

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

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

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vliv opotřebení na objem odebraného materiálu

Autor: **Bc. Tomáš Blumentrit**
Vedoucí práce: **doc. Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**

Akademický rok 2019/2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Tomáš BLUMENTRIT
Osobní číslo:	S17N0027K
Studijní program:	N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie – technologie obrábění
Téma práce:	Vliv opotřebení na objem odebraného materiálu
Zadávací katedra:	Katedra technologie obrábění

Zásady pro vypracování

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

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

Seznam doporučené literatury:

- KOCMAN, Karel. Technologie obrábění. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3068-0
- KOCMAN, Karel. Technologické procesy obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2
- ŘEHOŘ, J. Technologie HSC. In Technologické a informační činitele obrábění. Košice : Technická univerzita, 2009, s. 101-136. ISBN: 978-80-553-038-9
- FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9
- MÁDL, Jan. Optimalizace řezných podmínek v teorii obrábění: doplňkové skriptum. 4. vydání. Praha, 1990. ISBN 80-01-00323-X

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

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

Datum zadání diplomové práce: **16. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



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

V Plzni dne 16. října 2019

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

Podpis autora

Poděkování

Na tomto místě bych velmi rád poděkoval doc. Ing. Miroslavu Zetkovi, Ph.D. za jeho ochotu, cenné rady a čas, který mi věnoval při konzultacích mé diplomové práce.

Dále bych rád poděkoval paní Ing. Jaroslavě Fulemové, Ph.D. za čas a důležité poznatky při analýze vzniklých třísek, které se mnou konzultovala.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Bc. Blumentrit	Jméno Tomáš	
STUDIJNÍ OBOR	Strojírenská technologie – technologie obrábění		
VEDOUČÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulu) Ing. Zetek Ph.D.	Jméno Miroslav	
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Vliv opotřebení na objem odebraného materiálu		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2020
----------------	---------	----------------	-----	------------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	66	TEXTOVÁ ČÁST	52	GRAFICKÁ ČÁST	10
---------------	----	---------------------	----	--------------------------	----

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Diplomová práce se zabývá vlivem opotřebení na objem odebraného materiálu. Práce obsahuje základní informace o čelním frézování a frézování slitin na bázi niklu, opotřebení břitů, vzniku třísky a tepelné bilanci. V práci je zpracován experiment vlivu opotřebení na objem odebraného materiálu a rozbor vzniklých třísek. Opotřebení má vliv na objem odebraného materiálu, což bylo potvrzeno výsledky experimentu.
KLÍČOVÁ SLOVA	Čelní frézování, frézování slitin na bázi niklu, objem odebraného materiálu, opotřebení břitů, tvar třísek, tepelná bilance

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Bc. Blumentrit	Name Tomáš	
FIELD OF STUDY	Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Zetek Ph.D.	Name Miroslav	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Influence of tool wear on volume of material removed		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KTO	SUBMITTED IN	2020
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	66	TEXT PART	52	GRAPHICAL PART	10
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The diploma thesis deals with the influence of tool wear on the volume of material removal rate. The thesis contains basic information about face milling and milling of nickel-based alloys, tool wear, chip formation and heat balance. In the thesis was carried out an experiment of the tool wear on the volume of material removal rate and an analysis of the resulting chips. Tool wear affects the volume of material removal rate. This was proved by the results of the carried out experiment.
KEY WORDS	Face milling, milling of nickel-based alloys, volume of material removal rate, tool wear, chip shape, heat balance

Obsah

Obsah.....	8
1 Úvod.....	14
2 Rozbor současného stavu	15
2.1 Charakteristika čelního frézování.....	15
2.1.1 Frézování slitin na bázi niklu	15
2.1.2 Frézy s kruhovými VBD	16
2.1.3 Geometrie břítu frézy	17
2.1.4 Řezné podmínky pro frézování niklových slitin	18
2.1.5 Řezné materiály vhodné k obrábění materiálu Inconel 718.....	20
2.2 Objem odebraného materiálu.....	22
2.3 Opotřebení nástroje.....	23
2.3.1 Klasifikace typů opotřebení nástroje.....	24
2.3.2 Opotřebení při obrábění Inconelu 718	26
2.4 Tvorba a tvarování třísek.....	28
2.4.1 Plastická deformace třísky	28
2.4.2 Mechanika tváření třísky	30
2.4.3 Tvar třísek dle objemového součinitele W.....	31
2.4.4 Formování třísek při obrábění oceli Inconel 718	32
2.4.5 Nárůstek a jeho tvorba.....	34
2.5 Vznik tepla a tepelná bilance.....	35
2.5.1 Vznik tepla	35
2.5.2 Tepelná bilance řezného procesu	37
3 Návrh a realizace vlastního experimentu	39
3.1 Popis a průběh experimentu	39
3.2 Zkušební materiál Inconel 718	41
3.2.1 Mechanické vlastnosti	42
3.3 Měření opotřebení.....	43
3.4 Analýza třísky.....	45
4 Zhodnocení výsledků	47
4.1 Objem odebraného materiálu.....	47

4.1.1	Výpočet úhlu opásání	48
4.1.2	Objem odebraného materiálu z hlediska hmotnosti	52
4.2	Charakteristika vytvořených třísek	54
4.2.1	Tvar vzniklých třísek	54
4.2.2	Objem vytvořených třísek	57
4.3	Opotřebení	58
4.3.1	Charakter opotřebení	58
4.3.2	Diferenční analýza VBD	60
4.4	Sumarizace výsledků	61
5	Závěr	63
6	Použitá literatura	64

Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratka/symbol	Jednotka	Popis
ap	[mm]	hloubka řezu
vf	[mm/min]	posuvová rychlost
α	[°]	úhel hřbetu
β	[°]	úhel břitu
γ	[°]	úhel čela
δ	[°]	úhel řezu
κ	[°]	úhel nastavení hlavního ostří
α_o	[°]	úhel hřbetu v ortogonální rovině
γ_o	[°]	úhel čela v ortogonální rovině
γ_p	[°]	úhel čela v zadní rovině
b_γ	[mm]	šířka fazetky hlavní řezné hrany
vc	[m/min]	řezná rychlost
π	[-]	Ludolfovo číslo
D	[mm]	průměr nástroje
n	[ot/min]	počet otáček za minutu
fz	[mm]	posuv na zub
Q	[cm ³ /min]	objem odebraného materiálu
S	[cm ²]	plocha
a_e	[mm]	šířka řezu
VB _B	[μm]	opotřebení přímé části ostří
VB _C	[μm]	opotřebení v oblasti špičky nástroje
KT	[μm]	hloubka výmolu na čele
OMNO´	[-]	oblast primární plastické deformace
PKNB	[-]	kubický nitrid bóru
PD	[-]	polykrystalický diamant
SK	[-]	slinutý karbid
CBN	[-]	kubický nitrid bóru
VBD	[-]	vyměnitelná břitová destička
PVD	[-]	vakuová depozice tenkých vrstev
CVD	[-]	chemická depozice tenkých vrstev
TiN	[-]	nitrid titanu
TiCN	[-]	karbonitrid titanu
TiAlN	[-]	nitrid titanu hliníkového
Al ₂ O ₃	[-]	oxid hlinitý
ϕ_1	[°]	úhel posuvu vrstev v kluzných rovinách
ϕ	[°]	úhel stříhu
Ψ	[°]	rozdíl úhlů ϕ_1 a ϕ
ρ	[kg/m ³]	hustota
m	[kg]	hmotnost

V	[m ³]	objem
CAD	[-]	počítačem podporované programování
R	[MPa]	normálové napětí
R _m	[MPa]	pevnost v tahu
R _{ms}	[MPa]	pevnost ve stříhu
R _s	[MPa]	tečné napětí (ve stříhu)
R _{es}	[MPa]	mez kluzu ve stříhu
W	[-]	objemový součinitel třísek
V _t	[dm ³]	objem volně ložených třísek
V _m	[dm ³]	objem odebraného materiálu
λ	[W/m.K]	tepelná vodivost
μ	[-]	koeficient tření
a	[mm]	tloušťka odřezávané vrstvy
Δa	[mm]	zvětšení tloušťky odřezávané vrstvy
v	[m/min]	rychlost odcházející třísky
δ _{sk}	[°]	skutečný úhel řezu
ρ	[mm]	poloměr zaoblení ostří
ρ _{sk}	[mm]	skutečný poloměr zaoblení ostří
Q _e	[°]	teplo řezného procesu
Q _t	[°]	teplo odvedené třískou
Q _o	[°]	teplo odvedené obrobkem
Q _n	[°]	teplo odvedené nástrojem
Q _{pr}	[°]	teplo odvedené řezným prostředím
HRC, HRA	[HRC, HRA]	tvrdost dle Rockwella
A	[%]	tažnost
R _{p0,2}	[MPa]	mez kluzu
CCD	[-]	druh vysokorychlostní kamery
φ _{1,2}	[°]	jednotlivé úhly řezného oblouku
φ	[°]	úhel řezného oblouku
t	[s]	čas
RTI	[-]	Regionální technologický institut
3D	[-]	tří rozměrný
2D	[-]	dvou rozměrný
ω	[-]	objemový součinitel
B	[mm]	šířka obrobku
e	[mm]	excentricita
r	[mm]	poloměr nástroje
μm	[μm]	mikrometr
F	[N]	síla
l	[m]	délka

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Symetrické frézování [3]	15
Obrázek 2 - Nesymetrické frézování [3]	15
Obrázek 3 - Nastavení úhlu hlavního ostří [4]	16
Obrázek 4 - Geometrie břitu čelní frézy	17
Obrázek 5 - Schéma řezných podmínek při frézování [5]	20
Obrázek 6 - Hlavní mechanismy opotřebení břitu nástrojů [13].....	24
Obrázek 7 - Vliv teploty a řezných podmínek na jednotlivé mechanismy a průběh opotřebení [15]	24
Obrázek 8 - Průběh opotřebení v závislosti na době řezání [16].....	25
Obrázek 9 - Závislost objemu odebraného materiálu na hodnotě VB [18].....	27
Obrázek 10 - Vznik třísky [16]	29
Obrázek 11 - Oblasti plastické deformace [21].....	29
Obrázek 12 - Způsoby namáhání odřezávané vrstvy [20].....	30
Obrázek 13 - Schéma sousledného a nesousledného frézování [23]	33
Obrázek 14 - Čelní frézování	33
Obrázek 15 - Sousledné čelní frézování [23]	33
Obrázek 16 - Neousledné čelní frézování [23].....	33
Obrázek 17 - Tvoření nárůstku [22]	34
Obrázek 18 - Rozložení teplotního pole v průběhu obráběcího procesu [24].....	35
Obrázek 19 - Zdroje tepla při obrábění [24]	36
Obrázek 20 - Vznik a odvod tepla [25]	37
Obrázek 21 - DMU 40 eVo linear	39
Obrázek 22 - Čelní rovinná fréza s kruhovými VBD.....	40
Obrázek 23 - Frézovací hlava - Kraken [26].....	40
Obrázek 24 - Obrobek	40
Obrázek 25 - Dílenský mikroskop Multicheck PC 500	44
Obrázek 26 - Opticko-skenovací mikroskop IFM G4.....	44
Obrázek 27 - Dílenská váha BSA 220.4	45
Obrázek 28 - Třmenový mikrometr	45
Obrázek 29 - Mikroskop Keyence VHX-6000	46
Obrázek 30 - Schéma pro výpočet úhlu opásání	48
Obrázek 31 - Kontrolní výpočet úhlu opásání	49
Obrázek 32 - Schéma výpočtu kruhové výseče [29].....	50
Obrázek 33 - Plocha úhlu opásání	50
Obrázek 34 - Ideální plocha třísky	51
Obrázek 35 - 1-1 - 170 μ m	59
Obrázek 36 - 2-1 - 180 μ m	59
Obrázek 37 - 3-1 - 170 μ m	59
Obrázek 38 - 1-2 - 330 μ m	59
Obrázek 39 - 2-2 - 380 μ m	59

Obrázek 40 - 3-2 - 390 μ m	59
Obrázek 41 - 1-3 - 500 μ m	60
Obrázek 42 - 2-3 - 570 μ m	60
Obrázek 43 - 3-3 - 590 μ m	60
Obrázek 44 - Diferenční analýza VBD	60

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Doporučené řezné podmínky pro niklové slitiny [3]	19
Tabulka 2 - Nastavené řezné podmínky	27
Tabulka 3 - Řezné podmínky experimentu	41
Tabulka 4 - Chemické složení Inconel 718 - obsah v % [27]	42
Tabulka 5 - Mechanické a fyzikální vlastnosti [27]	42
Tabulka 6 - Naměřené hodnoty odebraného materiálu v milimetrech	47
Tabulka 7 - Dypočtené hodnoty V	51
Tabulka 8 - Hmotnosti objemu odebraného materiálu	53
Tabulka 9 - Naměřené hodnoty třísek	54
Tabulka 10 - Tvar vzniklých třísek	56
Tabulka 11 - Vypočtené hodnoty objemů třísek	57

Seznam grafů

Graf 1 - Průběh velikosti odebraného materiálu při nastavení hloubky řezu 0,5 mm v závislosti na opotřebení řezného nástroje	52
Graf 2 - Zhodnocení objemu odebraného materiálu z hlediska hmotnosti	53
Graf 3 - Průběh objemu odebraných třísek na opotřebení	58

1 Úvod

Současný vývoj moderní technologie si bez obrábění nelze představit. Stopa jeho využívání je vidět v mnoha odvětvích průmyslu, a proto se ve strojírenství řadí na přední místo. Nejedná se pouze o předměty moderní doby, ale také o předměty nezbytné pro každodenní život lidstva. Důležité je najít vhodné podmínky pro daný typ obrábění, aby objem odebraného materiálu byl, co nejvyšší a současně hodnota opotřebení, co nejnižší. Zároveň je důležité zajistit, aby rovnováha mezi ekonomickým faktorem a opotřebením řezného nástroje byla vyvážená. Toho lze docílit vhodným zvolením materiálu řezného nástroje, ale také pomocí vhodných řezných podmínek při obráběcím procesu.

Samotný obráběcí proces lze definovat, jako technologický proces, který umožňuje upravovat dané povrchy do požadovaných rozměrů, tvarů a jakostí, odebráním materiálu mechanickými, elektrickými aj. pochody. Součásti, které podléhají procesu obrábění, obecně nazýváme obrobek a obráběná plocha.

Tato diplomová práce se zabývá vlivem opotřebení nástroje na objem odebraného materiálu. Jako materiál pro tuto práci byla použita superslitina na bázi niklu, konkrétně tedy Inconel 718. Celá práce je rozdělena na dvě části: teoretický rozbor problematiky a experimentální verifikaci.

Teoretická část se zaměřuje na problematiku obrábění, kde je vysvětlena podstata čelního rovinného obrábění, které je využito v experimentální části. Jsou zde popsány správné parametry pro nastavení řezných podmínek, které by se měly využívat při práci se superslitinami na bázi niklu. Celá teoretická část se stává úvodem do samotného experimentu, neboť vše, co je v něm vysvětleno se využívalo i dále.

Cílem této diplomové práce je přiblížit čtenáři problematiku vlivu opotřebení řezného nástroje v závislosti na objemu odebraného materiálu. Experimentální část byla provedena v halových laboratořích Regionálního technologického institutu Západočeské univerzity v Plzni. Výstupem diplomové práce bude zhodnocení opotřebení vyměnitelné břitové destičky, tvar vzniklých třísek a také objem odebraného materiálu v závislosti na opotřebením nástroje.

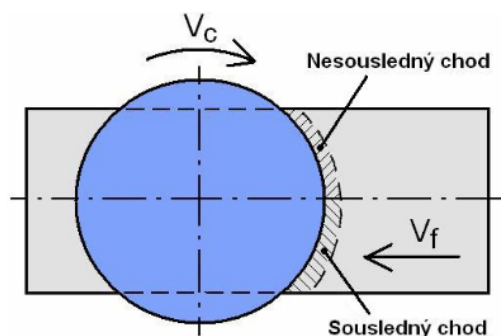
2 Rozbor současného stavu

2.1 Charakteristika čelního frézování

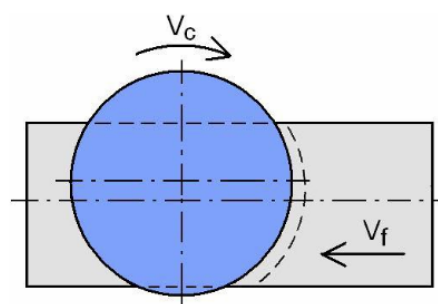
Při čelním frézování je materiál z obrobku odřezáván současně břity na obvodu i na čele frézy. Oproti válcovému frézování, se jedná o produktivnější metodu, jelikož v záběru je současně více zubů. Jedná se o proces obrábění, kdy je fréza upevněna na vřetenu stroje a otáčí se kolmo k pracovní ploše. Řezný nástroj je složen z několika odnímatelných břitů, které jsou známé jako vyměnitelné břitové destičky (VBD). Tyto VBD zanechávají na obrobku stopy po frézování v důsledku relativního pohybu mezi řezným nástrojem a obrobkem. [1]

Čelní frézování můžeme rozdělit, v závislosti na poloze osy frézy vzhledem k obrobku, na symetrické a nesymetrické. Při symetrickém frézování je osa nástroje stále ve středu frézované plochy. Osa tedy protíná osu plochy a plocha materiálu je obrobena na jeden posuv.

Naopak při nesymetrickém typu frézování osa nástroje neprotíná osu frézované plochy, ale v podstatě stále protíná rovnoběžku s osou této plochy. Plocha materiálu je obrobena na více posuvů.



Obrázek 1 - Symetrické frézování [3]



Obrázek 2 - Nesymetrické frézování [3]

V některých případech, jako tomu bylo v případě našeho experimentu, je vhodnější nesymetrický způsob frézování. Volí se proto, aby se zajistilo, že v místě vniknutí břitu do obrobku dojde k prvnímu dotyku mezi břitem a obrobkem dále od ostří. Tímto se výrazně zmenšuje nebezpečí lomu břitu. Dále se může využívat proto, aby v místě, kde břit vychází z místa řezu nevznikala příliš malá tloušťka třísky, jelikož zde může narůstat pravděpodobnost poškození břitu při odtrhávání částic nárůstku, která vzniká při extrémně tenké tříse. [2]

2.1.1 Frézování slitin na bázi niklu

Frézování materiálů spadajících do tzv. niklových superslitin, jsou velice problematické, jelikož mají austenitickou matici a jsou velice tvrdé. Navíc lokalizace smyku při vzniku třísky vytváří abrazivní pilové ozubené hrany, což vede k horší manipulaci s materiálem. Mezi hlavní požadavky slitin na bázi niklu patří vysoká rozměrová přesnost a hladký povrch obrobku. Frézování se od soustružení, vrtání a broušení liší přerušovaným řezem, který je u těchto

těžkoobrobitelných materiálů jednou z největších příčin velmi rychlého nárůstu opotřebení VBD. Na opotřebení mají vliv i další faktory, jako jsou:

- zvolené řezné podmínky
- geometrie nástroje
- obráběcí nástroje
- řezné prostředí
- materiál vyměnitelné břitové destičky [3]

2.1.2 Frézy s kruhovými VBD

Použití frézy s kruhovými břitovými destičkami je velice univerzální a v dnešní době jsou hojně využívány. Mají odpovídající předpoklady pro postupné zahlubování a používají se jak pro náročné aplikace při čelním frézování, tak i pro tvarované obrábění. Z důvodu nejvyšší pevnosti a odolnosti břitů jsou tyto frézy vhodné pro použití obrábění žáruvzdorných slitin třídy ISO S. Do této skupiny spadají zejména žáruvzdorné superslitiny na bázi niklu, kobaltu, železa a titanu. Tvrdost za tepla, pevnost a odolnost proti tečení a korozi předurčuje použití těchto materiálů v širokém rozpětí. Obrábění těchto materiálů je z mnoha důvodů velice náročné, a proto je důležité zvolit vhodný nástroj, aby se zajistila produktivní a spolehlivá řešení pro jejich použití. [3]

U frézovacích nástrojů je významným parametrem nástrojový úhel nastavení hlavního ostří κ_r . Na velikosti tohoto úhlu závisí tvar vzniklé třísky a tím i velikost řezných sil. Je to v podstatě úhel, který svírá hlavní ostří frézy s rovinou kolmou na osu rotace frézy.

Hodnota nastavení hlavního ostří u fréz s kruhovými VBD je přímo závislá na hloubce řezu a_p . Se zvyšující se hloubkou řezu narůstá úhel od nuly do 90° . Při změně úhlu se také mění směr výsledné řezné síly, jak je vyobrazeno na obrázku 3.



