

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N 2301 Strojní inženýrství

Studijní zaměření: 2303T004 Strojírenská technologie – technologie obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Trvanlivost řezných nástrojů při výrobě otvorů v materiálu
Inconel 718**

Autor: **Bc. Milan Daňa**

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

Akademický rok 2014/15

Oficiální zadání 1 strana

Oficiální zadání 2 strana

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne

.....

Podpis autora

Poděkování

Poděkování patří především mému vedoucímu Diplomové práce doktoru Miroslavu Zetkovi, který mi při vypracovávání diplomové práce věnoval mnoho času. Závěrem bych chtěl poděkovat mé rodině a přítelkyni za podporu po celou dobu studia.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Daňa	Jméno Milan	
STUDIJNÍ OBOR	N2301 „Strojírenská technologie-technologie obrábění“		
VEDOUČÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Zetek Ph.D.	Jméno Miroslav	
PRACOVÍŠTĚ	ZČU - FST - KTO		
DRUH PRÁCE	BAKALÁŘSKÁ	DIPLOMOVÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Trvanlivost řezných nástrojů při výrobě otvorů v materiálu Inconel 718		

FAKULTA	Strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEV.	2015
----------------	---------	----------------	-----	------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	80	TEXTOVÁ ČÁST	67	GRAF. ČÁST	13
---------------	-----------	---------------------	-----------	-------------------	-----------

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)	Tato práce se zabývá vrtáním a závitováním Inconelu 718. Nejprve bylo nutné zmapovat materiálové vlastnosti tohoto materiálu a následně bylo zapotřebí rozebrat současný stav jednotlivých technologií a používaných nástrojů včetně jejich materiálů. Po teoretické části bylo nutné vyhledané informace experimentálně ověřit. Poté byly jednotlivé nástroje otestovány a naměřené výsledky vyhodnoceny. V poslední části této práce byly výsledky porovnány s dosaženými výsledky jiných výzkumných ústavů a následně byly vyvozeny závěry.
ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	Inconel 718, Vrtání, Závitování, Trvanlivost nástrojů, Řezné síly

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Daňa	Name Milan	
FIELD OF STUDY	B2301 „Department of Machining Technology“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Zetek Ph.D.	Name Miroslav	
INSTITUTION	ZČU - FST – KTO		
TYPE OF WORK	BACHELOR	DIPLOMA	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	CUTTING TOOL LIFE WHEN HOLES FROM INCONEL 718 ARE MACHINED		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machining Technology	SUBMITTED IN	2015
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	80	TEXT PART	67	GRAPHICAL PART	13
----------------	-----------	------------------	-----------	-----------------------	-----------

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>This work deals with drilling and tapping from Inconel 718. First, there was necessary to map the material properties of Inconel 718 and then were analysed the existing knowledge of each technologies and using tools including their materials. Second part is aimed to experimental testing of information summarised in first part of the work. The results from the testing were processed and analysed. In the last part of the work were these results compared with other researches of other institutions and discussed.</p>
KEY WORDS	Inconel 718, Drilling , Tapping , Cutting tool life, Cutting forces

Seznam zkratek, symbolů a jednotek

CAD	Počítačem podporované navrhování
3D	Třírozměrný
HSS	Rychlořezné oceli
SK	Slinuté karbidy
RO	Rychlořezné oceli
ČSN	Česká státní norma
EP přísady	Přísady pro vysoké tlaky
WC	karbid wolframu
TiC	karbid titanu
NbC	Karbid niobu
TaC	karbid tantalu
TiN	Nitrid titanu
TiAlN	Nitrid Titanu a hliníku
TripleCoatings	Druh tenké vrstvy
WXS	Druh tenké vrstvy
HV	Jednotka tvrdosti podle Vickerse
IFM G4	Optický mikroskop
μm	Jednotka délky
mm	Jednotka délky
MPa	Jednotka tlaku
PVD	Fyzikální depozice z plynné fáze
CVD	Chemická depozice z plynné fáze
MT-CVD	Chemická depozice z plynné fáze za středních teplot
PACVD	Chemická depozice z plynné fáze za asistence plasmu
Fp	Pasivní složka řezné síly (v ose y)
Ff	Složka řezné síly v ose x
Mz	Krouticí moment
V _c	řezná rychlost [m/min]
f _{ot}	Posuv na otáčku [mm/ot]
Ra	Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti
Rt	Celková výška profilu drsnosti
Rz	Největší výška profilu drsnosti

