

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N 2301 Strojní inženýrství  
Studijní zaměření: Strojírenská technologie – technologie obrábění

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Vliv kvality povrchu nástroje na trvanlivost

Autor: **Bc. Ondřej HRONEK**

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

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

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

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej HRONEK**  
Osobní číslo: **S15N0093P**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Strojírenská technologie - technologie obrábění**  
Název tématu: **Vliv kvality povrchu nástroje na trvanlivost**  
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

Zásady pro vypracování:

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

## **Prohlášení o autorství**

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

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

V Plzni dne: .....

.....  
podpis autora

## **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 na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

## **Poděkování**

V první řadě chci poděkovat panu Ing. Miroslavovi Zetkovi, Ph.D. za vynikající vedení, mnoho cenných a užitečných rad v průběhu vypracování diplomové práce. Zároveň si cením vzájemné spolupráce a přístupu. Dále chci poděkovat za pozitivní přístup, kterého si také velice cením.

Dále děkuji katedře KTO ZČU v Plzni za vynikající přípravu a poskytnutí potřebných informací v průběhu studia. Poděkování patří i laboratořím LEO, LTO Regionálního technologického institutu a firmě SHM, bez kterých by tato práce byla těžko realizovatelná.

V neposlední řadě děkuji mé rodině a přátelům za jejich podporu, trpělivost a vytvoření potřebného zázemí pro studium na Fakultě strojní.

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Hronek	Jméno Ondřej		
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	Strojírenská technologie – technologie obrábění			
<b>VEDOUČÍ PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Ing. Zetek, Ph.D.	Jméno Miroslav		
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU - FST - KTO			
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	Nehodící se škrtněte	
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Vliv kvality povrchu nástroje na trvanlivost			

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KTO	<b>ROK ODEVZD.</b>	2017
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	71	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	56	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Modifikace mikrogeometrie řezných nástrojů je v současné době jedním z parametrů, který ovlivňuje finální kvalitu nástroje. Ovlivňuje adhezi mezi nástrojem a tenkou ořezovací vrstvou a výslednou trvanlivost nástroje. Cílem této práce je zmapování mikrogeometrie řezného nástroje po modifikaci, experimentální testování nástrojů a výsledný dopad modifikací mikrogeometrie na výslednou trvanlivost nástrojů, velikosti řezných sil a diagnostice stavu nástroje po dosažení limitního opotřebení.</p>
<p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p>Mikrogeometrie řezného břitů, řezný proces, kvalita povrchu, modifikace mikrogeometrie, vlečné omílání, tryskání vodním paprskem</p>

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Hronek	Name Ondřej	
<b>FIELD OF STUDY</b>	Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Zetek, Ph.D.	Name Miroslav	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KTO		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	Delete when not applicable
<b>TITLE OF THE WORK</b>	The Influence of the Cutting Tool Surface Quality on Durability		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Machining Technology	<b>SUBMITTED IN</b>	2017
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

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

<b>TOTALLY</b>	70	<b>TEXT PART</b>	56	<b>GRAPHICAL PART</b>	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	Currently, cutting edge modification is the one of the parameters which affects the final cutting tools quality. It affects the adhesion between tools and the thin layer or final cutting tool durability. The goal of this diploma thesis is to map the cutting edge microgeometry, modified microgeometry and tests those tools during milling process. Different cutting edge microgeometry will have an impact on the tool life, cutting forces etc.
<b>KEY WORDS</b>	Cutting edge microgeometry, cutting process, surface quality, microgeometry modification, drag finishing, water jet machining

## Obsah

Přehled použitých zkratk	8
1. Úvod	9
1.1 Cíle diplomové práce	9
2. Rozbor současného stavu [1], [2], [3], [4]	10
2.1 Charakteristika řezného nástroje [2]	13
2.2 Modifikace řezného břitu nástroje [5], [6], [7]	14
2.3 Metody modifikace řezné části nástroje [6], [7]	17
2.3.1 Omílání [7], [8]	17
2.3.2 Vodní paprsek [6], [25]	19
2.3.3 Procesní média pro omílání [10]	20
2.4 Metody měření mikrogeometrie řezného břitu [11], [12]	23
2.4.1 Dotykové metody měření [12]	24
2.4.2 Bezdotykové měření [13], [14]	26
2.5 Inconel 718 [19], [20]	29
2.5.1 Obrobitelnost Inconelu 718 [20], [21]	31
3. Návrh a realizace experimentu	32
3.1 Přípravné práce před experimentem	33
3.1.1 Broušení řezných nástrojů [22]	33
3.1.2 Modifikace mikrogeometrie ostří řezného nástroje	34
3.1.3 Depozice tenké vrstvy [23], [24]	43
3.2 Hlavní experiment	47
3.2.1 Volba řezných podmínek	48
3.2.2 Použité stroje a strojní vybavení	50
4. Vyhodnocení praktické části	51
4.1 Rozbor trvanlivosti nástrojů v závislosti na opotřebení	51
4.2 Rozbor řezných sil v závislosti na opotřebení	54
4.3 Vliv druhu modifikace na rozsah opotřebení řezného nástroje	56
4.4 Kvalita obrobeného povrchu v závislosti na opotřebení	59
4.5 Sumarizace výsledků	63
5. Závěr	65
Seznam použité literatury	66
Obrázky	67
Seznam obrázků, tabulek a grafů	69

## Přehled použitých zkratk

T		trvanlivost
$VB_B$	[ $\mu\text{m}$ ]	lineární opotřebení hřbetní plochy
$v_c$	[m/min]	řezná rychlost
$f_z$	[mm]	posuv na zub
$a_p$	[mm]	axiální hloubka řezu
$a_e$	[mm]	radiální hloubka řezu
$a_{\text{min}}$	[mm]	minimální tloušťka odřezávané vrstvy
$r_n$	[ $\mu\text{m}$ ]	rádius řezného břitu nástroje
S – N – O – P		stroj – nástroj – obrobek – přípravek
$\alpha$	[ $^\circ$ ]	úhel hřbetu
$\beta$	[ $^\circ$ ]	úhel břitu
$\gamma$	[ $^\circ$ ]	úhel čela
$R_a$	[ $\mu\text{m}$ ]	střední aritmetická hodnota lineární drsnosti
$R_z$	[ $\mu\text{m}$ ]	největší výška profilu
$R_q$	[ $\mu\text{m}$ ]	nejvyšší hloubka drsnosti
$S_a$	[ $\mu\text{m}$ ]	střední aritmetická hodnota plošné drsnosti
VBD		vyměnitelná břitová destička
RO		rychlořezná ocel
SK		slinutý karbid
DF		drag finishing (vlečné omílání)
SF		stream finishing (proudové omílání)
HSC 1/300		abrazivum z ořechových skořápek a umělého korundu
QZ 1-3W		abrazivum z umělého korundu
TRS		transverse rupture strenght
SIMcd	[ $\mu\text{m}$ ]	maximální hloubka defektů
SIMch	[ $\mu\text{m}$ ]	maximální výška defektů
SIMt	[ $\mu\text{m}$ ]	oblast defektů



## 1. Úvod

Vývoj, výzkum, nové materiály, nové metody, technologie a efektivní přístupy ve výrobě. Tyto slova jsou v současné době charakteristické pro strojírenský průmysl. Nové a náročnější požadavky a úkoly kladou na strojní inženýry stále nové a nové překážky pro jejich úspěšné řešení. Jedním z takových požadavků bylo, před lety, obrábění těžkoobrobitelných materiálů na bázi titanu a niklu. Jelikož z těchto materiálů se vyráběly součástky pro tak důležité odvětví jako je energetický a letecký průmysl, musely se vymýšlet nové nástroje, nástrojové materiály, nové strategie obrábění a mnoho dalšího, aby se tyto slitiny mohly třískově obrábět.

Charakteristické pro těžkoobrobitelné materiály je to, že při obrábění vykazují abrazivní účinek, mají vysokou pevnostní stálost za tepla, vysokou tvrdost a schopnost zpevňování. Takovéto vlastnosti vedou ke zvýšení řezného odporu a řezný nástroj je extrémně namáhaný. Proto bylo nutné hledat cesty, jak zefektivnit proces obrábění těchto slitin. Mezi tyto procesy patří používání výkonných strojů, používání tuhých upínačů, nových strategií obrábění v závislosti na úhlu opásání nástroje, používání nových řezných materiálů a deponování tenkých vrstev. Mnoho let se již výzkum a vývoj věnuje řezné hraně řezných nástrojů. Právě řezná hrana je v neustálém styku s obrobkem. Je extrémně jak mechanicky, tak tepelně namáhána. Na řezné hraně dochází k opotřebení ostří řezného nástroje. I přes jednoduchý tvar mikrogeometrie, který je ve většině případů klínovitý, dochází ke vzniku defektů apod. Tím se určuje kvalita řezné hrany nástroje a to má zásadní vliv na trvanlivost řezného nástroje. Jelikož ostří nástroje je kritické v místě, kde se sbíhá plocha hřbetu a čela, bylo nutné tuto mikrogeometrii řezného břitu tzv. modifikovat (rektifikovat). Modifikace mikrogeometrie řezného nástroje se vždy zařazuje za operaci broušení. Komplexně se hovoří o zvýšení kvality řezného břitu nástroje. Detailněji se jedná o zvýšení pevnosti řezného břitu (díky zaoblení řezného břitu), vyhlazení stop po brusném kotouči a s tím souvisí snížení drsnosti hřbetních a čelních ploch nástroje. Další výhodou je to, že je přesně definovaný rádius řezného břitu, zároveň dojde i k potřebné úpravě řezného břitu před deponováním tenké vrstvy. Takovéto modifikace mikrogeometrie ostří řezného nástroje má pak pozitivní vliv na efektivitu obrábění těžkoobrobitelných slitin a materiálů, dojde ke zvýšení trvanlivosti a řezivosti řezného nástroje

### 1.1 Cíle diplomové práce

Tato diplomová práce si klade za cíl posoudit vliv úpravy mikrogeometrie řezného břitu monolitních dvoubřitých fréz na trvanlivost. Parametry jako rádius řezného břitu, kvalita funkčních částí (drsnost hřbetních a čelních ploch) řezného nástroje jsou jedny ze sledovaných parametrů, které budou mít vliv při obrábění slitiny Inconel 718. Dále se bude zkoumat vliv řezných sil a drsnost obrobené plochy při nárůstu opotřebení hřbetní plochy řezných nástrojů.

## 2. Rozbor současného stavu [1], [2], [3], [4]

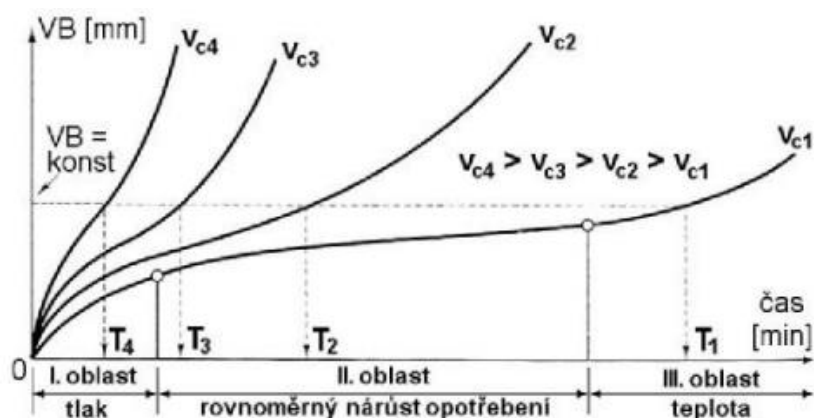
Souběžně se vznikem řezného nástroje pro obrábění, tak jak je znám v dnešní době, se započalo jeho vyvíjení a zlepšování. Důvodem tohoto vývoje byly zvyšující se požadavky na řezný nástroj. Mezi tyto požadavky patří vyšší řezivost, odolnost proti opotřebení, možnost obrábět těžko obrobitelné materiály, delší trvanlivost apod. Celkově se hovoří o zvyšování trvanlivosti nebo řezivosti řezného nástroje.

Trvanlivost nástroje lze popsat jako daný časový úsek, nejčastěji v minutách, od kterého započal proces obrábění až po dobu, kdy řezný nástroj ztratí své vlastnosti. Např. dojde k takovému otupení řezného břitu, že už nelze obrábět, či dojde k deformaci řezného břitu. To znamená, že už nelze s tímto břitem vyrobit obrobek s požadovanou přesností a jakostí předepsanou na výkrese. Mezi faktory, které ovlivňují trvanlivost, patří materiál obráběného polotovaru (mechanické a tepelné vlastnosti, obrobitelnost, vměstky, počet legujících prvků), řezného nástroje (materiál, geometrie řezného břitu, otěruvzdornost, tepelná odolnost, či houževnatost, typ tenké vrstvy), řezné prostředí, strategie obrábění, řezné podmínky (optimalizace řezných podmínek) atd. Z řezných podmínek má na trvanlivost největší vliv řezná rychlost  $v_c$ . Tuto skutečnost zjistil na počátku 20. století vědec F. W. Taylor. Závislost  $T - v_c$  pak vychází ze vztahu:

$$T = \frac{c_T}{v_c^m} [min], \quad (1)$$

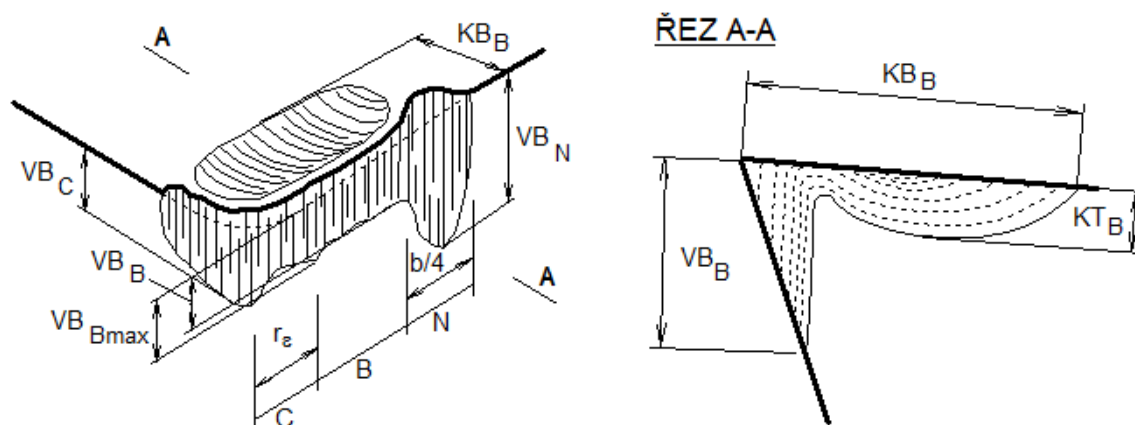
- kde:  $v_c$  – řezná rychlost [ $m \cdot min^{-1}$ ],  $m$  – míra závislosti na řezné rychlosti,  $c_T$  – konstanta

Během výzkumu a experimentů se zjistilo, že při zvyšování řezné rychlosti narůstá opotřebení nástroje. Např. se jedná o opotřebení VB. To znamená, že opotřebení VB je funkcí času, viz obr. 2.1. Řezná rychlost je jediná proměnná během zjišťování trvanlivosti. Pokud by tomu tak nebylo a měnily by se i další veličiny, tak by výstup byl nevypovídající na trvanlivost. Platí, že pro stanovení závislosti  $T - v_c$  musí dojít minimálně ke čtyřem změnám řezné rychlosti.



Obr. 2.1 Závislost opotřebení VB při různých  $v_c$  [1]

Jak bylo v předchozím odstavci napsáno, trvanlivost řezného nástroje se hodnotí podle druhu opotřebení řezného břitu. Opotřebení nástroje při obrábění je výsledný efekt mechanických, abrazivních, tepelných a chemických faktorů, které přirozeně vznikají během obrábění. Při těchto faktorech dochází k opotřebení řezného břitu nástroje. Pro jednotné posuzování existuje norma ISO 3685 [4], která popisuje obecný tvar opotřebení, viz obr. 2.2. Kromě popsaných faktorů, které mají vliv na opotřebení, jsou ještě další faktory úzce související s procesem obrábění. Jde o materiál obrobku, zvolený materiál řezného nástroje, řezné podmínky. Kromě toho do opotřebení nástroje promlouvá druh obráběcí operace, jestli se jedná o hrubovací či dokončovací proces. Nebo pokud jde o typ obrábění s přerušovaným či nepřerušovaným řezem.

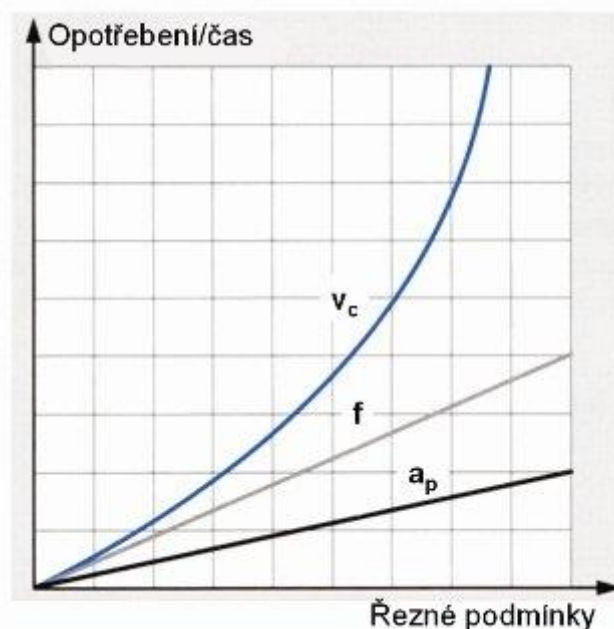


Obr. 2.2 Obecný tvar opotřebení dle ISO 3685 [2]

V současné době by nebylo správně hodnotit nástroje pouze z jednoho hlediska, kterým je výše popsaná trvanlivost. Hodnocení kvality řezného nástroje se posuzuje z více faktorů. S trvanlivostí úzce souvisí životnost nástroje. Ta lze popsat, jako součet všech trvanlivostí nástroje nebo také jako životní cyklus nástroje. To znamená od prvního použití, přes naostření až po stav, kdy je nutné nástroj vyřadit z výrobního procesu. Např. na břitové destičce, na které byly použity všechny řezné hrany. Dalším faktorem je řezivost. Řezivost ovlivňuje volba řezného materiálu a lze ji charakterizovat jako výkonnost řezného nástroje, který dokáže efektivním způsobem vytvořit obrobek při obrábění (odebrat třísku). Kromě volby řezného materiálu, řezivost ovlivňují stejné faktory, jako tomu je např. u trvanlivosti. Čili jde o obrobitelnost obráběného materiálu, řezných podmínek, řezném prostředí apod. Dnešní způsoby nabízí možnosti, jak zvýšit řezivost nástroje. U nejčastěji používaného řezného materiálu, slinutého karbidu, se řezivost zvyšuje např. snížením podílu kobaltového (Co) pojiva, či zjemnění struktury zrna karbidů. Avšak nejrozšířenější možností zvýšení užitečných vlastností nástroje a tím i jeho celkové kvality je nanášení tenké vrstvy. Tenké vrstvy mají kombinaci vlastností, které příznivě ovlivňují řezný proces. Mezi tyto faktory patří vyšší teplotní odolnost a s tím spojená tvrdost a stálost za vysokých teplot, či odolnost proti korozi, oxidaci apod.

Při každém procesu obrábění bude docházet k opotřebení nástrojů, resp. řezné části během obrábění. Je však nutné, aby opotřebení bylo předvídatelné, bezpečné a

kontrolovatelné. Toto opotřebení by vždy mělo vést k výmolu na čele a k otěru na hřbetní části nástroje. Řeznými podmínkami většinou technolog ovlivňuje trvanlivost řezného nástroje. Je tedy nutné volit řezné podmínky v daném pracovním rozmezí, které udává výrobce nástrojů pro dané řezné a obráběné materiály. Existují určité zásady, kterých je potřeba se držet, aby opotřebení nástroje bylo předvídatelné. Volba řezné rychlosti má být taková, aby nedocházelo k tvorbě nárůstku na čele, avšak nesmí být až příliš vysoká. To by docházelo k opotřebení vlivem chemických jevů. Hloubku řezu  $a_p$  volit vždycky větší než je rádius břitové destičky (v případě VBD). Díky tomu se zajistí správné formování vznikající třísky, avšak příliš velká hloubka řezu může mít za následek vylomení břitu. Co se týče posuvu, tak ten se volí takový, aby byla zajištěna efektivnost řezu. Platí pravidlo, že by měl být větší než cca  $\frac{1}{2}$  rádiusu břitové destičky. Pokud by tomu tak nebylo, hrozí vylomení břitu. Výzkumy prokázaly, že životnost nástroje klesá se zvyšující hloubkou řezu. Příkladem je zvýšení hloubky řezu o 10%. To má pak za následek snížení trvanlivosti řezného nástroje o cca 5%. Avšak v praxi, při správně zvolených řezných podmínkách, je vliv hloubky řezu zanedbatelný. Jak již Taylorův vzorec udává, řezná rychlost je faktor, podle kterého se hodnotí trvanlivost nástroje. Už jen zvýšení řezné rychlosti o 10% způsobí výrazné zkrácení trvanlivost nástroje, jedná se až o 50%. Posuv má stejnou charakteristiku jako hloubka řezu a řezná rychlost. Tedy se zvyšujícím posuvem klesá trvanlivost nástroje. Trvanlivost nástroje klesá cca o 20% se zvýšením posuvu o 10%. Je nutné si však uvědomit, že tyto hodnoty jsou pro jeden materiál s daným chemickým složením a tepleným zpracováním. Např. vyšší trvanlivosti nástroje se dosáhlo při obrábění nerezových ocelí při vyšším posuvu. Samozřejmě byla použita i jiný typ destičky dle ISO rozdělení.



Obr. 2.3 Závislost opotřebení na řezných podmínkách [3]

## 2.1 Charakteristika řezného nástroje [2]

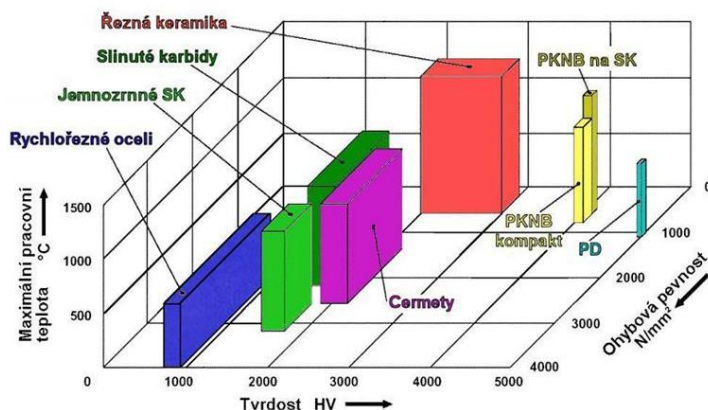
Řezný nástroj je součástí soustavy S-N-O-P, která má finální vliv na obráběnou součást. Soustava S-N-O-P určuje jakou má součást přesnost, drsnost, výrobní cenu, či za jak dlouho bude součást obrobena (výrobní čas). Při správné volbě řezného nástroje dojde k efektivnímu využití jeho vlastností během řezného procesu pro daný obráběný materiál. Ideálním výsledkem je ten, když dojde k výběru takového nástroje, který má vysokou trvanlivost v řezu, dosahuje požadované rozměrové a jakostní přesnosti a jehož pořizovací cena je relativně nízká. V dnešní době se pro volbu řezného materiálu používá širší úhel pohledu. Mezi nejdůležitější aspekty výběru patří materiál řezného břítu, geometrie řezné části nástroje, resp. makro a mikro geometrie, typ použité tenké vrstvy, způsob obrábění (hrubování x dokončování) a v neposlední řadě cena. Právě pořizovací cena bývá často nejdůležitějším faktorem při výběru řezného nástroje.

S volbou řezného materiálu jsou určovány i základní požadavky, které musí nástroj, během řezného procesu splnit, aby byl použitelný. Tyto základní požadavky jsou, už od začátku zkoumání a vývoje nástrojů, jedny z nejdůležitějších. Mezi požadavky patří:

- a) houževnatost – tato vlastnost je důležitá při zvyšujících nárocích na obrábění při přerušovaném řezu, při obrábění s vyššími řeznými podmínkami. Se zvyšující se houževnatostí řezného nástroje, klesá jeho náchylnost k opotřebení křehkým lomem
- b) tvrdost – další důležitá vlastnost, má vliv na faktory jako je trvanlivost a s tím spojená životnost, řezivost atd. Je pravidlem, že tvrdost nástroje má být min. o 6 HRC vyšší než tvrdost obráběného materiálu. Díky depozici tenkých vrstev na nástroje se tvrdost řezných nástrojů několika násobně zvýšila.
- c) stálost za vysokých teplot – je nutné, aby si řezný břit udržel své mechanické vlastnosti i za vysokých teplot (např. 500 °C). Pokud by tomu tak nebylo, docházelo by k velice rychlému opotřebení nástroje.
- d) tepelná vodivost – jedná se především o kritické místo nástroje, čili oblast špičky (u kořene třísky). Zde vzniká zvýšená koncentrace tepla. Pokud by měl nástroj nízkou tepelnou vodivost, vysoká teplota by neprostupovala břitem a docházelo by ke zvýšení opotřebení nástroje.
- e) chemická odolnost
- f) tuhost – zajištění tuhosti upnutí nástroje během obrábění, proti zamezení vzniku vibrací, chvění. Vyšší podíl chvění a vibrací má negativní vliv na trvanlivost nástroje a produktivitu obrábění.
- g) cena – často choulostivé téma, nutné najít kompromis mezi cenou a výkoností nástroje.

Je nutné najít správné nastavení a provázání těchto požadavků pro daný materiál řezného břítu, materiál obráběné součásti, ale i obráběcí stroj. Na tyto požadavky je důležité

pohlížet jako na komplexní vlastnosti. Pokud už by jedna z nich byla nesplňovala svoji funkci, tak už dochází ke snížení kvality nástroje. Z toho vyplývá, že je potřeba se věnovat všem požadavkům.



Obr. 2.4 Vliv teploty na tvrdost řezných materiálů [4]

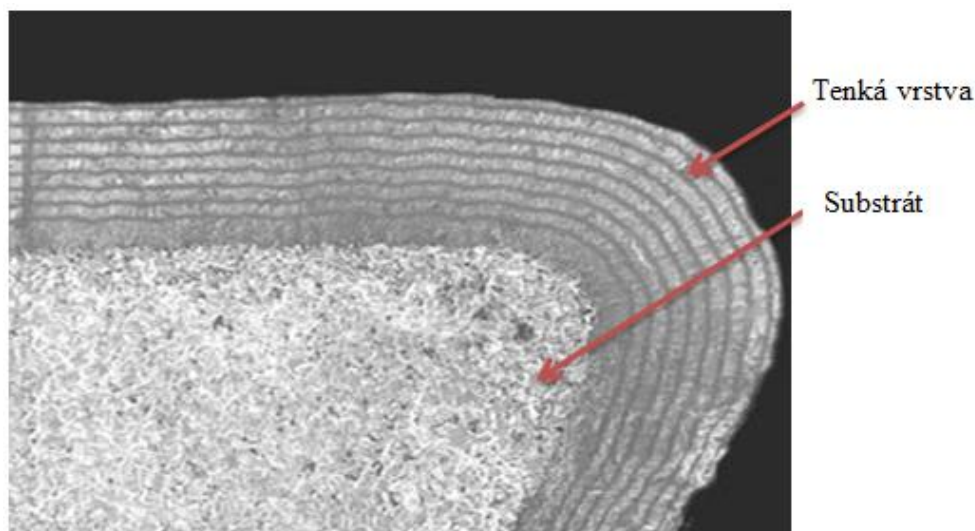
Jak již bylo uvedeno na začátku kap. 2.1 geometrii řezného nástroje lze na dvě základní skupiny. A to makrogeometrii a mikrogeometrii. Makrogeometrie řezného břitu je dána řeznými úhly ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\lambda$ ), které vzniknou během broušení nástroje. Dále pak je dána vlastním tvarem břitu nástroje. Tento tvar je pak závislý na řadě faktorů, mezi které patří druh obrábění, materiál řezného břitu, strategie obrábění apod. Do oblasti makrogeometrie patří i druh a tvar utvařeče třísek (např. u VBD). Mikrogeometrii řezného břitu nástroje se rozumí rádius řezného břitu, K faktor, drsnost na čele a hřbetě nástroje, stav defektů, mikrotvrdost povrchové vrstvy substrátu apod. Na mikrogeometrii se zkoumají i defekty vzniklé po broušení, např. symetrie rádiusu řezného břitu, vydrolené ostří, stopy drah brusného kotouče na hřbetní a čelní ploše. Na počátku 90. let minulého století stále ještě nešla zkoumat mikrogeometrie, protože neexistovaly metody a zařízení, které by věrohodně změřily uvedené parametry. Avšak díky výzkumu a vývoji metod a zařízení došlo na přelomu tisíciletí k razantnímu nárůstu zkoumání mikrogeometrie řezného břitu, která má pak za následek celkové zvýšení životnosti řezných nástrojů. Velikost mikrogeometrie je v řádech několika mikrometrů, avšak i díky těmto malým rozměrům dojde ke zvýšení kvality výsledné geometrie řezného břitu, která pak má vyšší efektivitu při obrábění.

## 2.2 Modifikace řezného břitu nástroje [5], [6], [7]

Zvyšování trvanlivosti, životnosti a celkové kvality nástroje jsou hlavní důvody pro modifikaci (preparaci) řezného břitu nástroje. Při použití správné technologie lze řezný břit modifikovat tak, že má ve výsledku vyšší pevnost, dojde k zesílení břitu. Dále pak se sníží drsnost povrchu, zvýší se otěruvzdornost, může dojít i ke snížení řezných sil. Takto upravený břit má v porovnání s vybroušeným břitem daleko vyšší kvalitu. Dále pak platí, že úprava řezné hrany má za následek vyhlazení povrchu řezného břitu, tzn. snížení či odstranění nerovností, dojde k příznivému zaoblení řezného břitu. Výslednou kvalitu řezného nástroje

pak charakterizují tyto vlastnosti: geometrický tvar řezného břitu, drsnost povrchu čela a hřbetu ostří, materiálové změny v povrchové vrstvě nástroje.