Obrázek 3 - Nastavení úhlu hlavního ostří [4]

V našem případě byl úhel κ_r vypočítán ze vzorce:

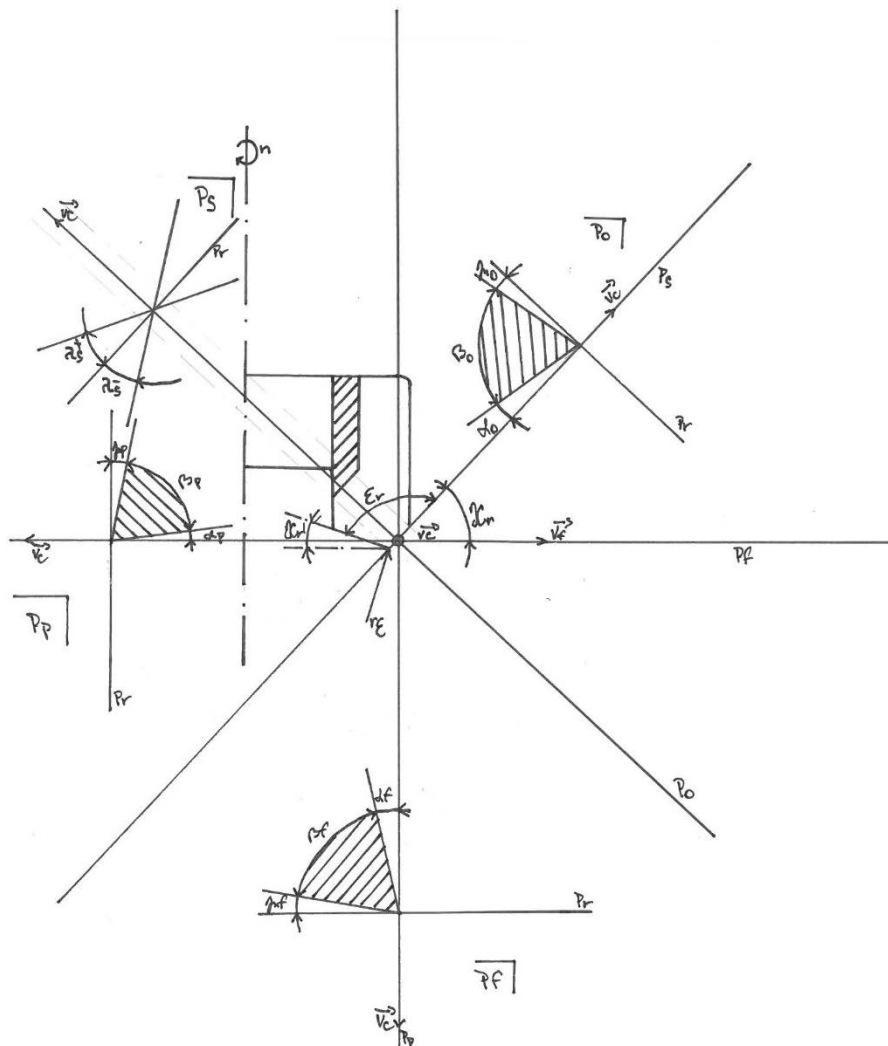
$$\operatorname{tg} \kappa_r = \frac{a_p}{\sqrt{a_p \cdot (d \cdot a_p)}} = \frac{0,5}{\sqrt{0,5 \cdot (12 \cdot 0,5)}} = 16 \text{ [}^\circ \text{]} \text{ [12]}$$

Úhel nastavení hlavního ostří vyšel 16° . U takto nízkých hodnot úhlů je předpoklad vysokého úběru materiálu. Je možné zde pracovat s extrémně vysokými rychlostmi posuvu, čímž opět docílíme velkého úběru materiálu z obrobku a směr ve kterém frézovací nástroje působí na nástroj je mnohem příznivější, jelikož nástroj je vystaven nižšímu radiálnímu zatížení, což omezuje vznik vibrací. [4]

2.1.3 Geometrie břítu frézy

Aby břit frézy byl schopen odebírat třísky, musí být náležitě upraven. Každá fréza je tvořena zuby, které mají klínovité provedení zakončené břitem, tvořeným dvěma plochami. Čelem a hřbetem. V průřezu těchto dvou ploch vzniká ostří, díky kterému můžeme odřezávat třísky.

Vzájemná poloha ploch břítu nástroje a obrobku tvoří soustavu úhlů, která se nazývá geometrie břítu. [5]



Obrázek 4 - Geometrie břítu čelní frézy

Správně zvolená geometrie frézovacího nástroje má zásadní vliv na životnost obráběcího nástroje. Pro čelní rovinné frézování slitin na bázi niklu se doporučují vysoce pozitivní úhly čela na nástroji. Pro dodržení správnosti geometrie jsou doporučeny tyto velikosti úhlů:

- úhel hřbetu v ortogonální rovině $\alpha_o = 7^\circ \div 10^\circ$
- úhel čela v ortogonální rovině $\gamma_o = 10^\circ \div 15^\circ$
- úhel čela v rovině zadní $\gamma_p = 10^\circ \div 15^\circ$
- šířka fazetky hlavní řezné hrany $b_\gamma = 0,2 \text{ mm}$
- pro frézovací hlavy je doporučený úhel nastavení $\kappa_r = 60^\circ$ [3]

Vhodná geometrie pro Inconel 718

Při obrábění Inconelu 718 lze použít podobnou geometrii, jako u oceli, ale s nižšími řeznými podmínkami a s ostřejší geometrií. U tohoto materiálu musíme dbát na kontakt třísky s čelem, protože tažnost je o něco vyšší než u běžně používaných ocelí. Z toho vyplývá, že řezné materiály pro tyto slitiny musí být houževnatější a mít co nejnižší tendenci k adhezi, to nám zajistí povlak. Dalším problémem je tepelná vodivost, která je výrazně nižší, než je tomu u oceli, to se projevuje menším odvodem tepla třískou a vyšším přenášením tepla do řezné hrany. Niklové superslitiny vykazují vyšší sklony k deformačnímu zpevnění. Toto musí zajistit správná geometrie ostří, neboť ostré hrany omezují deformační zpevnění při řezném procesu a rovněž je doporučeno měnit také hloubku záběru. [6]

2.1.4 Řezné podmínky pro frézování niklových slitin

Řezné podmínky můžeme definovat jako souhrn všech činitelů, kteří ovlivňují operaci frézování. K tomu, aby frézování probíhalo co možná nejlépe, tedy produktivně a hospodárně, je zapotřebí znát podmínky obrábění a jejich vzájemné propojení. Řezné podmínky u frézování se volí s ohledem na to, jaký obráběný materiál a frézovací nástroj se použije pro danou frézovací operaci. Mezi základními požadavky na nástroj jsou:

- vysoká tvrdost
- houževnatost
- značná pevnost
- odolnost proti opotřebení
- odolnost proti teplotním šokům, chemická stabilita

Vysoké nároky jsou kladeny i na zvolenou geometrii nástroje, ta musí za daných řezných podmínek splňovat co nejvyšší trvanlivost, dobrou pevnost a obrábění bez vibrací i chvění. [3]

Řezná rychlost a posuv

Řezné podmínky pro frézování niklových slitin jsou zvoleny tak, aby se zajistila rozměrová přesnost požadovaná kvalita obrobeneho povrchu, produktivita, ale také ekonomicky přijatelná trvanlivost nástroje.

Doporučené řezné rychlosti, posuvy a radiální či axiální hloubky řezu, pro obrábění těchto slitin se volí dle katalogu výrobců vyměnitelných břitových destiček. Zvolené velikosti těchto parametrů mají vliv na životnost nástroje. Příklady doporučených řezných podmínek od výrobců jsou uvedeny v tabulce č. 1. [3]

Druh VBD	Řezná rychlost [m/min]	Posuv na zub [mm]		Procesní kapalina
		Hrubování	Dokončování	
Slinutý karbid	20 – 75	0,1 – 0,4	0,05 – 0,2	s chlazením
Řezná keramika	300 – 1000	0,1 – 0,5	0,05 – 0,3	za sucha, i s chlazením

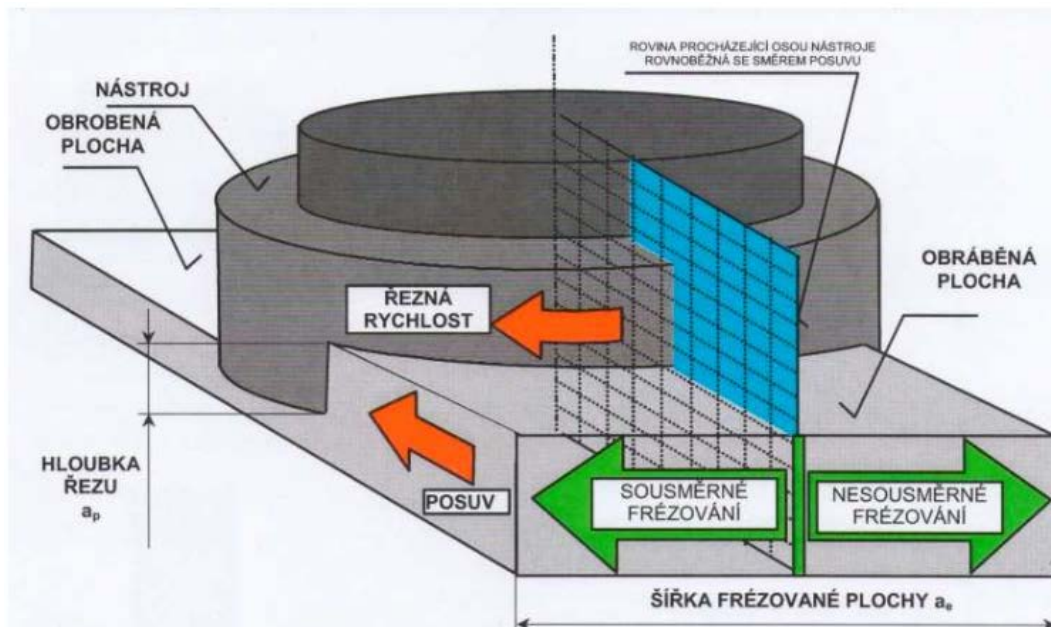
Tabulka 1 – Doporučené řezné podmínky pro niklové slitiny [3]

Z tabulky č.1 je patrné, že pro frézování niklových slitin za použití slinutého karbidu je vhodné řeznou rychlost volit mezi 20 – 75 m/min. Pro náš experiment byla řezná rychlost stanovena na 60 m/min. Pro snížení vlivu opotřebení nástroje je vhodné použít menší úhel nastavení hlavního ostří. Vždy je nutné pracovat s řeznou kapalinou a upřednostnit její přívod pod vysokým tlakem do těsné blízkosti břitu. Při splnění těchto podmínek dosáhneme vysoké produktivity neboli vysokého úběru materiálu.

Axiální a radiální hloubka řezu

Axiální hloubka řezu významně ovlivňuje objem odebraného materiálu. Nutno ji zvolit tak, aby docházelo k odebírání materiálu pod zpevněnou povrchovou vrstvou. Doporučená hodnota je do $\kappa 45^\circ$. V případě, že tuto hodnotu přesáhneme, dochází k nárůstu řezných sil a opotřebení ve formě vrubu.

Radiální hloubka řezu neboli šířka řezu, v případě rovinného frézování a při použití čelní frézy představuje, jakou částí průměru obrábí nástroj plochu obrobku. Šířka řezu nám ovlivňuje silové zatížení břitu. V záběru, který přesahuje poloměr nástroje působí na břit značné teplo a dochází tak k opotřebení nástroje. [7]



Obrázek 5 - Schéma rezných podmínek při frézování [5]

2.1.5 Řezné materiály vhodné k obrábění materiálu Inconel 718

Při obrábění slitiny Inconel 718 musí být rezný materiál tvrdší nežli vlastní obráběný materiál. Dalším problémem je nízká tepelná vodivost a tendence ke zpevňování. Proto je důležité vybrat vhodný rezný materiál. Mezi nejvýkonnější rezné materiály pro obrábění niklových superslitin patří kubický nitrid bóru, polykrystalický diamant, rezná keramika a slinuté karbidy.

Super tvrdé rezné materiály

Do této skupiny spadá polykrystalický kubický nitrid bóru (PKNB) a polykrystalický diamant (PD). Oba tyto materiály jsou jedny z nejtvrdějších a zároveň nejdražších materiálů na trhu. Polykrystalický diamant se vyrábí slinováním jemných krystalů diamantů za vysokých teplot a tlaků, jeho tvrdost se blíží tvrdosti monokrystalického diamantu. Životnost PD je mnohonásobně vyšší než životnost PKNB. Tvrdost PKNB je srovnatelná s tvrdostí diamantu a výrobní podmínky jsou obdobné jako pro PD, je tedy za potřeby ho vyrábět za vysokých teplot a tlaků. PKNB je chemicky stabilní, odolný proti abrazivnímu opotřebení a jeho tvrdost je přetrvávající i při teplotách kolem 1200 °C. [8]

Řezná keramika

Znaky rezné keramiky jsou především vysoká tvrdost, křehkost, chemická stálost a nízká tepelná vodivost. Tento materiál velice dobře snáší vysoké teploty na břitě, jelikož reaguje s kyslíkem až při teplotě 1200 °C a vyšší. Využití se pohybuje při rezných rychlostech kolem 300 – 1600 m/min.

Vysokovýkonným řezným materiálem je například materiál CBN (kubický nitrid boru), který má velice vysokou tvrdost. Vyšší tvrdost má pouze diamant. Využití CBN je zejména při obrábění materiálu s tvrdostí cca 45 HRC. Proto je vhodný pro práci s Inconel 718, neboť CBN nereaguje s původci karbidu, které jsou obsaženy ve výše uvedených materiálech.

Řezná keramika se dělí na oxidickou, neoxidickou, směsnou a povlakovou. Pro obrábění Inconelu 718 se využívá řezná keramika neoxidická, jejíž složení je na bázi nitridu křemíku. [9]

Slinutý karbid

Slinutý karbid je jedním z nejvyužívanějších materiálů pro VBD. V současnosti představují 80-90 % veškerých břitových destiček, které se používají pro obráběcí nástroje. Jejich výhodou je kombinace odolnosti proti opotřebení a houževnatosti. Doporučená řezná rychlost pro SK, je z důvodu tvoření nárůstku, velmi nízká a pohybuje se v řádech desítek m/min.

Na nástroje ze slinutých karbidů se většinou nanášejí tenké vrstvy povlaků metodou PVD nebo CVD. [11]

Metoda PVD

Původně byla tato metoda vyvinuta pro nástroje z rychlořezných ocelí, a proto se nanášení provádí za nízkých teplot, které se pohybují okolo 500 °C. Pokud by se nanášení provádělo za vysoké teploty, tak by mohla ovlivnit vlastnosti samotné oceli. Principem této metody je částečně ionizovaná pára kovu, která reaguje s plynem a vytváří tak tenkou vrstvu na základním materiálu. Samotný proces vychází z postupného odpařování kovu, který reaguje například s dusíkem. [10]

Hlavní složky PVD povlaků:

- TiN – Jedná se o nitrid titanu, který byl jako první nanášený metodou PVD. Má univerzální vlastnosti a zlatavou barvu
- TiCN – Tento karbonitrid titanu je tvrdší než TiN a zvyšuje odolnost proti opotřebení hřbetu
- TiAlN – titan aluminium nitrid se vyznačuje vysokou tvrdostí v kombinaci s vysokou odolností proti oxidaci, což přispívá ke zvýšení odolnosti vůči opotřebení [10]

Metoda CVD

Tato metoda probíhá za vyšších teplot, v rozmezí od 700 – 1500 °C. Principem této metody je reakce par povlakovaného kovu s podkladovým kovem. Tento děj je nutné vyvolat, což je možné například tepelně (nejčastější případ), plazmaticky, elektronově nebo fotonově. Výsledkem je povlak s velmi nízkým vnitřním pnutím. [9]

Hlavní složky CVD povlaků:

- TiN – tato vrstva zlepšuje odolnost proti opotřebení, ale také se využívá pro zjištění stupně opotřebení
- TiCN – jeho tvrdost zajišťuje odolnost proti opotřebení otěrem, což má za následek menší opotřebení hřbetu nástroje
- Al₂O₃ – Tato vrstva je chemicky inertní nízkou tepelnou vodivostí, zároveň tvoří chemickou a tepelnou bariéru a tím brání plastické deformaci břitu [11]

Hlavním rozdílem mezi PVD a CVD metodou je vznik tlakových zbytkových napětí, které se tvoří na povrchu břitu nástroje u metody PVD a tahových zbytkových napětí u metody CVD. Tlakovým napětím dochází ke zvýšení houževnatosti tenké vrstvy a tahová napětí vedou k větší křehkosti tenké vrstvy.

Pro náš experiment byla zvolena VBD s povlakem CVD metody, která dosahuje tvrdosti 89,3 HRA s tloušťkou vrstvy 4 μm. Hlavní příměsí povlaku byl zvolen nitrid titanu, který se může využívat pro mokré obrábění. [11]

2.2 Objem odebraného materiálu

Objem odebraného materiálu představuje, kolik centimetrů krychlových materiálu odebere břit VBD do jeho kritické hodnoty opotřebení na hřbetě. Ideální objem odebraného materiálu se vypočítá z obsahu plochy, která vychází z dráhy nástroje a hloubky řezu. V dráze nástroje je nutné uvažovat také úhel opásání nástroje, který vyjadřuje úhel styku frézy s obrobkem.

$$V = S \cdot a_p [m^3]$$

S = frézovaná plocha

a_p = hloubka řezu

Srovnání objemu odebraného materiálu s úběrem odebraného materiálu

Tento pojem vyjadřuje, kolik centimetrů krychlových materiálu za jednotku času, obrobí břit VBD, než dojde k dosažení jeho kritické hodnoty opotřebení na hřbetě břitu. Ve výrobní technologii je úběr odebraného materiálu významným faktorem pro hodnocení produktivity nástrojů a strojů. Ve většině případů se snažíme zvýšit produktivitu zvýšením rezné rychlosti nebo rychlosti posuvu.