Obsah

1	ÚVOD	1
2	ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU	2
2.1	Superslitina Inconel 718	2
2.1.1	Mikrostruktura	2
2.1.2	Historie Inconelu 718	2
2.1.3	Chemické složení Inconel 718	3
2.1.4	Vlastnosti Inconelu 718	3
2.1.5	Použití Inconelu 718	4
2.1.6	Obrobitelnost superslitin	4
2.1.7	Obrobitelnost Inconelu	5
2.1.8	Obecné doporučení při obrábění superslitin	6
2.2	Řezné materiály	6
2.2.1	Řezné materiály pro monolitní nástroje	7
2.2.2	Rychlořezné oceli	7
2.2.3	Slinuté karbidy	8
2.2.4	Slinuté karbidy povlakované [42],[52],[53]	10
2.2.5	Metody depozice tenkých vrstev	10
2.2.6	Metoda depozice PVD	10
2.2.7	Druhy povlaků nástrojů používaných při obrábění Inconelu 718	11
2.2.7.1	TiN a TiCN	11
2.2.7.2	Vrstva TiAlN	12
2.2.7.3	TripleCoatings	12
2.2.7.4	WXS	13
2.3	Vrtání Inconelu	14
2.3.1	Procesní kapaliny	15
2.3.2	Třísky	17
2.3.3	Opotřebení nástrojů	18
2.3.3.1	Druhy mechanismů vzniku opotřebení u Inconelu 718	19
2.3.3.2	Opotřebení hřbetu	20
2.3.3.3	Opotřebení ve tvaru vrubu	21
2.3.3.4	Opotřebení hřbetu na příčném ostří	22
2.3.3.5	Nárůstek	22
2.3.3.6	Zalomení nástroje	23
2.4	Závitování	23
2.4.1	Mazání a chlazení	25
2.4.2	Příprava otvoru pro závit	25
2.4.3	Upínání závitníků	26
2.4.4	Průběh krouticího momentu při závitování	27
2.4.5	Závitování Inconelu 718	28
2.4.6	Opotřebení závitníků	28

3	NÁVRH A REALIZACE VLASTNÍCH EXPERIMENTŮ	30
3.1	Použité zařízení	31
3.1.1	Použité nástroje	31
3.1.1.1	Vrtáky	31
3.1.1.2	Závitníky	31
3.1.1.3	Volba řezných podmínek	32
3.1.2	Použité stroje a přístroje	33
3.1.2.1	Stroj	33
3.1.2.2	Upínač vrtáků	33
3.1.2.3	Upínač závitníků	33
3.1.2.4	Optický mikroskop Multicheck 500 PC	34
3.1.2.5	Optický mikroskop Infinite Focus measurement G4	34
3.1.2.6	Zařízení pro měření řezných sil a momentů	35
3.1.3	Polotovary zkušebních vzorků	36
3.1.3.1	Chemické složení a mechanické vlastnosti použitého materiálu	37
3.2	Vyhodnocení experimentů	38
3.3	Vyhodnocení řezných sil	38
3.3.1	Řezné síly při vrtání	39
3.3.1.1	Krouticí moment	42
3.3.2	Řezné síly při závitování	44
3.4	Vyhodnocení trvanlivosti nástrojů	46
3.4.1	Trvanlivost vrtáků	46
3.4.2	Trvanlivost závitníků	46
3.5	Vyhodnocení opotřebení	47
3.5.1	Vyhodnocení opotřebení vrtáku A1 a A2	47
3.5.2	Vyhodnocení opotřebení vrtáku B1 a B2	49
3.5.3	Vyhodnocení opotřebení závitníku C1 a C2	50
3.5.4	Vyhodnocení opotřebení závitníku D1 a D2	51
3.6	Průměr vrtaných děr	53
3.7	Vyhodnocení drsnosti povrchu	55
3.8	Vyhodnocení přesnosti závitu	58
4	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A DOPORUČENÍ	61
4.1	Zhodnocení výsledků řezných sil	61
4.1.1	Porovnání řezných sil s experimenty jiné instituce	61
4.1.2	Porovnání průběhu krouticího momentu při závitování	63
4.2	Zhodnocení výsledků opotřebení	64
4.2.1	Zhodnocení opotřebení při vrtání	64
4.2.2	Zhodnocení opotřebení při závitování	64
4.3	Doporučení	65
4.3.1	Doporučení pro závitování závitníkem C	65

