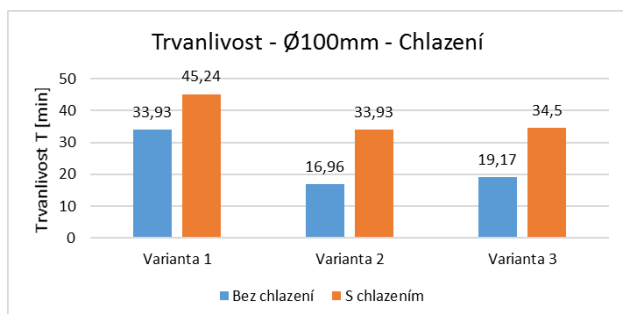


Graf 15 Trvanlivost. - Bez předfrézování

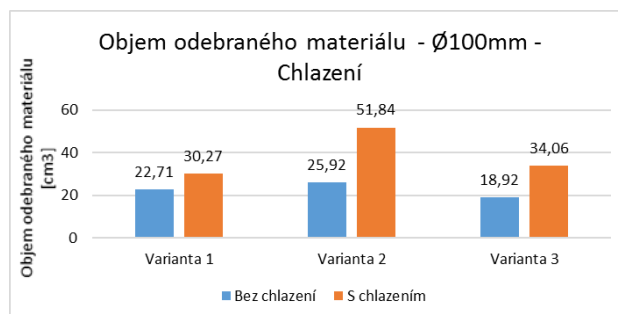
4.3 Chlazení

Experiment zaměřený na vliv chlazení se prováděl pouze pro střední průměr nástroje 100mm bez předfrézování.

Níže lze v grafech vidět porovnání mezi obráběním bez chlazení (modré sloupce) a s chlazením (oranžové).



Graf 16 Porovnání trvanlivosti - Bez a S chlazením



Graf 17 Porovnání objemu materiálu - Bez a s chlazením

Nárůst trvanlivosti a objemu odebraného materiálu %:

Varianta	1	2	3
Chlazení	33,33	100,06	79,97

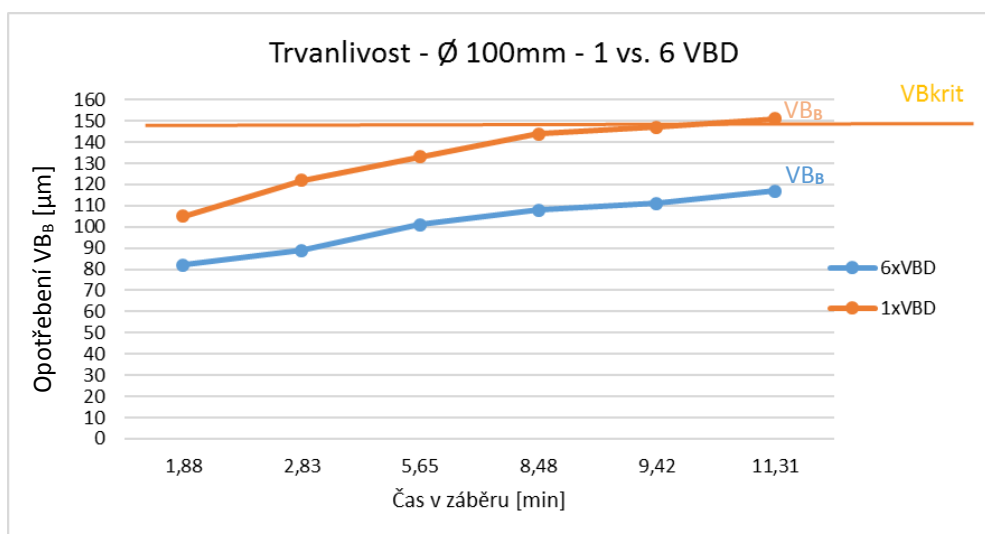
Tab. 17 Nárůst trvanlivosti při chlazení v %

Z grafů a tabulek výše lze vyčíst velmi vysoký nárůst trvanlivosti při použití chlazení. Spolu s ním zákonitě vzrostl i objem odebraného materiálu. Nejmenší hodnota navýšení trvanlivosti se projevila u první varianty a to 33,33%. U druhé varianty bylo navýšení o 100,06%. Potvrdila se tím teorie, která doporučuje použití chladicí kapaliny. Ta značným způsobem snižuje teplotu břitu a obrobku, zlepšuje mazání a pomáhá odvodu třísek. U všech průměrů hodnota trvanlivosti značně převyšuje optimální hranici 20 min. Rozhodně by se mohly upravit řezné podmínky a proces obrábění tím zefektivnit. Chlazení má rozhodně velmi kladný vliv na obrábění Inconelu 718.

4.4 Frézování s plně osazenou frézou

Testování s plně obsazenými lůžky frézovací hlavy probíhalo pouze u Varianty 2, průměru 100mm a 121,76mm. Dráhy byly vedeny přes celou délku obrobku, tedy bez předfrézování.

Porovnání trvanlivosti jednotlivých průměrů s 1 VBD a 6 VBD níže.

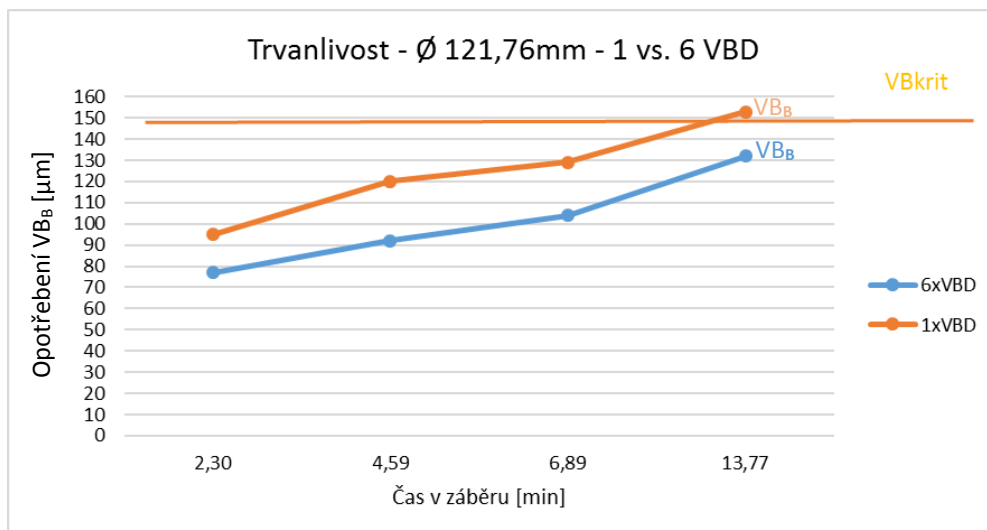


Graf 18 Trvanlivost - 1 vs. 6 VBD D100mm

Rozdíl trvanlivosti v % u průměru 100mm:

Čas [min]	1,88	2,83	5,65	8,48	9,42	11,31	Ø
Rozdíl trvanlivosti [%]	28,05	37,08	31,68	33,33	32,43	29,06	31,94

Tab. 18 Rozdíl trvanlivosti v % u průměru 100mm



Graf 19 Trvanlivost 1 vs. 6 VBD D121,76mm

Rozdíl trvanlivosti v % u průměru 121,76mm:

Čas [min]	77	92	104	129	132	Ø
Rozdíl trvanlivosti [%]	23,38	30,43	24,04	23,06	24,52	25,09

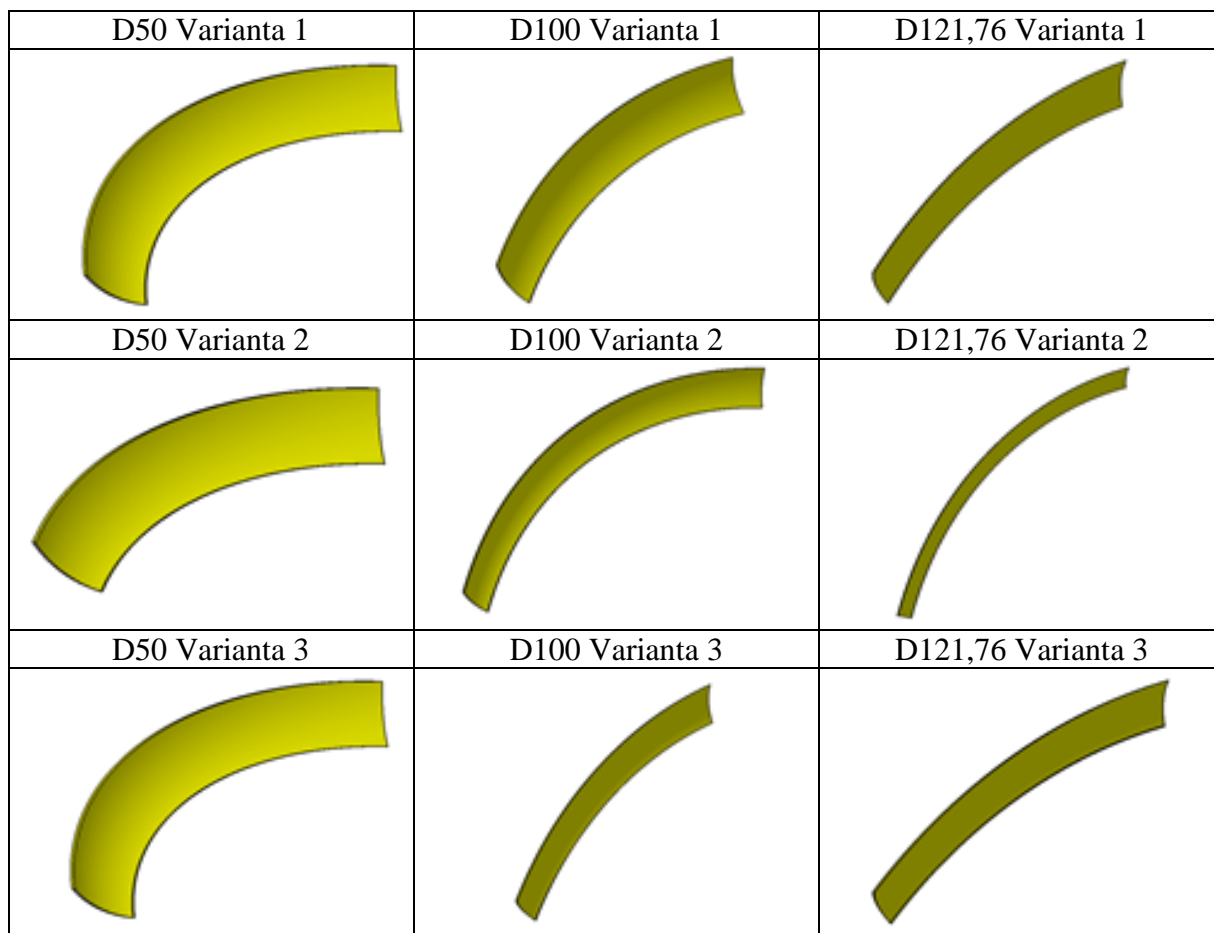
Tab. 19 Rozdíl trvanlivosti v % u průměru 121,76mm

U obou průměrů se prokázalo vhodnější použití maximálního počtu břitových destiček. Zvýšení trvanlivosti se během celého měření pohybovalo u průměru frézy 100mm kolem hodnoty 32%. U největšího průměru frézy byla průměrná hodnota přibližně o 7 procent nižší. lepší výsledky jsou zásluhou snížení vibrací nástroje, jelikož jsou v záběru vždy 2 břity. Dále je nástroj mnohem lépe vyvážený. Kladný vliv je v tomto případě i na vřeteno stroje, které je méně namáháno.

4.5 Hodnocení třísek

4.5.1 Modely třísek

V programu Catia V5R20 byly vytvořeny 3D modely třísek. Tyto modely lze použít k porovnání mezi skutečnou podobnou třísky a modelem. Dále odměřil přesný objem jednotlivých třísek.



Tab. 20 3D modely třísek

4.5.2 Hmotnost třísek

Pomocí přesné váhy byly změřeny hmotnosti třísek odebraných u jednotlivých variant a průměrů nástrojů, vždy po prvním přejezdu obrobku.