Vztah pro výpočet úběru odebraného materiálu:

$$Q = \frac{a_p \cdot a_e \cdot v_f}{1000} [cm^3/min] [12]$$

a_p = hloubka řezu

a_e = šířka řezu

v_f = posuvová rychlost

K zajištění vhodných podmínek pro proces řezání a pro maximální úběr materiálu z obrobku, musíme brát v úvahu několik aspektů:

- míru opotřebení nástroje
- mechanika tvoření třísky
- teplo vzniklé při obrábění
- materiál obrobku

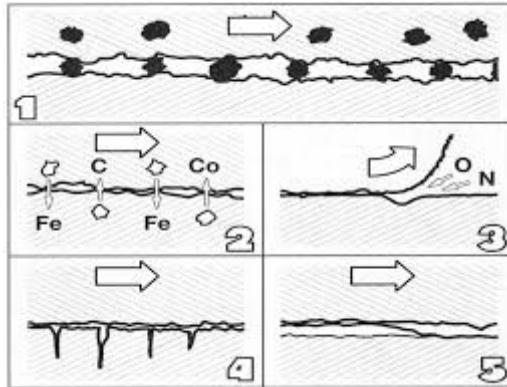
2.3 Opotřebení nástroje

Jedná se o proces, při kterém dochází ke zvyšování poloměru zaoblení ostří, zhoršuje se drsnost plochy čela a hřbetu v místech styku s třískou a plochou řezu, tím postupně dochází ke změně geometrie břitu. Při obrábění vzniká velké množství tepla, které se tvoří na ploše hřbetu a čele nástroje. Na obrázku 6 jsou vyobrazeny hlavní mechanismy opotřebení břitu, kdy jejich kombinací dochází k velmi složitému zatěžování břitu samotného nástroje, a to má za následek opotřebovávání nástroje. [13]

Opotřebení řezných nástrojů se stanovuje na základě následujících mechanismů:

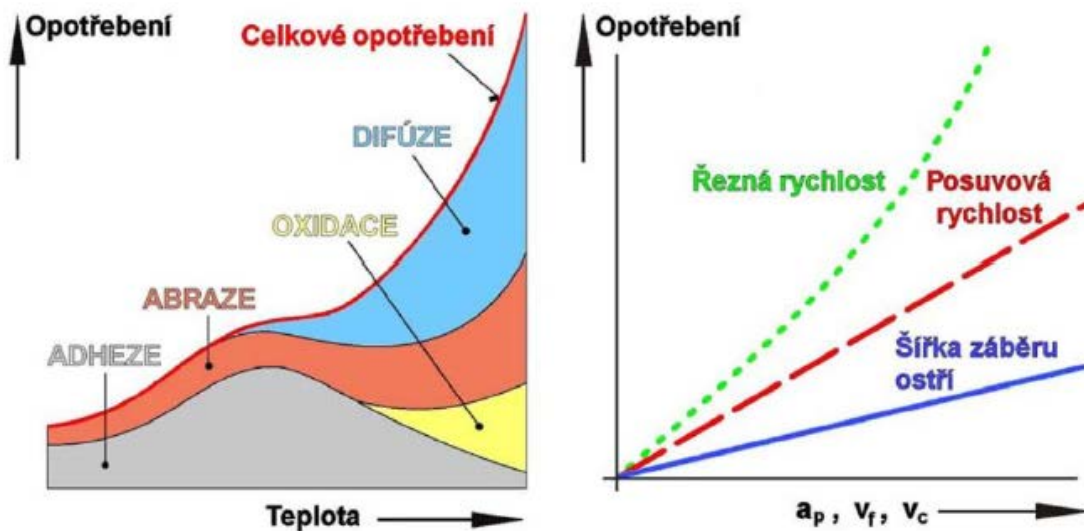
- **Abraze** – jedná se o obrušování nástroje, které patří mezi fyzikální mechanismy a je způsobena třením třísky o čelo nástroje a třením obrobené plochy o hřbet nástroje
- **Adheze** – je důležitá při použití nižší řezné rychlosti, kdy teplota, která vzniká mezi třískou odcházející po čele nástroje a čelem, nedosahuje příliš vysokých hodnot.
- **Difuze** – patří mezi chemické formy opotřebení, kdy difuzní mechanismus je dominantní zejména při teplotách nad 800 °C. Vzhledem k tomuto jevu se vytváří nežádoucí chemické sloučeniny ve struktuře nástroje.
- **Oxidace** – představuje chemický mechanismus opotřebení probíhající pomocí přítomnosti kyslíku, který je obsažen v atmosféře. Jedná se o vznik chemických sloučenin na povrchu nástroje v návaznosti na přítomnost kyslíku v okolním prostředí.
- **Lom** – jedná se o důsledek velmi vysokého mechanického zatížení břitu. V případě, že dojde ke zlomení, musí se proces obrábění přerušit, jelikož již nedokážeme odebrat třísku z obrobku.

- **Plastická deformace** – je způsobena vlivem vysokého tepelného a mechanického zatížení, který narůstá vlivem času. Plastická deformace vzniká vlivem teplot přesahujících mez stability samotného materiálu. [13]



Obrázek 6 - Hlavní mechanismy opotřebení bříty nástrojů [13]

Mezi fyzikální mechanismy opotřebení patří adheze s abrazí a do chemických mechanismů řadíme difúzi společně s oxidací. Během obrábění dochází k plynulému působení všech těchto mechanismů. Plastickou deformaci a křehký lom lze chápat jako mezi mechanismy náhlé, což znamená, že po jejich působení je nutná výměna nástroje nebo jeho částí.



Obrázek 7 - Vliv teploty a řezných podmínek na jednotlivé mechanismy a průběh opotřebení [15]

2.3.1 Klasifikace typů opotřebení nástroje

Tato klasifikace byla vytvořena za účelem posouzení operací v obrábění a zvýšení objemu odebraného materiálu z obrobku.

Pro volbu správných druhů nástrojových materiálů a pro určení správných podmínek obrábění jsou k dispozici následující kritéria obrábění:

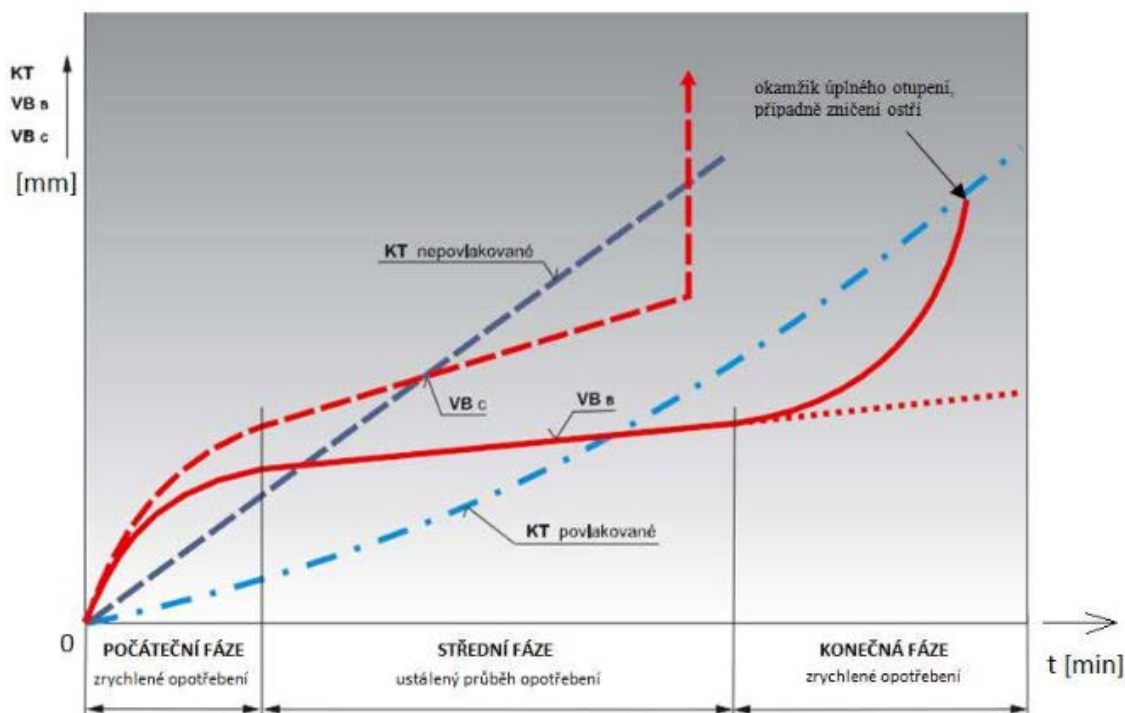
- přesnost rozměrů
- jakost obrobené plochy
- kontrolovaný odchod třísky

Opotřebení vzniklé při frézování niklových slitin

Při frézování slitin na bázi niklu vzniká intenzivní opotřebení na hřbetu nástroje, které můžeme rozdělit do tří základních stádií:

- První fáze – opotřebení které se projevuje otěrem hřbetní plochy s částečným kráterovým opotřebením. Dále je zde možné pozorovat mírné opotřebení ostří nástroje.
- Druhá fáze – tato fáze je časově delší vůči předcházející a projevuje se několikanásobně větším opotřebením vrubového charakteru.
- Třetí fáze – zde dochází k otěru hřbetní plochy tak, že se vyrovnává velikost opotřebení vrubového charakteru a ostří nástroje. [3]

Na základě těchto znalostí lze dojít k závěru, že nejčastější opotřebení vzniklé při frézování niklových slitin je opotřebení přímé části ostří (VB_B), opotřebení v oblasti špičky nástroje (VB_C) a hloubka výmolu na čele (KT). Na obrázku 8 je vyobrazena závislost opotřebení těchto parametrů na čase.



Obrázek 8 - Průběh opotřebení v závislosti na době řezání [16]

Počáteční fáze – zrychlené opotřebení – obecně souvisí se záběhem nástroje a je způsobeno vysokým měrným tlakem na okrajích nerovností nástroje.

Střední fáze – ustálený průběh opotřebení – dochází k lineárnímu nárůstu opotřebení a intenzita je neměnná.

Konečná fáze – zrychlené opotřebení – bývá spojeno s limitní teplotou řezání a poklesem tvrdosti nástroje, nastává velmi rychlé opotřebení. [15]

2.3.2 Opotřebení při obrábění Inconelu 718

Jedním z nejdůležitějších parametrů při obrábění Inconelu 718 je vhodná volba rezných materiálů a technologického postupu. Inconel 718 je superslitina na bázi niklu, která je využívána zejména pro svoji vysokou tepelnou pevnost, vynikající odolnost proti tečení a odolností proti korozi. Problém s tímto materiálem nastává při obrábění, poněvadž je znám jako těžko opracovatelný materiál, což způsobuje nevýhody během obráběcího procesu, jako je nízká tepelná vodivost, vysoká chemická afinita s téměř všemi nástroji, ale také vysoká pevnost. Všechny tyto parametry vedou k destrukci nástroje nebo VBD.

Při obrábění Inconelu 718 dochází ke vzniku opotřebení v podobě výmolu na čele. Toto opotřebení vzniká důsledkem abrazivního a difúzního procesu. V místech, kde se tříška otírá o čelo nástroje vznikají vysoké teploty a tím je podstatně urychlen celý proces difúze a obrušování čela nástroje tvrdými částicemi třísky. Důsledkem typu opotřebení výmolu na čele je změna tvaru utvařeče třísky, což může vézt ke zhoršení odchodu třísky z řezu. [14]

Dále může vznikat opotřebení v podobě vrubu na hlavním ostří v axiální hloubce řezu, tento druh je častým z důvodu deformačního zpevnování materiálu během obrábění. Pro získání nižšího opotřebení je vhodné zvolit menší úhel hlavního ostří, z důvodu menších rezných sil. Tento jev prodlužuje životnost nástroje a může vézt ke snížení velikosti vrubu.

Kromě vrubu se na nástroji vyskytuje opotřebení v podobě plastické deformace, která je způsobena vysokou teplotou a také tlakem, který je vyvinut na rezný nástroj během obrábění. V závislosti na tyto dvě veličiny, je Inconel 718 vhodným materiálem, neboť splňuje kritéria na požadavky ohledně vysoké tvrdosti nástroje při vyšších teplotách. [17]

Výsledky obdobného experiment ze zahraniční instituce

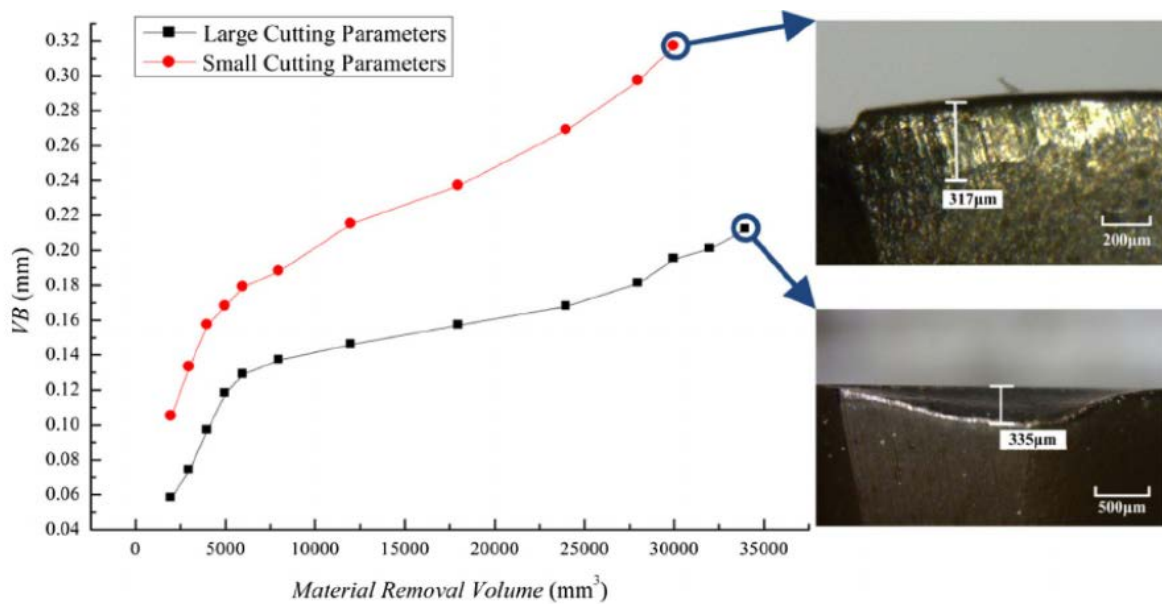
Tématem analýzy opotřebení nástroje při čelním frézování slitiny železa při zachování konstantního odběru materiálu se zabýval Song Zhang z Londýna v odborné publikaci s názvem „*Analýza opotřebení nástroje při čelním frézování slitiny železa za konstantního stavu při odebrání materiálu (Analysis of tool wear in face milling of alloy cast iron under constant material removal volume condition)*“. Tato studie si klade za úkol zanalyzovat morfologii a mechanismy opotřebení nástroje. [18]

Pro tento experiment byl použit materiál obrobku HTCuCrSn-250. K běžnému materiálu šedé litiny HT-250 byly přidány legující prvky chromu, mědi a cínu. Obrodek byl následně tepelně zpracován žíháním. Rozměr obrobku byl zvolen 100 x 100 x 30 mm. Použitým rezným nástrojem byla fréza o průměru 80 mm s břitovou vyměnitelnou destičkou typu SEKN1203AFTN od společnosti Seco. Tento druh destičky byl potažen povlakem TiC, TiN/Al₂O₃. Pro tento experiment byly použity dvoje rozdílné rezné podmínky.

	Řezná rychlost [m/min]	Hloubka řezu [mm]	Šířka řezu [mm]	Posuv na zub [mm]
Vyšší parametry	800	1,5	1,5	0,4
Nižší parametry	350	0,5	0,5	0,2

Tabulka 2 - Nastavené rezné podmínky

Pro vyhodnocení velikosti opotřebení byl použit dílenský mikroskop Dino – Lite, AN413ZT. Během frézování se vytvořilo opotřebení na čele, které je vyobrazené na obrázku 9.



Obrázek 9 - Závislost objemu odebraného materiálu na hodnotě VB [18]

Z vyobrazených hodnot vyplývá, že pro stanovenou nižší reznou podmínku bylo změřeno opotřebení nástroje okolo 317 μm, a naopak pro vyšší podmínku bylo změřeno 335 μm. Při těchto hodnotách opotřebení již zůstává na VBD linii abrazivního opotřebení a současně je vidět počátek výmolu na čele ostří. Pevnost nástroje byla oslabena oxidací a difúzí. K vážnému opotřebení nástroje došlo v důsledku úlomků, které byly odloupnuty z břitu nástroje. Tento experiment posuzuje objem odebraného materiálu v závislosti na opotřebení. Při stanovení nižších rezných parametrů jako je rezná rychlost a hloubka řezu dochází k menšímu objemu odebraného materiálu. S ohledem na teorii tepelné únavy lze také vyvodit, že menší rezné

parametry, zejména axiální hloubka řezu a radiální hloubka řezu způsobí mnohem vyšší teplo, než je tomu při vyšších řezných parametrech. Z tohoto důvodu může docházet ke zhoršení opotřebení nástroje.

Při vyšších řezných parametrech se zvyšuje řezná síla a zároveň podíl tepla v okolí řezu a dochází k mnohem vyšší četnosti tvoření třísek. Z toho vyplývá, že při vyšších řezných parametrech bude vyšší objem odebraného materiálu při nižší hodnotě opotřebení nástroje. [18]

2.4 Tvorba a tvarování třísek

Třísku si lze představit jako deformovanou odřezávanou vrstvu materiálu z obrobku. Při obrábění dochází k oddělování částic materiálu z obrobku, kde přebytečný materiál ve formě třísky odebírá břit nástroje. Proces obrábění je procesem intenzivní plastické deformace, která vzniká podél smykové roviny materiálu obrobku, která je tvořena břitem nástroje. V případě, že překročíme pevnost v namáhání dané smykové roviny, dochází k přeměně materiálu v třísku.

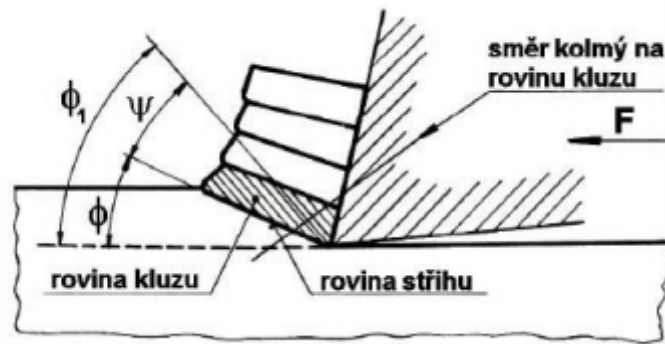
Při procesu obrábění je nutné uvažovat rozdílné vlastnosti materiálů a s tím spojenou různou obrábělností materiálů. K oddělování třísky je tedy nutné používat vhodně navržené břity nástrojů a vybrat správný materiál břitu. V dnešní době je obrábění zaměřeno především na vhodné utváření třísky, kde se snažíme minimalizovat energetickou náročnost obrábění, maximalizovat životnost nástroje a dosahovat požadovaných kvalit obráběné plochy. [15]

2.4.1 Plastická deformace třísky

Při řezném procesu dochází v oblasti tvoření třísky k pružným a následně k plastickým deformacím vlivem vnikání řezného nástroje do materiálu obrobku. Břit nástroje vniká do obrobku silou F .

Napětové pole v zóně řezání je rozloženo na napětové pole v obrobku a nástroji. Pružné deformace jsou rozloženy po celém objemu obrobku, ale plastické deformace zahrnují pouze zónu řezání.

Smyková napětí se zvyšují do té chvíle, než dojde k plastické deformaci materiálu obrobku před břitem nástroje (posuv vrstev v kluzných rovinách pod úhlem ϕ_1). Pohyb nástroje pokračuje dál a tím dochází k růstu plastické deformace a k přechování a posunu vrstev materiálu ve směru kolmém ke kluzným rovinám. Ve chvíli, kdy dojde k oddělení třísky, dojde zároveň k ukončení procesu plastické deformace. Plastický lom nastává působením kluzné síly, zatímco křehký lom působením síly normálové. [16]

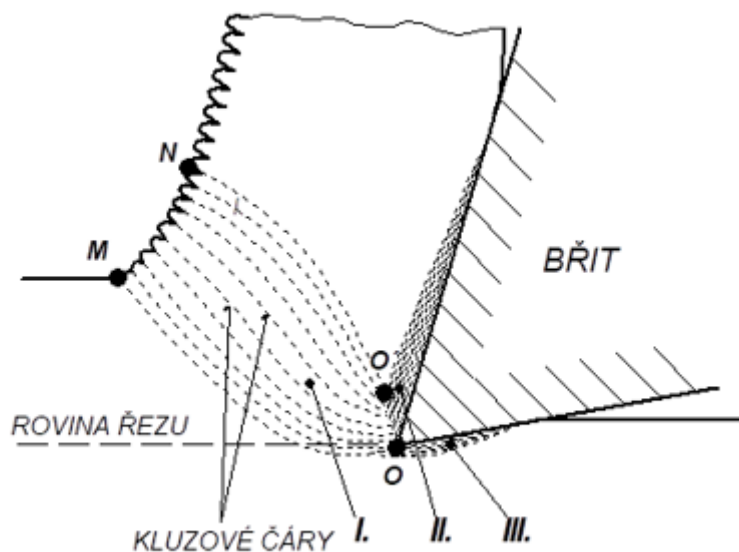


Obrázek 10 - Vznik třísky [16]

Při dalším pohybu nástroje roste i napětí v materiálu. Při dosažení vyšší hodnoty, než je hodnota meze stříhu obráběného materiálu dojde k oddělení segmentu třísky pod úhlem stříhu ϕ . Rozdíl mezi úhly ϕ_1 a ϕ se pohybuje v rozmezí $\Psi = (0 \div 30^\circ)$ nízké hodnoty úhlu Ψ představují tvárné materiály (např. ocel), vysoké hodnoty naopak materiály křehké (např. keramika). [16]

Oblasti plastické deformace

Při vnikání břitu nástroje do obráběného materiálu vznikají pružné a následně plastické deformace v těchto oblastech:



Obrázek 11 - Oblasti plastické deformace [21]

I. Oblast primární plastické deformace

První oblast je tvořena postupným vnikáním břitu nože do obráběného materiálu, při kterém vznikají nejprve pružné, později trvalé plastické deformace částic oddělovaného materiálu. Mez

kluzu se zvyšuje vlivem zpevnění materiálu. Plastické deformace v oblasti OMNO způsobují změnu rozměrů průřezu odřezávané vrstvy materiálu, změnu krystalické struktury a zpevnění materiálu vzniklé třísky. [21]

II. Oblast sekundární plastické deformace

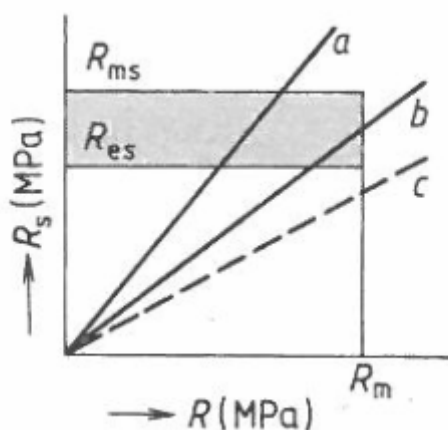
V povrchových vrstvách plochy styku třísky s čelem nástroje pomocí tření vzniká sekundární oblast. V dotykové ploše dochází k intenzivnímu tření, kdy dochází k překonávání povrchových nerovností a adhezních sil na úrovni svarů za studena. V třísece pak vzniká váznuocí vrstva a z té se případně může vytvořit poměrně stabilní nárůstek.