5 ZÁVĚR.....	66
CITOVANÉ ZDROJE.....	68
Literatura	68
SEZNAM OBRÁZKŮ	75
SEZNAM GRAFŮ	77
SEZNAM TABULEK.....	78

1 Úvod

V minulém století byl vynalezen materiál Inconel 718, který byl zařazen do skupiny materiálů, jež jsou těžkoobrobitelné konvenčními metodami obrábění. Díky jeho charakteristickým vlastnostem, jakož jsou vysoká pevnost, vysokoteplotní i nízkoteplotní pevnost, nízká tepelná vodivost, korozivzdornost a další, si tento materiál našel uplatnění především v leteckém a kosmickém průmyslu. Vzhledem k tomu, že se Inconel 718 prosadil v těchto významných odvětvích, kterým se věnuje mnoho strojírenských podniků, bylo nezbytné se zabývat jeho obráběním. I v současné době moderních technologií je obrábění tohoto materiálu velkým problémem. Téměř každá součást, která se nachází v letadle či raketoplánu, obsahuje alespoň několik děr nebo děr se závity. Jedná se tedy o prvky, které jsou pro tyto odvětví stěžejní. Jak již bylo řečeno, obrábění tohoto materiálu je velkým problémem pro konvenční operace, mezi které vrtání a závitování bezpochyby patří. Tento fakt byl podnětem pro vytvoření této diplomové práce.

Tato diplomová práce se bude zabývat vrtáním a závitováním Inconelu 718. Vzhledem k tomu, že pojem vrtání zahrnuje velice širokou oblast, se tato práce omezí pouze na vrtání monolitními nástroji. Při závitování se bude práce ubírat směrem závitování za pomoci závitníků.

Úvodem práce je nutné se seznámit s materiálem a jeho vlastnostmi, které je potřeba zmapovat. Pro obrábění je nezbytné dokonale určit, jaký materiál bude obráběn. Díky tomu lze předcházet některým problémům, které mohou vzniknout. Následně se práce ubírá směrem od materiálu k řeznému nástroji, kdy je prvotně důležité rozklíčovat, jaký řezný materiál je možné pro tyto aplikace použít. S materiálem nástroje je neodmyslitelně spjata tenká vrstva, již se bude zabývat další kapitola této práce. Zásadní kapitolou je vrtání Inconelu 718, kde jsou formulovány zásadní problémy, které při tomto procesu obrábění vznikají. Důležité je zde vytipování jednotlivých druhů opotřebení, jež mohou vzniknout při vrtání tohoto materiálu. Závěr teoretické části je věnován procesu závitování. Je zde stručně popsán princip závitování závitníky, poté následují informace o přípravě otvorů, průběhu krouticího momentu, možnosti chlazení a mazání. Úplný závěr teoretické části je věnován druhům opotřebení, které mohou vzniknout při závitování závitníky.

Náplní experimentální části bylo otestovat dva druhy vrtáků a dva druhy závitníků do materiálu Inconel 718. Každý nástroj byl otestován pouze s jedním opakováním díky vysoké ceně nástrojů i materiálu. Během experimentů byly měřeny řezné síly, opotřebení nástrojů, trvanlivost a další vlivy, které jsou v práci vyhodnoceny. V předposlední kapitole jsou zhodnoceny dosažené výsledky a navrhnuté doporučení pro zlepšení sledovaných procesů. Náplní této kapitoly je i porovnání dosažených výsledků této práce s dosaženými výsledky jiných výzkumných institucí. Poslední kapitolou diplomové práce je závěr, kde jsou sumarizovány výsledky a je zhodnocena tato práce jako celek. Cílem této práce je realizace experimentů za účelem vyselektování nejvhodnější kombinace vrtáku a závitníku pro zhotovení otvoru se závitem.