Naměřené hmotnosti [g]:

(Šedivě zvýrazněná buňka – Varianta 3, D50 – je totožná s Variantou 1, D50)

	Skutečná hmotnost [g]			3D model [g]		
	Ø50mm	Ø100mm	Ø121,76mm	Ø50mm	Ø100mm	Ø121,76mm
Varianta 1	0,070	0,039	0,031	0,076	0,036	0,033
Varianta 2	0,045	0,094	0,115	0,042	0,092	0,107
Varianta 3	0,070	0,057	0,060	0,076	0,061	0,057

Tab. 21 Hmotnosti třísek: Skutečná hmotnost a hmotnost dle 3D modelu

Rozdíl hmotností třísek [%] :

	Ø50mm	Ø100mm	Ø121,76mm
Varianta 1	8,2	6,7	5,1
Varianta 2	6,7	1,9	7,1
Varianta 3	8,2	7,3	5,6

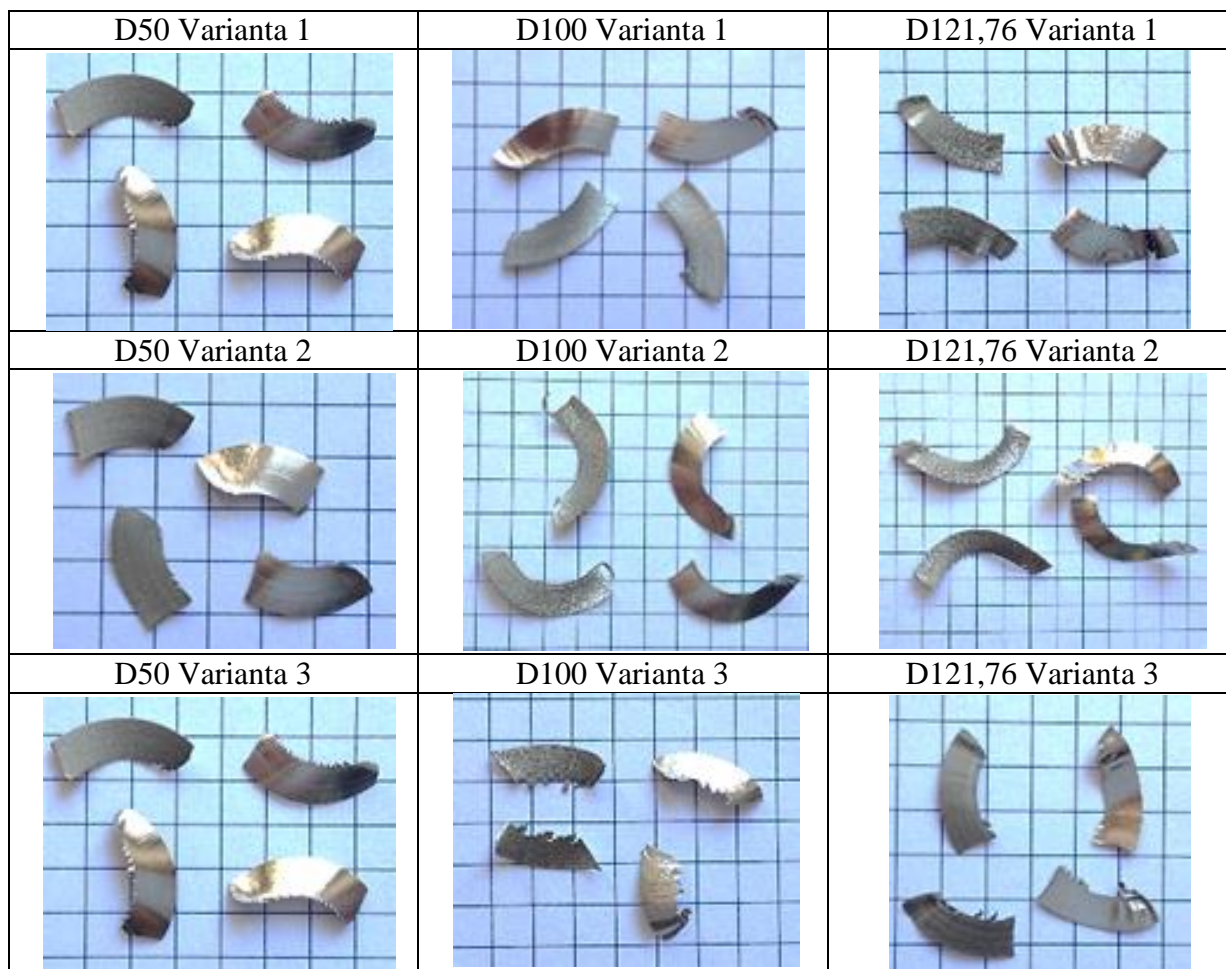
Tab. 22 Rozdíl hmotností

Tabulky výše zobrazují porovnání hmotností skutečně naměřených hodnot hmotnosti odebraných třísek a dat získaných ze softwaru Catia, ve kterém byly vytvořeny modely třísek.

Maximální hodnota rozdílu hmotností je rovna 8,2%. Tato hodnota není příliš vysoká, bereme-li v potaz odchylku laboratorní váhy a zkreslení výsledků 3D softwaru. Nakreslené modely tedy můžeme považovat za dostatečně přesné.

4.5.3 Foto třísek

Třísky byly odebrány po prvním přejezdu nové VBD.



Tab. 23 Foto třísek – S předfrézováním

Všechny třísky mají podobný charakter. Ani v jednom případě nedocházelo k lámání, vždy došlo oddělení celé plochy v jednom kuse. Plocha, která se dotýkala VBD je vysoce lesklá, zatímco druhá strana matná.

Na spodní části třísky, kde šířka tloušťka blížila k nule je patrné narušování celistvosti. U určitých variant a průměrů se zde tvořily trhliny ve tvaru pilových zubů. Nejvíce jsou patrné u průměru 100mm a 121,76 varianty 3. Z výsledků se dá předpokládat, že narušování má spojitost s velikostí posuvu a úhlu opásání. Přičemž velikost f_z má větší vliv. S jejím zvětšováním se zvyšuje výskyt poruch celistvosti třísky u nízkých hodnotách tloušťky třísky.

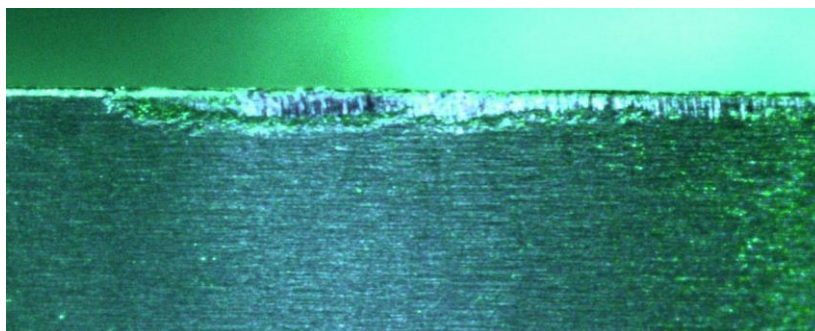
4.6 Opotřebení břitů

Dle snímků pořízených pomocí měřicího zařízení Blickle Multicheck PC500 bylo zjištěno významné otupování řezné hrany na hranici kontaktu VBD s povrchovou vrstvou odebíraného materiálu. Při pohledu na upnutou VBD byla tedy tato oblast na hlavním ostří vždy vertikálně 2 mm od dolní hranice břitové destičky, přesně ve výšce hloubky řezu a_p . Na zbylé délce řezu se opotřebení tvořilo konstantně. Narůstalo postupně v blízkosti povrchové vrstvy.

Největší podíl na vzniku toho nárůstu opotřebení má deformační zpevňování povrchu obráběné plochy při odebírání materiálu a dle literatury je pro frézování Inconelu 718 typické.

Tento způsob opotřebení byl shledán u všech průměrů a typů obrábění. Mírné odchylky byly vyzorovány pouze v délce návaznosti nižšího konstantního opotřebení a výrazného nárůstu na hranici obrobku. To bylo pravděpodobně způsobeno různou šířkou zpevněné vrstvy. Bohužel nemůžeme zpětně zjistit vliv řezných parametrů na ovlivnění její velikosti. To však ani nebylo v původním zadání práce.

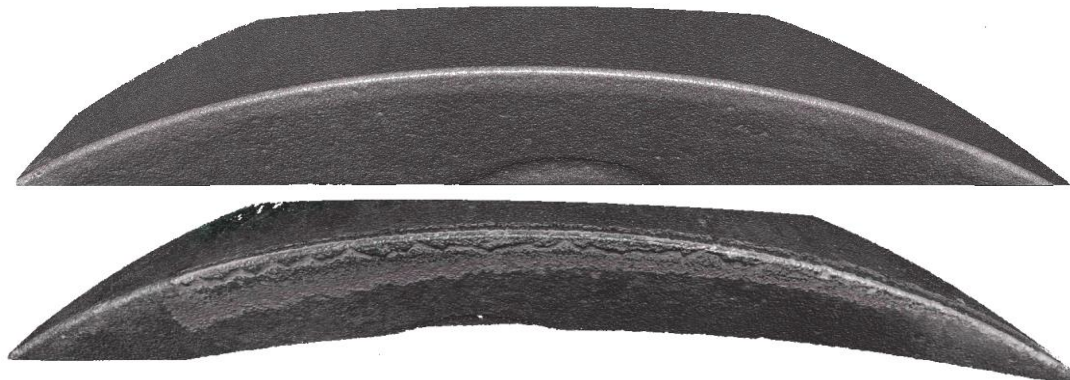
Na obrázku níže lze vidět průměrné opotřebení VBD.



Obr. 36 Opotřebení - Bez D100 V2

Pomocí přístroje Alicona byly pořízeny kvalitnější smínky opotřebení z jiného úhlu. Potrdilo se nejvyšší opotřebení v oblasti zpevněné vrstvy.

U těchto snímků bylo možno posoudit i opotřebení čela VBD. U všech variant a průměrů docházelo k mírnému vyštipování materiálu za hranicí řezné hrany a v celé ploše odebírané třísky.

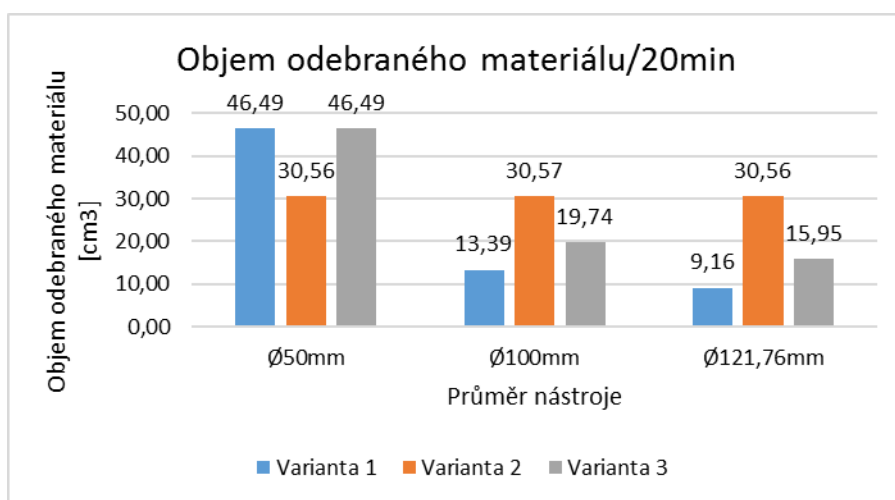


Obr. 37 Nový vs. opotřebený břit

4.7 Shrnutí

Dle získaných výsledků lze přisuzovat zvýšení trvanlivosti nižším hodnotám nastavení šířky řezu a_p , dále pak úhlu opásání a posuvu na zub. Posuv na zub f_z má na trvanlivost ze jmenovaných parametrů největší vliv. Zvýšení trvanlivosti pravděpodobně přispělo ke snížení řezného odporu materiálu a snížení teploty při kontaktu VBD s obrobkem.

Vyšší hodnota trvanlivosti však nezajistí vyšší produktivitu obrábění. Trvanlivost je podle naměřených výsledků pevně spjata s odporem spjatým s oddělováním třísky. Dle grafu č.20 níže lze vyčíst největší hodnotu úberu materiálu u frézy průměru 50mm, Varianty 1. Na druhém místě se umístil průměr 100 u všech variant. Nejmenší průměr frézy však vykazoval nízké hodnoty trvanlivosti, a proto se jako vhodný kompromis mezi trvanlivostí blížící se požadované hodnotě 20 minut a objemem odebraného materiálu jeví průměr 100 mm u Varianty 2.



Graf 20 Objem odebraného materiálu/20min

Dále se velmi kladně projevilo použití procesní kapaliny, která snižuje teplotu břitů, zlepšuje mazání a odvádí třísky z místa řezu.

Pozitivní vliv má i osazení těla frézy plným počtem břitů. Snižují se vibrace a nástroj je lépe vyvážen.

Třísky měly velmi podobný charakter. Ani v jedno případě nedocházelo k lámání třísky a měly velmi podobný tvar. Na spodní hraně třísky, která se blížila nule se v určitých případech tvořily trhliny. Jejich výskyt a hloubka se zvyšovaly s nárůstem posuvové rychlosti a úhlu opásání. Znatelnější vliv měl nárůst f_z . Viz Tab.25 (str.43) D100 Varianta 3 a D121,76 Varianta 3. U Posledního obrázku je vidět úplné odlamování vzniklých „zubů“.

5 Závěr

Diplomová práce byla zaměřena na testování trvanlivosti vyměnitelné břitové destičky při rovinném frézování slitiny Inconel 718.