III. Oblast terciální plastické deformace

Tato oblast vzniká současně se sekundární plastickou deformací. Vlivem zaoblení ostří a rozsáhlé oblasti primární plastické deformace zasahující až pod rovinu řezu, dochází k plastické deformaci vrstvy těsně pod obroběným povrchem. Důsledkem těchto dvou faktorů vzniká zpevnění materiálu povrchové vrstvy. Toto zpevnění je výsledkem zbytkových pnutí zůstávajících v povrchové vrstvě po její plastické deformaci. Zpevnění také způsobuje vyšší tvrdost povrchové vrstvy obroběné plochy. [21]

2.4.2 Mechanika tváření třísky

Při vnikání břitu řezného nástroje do obrobku je odřezávaná vrstva obrobku velice namáhána a značně deformována. Podle poměru pevností v tahu a ve smyku obráběného materiálu nastanou případy, které jsou vyobrazeny na obrázku 12.



R = normálové napětí
R_m = pevnost v tahu
R_{ms} = pevnost ve stříhu
R_s = tečné napětí (ve stříhu)
R_{es} = mez kluzu ve stříhu

Obrázek 12 - Způsoby namáhání odřezávané vrstvy [20]

1. Namáhání podle přímky *a*

Tečné napětí dosáhne v tomto případě meze kluzu ve stříhu a meze pevnosti ve stříhu dříve než normálové napětí meze pevnosti v tahu. Materiál odřezávané vrstvy se plasticky tváří a následně odděluje. Vlivem plastického kluzu zde vzniká tříška tvářená (soudržná, plynulá, článkovitá, celistvá), která je typická pro oceli, slitiny hliníku, mědi a pro podobně houževnaté materiály. [19]

2. Namáhání podle přímky *c*

Toto namáhání vzniká v případě, že normálové napětí dosáhne meze pevnosti v tahu dříve než tečného napětí meze kluzu. Materiál odřezávané vrstvy je odtržen bez dalšího tváření a vzniká tříška bez předchozího tváření, která je typická pro obrábění dřeva, plastů a skla. [22]

3. Namáhání podle přímky *b*

Tento případ může nastat mezi krajními body *a* a *c*. Normálové napětí zde dosahuje meze pevnosti v tahu dříve než tečné napětí meze pevnosti ve stříhu, ale zároveň později než meze kluzu a materiál je tedy před oddělením z větší části tvářen. Vzniká zde elementární částečně tvářená tříška, která se vytváří v případě obrábění křehkých kovových materiálů jako je litina či bronz. [21]

2.4.3 Tvar třísek dle objemového součinitele *W*

Požadavek na tvar a rozměr třísek lze také hodnotit pomocí objemového součinitele třísek. Co nejmenší objem a tvar třísek slouží k jednoduchému odstranění z prostoru obráběcího stroje. Nevhodné třísky jsou většinou plynulé třísky, které se snadno namotají nástroj a mohou poškodit obrobek a nástroj. Zvyšuje se zde také riziko zranění obsluhy stroje při manipulaci s obrobkem. Vhodné jsou třísky malých rozměrů, kterých docílíme vhodnou geometrií rezného nástroje. V tomto ohledu jsou důležité také rezné podmínky, zejména rezná rychlost a posuv nástroje. Dalším kritériem, který hraje důležitou roli je také materiál obrobku nástroje.

Pro výpočet hodnoty objemového součinitele se vychází z následujícího vztahu:

$$W = \frac{V_t}{V_m} [-] [21]$$

V_t [dm³] = objem volně ložených třísek

V_m [dm³] = objem odebraného materiálu korespondující s V_t

V našem případě nebylo možné počítat tvar, rozměr, hmotnost a objem dle objemového součinitele, jelikož jsme během obrábění neodebírali dostatečný počet třísek pro vyhodnocení objemu odebraných třísek. Pomocí laboratorních měřidel jako je váha, dílenský mikroskop a dílenská měřidla bylo možné vypočítat objem odebraných třísek dle základního matematicko – fyzikálního modelu.

$$\rho = \frac{m}{v} [kg/m^3]$$

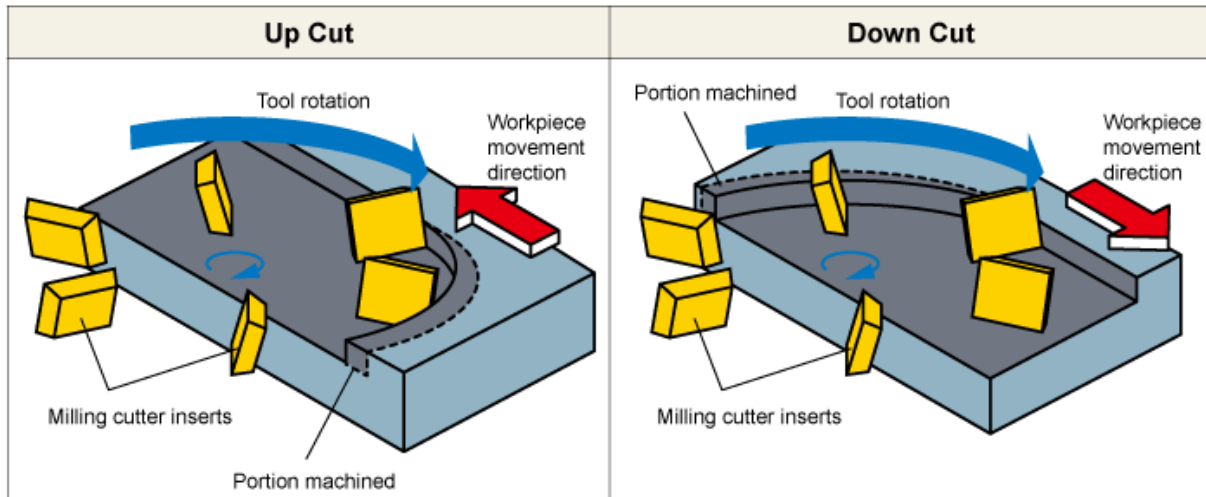
Po vyjádření objemu z této rovnice, je možné vypočítat skutečný objem odebraného materiálu.

$$V = \frac{m}{\rho} [m^3]$$

Následně bylo možné vypočítat skutečný objem odebraných třísek z řezu. K tomuto výpočtu bylo zapotřebí zjistit hodnotu hustoty materiálu, která je dohledatelná z materiálového listu. Pro kontrolu výpočtu je také možné vymodelovat tvar odebírané třísky v některém z CAD softwarů a poté pomocí výpočtu plochy třísky a následným vynásobením s hodnotou posuvu, je možné získat objem jedné odebírané třísky.

2.4.4 Formování třísek při obrábění oceli Inconel 718

Na základě studie, která porovnávala sousledné (down) a nesousledné (up) čelní frézování materiálu Inconel 718 s vícevrstevnými karbidovými destičkami potaženými TiAlN „(Comparison between up-milling and down-milling operations on tool wear in milling Inconel 718)“ a kterou se zabýval M. A. Hadi a kolektiv na Univerzitě Kebangsaan v Malajsii bylo zjištěno, že při sousledném frézování byly získány vhodnější výsledky týkající se opotřebení nástroje než při nesousledném frézování. Při sousledném frézování docházelo ke tvorbě třísky na hřbetě nástroje, které způsobilo opotřebení ve tvaru vrubu, zatímco při použití nesousledného frézování došlo k vytvoření dvakrát větších třísek.



Obrázek 13 - Schéma sousledného a nesousledného frézování [23]

Během nesousledného obrábění se nízká řezná síla podílela na působení vibrací během řezného procesu. Obecně tyto vibrace mohou vést ke zvýšení opotřebení nástroje, snižování životnosti stroje a omezení produktivity. Při této studii byla získaná tříska ve tvaru pilového zubu, která je v porovnání s naším experimentem téměř totožná. Tato tříska navíc způsobuje zvýšené opotřebení nástroje a zhoršení povrchu obrobku. Tříska, která byla získaná během našeho experimentu je vyobrazena na obrázku 14 a pro srovnání je zde přiložena i tříska ze studovaného experimentu. [23]



Obrázek 14 – Čelní frézování



Obrázek 15 –Sousledné čelní frézování [23]



Obrázek 16 - Nesousledné čelní frézování [23]

Na základě tohoto výzkumu je zřejmé, že utváření třísek při sousledném frézování probíhá opačně než při nesousledném frézování. Při nesousledném frézování se vytvářejí větší třísky, což je způsobeno vlivem vyšší řezné síly během kontaktu na vstupu nástroje do obrobku. Kromě tohoto jevu, podporují tvar třísky menší vibrace v místě řezu. Při sousledném frézování dochází k nižšímu opotřebení nástroje, čímž vzniká kvalitnější povrch obrobku. [23]

Obecně bylo zjištěno, že opotřebení nástroje při nesousledném frézování je rychlejší. To vychází z faktu, že během obrábění materiálu je využívána vyšší řezná síla na vstupu nástroje do obrobku. Tím je nástroj více mechanicky namáhán, než by tomu bylo při nižší řezné síle. Tyto parametry mají rovněž vliv na objem odebraného materiálu. [23]

2.4.5 Nárůstek a jeho tvorba

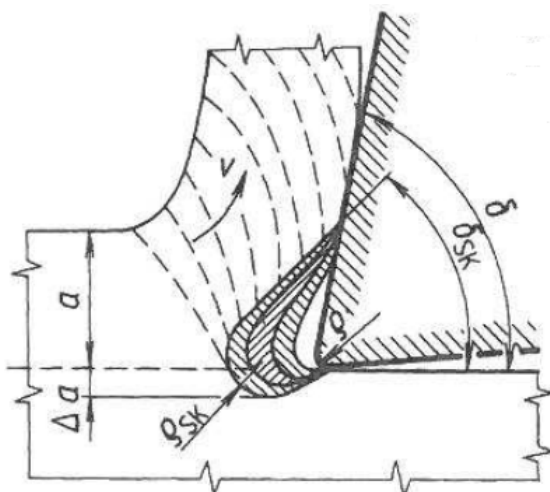
V důsledku plastické deformace odřezávané vrstvy se vytváří tříska, která odchází po čele nástroje, přičemž se již nedeformuje. Při pohybu musí tříska překonat třecí síly a zároveň je vystavena vysoké teplotě. Tyto jevy vedou k vytváření adhezních spojů, a to má za následek rostoucí tečné napětí ve vrstvách, které jsou nejbližší čelu nástroje. Způsobená tečná napětí vyvolávají v třisce další plastickou deformaci. [20]

Nárůstek se může vytvořit pouze na základě těchto předpokladů:

- vysoká adheze mezi obrobkem a břitem (Jedná se o adhezní navařování, které vznikají při dotyku čistých kovových povrchů, vyšších teplotách a vyšším napětím ve stykové ploše)
- schopnost zpevňování obráběného materiálu při jeho plastické deformaci [21]

Tvoření nárůstku je ovlivněno:

- vlastnostmi obráběného materiálu (velikostí meze pevnosti)
- vlastnostmi řezného materiálu (koeficient tření μ , tepelná vodivost λ , adhezní vlastnosti)
- řeznou rychlostí v_c a teplotu deformovaného kovu
- pracovní geometrií břitu (úhel čela γ), řeznými podmínkami, řezným prostředím [21]



- a – tloušťka odřezávané vrstvy
- Δa – zvětšení tloušťky odřezávané vrstvy
- v – rychlost odcházející třísky
- δ – úhel řezu
- δ_{sk} – skutečný úhel řezu
- ρ – poloměr zaoblení ostří
- ρ_{sk} – skutečný poloměr zaoblení ostří

Obrázek 17 - Tvoření nárůstku [22]

Při obrábění ocelí je nejintenzivnější tvorba nárůstku při teplotách +300 až +400 °C. Nárůstek má někdy kladný význam, kdy přebírá vlastní funkci břitu a chrání břit před jeho otěrem. Zároveň má ale vliv záporný, který však převažuje. Tento vliv vede k vylamování ostří nástroje a zhoršuje jakost obrobenej plochy. [22]

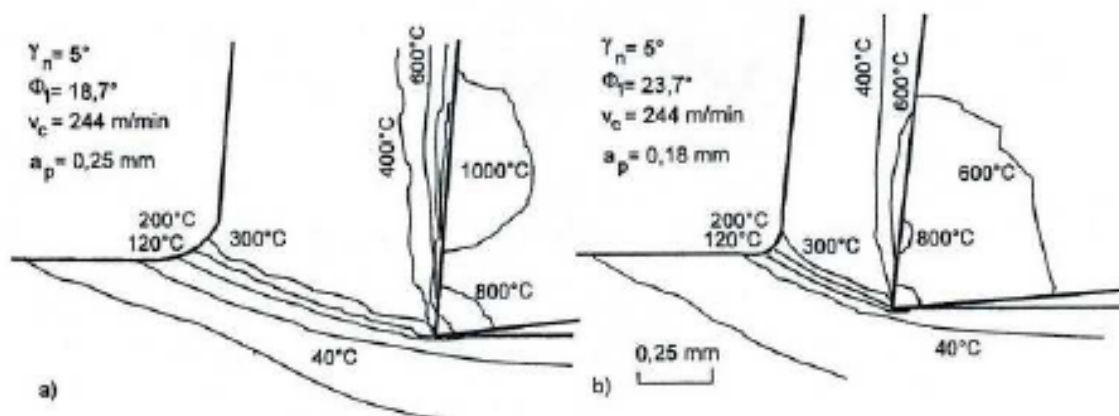
2.5 Vznik tepla a tepelná bilance

2.5.1 Vznik tepla

Řezný proces si lze představit jako fyzikálně-mechanický děj, kdy dochází k přeměně vstupní energie na energii vynaloženou na vytvoření třísky. Při samotném úběru materiálu dochází k překročení kohezni pevnosti mezi deformovaným a nedeformovaným materiálem. Celý tento proces je doprovázen uvolňováním velkého množství tepla.

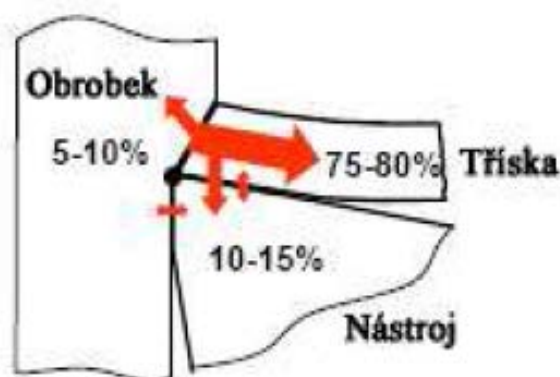
Další teplo vzniká při tření třísky s čelem nástroje. Hlavním důvodem je existence mikro nerovností, které se vyskytují vždy na obou dvou plochách. Tyto nerovnosti mají za následek zvýšení adheze mezi odcházející třískou a povrchem nástroje. Zde dochází k nárůstu třecí energie, kterou je nutné následně překonat zvýšením vstupní energie, která přichází do procesu obrábění. Z toho vyplývá, že pro tvorbu tepla na břitu nástroje je zapotřebí více než 90% vstupní mechanické energie.

Teplota na čele břitu nástroje může za daných podmínek obrábění dosahovat teploty až 1000°C. [24]



Obrázek 18 - Rozložení teplotního pole v průběhu obráběcího procesu [24]

Rozdělení teplotního pole v místě řezu je dáno součinitelem tepelné vodivosti obráběného materiálu. U některých typů obráběných materiálů, které se vyznačují nízkou tepelnou vodivostí dochází ke zvyšování teploty v místě řezu. [24]



Obrázek 19 - Zdroje tepla při obrábění [24]

Na obrázku 19 můžeme vidět schématické znázornění zdrojů tepla a zároveň teplotních toků, které se vyskytují v třískové obrábění. Z obrázku můžeme odvodit, že největší podíl tepla se odvádí do třísky, dále pak do nástroje a obrobku. Z tohoto vyplývá, že je potřeba používat takové nástroje a typy povlaků, které budou plnit funkci teplotní bariéry. Pro zamezení růstu teploty a s tím spojeného teplotního přetěžování obráběcího nástroje je nutné zajistit plynulý odchod třísky z místa řezu. [24]

Teplo v třísce

Teplo v třísce roste neúměrně s růstem řezné rychlosti, jelikož při vysokých řezných rychlostech roste množství tepla v třísce velmi pomalu. Teploty v třísce jsou rozloženy neúměrně, protože plastická deformace se nerozkládá rovnoměrně po celém průřezu odřezávané vrstvy. Teplota řezání tedy ovlivňuje trvanlivost a opotřebení nástroje. [25]

Teplo v nástroji

Teplo, které pohltí nástroj při obrábění závisí na čase, kdy je nástroj v záběru. Toto teplo, nejprve prudce roste do doby, kdy dosáhne nasyceného stavu nástroje. V tomto případě tepelný obsah prakticky nezávisí na čase práce nástroje. Množství tepla, které nástroj pohltí závisí především na tepelné vodivosti materiálu využívaných pro výrobu nástrojů a také na podmínkách odvodu tepla z nástroje. [25]

Teplo v obrobku

Toto teplo je stejně jako teplo v nástroji závislé na čase práce nástroje. V řezném procesu prochází ze zdrojů tepla do obrobku určitý tepelný tok, kdy část odvádí tříška a další část je odvedena do okolního prostředí. Po skončení obrábění lze měřit pouze množství tepla, které zůstalo v obrobku. [25]

2.5.2 Tepelná bilance řezného procesu

V průběhu procesu obrábění se veškerá práce řezání z větší části přemění na teplo. Teplo řezného procesu vzniká při odebrání určitého množství materiálu, je rovné práci řezného procesu. Hlavní zdroje tepla jsou v oblasti plastických deformací při tvorbě třísky, v oblasti tření třísky s čelem nástroje a v oblasti tření hřbetu nástroje po obrobené ploše. [25]

Vzniklé teplo řezného procesu Q_e je odváděno do jednotlivých prvků:

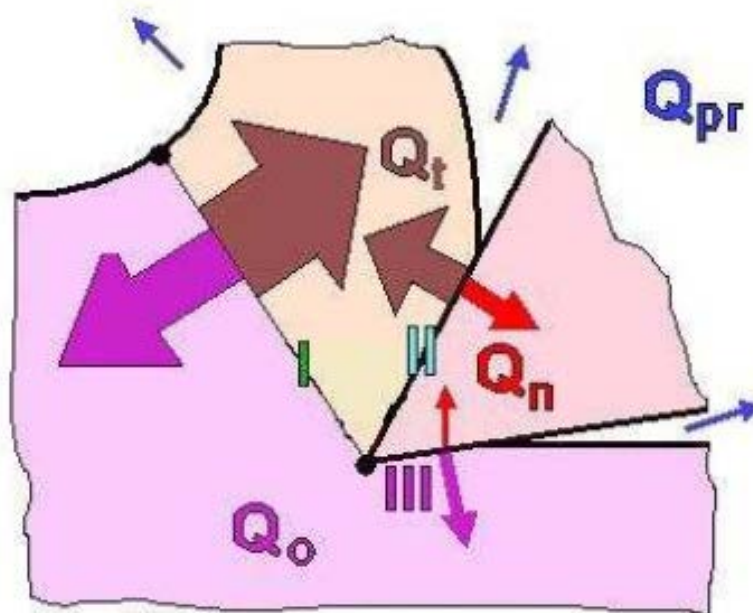
$$Q_e = Q_t + Q_o + Q_n + Q_{pr}$$

Q_t – teplo odvedené třískou

Q_o – teplo odvedené obrobkem

Q_n – teplo odvedené nástrojem

Q_{pr} – teplo odvedené řezným prostředím [25]



Obrázek 20 - Vznik a odvod tepla [25]

Podíl jednotlivých složek, které jsou odváděny z řezného procesu do třísky, nástroje, obrobku a prostředí jsou závislé na tepelné vodivosti materiálu obrobku a nástroje, dále pak na řezných podmínkách. Rozsah a kvalita styku mezi třískou a nástrojem působí přímo na výkon, proto největší teplo vzniká v rovině stříhu. V případě, že chceme zvýšit odvod tepla do obrobku je nutné, aby byly malé mezní úhly roviny stříhu jako důsledek malého úhlu čela.