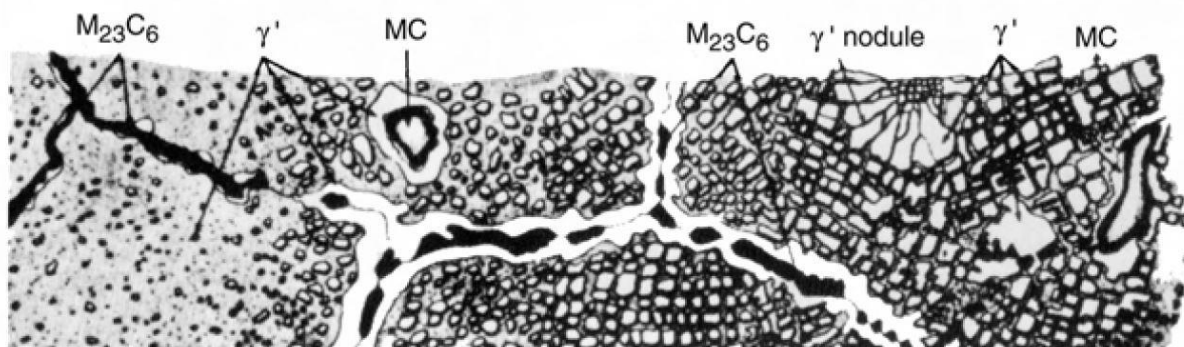
2 Rozbor současného stavu

2.1 Superslitina Inconel 718

O superslitině se hovoří jako o materiálu, který dokáže pracovat i nad teplotu 650°C. Mezi jeho další vlastnosti patří žáruvzdornost, žarupevnost, odolnost proti tečení, odolnost proti korozi, rozměrová stálost, odolnost proti únavě, schopnost pracovat delší čas při vysokých teplotách a dalo by se vyjmenovat mnoho dalších vlastností. Každý průmysl má své specifické požadavky na superslitiny. Superslitiny se dělí podle druhu matrice na tři základní skupiny. Matrice na bázi kobaltu, železa a niklu. [23],[24],[29]

2.1.1 Mikrostruktura

V mikrostruktuře niklových superslitin je obsaženo několik velmi rozdílných fází, každá z nich svým způsobem ovlivňuje výsledné materiálové vlastnosti. Ve výskytu fází má hlavní slovo chemické složení, ale může být v nemalé míře ovlivněno například tepelným zpracováním. Základním stavebním kamenem mikrostruktury je matrice γ . Další fáze, které se zde vyskytují, jsou vytvrzující fáze γ' a γ'' , primární karbidy, sekundární karbidy a nežádoucí fáze. Pro dosažení vynikajících vlastností, které nasazení niklových slitin předpokládá, je potřeba zamezit vylučování nežádoucích fází. [24],[25],[28]

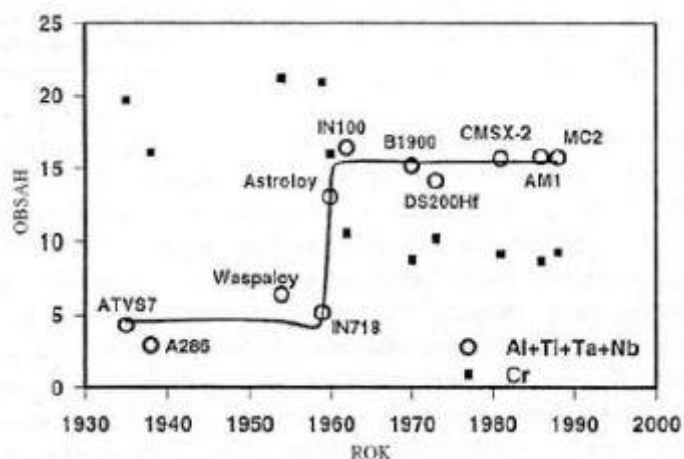


Obr. 1 Mikrostruktura niklových superslitin vlivem vývoje [25]

Pro zpevňování Inconelu 718 je zásadní vytvrzující fáze γ'' . Jedná se o základní zpevňující fázi ve speciálních slitinách. V tomto případě se jedná o zpevňující fázi s chemickým vzorcem Ni_3Nb , která má tetragonální prostorově centrovanou mřížku. Fáze γ'' vytváří koherentní precipitáty s austenitickou matricí. Precipitáty jsou ve formě diskovitých částic a lamel. Radikálně zvyšuje hodnoty pevnosti do teploty cca 650°C, kdy je stabilní. Nad teplotu 650°C se stává fáze metastabilní díky změně mřížky na ortombickou. [10],[24],[27],[28]

2.1.2 Historie Inconelu 718

Jedná se o slitinu, která byla vyvinuta během 60. let minulého století s vizí uplatnění v leteckém a kosmickém průmyslu, avšak díky svým výborným vlastnostem se rozšířila i do dalších odvětví. Jedná se o superslitinu na bázi niklu a chromu, která může být vytvrzena a tím dosahuje vynikajících vlastností. Inconel 718 známe díky společnosti Special Metals Corporation, která dodává na trh speciální materiály, do kterých Inconel 718 bezpochyby patří. Můžeme ji najít také pod označením UNS N07718, W.Nr. 2.4668, ale častější je její zaběhnutý název. [30],[21]



Obr. 2 Vývoj superslitin [31]