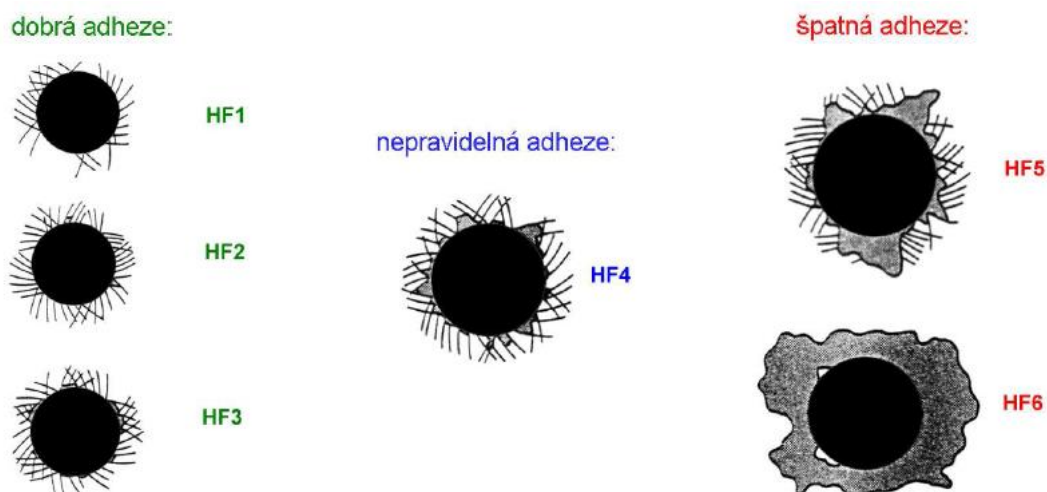
Výrobu řezného nástroje je třeba brát jako souhrn několika operací, díky kterým se zvyšují užité vlastnosti nástroje. Zjednodušeně se jedná o volbu materiálu pro nástroj – vybroušení řezné části – před depoziční úpravu břitu – nanášení tenké vrstvy a eventuálně úprava povrchu řezné části nástroje po depozici. Výsledná kvalita řezného nástroje, tzn. jeho trvanlivost, životnost, řezivost apod. je dána souborem tří faktorů. Jedná se o geometrii řezného břitu, řezný materiál (substrát) a použitou tenkou vrstvou. Na tento soubor je třeba se dívat jako na jeden celek. Čili výběru, vytvoření a úpravě jednotlivých faktorů je třeba přikládat velikou pozornost. Všechny tyto body je potřeba precizně zpracovat, jelikož se navzájem ovlivňují. Platí, že pokud jeden z těchto faktorů je špatně zvolený, či selže, tak dojde k selhání nástroje jako celku.



Obr. 2.5 Rozhraní substrát – tenká vrstva [5]

Veškerým složkám ve výrobním cyklu řezného nástroje je nutné věnovat pozornost, protože jsou na sobě závislé. Např. pokud by došlo ke špatnému vybroušení nástroje, tak by následná depozice byla nekvalitní a tím pádem by výsledný nástroj nesplňoval požadavky na trvanlivost či odolnost, protože by došlo k brzkému porušení tenké vrstvy. V současné době už nelze ve většině případů po broušení zařadit depozici tenké vrstvy, jelikož broušení nedosáhne požadované kvality, které je potřeba pro depozici. Mezi důvody patří snížená adheze mezi substrátem a vrstvou, vysoká drsnost povrchu, v oblasti mikro geometrie je řada výstupků a defektů. Jak již bylo uvedeno, jedním z důvodů úpravy řezné hrany je zvýšení adheze mezi substrátem a tenkou vrstvou. Následující Obr. 2.6 popisuje, jak se chová soustava substrát – tenká vrstva při rozdílné adhezi. Jak je vidět, při Mercedes testu dochází u substrátu s horší adhezí k vytrhávání, či vylamování tenké vrstvy. Právě tzv. Mercedes test je jednou z nejrozšířenějších metod, které zkoumají kvalitu soudržnosti tenké vrstvy a substrátu. Jedná se o statickou vnikající metodu. Princip této metody spočívá v tom, že do soustavy substrát – tenká vrstva vniká indentor, který vytvoří v materiálu vtisk. Tento vtisk vyvolá

napětí na rozhraní substrát – tenká vrstva, přičemž na povrchu se inicializuje vznik malých trhlinek viditelných pomocí příslušného zvětšení pod mikroskopem.



Obr. 2.6 Stupnice hodnocení adhezních vlastností systému substrát – tenká vrstva [6]

Mezi další modifikovanou část řezného břitu patří samotný rádius řezného břitu. Problém nastává po broušení nástroje. Vznikne totiž malý rádius řezného břitu nástroje, cca 3  $\mu\text{m}$ . Takto malý rádius způsobí následné problémy v soustavě substrát – tenká vrstva. Po nanesení tenké vrstvy dojde ve špičce řezného břitu ke vzniku vysoké koncentraci napětí a ta má pak za následek porušení tenké vrstvy. Kromě toho, že je zde vysoká pravděpodobnost odloupení tenké vrstvy během prvotního kontaktu nástroje s obrobkem při obrábění. Výsledkem je poté nástroj, který nemá už žádnou hodnotu, nelze s ním už prakticky nic obrábět. Proto je nutné upravit vybroušenou řeznou hranu tak, resp. zvětšit rádius řezného břitu tak, aby se snížilo kritické napětí mezi vrstvou a základním materiálem (substrátem). Vzhledem k vysokému podílu deponování většiny řezných nástrojů bylo prokázáno, že adheze tenké vrstvy ve špičce nástroje se zvýší právě díky většímu rádiusu řezného břitu. V oblasti mikrogeometrie existuje ještě další parametr, související s poloměrem zaoblení řezného břitu nástroje. Jedná se o tzv. K – faktor. Tento faktor určuje, jak je řezný břit symetrický. Celkově mohou nastat 3 případy. Zaprvé, když  $K > 1$  je řezný břit nesymetrický a větší část poloměru zaoblení je na čelní ploše břitu. Naopak, když je  $K < 1$  jedná se rovněž o nesymetrický břit, avšak zde je větší část poloměru na hřbetní ploše břitu. Poslední případ je symetrický řezný břit a ten je, když  $K = 1$ . Jedná se o nerozměrnou veličinu, na kterou má vliv druh řezného materiálu, způsob výroby, resp. modifikace řezné mikrogeometrie břitu. Díky experimentům a vývoji se zjistilo, že na K faktor má dále vliv silové a tepelné zatížení nástroje. K – faktor se vypočte podle následujícího vzorce:

$$K = \frac{S_\gamma}{S_\alpha} [-], \quad (2)$$

- kde:  $S_\gamma$  – vzdálenost na čelní ploše nástroje [ $\mu\text{m}$ ],  $S_\alpha$  - vzdálenost na hřbetní ploše nástroje [ $\mu\text{m}$ ]



## 2.3 Metody modifikace řezné části nástroje [6], [7]

Se vzrůstajícími požadavky na zvýšení kvality povrchu nástrojů, ale i obecně součástí vzniklo mnoho metod, jak dosáhnout požadovaných hodnot. Od těchto metod se očekává zvýšení geometrické přesnosti, snížení drsnosti ploch. U nástrojů se kromě uvedeného dále pak jedná o redukci zbytkového napětí, úpravy hřbetních a čelních ploch, šroubovitých drážek apod. V současné době trh nabízí několik způsobů a metod, pomocí kterých lze efektivně modifikovat řezný břit nástroje. Díky tomu lze vybrat vhodnou metodu pro daný řezný materiál, pro monolitní nástroj či VBD a pro deponovaný nebo nedeponovaný řezný nástroj. Tyto metody se rozdělují na tři základní skupiny. První skupinu zastupují mechanické procesy. Do mechanických procesů patří známé metody jako např. kartáčování, omílání, pískování, vodní paprsek. Druhou skupinou jsou tepelné procesy. Sem patří především nekonvenční, ale v dnešní době rozšiřující metody, mezi které patří laser, plazma či elektronový svazek. Chemické a elektro – chemické způsoby patří do poslední skupiny, pro kterou jsou charakteristické chemické změny během procesu úpravy povrchu součástí.

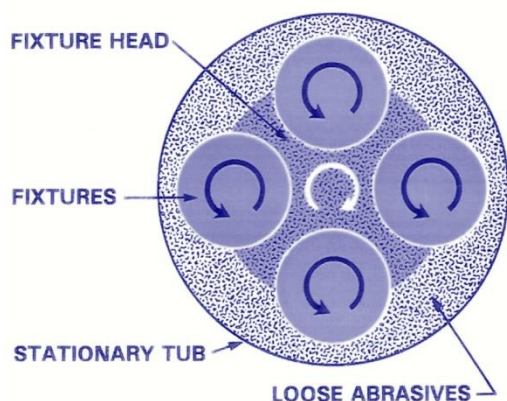
### 2.3.1 Omílání [7], [8]

Omílání je jedna z nejpoužívanějších mechanických metod pro úpravu povrchu. Jedná se tedy o dokončovací metodu, při které dochází k odebrání třísek v řádech mikrometrů. Tato technologie se hojně v praxi využívá pro úpravu povrchu, resp. odstranění ořepů, mikro nerovností, ale i odstraňování mastnoty, či koroze. Celkově existují čtyři druhy omílání: vlečné, proudové, odstředivé a vibrační. Právě metody vlečného a proudového omílání byly speciálně vyvinuté pro modifikaci mikrogeometrie řezných břitů nástrojů, ať už se jedná o VBD, či monolitní nástroje pro frézování či vrtání.

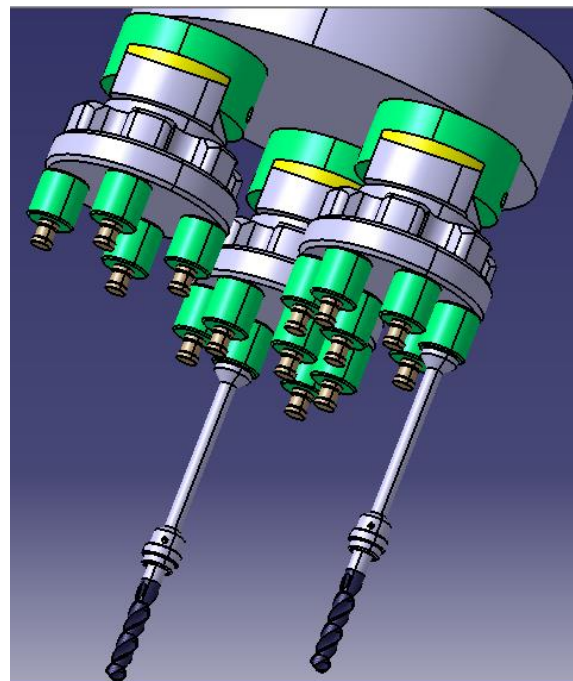
#### 1. Vlečné omílání [8]

Jak již bylo řečeno, vlečné omílání (DF) nachází své využití především při modifikaci řezného břitu nástroje. Tato úprava vždy následuje po vybroušení nástrojů. Řezné nástroje (součásti) jsou během procesu omílání upnuté ve speciálních držácích. Po upnutí součástí do držáků nastává vlastní proces. Během omílání vzniká kombinovaný rotační pohyb a omílaná součást vykonává planetový pohyb. Tento proces probíhá uvnitř nádoby s abrazivem. Při tomto způsobu omílání procesní nádoba s abrazivem nevykonává žádný pohyb (na rozdíl od proudového omílání). Díky planetovému pohybu součásti uvnitř nádoby vzniká tlak mezi omílanou součástí a abrazivem. Tento tlak způsobuje modifikaci řezné hrany nástroje. Výhodou procesu jsou vysoké obvodové rychlosti součástí (nástrojů), které zefektivňují daný proces, jelikož se snižuje potřebný čas na omílání. Další výhodou je dosahovaná kvalita povrchu během krátkého času, řádově v minutách. Současné stroje pro vlečné omílání umožňují upnutí několika nástrojů do stroje. To znamená, že během 1 procesu lze omílat např. 16 nástrojů. Další výhodou vlečného omílání je to, že díky upnutí nástrojů během procesu nedochází ke vzájemnému střetnutí během procesu omílání. Dále pak lze upravovat hloubku ponoru, čili lze omílat nástroje ve velkém rozsahu celkových délek. Navíc i zvolená hloubka

ponoru má vliv na celkovou intenzitu omílání. U nástrojů, jako jsou např. šroubovitě vrtáky, může být dán požadavek na úpravu povrchu uvnitř šroubovitě drážky. Proto pro lepší přívod média během omílání lze vyklonit pracovní hlavu. Po vyklonění pracovní hlavy o  $15^\circ$  dojde k lepšímu přísunu média právě do těchto míst na nástroji.



Obr. 2.7 Schéma vlečného omílání [7]



Obr. 2.8 Hnací část omílacího stroje

## 2. Proudové omílání [9]

Další možností, jak zvýšit kvalitu řezného břitu nástroje je proudové omílání (SF). Na první pohled je princip vlečného a proudového omílání stejný. I v tomto případě omílaný nástroj vykonává v pracovní nádobě planetový pohyb. Kromě tohoto pohybu, který vykonává nástroj, je v případě proudového omílání zařazen ještě jeden pohyb. A tím je rotační pohyb pracovní nádoby. Platí, že hlavní pohyb stroje vykonává právě pracovní nádoba s abrazivem. Díky tomuto pohybu se zvýší intenzita mezi omílanou součástí a abrazivem. V tomto způsobu omílání se hojně využívá naklápění pracovní hlavy. Oproti vlečnému omílání je zde výhoda tom, že je možné si libovolně nastavit úhel natočení v rozmezí  $0 - 35^\circ$ . V případě vlečného omílání lze pouze vychýlit pracovní hlavu jen o  $15^\circ$ . Toto přináší výhodu nejen u omílání řezných nástrojů ale i u jiných produktů nejenom pro strojírenský průmysl. Jedná se např. o farmaceutický průmysl, protézy, kostní implantáty apod. Způsob upnutí součástí během proudového omílání je podobný, jako v případě vlečného omílání. Čili i zde je ta výhoda, že během procesu nikdy nedojde ke kontaktu mezi omílanými díly. Kromě výrobců nástrojů se omílání využívá i v jiných odvětvích strojírenského průmyslu. Mezi ně patří především kosmický, letecký a automobilový průmysl. Na obr. 2.9 je vidět strojní součást, pro letecký průmysl, upravená proudovým omíláním. Kromě získání vyššího lesku se logicky zlepšila kvalita povrchu. Výsledná drsnost  $R_a$  omléte součásti je pak  $0,06 \mu\text{m}$ .

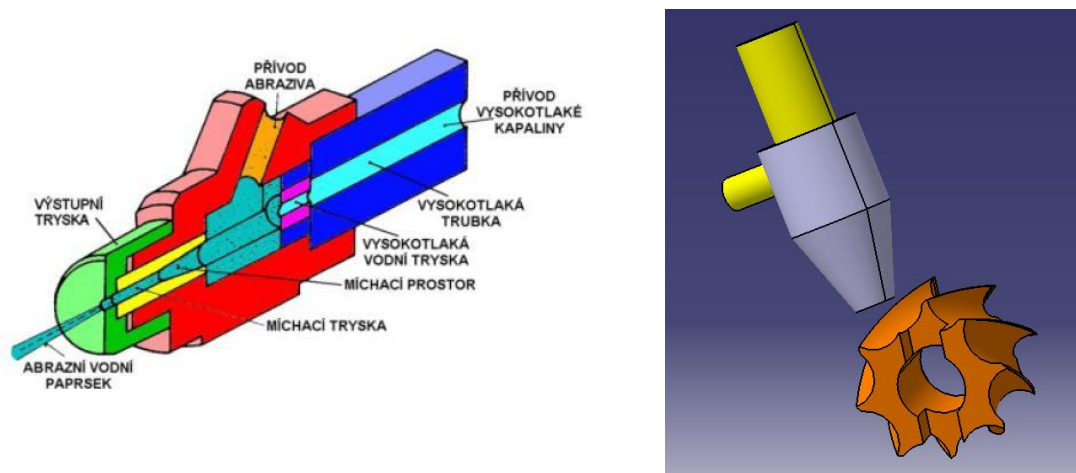


Obr. 2.9 Zvýšená kvalita povrchu součásti po proudovém omílání [8]

### 2.3.2 Vodní paprsek [6], [25]

Vodní paprsek je další mechanická metoda, která se používá v různých odvětvích strojírenského průmyslu. Čili i tento způsob lze v určitých případech použít na úpravu mikrogeometrie řezného břitu nástroje. Tento způsob však nepatří mezi nejpoužívanější, jelikož existují cenově a technologicky dostupnější zařízení. Pro přehlednost, technologie vodního paprsku se v některých případech a literaturách nazývá tryskání pomocí vodního paprsku. V případě, kdy se používá vodní paprsek na úpravu mikrogeometrie nástrojů, či jiných součástí, se i může hovořit o mikro – tryskání pomocí vodního paprsku.

Během úpravy mikrogeometrie řezného břitu nástrojů, např. ze slinutého karbidu se v trysce zařízení smíchává směs abraziva a vody. Poměr mezi těmito dvěma složkami je v rozmezí 7:1 až 10:1 ve prospěch vody. Díky této směsi lze efektivněji upravit řezný břit nástroje, i když je vyrobený z CERMETU, či řezné keramiky. Ve vyústění trysky se pracovní tlak pohybuje v rozmezí 200 – 340 MPa. V průběhu této metody je nejdůležitějším krokem správné na polohování řezné hrany nástroje proti trysce. Správná poloha ovlivňuje vznik, výsledný tvar a velikost rádiusu řezného břitu. Problém nastává u nástrojů, které mají ostří ve šroubovici. V těchto případech je nutné správně zkombinovat rotační a posuvný pohyb nástroje při modifikaci řezného břitu. Mezi další faktory, které mají vliv na výslednou mikrogeometrii, patří vzdálenost řezného nástroje od trysky, rychlost pohybu nástroje (součásti) pod vodním paprskem a s tím je i spojený celkový čas opracování. Jedná se o rychlý způsob úpravy povrchu, jehož výhodou je minimální silové působení na upravovanou součást. Další výhodou vodního paprsku je, že během procesu nevznikají žádné neekologické zplodiny a dochází k malé spotřebě vody a abraziva. Abraziva jsou netoxické látky, které se po oddělení od vody mohou dále používat. Avšak mezi nevýhody patří ta skutečnost, že při vyšší intenzitě používání může v průběhu času dojít k ucpaní trysky. Na stěnách trysky se totiž nahromadí směs vody a abraziva a tím dojde k zmenšování průměru trysky, až k úplnému zahlcení. Kromě toho má směs tendenci v trysce tvořit kašovitou hmotu, která právě ucpe výstupní trysku. Z tohoto důvodu je nutné trysku zařízení pravidelně čistit.



Obr. 2.10 a) Popis částí trysky vodního paprsku [9], b) Soustava tryska – řezný nástroj

### 2.3.3 Procesní média pro omílání [10]

Volba procesního média (abraziva) je jedna z nejdůležitějších faktorů na proces omílání a především na výslednou kvalitu povrchu omílaných součástí. V případě modifikace mikrogeometrie řezných nástrojů se díky správné volbě média dosahuje efektivní úpravy řezného břitu nástroje během krátkých procesních časů. Naopak při špatné volbě mohou např. procesní časy nebývale narůstat nebo dochází k nevhodné úpravě mikrogeometrie řezného nástroje. V současné době se na trhu objevují různé druhy procesních médií, které mají typově odlišné vlastnosti, aby bylo možné dokončovat širokou škálu součástí, různě tvarovaných a z odlišných materiálů. Aby došlo k efektivní úpravě povrchu, tak je nutné zvolit správné abrazivum. Mezi nejdůležitější parametry patří: typ omílacího stroje, materiál omílané součásti, velikost omílané součásti, požadavky na lesklost finálního povrchu, tvar a velikost abraziva. Vzhledem k tomu, že některé druhy omílacích strojů (odstředivé a vibrační) mají možnost omílat za sucha a za mokra, tak se abrazivum dělí na médium pro suché a pro mokré omílání.

Pro preparaci mikrogeometrie řezného břitu nástroje se používají abraziva pro suchý proces, protože mikrogeometrie řezných nástrojů se upravuje vlečným a proudovým omíláním. Mezi jedno z nejpoužívanějších patří médium HSC, které je směsí skořápek z vlašských ořechů a karbidu křemíku. Toto médium je vhodné právě na úpravu mikrogeometrie řezných nástrojů, ať už se jedná o nástroje z rychlořezné oceli nebo slinutého karbidu. Může se však použít na tvrdší řezné materiály, jako je např. řezná keramika. Platí, že toto médium lze použít do max. rádiusu řezného břitu 20  $\mu\text{m}$ . Pokud dochází k omílání na vyšší hodnoty poloměru, dochází k razantnímu nárůstu procesního času a tím se proces stává neefektivní. Velikost zrn abraziva je 0,4 – 0,8 mm. Je nutné udržovat správnou vlhkost tohoto média, aby nedocházelo k rychlému vysychání. Proto se po určitých provozních hodinách přidává speciální olej, který udržuje správnou vlhkost média HSC.



Obr. 2.11 Médium HSC 1/300

V určitých případech je dosáhnout vyššího rádiusu řezného břitu. K tomu slouží abrazivum QZ. Jedná se o zrna z umělého korundu o velikosti 0,5 – 3 mm. Tímto abrazivem lze vytvořit  $r_n =$  až 30  $\mu\text{m}$ , což je výhodné např. mikrogeometrie vrtacích nástrojů. Dalším abrazivem je TZC, což médium z karbidu křemíku, které má na povrchu vrstvu polyuretanu. Jedná se o malé válečky, které mají rozměr 4 x 5 mm nebo 2 x 3 mm a jsou určené pro  $r_n$  řezného břitu nástrojů až do hodnoty 60  $\mu\text{m}$ . Výhodou je to, že TZC abrazivum má schopnost samo dobrušování, čili výrazně se prodlužuje životnost. Využívá se na všechny řezné materiály (RO, SK, apod.).



Obr. 2.12 a) Médium QZ 1 – 3W, b) TZC

Existují však i média, jejíž hlavním úkolem není zvětšení rádiusu řezného břitu o malé hodnoty např. o 3 – 5  $\mu\text{m}$ . Jedním z takových médií je granulát z vlašských ořechů, označovaný H. Jde o médium, které slouží především k leštění šroubových drážek, hřbetů (fazety) nástrojů, leštění keramických materiálů apod. U řezných nástrojů po depozici se toto médium využívá na odstraňování tzv. dropletů, které vznikly při depozici. Velikost zrn toto média je okolo 0,4 – 2 mm, záleží na typu média. Do tohoto média se pro dosažení lepších výsledků (kvalitnějších povrchů) přidává lešticí prášek, nebo pasta. Jako v případě média HSC, je nutné udržovat správnou vlhkost média, aby nedocházelo k vysychání. Dalším podobným médiem je kukuřičné médium, označované M. Hlavním úkolem M média je vytváření velice hladkých a lesklých povrchů. Toto médium se využívá kromě úpravy řezných nástrojů i v automobilovém průmyslu, zdravotnictví apod. Zrnitost kukuřičného média je 0,8 – 1,3 mm.



Obr. 2.13 a) Médium H4/400, b) Kukuřičný granulát [10]

I v případě mokrého omílání existuje celá řada druhů procesních médií určená právě pro tento druh úpravy povrchu součástí. Účelem kombinace média a procesní kapaliny je zvýšení účinku omílání. Během omílání má procesní kapalina za úkol odstraňovat otřepy a odebraný materiál z povrchu a média a dochází k již zmíněnému zvýšení efektivity omílání. Zirkonové kuličky jsou používány velmi často pro součásti, kde je požadavek na vysoký lesk povrchu. Dále jsou vhodné pro odstraňování otřepů. Jedná se o velmi tvrdé a zároveň trvanlivé abrazivum, které nachází uplatnění během vibračního způsobu omílání. Průměr těchto kuliček se pohybuje v rozmezí 0,8 – 2,5 mm. Keramická tělíska jsou dalším druhem procesního média pro mokré omílání. Používají se především při odstředivém omílání, kde je požadavek vyleštění a odjehlení slitin oceli. Díky své vysoké tvrdosti, které tyto tělíska mají lze omílat i tvrdší materiály než je ocel. Keramická tělíska mohou mít různý tvar, např. elipsy, trojúhelníku, válečku. Rozměry média jsou pak v rozsahu 4 – 15 mm, záleží na typu keramického tělíska.



Obr. 2.14 a) Zirkonové kuličky[11], b) Keramická tělíska [12]

Dalším hojně používaným médiem jsou plastová tělíska. Pomocí nich se dokončují jak tvrdé, tak i relativně měkké materiály, u kterých je požadavek lesklého povrchu. Díky svému složení je toto médium vhodné k omílání měkkých materiálů (plasty apod.), kde může dojít k vytvoření tzv. „šupinek“ na povrchu. Jako v případě keramických tělísek, tak i plastová mohou mít různý tvar. Většinou se jedná o kužele a pyramidy o velikosti 6 – 12 mm. Během

mokrého procesu se využívají i ocelové jehličky malých rozměrů, které v kombinaci s procesní kapalinou zhutňují povrch součástí. Tento způsob se většinou využívá při omílání drahých kovů, čili jedná se více o šperkařský průmysl. Ve strojírenském průmyslu se toto médium může používat na odjehlování součástí.



Obr. 2.15 a) Plastová tělíška [12], b) Ocelové jehličky [12]

## 2.4 Metody měření mikrogeometrie řezného břitu [11], [12]

Výsledná kvalita řezných nástrojů je vždy jedním z nejdůležitějších hledisek nejenom pro budoucí použití v praxi, ale i během samotné výroby. Nástroj musí projít, od vybroušení až po úspěšné použití v praxi, několika důležitými kroky výroby. Jedním z nejdůležitějších kroků tohoto procesu je měření rozměrů a kvality povrchu řezné části. Se zvyšujícími se nároky na kvalitu řezných nástrojů bylo nutné vyvinout měřicí zařízení, které umožňovalo měřit a analyzovat nejenom makrogeometrii, ale i mikrogeometrii. Správné měření požadovaných veličin je nejdůležitější fází samostatného měření, aby došlo k získání požadovaných hodnot a tím pádem získání celkového obrazu o kvalitě řezného nástroje. Hlavním cílem měření je zjištění reálných hodnot, odhalení vad (např. na čelní nebo hřbetní ploše řezného nástroje) a případné vytvoření analýzy a zhodnocení stavu povrchu nástroje. Tento úkol je velice důležitý, jelikož se vytvoří závěr o tom, jaký bude mít řezný nástroj např. trvanlivost, řezivost, životnost apod.

V současné době klade vývoj řezných nástrojů i zvyšující požadavky na měřicí zařízení. Jedná se především o možnost měření složitých ploch, které by před několika lety nešly měřit, dále pak narůstá požadavek na přesnost měření, možnost měření až na úrovni nanometrů. Dalším důležitým požadavkem na měřicí zařízení je skenovací rychlost, tzn. hustota naměřených bodů během měření. S přesností souvisí fakt, že je nutné, aby bylo zaručené stabilní měření, bez vzniku otřesů, rázů a vibrací, které by se ve finále projevíly na kvalitě měření. Měřicí zařízení by mělo být co nejblíže umístěné výrobním prostorám, protože se díky tomu zkrátí vedlejší časy. Avšak je nežádoucí, aby takovéto zařízení bylo umístěné u výrobních strojů, jako jsou např. lisy, buchary apod. Vývin však pokročil i v těchto ohledech a v současné době existují různé opatření a konstrukční řešení (odizolování měřicího stroje), pomocí nich lze, v některých případech, měřit i relativně v blízkosti výrobních strojů. V neposlední řadě je důležité, aby naměřené výsledky bylo možné naměřit znovu, jedná se o

tzv. opakovatelnost měření. Je logické, že přesné měřicí zařízení, které splňují výše uvedené požadavky, budou mít vysokou pořizovací cenu. Zákazník musí najít kompromis mezi svými požadavky a kupní cenu měřicího zařízení (mikroskopu).

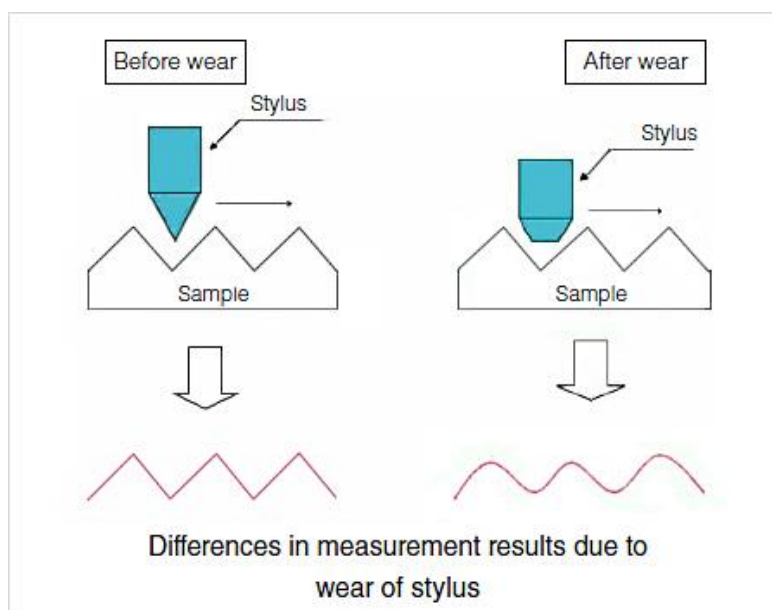
K měření rozměrové přesnosti na obecných plochách se v průmyslové praxi využívají tři metody měření. Zaprvé jde o absolutní měření, při kterém jsou naměřené celkové rozměry měřené součásti, druhou metodou je relativní měření. Při relativním měření jsou měřené a zjišťovány odchylky od jmenovitého rozměru, který je předepsaný např. na výkrese součásti. Poslední metodou je měření toleranční, při které je měřeno a následně vyhodnocováno, zda je odchylka v dané toleranci. V případě mikrogeometrie řezných nástrojů se měření rozděluje na dvě základní metody. A to na dotykovou a bezdotykovou metodu. V dnešní době lze říci, že nejpoužívanější metodou je bezdotykové měření mikrogeometrie. Bezdotyková metoda bude použita i během praktické části této diplomové práce.