První část dle zadání obsahuje rozbor současného stavu. Popisují se zde mechanické vlastnosti obráběného materiálu, chemické složení a rozsah použitelnosti v jednotlivých odvětvích. Slitina je díky své značné pevnosti za vysokých i nízkých hodnot, velmi dobré korozivzdornosti a nízké tepelné vodivosti vhodná pro použití ve velmi náročných prostředích. Její obrábění však není snadné a nese svá úskalí. V první části se popisují vhodné řezné materiály a jejich chování při obrábění Inconelu. Posuzuje se také tvar VBD a otupení vnikající při procesu obrábění.

Ve druhé části jsou popsány jednotlivé varianty nastavení řezných podmínek. Varianta 1 s konstantní délkou oblouku, Varianta 2 s neměnnou šířkou řezu odpovídající hodnotě 30% průměru nástroje a Varianta 3 se stálou délkou oblouku a plochou třísky. Dále se zde popisují jednotlivé etapy experimentu a proměnlivé strategie obrábění, parametry testované vyměnitelné břitové destičky, fréz, frézky a měřícího zařízení Blickle. Konec kapitoly tvoří tabulky s naměřenými hodnotami trvanlivosti a objemu odebraného materiálu při frézování jednou břitovou destičkou. Dále pak za použití procesní kapaliny a s plným počtem obsazených lůžek frézy.

Třetí část obsahuje hodnocení výsledků. Z porovnání trvanlivostí jednotlivých variant se vyzoroval vliv některých řezných parametrů – posuvu na zub, šířky řezu a úhlu opásání. Ze všech parametrů se nejvíce projevilo zvyšování posuvové rychlosti nad hodnotu 0,2mm/zub. To bylo zaznamenáno jako velmi negativní. Dále se trvanlivost snižovala s narůstající šířkou řezu a úhlem opásání. Z hlediska trvanlivosti se nejvíce osvědčila Varianta 1 s průměrem nástroje 100mm. Vysoká trvanlivost však nezaručuje produktivitu. Při porovnání objemu odebraného materiálu (Graf 20, str.45) vykazuje nejvyšší hodnotu průměr frézy 50mm, Varianta 1. Ta však má velmi nízkou trvanlivost. Jako vhodný kompromis mezi trvanlivostí a objemem odebraného materiálu se jeví průměr frézy 100mm, Varianta 2. Ve stejném porovnání jsou velmi dobré výsledky i u největšího průměru frézy totožné varianty. U vyšších průměrů tedy lze dle naměřených výsledků doporučit obrábění šířkou řezu rovnou 30% průměru frézy. Pro potvrzení tohoto tvrzení by bylo vhodné použít více větších průměrů fréz a udělat několik opakování.

Velmi kladný vliv byl naměřen u použití procesní kapaliny. Zaznamenaný nárůst trvanlivosti břítu se u Varianty 2 vyšplhal na hranici 100%. Při plném obsazení lůžek frézy břitovými destičkami se trvanlivost u průměru 100mm zvýšila o 25 a 32%.

Pro potvrzení výsledných hypotéz by bylo vhodné provést opakování všech variant a způsobů frézování. Výsledky mohly být zkráceny i z důvodu škrtání nové VBD na ploše obrobene předchozí VBD. Vyvarování se tohoto jevu by se docílilo prvním přejezdem vždy na hraně obrobku. Dalšími faktory ovlivňujícími výsledky jsou například chyba v odměřování, nestejnorodost materiálu, rozdíl kvality jednotlivých břitů, či rozdílná tuhost jednotlivých fréz. Nižší tuhost lze předpokládat u experimentální frézy. Její tuhost však nikdy nebyla měřena.

Další experimenty by se měly zaměřit nejvíce na použití procesní kapaliny, která měla značný vliv na trvanlivost nástroje.

Diplomová práce splnila vstupní požadavky v plném rozsahu a pomohla nasměrovat určitým směrem další experimenty vedoucí k dosažení optimálního nastavení řezných podmínek pro produktivní obrábění slitiny Inconel 718.

6 Zdroje

6.1 Seznam literatury

- [1] OSG Tool. OSG [online]. [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: <http://www.osgtool.com/>
- [2] Skripta Technologie II. [cit. 2017-02-10]. VŠB - Technická Univerzita Ostrava. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_1dil.pdf
- [3] OĞUZ ÇOLAK. Investigation on Machining Performance of Inconel 718 under High Pressure Cooling Conditions. [cit. 2017-03-10]. Journal of Mechanical Engineering 58(2012)11, Dostupné z: http://www.sv-jme.eu/data/upload/2012/11/07_2012_730_Colak_02.pdf
- [4] Eiselstein H. L. a D. J. Tillack. The invention and definition of alloy 625. Inco Alloys International, Inc. Edited by Edward A. Loria, The Minerals, Metals & Materials Society 1991. http://www.tms.org/superalloys/10.7449/1991/Superalloys_1991_1_14.pdf
- [5] Oil industry [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.industrysourcing.com/sites/default/files/1409imne-sandvik-coromant-cutting-tool-corodrigill-801.jpg>
- [6] Sandvik [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/boring/how-to-achieve-good-hole-quality/selection-of-inserts/insert-shape/pages/default.aspx>
- [7] [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <https://www.grouphes.com/Content/Images/uploaded/MQL.jpg>
- [8] [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vysokotlaka-chlazení-pro-obrabeni.html>
- [9] KOCMAN, K., PROKOP, J.: Technologie obrábění. Brno. Akademické nakladatelství. CERM, 2005. ISBN 80-214-3068-0
- [10] Shane Y. Hong, Irel Markus, Woo-cheol Jeong: New cooling approach and tool life improvement in cryogenic machining of titanium alloy Ti-6Al-4V : International Journal of Machine Tools & Manufacture 41 (2001) 2245–2260
- [11] Aznizar Ahmad-Yazid, Zahari Taha, Indra Putra Almanar : A review of cryogenic cooling in high speed machining (HSM) of mold and die steels : Scientific Research and Essays Vol. 5 (5), pp. 412-427, 4 March, 2010
- [12] BENEŠ, Vladimír; MRKVICA, Miloš. Teorie řezných nástrojů : určeno pro stud. fak. strojní. 1. vyd. Praha : ČVUT, 1990. ISBN 80-01-00265-9.
- [13] [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: http://www.airtx.com/images/T/60040_60071_300.jpg
- [14] [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: http://emag.directindustry.com/wp-content/uploads/sites/3/2015/10/Cryo-Tech_The-Future-of-Hard-Metal-Machining-is-Getting-Cold.jpg
- [15] [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: [http://slideplayer.cz/slide/2618404/9/images/5/Technologick%C3%A9+parametry+%C5%99+ezn%C3%BDch+materi%C3%A1l%C5%AF+\[H-II/57\].jpg](http://slideplayer.cz/slide/2618404/9/images/5/Technologick%C3%A9+parametry+%C5%99+ezn%C3%BDch+materi%C3%A1l%C5%AF+[H-II/57].jpg)
- [16] [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/1919742/>
- [17] [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat_pro_rez_nastroje/1_Slinute_karbidy/Nepovlakovane/VC.jpg
- [18] [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/docs-images/17/113327/images/2-1.jpg>

- [19] [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z:
<http://www.diamantovekotouce.cz/fotocache/bigorig/becke%20desticka%20cnma%20mw%20pdca.jpg>
- [20] ŘEHOŘ, Jan. *TO-Temata_1-9_kor: Materiál k předmětu TO.*, 101.
- [21] Sandvik Coromant – Příručka HRSA . [USB]. *Appl. Guide HRSA*. 2011. Není dostupné. [10.5. 2016].
- [22] [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.prumysl.cz/wp-content/uploads/2013/08/Jetstream-Tooling011.jpg>
- [23] Inconel 718 [online]. [cit. 2017-01-19]. Dostupné z:
<http://3.imimg.com/data3/NY/DB/MY-5174462/inconel-718-bar-uns-no-7718-500x500.jpg>
- [24] DMG MORI. DMG MORI [online]. [cit. 2017-03-15]. Dostupné z:
<http://www.directindustry.com/prod/dmg-mori/product-5973-1097095.html>
- [25] DMG MORI. DMG MORI [online]. [cit. 2017-03-15]. Dostupné z:
<http://uk.dmgmori.com/products/milling-machines/universal-milling-machines-for-5-sided-5-axis-machining/dmu-evo/dmu-40-evo-linear#Technic>

6.2 Seznam tabulek

Tab. 1 Chemické složení Inconelu 718 [23]	12
Tab. 2 Mechanické vlastnosti Inconelu 718 [23]	13
Tab. 3 Vzorce pro frézování[12]	25
Tab. 4 Parametry – Varianta 1	26
Tab. 5 Parametry – Varianta 2	27
Tab. 6 Parametry – Varianta 3	28
Tab. 7 Parametry stroje[25].....	32
Tab. 8 Hodnoty - Trvanlivost - S předfrézováním	34
Tab. 9 Hodnoty - Odebraný materiál - S předfrézováním.....	34
Tab. 10 Trvanlivost - Bez předfrézování	35
Tab. 11 Odebraný materiál - Bez předfrézování	35
Tab. 12 Trvanlivost - Chlazení.....	35
Tab. 13 Odebraný materiál - Chlazení	35
Tab. 16 Trvanlivost - 6xVBD	36
Tab. 17 odebraný materiál - 6xVBD.....	36
Tab. 18 Velikost opotřebení - 6xVBD	36
Tab. 19 Nárůst trvanlivosti při chlazení v %.....	40
Tab. 20 Rozdíl trvanlivosti v % u průměru 100mm.....	40
Tab. 21 Rozdíl trvanlivosti v % u průměru 121,76mm.....	41
Tab. 22 3D modely třísek.....	42
Tab. 23 Hmotnosti třísek: Skutečná hmotnost a hmotnost dle 3D modelu.....	42
Tab. 24 Rozdíl hmotností	43
Tab. 25 Foto třísek – S předfrézováním	43

6.3 Seznam obrázků

Obr. 1 Inconel 718[23]	12
Obr. 2 Inconel 718 - Oil industry[5]	13
Obr. 3 Struktura SK [17]	16
Obr. 4 Řezná keramika [18]	17
Obr. 5 VBD s CBN [19]	18
Obr. 6 Tryska pro MQL [7]	19
Obr. 7 Vysokotlaké chlazení [22]	20
Obr. 8 Trysky na studený vzduch [13]	20
Obr. 9 Kryogenní chlazení nástroje [14]	21
Obr. 10 Tvary VBD [6]	21
Obr. 11 Opotřebení řezného nástroje [20]	22
Obr. 12 Vrubové opotřebení [21]	23
Obr. 13 Plastická deformace [21]	23
Obr. 14 Vylamování břitu [21]	23
Obr. 15 D121,76 Varianta 1	26
Obr. 16 D100 Varianta 1	26
Obr. 17 D50 Varianta 1	26
Obr. 18 D50 Varianta 2	27
Obr. 19 D100 Varianta 2	27
Obr. 20 D121,76 Varianta 2	27
Obr. 21 D50 Varianta 3	28
Obr. 22 D100 Varianta 3	28
Obr. 23 D121,76 Varianta 3	28
Obr. 24 Obráběná plocha - S předfrézováním	29
Obr. 25 Obráběná plocha - Bez předfrézování	29
Obr. 26 Loga OSG [1]	30
Obr. 27 VBD [1]	30
Obr. 28 Fréza 50mm	31
Obr. 29 Fréza 100mm	31
Obr. 30 Fréza 121,76mm	31
Obr. 31 DMG MORI DMU 40 eVo linear	32
Obr. 33 Svěrák - pravá strana	33
Obr. 32 Svěrák - levá strana	33
Obr. 35 přípravek pro měření	33
Obr. 36 Blickle Multicheck PC500	33
Obr. 37 Opotřebení - Bez D100 V2	44
Obr. 38 Nový vs. opotřeбенý břit	44

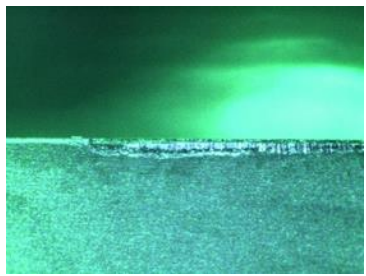
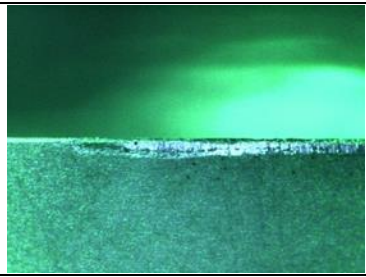
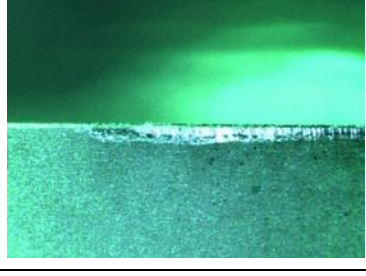
6.4 Seznam grafů