Použitím moderních materiálů a povlaků břitových destiček je možné proces obrábění optimalizovat tak, aby přechod tepla do břitu byl minimalizován.

Teplo, které vzniká v oblasti hřbetu a kde se dráhy nástroje a opracovaného obrobku rozdělují, by mělo být na co nejnižších hodnotách. Důležitými faktory jsou dostatečně velký úhel hřbetu a zamezení výrazného opotřebení hřbetu. V případě, že tyto faktory ignorujeme, vznikají v řezném procesu vysoké teploty a ty mají za následek lom břitu. [25]

3 Návrh a realizace vlastního experimentu

Experiment byl prováděn pro řešení této diplomové práce, který vedl ke zjištění potřebných hodnot opotřebení a objemu odebraného materiálu a pomohl tak ke správnému zpracování této práce. Realizace experimentu byla uskutečněna v Regionálním technologickém institutu (RTI) na půdě Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni. Tato kapitola je věnována rozboru experimentu, rozboru vybraného materiálu a využitého dílenského vybavení k naměření nezbytných hodnot.

Samotnou podstatou bylo nalezení příčin, které mají za následek problémy, které byly zmíněny v teoretické části práce. Úkolem bylo zanalyzovat všechny podmínky, které souvisejí s úběrem materiálu z řezu a také vlastní opotřebení nástroje.

3.1 Popis a průběh experimentu

Cílem bylo zjistit hodnotu opotřebení v závislosti na objemu odebraného materiálu. Experiment byl prováděn čelním rovinným frézováním na stroji DMU 40 eVo linear, pro naši práci byla využita čelní rovinná fréza o průměru 100 mm s vyměnitelnými břitovými destičkami. Z důvodu většího a rychlejšího opotřebení VBD, se zvolilo frézování pouze jednou vyměnitelnou břitovou destičkou, abychom urychlili tento proces a zároveň mohli lépe zhodnotit její opotřebení v závislosti na objemu odebraného materiálu. Druhý využívaný nástroj, pouze pro zarovnání čela obrobku před každým dalším přejezdem, byla použita také čelní rovinná fréza, kterou známe pod označením Kraken. Tato fréza byla vyvinuta doc. Ing. Miroslavem Zetkem PhD. a kolektivem v Regionálním technologickém institutu Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni. Jedná se o prutový



Obrázek 21 - DMU 40 eVo linear

nástroj určený pro frézování těžkoobrobitelných materiálů, který je vyroben metodou aditivní technologie (3D tisku). Konstrukce nástroje přináší výraznou úsporu hmotnosti při zachování tuhosti. Naprosto revolučním způsobem je zde vyřešen přívod chladicí kapaliny soustavou

vnitřních kanálků nejen na čelo nástroje, jak je běžné u standardních fréz, ale i na hřbet s vyměnitelnými břitovými destičkami. [26]

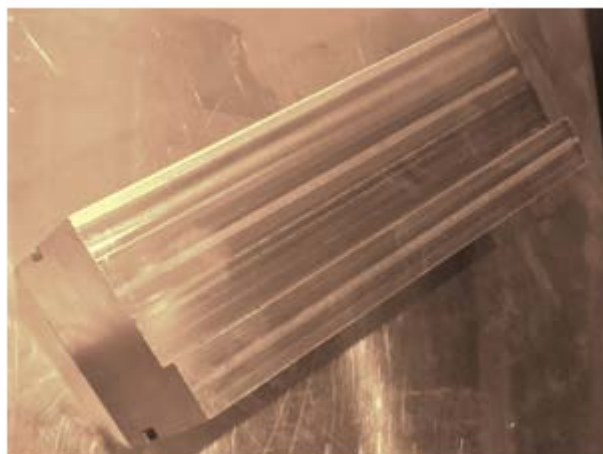


Obrázek 22 - Čelní rovinná fréza s kruhovými VBD



Obrázek 23 - Frézovací hlava - Kraken [26]

Frézování bylo prováděno na obrobku o rozměrech 267 x 25 x 70 mm o počáteční váze 13,917 kg. V průběhu řezného procesu byl nástroj chlazen procesní kapalinou, konkrétně emulzí s koncentrací 5-8% oleje. Obráběným materiálem byla ocel Inconel 718 - slitina na bázi niklu, kde se tvrdost pohybuje mezi 25-45 HRC a v případě našeho obrobku byla tato hodnota okolo 40 HRC. Materiál se využívá zejména v leteckém průmyslu či ve spalovacích turbínách. Pro náš experiment byl tento materiál využit zejména kvůli jeho vysoké tvrdosti, pevnosti a houževnatosti. Všechny tyto vlastnosti vedly k mnohem vyššímu opotřebení, než by tomu bylo například u ocelí, které mají tyto hodnoty nižší.



Obrázek 24 - Obrobek

Upnutí obrobku bylo provedeno pomocí upínek, které se vytvořily pro rozměr drážek na obrobku. Následně se obrobek umístil do stroje a upnul do svěráku.

Obrobek byl nejprve zarovnan do roviny. Následně se provedlo změření Z souřadnic, pomocí sondy ve stroji, kde bylo zjištěno, že nulové hodnoty se liší v tisícinách milimetrů, což bylo dostačující pro náš experiment. Poté započalo samotné testování, což obnášelo frézování,

příčemž bylo měřeno opotřebení a objem odebraného materiálu z obrobku. Byla provedena 3 opakování, kdy v každém opakování byly provedeny celkem 3 přejezdy. Po každé této sérii opakování byla pootočená vyměnitelná břitová destička, abychom byli schopni zhodnotit jednotlivé velikosti opotřebení, a také z důvodu, aby nedošlo k lomu břitu nástroje. Před každým samotným přejezdem se odebralo přibližně 20 ks třísek, které byly následně analyzovány v laboratořích. Následovalo zarovnání čela obrobku a provedení kontrolního zvážení. V poslední řadě bylo provedeno měření opotřebení na dílenském mikroskopu.

Řezné podmínky		
Průměr frézy	D [mm]	100
Otáčky	n [1/min]	191
Řezná rychlost	v_c [m/min]	60
Posuv na zub	f_z [mm]	0,1
Hloubka řezu	a_p [mm]	0,5
Šířka řezu	a_e [mm]	25
Procesní kapalina		emulze s koncentrací 5-8% oleje

Tabulka 3 - Řezné podmínky experimentu

Řezné podmínky a materiál obrobku, pro tento experiment, byly zvoleny tak, aby opotřebení břitové destičky bylo urychleno, ale současně tak, aby nedošlo k lomu nástroje. Zvolené řezné podmínky jsou zaznamenány v tabulce 3.

Během záběru totiž dochází ke změně tloušťky třísky, a tím může docházet k místnímu zpevnění obráběného materiálu, a proto bylo vhodné stanovit odklon frézy od středu obrobku, aby nedošlo k frézování středem obrobku. V závislosti na změně polohy osy nástroje vůči obráběnému povrchu se mění úhel vstupu i úhel výstupu břitu a průběh změny tloušťky třísky. Z těchto důvodů byla stanovena hodnota excentricity neboli odklon frézy od středu obrobku na 20 mm. Odklon od středu obrobku také umožňuje využití vyšších řezných rychlostí a plynulý vstup do záběru, zároveň by se měl výstupní úhel pohybovat mezi $+30^\circ$ až $+90^\circ$ nebo -30° až -90° a současně je nutné upřednostňovat, aby tloušťka třísky na výstupu nebyla příliš velká, neboť při nedodržení těchto podmínek dochází k nevýhodnému namáhání břitu nástroje. Z tohoto důvodu se při čelním frézování volí průměr frézy o 20-50% větší než šířka záběru a osa frézy se posouvá mimo střed obrobku. Nicméně pro náš experiment byl zvolen průměr frézy o 75% větší než byla šířka záběru. Pro tento typ frézování nebylo nutné dodržet doporučený průměr frézy, jelikož tvar obrobku nebyl složitý.[11]

3.2 Zkušební materiál Inconel 718

Pro zhodnocení vlivu opotřebení na objem odebraného materiálu, byla vybraná slitina na bázi niklu, který je vysoce odolný proti korozi. Zároveň je tento materiál velmi tažný a kujný.

Slitina se velmi často používá v konstrukčních a jiných odvětvích taktéž z důvodu možnosti odolávat v rozmezí teplot -253 až $+760^{\circ}\text{C}$, v některých odborných literaturách se vyskytuje hodnota -423 až $+1300^{\circ}\text{C}$. Nikl je v oceli zastoupen ve formě feromagnetického kovu, který si lze představit jako bílý prášek nevyskytující se v přírodě, a proto je nutné tento kov vyrobit. V poslední fázi jeho výroby je získán oxid nikelnatý, který je dále zpracováván a redukován pomocí koksu a následně čištěn elektrolyzou. Chemické složení této slitiny je vyobrazeno v tabulce níže.

V materiálu Inconel 718 je nikl v 50% zastoupením. Druhým významným prvkem je chrom s 20% podílem. Do této slitiny se další prvky dostávají v průběhu výroby a tepelného zpracování, a to má velmi často pozitivní vliv na výsledné mechanické vlastnosti a tvorbu defektů v samotném materiálu. Jeden z důležitých prvků bude také uhlík, který se musí při výrobě regulovat na maximální stanovenou hodnotu, neboť karbidy mají tendenci se seskupovat na hranicích zrn a z důvodu zachování pevnostních vlastností při vysokých teplotách je toto seskupování nežádoucí. [27]

C	Ni(+Co)	Cr	Fe	Nb(+Ta)	Mo	Ti	Al
Max. 0,08	50–55	17–21	Zbytek	4,75–5,5	2,8-3,3	0,65-1,15	0,2-0,8
Co	Mn	Si	P	S	B	Cu	
Max. 1	Max. 0,35	Max. 0,35	Max. 0,015	Max. 0,015	Max. 0,006	Max. 0,3	

Tabulka 4 - Chemické složení Inconel 718 - obsah v % [27]

Ve slitině se objevuje mnoho legujících prvků, které mají vliv na výsledné mechanické vlastnosti. Patří mezi ně zejména brom a zirkonium, které přispívají ke zpevnění materiálu na hranicích zrn.

3.2.1 Mechanické vlastnosti

Na mechanické vlastnosti Inconelu 718 má významný vliv zejména teplota a doba jeho zpracování. V návaznosti na tyto dvě veličiny dochází k ovlivnění i funkčních vlastností této slitiny.

Mez kluzu $R_p 0,2$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tvrdość [Rockwell]	Tažnosť A [%]	Bod tání [$^{\circ}\text{C}$]	Hustota [g/cm^3]
Min. 1040	Min. 1275	24-45	Min. 20%	1336	8,19

Tabulka 5 - Mechanické a fyzikální vlastnosti [27]

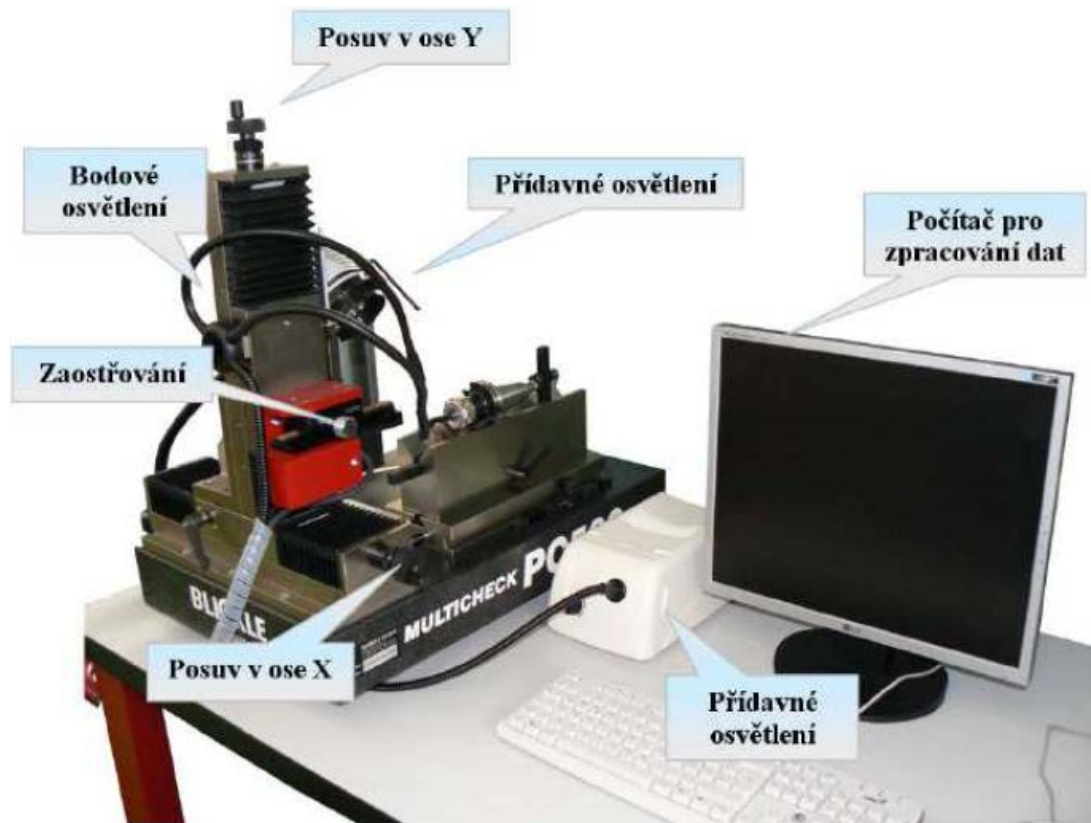
Ve výše uvedené tabulce jsou vyobrazeny základní mechanické a fyzikální vlastnosti materiálu Inconel 718. Tyto vlastnosti jsou velkou měrou ovlivňovány chemickou čistotou materiálu a zároveň vlastnostmi povrchových a podpovrchových vrstev. V materiálu se tvoří vnitřní pnutí, které má negativní dopad zejména na mechanické vlastnosti materiálu, a zároveň podporuje tvorbu vad. Mohou se zde objevit trhliny, které vznikají např. v důsledku nehomogenních deformací, nebo rozdílu tlakového a tahového napětí mezi povrchovou a podpovrchovou vrstvou. S tímto jevem se nejčastěji setkáme po tepelném zpracování. [28]

Veškeré mechanické vlastnosti materiálu Inconel 718 mezi které řadíme vysokou pevnost, tvrdost, houževnatost, jsou velice důležité pro finální produkt, neboť nám velmi ovlivňují obrobitelnost tohoto materiálu. Při obrábění materiálu dochází ke zpevňování a abrazivnímu opotřebení rezného nástroje. Další významnou veličinou, která nám sťažuje obrábění samotného materiálu, je tažnost. Obecně můžeme říci, že tažnost se, se zvyšující teplotou zvyšuje. Při zvýšení tažnosti se zároveň zvyšuje celkové zatížení rezné části nástroje, a to má vliv na samotné opotřebení nástroje. Dalším důležitým faktorem na toto opotřebení má vliv zpevňování obráběného povrchu, a to zejména vlivem plastických deformací, které se tvoří při tvorbě třísky. [28]

Všechny tyto aspekty byly brány v úvahu při volbě materiálu pro tento experiment. Aby bylo možné zkoumat vliv opotřebení na objem odebraného materiálu, bylo zapotřebí vybrat takovou slitinu, která bude tvrdá, houževnatá a zároveň tažná.

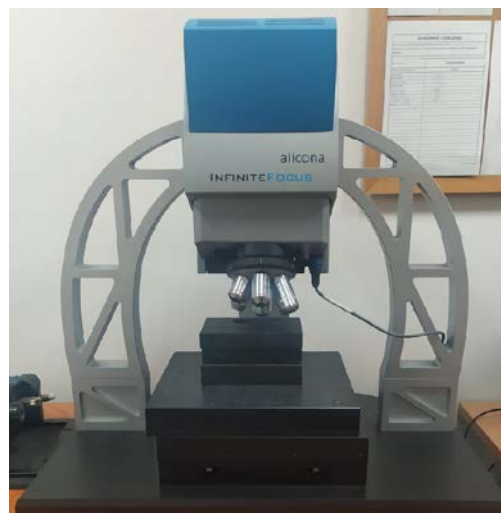
3.3 Měření opotřebení

Velikost opotřebení bylo měřeno na dílenském mikroskopu Multicheck PC 500, kde se zjišťovala samotná hodnota opotřebení udávaná v μm . Měření se prováděla po každém přejezdu, kdy byla vyměnitelná destička v záběru. Hodnota opotřebení se pochopitelně zvyšovala s každým dalším použitím. Dílenský mikroskop dosahuje přesnosti měření až 0,005 mm a jsou na něm měřeny nově vyrobené nástroje a jejich geometrie, ale také opotřebení břitů. Pro měření správného opotřebení vyměnitelné břitové destičky se musela upravit poloha prizmatických bloků, aby nedocházelo k překlápění frézy při samotném měření. Tento nedostatek byl vyřešen použitím plastelíny, která nám zaručila správnost polohy frézy pro měření opotřebení. Na základní desce mikroskopu je uchyceno horizontální vedení (osa X), které pomocí kuličkového šroubu zajišťuje posuv vertikální části vedení (osa Y). S použitím klíčků a obou vedení lze měnit polohu CCD kamery, která snímá břit nástroje. Na vertikálním vedení je dále nainstalovaná zmiňovaná CCD kamera. Tato kamera je přes grafické rozhraní zapojena do stolního počítače. Při každém měření opotřebení je nutné zaostření kamery na výchozí bod. Při hodnocení opotřebení je nutné důkladné nasvícení celého břitu, a proto se využívají také pomocné optické kabely.



Obrázek 25 - Dílenský mikroskop Multichack PC 500

Pro vyhodnocení mikrageometrie nástroje a skutečného opotřebení VBD byla využita diferenční analýza. Tato analýza se prováděla na opticko-skenovacím mikroskopu IFM G4, který umožňuje zachytit topografii povrchu včetně její skutečně barevné informace. Hlavní předností tohoto přístroje je integrované měření tvaru jak ve 2D, tak i ve 3D prostoru. Výstupem z měření jsou velmi přehledné protokoly, pomocí kterých jsme schopni rozeznat konkrétní typ opotřebení.



Obrázek 26 - Opticko-skenovací mikroskop IFM G4

3.4 Analýza třísky

Pro vyhodnocení experimentu a stanovení vlivu opotřebení na objem odebraného materiálu bylo zapotřebí podrobněji zanalyzovat tvar a velikost třísky. Proto se tříska odebírala během celého experimentu a rozdělovala se dle jednotlivých úběrů materiálu. Po každém přejezdu, kdy docházelo také k měření opotřebení VBD, byly odebrány třísky z prostoru stroje. Bylo odebíráno přibližně 20 ks třísek pro snadnější analýzu. Následně v laboratoři na katedře obrábění Západočeské univerzity v Plzni proběhla analýza třísek.

Nejprve se na laboratorní váze zvažilo 10 ks třísek. Jedná se o velmi přesnou laboratorní analytickou váhu, jejíž váhový rozsah je 0-220 g s dílkem 0,0001 g. Pro vkládání třísek na plošinku váhy o průměru 90 mm, byly použity plastové kleště, aby nedocházelo k přímému kontaktu s váhou. V případě přímého kontaktu by totiž mohlo dojít k rozladění kalibrace váhy a měření by mohlo být nepřesné.

Následovalo měření jednotlivých rozměrů třísek jako je tloušťka, šířka a délka třísky. Všechny tyto hodnoty se zjišťovaly proto, aby bylo možné porovnat naměřené hodnoty s ideálními dopočtenými hodnotami. Pro samotné měření se využily 4 kusy třísek pro každý přejezd, aby následně mohl být proveden aritmetický průměr naměřených hodnot. Čtyři kusy třísek z každého odběru se analyzovaly záměrně, z důvodu dosažení přesnějšího měření, které nezávisí pouze na jednom vzorku.