#### **2.4.1 Dotykové metody měření [12]**

Všechny metody dotykových měření vychází ze stejného principu. Tím je, že po povrchu měřené součásti se pohybuje indentor, díky kterému dochází k zaznamenávání skutečného tvaru povrchu a tím pádem pak k vyhodnocení rozměrové, či jakostní kvality měřeného povrchu. Jedná se o metodu, která je dlouhodobě používaná a celkově snadno dostupná. Avšak nevýhodou této metody je, že postupně nemůže vyhovět některým požadavkům praxe a nelze pomocí dotykových metod měřit některé složité nebo malé tvary. Mezi hlavní požadavky na tyto měřicí zařízení patří citlivost. To znamená schopnost plynulého lineárního pohybu (bez žádných skoků a trhaných pohybů) po povrchu měřeného vzorku a zároveň schopnost zaznamenávání i velmi malých nerovností.

Dotykové měřicí zařízení se obecně nazývají profilometry. Jak již bylo řečeno, povrch měřené součásti je v neustálém kontaktu s měřícím hrotem, který bývá většinou vyrobený z diamantu. Takovýto hrot má definovanou geometrii. Během kontaktu měřicího hrotu a měřené součásti dochází k opotřebení měřicího hrotu. Tato skutečnost má poté zásadní vliv na přesnost měření a je třeba si ji uvědomit.





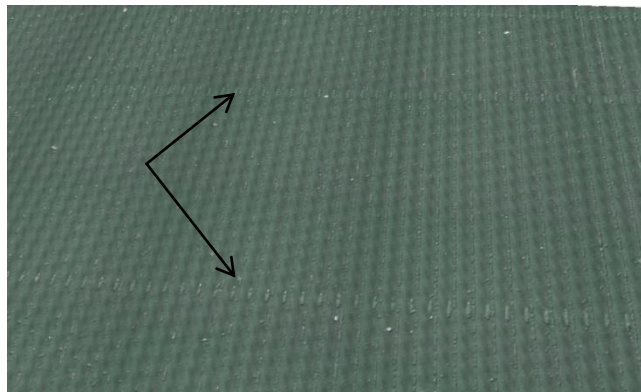
Obr. 2.16 Vliv opotřebení měřícího hrotu na přesnost měření [13]

V některých případech platí, že hrotem, kterým se změní profil povrchu nelze měřit poloměr zaoblení řezného břitu. To platí v případě, pokud je tento poloměr malý, např. 2  $\mu\text{m}$ . Platí, že poloměr zaoblení diamantového hrotu musí být menší, než je měřený poloměr. Profilometry mohou být buď dvousouřadnicové, tzv. 2D nebo třísouřadnicové (3D). Využití nachází nejenom na měření jednotlivých bodů, ale také na měření různých křivek (v případě třísouřadnicových strojů). Dotykové měření se rozděluje na dvě základní skupiny. Měření profilu (profilové měření) a plošné profilové měření.

Během profilového měření se vlivem zaoblení diamantového měřícího hrotu se přesně neměří daný profil povrchu. Od skutečného povrchu je vytvořena ekvidistanta, která je dána právě poloměrem zaoblení měřícího hrotu a složitostí profilu povrchu. Cílem je, aby docházelo k co nejpřesnějšímu kopírování skutečného průběhu profilu. Proto je nutné, aby zaoblení měřícího hrotu bylo co nejmenší. Díky tomu dojde k věrohodnějšímu měření. Měřený profil charakterizuje počet vrcholů a prohlubní a jejich hustota na určité vzdálenosti. To vše ovlivňuje výslednou naměřenou hodnotu. V dnešní době se tato chyba od měřidla bere v úvahu, a proto se pomocí korekcí snižuje její vliv. Jde o tzv. filtrování. Platí, že v případě kvalitnější struktury povrchu toto mechanické filtrování je bráno v menším podílu na celkový výsledek. Při měření profilu je nutné, aby měřící hrot byl vždy kolmo k měřenému profilu. Jedině tak dojde k věrohodnému měření. Avšak existují některá omezení u tvarově složitých měřených vzorků. Tím je maximální sklon mezi měřenými plochami. Tento sklon závisí na vrcholovém úhlu měřícího hrotu, avšak zpravidla jde o hodnotu 35° a 55°.

Z profilového měření, které se využívá na dvousouřadnicových zařízeních vznikla díky vývoji měřit profil ve 3D. Jedná se o tzv. plošné profilové měření, kterého lze dosáhnout pouze na třísouřadnicových měřících zařízeních. Principem je podobný jako v případě profilového měření, avšak v tomto případě se povrch měří ještě v jedné ose. Po změření matice bodů ve 3 osách. Po SW vyhodnocení těchto bodů vznikne 3D plocha. Takovéto

měřicí zařízení kladou vyšší nároky na výpočetní techniku. Pro kvalitnější a detailnější vyhodnocení povrchu je nutné vysoký počet měřících bodů. To znamená, že plošné profilové měření je časově náročnější než klasické profilové měření. Naopak díky plošnému profilovému měření se získává nový pohled na výslednou kvalitu měřené plochy. Je dobré říci, že během kontaktu měřicího hrotu a měřené plochy může dojít k vytvoření rýh na měřeném povrchu. Tento problém může nastávat např. při kalibrování měřících strojů pomocí etalonů. Po určité době jsou na povrchu etalonu vytvořené až takové markantní rýhy, které mohou způsobit vznik hrubých chyb měření. Následující obrázek demonstruje povrch etalonu s příslušnými parametry drsnosti  $R_a = 1,0 \mu\text{m}$  a  $R_z = 3,3 \mu\text{m}$ . Je vidět, že díky častému používání kontaktní metody dojde na povrchu ke vzniku rýh.



Obr. 2.17 Rýhy vytvořené měřícím hrotem

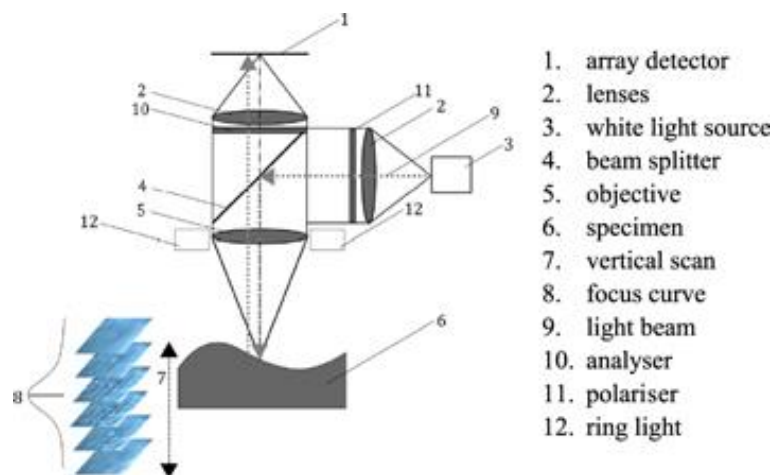
#### 2.4.2 Bezdotykové měření [13], [14]

Jak již bylo napsáno, tak v případě měření složitých či velmi malých ploch jsou kontaktní metody měření nedostačující. Proto bylo nutné vyvinout nový způsob měření i tvarově složitých ploch. A díky tomu vznik bezdotykový způsob měření. Bezdotykové metody měření přináší nové možnosti v oblasti metrologie, výroby řezných nástrojů, analýze řezných hran i u nástrojů, které mají malé průměry, např. 0,5 mm. Existuje několik způsobů bezdotykového měření. Mezi nejpoužívanější metody patří optické, laserové a elektronové. Jako i u ostatních měřících zařízení, tak i u bezdotykového mikroskopu platí určité faktory, podle kterých se zvolí správné měřicí zařízení na danou aplikaci. Jedná se především o vertikální a horizontální rozlišení, maximální úhel, pod kterým lze měřit strmé plochy, rychlost a doba snímání a v neposlední řadě cena měřicího zařízení. Další, neméně důležitou vlastností je vzdálenost objektivu od měřeného vzorku. Tato vzdálenost je velice důležitá, neboť určuje rozsah skenovaného prostoru a také může zabránit kolizi mezi vzorkem a objektivem. Během měření nedochází ke kontaktu mezi měřícím zařízením a vzorkem. Tato skutečnost je považována za výhodu v těch případech, kdy probíhá měření takových povrchů, jejichž jakostní kvalita je velice vysoká. V případě dotykových metod dochází např. k poškrabání (na úrovni nanometrů) povrchu vzorku diamantovým hrotem měřidla. Naopak nevýhodou bezdotykových měřících zařízení je jejich vyšší pořizovací cena oproti kontaktním měřidlům.

V průběhu měření lze měřit a vyhodnocovat povrch dvěma způsoby. Prvním způsobem je topografická mikroskopie povrchu a druhým způsobem je optická mikroskopie. Principem topografické mikroskopie povrchu je to, že lze přímo měřit dané lokální výškové proměnné měřeného povrchu vzorku. Výhodou je to, že při správném nastavení této metody nezáleží na vstupech, kterými je osvětlení a stíny. Avšak při nevhodném nastavení je měření nepřesné, povrch je zkreslený, protože na měření mají vliv rušivé signály, či nedostatek dat pro vyhodnocení povrchu. U optické mikroskopie jsou výškové změny měřeného povrchu zaznamenávané nepřímou. V tomto případě je zobrazen kontrast světla v závislosti na poloze. Kontrast světla je ovlivňován nepřímými faktory. Mezi tyto faktory patří tvarová složitost měřeného vzorku, stíny, směr a velikost osvětlení, odrazy od plochy apod. Princip vyhodnocování získaných dat u bezdotykového měření spočívá v tom, že je v první řadě vytvořena prvotní plocha v SW měřicího stroje. Poté je pomocí několika filtrů tato plocha připravena na operace, mezi které patří vyhodnocování drsnosti povrchu apod. Výhodou je to, že s naskenovanou plochou, která je ve 3D lze pracovat a díky nástrojům lze tuto plochu detailně analyzovat na různých místech naměřené plochy.

#### a) Optické bezdotykové měření [13], [15], [16]

Tento způsob měření je v současné době jedním s nejrozšířenějším ve strojírenském průmyslu. Princip této metody vychází z tzv. variace ostření, v průmyslové praxi známé jako „Focus Variation“. Jedná se o skenování kolmo na měřený povrch a zároveň dochází k vytvoření velkého množství snímků, které mají malou hloubku ostrosti optického mikroskopu. Dané měřicí zařízení tyto 2D snímky vyhodnotí a vytvoří z nich celkový, přesný plošný snímek ve 3D. Právě tento způsob měření nachází uplatnění ve vývoji a výrobě rezných nástrojů, kdy i velice malé oblasti nástroje, např. již zmiňovaná mikrogeometrie rezného bříty, povrch čela a hřbetu nástroje, je možné zkoumat a analyzovat. Výhodou tohoto způsobu měření je možnost měření jak tvaru, tak i drsnosti během jednoho měření, možnost měření strmých ploch až  $80^\circ - 85^\circ$ , široké škály materiálů, veliký rozsah měřících oblastí, možnost měření jak drsných tak i hladkých povrchů.



Obr. 2.18 Schéma měření pomocí metody „Focus Variation“ [14]

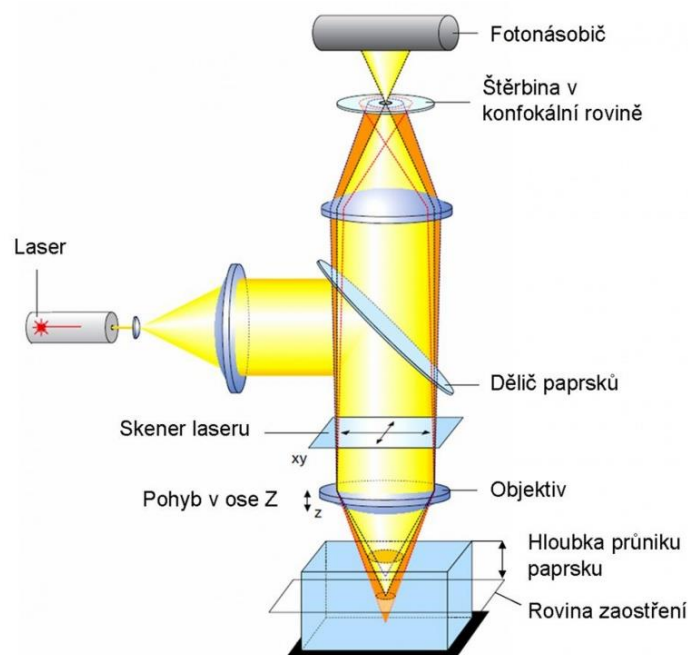
- kde: 1 – maticový detektor, 2 – čočka, 3 – zdroj bílého světla, 4 – dělič, 5 – objektiv, 6 – měřený vzorek, 7 – vertikální skenování, 8 – zaměřená křivka, 9 – paprsek světla, 10 – analyzátor, 11 – polarizér, 12 – světelný prstenec

Už v úvodu kapitoly bylo zmíněno, že výslednou kvalitu naskenované plochy ovlivňují parametry měřicího zařízení. Jedním z nejdůležitějších je správné nastavení osvětlení. V mnoha případech se používá přídavné, tzv. bílé světlo. Jedná se o koaxiální regulovatelné osvětlení měřeného vzorku. Toto světlo se odráží od povrchu měřené součásti a tento odraz je zaznamenáván v optické části mikroskopu pomocí senzoru. Následně se pak ve vertikálním směru pohybuje tento senzor, který udává ostrost každé skenované hladiny na povrchu měřeného vzorku. V další fázi jsou do poměru dány rozdílné odrazy koaxiálního světla a ostrost jednotlivých bodů. Ve výsledku je pak každému bodu přiřazena daná míra ostrosti ve vertikálním směru. To znamená, že pro výsledné vytvoření 3D plochy měřené součásti v SW je rozhodující informací ostrost.

Takto naskenovaný povrch má velice vysokou kvalitu, vysoké rozlišení díky své vertikální hloubce skenování. I v tomto případě je možné naměřit i takové plochy, které jsou vůči sobě strmé pod úhlem až  $85^\circ$ . V závislosti na tvaru a velikosti měřené oblasti vzorku je nutné si před vlastním měřením správně nastavit mikroskop. Jedná se především o správné zvolení objektivu. V současné době se metodika měření dle „Focus Variation“ stále připravuje. V budoucnu by tato problematika měla být popsána normou ISO 25178-606.

#### b) Konfokální skenování [17], [18]

Jedná se opět o optickou bezdotykovou metodu měření. Princip konfokálního mikroskopu spočívá v zaměření laserového paprsku na danou plochu o průměru tzv. difrakční meze. Poté se na té samé výškové úrovni skenuje daná plocha. Paprsek, který se odráží od plochy vzorku, je snímán snímačem. Následujícím krokem je zpracování signálu pomocí počítače. Výhodou tohoto způsobu měření je vysoká rozlišovací kvalita. Konfokální skenování se dělí na dva základní druhy. Prvním je konfokální mikroskopie s rotujícím diskem (TSM) a druhým je laserová rastrovací mikroskopie (LSCM). Např. ve vertikálním směru je přesnost rozlišení až 3nm. V horizontálním směru je pak přesnost rozlišení až 1  $\mu\text{m}$ . Mezi omezení metody patří maximální úhel sklonu plochy. V případě konfokálního skenování je tento úhel okolo  $15^\circ$ .



Obr. 2.19 Princip konfokálního mikroskopu [15]

## 2.5 Inconel 718 [19], [20]

Jedná se o slitinu, jejíž základ chemického složení tvoří nikl. Nikl, jakožto čistý prvek je feromagnetický kov, odolný proti korozi. Zároveň je velmi tažný a zároveň kujný. V porovnání s většinou neželezných kovů, slitiny niklu jsou tvrdší, houževnatější a pevnější. Chemické složení slitiny Inconel 718 je uvedeno v následující tabulce. Obsah niklu je okolo 50%. Druhým nejvíce zastoupeným prvkem v této slitině je chrom. Obsah chromu je okolo 20%. Právě tyto dva prvky ovlivňují, z velké části, mechanické vlastnosti. Při výrobě a tepelném zpracování se do těchto slitin mohou dostávat prvky, které buď pozitivně, nebo negativně ovlivňují výsledné mechanické vlastnosti, tvorbu defektu v materiálu apod. Např. obsah uhlíku je třeba co nejvíce regulovat. Velké množství karbidů by bylo nežádoucí, jelikož karbidy mají tendenci se seskupovat na hranicích zrn. Z hlediska zachování pevnostních vlastností při vysokých teplotách je seskupování karbidů na hranicích zrn nežádoucí. Prvky jako síra, fosfor či měď jsou v této super slitině nežádoucími. Legujícími prvky, které přispívají ke zvyšování mechanických vlastností, jsou např. B a Zr. Tyto prvky, ve struktuře, způsobují zpevnění hranic zrn.

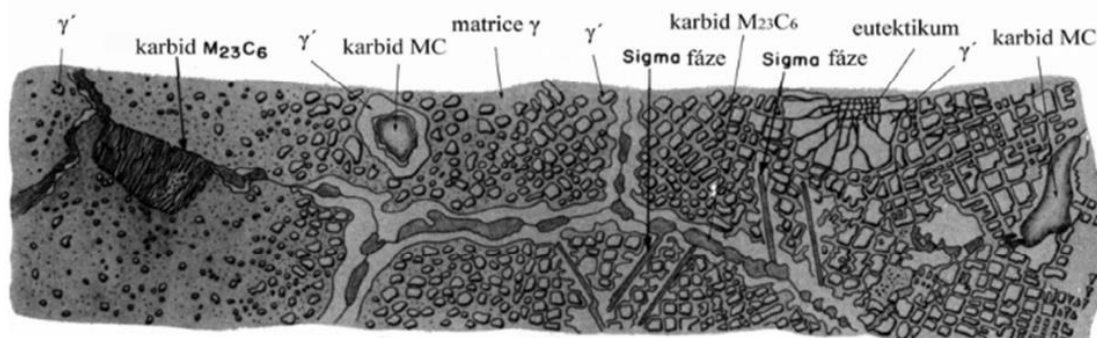
C	Ni (+Co)	Cr	Fe	Nb (+Ta)	Mo	Ti	Al
Max. 0,08	50,0 – 55,0	17,0 – 21,0	Zbytek	4,75 – 5,50	2,80 – 3,30	0,65 – 1,15	0,20 – 0,80
Co	Mn	Si	P	S	B	Cu	
Max. 1,0	Max. 0,35	Max. 0,35	Max. 0,015	Max. 0,015	Max. 0,006	Max. 0,3	

Tab. 2.1 Chemické složení Inconel 718 (obsah v %)

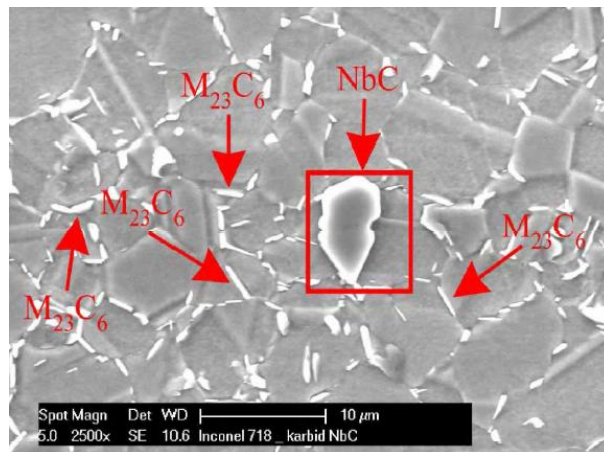
Mez kluzu $R_p 0,2$ [MPa]	Min. 1040	Modul pružnosti v tahu [GPa]	204,9
Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	Min. 1275	Koeficient roztažnosti [ $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ ]	13,0
Tvrдость HRC	24-45	Bod tání [ $^\circ\text{C}$ ]	1336
Tažnost A [%]	Min. 20%	Hustota [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	8,19

Tab. 2.2 Mechanické a fyzikální vlastnosti

Základní fází mikrostruktury je matrice  $\gamma$ . Jedná se o substituční tuhý roztok Ni a legujících prvků, mezi které patří Cr, Co, M. Tato matrice má kubickou plošně centrovanou mřížku (FCC). Zachování vysokých funkčních vlastností niklových slitin za velmi vysokých teplot (např. 1 000  $^\circ\text{C}$ ) má za následek základní zpevňující fáze  $\gamma'$  ve struktuře. Fáze  $\gamma'$  vzniká ochlazením tuhého roztoku  $\gamma$  a je to intermetalická fáze sloučeniny  $\text{Ni}_3\text{Al}$ . Typickým tvarem pro tuto fázi jsou tyčinky, krychle a globule. Avšak ve slitině Inconel 718 fáze  $\text{Ni}_3\text{Nb}$  je základní zpevňující fází, označovaná  $\gamma''$ . Tato fáze má mřížku tetragonální prostorově centrovanou (BCT). Proces precipitačního vytvrzování má za následek tvorby metastabilní fáze  $\gamma'''$ . Rozpouštěcí žhání při teplotách cca 970 – 1035  $^\circ\text{C}$  je součástí procesu vytvrzování. Proces probíhá v inertní atmosféře či ve vakuu, po rozpouštěcím žhání následuje ohřev na teplotu 600 – 800  $^\circ\text{C}$ . Při tomto procesu vznikají velká zrna, která obsahují precipitační fáze  $\text{Ni}_3\text{Nb}$ . Díky vysokému obsahu chromu má slitina Inconel 718 vysokou korozní odolnost a schopnost pracovat v agresivním prostředí při vysokých teplotách. Schopností této slitiny je to, že si zachovává své mechanické vlastnosti při vysokých teplotách a zároveň nedochází k chemickému opotřebení. Díky obsahu chromu ve slitině se na povrchu vytváří vrstva oxidu chromu, která chrání povrchové vrstvy právě před účinkem agresivního prostředí a tím se zvýší korozní odolnost.



Obr. 2.20 Mikrostruktura precipitačně zpevněné niklové superslitiny [16]

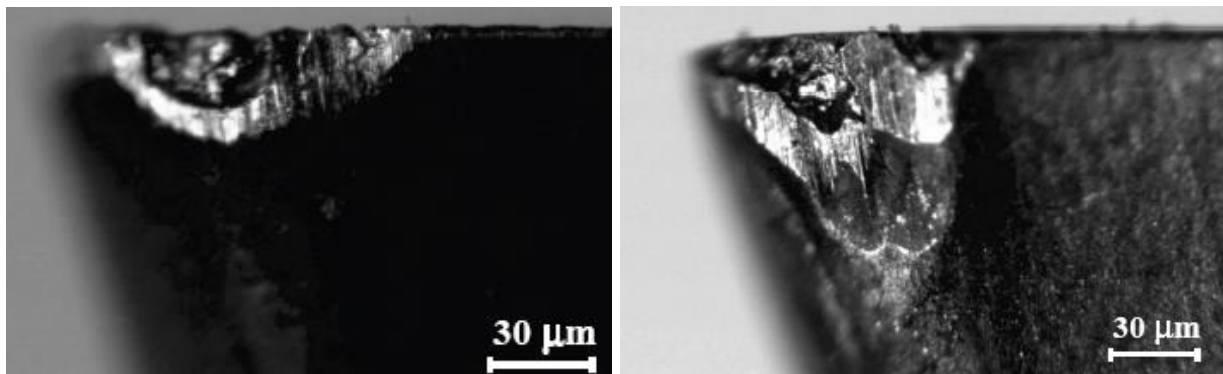


Obr. 2.21 Mikrostruktura slitiny Inconel 718 [17]

### 2.5.1 Obrobitelnost Inconelu 718 [20], [21]

Mechanické vlastnosti Inconelu 718 jako je vysoká pevnost, tvrdost, houževnatost (a to i za zvýšených teplot), které jsou pro finální produkty výhodné, tak během obrábění jsou zdrojem problémů. Kromě vysoké pevnosti a tvrdosti, mezi další problematické vlastnosti při obrábění patří tendence ke zpevňování, abrazivní opotřebení (díky Cr) řezného nástroje a nízká tepelná vodivost (nutnost procesního chlazení). Mezi další materiálovou vlastnost, která ztěžuje proces obrábění je tažnost. Platí, že tažnost se zvyšující se teplotou zvyšuje. Tato zvyšující se tažnost má pak za následek zvýšení zatížení řezné části, tzn. řezného břitu během obrábění. Vlivem plastických deformací, které vznikají při tvorbě třísky, dochází k mechanickému zpevňování obráběného povrchu. Takto zpevněná vrstva je daleko pevnější než původní materiál. Proto je nutné upravit geometrii nástroje tak, aby se snížila celková energie řezného procesu. Především se jedná o redukci mechanické energie. Dalším cílem úpravy řezné geometrie je i dosažení menších řezných sil, eventuálně snížení kolísání řezných sil a dosažení plynulé a vhodné tvorby třísek. Z důvodu výše uvedených vlastností slitiny Inconel 718 bylo nutné se poohlédnout po takových řezných materiálech, které by byl schopny obrábět tuto slitinu při zachování dobré trvanlivosti nástroje. Bylo nutné najít takový řezný materiál, který by odolával vysokým teplotám, byl by schopný odolávat abrazivnímu opotřebení a zároveň dostatečně tuhý a houževnatý. Samozřejmě takový řezný nástroj (materiál) neexistuje, tak bylo nutné najít kompromis mezi těmito základními vlastnostmi. Rychlořezná ocel se na obrábění těchto slitin nehodí z důvodu nízké tvrdosti a teplotní odolnosti. Slinuté karbidy jsou materiálem, který se hojně používá pro obrábění Inconelu 718. Avšak samostatný SK by nebyl dostačující pro obrábění, proto se substrát deponuje tenkými vrstvami. Díky tomu vznikne řezný nástroj, který má několikrát delší trvanlivost, než nástroje bez depozice. Moderní gradientní tenké vrstvy mají vysokou tvrdost a zároveň tepelnou odolnost. Díky těmto vrstvám je možné obrábět tyto slitiny s relativně dobrou efektivitou při zachování požadovaných geometrických a tvarových rozměrů. Mezi další řezné materiály, pro obrábění niklových slitin, patří řezná keramika a kubický nitrid bóru (CBN). Tyto materiály vykazují požadovanou tvrdost a s tím spojenou odolnost proti opotřebení, teplotní stálost. Avšak nevýhodou těchto materiálů je nízká houževnatost. Proto se musí změnit strategie

obrábění a řezné podmínky tak, aby nedošlo k destrukci těchto křehkých řezných materiálů. Další nevýhodou je vysoká cena. Tudíž řezná keramika a CBN se využívají jen na speciální případy.



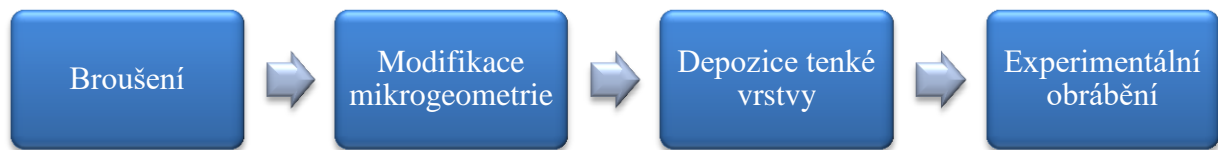
Obr. 2.22 Opotřebení řezného nástroje ze SK,  $v_c = 50$  m/min,  $f_z = 0,05$  mm/zub a) sousledné, b) nesousledné frézování [18]

Vlivem nízké tepelné vodivosti viz Tab. 2.2 dochází při obrábění niklových slitin ke vzniku vysokých teplot. Při procesu obrábění je pak problematický odvod tepla z místa styku obráběného materiálu a řezné části řezného nástroje. Teploty při obrábění mohou dosahovat až 1200 °C. Při těchto teplotách se zvyšuje riziko selhání řezného nástroje a zároveň nedodržení požadovaných geometrických a tvarových přesností obráběných ploch. Dalším důvodem ke vzniku takto vysokých teplot je i to, že při procesu vznikají dělené třísky, které v některých případech zahlcují místo řezu a vznikající teplo nemá kam uniknout, proto přechází do řezného nástroje či obrobku. Teplo vzniká právě při obrábění, kdy se deformuje obráběný povrch. Snahou je, aby vznikající teplo bylo odvedeno v třísece a co nejméně ovlivňovalo řezný nástroj a obráběný materiál. Proto se při řezném procesu používá řezné prostředí, aby se snížila teplota při obrábění.

### 3. Návrh a realizace experimentu

Experiment diplomové práce má za cíl zjistit hodnotu trvanlivosti řezných nástrojů, které mají upravenou mikrogeometrii ostří různými médii a technologiemi. K tomu pak budou během experimentu zjišťované jednotlivé složky řezných sil, opotřebení hřbetu  $VB_B$  [mm] a drsnost povrchu obrobku. Mezi fáze, které předcházely hlavnímu experimentu, patří broušení řezného nástroje, modifikace mikrogeometrie řezného břitu nástroje a následné deponování tenké vrstvy na řeznou část nástroje. Volba řezného materiálu je nejdůležitějším vstupem do této praktické části. Pro tuto diplomovou práci byl za řezný materiál zvolen slinutý karbid, který bude po následné modifikaci mikrogeometrie deponován tenkou vrstvou pro zvýšení řezivosti a trvanlivosti.