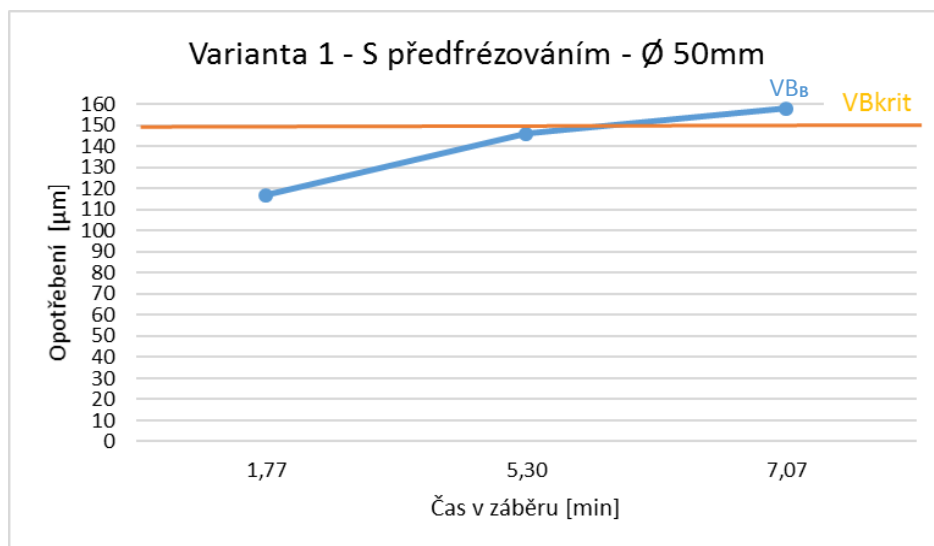
Graf 1 Graf použitelnosti řezných materiálů [15]	15
Graf 2 Vliv závislosti tvrdosti materiálu na teplotě [16].....	15
Graf 3 Trvanlivost - S předfrézováním	34
Graf 4 Objem odebraného materiálu - S předfrézováním	34
Graf 5 Trvanlivost - Bez předfrézování	35
Graf 6 Objem odebraného materiálu - Bez předfrézování	35
Graf 7 Trvanlivost – Chlazení	35
Graf 8 Objem odebraného materiálu - Chlazení	35
Graf 9 Trvanlivost - 6xVBD	36
Graf 10 Objem odebraného materiálu - 6xVBD	36
Graf 11 Průběh opotřebení - V1 D50 - S předfrézováním	37
Graf 12 Průběh opotřebení - V1 D100 - S předfrézováním	37
Graf 13 Průběh opotřebení - V1 D121,76 - S předfrézováním	37
Graf 14 Trvanlivost - S předfrézováním	38
Graf 15 Trvanlivost. - Bez předfrézování	39
Graf 16 Porovnání trvanlivosti - Bez a S chlazením	39
Graf 17 Porovnání objemu materiálu - Bez a s chlazením.....	39
Graf 18 Trvanlivost - 1 vs. 6 VBD D100mm.....	40
Graf 19 Trvanlivost 1 vs. 6 VBD D121,76mm	41
Graf 20 Objem odebraného materiálu/20min.....	45

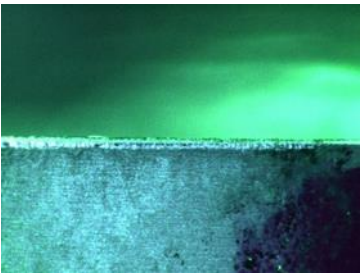
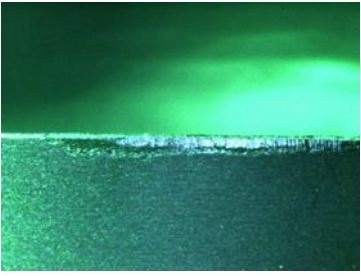
7 Přílohy

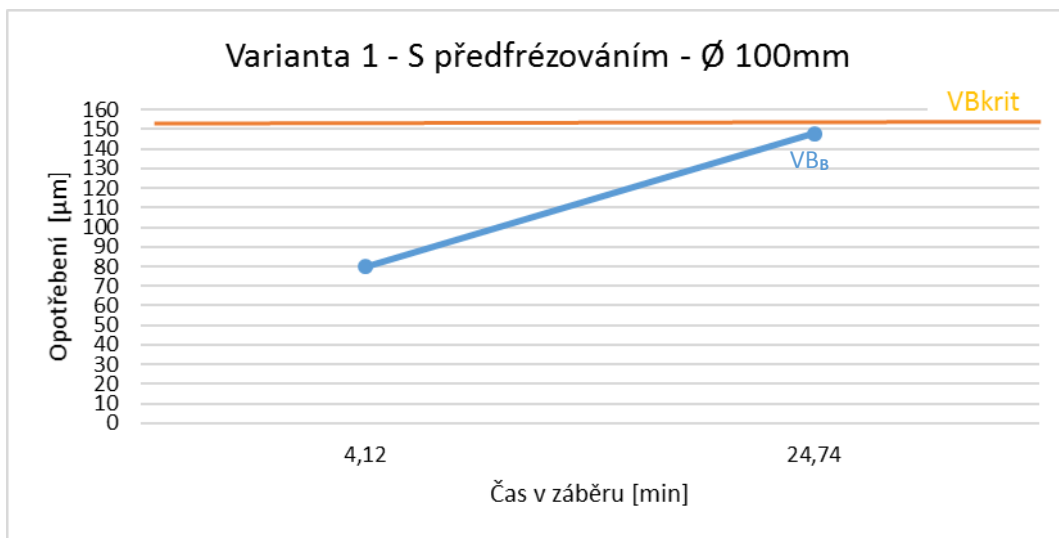
7.1 Naměřené hodnoty + foto opotřebení + grafy průběhu opotřebení

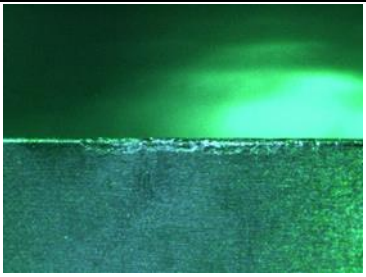
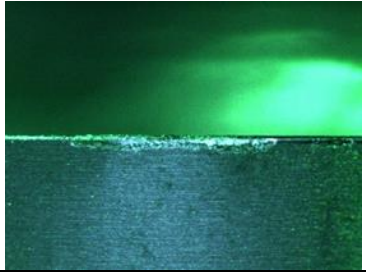
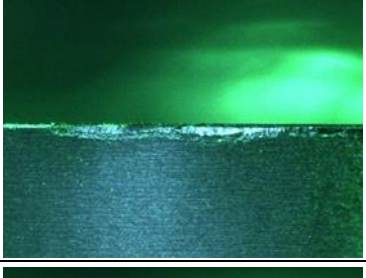
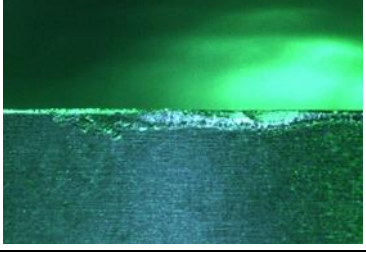
7.1.1 S předfrézováním

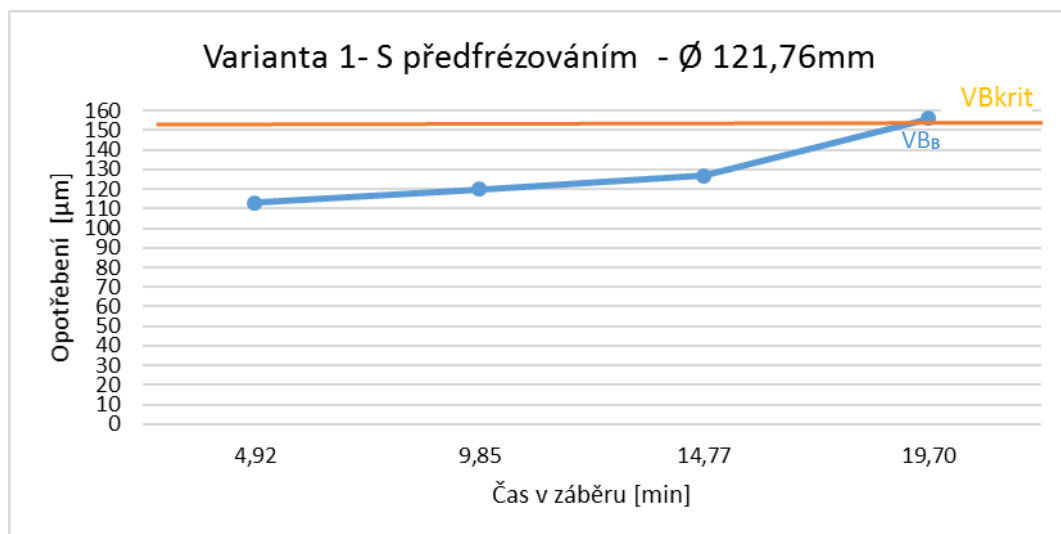
S předfrézováním – D50 Varianta 1			
Přejezd	Opotřebení [μm]	Čas v záběru [min]	
1	117	1,77	
3	146	5,30	
4	158	7,07	

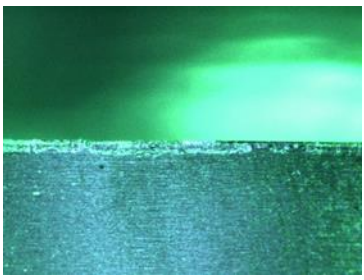
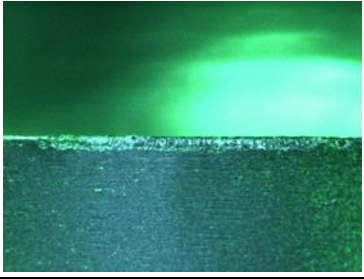
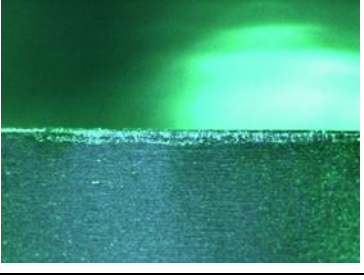
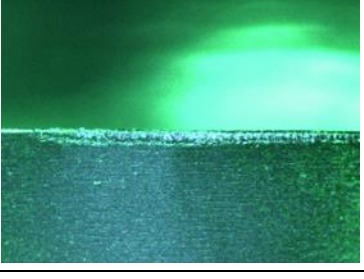
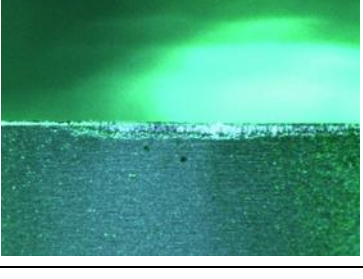


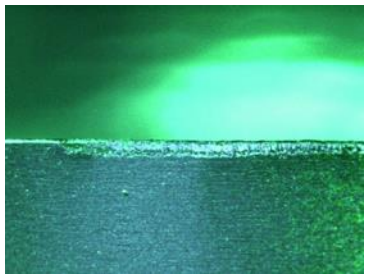
S předfrézováním - D100 Varianta 1			
Přejezd	Opotřebení [μm]	Čas v záběru [min]	
1	80	4,12	
6	148	24,74	

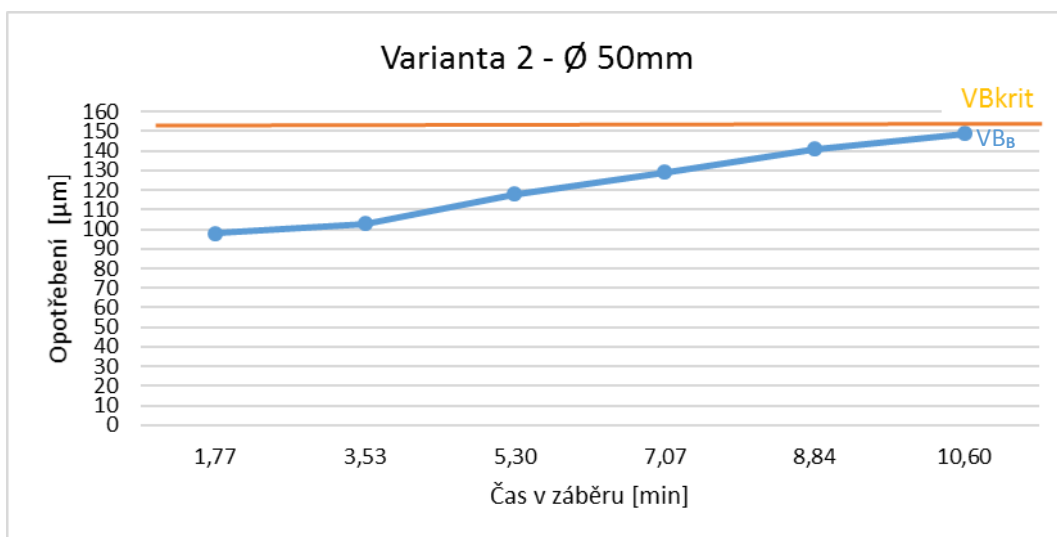




S předfrézováním – D121,76 Varianta 1			
Přejezd	Opotřebení [μm]	Čas v záběru [min]	
1	113	4,92	
2	120	9,85	
3	127	14,77	
4	156	19,70	