Obrázek 27 - Dílenská váha BSA 220.4

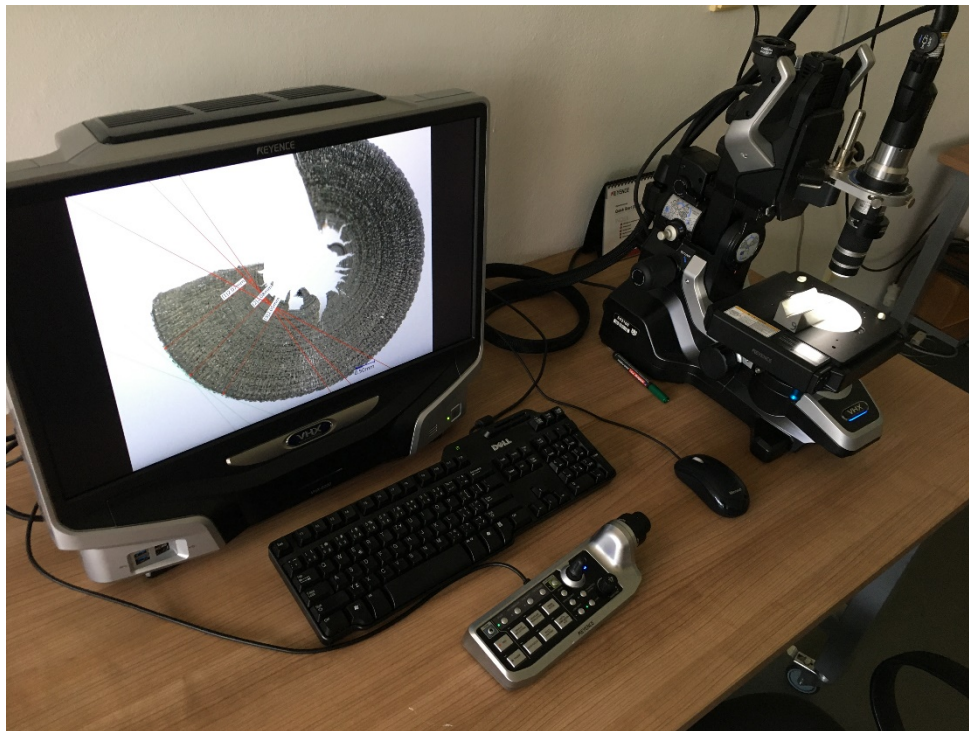


Obrázek 28 - Třmenový mikrometr

Tloušťka třísky byla měřena pomocí dílenského třmenového mikrometru. Mikrometr byl upevněn do mini držáku, jelikož v případě volného měření by mohlo dojít k nepřesnostem při měření. Přístroj je schopen měřit s přesností setin milimetrů. Jelikož mikrometr nebyl vybaven kalibračním válečkem, bylo nutné nejprve stanovit hodnotu na mikrometru, protože není téměř nikdy nastaven do počátku, tedy do nuly. Bylo provedeno dotažení pevného a posuvného dotyku a tím se zjistilo, že ke každé naměřené hodnotě musí být přidána hodnota 3 μm , neboť takový byl posun vůči nule. Při měření byla tříska vložena mezi dva dotyky. Jakmile se dosáhlo optimální polohy doteků, ráčna začala prokluzovat a bylo možné odečíst správnou hodnotu z mikrometru.

Pro odměření délky třísek se použila plastelína, která byla nejprve rozválena do hladka a následně byl zaznamenán otisk délky třísky. Pomocí digitálního posuvného měřítka, se změřila velikost délky.

Pro poslední analýzu třísek byl využit mikroskop Keyence VHX-6000, na kterém se měřila šířka třísky. Dále pomocí mikroskopu bylo možné vyhodnotit samotný tvar třísky. Jedná se o digitální mikroskop s velkou hloubkou ostrosti a moderními měřicími funkcemi pro kontrolu a analýzu měřených předmětů. Na mikroskopu je možné volit hodnotu zvětšení, tato hodnota je volitelná a pro náš případ se stanovila na 30. Vzorek byl ustaven volně na pracovní stůl mikroskopu, kde bylo nastaveno osvětlení a zaostření obrazu. Následně se stiskem tlačítka na ovládacím panelu mikroskopu zmrazil obraz, čímž bylo zamezeno pohybu třísky a zároveň nepřesnostem při měření. Pomocí třech vodorovných přímek se odměřila hodnota šířky třísky, která byla měřena v milimetrech.



Obrázek 29 - Mikroskop Keyence VHX-6000

4 Zhodnocení výsledků

Prováděný experiment byl zaměřen na zkoumání vlivu opotřebení na objem odebíraného materiálu. V průběhu experimentu byl kladen důraz na průběžnou kontrolu opotřebení nástroje, které bylo ovlivněno reznými podmínkami, především pak velikostí rezné rychlosti, posuvu na zub a měnící se geometrií břitu, která je závislá na opotřebení nástroje. Následně byla provedena mikrogeometrie nástroje, neboli 3D scan vyměnitelné břitové destičky, která se porovnávala s typem opotřebení. V neposlední řadě byl hodnocen stav odebírané třísky, a to zejména z hlediska tvaru a velikosti. V následujících podkapitolách jsou postupně zhodnoceny výsledky z jednotlivých měření.

4.1 Objem odebraného materiálu

Při vyhodnocování objemu odebraného materiálu se vycházelo z hodnot, které byly získány v průběhu experimentu. Hodnoty se měřili po každém přejezdu čela obrobku za pomoci sondy ve stroji DMU 40 eVo linear. Hodnoty byly měřeny od nulového bodu obrobku vždy po 50 milimetrech do kladných hodnot. Úkolem bylo zaznamenat velikost objemu a porovnat ho s ideálním vypočteným objemem odebraného materiálu.

Opakování - přejezd	Naměřené hodnoty (mm)				
	0	50	100	150	200
1-1	0,4946	0,4927	0,4906	0,4891	0,4680
1-2	0,4846	0,4850	0,4837	0,4825	0,4604
1-3	0,4756	0,4742	0,4718	0,4692	0,4229
2-1	0,4888	0,4871	0,4848	0,4836	0,4655
2-2	0,4778	0,4766	0,4750	0,4724	0,4426
2-3	0,4698	0,4682	0,4667	0,4635	0,4568
3-1	0,4928	0,4904	0,4887	0,4870	0,4679
3-2	0,4808	0,4788	0,4768	0,4750	0,4607
3-3	0,4702	0,4709	0,4689	0,4645	0,4296

Tabulka 6 - Naměřené hodnoty odebraného materiálu v milimetrech

Z údajů, které jsou zaznamenány v tabulce je zřejmé, že stanovená hloubka řezu 0,5 mm nebyla dodržena ani v jednom případě, nicméně tento údaj byl stanoven pouze jako ideální a téměř vždy jsou reálné hodnoty vychýlené od skutečnosti. Pro tento experiment bylo důležité, že hodnoty se velmi přibližují ideálnímu stavu.

Pro vypočtení ideálního objemu odebraného materiálu byl použit následující vzorec:

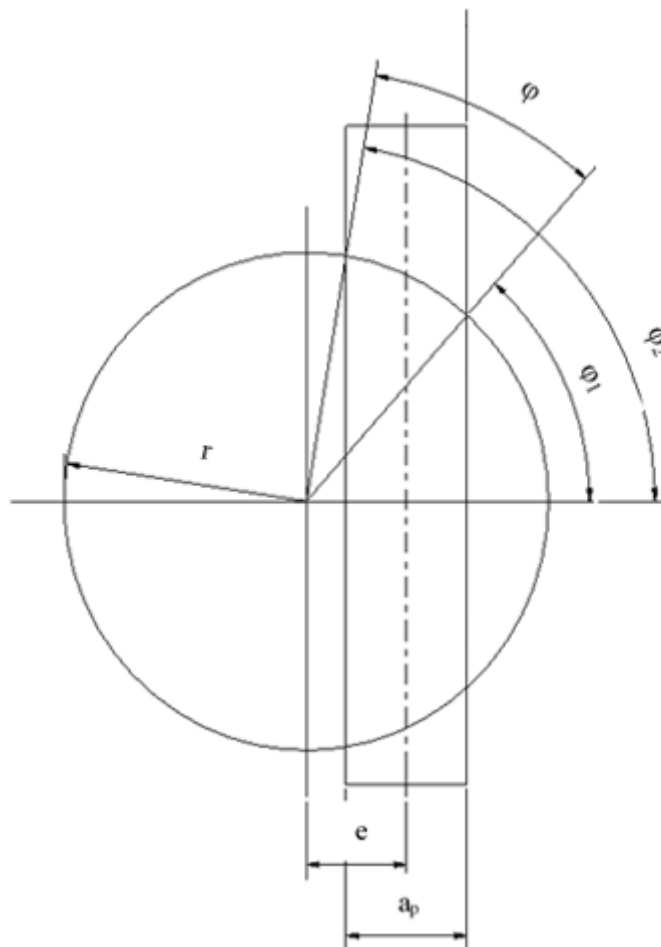
$$V = S \cdot a_p \text{ [mm}^3\text{]}$$

Pro dosažení do vzorce bylo nutné stanovit neznámé veličiny, zejména pak obsah obráběné plochy, která vychází z dráhy nástroje a úhel opásání φ , který je v odborné literatuře znám jako úhel řezného oblouku. Tento úhel bylo nutné dopočítat s ohledem na fakt, že frézování bylo prováděno mimo střed obrobku. Hodnota excentricity neboli odklon nástroje od středu obrobku, byla stanovena na 20 mm. Pomocí úhlu můžeme následně stanovit dráhu nástroje, která byla vykonána za jednu otáčku. Pomocí těchto veličin je možné určit ideální objem odebraného materiálu.

4.1.1 Výpočet úhlu opásání

Úhel opásání představuje, pod jakým úhlem je fréza a břit v záběru. Tento úhel pro čelní frézování je možné vypočítat dle následujícího vzorce.

$$\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 [^\circ]$$



Obrázek 30 - Schéma pro výpočet úhlu opásání

Výpočet jednotlivých úhlů řezného oblouku

Určení parametrů φ_1 a φ_2 je možné dopočítat dle základní vzorců pro výpočet úhlů řezného oblouku:

$$\varphi_1 = \arccos\left(\frac{B+2.e}{D}\right) = \arccos\left(\frac{25+2.20}{100}\right) = 49^\circ 27' [30]$$

$$\varphi_2 = \arccos\left(\frac{2.e-B}{D}\right) = \arccos\left(\frac{2.20-25}{100}\right) = 81^\circ 22' [30]$$

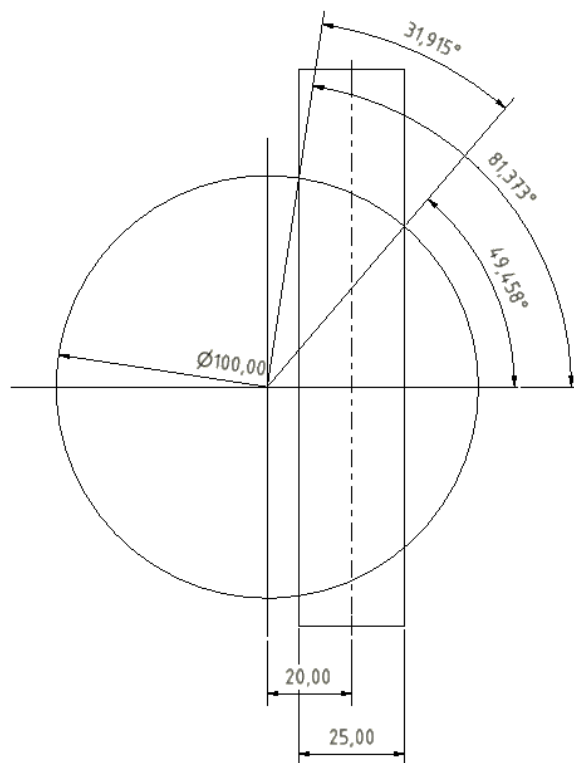
B [mm] = šířka obrobku a_e

e [mm] = excentricita, posunutí osy nástroje vůči obrobku

D [mm] = průměr frézy

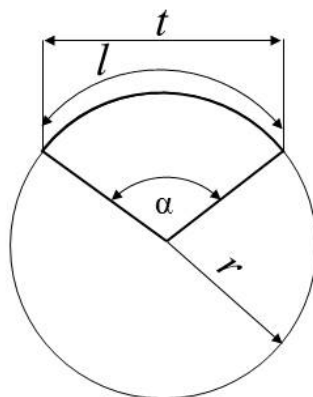
$$\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = 31^\circ 55'$$

Pro kontrolu výpočtu bylo provedeno vykreslení skutečného stavu do CAD softwaru (Autodesk Inventor 2020). Po vykreslení se zjistilo, že skutečný stav se liší v řádech minut, což bylo možné přikládat k chybám v zaokrouhlování, popřípadě možné odchylce ve vzorcí. Pro náš výpočet se tedy použily skutečně vykreslené hodnoty z CAD softwaru.



Obrázek 31 - Kontrolní výpočet úhlu opásání

Pro dosažení do vzorce pro objem odebraného materiálu bylo nutné dopočítat plochu úhlu opásání neboli plochu ve které je břit vůči obrobku v záběru. V našem případě to byla dráha, kterou musel nástroj v obrobku urazit. Jedná se tedy o délku úhlu opásání, která se vypočítá dle základního matematického modelu pro stanovení kruhové výseče.



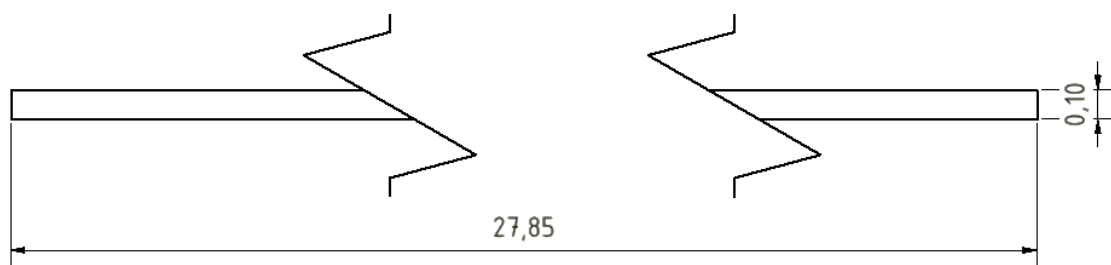
Obrázek 32 - Schéma výpočtu kruhové výseče [29]

$$l = \frac{\pi \cdot r \cdot \varphi}{180} = \frac{\pi \cdot 50 \cdot 31,915}{180} = 27,815 \text{ mm} \quad [29]$$

r [mm] = poloměr nástroje

φ [°] = úhel opásání

Po dopočtení délky, ve které nám zabírá břit vůči obrobku, můžeme stanovit plochu a následně objem odebraného materiálu.

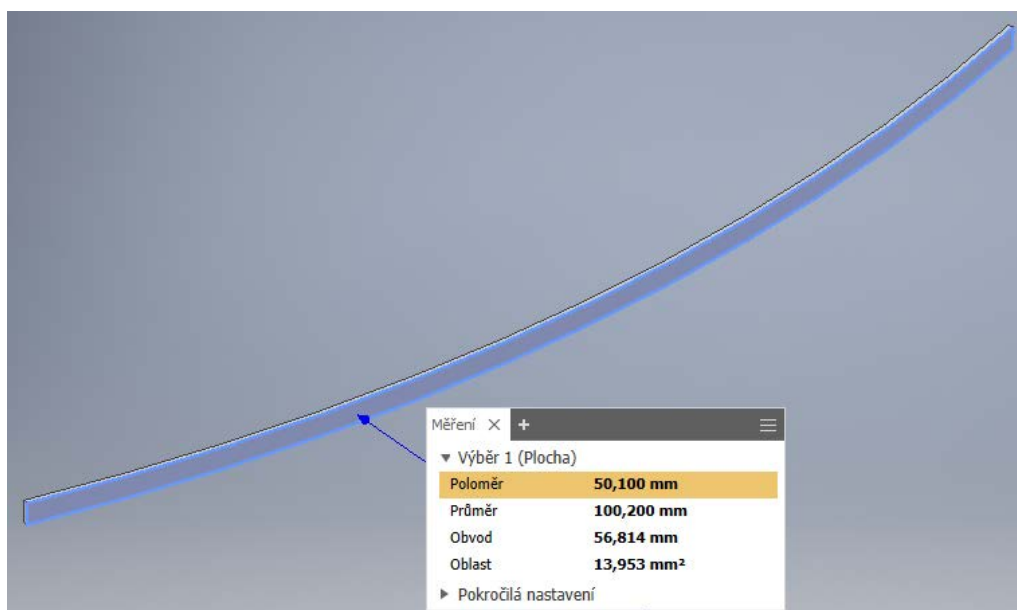


Obrázek 33 - Plocha úhlu opásání

$$S = a \cdot b = 27,851 \cdot 0,1 = 2,7851 \text{ mm}^2$$

$$V = S \cdot a_p = 2,7851 \cdot 0,5 = 1,39255 \text{ mm}^3$$

Pro kontrolu výpočtu je možné opět použít CAD software, kde jsme ověřili skutečnou plochu úhlu opásání.



Obrázek 34 - Ideální plocha třísky

$$V = S \cdot f_z = 13,925404 \cdot 0,1 = 1,39254 \text{ mm}^3$$

Jedním z úkolů bylo porovnat ideální objem odebraného materiálu se skutečným objemem odebraného materiálu. Skutečný objem bylo možné dopočítat z reálně naměřených Z souřadnic a po dosazení těchto souřadnic byl zjištěn skutečný objem odebraného materiálu pro jednotlivé přejezdy.

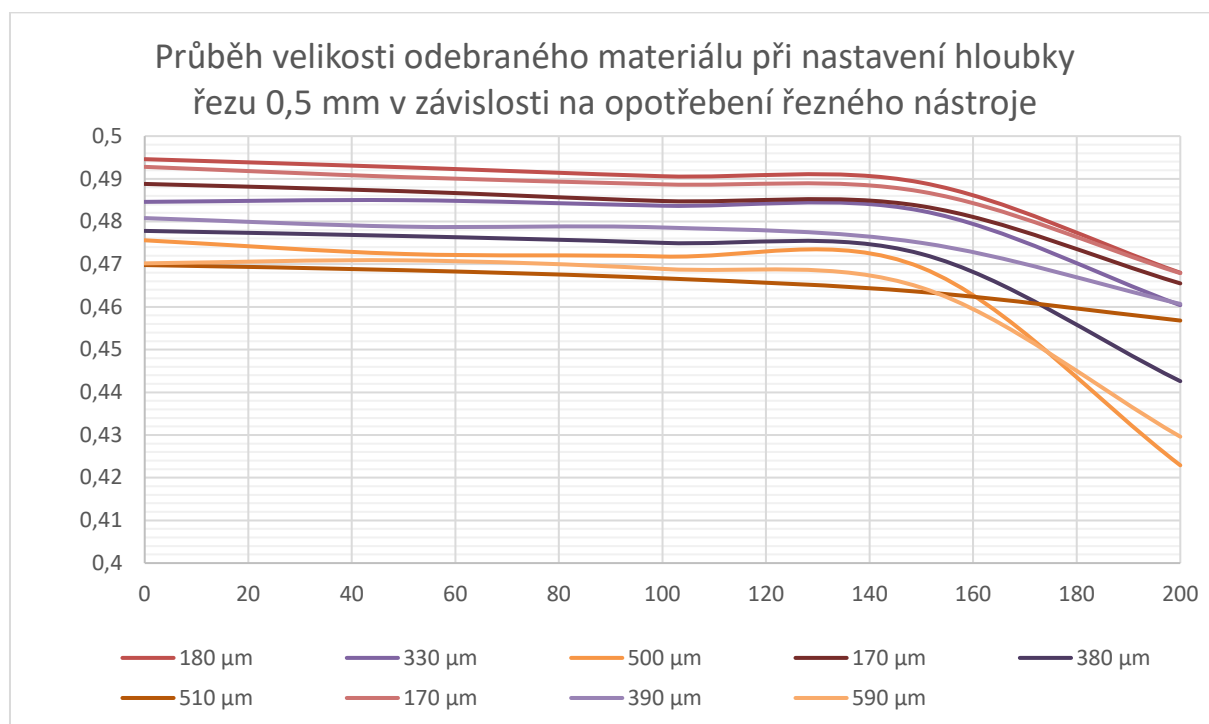
$$V = S \cdot a_p = 2,7851 \cdot 0,487 = 1,3563 \text{ mm}^3$$

Stejným způsobem je dopočten objem odebraného materiálu pro jednotlivé přejezdy. Výsledky jsou zaznamenány v tabulce 7.