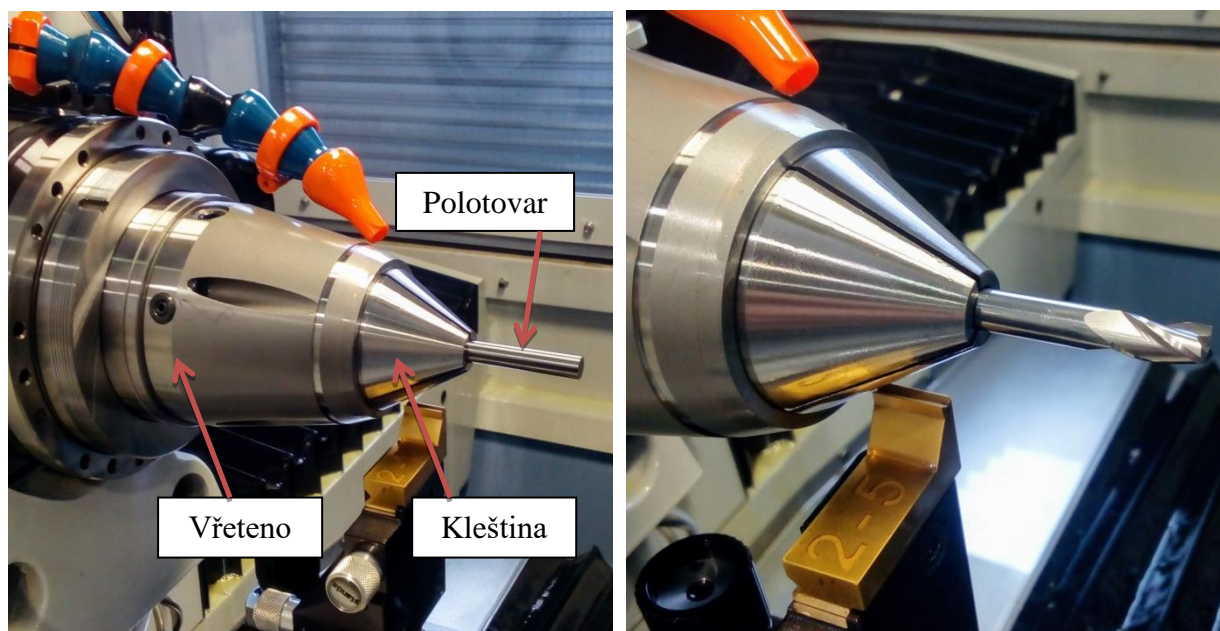
Obr. 3.1 Návrh jednotlivých fází experimentu

### 3.1 Přípravné práce před experimentem

Praktická část diplomové práce se skládá ze dvou základních kroků. Jde o přípravné práce a vlastní experiment. Do přípravných prací patří řada kroků, kterými se dle moderních způsobů a metod výroby vyrobí 12 kusů monolitních drážkovacích fréz, které pak budou použité v hlavní části experimentu. Následující kapitoly popisují jednotlivé kroky a jejich problematiku.

#### 3.1.1 Broušení řezných nástrojů [22]

Produktivní výrobu řezných nástrojů lze v současné době docílit za pomoci víceosých brusek. Při výrobě osových řezných nástrojů (frézy, vrtáky) do průměrů cca  $\varnothing$  14, 16 mm platí, že polotovarem pro broušení jsou tzv. roubíky. To znamená, že se výsledná geometrie brousí do plného materiálu polotovaru. Po vybroušení vznikne monolitní řezný nástroj. K broušení řezných nástrojů, které mají složité tvary a plochy, např. šroubovice vrtáků, stopkových fréz apod. je nutné využívat právě víceosé stroje. Díky těmto strojům a vhodných brusných kotoučů je možno brousit složité plochy. Pro broušení vzorků pro experiment této práce byla použita víceosá nástrojařská bruska Anca MX7. Řezné nástroje byly vybroušeny za pomoci laboratoře experimentálního obrábění na hale RTI. Celkem bylo vybroušeno 12 monolitních dvoubřitých fréz. Po vybroušení řezného nástroje se kontroluje průměr nástroje, obvodové (radiální) házení, kvalita ostří řezné hrany apod.



Obr. 3.2 a) Polotovár (roubík) před broušením, b) Vybroušený řezný nástroj

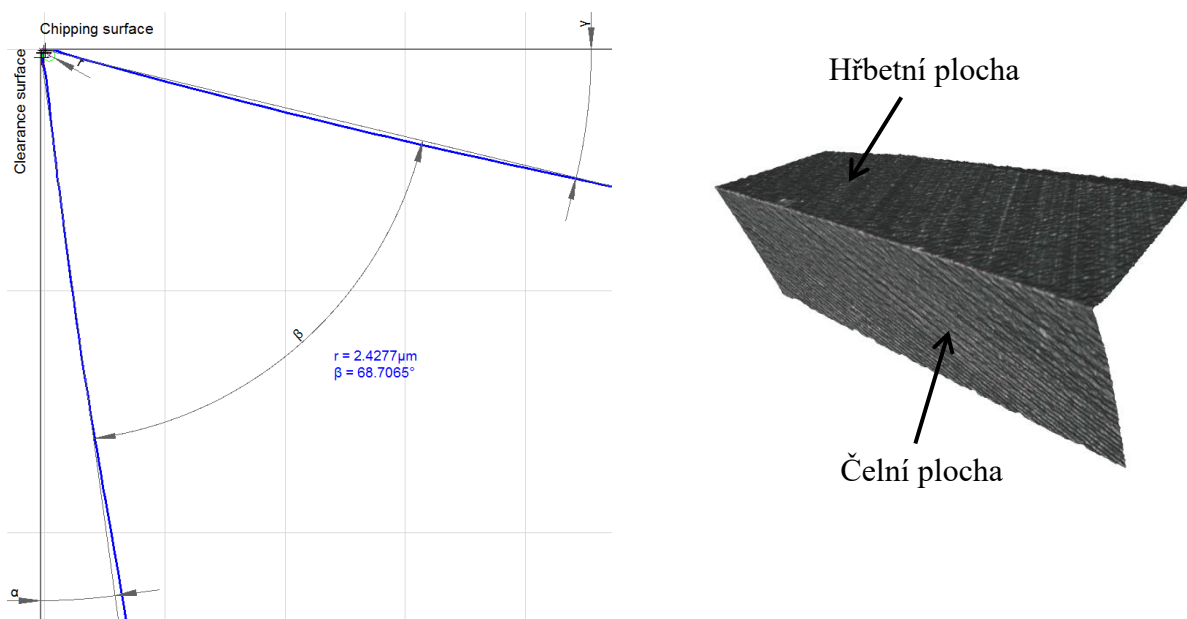
V této fázi je nejdůležitější si uvědomit, že kvalitu výsledného nástroje po broušení určuje výběr polotovaru, kvalita brusných kotoučů, řezné podmínky, řezné prostředí apod. Především výběr polotovaru určuje kvalitu nástroje, mechanické vlastnosti, podíl kobaltu apod. V tomto případě byly vzorky vybroušeny z polotovaru, jejichž vlastnosti jsou uvedené v tabulce. Pro doplnění, tyto polotovary jsou od německé firmy PCG.

Struktura	Velikost zrna [ $\mu\text{m}$ ]	Podíl Co $\pm 0,5\%$	Tvrdość HV30	Tvrdość HRA	Hustota [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	TRS [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]
Submicron	0,7	10,0	1580	91,8	14,35	3600

Tab. 3.1 Mechanické a fyzikální vlastnosti slinutého karbidu

### 3.1.2 Modifikace mikogeometrie ostří řezného nástroje

V následujícím kroku po broušení následovala modifikace mikogeometrie ostří řezného nástroje (vzorku). Díky tomu se vytvoří definovaný rádius zaoblení řezných břitů. Během první fáze je však nutné změřit mikogeometrii ostří, resp. rádius řezného břítu nástroje, který vznikl po broušení. Kromě toho se provede i vizuální analýza kvality hřbetní a čelní plochy a především místa, kde se tyto dvě plochy protínají, tedy řezné hrany. Díky tomuto měření se mohou objevit případné defekty a ty se pak dále analyzují. K měření byl použit opticko – skenovací mikroskop Alicona IFM G4. Mikroskop pracuje na principu změny ohniskové vzdálenosti, tzn. princip „Focus Variation“ (viz bod 2.4.2). Řezný břit nástroje byl naskenován objektivem, jehož zvětšení odpovídá předpokládané velikosti rádiusu řezné hrany nástroje. Naměřená velikost rádiusu řezného břítu nástroje po broušení byla  $2 \pm 0,5 \mu\text{m}$ . U každého vzorku probíhalo měření vždy na stejném místě, které bylo vzdáleno 2 mm od špičky nástroje.



Obr. 3.3 a) Mikrogeometrie řezného nástroje, b) 3D snímek řezného břítu nástroje

Po měření rádiusu řezného břítu následovala modifikace mikrogeometrie. Kap. 2.3 popisovala metody, vhodné pro modifikaci mikrogeometrie řezných nástrojů. V případě této diplomové práce, kde řezným nástrojem je monolitní dvoubřitá fréza, byly zvoleny dvě metody. Těmito metodami bylo vlečné omílání a tryskání vodním paprskem. Modifikace mikrogeometrie vlečným omíláním navíc využívala dvě procesní média, aby se experimentálně ověřil vliv daného média. Zvolenými médii bylo HSC 1/300 (ořechové skořápky + SiC) a QZ 1-3W (umělý korund). Požadavkem bylo vytvořit na řezném břítu rádius 15, 20, 25  $\mu\text{m}$ . Modifikace mikrogeometrie řezných nástrojů přináší řadu výhod. Mezi výhody patří vyšší pevnost řezné hrany (díky většímu rádiusu řezného břítu), hrana má pak vyšší odolnost proti opotřebení. Kvalita povrchu se zlepšuje, především vznikne lepší adheze pro budoucí nanášení tenké vrstvy. Díky modifikaci může dojít ke zlepšení kvality povrchu z hlediska zbytkových pnutí, tzn., že omíláním odebere v řádech max.  $\mu\text{m}$  povrchová vrstva, která obsahuje tahové pnutí, které je na povrchu škodlivé (podpora vzniku trhlin, křehkost povrchové vrstvy apod.).

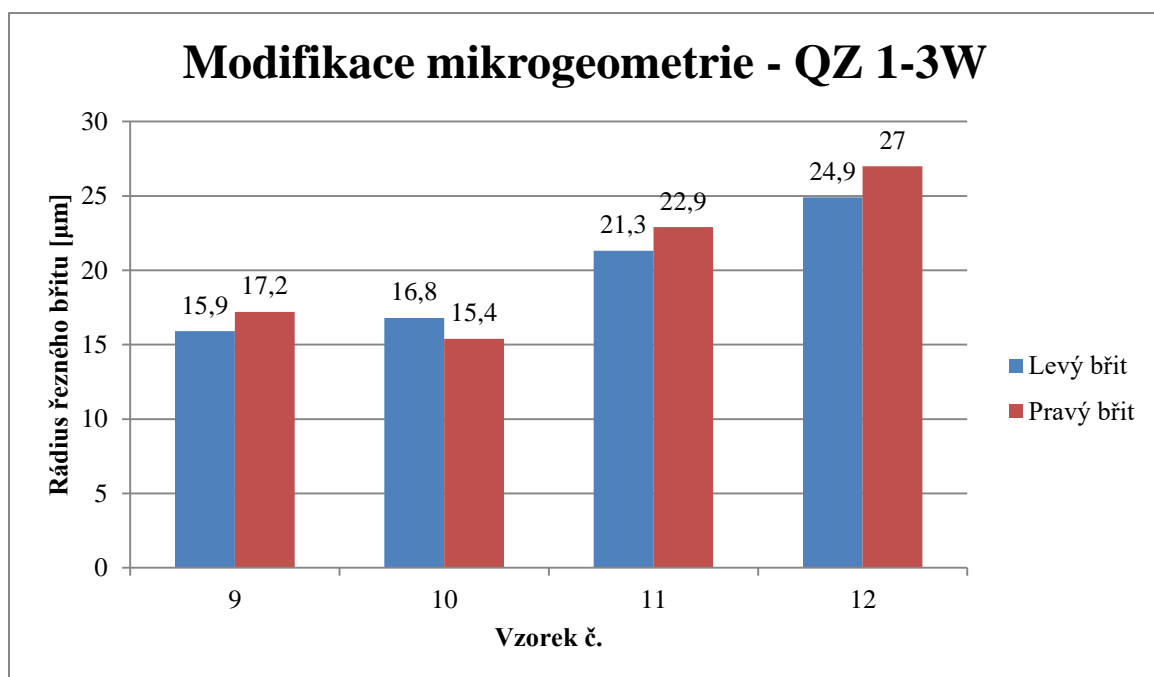
Pro vlečné omílání byl využit omílací stroj OTEC DF-3 Tools. Toto omílací zařízení umožňuje měnit celkem šest základních parametrů. Jedná se o celkový čas omílání, čas omílání po směru a proti směru hodinových ručiček, otáčky rotoru, otáčky držáku a hloubka ponoru vzorku během omílání uvnitř pracovní nádoby. Co se týče tryskání vodním paprskem, tak mezi parametry, které ovlivňují mikrogeometrii nástroje, patří rychlost vodního paprsku, pohyb vzorku vůči trysce a celkový čas. Následující tabulka udává parametry, které byly zvoleny pro jednotlivé definované parametry během vlečného omílání.

Požadovaný rádius	Médium	Celkový čas	Čas P	Čas L	Otáčky rotor	Otáčky držák	Hloubka ponoru
15	QZ	0:12	0:09	0:03	35/-35	35/-35	350
20	QZ	1:00	0:45	0:15	30/-30	45/-45	370
25	QZ	1:00	0:45	0:15	30/-30	45/-45	390
15	HSC	6:00	3:00	3:00	40/-40	65/-65	420

20	HSC	15:00	11:00	4:00	40/-40	65/-65	420
25	HSC	23:00	17:00	6:00	40/-40	65/-65	420

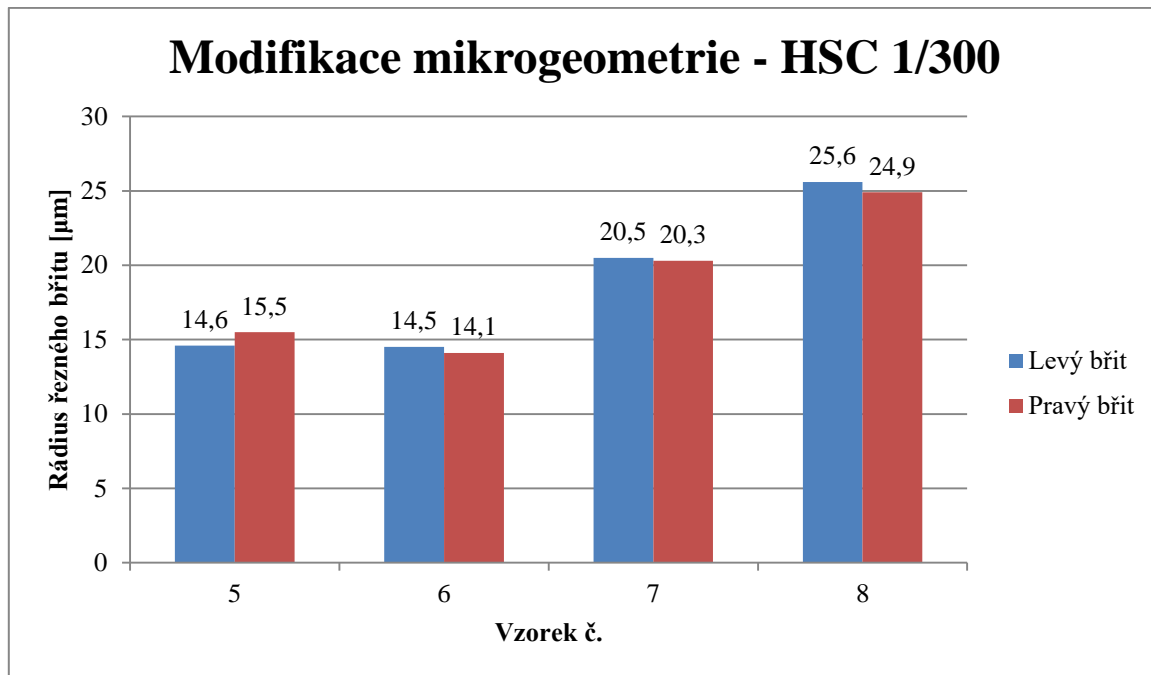
Tab. 3.2 Procesní parametry vlečného omílání

V dalším kroku se opět použil mikroskop IFM G4 k tomu, aby se změřila velikost rádiusu řezného břítu nástroje po modifikaci. Následující grafy pro jednotlivá média a způsoby modifikace popisují naměřené hodnoty jak pro levý, tak pro pravý břit. Měření probíhala opět 2 mm od čela, aby byla zajištěna věrohodnost měření a dalo se dál pracovat s naměřenými hodnotami. První graf zobrazuje naměřené hodnoty vzorků, které byly modifikované pomocí vlečného omílání v QZ 1 – 3W médiu. Díky tomuto médiu byly dosaženy požadované definované poloměry zaoblení řezného břítu v daleko kratším čase, než v případě média HSC 1/300. Na druhou stranu, mezi značnou nevýhodu patří velké rozdíly v poloměru mezi levým a pravým řezným břitem.



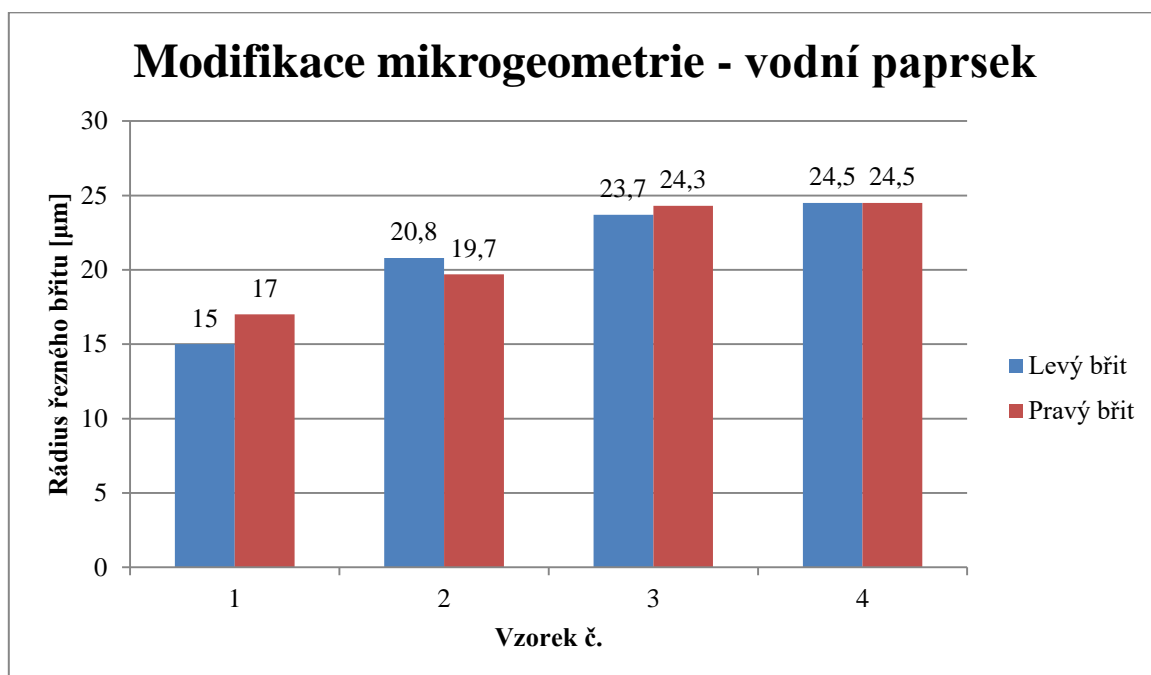
Graf 3.1 Hodnoty rádiusu řezného břítu po vlečném omílání QZ

V druhém kroku došlo k vyhodnocení vzorků, které byly rovněž omílané. Avšak tentokrát bylo médiem HSC 1/300. Už při prvním pohledu na graf 3.2 je vidět znatelné zmenšení rozdílných velikostí mezi levým a pravým rádiusem řezného břítu nástroje. Navíc se i skutečné hodnoty daleko blíže přibližují teoretickým, požadovaným hodnotám. Avšak nevýhodou tohoto média je to, že při omílání na rádius řezného břítu >20 µm dochází k razantnímu nárůstu procesního času.



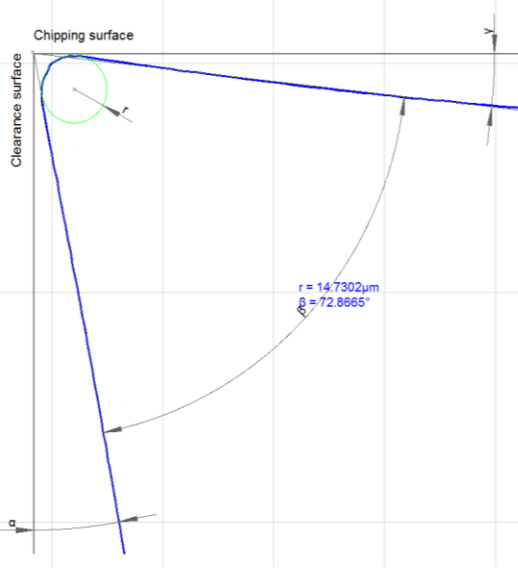
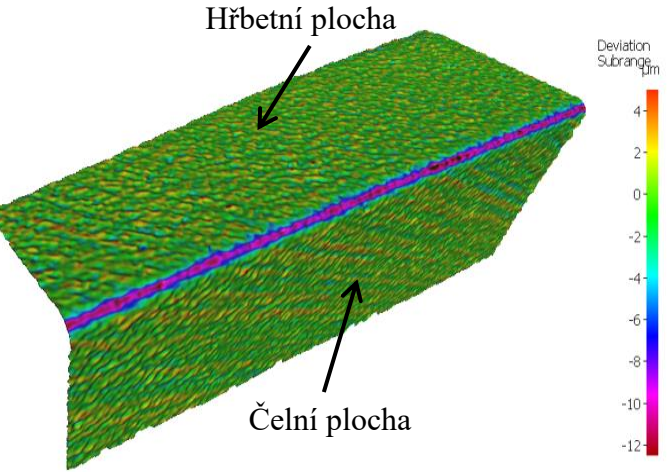
Graf 3.2 Hodnoty rádiusu řezného břitu po vlečném omílání HSC

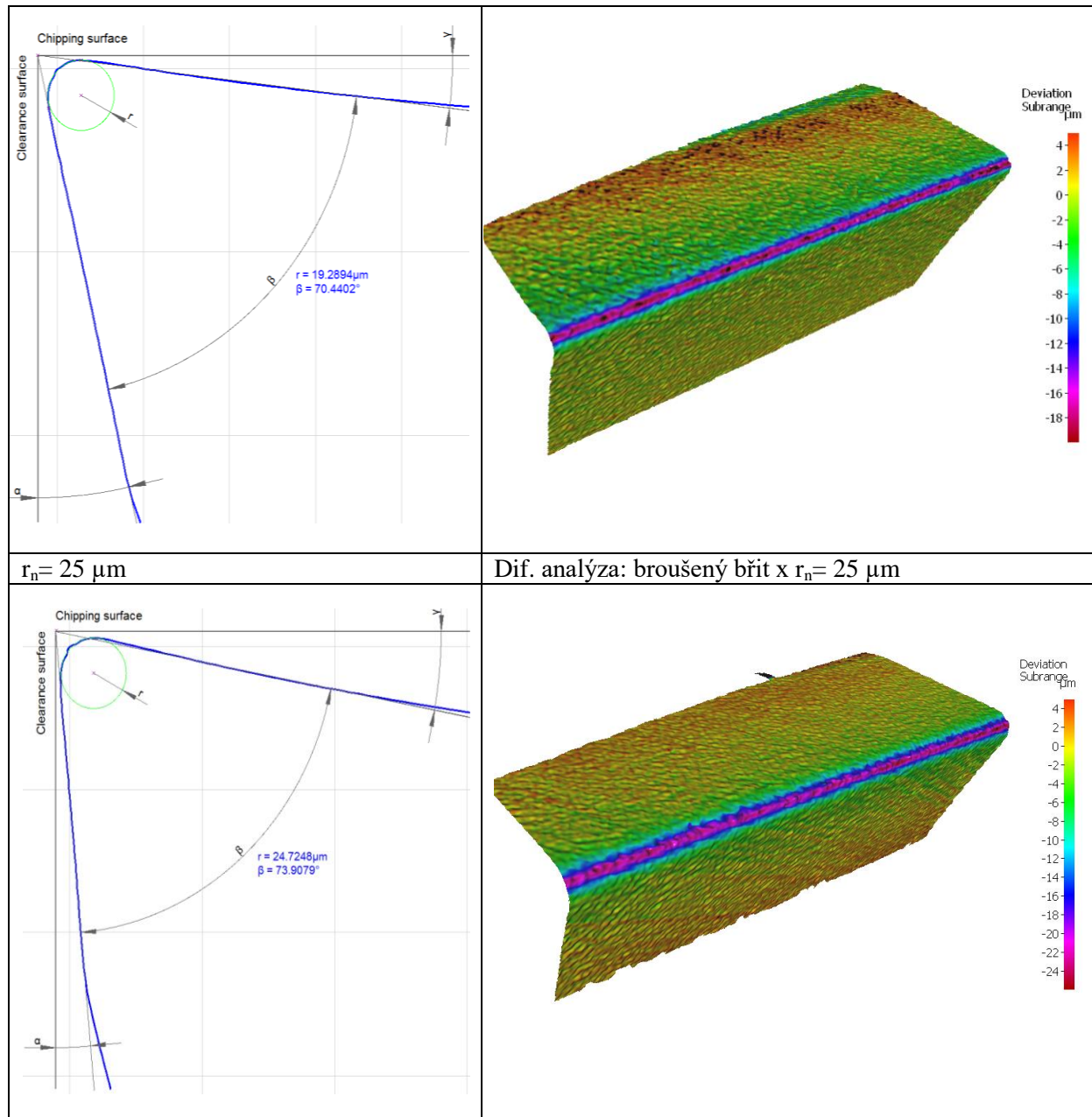
Posledním krokem bylo naměření vzorků po modifikaci vodním paprskem. Naměřené hodnoty rádiusu levého a pravého řezného břitu se od sebe celkem relativně liší, podobně jako v případě omílání v QZ médiu. Avšak i v tomto případě je výhodou velmi krátký procesní čas, v řádech desítek vteřin. Jelikož tryskání vodním paprskem byla prototypová technologie, která je v procesu vývoje a výzkumu. Proto jsou zde uvedené jen některé parametry. Vzdálenost vzorku od trysky byla 1 cm, doba tryskání byla a)  $r_n = 15 \mu\text{m}$ : 20s, b)  $r_n = 20 \mu\text{m}$ : 25s, c)  $r_n = 25 \mu\text{m}$ : 32s. Tlak vodního paprsku byl 250 MPa.



Graf 3.3 Hodnoty rádiusu řezného břitu po tryskání vodním paprskem

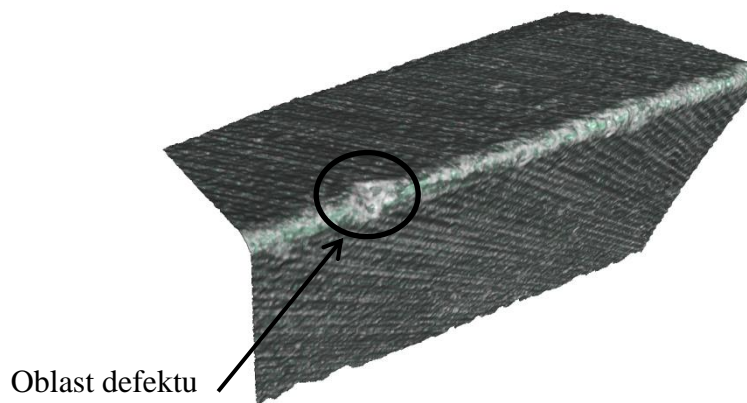
Jednotlivé naměřené mikrogeometrie řezných nástrojů udává následující tabulka. Jedná se o mikrogeometrii řezných břitů, které byly modifikovány pomocí vlečného omílání v médiu HSC 1/300. V levé části tabulky jsou naměřené řezné klíny s danou hodnotou rádiusu řezného břitu ( $r_n$ ). Mikroskop IFM G4 proměří řezný břit na vzdálenosti 2 mm od špičky. Poté ve střední oblasti řezného klínu vytvoří celkem 50 řezů, ve kterých změří dané parametry mikrogeometrie, mezi které patří již zmíněný rádius řezného břitu. Poté z těchto 50 hodnot vypočte aritmetický průměr. Kromě 2D mikrogeometrie řezného nástroje je v tabulce demonstrována tzv. diferenční analýza. Diferenční analýza je nástroj pro porovnání dvou stavů skenovaných objektů. Pro případ diplomové práce je tato analýza výhodná v tom, že díky ní lze porovnávat řezné nástroje před a po modifikaci. Jedná se o rychlý způsob analýzy, pomocí kterého lze zjistit výsledné odchylky, či defekty řezných nástrojů. V tomto případě byly porovnávány řezné břity s danou modifikací mikrogeometrie vůči referenčnímu nástroji, který byl bez modifikace, resp. po broušení.

<p><math>r_n = 15 \mu\text{m}</math></p> 	<p>Dif. analýza: broušený břit x <math>r_n = 15 \mu\text{m}</math></p> 
<p><math>r_n = 20 \mu\text{m}</math></p>	<p>Dif. analýza: broušený břit x <math>r_n = 20 \mu\text{m}</math></p>



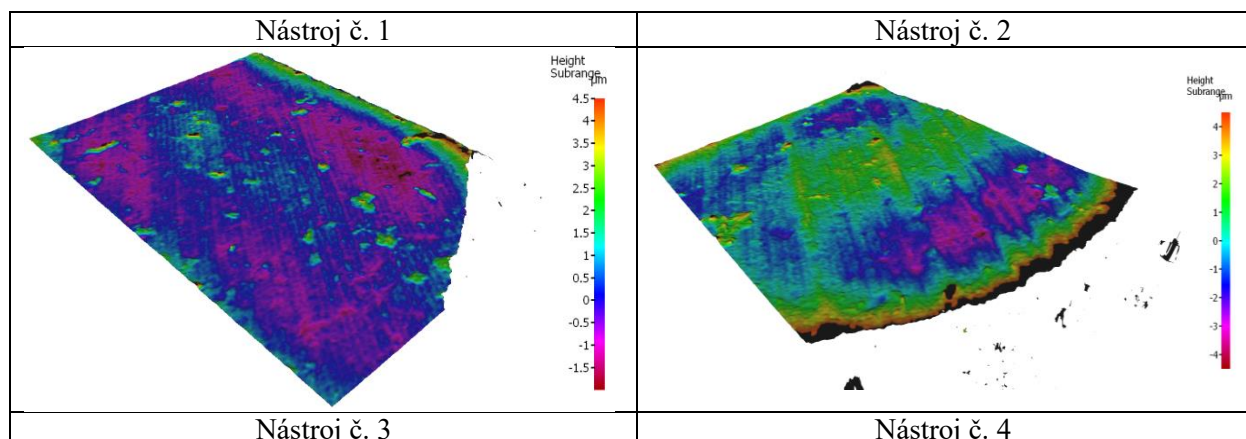
Tab. 3.3 Modifikace mikrogeometrie na definované  $r_n$  řezného břítu

U řezného nástroje č. 9, který byl modifikován v médiu QZ 1-3W na definovaný rádius řezného břítu  $15 \mu\text{m}$ , byl zjištěn defekt. Při analýze stavu břítu, kdy se měřila mikrogeometrie řezného břítu, se zjistilo, že na zaoblení došlo k drobnému vydrolení, viz obr. 3.4. Tato skutečnost se vzala v potaz a rozhodlo se tento nástroj zařadit do experimentu. Bude se sledovat, zda tento defekt nijak neovlivní výsledné sledované parametry. Defekt na řezném břítu by mohl mít za následek zvýšení řezných sil, ale hlavně rozvoj vibrací. Ty by pak zhoršovaly řezný proces a řezný nástroj by byl více namáhán právě vlivem vibrací.