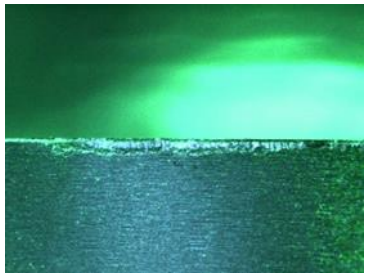
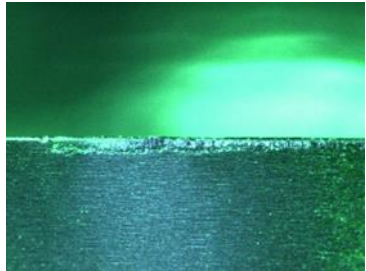


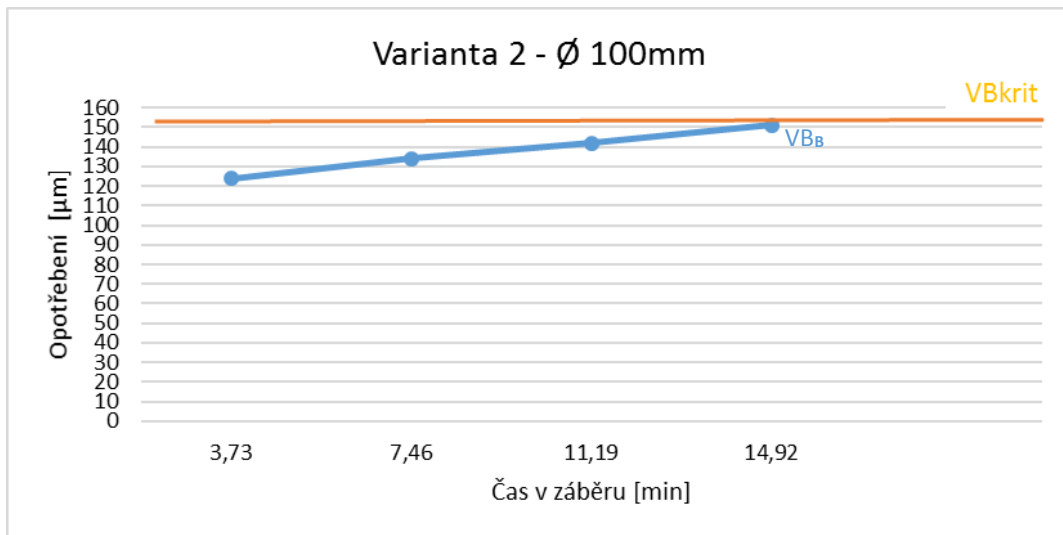
S předfrézováním – D50 Varianta 2			
Přejezd	Opotřebení [μm]	Čas v záběru [min]	
1	98	1,77	
2	103	3,53	
3	118	5,30	
4	129	7,07	
5	141	8,84	

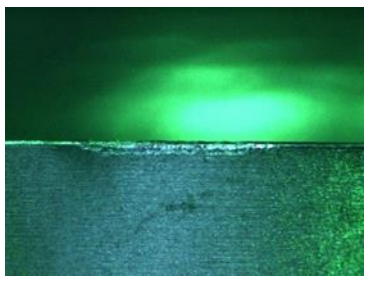
6	149	10,60	
---	-----	-------	--

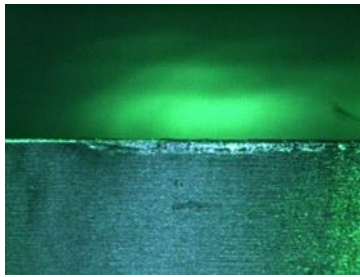
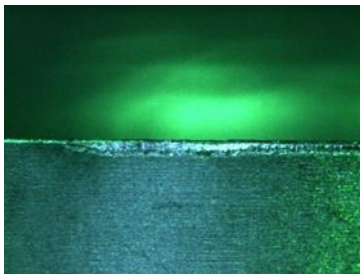
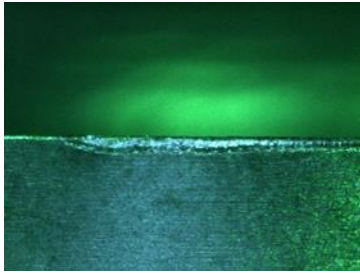



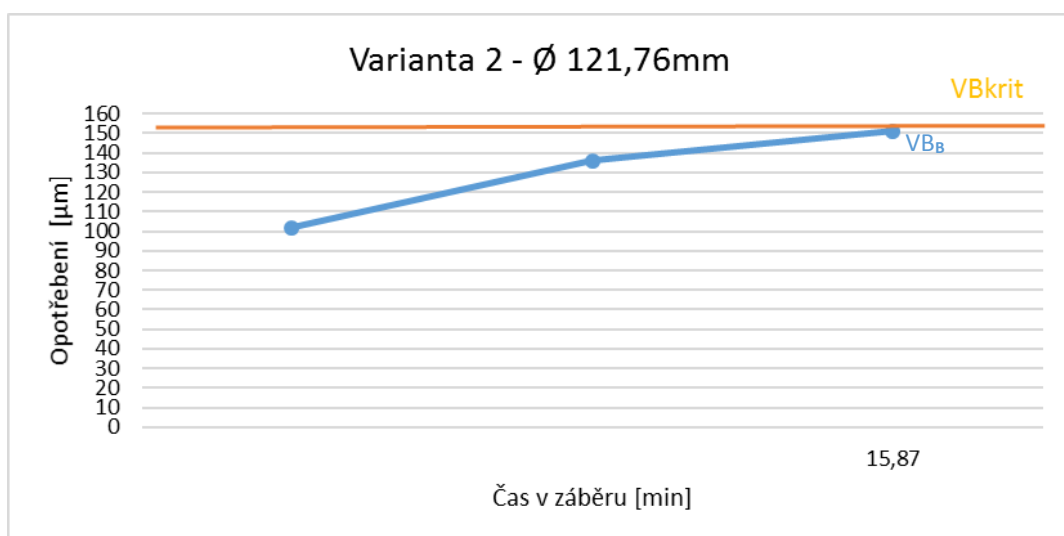
S předfrézováním – D100 Varianta 2			
Přejezd	Opotřebení [µm]	Čas v záběru [min]	
1	124	3,73	
2	134	7,46	

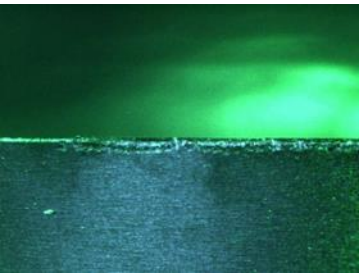
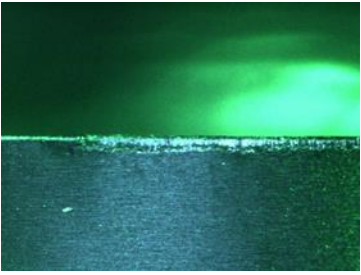
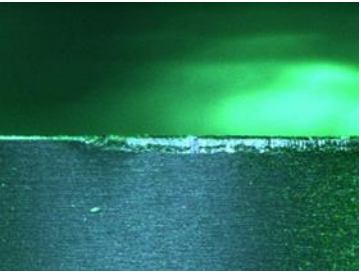
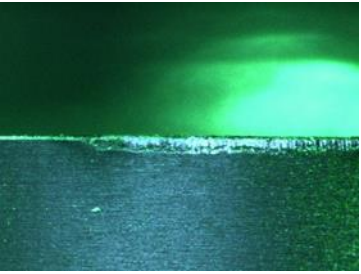

3	142	11,19	
4	151	14,92	




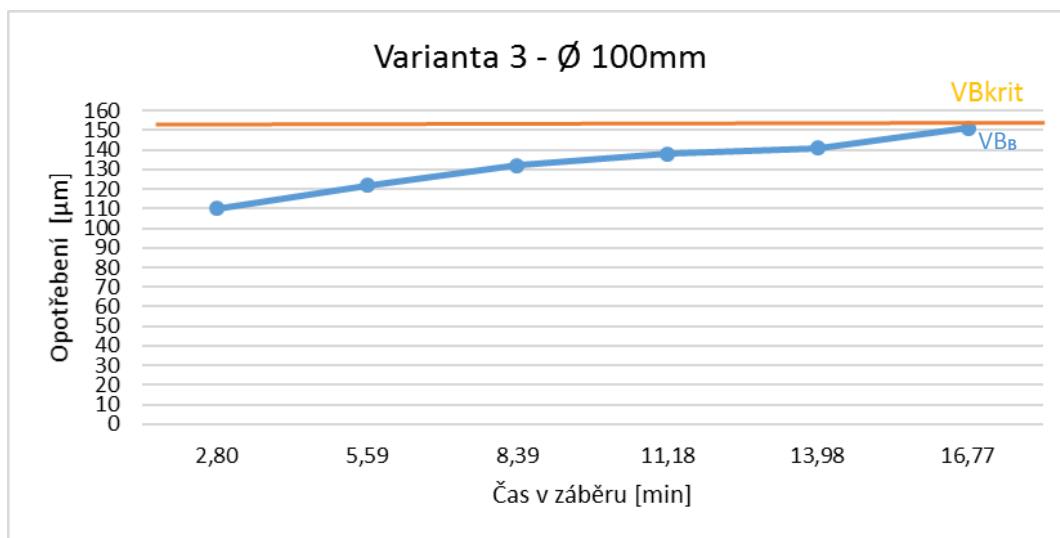
S předfrézováním – D121,76 Varianta 2			
Přejezd	Opotřebení [µm]	Čas v záběru [min]	
1	100	3,97	

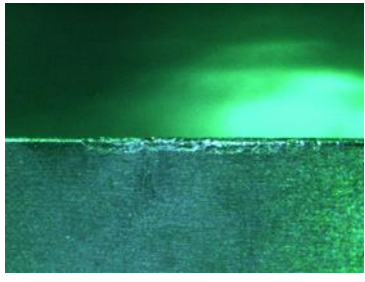
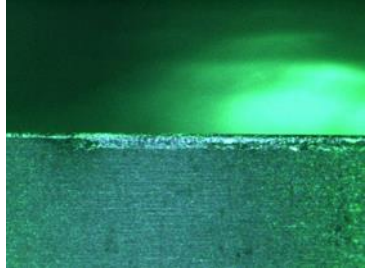
2	110	7,94	
3	134	11,91	
4	142	15,87	
5	153	19,84	

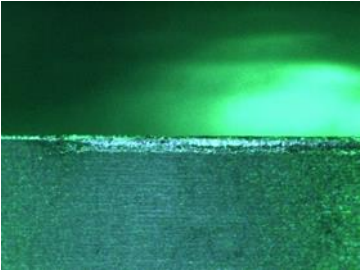
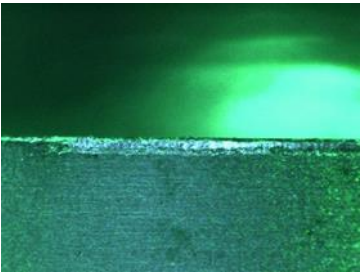
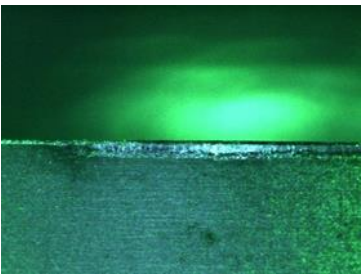