Opakování - přejezd	0	50	100	150	200	Průměr hodnot [mm]	V [mm ³]	Opotřebení [μm]
1-1	0,4946	0,4927	0,4906	0,4891	0,4680	0,48700	1,3563	180
1-2	0,4846	0,4850	0,4837	0,4825	0,4604	0,47924	1,3347	330
1-3	0,4756	0,4742	0,4718	0,4692	0,4229	0,46274	1,2887	500
2-1	0,4888	0,4871	0,4848	0,4836	0,4655	0,48196	1,3423	170
2-2	0,4778	0,4766	0,4750	0,4724	0,4426	0,46888	1,3058	380
2-3	0,4698	0,4682	0,4667	0,4635	0,4568	0,46500	1,2951	510
3-1	0,4928	0,4904	0,4887	0,4870	0,4679	0,48536	1,3518	170
3-2	0,4808	0,4788	0,4768	0,4750	0,4607	0,47442	1,3213	390
3-3	0,4702	0,4709	0,4689	0,4645	0,4296	0,46082	1,2834	590

Tabulka 7 - Dopočtené hodnoty V

Z dopočtených hodnot je zřejmé, že hodnota opotřebení VBD je závislá na objemu odebraného materiálu. Z-tová souřadnice se chová stále stabilně. Z grafu lze říci, že opotřebení VBD narůstá až ke konci řezného procesu. Tento jev je možné vysvětlit množstvím tepla, které se koncentruje ve VBD a hodnota teploty v destičce se neustále zvyšuje. Trend ohybu se objevuje u všech přejezdů, přičemž se zvyšujícím se opotřebením se směrnice propadu posouvá rychleji v závislosti na nižším opotřebením a současně se zlom přibližuje ke konci. Dochází k mnohem většímu nárůstu na konci opotřebení. S jistotou lze říci, že při zvyšujícím se opotřebením, klesá objem odebraného materiálu. Tento pokles je velice mírný a nepřesahuje hodnotu $0,11 \text{ mm}^3$. Hodnota opotřebení velmi ovlivňuje množství odebraného materiálu z obrobku a při používání stejné břitové destičky pro několik opakování by mohlo dojít k vylomení břitu nebo poškození stroje či obrobku. Zaznamenané výsledky jsou vykresleny v grafu 1, ve kterém si lze lépe představit průběh měření a jednotlivých opakování. Hodnoty, které mají podobnou velikost opotřebení, mají téměř shodný průběh odebraného materiálu.



Graf 2 - Průběh velikosti odebraného materiálu při nastavení hloubky řezu 0,5 mm v závislosti na opotřebením řezného nástroje

4.1.2 Objem odebraného materiálu z hlediska hmotnosti

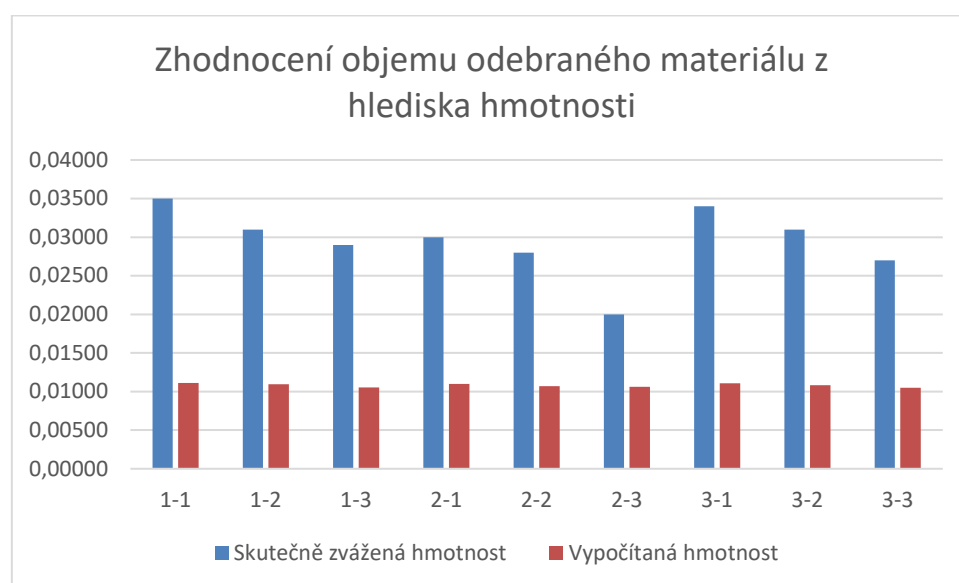
Experiment byl také zaměřen na zhodnocení objemu odebraného materiálu z hlediska hmotnosti. Nejprve se stanovila skutečná hmotnost objemu odebraného materiálu, která byla vypočítána z váhy obrobku, tzn. z rozdílu naměřených hodnot před frézováním a po frézování. Následně byla stanovena hmotnost odebraného materiálu pomocí naměřených souřadnic ve stroji. Nicméně tuto hmotnost nelze uvažovat jako skutečnou, nýbrž pouze jako teoreticky

vypočítanou hmotnost. Vypočítán byl objem odebraného materiálu a z této hodnoty bylo možné dopočítat váhu pro jednotlivé přejezdy. V tabulce 8 jsou znázorněny výsledky z měření.

Opakování - přejezd	Hmotnost před frézováním [kg]	Hmotnost po frézováním [kg]	Skutečná hmotnost [kg]	Vypočítaná hmotnost [kg]
1-1	13,907	13,872	0,035	0,01111
1-2	13,872	13,841	0,031	0,01093
1-3	13,841	13,812	0,029	0,01055
2-1	13,812	13,782	0,030	0,01099
2-2	13,782	13,754	0,028	0,01069
2-3	13,754	13,734	0,020	0,01061
3-1	13,734	13,700	0,034	0,01107
3-2	13,700	13,669	0,031	0,01082
3-3	13,669	13,642	0,027	0,01051

Tabulka 8 - Hmotnosti objemu odebraného materiálu

Z naměřených a vypočtených hodnot lze konstatovat, že při vážení nebo měření vznikla chyba, která je viditelná na grafu 2. Rozdíl skutečně zvážené hmotnosti oproti vypočítané hmotnosti je zřetelný. Tuto chybu je možné přisuzovat nepřesnosti při vážení obrobku, jelikož obrobek byl vážen vždy po jednom opakování, ale ve skutečné hmotnosti je zahrnut také úběr materiálu při zarovnání obrobku na nulové hodnoty. Z grafu je také patrné, že při zvyšujícím se opotřebením docházelo ke konstantnímu poklesu objemu odebraného materiálu jak pro skutečně zváženou hmotnost, tak i pro vypočítanou hmotnost. I přes viditelné chyby v měření, lze s jistotou říci, že opotřebením nástroje negativně ovlivňuje objem odebraného materiálu z obrobku.



Graf 3 - Zhodnocení objemu odebraného materiálu z hlediska hmotnosti

4.2 Charakteristika vytvořených třísek

Mezi hlavní aspekty, které určují charakter řezného procesu, patří nejen objem odebraného materiálu a tepelné ovlivnění obrobeného povrchu či nástroje, ale především mechanismus tvorby třísky. Typ společně s tvarem třísky jsou nejvíce závislé na druhu a jakosti obráběného materiálu, na řezných podmínkách, geometrii břitu a chlazení. Veškeré třísky byly získány za stejných podmínek obrábění, přičemž se měnila pouze hodnota opotřebení vyměnitelné břitové destičky. Hodnota opotřebení je tedy závislá na tvaru a velikosti vzniklé třísky. V tabulce 9 jsou zaznamenané hodnoty, které vyšly z měření jednotlivých typů třísek, pomocí dílenských měřidel a mikroskopu. Při měření byly použity čtyři vzorky z každého přejezdu a následně byl spočten aritmetický průměr.

Opakování	Vzorek	Průměr tloušťky [mm]	Průměr délky [mm]	Průměr šířky [mm]	Váha třísky [g]	Opotřebení [μm]
1-1	1-4	0,010875	15,000	1,310	0,00996	180
1-2	1-4	0,030750	12,120	1,853	0,00964	330
1-3	1-4	0,034500	11,200	1,600	0,00942	500
2-1	1-4	0,010750	14,943	1,233	0,00990	170
2-2	1-4	0,020750	11,295	1,673	0,00953	380
2-3	1-4	0,024750	10,265	2,080	0,00921	510
3-1	1-4	0,013500	14,838	2,067	0,00988	170
3-2	1-4	0,023500	12,340	1,743	0,00948	390
3-3	1-4	0,025250	10,553	2,053	0,00923	590

Tabulka 9 - Naměřené hodnoty třísek

Z tabulky je patrné, že se zvyšujícím se opotřebením VBD se snižují hodnoty velikostí délky, šířky a váhy, avšak hodnota tloušťky se zvětšuje, což je způsobeno pěchováním třísky, kdy tloušťka odřezávané vrstvy je vždy menší než tloušťka třísky a současně délka třísky je menší než délka dráhy nástroje, na které vzniká tříska. Je to důsledek plastické deformace materiálu v oblasti primární plastické deformace, během které je materiál pěchován.

4.2.1 Tvar vzniklých třísek




Tvary vzniklých třísek jsou závislé na opotřebením nástroje. Se zvyšujícím se opotřebením nástroje se tvar třísek měnil. Dle normy ISO 3685 můžeme zhodnotit tvar vzniklé třísky.







Pro první přejezdy každého opakování vznikly třísky krátké, stužkovité. Tvar třísek pro první opakování je podlouhlý a třísky se ještě se nezabalují. Trhání, které je možné vidět na dně třísky je způsobeno kinematikou obrábění a nedochází zde k úplnému tváření třísky.

Proto se tříška na dně trhá a má stáčejší se tendenci, jelikož nástroj musí ujet dlouhou vzdálenost na rádiusu břitu.

Pro druhé a třetí přejezdy každého opakování lze třísku definovat jako spirálovitou kuželovitou. Ve tvaru těchto třísek se stále objevuje trhání, ale již se více stáčí a zároveň se zvětšuje tloušťka třísky. Zvětšování tloušťky je možné přisuzovat opotřebením na čele nástroje. Z důvodu udržení podobné geometrie břitu, jsou třísky pro druhé a třetí opakování téměř shodné. Proto od určité hodnoty opotřebení třísky svůj tvar téměř nemění. Zásadní dopad na tvar vzniklé třísky má výmol na čele VBD, jelikož se většinou u tohoto typu opotřebení, tříška začne stáčet a v podstatě se vytváří negativum geometrie nástroje.

V tabulce 10 jsou znázorněny typy třísek pro jednotlivé opakování. Jsou zde znázorněny také velikosti opotřebení a průměrné hodnoty skutečné hloubky řezu, které se vážou k vyobrazeným třískám. Opotřebení nástroje tedy ovlivňuje tvar vzniklé třísky, ale zároveň ovlivňuje také skutečnou hloubku řezu, která byla měřena po každém přejezdu.

Opakování – přejezd	Opotřebení [μm]	Průměr Z souřadnice [mm]	Tvar vzniklé třísky
1-1	180	0,487	
1-2	330	0,479	
1-3	500	0,463	

2-1	170	0,482	
2-2	380	0,469	
2-3	510	0,465	
3-1	170	0,485	
3-2	390	0,474	
3-3	590	0,461	

Tabulka 10 - Tvar vzniklých třísek

4.2.2 Objem vytvořených třísek

Požadavky na rozměr a tvar vzniklých třísek lze kvantifikovat pomocí objemového součinitele třísek ω . Tento postup nebyl aplikován pro tento experiment, jelikož se v průběhu řezného procesu neodebíralo celkové množství vzniklých třísek, ale sbíralo se pouze přibližně 20 ks třísek po každém přejezdu frézy. Pro stanovení objemu vytvořených třísek bylo nutné zjistit hmotnost vzniklých třísek vážením, jelikož reálná hmotnost třísky je vždy menší než skutečná. Je to z důvodu zaoblení břitu, kdy na zaoblení je určitý bod, ve kterém dochází k dělení materiálu. Část materiálu se zamačkává pod obrobenu plochu a část odchází z řezu ve formě třísky. Dále bylo nutné znát také hodnotu hustoty obráběného materiálu.

Následně se objem třísky vypočítal ze vzorce pro měrnou hmotnost.

$$V = \frac{m}{\rho} [m^3]$$

m [kg] = hmotnost

ρ [kg/m³] = hustota

V tabulce 11 jsou zaznamenané vypočtené hodnoty objemů třísek pro jednotlivá opakování. Jedná se o skutečně vypočtený objem odebraných třísek, který byl vypočten z reálně naměřených hodnot.

Opakování – přejezd	Opotřebení [μm]	Objem [mm^3]
1-1	180	1,2161
1-2	330	1,1771
1-3	500	1,1502
2-1	170	1,2088
2-2	380	1,1636
2-3	510	1,1245
3-1	170	1,2063
3-2	390	1,1575
3-3	590	1,1270

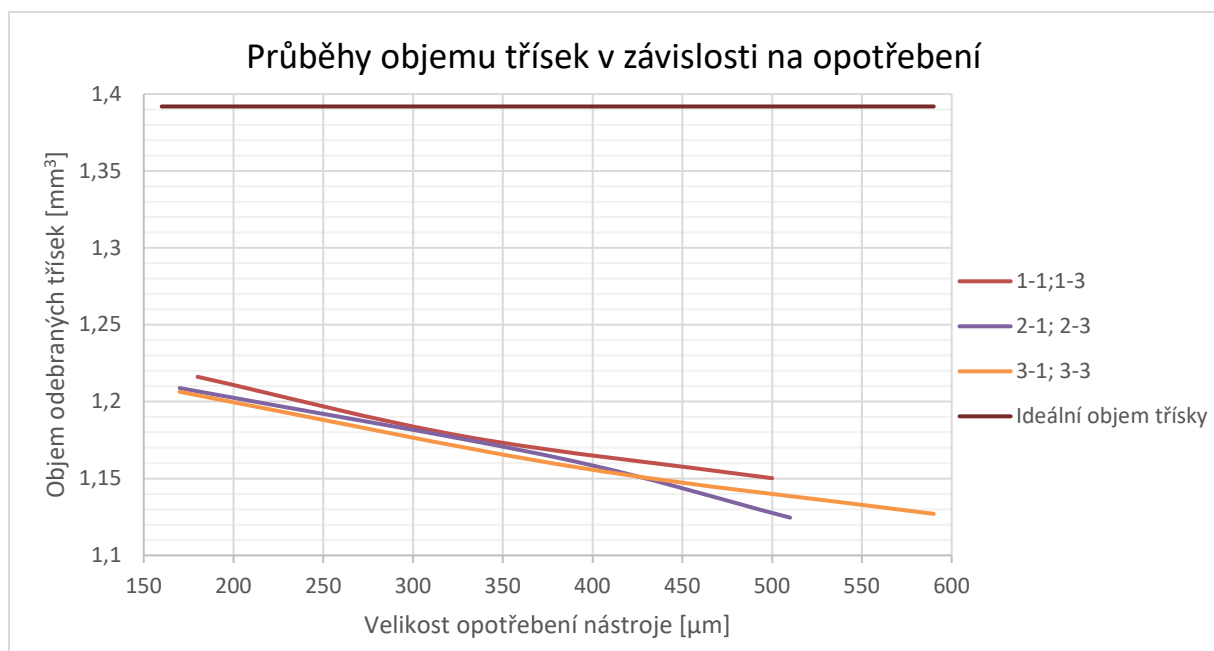
Tabulka 11 - Vypočtené hodnoty objemů třísek

Stejným způsobem jsme byli schopni vypočítat skutečnou hmotnost ideální třísky a z této hmotnosti následně vypočítat ideální objem pro náš experiment. Hmotnost třísky se vypočítala pomocí ideálního objemu odebraného materiálu, který byl vynásoben hustotou obráběného materiálu. Hustota byla zjištěna z materiálového listu Inconel 718. Ideální objem třísek by měl vyjít vždy vyšší než skutečně odebraný. V našem experimentu byl tento předpoklad potvrzen, jelikož ideální objem třísek vyšel 1,3919 mm³ a skutečně naměřený objem vyšel v rozmezí hodnot od 1,1245 – 1,2161 mm³.

$$V = \frac{m}{\rho} \Rightarrow m = V \cdot \rho = 1,39255 \cdot 0,00819 = 0,0114 \text{ g}$$

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{0,0114}{0,00819} = 1,3919 \text{ mm}^3$$

V grafu 2 je možné vidět jakým způsobem se měnil objem odebraných třísek v závislosti na opotřebení. Dle očekávání měl objem třísek vůči opotřebení snižující se tendenci. Čím vyšší bylo opotřebení, tím menší byl objem odebraných třísek. Pro představu je zde také zobrazena lineární závislost ideálního objemu odebraného materiálu, který se v průběhu experimentu neměnil.



Graf 4 - Průběh objemu odebraných třísek na opotřebení

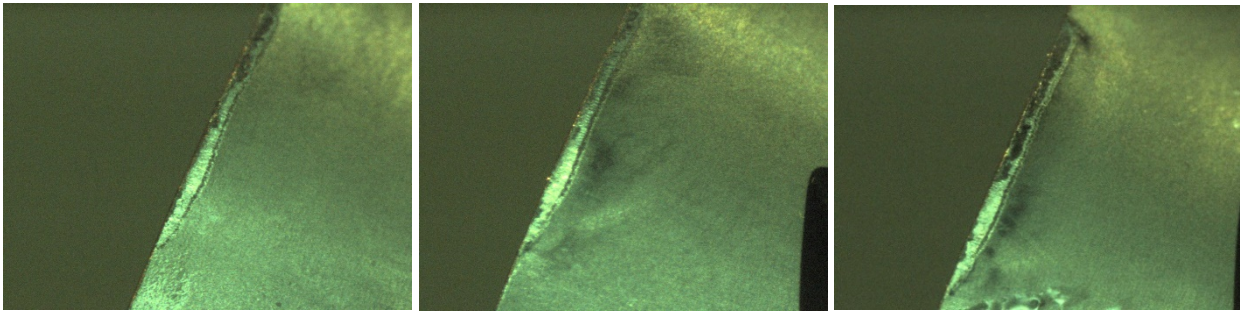
4.3 Opotřebení

Opotřebení bylo měřeno průběžně po každém přejezdu. Frézovací hlavu bylo nutné ustavit do polohy, ve které bylo možné zachytit opotřebení VBD. Aby nedošlo k překlolení hlavy frézy, bylo nutné použít plastelínu k upravení pozice frézy vůči kameře. Následně bylo možné provádět měření.

4.3.1 Charakter opotřebení

V průběhu experimentu se provedly celkem tři opakování a pro každé opakování byly provedeny tři přejezdy. Před každým prvním přejezdem z daného opakování byla vyměnitelná břitová destička na hodnotě opotřebení 0 μm .

Po změření opotřebení po prvních přejezdech byla zjištěna hodnota opotřebení v průměru okolo 175 μm . Při této hodnotě opotřebení vzniklo čisté abrazivní opotřebení bez náznaku výmolů nebo adheze na čele břitu. Jednalo se tedy především o obrušování nástroje, které bylo způsobeno třením třísky o čelo nástroje a třením obrobku o hřbet nástroje. Současně zde nedocházelo k náznaku tvoření nárůstku, což znamenalo, že materiál se nezačal natavovat na břit.

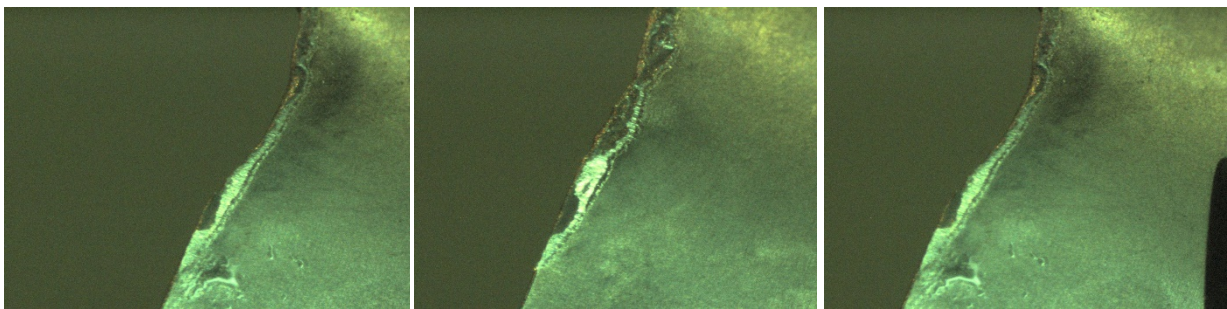


Obrázek 35 - 1-1 - 170 μm

Obrázek 36 - 2-1 - 170 μm

Obrázek 37 - 3-1 - 180 μm

Opotřebení po druhých přejezdech začínalo na hodnotě 330 μm a nejvyšší hodnota opotřebení pro druhé přejezdy byla změřena na 390 μm . Při takové hodnotě opotřebení zůstávala na VBD linie abrazivního opotřebení a současně je možné na scanu z 2D mikroskopu vidět počátek výmolů na čele ostří. Je zde také vidět úbytek VBD na horní hraně hlavního ostří. Toto opotřebení nebylo způsobeno vydrolováním ostří ani jiným typem opotřebení, ale hlavním důvodem byl výmol na čele ostří. Na VBD je také možné spatřit náznak odštípnutí břitu hlavního ostří, protože výmol na čele začíná měnit kinematickou geometrii VBD a vytváří si svojí geometrii. Z tohoto důvodu dochází k odštípnutí hlavního ostří současně na ploše hřbetu.