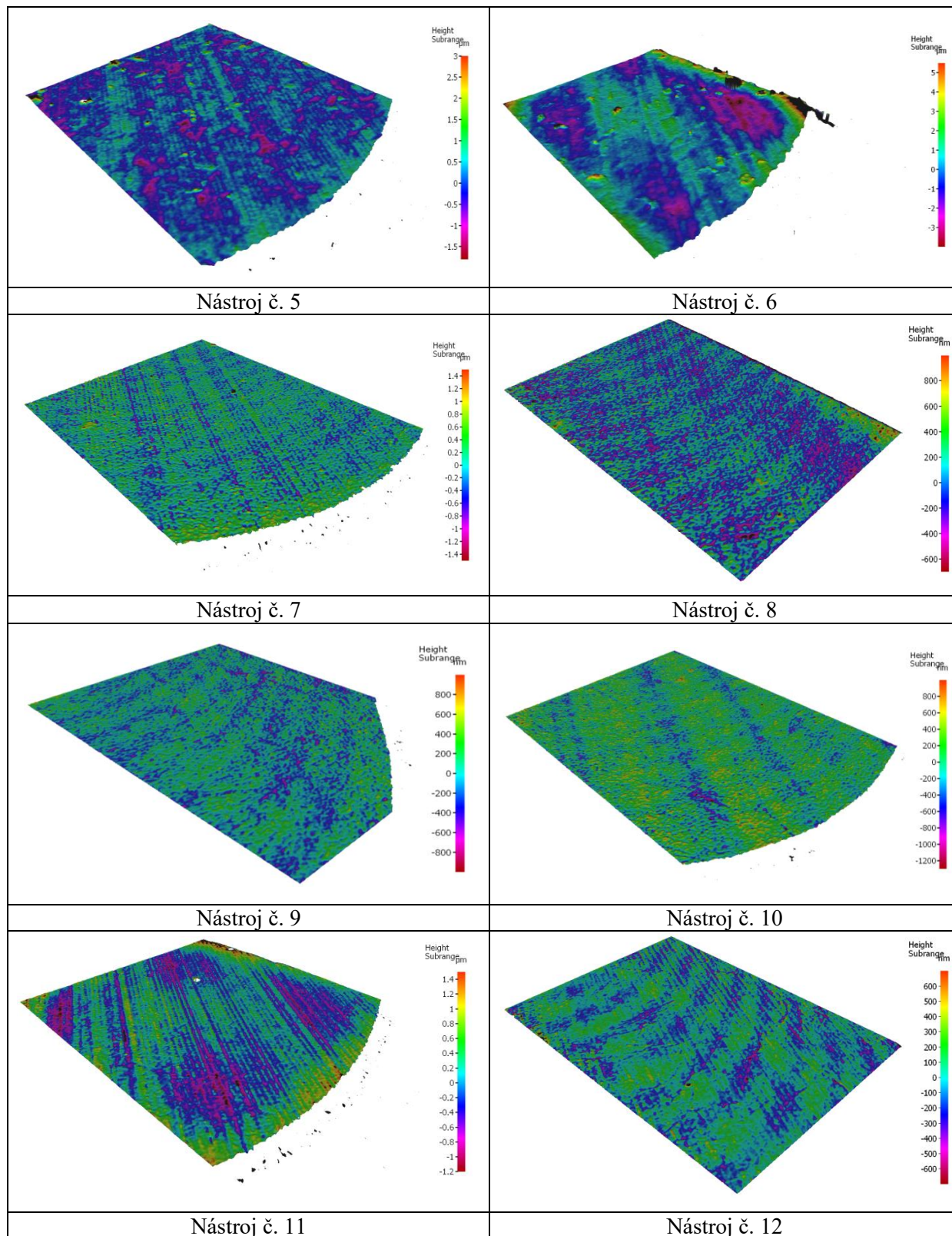


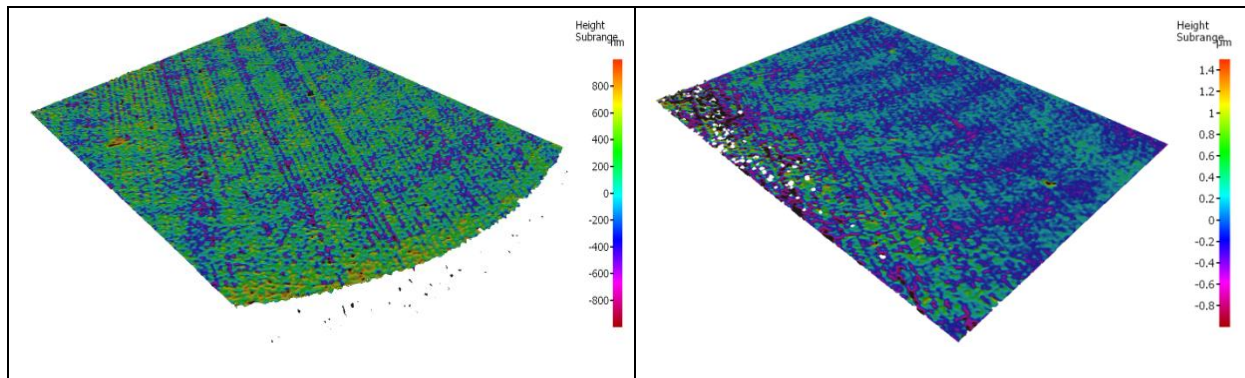
Obr. 3.4 Defekt na řezném nástroji č. 9

Dalším krokem byla analýza stavu povrchu čelních a hřbetních ploch nástrojů. Pro tuto analýzu bylo nutné naměřit tyto funkční plochy řezných nástrojů pomocí objektivu s větším zvětšením. Pro tyto účely byl zvolen objektiv se zvětšením 50x. Díky tomu poté lze i na těchto plochách vyhodnocovat drsnost (lineární, nebo plošnou), která bude v této práci taktéž vyhodnocená. V první řadě byly vyhodnoceny čelní plochy řezných nástrojů. V následující tabulce je za pomoci barevného spektra zobrazena oblast na čelní ploše, která je vzdálena 2 mm od špičky nástrojů. Pro zajištění shody měření byly všechny vzorky měřeny v této vzdálenosti se stejnou velikostí měřené oblasti. Měřená oblast má velikost 0,5 x 0,5 mm. K měření byl vždy vybrán levý břit řezného nástroje. U nástrojů (č. 5; 6; 7; 8) které byly omílané v médiu HSC 1/300 bylo zjištěné, že se zvyšujícím se časem má toto médium pozitivní vliv na čelní plochy nástrojů. S přibývajícím časem dochází k zahlazování stop, které vytvořil brusný kotouč během broušení. Zvyšování kvality povrchu nástrojů je pak důležitým faktorem pro budoucí deponování tenké vrstvy. Díky tomu se zvyšují adhezni vlastnosti systému substrát – tenká vrstva. Co se týče média QZ 1 – 3W tak výhoda jsou nižší časy omílání. Avšak z pohledu kvality čelní plochy nedochází k tak výraznému zahlazování stop po broušení. Zcela odlišná topologie povrchu je pak u nástrojů, které byly modifikovány pomocí vodního paprsku. V porovnání s omílanými nástroji, čelní plochy vzorků č. 1; 2; 3 a 4 vykazují větší rozptyl hodnot.



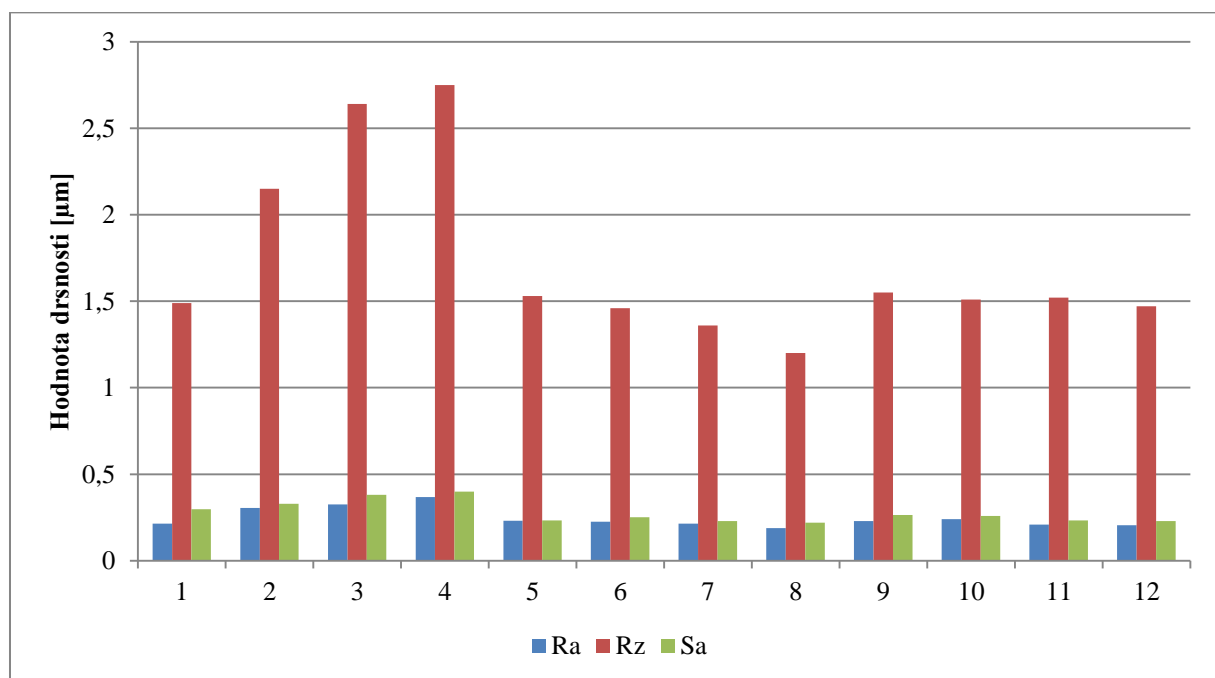






Tab. 3.4 Oblasti na čelní ploše nástrojů po modifikaci mikrogeometrie

V druhém kroku se pozornost zaměřila na hřbetní plochy. Jako v předchozím případě se použil objektiv 50x, aby bylo zajištěno potřebné zvětšení a rozlišení hřbetních ploch. Kromě barevného spektra, kdy se i na této ploše potvrdila teorie, že delší čas omílání v médiu HSC 1/300 efektivně zahlazuje stopy po broušení, se vyhodnocovala drsnost hřbetních ploch. Následující graf zobrazuje dané hodnoty lineární drsnosti, kdy se měřily parametry  $R_a$  a  $R_z$  a plošné drsnosti, kde se vyhodnocoval parametr  $S_a$ . U vzorků 1 – 4 byla zjištěna závislost, že delší čas tryskání má negativní vliv na drsnost povrchu hřbetu. Především parametr  $R_z$  se v porovnání mezi nástrojem č. 1 a č. 4 výrazně zvýšil. Naopak delší čas omílání způsobuje snížení drsnosti, viz následující graf. Díky médiu HSC 1/300, kde dochází k efektivnímu zahlazování stop po brusném kotouči, se kvalita povrchu hřbetních ploch zvýšila. Médium QZ 1-3W nemá takové účinky, avšak jak bylo už napsáno, výhoda tohoto média spočívá v razantně nižší době omílání v porovnání s médiem HSC1/300. Metodika měření spočívá v 10ti náměrech a uvedené hodnoty v grafu jsou pak aritmetickým průměrem.



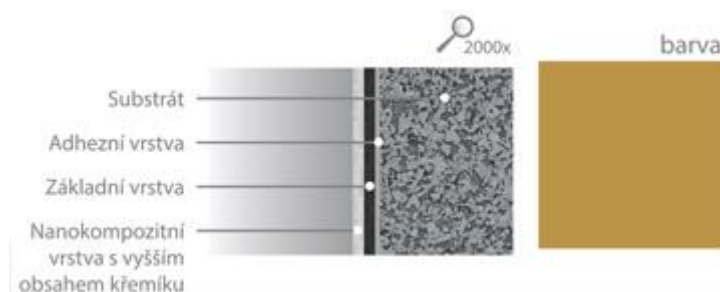
Graf 3.4 Drsnost hřbetních ploch nástrojů po modifikaci mikrogeometrie

### 3.1.3 Depozice tenké vrstvy [23], [24]

Technologie deponování tenké vrstvy byla dalším významným krokem v přípravě nástrojů před hlavním experimentem. Co je vůbec tenká vrstva? Tenká vrstva je materiál o tloušťce maximálně desítek mikrometrů. Ve strojírenském průmyslu se už používají dlouhou dobu. Jejich hlavní využití spočívá v povrchových úpravách. Jejich účelem je chránit výrobky a zvyšovat jejich užité vlastnosti (životnost, korozní a chemickou odolnost apod.).

V současné době se u drtivé většina řezných nástrojů deponuje tenkou vrstvou. Tímto krokem se zvýší trvanlivost, řezivost, odolnost řezného nástroje proti opotřebení, apod. Tato operace se při výrobě nástrojů využívá poměrně dlouho, takže vývoj a výzkum tenkých vrstev je na vysoké úrovni. Dnešní nástroje mohou využívat tenké vrstvy IV. generace nebo gradientní vrstvy. Takovéto vrstvy se skládají z různých chemických prvků, které dodávají soustavě substrát – vrstva potřebné výhody během obrábění. Pro deponování se využívá celkem tři způsobů. Prvním je PVD (Physical Vapor Deposition), což je fyzikální deponování vrstvy. Během PVD je maximální teplota deponování 500 °C. Princip spočívá v rozprašování materiálu ve výboji během nízkých tlaků nebo ve vypařování ve vakuu. Mezi základní způsoby patří reaktivní napařování, reaktivní napařování a reaktivní iontové plátování. Tento způsob se hodí především pro hliníkové slitiny, plasty a nástrojové oceli např. protahovací trny, odvalovací frézy). Druhým způsobem je PACVD (Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition). Jedná se o chemické deponování vrstvy za pomoci plazmy. Princip spočívá ve zvýšení energie plynné atmosféry v komoře během její ionizace a aktivace v plazmatickém výboji. Maximální teplota během PACVD dosahuje 700 °C. Posledním způsobem je CVD (Chemical Vapor Deposition), což je chemické deponování vrstvy. Jedná se o nejrozšířenější způsob deponování, při kterém je pracovní teplota 950 °C. CVD depozice přináší výhody v podobě vysoké teplotní stability vrstev, vysoká adheze, rovnoměrná tloušťka tenké vrstvy a odolnost proti opotřebení. Nevýhodou jsou však dlouhé pracovní cykly (až 10 hodin), energetická náročnost a nepříznivá zbytková pnutí tahového charakteru.

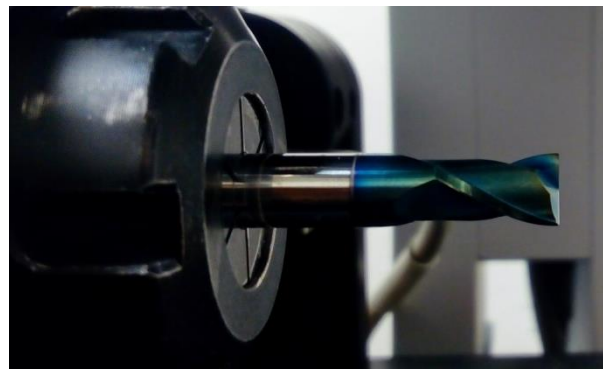
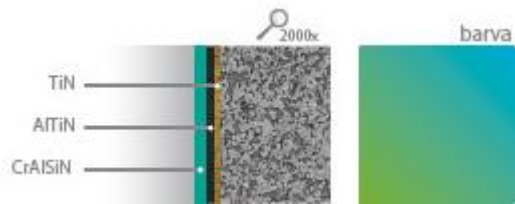
Adheze mezi vrstvou a substrátem hraje velmi důležitou roli, protože ovlivňuje soudržnost soustavy tenká vrstva – substrát. To je jeden z důvodů proč se řezné nástroje, resp. jeho řezná část, modifikuje před vlastní depozicí.



Obr. 3.5 Příklad gradientní vrstvy na bázi Si od firmy SHM [19]

Jelikož firmy, zabývající se depozicí nabízí mnoho druhů a typů tenkých vrstev, tak je nutné zvolit správnou tenkou vrstvu tak, aby během řezného procesu došlo k využití všech

jejich výhod. Proto je nutné znát materiál rezného nástroje (substrátu), obráběný materiál, geometrii nástroje, řezné podmínky. V této diplomové práci bude obráběným materiálem Inconel 718. Jedná se o těžko – obrobitelný materiál, takže je nutné zvolit takovou tenkou vrstvu, která se hodí právě na obrábění takových to materiálů. Pro experiment byla zvolena tenká vrstva „TripleCoating Cr“ od firmy SHM. Jedná se o tenkou vrstvu nanesenou PVD technologií.



Obr. 3.6 a) Tenká vrstva TricpleCoating Cr [20], b) Řezný nástroj po depozici

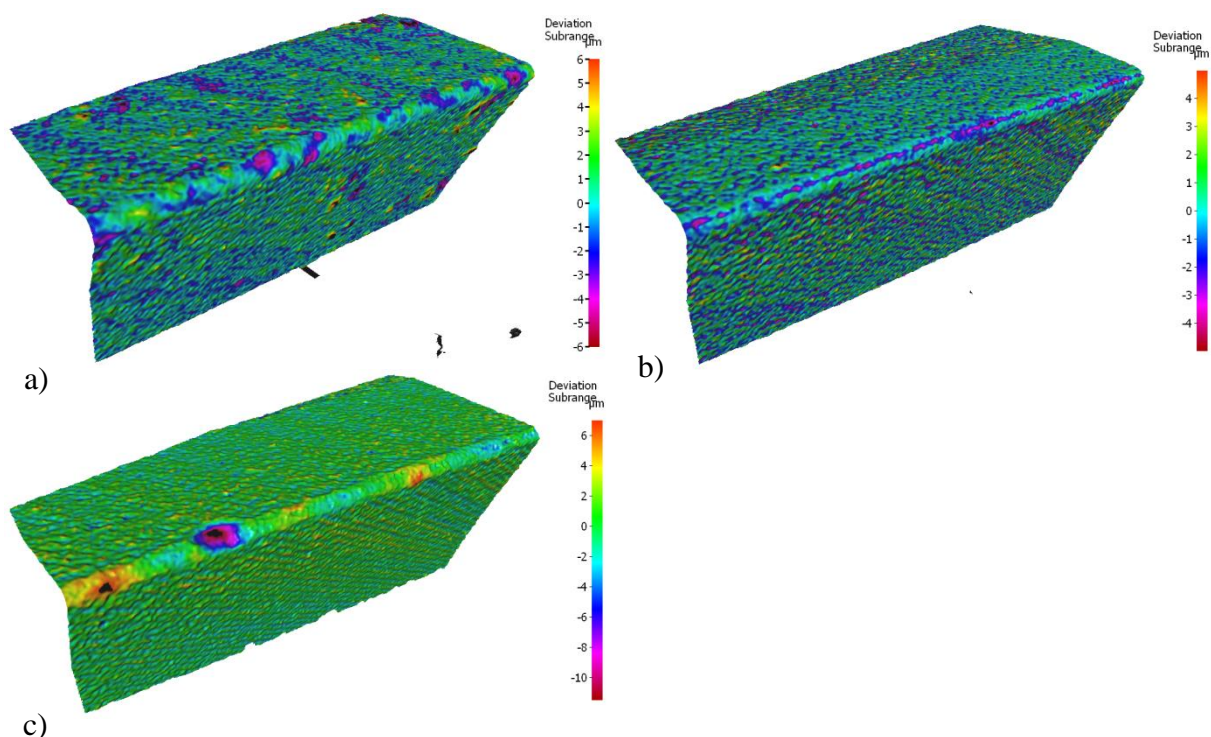
Takto deponované rezné nástroje se ještě, před experimentem, změřily na mikroskopu IFM G4. Mezi hlavní důvody tohoto mezikroku bylo zkoumání vlivu depozičního procesu na mikrogeometrii rezných nástrojů. Hlavním zkoumaným parametrem byl rádius rezného břítu nástroje. Naměřené hodnoty se poté porovnávaly s hodnotami rádiusu rezných břitů před depozicí. Následující tabulka udává hodnoty, které byly naměřené. Zároveň jsou zde, pro porovnání, uvedené hodnoty před depozicí. Jak je vidět, po depozici došlo k logickému zvětšení poloměru zaoblení rezného břítu. Hodnota poloměru se zvětšila  $\pm$  o 2  $\mu\text{m}$ . Největší rozdíl byl naměřen u vzorku č. 4, kde se poloměr lišil o 3,6  $\mu\text{m}$ . Naopak nejmenší rozdíl byl u vzorku č. 3, kde byla výsledná rozdílná hodnota pouhý 1  $\mu\text{m}$ .

Č. vzorku	Modifikace	Rádius $\check{R}B$ před depozicí	Rádius $\check{R}B$ po depozici
1	Vodní paprsek	15,0	17,2
2	Vodní paprsek	20,8	22,4
3	Vodní paprsek	23,7	26,7
4	Vodní paprsek	24,5	28,1
5	Omílání HSC	14,6	17,6
6	Omílání HSC	14,5	17,4
7	Omílání HSC	20,5	22,4
8	Omílání HSC	24,9	26,9
9	Omílání QZ	15,9	17,9
10	Omílání QZ	15,4	17,7
11	Omílání QZ	21,3	23,4
12	Omílání QZ	24,9	25,9

Tab. 3.5 Porovnání  $r_n$  rezného břítu před a po depozici

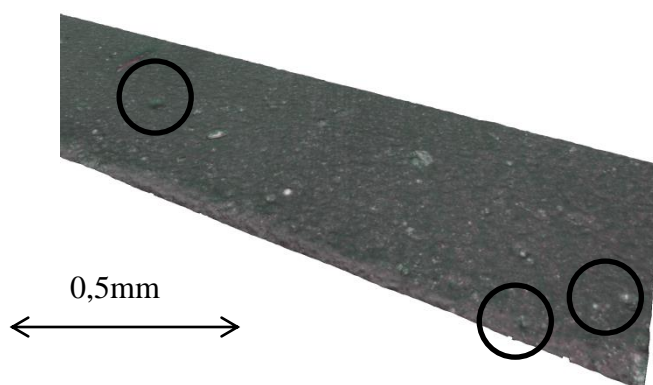
Jelikož se k úpravě modifikace použily dvě zcela odlišné metody modifikace mikrogeometrie rezného břítu nástroje, bylo nutné provést analýzu stavu rezných břitů po depozici tenké vrstvy. Jednalo se především o zaměření na stav kvality depozice a případné

odhalení defektů tenké vrstvy. Diferenční analýza mezi řezným břitkem před a po depozici byla použita jako nástroj pro odhalení vad a celkové kvality depozice. Obr. 3.7 demonstruje nástroje č. 1; č. 5 a č. 9. Řezný břit po modifikaci mikrogeometrie je referenčním vzorkem. K němu je poté srovnán řezný břit po depozici. V tomto případě je kritickým místem samotné zaoblení, resp. místo kde dochází ke spojení čelní a hřbetní plochy. Nástroj č. 1 vykazuje na zaoblení nepravidelné rozdíly, které dosahují až  $-5/+3 \mu\text{m}$ . Naopak řezný nástroj č. 5 vyšel z této analýzy nejlépe. Rozdíl na zaoblení je  $0/-3 \mu\text{m}$ . Je dobré říci, že oba řezné klíny nevykazují žádné defekty typu odštipnutý břit resp. odštipnutá tenká vrstva, vydrolení apod. Řezný nástroj č. 9, který už měl na řezném břitu defekt po vlečném omílání, si s sebou přenesl tento defekt i po depozici. Rozsah maximálního defektu dosahuje až  $-10 \mu\text{m}$ . S touto skutečností se pak bude počítat v experimentu, tudíž řezný nástroj bude použit i do experimentu. Co se týče hřbetních a čelních ploch, tak uvedené řezné břity nevykazují takové rozdíly jako v případě rádiusu řezného břitu. Tudíž lze tvrdit, že nejvíce kritickým místem je při deponování tenké vrstvy na nástroj právě rádius řezného břitu. Je dobré si i povšimnout, že i po modifikaci mikrogeometrie a následné depozice, jsou na čelních a hřbetních plochách vidět stopy po brusném kotouči.



Obr. 3.7 Diferenční analýza deponovaného řezného břitu nástroje a) č. 1, b) č. 5, c) č. 9

Zároveň se na vytvořených 3D snímcích hodnotila kvalita povrchu. V první řadě se vizuálně kontrolovalo, jestli některé řezné břity neobsahují defekty, vyštípnutí, vylomení, vydrolení, plastická deformace apod. V dalším kroku došlo, pomocí objektivu 50x, ke skenování hřbetní plochy (fazety) a čelní plochy (drážka, šroubovice). Celkem na 6 deponovaných řezných nástrojích se po depozici objevily tzv. droplety na hřbetní ploše.



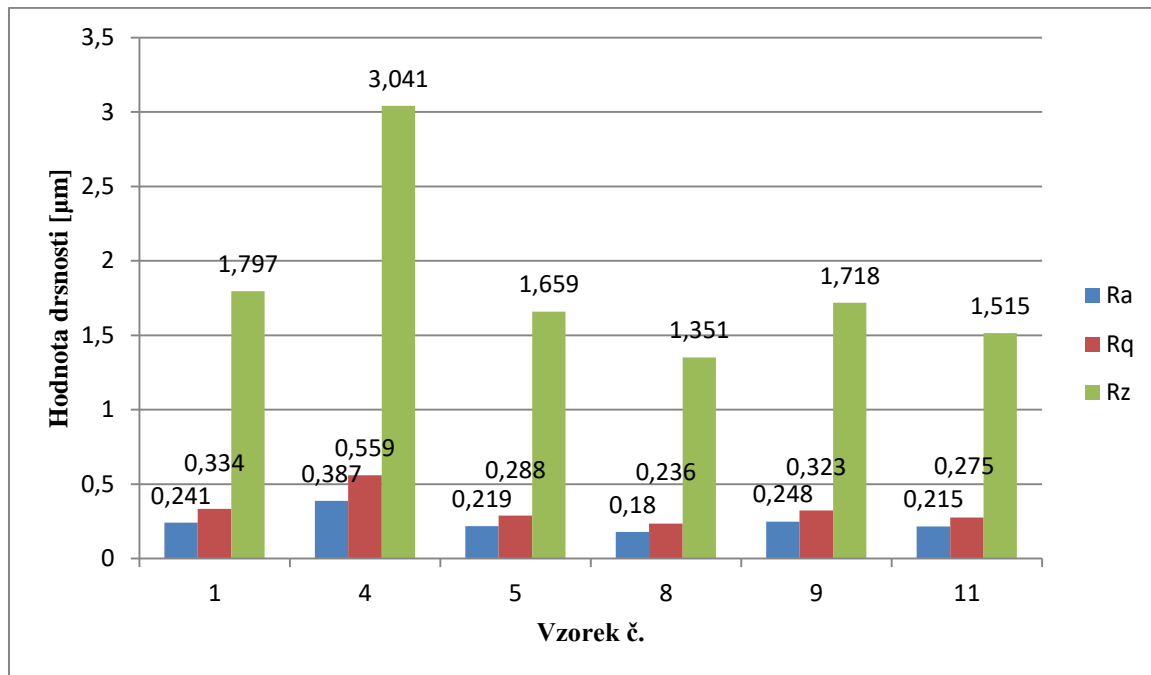
Obr. 3.8 Deponovaná hřbetní plocha řezného nástroje č. 12 – droplety

Díky softwarovým nástrojům mikroskopu IFM G4 lze hodnotit i další parametry, jako je lineární nebo plošná drsnost, kontura, profil povrchu apod. V této diplomové práci byla pozornost věnována lineární drsnosti. Plochou, na které se hodnotila drsnost, byla hřbetní plocha řezného nástroje. Následující tabulka popisuje metodiku měření. Každé měření spočívalo v 10 náměrech. Poté se z těchto hodnot udělal aritmetický průměr. V Tab. 3.6 je uvedený příklad měření pro řezný nástroj č. 1, který byl modifikován vodním paprskem na definovanou hodnotu rádiusu řezného břitu  $r_n = 15 \mu\text{m}$ . Levý břit řezného nástroje byl vždy zvolen pro měření drsnosti povrchu.

Náměr č. (x)	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rq [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]
1	0,231	0,309	1,851
2	0,247	0,373	1,863
3	0,264	0,354	1,724
4	0,206	0,295	1,742
5	0,226	0,306	1,597
6	0,234	0,318	1,753
7	0,252	0,371	1,922
8	0,274	0,381	2,055
9	0,229	0,302	1,687
10	0,243	0,332	1,777
$\bar{x}$	0,241	0,334	1,797

Tab. 3.6 Naměřené parametry drsnosti

Tímto způsobem byly naměřené dané hodnoty drsnosti i pro další řezné nástroje, které jsou uvedené v následující tabulce. Z naměřených hodnot je vidět, že nejnižší hodnoty drsnosti se zaznamenali u vzorku č. 8. Naopak nejvyšší drsnost, resp. parametry drsnosti vykazoval hřbet vzorku č. 4. Důvodem, proč se vyhodnocovala drsnost hřbetní plochy je to, že kromě řezných podmínek, materiálu nástroje a obrobku, má právě hřbetní plocha vliv na finální drsnost obrobekové plochy. Pro toto vyhodnocení bylo zvoleno celkem 6 nástrojů, vždy po dvou nástrojích pro každý použitý druh modifikace mikrogeometrie řezného nástroje.