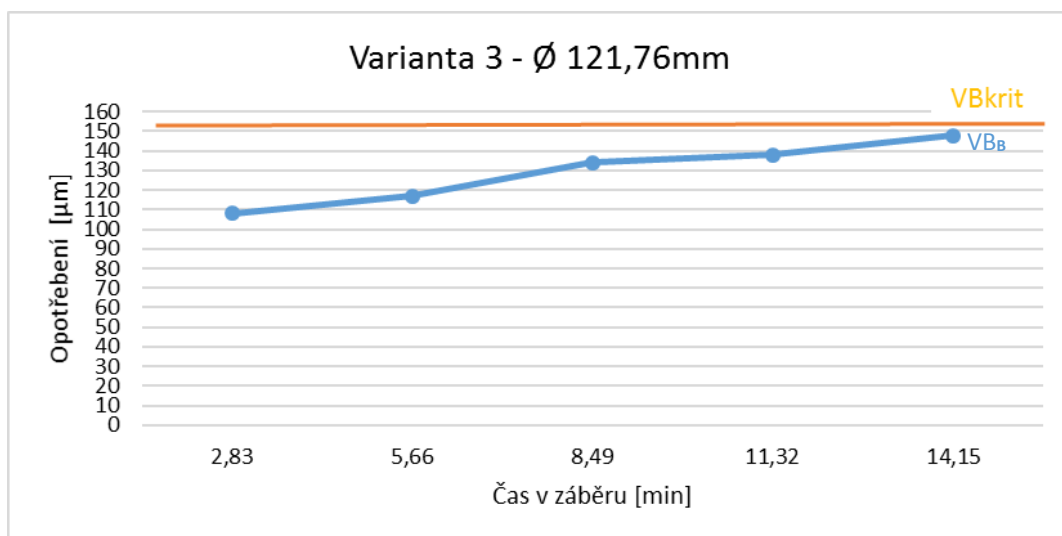
S předfrézováním – D100 Varianta 3			
Přejezd	Opotřebení [μm]	Čas v záběru [min]	
1	110	2,80	
2	122	5,59	
3	132	8,39	
4	138	11,18	
5	141	13,98	

6	151	16,77	
---	-----	-------	--


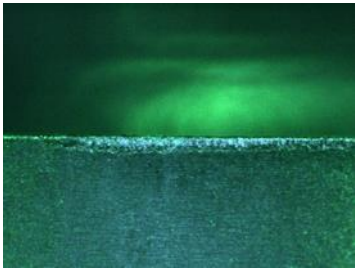
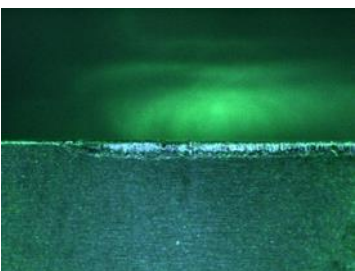


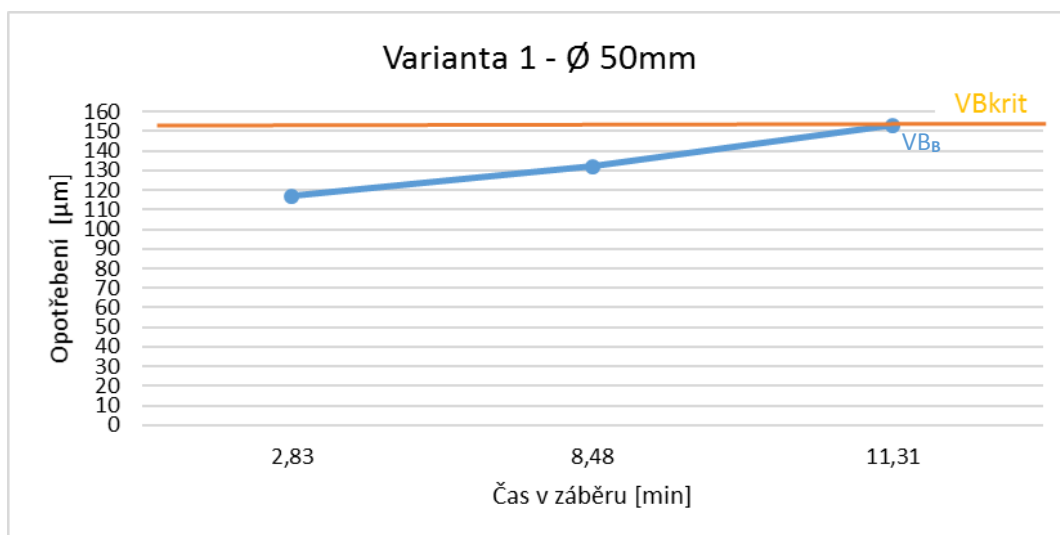
S předfrézováním – D121,76 Varianta 3			
Přejezd	Opotřebení [µm]	Čas v záběru [min]	
1	108	2,83	
2	117	5,66	

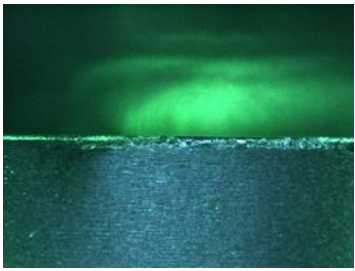
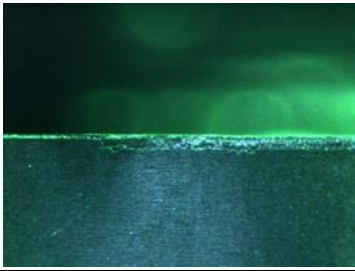
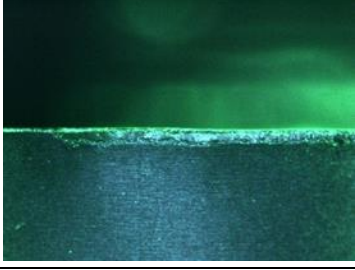
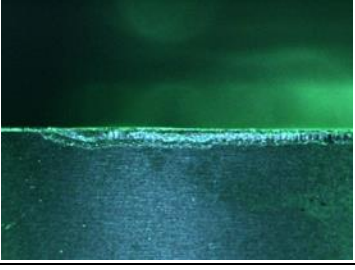
3	134	8,49	
4	138	11,32	
5	148	14,15	

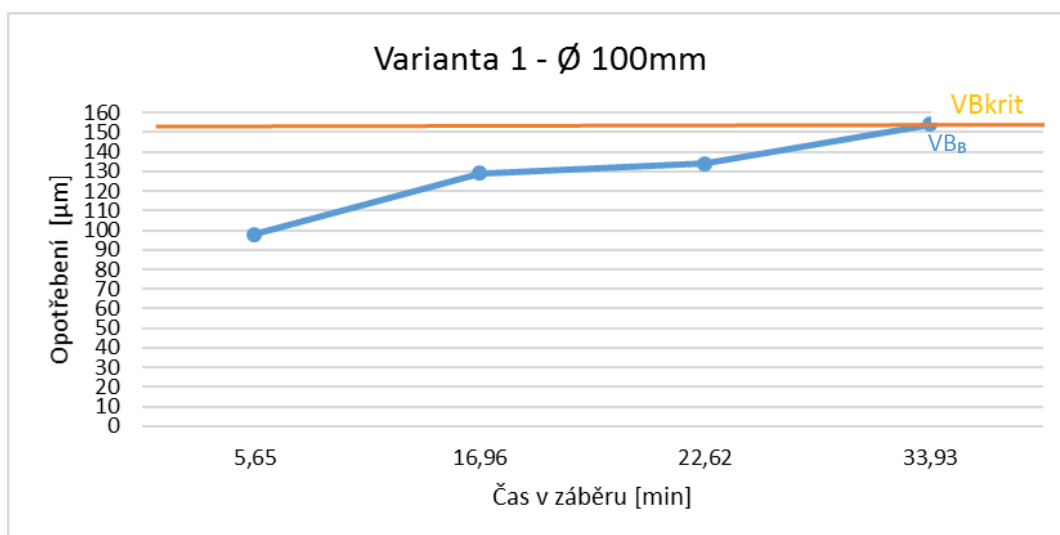


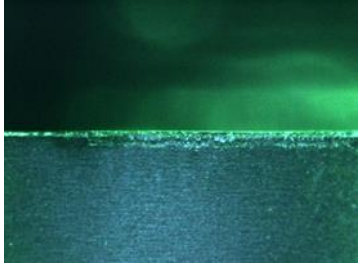
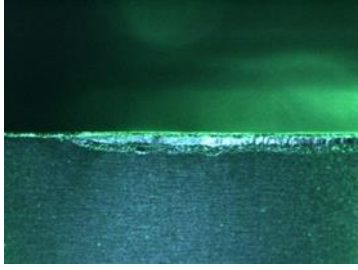
7.1.2 Bez předfrézování

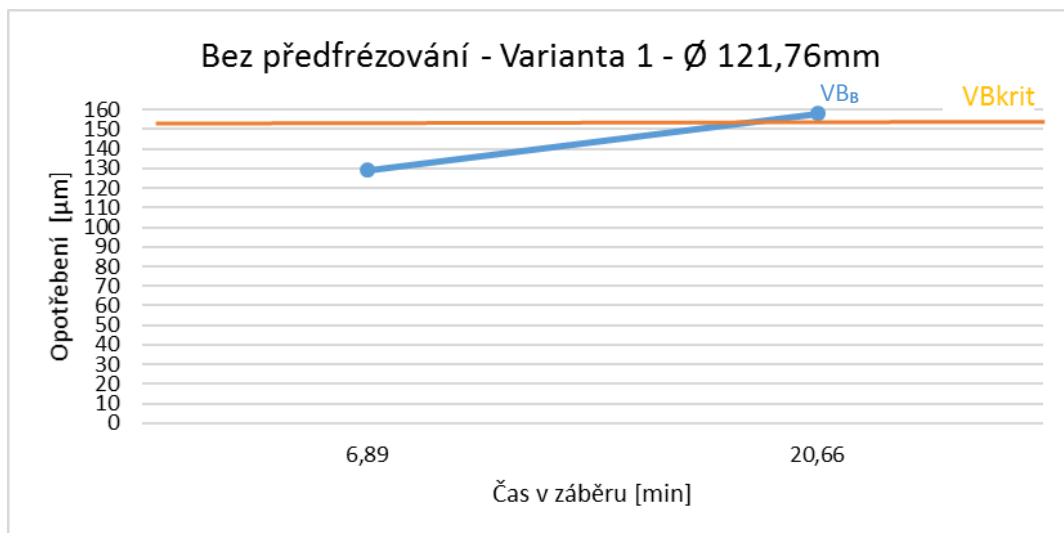
Bez předfrézování – D50 Varianta 1			
Přejezd	Opotřebení [μm]	Čas v záběru [min]	
1	117	2,83	
2	132	8,48	
3	153	11,31	

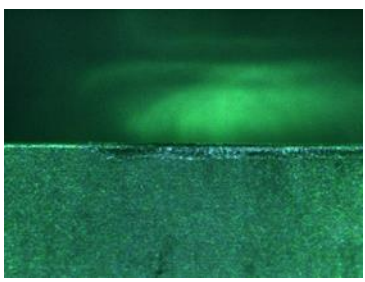
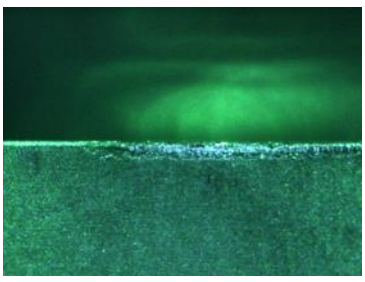
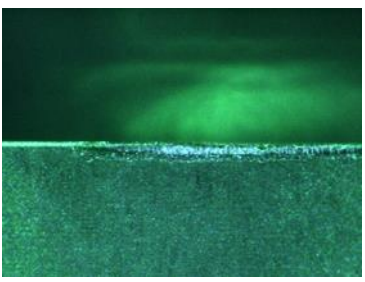


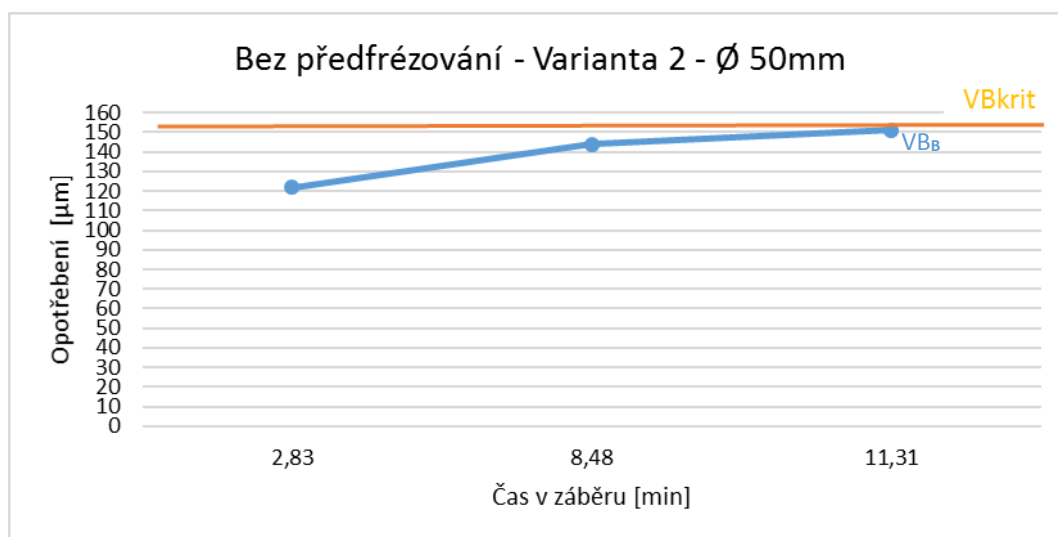
Bez předfrézování – D100 Varianta 1			
Přejezd	Opotřebení [μm]	Čas v záběru [min]	
1	98	5,65	
3	129	16,96	
4	134	22,62	
6	154	33,93	