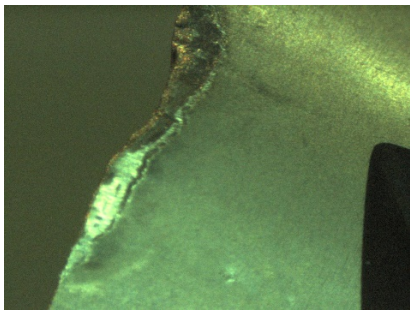
Obrázek 38 - 1-2 - 330 μm

Obrázek 39 - 2-2 - 380 μm

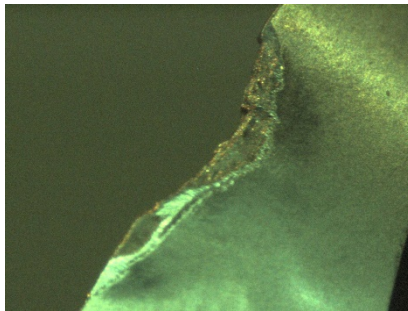
Obrázek 40 - 3-2 - 390 μm

U opotřebení nad 550 μm docházelo k prohlubování efektu opotřebení. Obecně je možné říci, že při takto vysokém opotřebení je umocněn efekt vysoké teploty a tlaku z důvodu vydírání čela břitu. Vytváří se pracovní kinematická geometrie a pomocí tohoto jevu přebírá břit opět funkci břitu a dochází k abrazivnímu opotřebení bez ohledu na výmol, který vznikl na čele břitu. Nicméně tento výmol se prohlubuje v závislosti na opotřebení a současně se zvyšuje spodní hodnota opotřebení VB, avšak opotřebení na hřbetě je přibližně pořád stejné. Tento efekt vznikl v nejhlubší části, tam kde dochází ke kontaktu s obrobeným povrchem. Na hraně VBD dochází

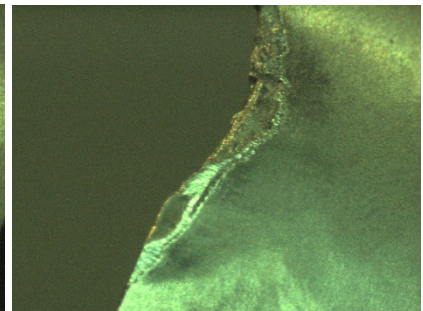
ke kontaktu s obrobeným povrchem. Na spodní hraně VBD je kontakt mezi obrobkem a destičkou a na horní hraně se objevuje efekt rozhraní vzduch – tříska. Destička se tedy zařezává do hrany obrobku, přičemž samotná hrana obrobku je velmi zpevněná. Jelikož se jedná o ocel s vysokou tvrdostí je zde umocněna velikost a typ opotřebení, protože VBD se vydírá a současně na čele bříty vzniká žlábek. Následně dochází k prohlubování opotřebení, protože v místě styku velmi intenzivně narůstá teplota a společně s teplotou narůstá také intenzita opotřebení. Prioritně tedy vzniká abrazivní opotřebení s občasným vylomením bříty, pravděpodobně vlivem tvoření nárůstků.



Obrázek 41 - 1-3 - 500 μ m



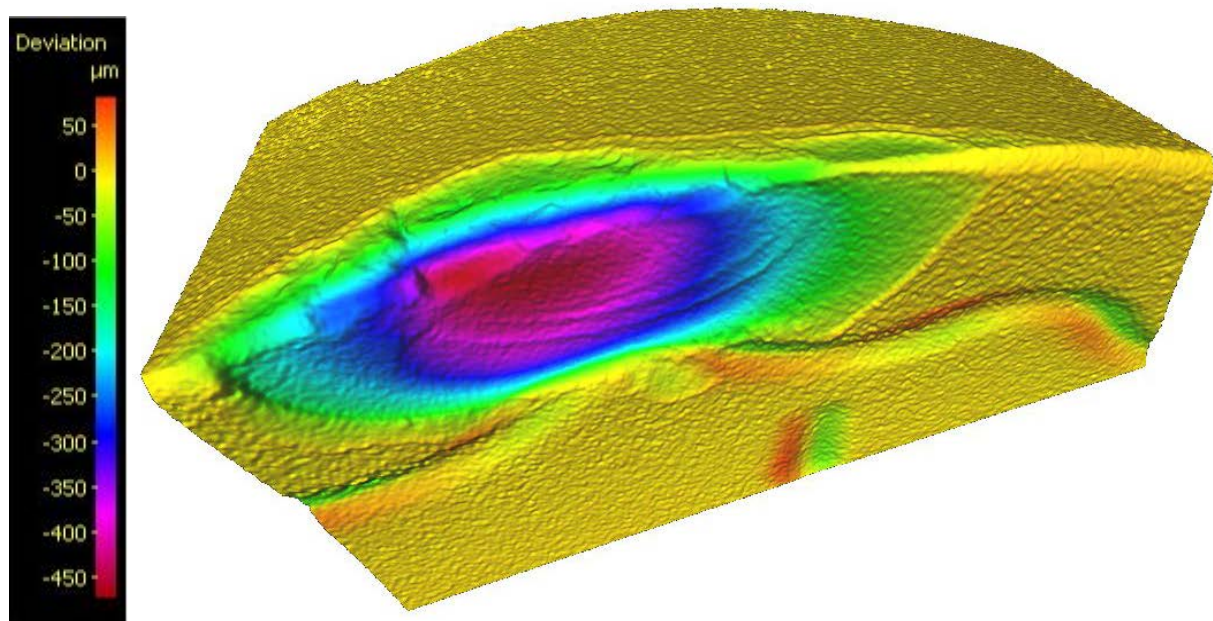
Obrázek 42 - 2-3 - 570 μ m



Obrázek 43 - 3-3 590 μ m

4.3.2 Diferenční analýza VBD

Diferenční analýza mikro geometrie nástroje a skutečného opotřebení VBD byla provedena na opticko-skenovacím mikroskopu IFM G4, který umožnil zachytit celou topografii povrchu VBD.



Obrázek 44 - Diferenční analýza VBD

Celý proces měření byl prováděn po skončení experimentu, kdy byl nejprve ofocen původní tvar VBD bez opotřebení a následně byl ofocen také tvar opotřebované VBD. Mikroskop tyto dvě destičky prolne do jedné a následně se obě destičky nastaví do jedné polohy. Mikroskop pak vykreslí úbytek, popřípadě nárůstek materiálu.

Opotřebení se měří od původního hlavního ostří, takže dochází k jeho neustálému nárůstu z důvodu vydírání čela břitu. Toto vydírání a vydlabání způsobilo ztrátu čela břitu, proto na 2D fotkách můžeme vidět, jak se vzdaluje nová viditelná hrana od původního hlavního ostří, protože na čele vznikl velký výmol. Výmol je kombinací porušení struktury, difúze a abrazivního opotřebení. Teplo z odebíraných třísek z obrobku totiž uvolňuje zrna wolframu ze základní struktury substrátu. VBD se pojí s materiálem třísky, což zapříčiní vznik výmolu na VBD. Opotřebení typu výmolu se nejvíce projevuje na čele nástroje jako malá jamka na vrchní části destičky. V našem případě vznikl tak velký výmol, že způsobil vydrolení ostří nástroje.

Vydírání nastává od určité hodnoty opotřebení, protože na čele chybí vrstva, která má funkci zabránit teplotnímu přechodu, současně se zvyšuje tření a zároveň také abraze VBD. Tato vrstva ztrácí svoji funkci přibližně od opotřebení 200 mikrometrů. Dojde k odhalení základního substrátu VBD, který již není povlakovaný a opotřebení přechází intenzivně do VBD a celý systém drží pouze na tomto substrátu.

4.4 Sumarizace výsledků

V průběhu diplomové práce bylo provedeno několik experimentů, které se věnovaly velikosti opotřebení, objemu odebraného materiálu a tvaru třísek, které vznikly při frézování materiálu Inconel 718. V grafu 1, který je zaměřen na průběh velikosti odebraného materiálu při nastavení hloubky řezu 0,5 mm v závislosti na opotřebení řezného nástroje je patrné, že při zvyšujícím se opotřebení řezného nástroje klesá hodnota objemu odebraného materiálu. Hodnota opotřebení VBD narůstá ke konci řezného procesu, proto je v grafu zřejmý pokles hodnoty objemu odebraného materiálu. Tento pokles je zapříčiněn množstvím tepla, které se v průběhu procesu obrábění ukládá do VBD a během tohoto procesu se neustále zvyšuje. Pro všechna opotřebení se trend ohybu objevuje prakticky u všech přejezdů a můžeme konstatovat, že na konci řezného procesu, dochází k mnohem většímu nárůstu opotřebení, a to jak na hřbetu, tak především na čele ve formě žlábků. Tento jev je v přímé korelaci s množstvím odebraného materiálu z řezu. V případě našeho experimentu byly provedeny tři opakování a v každém opakování byly provedeny tři přejezdy stejnou VBD. Reálná hodnota hloubky řezu byla nastavena na 0,5 mm, avšak skutečně odebíraná hloubka řezu se pohybovala v rozmezí od 0,4229 do 0,4946 milimetru. Nejnižší hodnota byla naměřena při prvním opakování, třetím přejezdu, a naopak nejvyšší hodnota při prvním opakování a první přejezdu. Nejvyšší hodnota byla tedy zaznamenána při použití nové VBD a nejnižší hodnota při opotřebení okolo 500 μm . V průběhu experimentu jsme zaznamenali ještě vyšší opotřebení než 500 μm , nicméně byla odebírána přibližně stejná hodnota hloubky řezu. Hodnota při opotřebení 590 μm byla

0,4296 mm, což je srovnatelné s hodnotou 500 mikrometrů. S poklesy hloubky řezu, tedy množstvím odebíraného materiálu z řezu jsou spojeny také tvary vzniklých třísek, které jsou závislé na opotřebení nástroje.

Při prvních přejezdech a opotřebení okolo 175 μm vznikly krátké stužkovité třísky, které mají podlouhlý tvar a nedochází zde k jejich zabalení. Opotřebení, které vzniklo na VBD je možné definovat jako čisté abrazivní opotřebení bez náznaku výmolů nebo adheze na čele břitu. V první fázi se tedy jednalo spíše o obrušování břitu nástroje.

V dalších dvou přejezdech a od hodnoty opotřebení 330 μm lze třísku hodnotit jako spirálovitou kuželovitou. U těchto přejezdů byly tvary třísek poměrně stejné, jelikož nedochází ke změně geometrie VBD a opotřebení břitové destičky se projevuje od čela břitu dolů. Z tohoto důvodu je geometrie břitu pořád stejná i za předpokladu, že se mění velikost hodnoty objemu odebraného materiálu. U těchto přejezdů vzniklo již opotřebení VBD ve tvaru výmolu na čele ostří. Střížná rovina třísky se v tomto případě již nemění, pouze se posouvá a zároveň se nemění ani úhly v závislosti na geometrii břitu.

5 Závěr

Předmětem této diplomové práce je vliv opotřebení na objem odebraného materiálu. Úvodní část je zaměřena na problematiku týkající se čelního rovinného frézování superslitin na bázi niklu. Následující kapitoly řeší volbu vhodných řezných podmínek a geometrii řezného nástroje pro obrábění této skupiny slitin.

Volba vhodných řezných podmínek pro obrábění těchto slitin, v našem případě materiálu Inconel 718, je velice důležité, jelikož tento materiál se řadí mezi těžkoobrobitelné materiály. Tato vlastnost může být zapříčiněna faktory (např. tvrdost, houževnatost, aj.), které působí na opotřebení břitu řezného nástroje. Z tohoto důvodu je nezbytné zvolit i vhodnou geometrii břitu frézy, aby fréza byla schopna třísku náležitě odebírat. Dále byl zhodnocen stav opotřebení nástroje v závislosti na obrábění superslitin na bázi niklu a také tvar vznikajících třísek při obrábění těchto materiálů. V neposlední řadě jsme se zabývali tepelnou bilancí, která souvisí s řezným procesem a je jeho nedílnou součástí.

Experiment diplomové práce vedl ke zjištění potřebných hodnot a pomohl tak například k ověření předpokladu vlivu opotřebení nástroje na objem odebraného materiálu. Úkolem bylo analyzovat všechny podmínky, které souvisejí s úběrem materiálu z řezu a také vlastní opotřebení nástroje. Pro naši práci byla využita čelní rovinná fréza s kruhovými VBD. Z důvodu vyššího a rychlejšího opotřebení VBD, bylo zvoleno frézování pouze jednou vyměnitelnou břitovou destičkou.

V průběhu celého experimentu byl kladen důraz na průběžnou kontrolu opotřebení nástroje, objem odebraného materiálu a zhodnocení tvaru a velikosti vzniklých třísek. Bylo provedeno několik korelací, ze kterých vyplývá, že opotřebení nástroje ovlivňuje množství odebíraného materiálu z řezu. Dále bylo zjištěno, že tvar a velikost vzniklých třísek jsou rovněž závislé na opotřebení. Na základě získaných výsledků lze konstatovat, že experiment proběhl úspěšně.

6 Použitá literatura

- [1] *Face Milling Simulation to Correlate and Predict The Effects of Machine Tool Geometric Errors on Part Flatness Tolerance* [online]. Copyright © Dostupné z: https://etd.ohiolink.edu/!etd.send_file?accession=ucin1406881376&disposition=inline
- [2] CORE – *Aggregating the world's open access research papers* [online]. Copyright © Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30290271.pdf>
- [3] NESLUŠAN, Miroslav a Andrej CZÁN. *Obrábanie titánových a niklových zliatin*. Žilina: Žilinská univerzita, 2001. ISBN 80-7100-933-4.
- [4] Cutting tool materials. *Document Moved* [online]. Copyright © Sandvik Coromant [cit. 13.06.2020]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/materials/pages/cutting-tool-materials.aspx>
- [5] [online]. Copyright © Dostupné z: http://www.sszts.cz/stary_web/stary_web/esf/TEC_fr.pdf
- [6] *DSpace VŠB-TUO* [online]. Copyright © Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/129681/HRU0165_FS_B2341_2303R002_2018.pdf?sequence=1
- [7] *DSpace at University of West Bohemia: NO TITLE* [online]. Copyright © Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/14134/1/Pivonka_Jiri_BP.pdf
- [8] *ČVUT DSpace* [online]. Copyright © Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/73049/F2-BP-2017-Trunca-Jan-BP_Trunca.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [9] [online]. Copyright © Dostupné z: <http://educom.tul.cz/getFile/case:get/id:14671>
- [10] 301 Moved Permanently. *The surface engineers* [online]. Dostupné z: <http://www.ionbond.cz/cz/technologie/pvd/>
- [11] Cutting tool materials. *Document Moved* [online]. Copyright © Sandvik Coromant [cit. 13.06.2020]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/materials/pages/cutting-tool-materials.aspx>
- [12] HOFFMANN GROUP, *Německo.Garant – Příručka obrábění* [online]. Dostupné z: <http://www.hoffmann-gmbh.de/download/cz/zerspanungshandbuch/cz-zerspanungshandbuch.pdf>
- [13] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění: učební text*. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2012. ISBN 978-80-248-2533-5.

- [14] URSUNCU, Bilal, Halil CALISKAN, Sevki yilmaz GUVEN a Peter PANJAN. *Wear Behavior of Multilayer Nanocomposite TiAlSiN/TiSiN/TiAlN Coated Carbide Cutting Tool during Face Milling of Inconel 718 Superalloy*. *Journal of Nano Research* [online]. Trans Tech Publications, 2017, 47, 11-16 Dostupné z: 10.4028/www.scientific.net/JNanoR.47.11. ISSN 1662-5250.
- [15] HUMÁR, A. *Technologie I - Technologie obrábění -1. část. Studijní opory*. VUT-FSI v Brně, ÚST, Odbor technologie obrábění. 2003. [online]. Dostupné na World Wide Web: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [16] BRYCHTA, Josef. *Technologie II*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1641-8.
- [17] Rosemar B. da Silva, Álisson R. Machado, Emmanuel O. Ezugwu, John Bonney, Wisley F. Sales. *Tool life and wear mechanisms in high speed machining of Ti-6Al-4V alloy with PCD tools under various coolant pressures*. [Online] *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 213, Issue 8, August 2013, Pages 1459-1464, ISSN 0924-0136
- [18] Wenhao Shi, Song Zhang, Jianfeng Li, Gang Li, Tao Zhang: *Analysis of tool wear in face milling of alloy cast iron under constant material removal volume condition* [online]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/317103967_Analysis_of_tool_wear_in_face_milling_of_alloy_cast_iron_under_constant_material_removal_volume_condition
- [19] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999. ISBN 978-80-01-03752-2.
- [20] *Střední průmyslová škola Ostrava - Vítkovice, příspěvková organizace - Úvod* [online]. Copyright © Dostupné z: https://www.spszenegrova.cz/texty/texty/STT/STT2-5_Zakladni_pojmy_obrabeni_RAJ.pdf
- [21] Řehoř, J.: *Teorie obrábění; podklady k přednáškám*, z: <https://portal.zcu.cz/portal/studium/courseware>
- [22] KUBÍČEK, M.: *Mechanika tvoření třísky, nárůstek, lamače třísek* [online]. Copyright © Dostupné z: http://domes.spsbrno.cz/web/DUMy/STT,%20KOM/VY_32_INOVACE_19-04.pdf
- [23] Up and Down Cut (CLIMB) Milling | MITSUBISHI MATERIALS CORPORATION. *MITSUBISHI MATERIALS CORPORATION | METALWORKING SOLUTIONS COMPANY* [online]. Copyright © MITSUBISHI MATERIALS Corporation. All rights reserved. [cit. Dostupné z: http://www.mitsubishicarbide.com/en/technical_information/tec_rotating_tools/face_mills/tec_rotating_function_cutting_edge/tec_milling_function_cut

- [24] Beneš, P., *Teplotní degradace tenkých otěruvzdorných PVD vrstev* [Disertační práce]
- [25] BUDA, Ján, BÉKÉS, Ján. *Teoretické základy obrábania kovov*. Bratislava: ALFA, 1977. 696 s. ISBN 302-05-59.
- [26] Frézovací hlava Kraken z RTI získala zlatou medaili na Mezinárodním strojírenském veletrhu - INFO - zpravodajský portál ZČU. *INFO - zpravodajský portál ZČU* [online]. Dostupné z: <https://info.zcu.cz/clanek.jsp?id=1662>
- [27] Alloys Inconel 718 with good heat conductivity. *Professional supplier of Nickel-based Alloys, Tungsten Carbide alloys, Titanium, Copper alloys material | LKALLOY* [online]. Copyright © 2018 Dostupné z: <https://lkalloy.com/cs/nickel-based-alloys/inconel-718/>
- [28] INCONEL® alloy HX. *Special Metals Wiggin* [online]. Dostupné z: <http://www.specialmetalswiggin.co.uk/pdfs/products/INCONEL%20alloy%20HX.pdf>
- [29] Kruhová výseč - výpočet poloměru, obvodu, obsahu, úhlu, délky, výšky, tětiny, vzorce. *Dopocitej.cz - stránky plné výpočtů* [online]. Dostupné z: https://www.dopocitej.cz/kruhova_vysech.html
- [30] Applied Sciences | Free Full-Text | Effect of the Relative Position of the Face Milling Tool towards the Workpiece on Machined Surface Roughness and Milling Dynamics. *MDPI - Publisher of Open Access Journals* [online]. Copyright © 1996 Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/5/842>