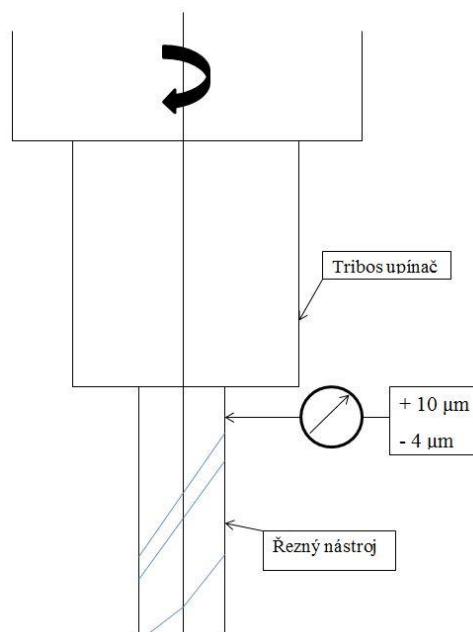
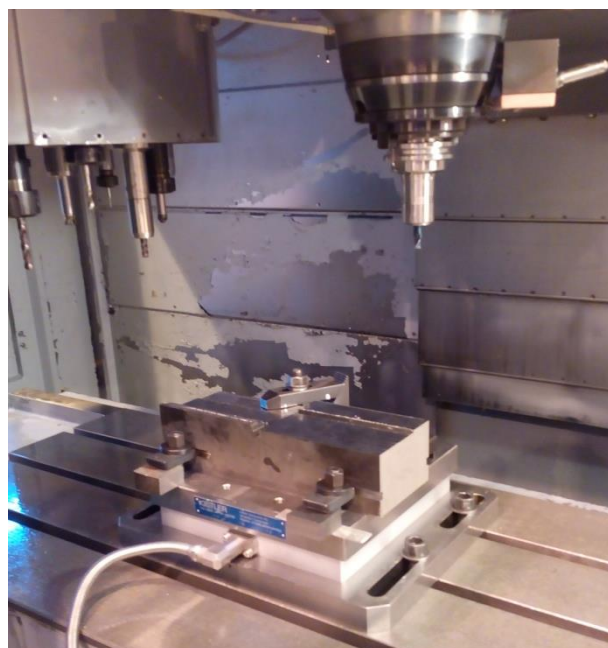


Graf 3.5 Parametry lineární drsnosti hřbetních ploch řezných nástrojů po depozici

### 3.2 Hlavní experiment

Po zhotovení předchozích kroků, kdy byla upravena mikrogeometrie řezných nástrojů, byla na řadě hlavní fáze experimentu. V této fázi došlo k experimentálnímu testování řezných nástrojů při obrábění zvoleného materiálu. Hlavním cílem experimentu bylo ověření vlivu modifikace mikrogeometrie řezných nástrojů na trvanlivost.

Jak již bylo napsáno, obráběným materiálem bylo zvoleno slitina Inconel 718. Obrobek byl pomocí upínek upnutý k obrobkovému dynamometru Kistler 9255A. Tento dynamometr byl přes šrouby a upínky upnutý ke stolu obráběcího stroje. Důležité bylo zajistit správnou polohu dynamometru tak, aby osy dynamometru byly sjednocené s osami stroje. Díky správnému na polohování síla  $F_x$  bude působit ve směru osy  $x$  obráběcího stroje, apod. Jelikož se od soustavy S-N-O-P požaduje minimum vibrací, vysoká tuhost apod., tak řezné nástroje, které byly testovány v průběhu obrábění, byly upnuté do polygonálních upínačů Tribos. Při každém upínání řezného nástroje do upínače se postupovalo tak, aby vyložení řezného nástroje bylo co nejmenší. Délka vyložení se vždy skládala z délky řezné části (18 mm) + válcové upínací části (cca 2 mm). Pomocí číselníkového úchylkoměru bylo před experimentem změřeno obvodové házení stopky nástroje. Házení na válcové stopce řezného nástroje je pak zobrazeno na Obr. 3. 9 b). Velikost házení se pohybovala od  $-4$  do  $+10$   $\mu\text{m}$ . Celková délka řezného nástroje byla 55mm. Během experimentu se vždy měřilo opotřebení po určitém počtu lineárních přejezdů. Poté vždy došlo k měření opotřebení a při hodnotách  $VB_B = 0; 100; 150$   $\mu\text{m}$  došlo k měření řezných sil.



Obr. 3.9 a) Soustava S – N – O – P, b) obvodové házení nástroje

### 3.2.1 Volba řezných podmínek

Při volbě řezných podmínek se vycházelo z předchozích testů, při kterých byla obráběna těžkoobrobitelná slitina Inconel 718 pomocí dvoubřitých, monolitních fréz ze slinutého karbidu. Zvolené řezné podmínky, které byly použité, jsou uvedené v následující tabulce (Tab. 3.7). Během experimentu byla použita technologická kapalina. V tomto experimentu se vždy obrábělo sousledným způsobem frézování. Řezné podmínky, strategie obrábění a řezné prostředí byly vždy, pro všechny testované řezné nástroje, konstantní.

Řezná rychlost	Posuv na zub	Posuvová rychlost	Axiální hloubka řezu	Radiální hloubka řezu
$v_c$ [m/min]	$f_z$ [mm]	$v_f$ [mm/min]	$a_p$ [mm]	$a_e$ [mm]
35	0,04	111	3	0,5

Tab. 3.7 Řezné podmínky experimentu

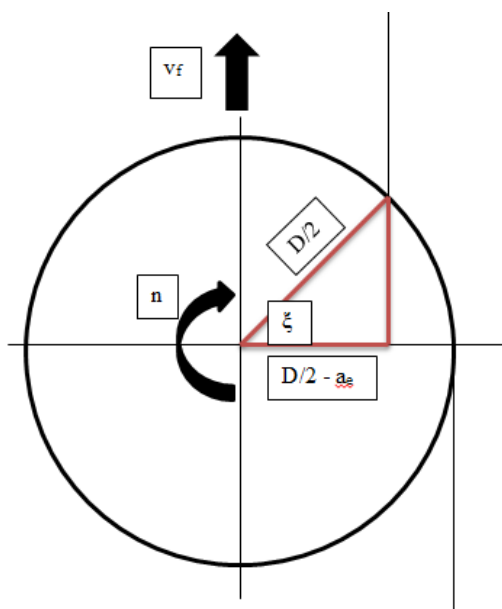
Obráběný materiál v kombinaci s uvedenými řeznými podmínkami a řezným prostředím měl pak výslední vliv na velikost a tvar vznikajících třísek. Na následujícím obrázku jsou vzniklé třísky po obrábění. Jedná se o jehlovité třísky, tedy skupinu 8 pro rozdělení třísek.





Obr. 3.10 Finální třísky při daných řezných podmínkách

Zvolená radiální hloubka řezu a průměr nástroje určují záběrové podmínky resp. úhel, ve kterém řezný břit jde do záběru. Jedná se o úhel opásání. Následující schéma popisuje záběrové podmínky, jež nastaly při tomto experimentu. Pomocí výpočtu došlo ke zjištění, že úhel opásání  $\xi = 28,955^\circ$ .



$$\cos \xi = \frac{\frac{D}{2} - a_e}{\frac{D}{2}} = \frac{4 - 0,5}{4} = 0,875 \rightarrow \quad (3)$$

$$\rightarrow \xi = 28,955^\circ$$

Obr. 3.11 Záběrové podmínky řezného nástroje a výpočet úhlu opásání

Během experimentu v této diplomové práci budou proměnnými vstupními parametry právě rádiusy řezných břitů. Tudiž lze očekávat, že právě tento parametr bude hrát největší roli v ohledu trvanlivosti řezného nástroje a velikosti řezných sil. V určitých případech, kdy se zvolí nevhodná velikost a tvar zaoblení (např. symetrie zaoblení řezného břitu), může dojít k rychlé degradaci řezného nástroje při daných řezných podmínkách. Je nutné znát minimální

tloušťku třísky, protože právě tato hodnota ovlivňuje efektivitu procesu obrábění a tím i výslednou trvanlivost řezného nástroje. Výpočet je provedený dle následujícího vzorce a výsledná minimální tloušťka je udána v následující tabulce.

$$a_{min} = r_n \cdot \left( 1 - \frac{f_z + 1}{\sqrt{2 \cdot (f_z^2 + 1)}} \right) [mm], \quad (4)$$

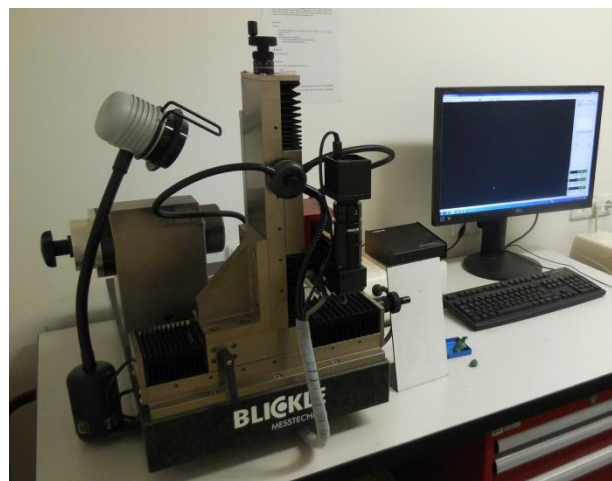
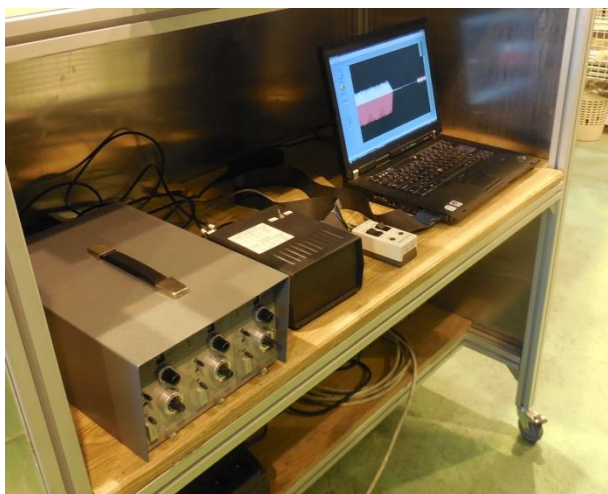
- kde:  $r_n$  – rádius řezného břitu [mm],  $f_z$  – posuv na zub [mm]

$r_n$ [μm]	$f_z$ [mm]	$a_{min}$ [mm]
15	0,04	$3,977 \cdot 10^{-3}$
20	0,04	$5,303 \cdot 10^{-3}$
25	0,04	$6,629 \cdot 10^{-3}$

Tab. 3.8 Min. tloušťka odebírané vrstvy v závislosti na poloměru  $r_n$

### 3.2.2 Použité stroje a strojní vybavení

Ke statickému dynamometru Kistler 9255A (Obr. 3.12 a)), který pracuje na principu piezoelektrického jevu, byla nutná aparatura pro měření řezných sil. Měřicí aparatura se skládá ze zesilovače analogového signálu, PC měřicí karty, řadiče a notebooku. Jednotlivé zařízení bylo propojeno pomocí spojovacích kabelů. Pro úplnost, dynamometr Kistler 9255A je tříoskový, tedy je schopný zaznamenávat řezné síly v ose X, Y a Z. Pro rychlé měření opotřebenosti hřbetní plochy řezných nástrojů byl použit optický mikroskop Multicheck PC 500. Pro zajištění věrohodnosti měření bylo nutné zvolit takové zvětšení, kterým půjde přesně změřit dané opotřebenění. Z předchozích zkušeností bylo zvoleno zvětšení 120x.



Obr. 3.12 a) Silové měřicí zařízení, b) Optický mikroskop Multicheck PC 500

Posledním, avšak neméně důležitým zařízením, které bylo při experimentu použito, je multifunkční frézovací centrum MCV 70A. Jedná se o 3osý stroj s CNC řízením. Programovacím prostředím tohoto centra je pak Heidenhain iTNC 530.



Obr. 3.13 Pracovní prostor a ovládací panel frézovacího centra MCV 70A

## 4. Vyhodnocení praktické části

Předposledním bodem osnovy diplomové práce bylo vyhodnocení získaných dat. Vyhodnocení si dává za cíl popsat závislost mezi vstupními úpravami řezné mikrogeometrie nástrojů a získanými daty, mezi které patří trvanlivost, řezné síly a drsnost obrobeného povrchu. Metodika vyhodnocování bude spočívat v porovnávání jednotlivých výsledků v závislosti na stejné vstupní modifikaci mikrogeometrie řezného nástroje. Pro zachování věrohodnosti se vždy na začátku stanovil postup vyhodnocení a získání potřebných hodnot tak, aby se jednotlivé výsledné hodnoty daly mezi sebou porovnávat.

### 4.1 Rozbor trvanlivosti nástrojů v závislosti na opotřebení

V prvním bodě vyhodnocení získaných hodnot z experimentu se pozornost zaměřila na trvanlivost jednotlivých nástrojů. Díky době trvanlivosti řezného nástroje do limitní hodnoty opotřebení lze rychle zjistit výdrž daného řezného nástroje. Podle toho se pak určí jeho efektivita a zároveň produktivita obrábění. Pro jednotné hodnocení trvanlivosti bylo určeno, že limitní opotřebení se bude zjišťovat na hřbetní ploše a maximální hodnota opotřebení bude  $VB_B = 150 \mu\text{m}$ .

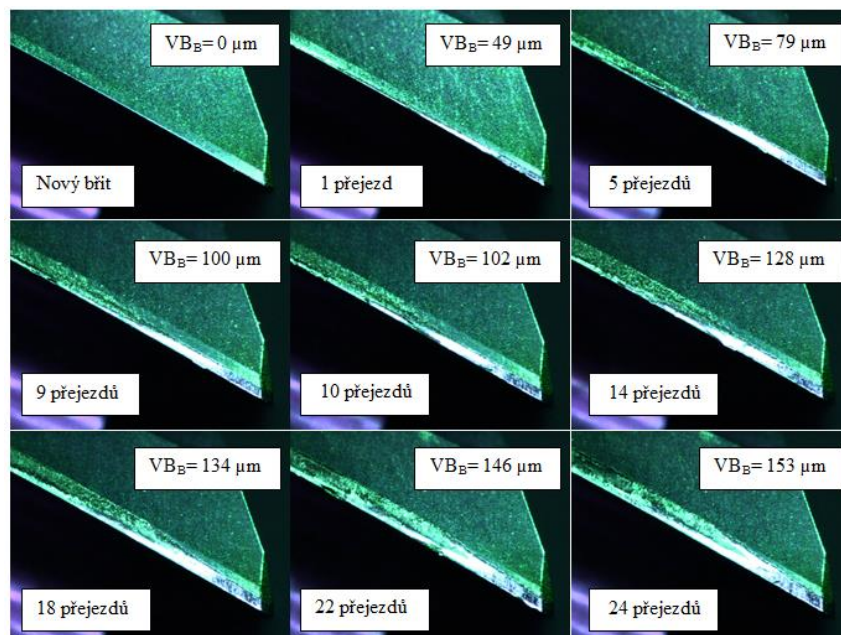
Č. nástroje	Modifikace	Def. rádius řezného břitu [ $\mu\text{m}$ ]	Doba 1 přejezdu [s]	Počet přejezdů	Trvanlivost [mm]
1	VP	15	78	23	29,9
2	VP	20		22	28,6
3	VP	25		20	26,0
4	VP	25		21	27,3
5	HSC	15		24	31,2
6	HSC	15		24	31,2

7	HSC	20		22	28,6
8	HSC	25		11	14,3
9	QZ	15		22	28,6
10	QZ	15		22	28,6
11	QZ	20		21	27,3
12	QZ	25		20	26,0

Tab. 4.1 Dosažená trvanlivost při opotřebení  $VB_B = 150 \mu\text{m}$

Pomocí mikroskopu Multicheck PC 500 se vyhodnocovalo opotřebení řezného nástroje. Následující obrázek ukazuje nárůst opotřebení v závislosti na počtu přejezdů. Na mikroskopu se použilo zvětšení obrazu 120x, tudíž takové zvětšení, při kterém se detailně měřilo aktuální opotřebení hřbetní plochy nástroje. Zvoleným opotřebováním bylo opotřebení, které je označováno dle ISO  $VB_B$  [ $\mu\text{m}$ ]. Jedná se o lineární opotřebení. Platí, že do tohoto opotřebení se nezahrnují skokové změny v podobě rýh, vrypů apod.

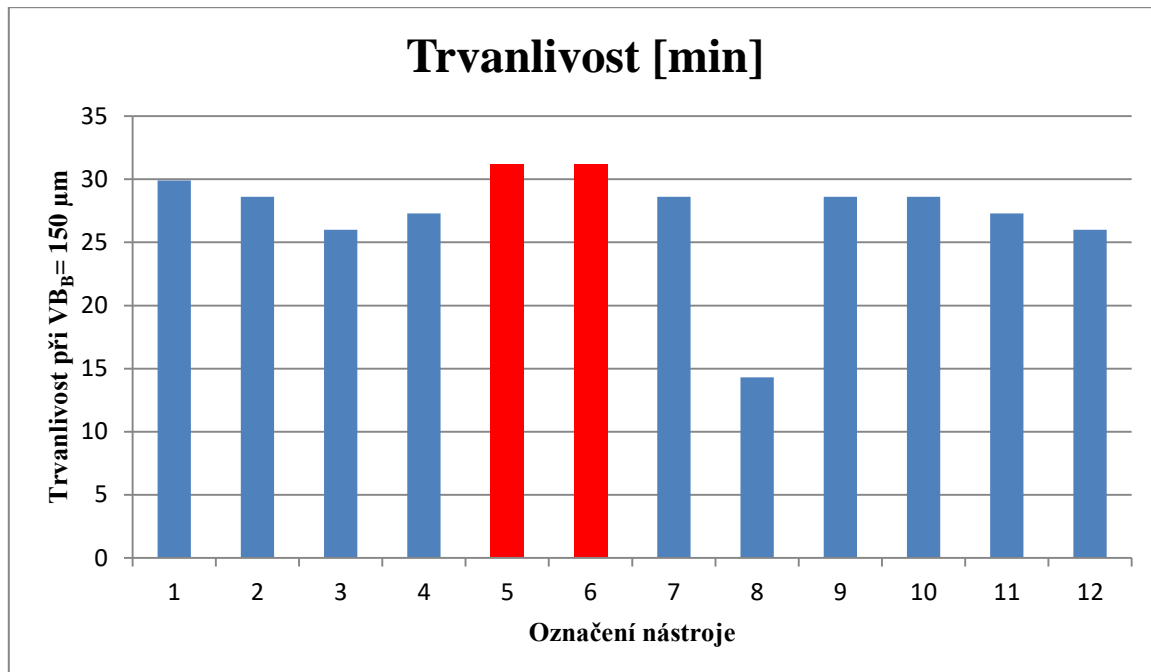
Po prvním přejezdu nového nástroje došlo k intenzivnímu nárůstu opotřebení (v rozsahu  $VB_B = 40 - 50 \mu\text{m}$ ). Poté se vždy měřilo opotřebení po 4 následujících přejezdech. Při nárůstu opotřebení k hodnotě  $VB_B \approx 100 \mu\text{m}$  došlo k měření řezných sil, viz kapitola 4.2. Poté se postupovalo stejně, tedy že aktuální opotřebení se měřilo po 4 přejezdech řezného nástroje na obráběné ploše obrobku. Tato metodika měření opotřebení byla pro všech 12 nástrojů totožná. Následující obr. 4.1 zobrazuje vývoj opotřebení na nástroji č. 5.



Obr. 4.1 Nárůst opotřebení v závislosti na počtu přejezdů na obrobku

Následující graf vyjadřuje trvanlivost jednotlivých nástrojů pro dané modifikace mikrogeometrie řezných nástrojů. Analýzou získaných hodnot se dospělo k několika závěrům. Zaprvé, nástroje č. 5 a 6, jejichž mikrogeometrie byla modifikována vlečným omíláním v médiu HSC 1/300 na hodnotu rádiusu řezného břitu  $15 \mu\text{m}$ , mají nejvyšší dobu trvanlivosti. Zadruhé se u jednotlivých technologií modifikací zjistila stejná závislost. Při zvyšujícím se

rádiusem řezného břitu klesá trvanlivost. Řezné podmínky, minimální tloušťka odebírané vrstvy a terciální plastické deformace mohou být jedny z hlavních důvodů této závislosti.

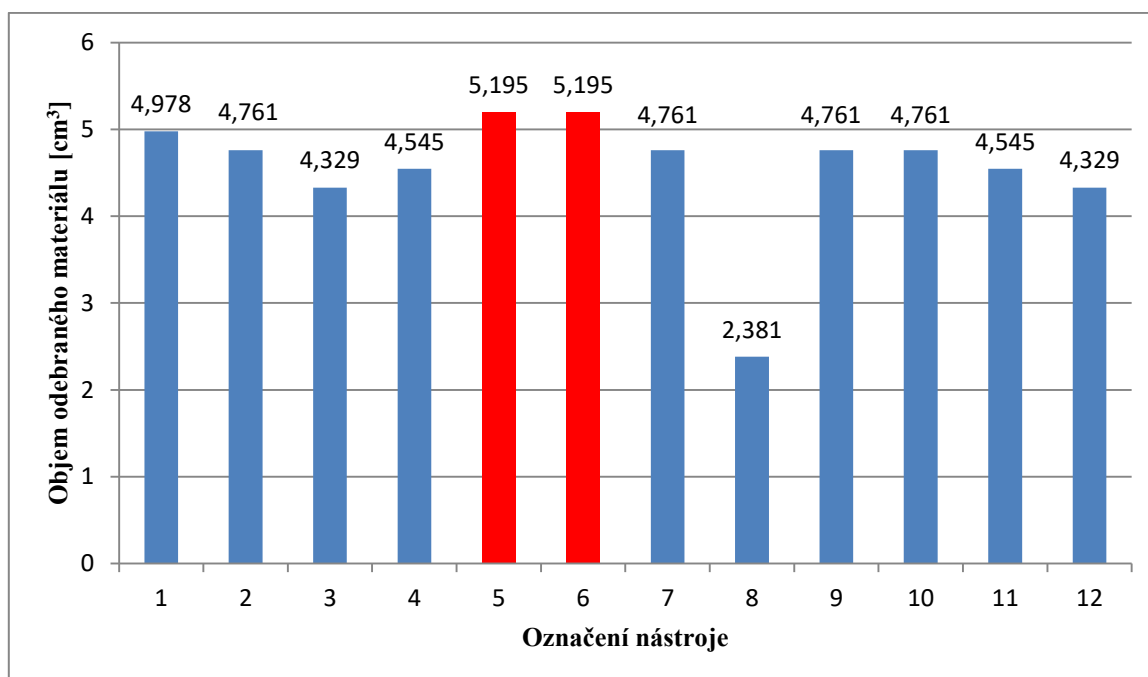


Graf 4.1 Grafické vyjádření trvanlivost řezných nástrojů po experimentu

Trvanlivost řezných nástrojů je přímo úměrná hodnotě množství odebraného materiálu. Množství odebraného materiálu má pak přímý dopad na efektivitu řezného nástroje, resp. jeho schopnost obrábět pokud možno co nejvyšší množství materiálu a tím se dosahuje dané efektivitě. Výpočet objemu odebraného materiálu se provede dle následujícího vzorce:

$$V_m = a_p \cdot a_e \cdot v_f \cdot T \cdot 10^{-3} [cm^3] \quad (5)$$

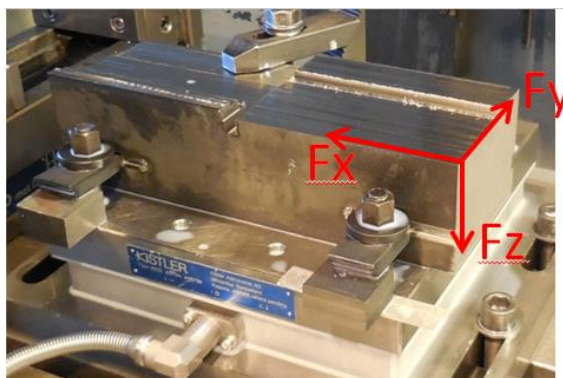
V případě této diplomové práce, kdy byly během experimentu konstantní řezné podmínky je patrné že  $V_m=f(T)$ . Tudíž, jak následující graf ukazuje, nástroje č. 5 a 6, jejichž trvanlivost byla nejvyšší, odebraly největší množství materiálu do limitního opotřebení  $VB_B=150 \mu m$ . Celkově se jednalo o objem  $5,195 cm^3$ . Nejmenší objem byl u nástroje č. 8, kde  $V_m=2,381 cm^3$ .



Graf 4.2 Objem odebraného materiálu v závislosti na trvanlivosti

## 4.2 Rozbor řezných sil v závislosti na opotřebení

Jelikož trvanlivost v sobě nezahrnuje další parametry, bylo nutné provést další pohled na rozbor získaných dat. Proto při experimentu byly měřeny řezné síly. Díky tomu byl získán další pohled a informace o experimentu této diplomové práce. Působení jednotlivých složek řezných sil v závislosti na orientaci obrobku upnutého na statický dynamometr je uvedeno na následujícím obrázku.



Obr. 4.2 Rozklad řezných sil

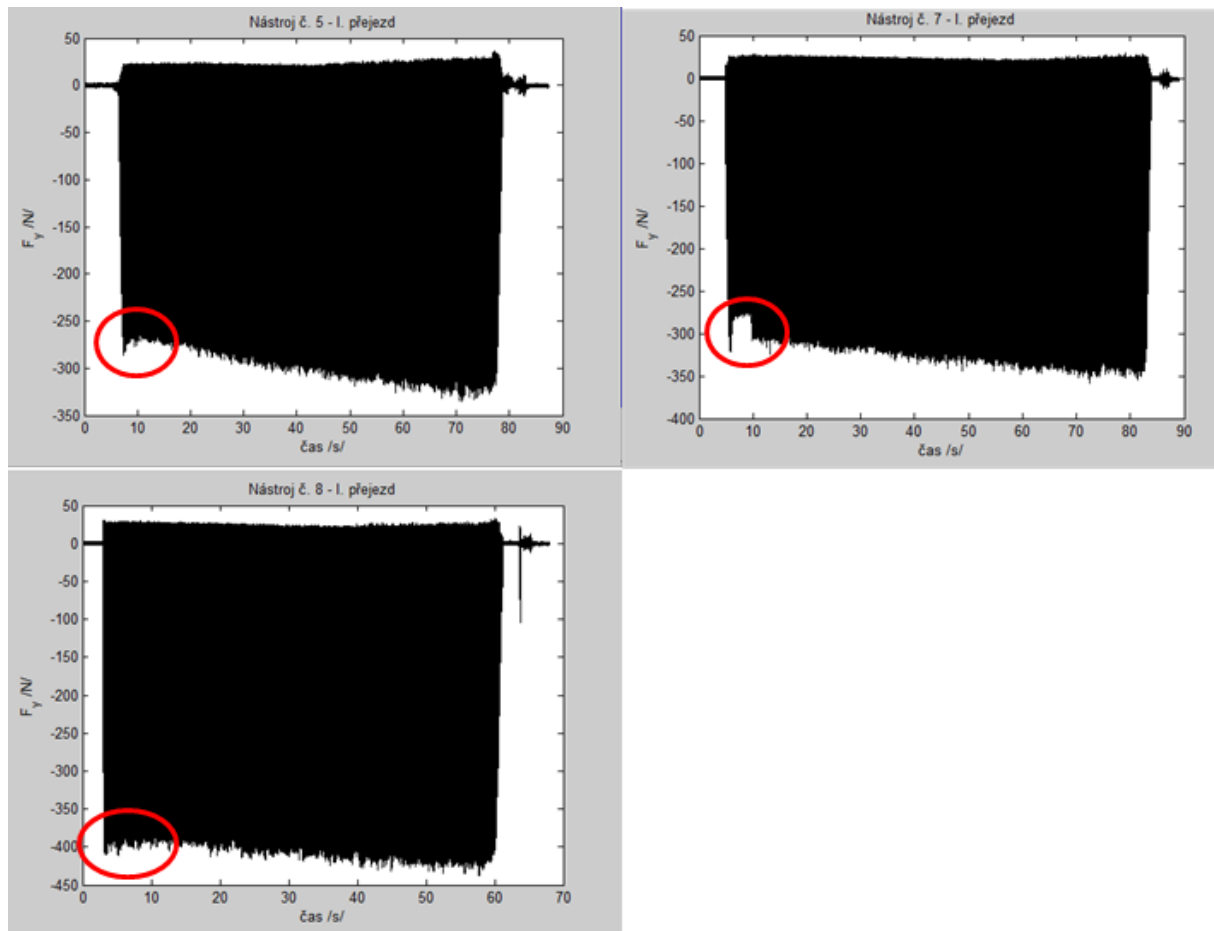
Metodika měření řezných sil spočívala v měření řezných sil v závislosti na opotřebení hřbetní plochy nástroje. Bylo určeno, že řezné síly se budou měřit při opotřebení  $VB_B = 0$ ; 100 a 150  $\mu\text{m}$ . Následující tabulka udává naměřené složky řezných sil. Jsou zde uvedené jednotlivé řezné síly v [N]. Z naměřených hodnot je vidět závislost, že se zvyšujícím se opotřebením dochází k nárůstu řezných sil. Tato skutečnost platí pro všechny  $r_n$ . Dalším

zjištěním je to, že se zvyšujícím rádiusem řezného břitu narůstá síla pro jednotlivé složky řezných sil. Při pohledu na velikosti řezných sil v závislosti na použité technologii modifikaci mikrogeometrie jsou odchylky ve velikosti řezných sil minimální. V tomto experimentu bylo silové namáhání s relativně malými odchylkami mezi jednotlivými modifikacemi mikrogeometrie.