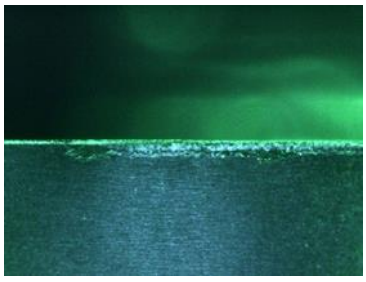
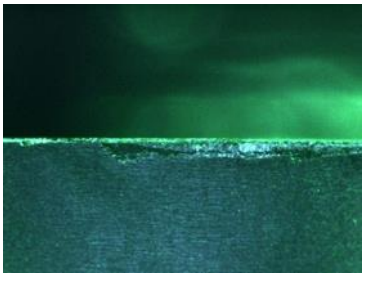


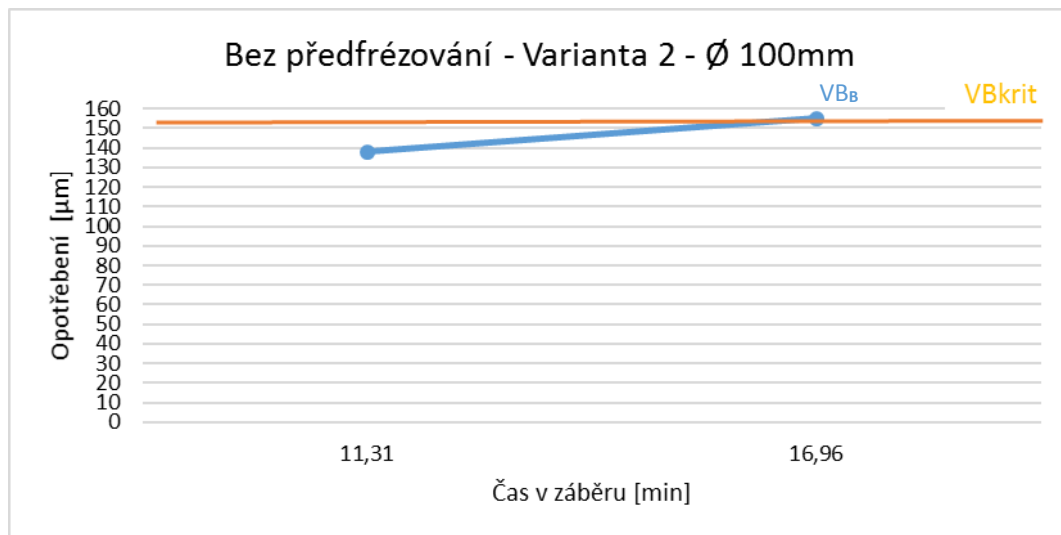
Bez předfrézování – D121,76 Varianta 1			
Přejezd	Opotřebení [μm]	Čas v záběru [min]	
1	129	6,89	
3	158	20,66	

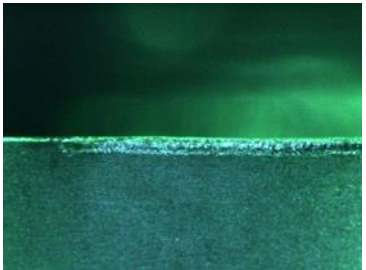
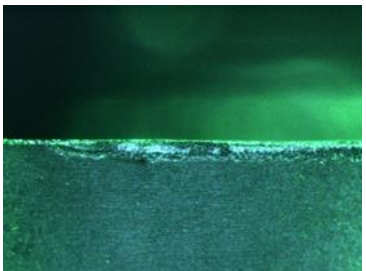


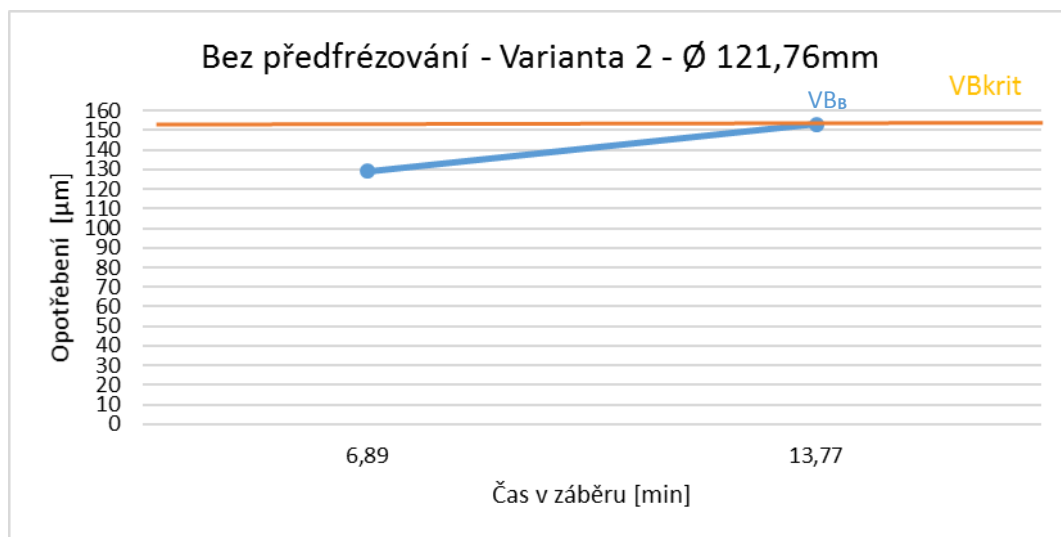
Bez předfrézování – D50 Varianta 2			
Přejezd	Opotřebení [μm]	Čas v záběru [min]	
1	122	2,83	
3	144	8,48	
4	151	11,31	

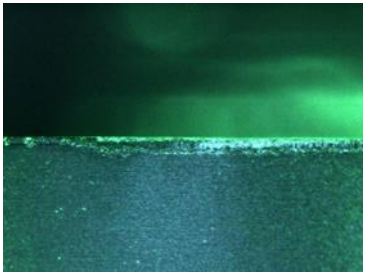
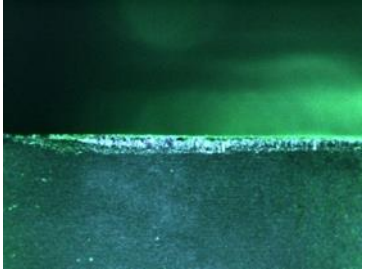
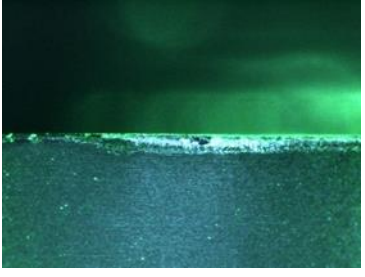


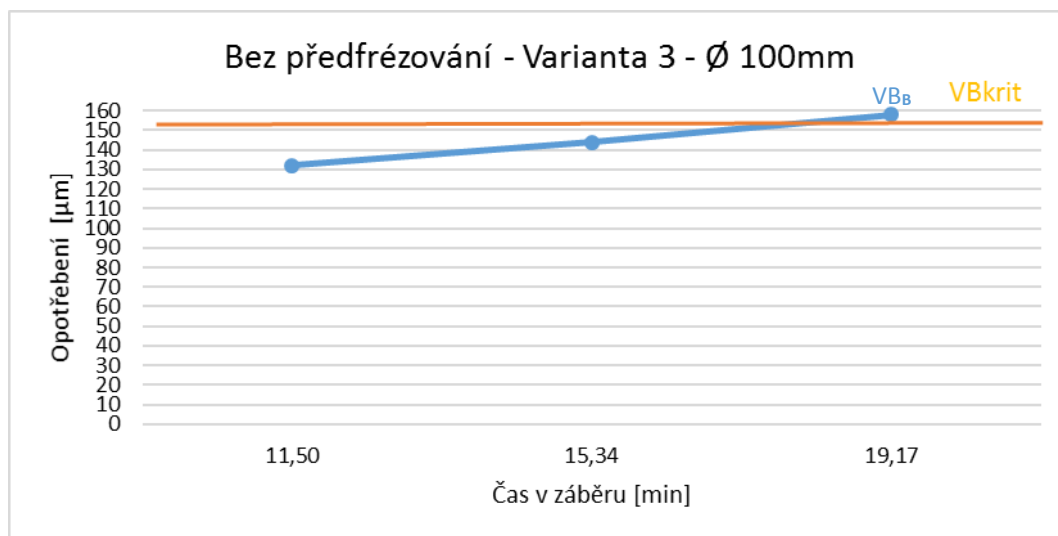
Bez předfrézování – D100 Varianta 2			
Přejezd	Opotřebení [μm]	Čas v záběru [min]	
2	138	11,31	
3	155	16,96	

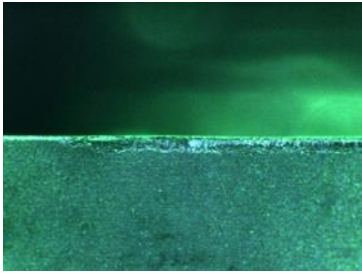
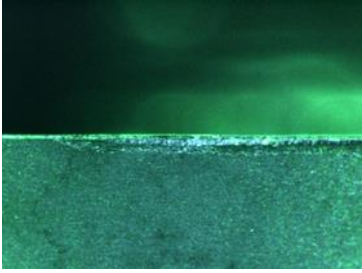


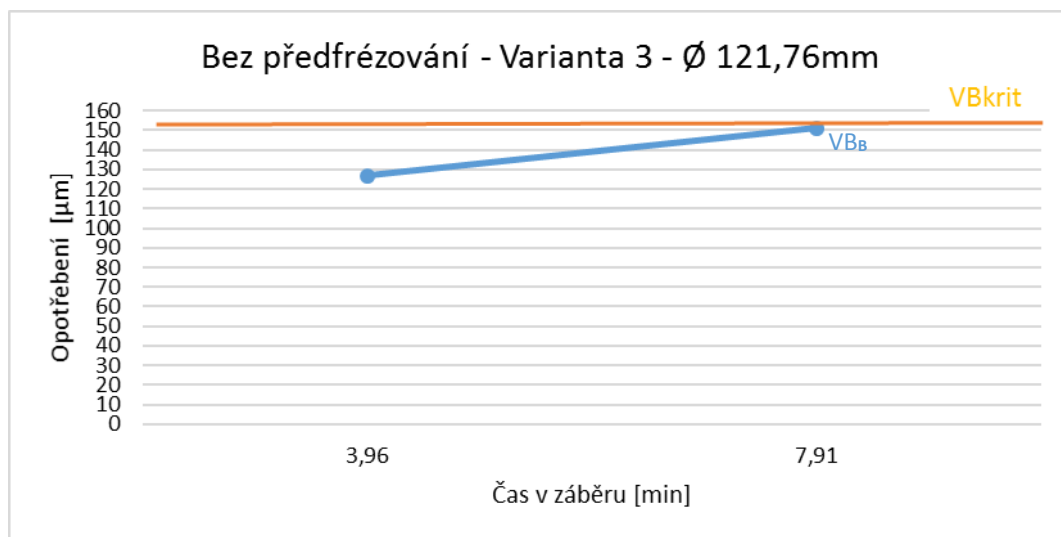
Bez předfrézování – D121,76 Varianta 2			
Přejezd	Opotřebení [μm]	Čas v záběru [min]	
1	129	6,89	
2	153	13,77	



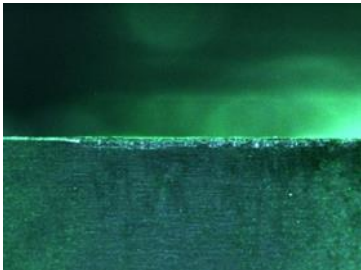

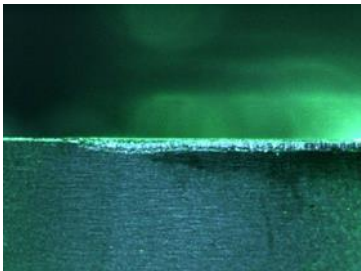
Bez předfrézování – D100 Varianta 3			
Přejezd	Opotřebení [μm]	Čas v záběru [min]	
3	132	11,50	
4	144	15,34	
5	158	19,17	

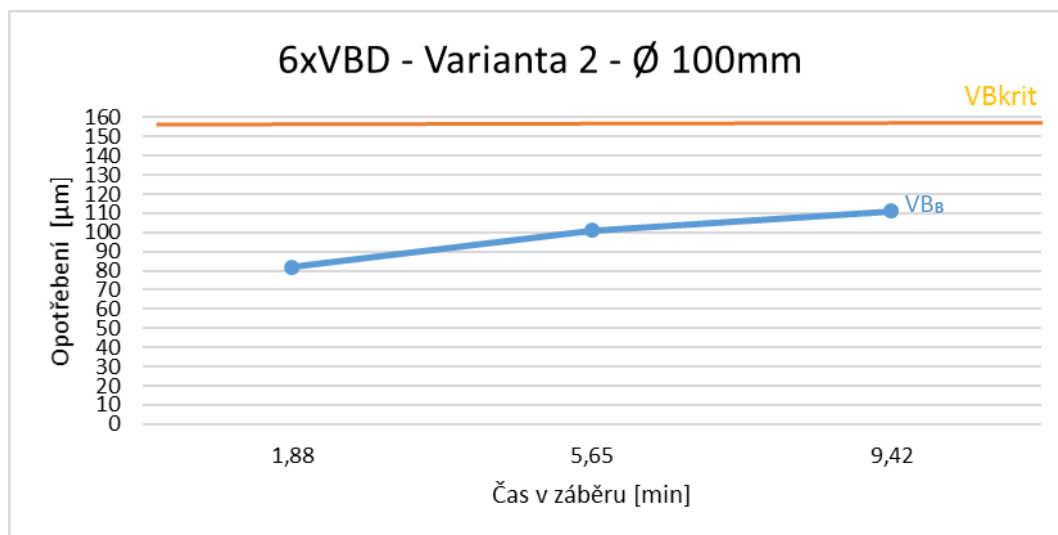


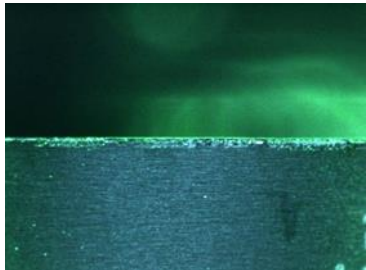
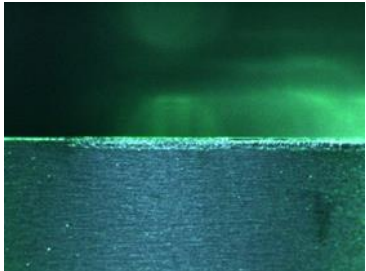
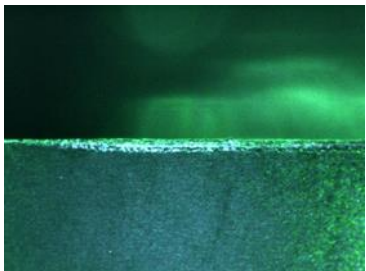
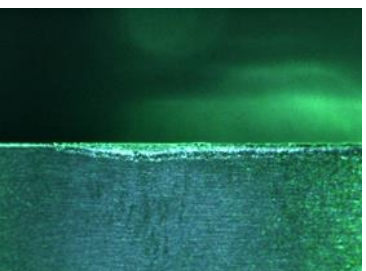
Bez předfrézování – D121,76 Varianta 3			
Přejezd	Opotřebení [μm]	Čas v záběru [min]	
1	127	3,96	
2	151	7,91	

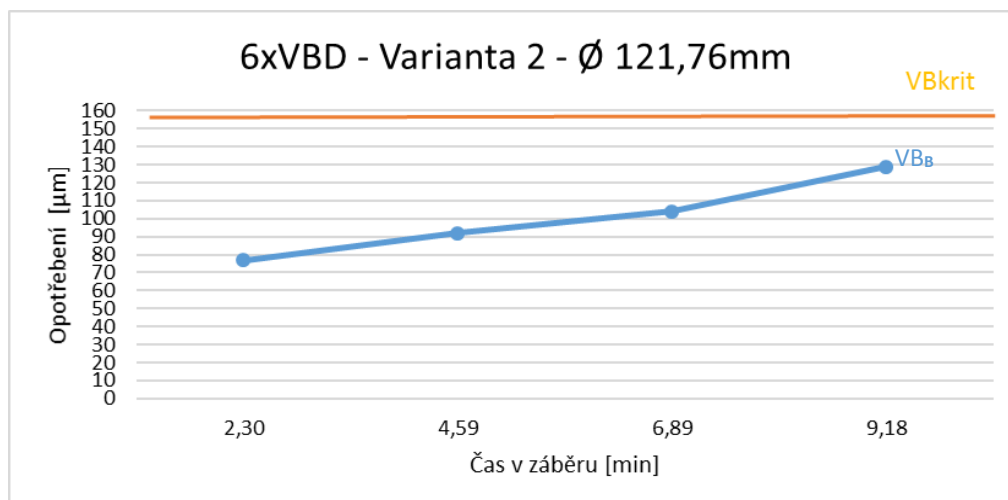


7.1.3 Plný počet břitů

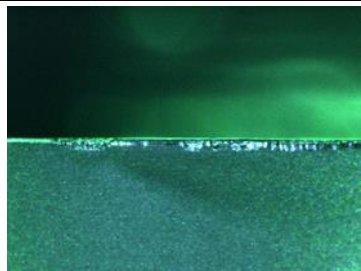
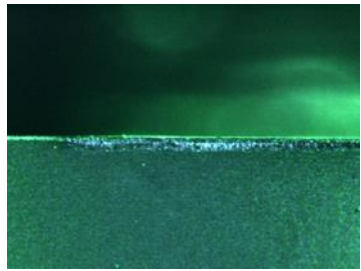
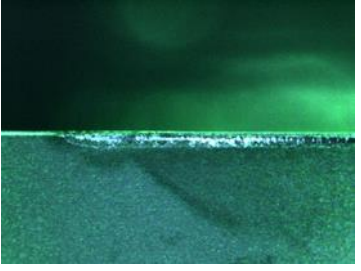
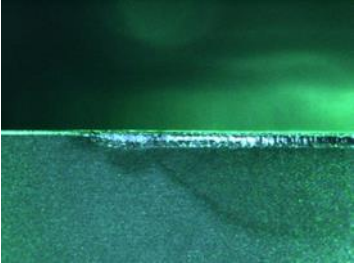

Plný počet břitů – Bez předfrézování - D100 Varianta 2			
Přejezd	Opotřebení [μm]	Čas v záběru [min]	
2	82	1,88	
6	101	5,65	
10	111	9,42	

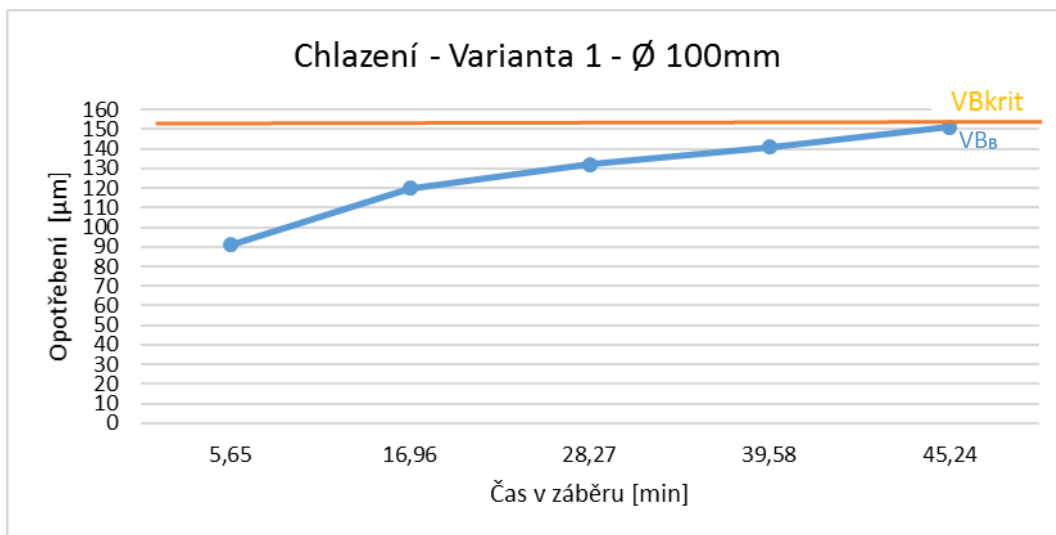


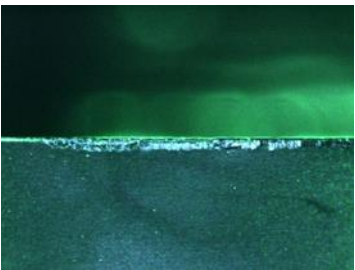
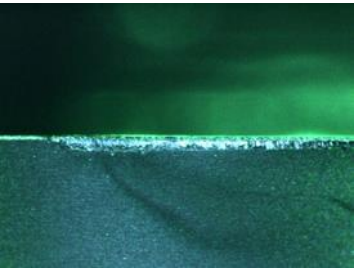
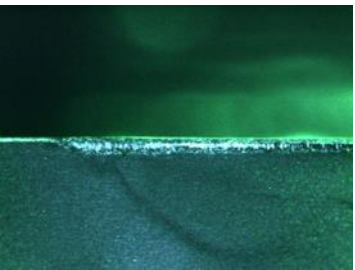
Plný počet břitů – Bez předfrézování - D121,76 Varianta 2			
Přejezd	Opotřebení [μm]	Čas v záběru [min]	
2	77	2,30	
4	92	4,59	
6	104	6,89	
8	129	9,18	

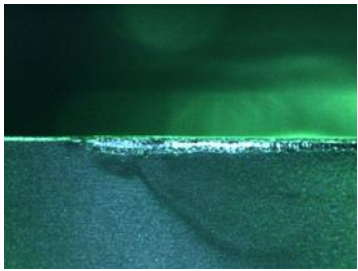


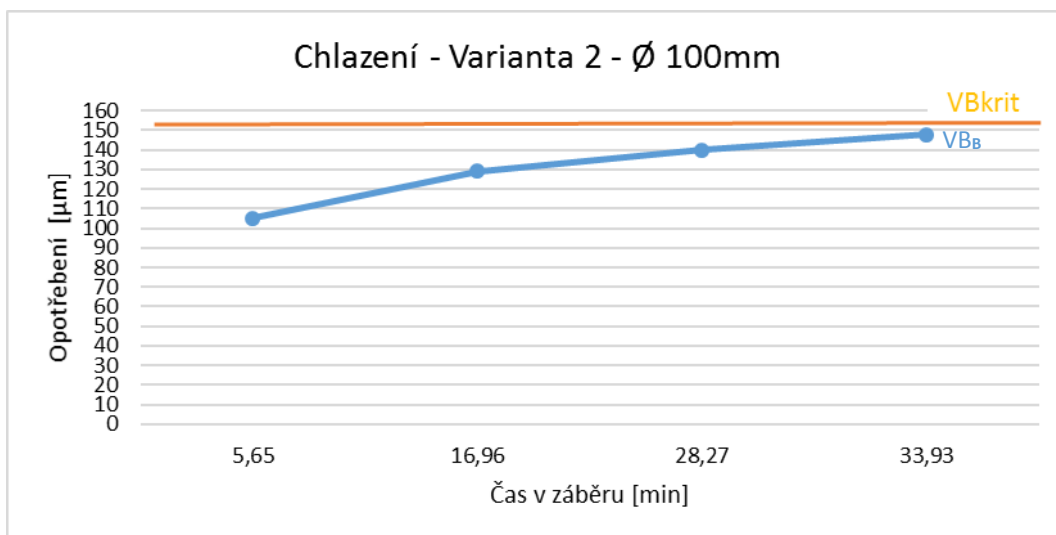
7.1.4 Použití procesní kapaliny

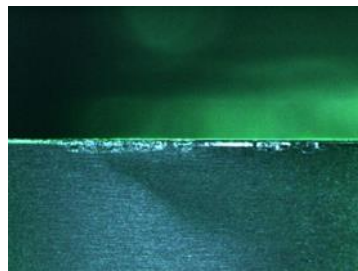
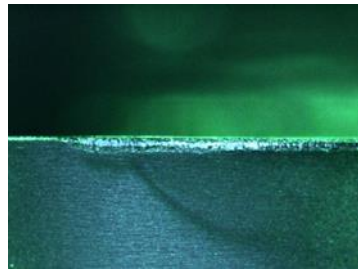
Chlazení – D100 Varianta 1			
Přejezd	Opotřebení [μm]	Čas v záběru [min]	
1	91	5,65	
3	120	16,96	
5	132	28,27	
7	141	39,58	
8	151	45,24	

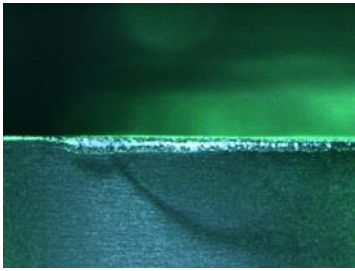


Chlazení – D100 Varianta 2			
Přejezd	Opotřebení [µm]	Čas v záběru [min]	
1	105	5,65	
3	129	16,96	
5	140	28,27	

6	148	33,93	
---	-----	-------	--



Chlazení – D100 Varianta 3			
Přejezd	Opotřebení [µm]	Čas v záběru [min]	
1	110	3,83	
6	134	23,00	

8	142	30,67	
9	149	34,50	