$r_n = 15 \mu\text{m}$	č. 1 (VP)	č. 5 (HSC)	č. 6 (HSC)	č. 9 (QZ)	č. 10 (QZ)
$VB_B = 0$	214/346/77	211/335/43	266/356/47	218/335/56	222/345/88
$VB_B = 100$	292/494/67	310/505/83	317/498/58	293/465/54	292/505/89
$VB_B = 150$	361/643/62	358/603/123	361/684/77	374/647/90	371/658/90
$r_n = 20 \mu\text{m}$	č. 2 (VP)	č. 7 (HSC)	č. 11 (QZ)		
$VB_B = 0$	284/407/83	252/357/43	260/400/96		
$VB_B = 100$	339/558/77	315/510/97	332/488/58		
$VB_B = 150$	377/663/84	346/648/58	345/596/66		
$r_n = 25 \mu\text{m}$	č. 3 (VP)	č. 4 (VP)	č. 8 (HSC)	č. 12 (QZ)	
$VB_B = 0$	387/396/185	345/381/104	284/438/114	245/409/99	
$VB_B = 100$	497/523/114	432/515/132	349/627/130	278/478/62	
$VB_B = 150$	580/712/137	585/702/134	298/513/60	366/661/90	

Tab. 4.2 Naměřené řezné síly během experimentu

Velikost rádiusu řezného břitu nástroje je jeden z faktorů, které ovlivňují tzv. zaříznutí řezného nástroje, resp. břitu nástroje. Během zaříznutí řezného břitu dochází k výskytu vibrací, průběh složek řezných sil bývá kolísavý a toto zaříznutí celkově ovlivňuje kvalitu břitu nástroje. Po tomto zaříznutí se pak na nástroji vytvoří tzv. pracovní geometrie. Následující obrázek porovnává průběh řezných sil pro  $r_n$  řezného břitu 15; 20 a 25  $\mu\text{m}$ . Pro porovnání průběhu řezných sil byla vybrána složka řezné síly působící ve směru přísuvu nástroje, tedy ose Y. Červeně je označena právě oblast, kdy dochází k zaříznutí řezného břitu. Největší změna průběhu řezné síly byla zaznamenána u nástroje č. 7 s rádiusem řezného břitu 20  $\mu\text{m}$ . Dále pak, doba zaříznutí u nástroje s  $r_n = 15 \mu\text{m}$  je kratší než u nástroje s  $r_n = 25 \mu\text{m}$ .



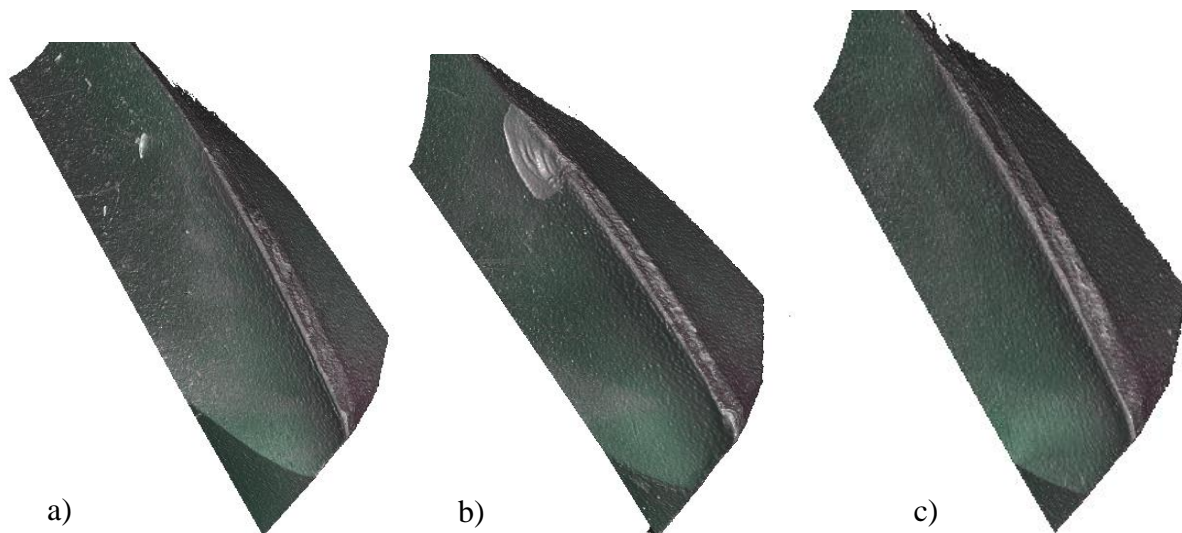
Obr. 4. 3 Doba zařiznutí nástroje při I. přejezdu v závislosti na poloměru: a)  $r_n = 15 \mu\text{m}$ , b)  $r_n = 20 \mu\text{m}$ , c)  $r_n = 25 \mu\text{m}$

### 4.3 Vliv druhu modifikace na rozsah opotřebení řezného nástroje

Vliv modifikace mikroteometrie, jakožto jediný proměnný faktor tohoto experimentu, měl zásadní vliv na opotřebení řezných nástrojů. V této kapitole se analyzují, pomocí diferenční analýzy, rozdíly mezi novým a opotřebovaným řezným nástrojem, resp. „řezným klínem“. V první řadě bylo stanovené, že vzorky, u kterých proběhne rozbor stavu mikroteometrie, budou řezné nástroje, jejichž rádius řezného bříty byl modifikován na teoretickou hodnotu  $15 \mu\text{m}$ .

Následující obr. 4.4 porovnává řezné bříty nástrojů č. 1; 5 a 9. Pro všechny nástroje je charakteristické opotřebení na hřbetní ploše. Délka opotřebení na válcové ploše nástroje je shodná s parametrem  $a_p$ , tudíž délka opotřebení je 3 mm. Avšak významný rozdíl je pak u vzorku č. 5. Jak je vidět, na čelní ploše došlo při dosažení  $VB_B = 150 \mu\text{m}$  k rozsáhlému odštipnutí tenké vrstvy od substrátu. Je zajímavé, že oblast defektu je právě ve vzdálenosti 2,8 – 3,0 mm od špičky. Mezi důsledky odštipnutí patří především opotřebení, zvýšené řezné síly a elasticko – plastické vlastnosti obráběného materiálu třídy ISO S. Tento defekt má pak rozměr 0,2 x 0,15 mm.

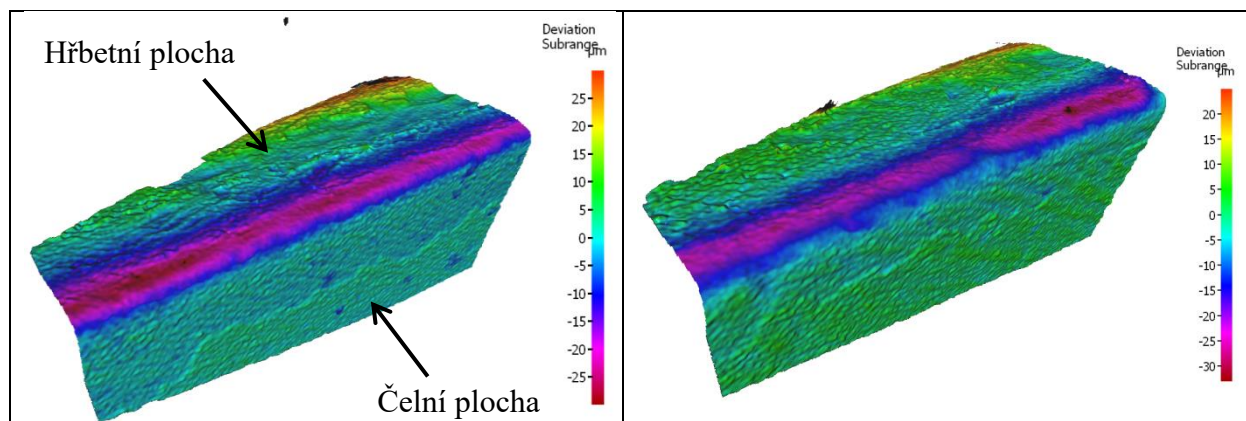




Obr. 4.4 Řezné břity po experimentu a) nástroj č. 1, b) č. 5, c) č. 9

K diferenční analýze se vybralo celkem 6 nástrojů. Jedná se o nástroje s rádiem řezného břitu 15 a 25  $\mu\text{m}$ , které byly upravovány rozdílnými technologiemi, resp. médii. Jelikož pro všechny modifikace vyšlo, že nástroje s  $r_n = 15 \mu\text{m}$  mají nejdelší trvanlivost a nástroje s  $r_n = 25 \mu\text{m}$  naopak nejnižší, bylo rozhodnuto, že právě tyto nástroje s nejdelší a nejnižší trvanlivostí se vzájemně porovnají.

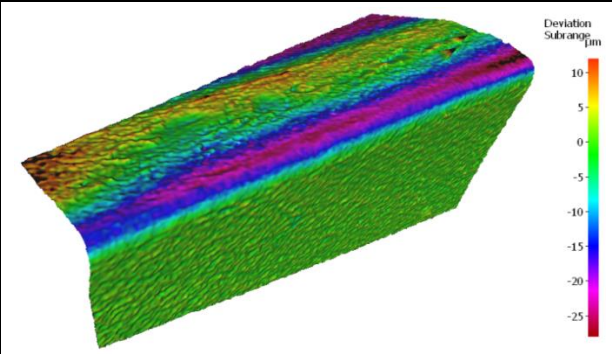
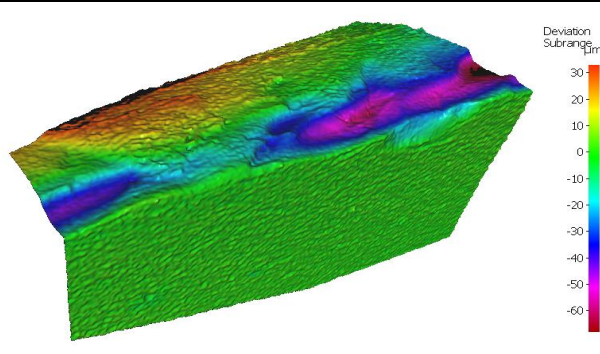
V prvním kroku se analýza zaměřila na řezné nástroje č. 1 a 4, tedy nástroje, jejichž mikrogeometrie byla modifikována pomocí vodního paprsku. Pro oba nástroje je charakteristické lineární opotřebení na hřbetní ploše, kde limitní opotřebení  $VB_B$  bylo 150  $\mu\text{m}$ . Avšak ze zkoumaných nástrojů měly nástroje modifikované vodním paprskem stejný defekt na čelní ploše. Při obrábění došlo k porušení soustavy substrát – tenká vrstva a i čelní plocha vykazuje známky opotřebení, resp. defektu. Jelikož řezné podmínky byly pro všechny nástroje konstantní, tak se zdá, že adhezni vlastnosti, zbytkové napětí v povrchové vrstvě řezných nástrojů č. 1; 2; 3 a 4 bylo nepříznivé pro následující deponování tenké vrstvy. Experimentálním obráběním pak došlo k této destrukci v oblasti mikrogeometrie. Součástí analýzy jsou zde i uvedené parametry (SIMcd, SIMch, SIMt), které souvisí s diferenční analýzou. Tyto parametry slouží jako další úhel pohledu na porovnání modifikací mikrogeometrie různými technologiemi a na požadovaný rádius řezného břitu nástroje.



Nástroj č. 1 $r_n=15\ \mu\text{m}$		Nástroj č. 4 $r_n=25\ \mu\text{m}$	
Max. hloubka defektů SIMcd [ $\mu\text{m}$ ]	33,98	Max. hloubka defektů SIMcd [ $\mu\text{m}$ ]	35,59
Max. výška defektů SIMch [ $\mu\text{m}$ ]	33,72	Max. výška defektů SIMch [ $\mu\text{m}$ ]	24,29
Oblast defektů SIMt [ $\mu\text{m}^2$ ]	68 435,63	Oblast defektů SIMt [ $\mu\text{m}^2$ ]	70 312,98

Tab. 4.3 Vyhodnocení opotřebení nástrojů dif. analýzou; modifikace – vodní paprsek

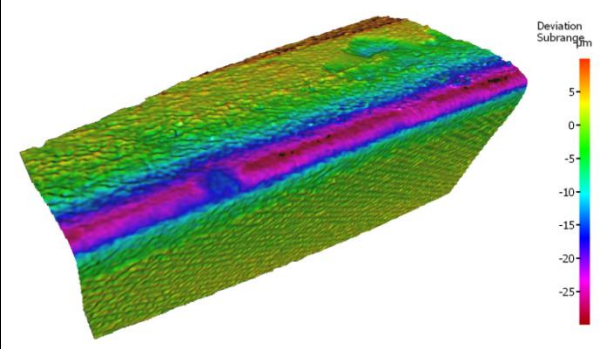
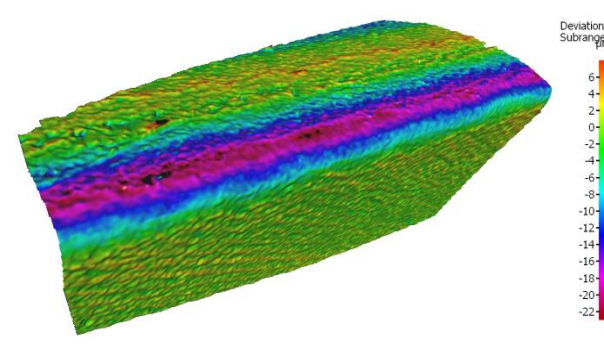
Dalšími nástroji pro analýzu opotřebení byly nástroje č. 5 a 8. Tyto nástroje měly modifikovanou mikrogeometrii vlečným omíláním v ořechových skořápkách (HSC 1/300). Navíc nástroj č. 5 měl nejvyšší trvanlivost a naopak nástroj č. 8 nejnižší. Důvodem toho, proč nástroj č. 9 měl nejnižší trvanlivost, je to, že v průběhu obrábění došlo k porušení soustavy substrát – tenká vrstva. V postiženém místě na řezném nástroji, kde už po prvních přejezdech se odloupla tenká vrstva, docházelo k rychlé degradaci řezného nástroje. Vysoký tlak a silové napětí pak způsobily rychlé opotřebení nástroje, jak je vidět v následující tabulce. Je dobré si povšimnout i uvedených hodnot. Opotřebovaná oblast (SIMt) je daleko vyšší než v případě nástroje č. 5. Navíc i maximální hloubka defektu dosahovala 72,94  $\mu\text{m}$  v porovnání s 31,13  $\mu\text{m}$  na nástroji č. 5. Lze si i všimnout, že čelní plocha řezných nástrojů č. 5 a 8 není tak výrazně porušená jako u nástrojů č. 1 a 4.

			
Nástroj č. 5 $r_n=15\ \mu\text{m}$		Nástroj č. 8 $r_n=25\ \mu\text{m}$	
Max. hloubka defektů SIMcd [ $\mu\text{m}$ ]	31,13	Max. hloubka defektů SIMcd [ $\mu\text{m}$ ]	72,94
Max. výška defektů SIMch [ $\mu\text{m}$ ]	23,65	Max. výška defektů SIMch [ $\mu\text{m}$ ]	48,43
Oblast defektů SIMt [ $\mu\text{m}^2$ ]	61 283,82	Oblast defektů SIMt [ $\mu\text{m}^2$ ]	94 608,50

Tab. 4.4 Vyhodnocení opotřebení nástrojů dif. analýzou; modifikace – omílání (HSC 1/300)

Pro kompletní vyhodnocení se provedla analýza u vzorků, které byly modifikovány v médiu QZ 1 – 3W. Analyzovaným nástrojem byl i nástroj č. 9. Tedy inkriminovaný nástroj, který už po modifikaci mikrogeometrie měl defekt na zaoblení řezného břítu. Po analýze stavu břítu po experimentu se zjistilo, že tento defekt nezpůsobil žádný rozvoj dalších defektů a problémů během obrábění. Samozřejmě bylo nutné měřit ve stejném místě a to bylo dodrženo, jelikož metodika měření zůstala neměnná. Čili mikrogeometrie se měřila 2 mm ve vzdálenosti od špičky řezných nástrojů. U obou vzorků je vidět rovnoměrné opotřebení na hřbetní ploše. Co se týče čelní plochy, opotřebení není tak markantní jako v případě vzorků č.

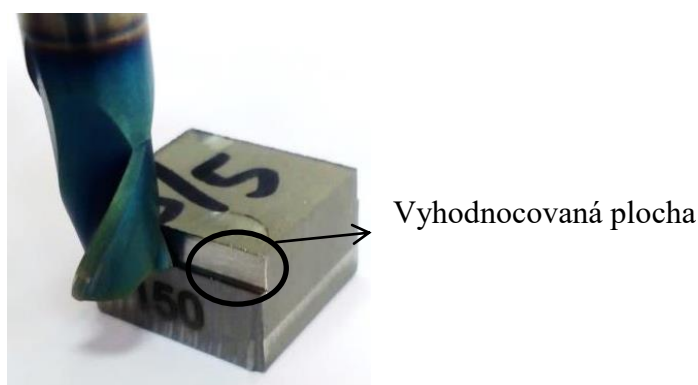
1 a 4. Opotřebení hřbetní souvisí s daným rádiusem  $r_n$ , řeznými podmínkami (posuvem  $f_z$  a radiální hloubkou řezu  $a_e$ ), silovým a tlakovým působením a obráběným materiálem. Co se týče naměřených parametrů, viz tab. 4.5, tak oblast defektů byla na nástroji č. 9 nejmenší ze všech vzorků. Zároveň i max. výška defektů byla nejnižší, SIMch= 18,40  $\mu\text{m}$ .

			
Nástroj č. 8 $r_n= 15 \mu\text{m}$		Nástroj č. 12 $r_n= 25 \mu\text{m}$	
Max. hloubka defektů SIMcd [ $\mu\text{m}$ ]	32,85	Max. hloubka defektů SIMcd [ $\mu\text{m}$ ]	30,23
Max. výška defektů SIMch [ $\mu\text{m}$ ]	18,40	Max. výška defektů SIMch [ $\mu\text{m}$ ]	19,11
Oblast defektů SIMt [ $\mu\text{m}^2$ ]	58 605,19	Oblast defektů SIMt [ $\mu\text{m}^2$ ]	62 638,09

Tab. 4.5 Vyhodnocení opotřebení nástrojů dif. analýzou; modifikace – omílání (QZ 1-3W)

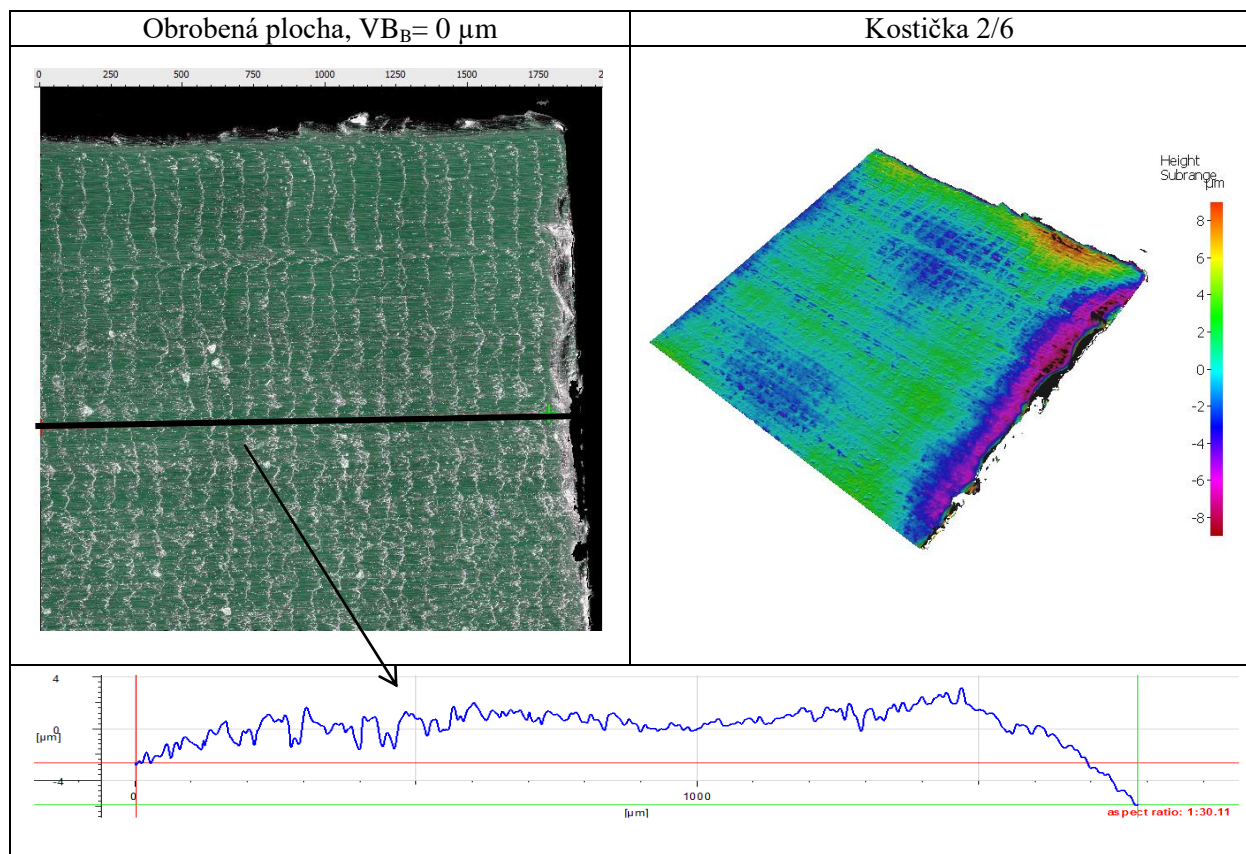
#### 4.4 Kvalita obrobeného povrchu v závislosti na opotřebení

Součástí vyhodnocení je i kapitola, která věnuje pozornost obrobku. Pozornost byla zaměřena na obrobené plochy, které vytvořila válcová část řezných nástrojů. K měření obrobené plochy se zase využila bezkontaktní metoda Focus Variation mikroskopu IFM G4. V první řadě bylo nutné zvolit, jaké plochy budou vyhodnocovány. Obrobené plochy, které budou vyhodnocované, byly při přejezdu nového nástroje a při opotřebení  $VB_B= 100$  a  $150 \mu\text{m}$ . Následující tabulka demonstruje vývoj obrobené plochy v závislosti velikosti opotřebení hřbetní plochy.



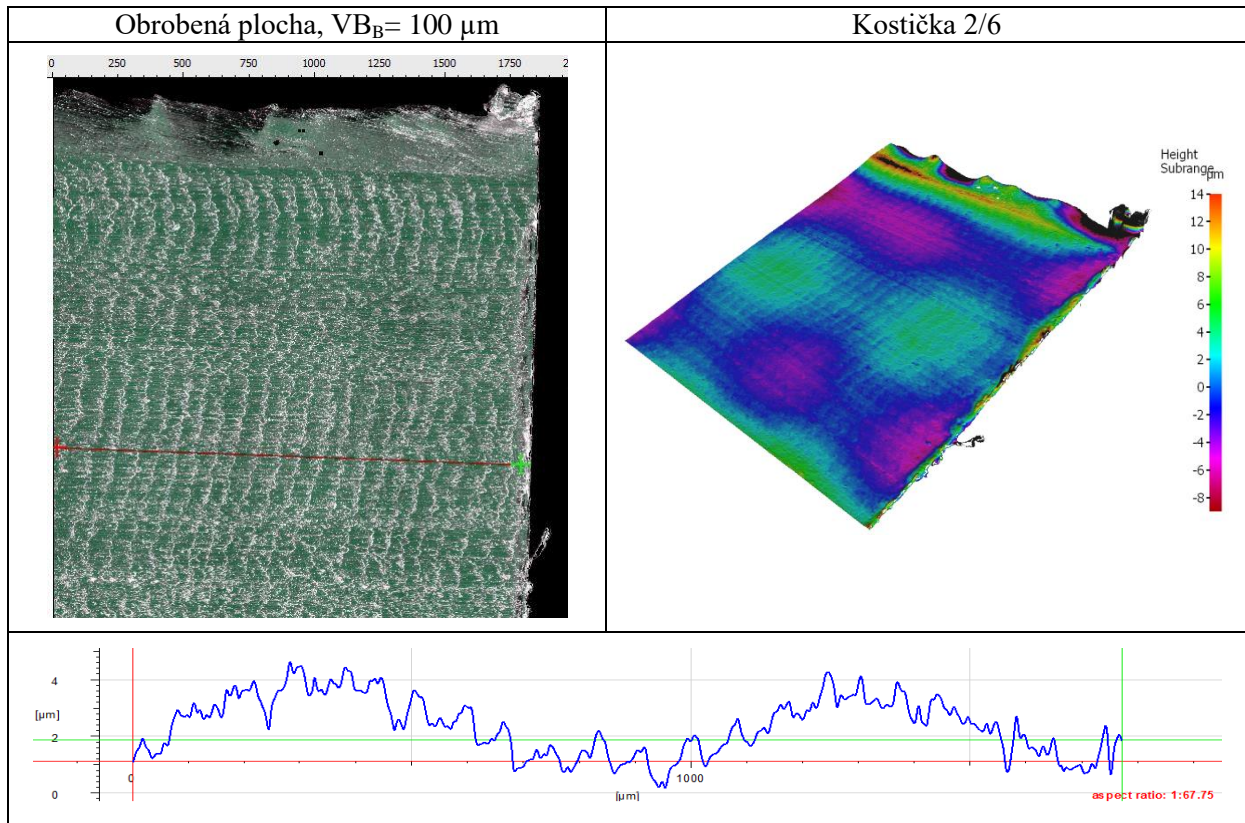
Obr. 4.5 Vizualizace obrobené plochy, na které proběhlo vyhodnocení

V této diplomové práci se analýza stavu povrchu obrobku zaměřila na obrobek, který byl obráběn nástrojem č. 5. Pro úplnost jednalo se o nástroj, který byl modifikován vlečným omíláním v HSC 1/300 na  $r_n = 15 \mu\text{m}$ . Při prvním přejezdu vznikla daná obrobená plocha, která je zobrazena v tab. 4.6. Jak je vidět, tak na obrobené ploše vznikali svislé stopy. Jednotlivé stopy mezi sebou byly vzdálené cca 0,04 mm. Tedy jedná se o vzdálenost rovnající se  $f_z$ . Součástí vyhodnocení bylo i vytvoření profilu pomocí úsečky (2 mm dlouhé), která byla kolmá právě na tyto stopy. Jedná se však pouze o měření v jednom místě. Čili se nezíská celkový přehled o kvalitě obrobené plochy. Proto součástí vyhodnocení je i analýza pomocí barevného spektra. Tato nevýhoda se eliminuje a získá se celkový přehled o kvalitě plochy. Pomocí barevného spektra jsou pak vidět jednotlivé odchylky. Při vstupu nástroje do řezu, došlo vlivem plastických deformací k deformaci (fialová oblast). Tato deformace dosahovala až  $-10 \mu\text{m}$ . Šířka této výrazné deformace pak byla 0,08 mm. Maximální hodnota odchylky je pak  $+9 \mu\text{m}$ .



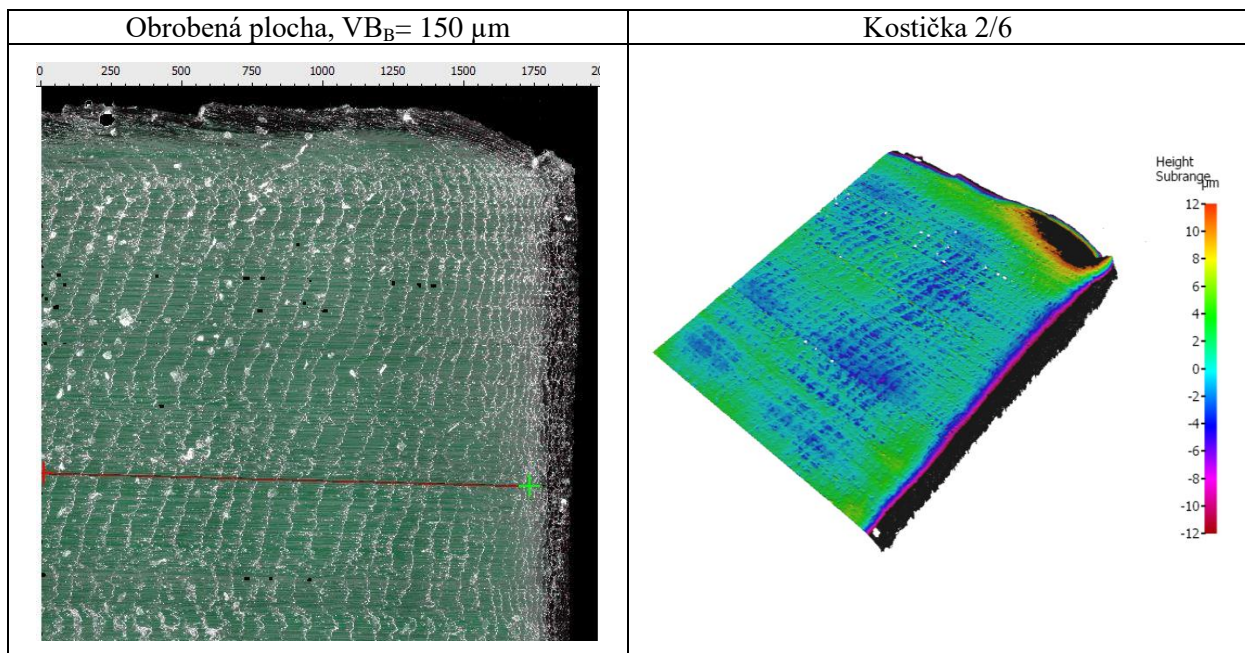
Tab. 4.6 Stav obrobené plochy v závislosti na opotřebení hřbetu řezného nástroje

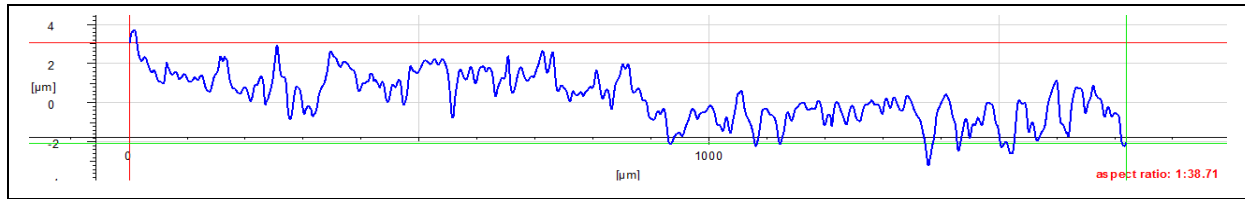
Vlivem opotřebení  $VB_B = 100 \mu\text{m}$  se měnila i topologie obrobeného povrchu. Křivka profilu je pak více skoková než v porovnání s profilem u  $VB_B = 0 \mu\text{m}$ . Je zde vidět vliv opotřebení především na vzniku ořepu na hraně obráběné plochy. Právě tento ořep pak způsobuje nárůst max. odchylky na  $+14 \mu\text{m}$ . Celkově pak analyzovaná plocha vykazuje větší vlnitost než plocha předchozí. Jsou zde vidět větší rozdíly. U většiny obrobků byla nejhorší kvalita povrchu zaznamenána právě při tomto opotřebení ( $VB_B = 100 \mu\text{m}$ ).



Tab. 4.7 Stav obrobené plochy v závislosti na opotřeбенí  $VB_B = 100 \mu\text{m}$

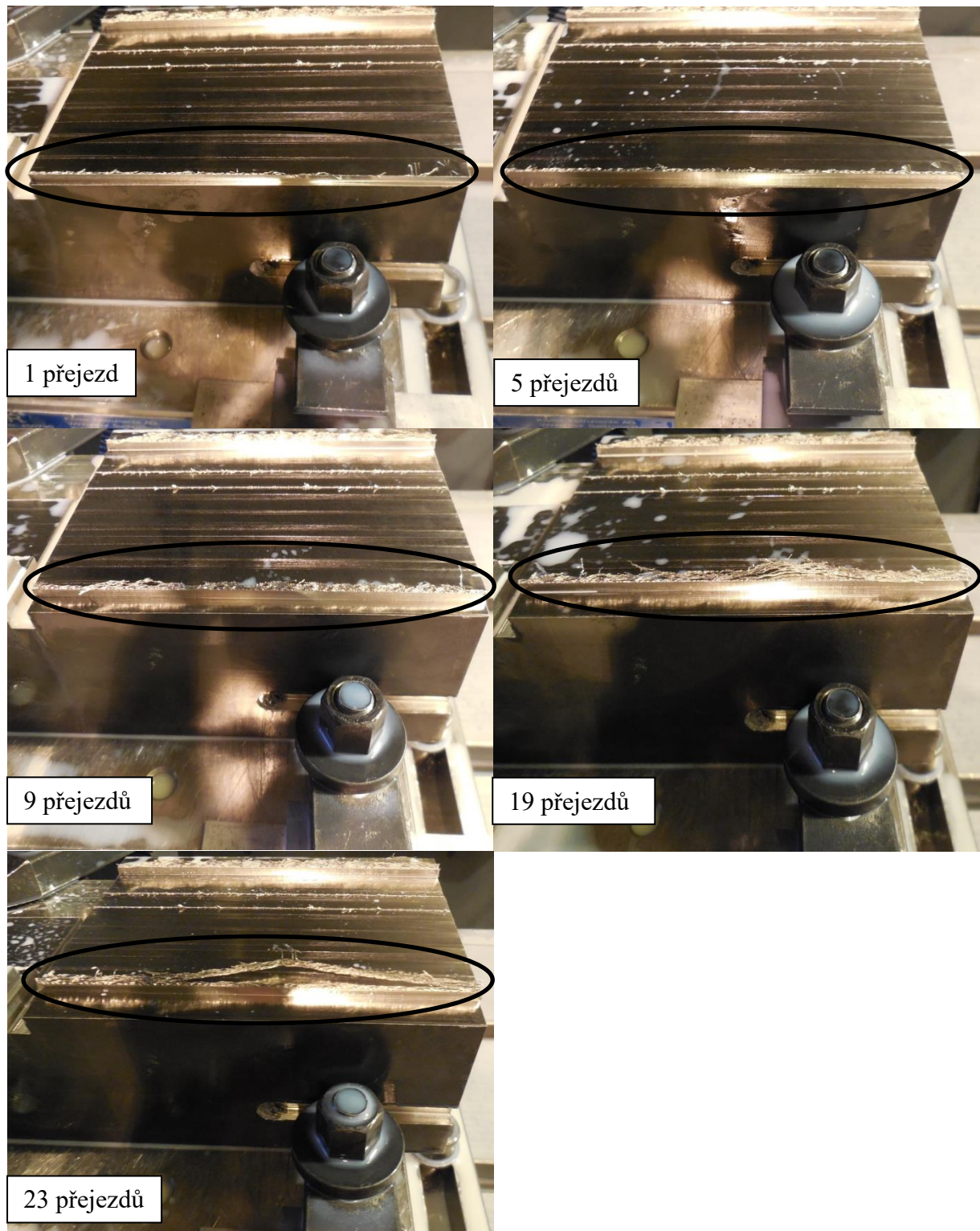
Posledním krokem bylo vyhodnocení při kritickém opotřeбенí  $VB_B = 150 \mu\text{m}$ . V porovnání s předchozím stavem, obrobená plocha nevykazuje tak markantní vlnitost. Rozsah této vlnitosti se pak snížil na  $+3/-3 \mu\text{m}$ . Avšak je zde, jako v prvním případě deformovaná oblast vlivem nájezdu rezného nástroje. Tato oblast má velikost  $-14 \mu\text{m}$  a šířka je podobná jako v prvním případě ( $0,08 \text{ mm}$ ).





Tab. 4.7 Stav obrobené plochy v závislosti na opotřebení  $V_{B_B} = 150 \mu\text{m}$

V průběhu experimentu byl i pozorován vznik otřepu na obrobené ploše, kterou vytvářela válcová plocha řezné části nástroje. S narůstajícím opotřebením, resp. počtem přejezdu tento otřep se neustále zvětšoval. Na následujícím obrázku je zobrazen tento vývoj. Nebezpečí takto velkého otřepu (cca od 9. přejezdu) může spočívat ve zvyšující se teplotě řezného nástroje při obrábění, jelikož vlivem zahlcení místa řezu třískami a těmito otřepy nedochází k dostatečnému chlazení řezného nástroje. V případech, kdy by se obráběla složitá kontura, která by navíc byla hůře přístupná pro technologickou kapalinu, tak by tento otřep způsoboval závažné problémy. Zvětšující se otřep je důsledkem opotřebením řezného nástroje, charakteristikami obráběného materiálu a řeznými podmínkami. U všech 12 vzorků vznikala stejný tvar a velikost otřepu na obrobené ploše v závislosti na opotřebením.



Obr. 4.6 Tvar vznikajícího otřepu v závislosti na opotřebení řezného nástroje č. 1

#### 4.5 Sumarizace výsledků

Jednotlivé výsledky praktického experimentu vykazují mezi sebou určité provázání. Testy prokázaly, že mezi trvanlivostí řezných nástrojů a výslednými řeznými silami platí

nepřímá úměra. Když rádius řezného břitu nástroje se zvětšuje tak trvanlivost klesá, avšak řezné síly narůstají. Nárůst řezných sil, při vyšším rádiusu řezného břitu nástroje, je pak jedním z důvodů klesající trvanlivosti. Se zvyšující se řeznou silou dochází k většímu namáhání řezného nástroje v místě řezu. Tím dochází k vyšší míře opotřebení. Zhoršující se kvalita řezné části nástroje, vlivem opotřebení, má také vliv na zvyšující se řezné síly. Dochází totiž ke zvýšení drsnosti hřbetní a čelní plochy, tenká vrstva přestává správně fungovat a zároveň dochází ke zvyšování tření mezi nástrojem a obrobkem. To jsou důvody, které stojí za zvyšující se řeznou silou v průběhu obrábění. Dalším důvodem můžou být řezné podmínky, především hodnoty  $f_z$ ,  $a_e$  apod. Jako vhodným řešením by byla úprava řezných podmínek tak, aby nástroje s větším rádiusem řezného břitu (20 a 25  $\mu\text{m}$ ) měly pokud možno vyšší trvanlivost. Zajímavé by bylo i vyhodnocení zbytkového napětí v obrobené ploše. Díky tomuto vyhodnocení by kromě řezných podmínek, byl vidět vliv rádiusu řezného břitu nástroje na průběh a orientaci zbytkového napětí. Ve výsledku by se získala testem potvrzená informace o vlivu mikrogeometrie řezného nástroje na obrábění. Materiálovou analýzou by se mohl stanovit vliv rádiusu řezného břitu na tloušťku zpevněné vrstvy. Kromě  $r_n$ , na tloušťku zpevněné vrstvy má vliv i kvalita obrobeného povrchu, řezné podmínky a vznik otřepu. Se zvyšujícím se časem obrábění řezný nástroj ztrácí svoji schopnost oddělovat správně třísku. Dochází k degradaci celkové geometrie řezné části nástroje. Tato degradace má za následek vznik otřepu, viz Obr. 4.6. Se zvyšujícím se opotřebením se řezná část nástroje stále hůře zařezává.

Při experimentu byla zvolena jednoduchá strategie obrábění, která spočívala v lineárních přejezdech. Nájezdy a výjezdy nástroje byly také lineární. Avšak při obrábění těžkoobrobitelných materiálů jako je Inconel 718 by bylo vhodné zkusit upravit nájezdy a odjezdy. V kapitole 4.4 jsou pak vidět dopady lineárního nájezdu do řezu. Pomocí barevného spektra je v místě nájezdu nástroje do obrobku vidět velká deformovaná oblast, v porovnání se zbytkem obrobené plochy. Např. nájezd po kruhové dráze by pak mohl způsobit menší deformaci obrobené plochy, ale i menší namáhání řezného nástroje. Zajímavým přínosem by bylo použití tepelného upínače. Jelikož se jedná o přesnější upínání, tak by tepelný upínač mohl mít pozitivní vliv na zvýšení trvanlivosti řezných nástrojů.

Z pohledu ekonomického zhodnocení je složité takovéto hodnocení provést, jelikož se jedná o výzkumnou činnost. K tomu ještě byla technologie vodního paprsku prototypovou, tudíž se vše zkoušelo a testovalo poprvé.



## 5. Závěr

Experimentální částí v této diplomové práci se splnily hlavní úkoly, které byly stanovené v úvodu práce. V první fázi došlo ke zvolení dvou metod modifikace mikrogeometrie řezného nástroje. Jednalo se o vlečné omílání a tryskání vodním paprskem. U vlečného omílání pak byly použité dva druhy média. A to ořechové skořápky + SiC a umělý korund. Důležitým krokem pak bylo měření a studium stavu povrchu řezného nástroje. Tato analýza se prováděla za účelem zjištění procesních parametrů modifikace mikrogeometrie a vlivu různých omílacích médií. Před depozicí řezných nástrojů se zjistilo, že na výslednou kvalitu hřbetních a čelních ploch má nejlepší vliv vlečné omílání v médiu HSC 1/300. Navíc se zvyšujícím se časem omílání, resp. modifikace nástrojů na  $r_n = 25 \mu\text{m}$  se dosáhlo nejnižší drsnosti. Naopak technologie vodního paprsku nedosahovala takové kvality povrchu jako v porovnání s vlečným omíláním v médiu HSC 1/300. V další fázi došlo k depozici nástrojů. I po depozici došlo k analýze stavu povrchu a porovnání naměřených hodnot před a po depozici.

Další fází byl návrh a příprava experimentu. Kromě volby řezných podmínek, obráběcího stroje, způsobu upnutí obrobku a nástroje, byla zvolena metodika vyhodnocování opotřebení. Opotřebení se vyhodnocovalo na hřbetní ploše a šlo o lineární opotřebení, s limitní hodnotou  $VB_B = 150 \mu\text{m}$ . Kromě vyhodnocení trvanlivosti se při experimentu měřily řezné síly, aby se zaznamenal vliv proměnné mikrogeometrie a zvyšujícího se opotřebení nástroje. V dalším kroku došlo k analýze získaných hodnot. Výsledkem bylo stanovení závislosti, že při daných řezných podmínkách, mají nástroje s  $r_n = 15 \mu\text{m}$  nejdelší trvanlivost. Platilo, že se zvyšujícím se rádiusem řezného břitu nástroje trvanlivost klesá. Nástroje č. 5 a 6 měly nejvyšší trvanlivost  $T = 31,2 \text{ min}$ . Další závislostí, která se v tomto experimentu zjistila je to, že se zvyšujícím se opotřebením dochází ke zvyšování složek řezných sil. Platí také, že větší rádius řezného břitu nástroje způsobuje nárůst řezných sil. Tato skutečnost souvisí především s řeznými podmínkami a vlastnostmi obráběného materiálu (Inconelu 718). V závěrečné fázi došlo k porovnání nového a opotřebeného řezného břitu nástroje. Zde díky diferenční analýze, na mikroskopu IFM G4, došlo k diferenční analýze mezi novým a opotřebeným řezným břitem. Díky ní se získal detailní přehled o stavu mikrogeometrie řezného nástroje. Zjišťovala se oblast defektu, maximální a minimální výška defektů apod. Dále se pak analyzovala obrobená plocha.

V této práci byla metoda vlečného omílání v médiu HSC 1/300 nejvýhodnější. Jelikož se zjistila závislost, že se zvyšujícím se rádiusem řezného břitu dochází ke snížení trvanlivosti, bude v budoucnu užitečné se zaměřit na změnu řezných podmínek, především  $f_z$  a  $a_e$  tak, aby došlo k efektivnímu využití  $r_n = 20$  a  $25 \mu\text{m}$ . Tyto úvahy budou pak dále v budoucnu experimentálně ověřeny soustavou různých testů, kdy bude proměnnou jeden parametr.

## Seznam použité literatury

- [1] BRYCHTA, J., ČEP, R., NOVÁKOVÁ, J., PETŘKOVSKÁ L. Technologie obrábění II. – 1. díl [cit. dne 4. 11. 16] On-line. <  
[http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta\\_Technologie\\_II\\_1dil.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_1dil.pdf)>
- [2] SOVA, F.: Technologie obrábění a montáže. Plzeň: ZČU, 2001, ISBN 80-7082-823-4
- [3] mmspektrum.com [cit. dne 4. 11. 16] On-line. <  
<http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-proces-obrabeni-kovu-zivotnost-nastroju.html>>
- [4] ISO 3685:1993, Tool-life testing with single-point turning tools [cit. dne 5. 11. 16] On-line. <  
[http://www.technicke-normy-csn.cz/inc/nahled\\_normy.php?norma=220031-csn-iso-8688-1&kat=28552](http://www.technicke-normy-csn.cz/inc/nahled_normy.php?norma=220031-csn-iso-8688-1&kat=28552)>
- [5] ateam.zcu.cz. Tenké vrstvy. [cit. dne 7. 11. 16] On-line. <  
[http://www.ateam.zcu.cz/tenke\\_vrstvy\\_sma.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf)>
- [6] RODRÍGUEZ, C.J.C. Cutting Edge Preparation of Precision Cutting Tools by Applying Micro Abrasive Jet Machining and Brusning, 2009, ISBN 978-3-89958-712-8
- [7] HRONEK, O., ZETEK M., BAKŠA, T., ADÁMEK, P. (2016) Influences of Holders Speed on the Cutting Edge during Drag Finishing. In: *Manufacturing Technology*, Vol. 13, No. 5, ISSN 12-13-2489
- [8] mmspektrum.com [citováno dne 6. 11. 2016] On-line. <  
<http://www.mmspektrum.com/clanek/omilani-jako-univerzalni-metoda-pro-upravu-povrchu.html>>
- [9] otec.de [cit. dne 9. 11. 16] On-line <  
[http://www.otec.de/fileadmin/user\\_upload\\_2014/downloads/Prospekte/SF\\_Prospekt\\_DE.pdf](http://www.otec.de/fileadmin/user_upload_2014/downloads/Prospekte/SF_Prospekt_DE.pdf)>
- [10] otec.de [cit. dne 27. 11. 16] On-line <  
<http://www.otec.de/cz/produkty/procesni-media/>>
- [11] JIANG, X. J., WHITEHOUSE, D. J. (2012) Technological shifts in surface metrology. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. Vol. 61, No. 2, pp. 815-836, ISSN 0007-8506
- [12] MATHIA, T. G., PAWLUS, P., WIECZOROWSKI, M. (2011) Recent trends in surface metrology. In: *Wear*. Vol. 271, Issues 3-4, pp. 494-508, ISSN 0043 – 1648
- [13] ZETEK, M., BAKŠA, T., SCHORNÍK, V., ZETKOVÁ, I. (2016) Monitoring and Evaluating Cutting Tool Wear using a IFM G4 Microscope In: *Manufacturing technology*. Vol. 16, No. 5, pp. 1211 – 1216, ISSN 1213 - 2489
- [14] VORBURGER, Ted. Optical Methods of Surface Measurement. [online]. 2012 [cit. 2016-11-28]. On-line <  
<https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/oles/3-Vorburger-Ted-Optical-Methods-of-Surface-Measurement-MSSFAA-10jul12.pdf>>
- [15] ALICONA IMAGING GMBH. [online]. [cit. 2016-11-28]. Dostupné z:  
<http://www.alicon.com/home/>

- [16] Infinite Focus Microscope (IFM). [online]. [cit. 2016-11-28]. Dostupné z: <  
<https://www.shu.ac.uk/research/meri/infinite-focus-microscope-ifm>>
- [17] VORBURGER, Ted. Optical Methods of Surface Measurement. [online]. 2012 [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: <  
<http://www.nist.gov/oles/upload/3-Vorburger-Ted-Optical-Methods-of-Surface-Measurement-MSSFAA-10jul12.pdf>>
- [18] DEMIRCIOGLU, P., DURAKBASA, M.N. (2011) Investigations on machined metal surfaces through the stylus type and optical 3D instruments and their mathematical modeling with the help of statistical techniques, Measurement, Vol. 44, Issue 4, pp. 611-619, ISSN 0263-2241
- [19] MOTORCU, A.R., KUS, A., ARSLAN, R., YÜCEL, T., EZENTAS, R. (2013) Evaluation of Tool Life - Tool Wear in Milling of Inconel 718 Superalloy and the Investigation of Effects of Cutting Parameters on Surface Roughness with Taguchi Method. In: *Tehnicki Vjesnik*. Vol. 20, No. 5, pp. 765 – 774, ISSN 1330-3651
- [20] specialmetals.com. 2008 [cit. dne 18. 3. 17]. On-line<  
<http://www.specialmetals.com/products/inconelalloy718.php>>
- [21] TANAKA, H., SUGIHARA, T. (2016). High Speed Machining of Inconel 718 Focusing on Wear Behaviors of PCBN Cutting Tool In: *Procedia CIRP*. Vol. 46, pp. 545 – 548, ISSN 2212 - 8271
- [22] pcg-gmbh.de [cit. dne 4. 1. 17] On-line. <  
<http://pcg-gmbh.de/default.asp?kat=190&ukat=243&lang=eng>>
- [23] shm-cz.cz [cit. dne 4. 1. 17]<  
[http://www.shm-cz.cz/wp-content/uploads/2013/02/Produktovy\\_list\\_TripleCoatings.pdf](http://www.shm-cz.cz/wp-content/uploads/2013/02/Produktovy_list_TripleCoatings.pdf)>
- [24] opi.zcu.cz [cit. dne 25. 2. 17]<  
[https://www.opi.zcu.cz/tenke\\_vrstvy\\_sma.pdf](https://www.opi.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf)>
- [25] BIERMANN, D., ABMUTH, R., SCHUMANN, S., RIEGGER, M., KUHLENÖTTER, B. (2016). Wet abrasive jet machining to prepare and design the cutting edge micro shape. In: *Procedia CIRP*. Vol. 45, pp. 195 – 198, ISSN 2212 – 8271

## Obrázky

- [1] BRYCHTA, J., ČEP, R., NOVÁKOVÁ, J., PETŘKOVSKÁ L. Technologie obrábění II. – 1. díl [cit. dne 4. 11. 16] On – line. <  
[http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta\\_Technologie\\_II\\_1dil.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_1dil.pdf)>
- [2] SOVA, F.: Technologie obrábění a montáže. Plzeň: ZČU, 2001, ISBN 80-7082-823-4
- [3] mmspektrum.com [cit. dne 4. 11. 16] On-line. <  
<http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-proces-obrabeni-kovu-zivotnost-nastroju.html>>
- [4] cit. dne 5.11.2016 <  
[http://images.slideplayer.cz/9/2618404/slides/slide\\_5.jpg](http://images.slideplayer.cz/9/2618404/slides/slide_5.jpg)>

- [5] cit. dne 5.11.2016 < <http://customcarbide-tools.com/wp-content/uploads/2010/07/CROSSS1.jpg>
- [6] MUSIL, Michal. *Příprava řezného nástroje před povlakováním*. Brno 2010. Bakalářská práce. VUT v Brně.
- [7] rcmdeburring.com [cit. dne 9.11. 2016] On-line. < <http://www.rcmdeburring.com/images/equipment/dragfinishing1.jpg>>
- [8] ainsmag.co.uk [cit. dne 9.11. 2016] On-line. < [http://www.ainsmag.co.uk/assets/Uploads/client-news/fintek/aerospace-component-super-surface-finishing-showcase-for-fintek-at-advanced-engineering/downloads/\\_resampled/SetSize760506-5588f1h-turbine-blades-before-after-sf4.jpg](http://www.ainsmag.co.uk/assets/Uploads/client-news/fintek/aerospace-component-super-surface-finishing-showcase-for-fintek-at-advanced-engineering/downloads/_resampled/SetSize760506-5588f1h-turbine-blades-before-after-sf4.jpg)>
- [9] mlgeardesigns.blog.cz [cit. dne 27.11. 2016] On-line. < <http://mlgeardesigns.blog.cz/1503/vodni-paprsek>>
- [10]otec.de [cit. dne 27. 11. 16] On-line < <http://www.otec.de/cz/produkty/procesni-media/obrabeni-za-sucha/kukuricny-granulat/>>
- [11]otec.de [cit. dne 27. 11. 16] On-line <https://www.otec.de/cz/produkty/procesni-media/obrabeni-za-mokra/zirkonove-kulicky/>>
- [12]otec.de [cit. dne 27. 11. 16] On-line < <http://www.otec.de/cz/produkty/procesni-media/obrabeni-za-mokra/>>
- [13]keyence.com [cit. dne 30. 11. 16] On-line < [http://www.keyence.com/Images/ss\\_marking\\_roughness\\_equipment\\_img\\_1\\_03.jpg](http://www.keyence.com/Images/ss_marking_roughness_equipment_img_1_03.jpg)>
- [14]cdn.iopscience.com [cit. dne 30. 11. 16] < [http://cdn.iopscience.com/images/2051-672X/3/2/023001/Full/stmp511025f1\\_online.jpg](http://cdn.iopscience.com/images/2051-672X/3/2/023001/Full/stmp511025f1_online.jpg)>
- [15]chempoint.cz [cit. dne 2. 12. 16] < <http://www.chempoint.cz/data/imgs/003381.jpg>>
- [16] DAVIS, J. R. *ASM Speciality Handbook: Nickel, Cobalt, and their Alloys*. ASM International, Ohio, USA, 2000. 421 p. ISBN 0-87170-658-7.
- [17] Hliník, slitiny hliníku a slitiny niklu [cit. dne 31. 1. 17]. On-line < [http://www.ateam.zcu.cz/download/Slitiny09\\_10.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/download/Slitiny09_10.pdf) >
- [18] MOTORCU, A.R., KUS, A., ARSLAN, R., YÜCEL, T., EZENTAS, R. (2013) Evaluation of Tool Life - Tool Wear in Milling of Inconel 718 Superalloy and the Investigation of Effects of Cutting Parameters on Surface Roughness with Taguchi Method. In: *Tehnicki Vjesnik*. Vol. 20, No. 5, pp. 765 – 774, ISSN 1330-3651
- [19] shm-cz.cz [cit. dne 26. 2. 17] < <http://www.shm-cz.cz/pvd-povlaky-a-sluzby/pvd-povlaky/triplecoating-si/>>

[20] shm-cz.cz [cit. dne 26. 2. 17] < <http://www.shm-cz.cz/pvd-povlaky-a-sluzby/pvd-povlaky/triplecoatings-cr/>>

## **Seznam obrázků, tabulek a grafů**

Obr. 2.1 Závislost opotřebení VB při různých  $v_c$

Obr. 2.2 Obecný tvar otupení dle ISO

Obr. 2.3 Závislost opotřebení na řezných podmínkách

Obr. 2.4 Vliv teploty na tvrdost řezných materiálů

Obr. 2.5 Rozhraní substrát – tenká vrstva

Obr. 2.6 Stupnice hodnocení adhezních vlastností systému substrát – tenká vrstva

Obr. 2.7 Schéma vlečného omílání

Obr. 2.8 Hnací část omílacího stroje

Obr. 2.9 Zvýšená kvalita povrchu součásti po proudovém omílání

Obr. 2.10 a) Popis částí trysky vodního paprsku, b) Soustava tryska – řezný nástroj

Obr. 2.11 Médium HSC 1/300

Obr. 2.12 a) Médium QZ 1 – 3W, b) TZC

Obr. 2.13 a) Médium H4/400, b) Kukuřičný granulát

Obr. 2.14 a) Zirkonové kuličky, b) Keramická tělíska

Obr. 2.15 a) Plastová tělíska, b) Ocelové jehličky

Obr. 2.16 Vliv opotřebení měřicího hrotu na přesnost měření

Obr. 2.17 Rýhy vytvořené měřicím hrotem

Obr. 2.18 Schéma měření pomocí metody „Focus Variation“

Obr. 2.19 Princip konfokálního mikroskopu

Obr. 2.20 Mikrostruktura precipitačně zpevněné niklové superslitiny

Obr. 2.21 Mikrostruktura slitiny Inconel 718

Obr. 2.22 Opotřebení řezného nástroje ze SK,  $v_c = 50$  m/min,  $f_z = 0,05$  mm/zub a) sousledné, b) nesousledné frézování

Obr. 3.1 Návrh jednotlivých fází experimentu

Obr. 3.2 a) Polotovár (roubík) před broušením, b) Vybroušený řezný nástroj

Obr. 3.3 a) Mikrogeometrie řezného nástroje, b) 3D snímek mikrogeometrie řezného nástroje

Obr. 3.4 Defekt na řezném nástroji č. 9

Obr. 3.5 Příklad gradientní vrstvy na bázi Si od firmy SHM

Obr. 3.6 a) Tenká vrstva TripleCoating Cr, b) Řezný nástroj po depozici

Obr. 3.7 Diferenční analýza deponovaného řezného břitu nástroje a) č. 1, b) č. 5, c) č. 9

Obr. 3.8 Deponovaná hřbetní plocha řezného nástroje č. 12 – droplety

Obr. 3.9 a) Soustava S – N – O – P, b) obvodové házení nástroje

Obr. 3.10 Finální třísky při daných řezných podmínkách

Obr. 3.11 Záběrové podmínky řezného nástroje a výpočet úhlu opásání

Obr. 3.12 a) Silové měřicí zařízení, b) Optický mikroskop Multicheck PC 500

Obr. 3.13 Pracovní prostor a ovládací panel frézovacího centra MCV 70A

Obr. 4.1 Nárůst opotřebení v závislosti na počtu přejezdů na obrobku

Obr. 4.2 Rozklad řezných sil

Obr. 4.3 Doba zařiznutí nástroje při I. přejezdu v závislosti na poloměru: a)  $r_n = 15 \mu\text{m}$ , b)  $r_n = 20 \mu\text{m}$ , c)  $r_n = 25 \mu\text{m}$

Obr. 4.4 Řezné břity po experimentu a) nástroj č. 1, b) č. 5, c) č. 9

Obr. 4.5 Vizualizace obrobené plochy, na které proběhlo vyhodnocení

Obr. 4.6 Tvar vznikajícího ořepu v závislosti na opotřebení řezného nástroje č. 1

Tab. 2.1 Chemické složení Inconel 718 (obsah v %)

Tab. 2.2 Mechanické a fyzikální vlastnosti

Tab. 3.1 Mechanické a fyzikální vlastnosti slinutého karbidu

Tab. 3.2 Procesní parametry vlečného omílání

Tab. 3.3 Modifikace mikrogeometrie na definované  $r_n$  řezného břitu

Tab. 3.4 Oblasti na čelní ploše nástrojů po modifikaci mikrogeometrie

Tab. 3.5 Porovnání  $r_n$  řezného břitu před a po depozici

Tab. 3.6 Naměřené parametry drsnosti

Tab. 3.7 Řezné podmínky experimentu

Tab. 3.8 Min. tloušťka odebírané vrstvy v závislosti na poloměru  $r_n$

Tab. 4.1 Dosažená trvanlivost při opotřebení  $VB_B = 150 \mu\text{m}$

Tab. 4.2 Naměřené řezné síly během experimentu

Tab. 4.3 Vyhodnocení opotřebení nástrojů dif. analýzou; modifikace – vodní paprsek

Tab. 4.4 Vyhodnocení opotřebení nástrojů dif. analýzou; modifikace – omílání (HSC 1/300)

Tab. 4.5 Vyhodnocení opotřebení nástrojů dif. analýzou; modifikace – omílání (QZ 1-3W)

Tab. 4.6 Stav obrobené plochy v závislosti na opotřebení hřbetu řezného nástroje

Tab. 4.7 Stav obrobené plochy v závislosti na opotřebení  $VB_B = 150 \mu\text{m}$

Graf 3.1 Hodnoty rádiusu řezného břitu po vlečném omílání v QZ

Graf 3.2 Hodnoty rádiusu řezného břitu po vlečném omílání v HSC

Graf 3.3 Hodnoty zaoblení řezné hrany po tryskání vodním paprskem

Graf 3.4 Drsnost hřbetních ploch nástrojů po modifikaci mikrogeometrie

Graf 3.5 Parametry lineární drsnosti hřbetních ploch řezných nástrojů po depozici

Graf 4.1 Grafické vyjádření trvanlivost řezných nástrojů po experimentu

Graf 4.2 Objem odebraného materiálu v závislosti na trvanlivosti