2.1.3 Chemické složení Inconel 718

Inconel 718							
Nikl (+Kobalt)	Chrom	Železo	Niob (+Tantal)	Molybden	Titan	Hliník	Kobalt
50,0-55,0	17,0-21,0	Zbytek*	4,75-5,5	2,8-3,3	0,65-1,15	0,2-0,8	1,0 max
Magnesium	Křemík	Měď	Uhlík	Fosfor	Síra	Bór	
0,35 max	0,35 max	0,3 max	0,08 max	0,015 max	0,015 max	0,006 max	
Hodnoty v tabulce jsou uvedeny v procentuálním podílu ve sloučenině							
Zbytek* - jedná se o hodnotu okolo 16 – 19% v závislosti na hodnotách ostatních prvků ve sloučenině							

Tab. 1 Chemické složení Inconel 718 [22]

Obsah uhlíku je nutno držet na malých a regulovaných hodnotách, neboť s uhlíkem se pojí další prvky a tvoří karbidy, které jsou zde ve větší míře nežádoucí. Díky předpokladu dlouhodobého používání této slitiny je třeba počítat s tím, že by se karbidy mohly seskupovat po hranicích zrn a mohlo by docházet ke ztrátě mechanických vlastností za vysokých teplot, což je naprosto nepřijatelné. Dále je potřeba počítat s horší korozní a oxidickou odolností. [23]

2.1.4 Vlastnosti Inconelu 718

Mechanické vlastnosti Inconel 718						
Pevnost v tahu [MPa]	Mez kluzu [Mpa]	Modul pružnosti [GPa]	Tvrdość [HV10]	Hustota [g/cm3]	Bod tání [°C]	Tepelná vodivost [W/(mK)]
1310	1110	206	420	8.19	1300	11.2

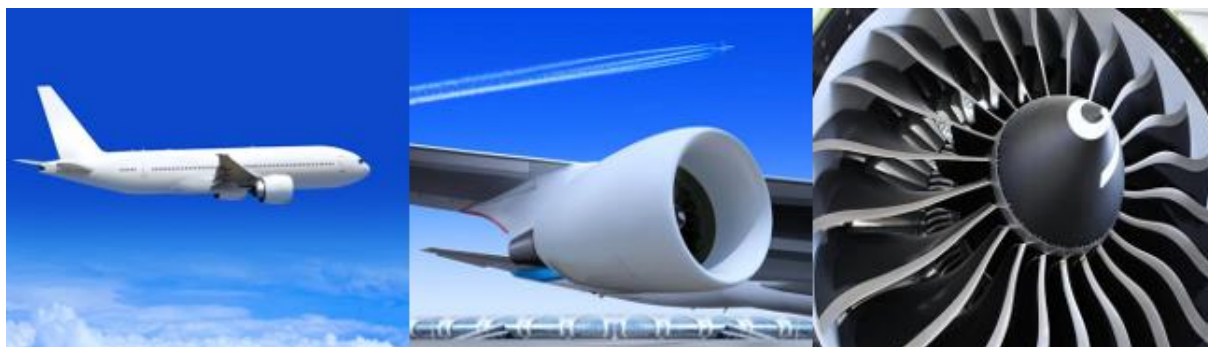
Tab. 2 Mechanické vlastnosti Inconel 718 [10]

Inconel 718 disponuje řadou vlastností, které nejsou pro ostatní materiály dosažitelné. Mezi takovéto vlastnosti patří například nízkoteplotní a vysokoteplotní pevnost, která dokáže pracovat od teplot hodně pod bodem mrazu -250°C až do teploty 700°C . Další unikátní vlastností je korozní odolnost za vysokých teplot. Během ohřívání na vysokou teplotu se na

povrchu součásti vytvoří povrchová vrstva oxidu, který chrání součást před těmito nepřátelskými vlivy a teplotami. Při teplotách nad 700°C ztrácí hliník a ocel ve struktuře Inconelu své vlastnosti, a proto nemůže dál odolávat nepřátelským vlivům. Objemové deformaci za zvýšených teplot brání sloučenina Ni_3Nb , díky které si Inconel při změně teplot zachovává téměř neměnné vlastnosti. Tvrdost slitiny je velmi závislá na tepelném zpracování. Ve stavu žíhaném může tvrdost být 20 – 25 HRC, ale při vytvrzení slitiny může tvrdost dosahovat vyšších hodnot v rozmezí 36 až 44 HRC. Teplota tavení se pohybuje v rozmezí 1260-1336°C. [21],[22],[32],[33]

2.1.5 Použití Inconelu 718

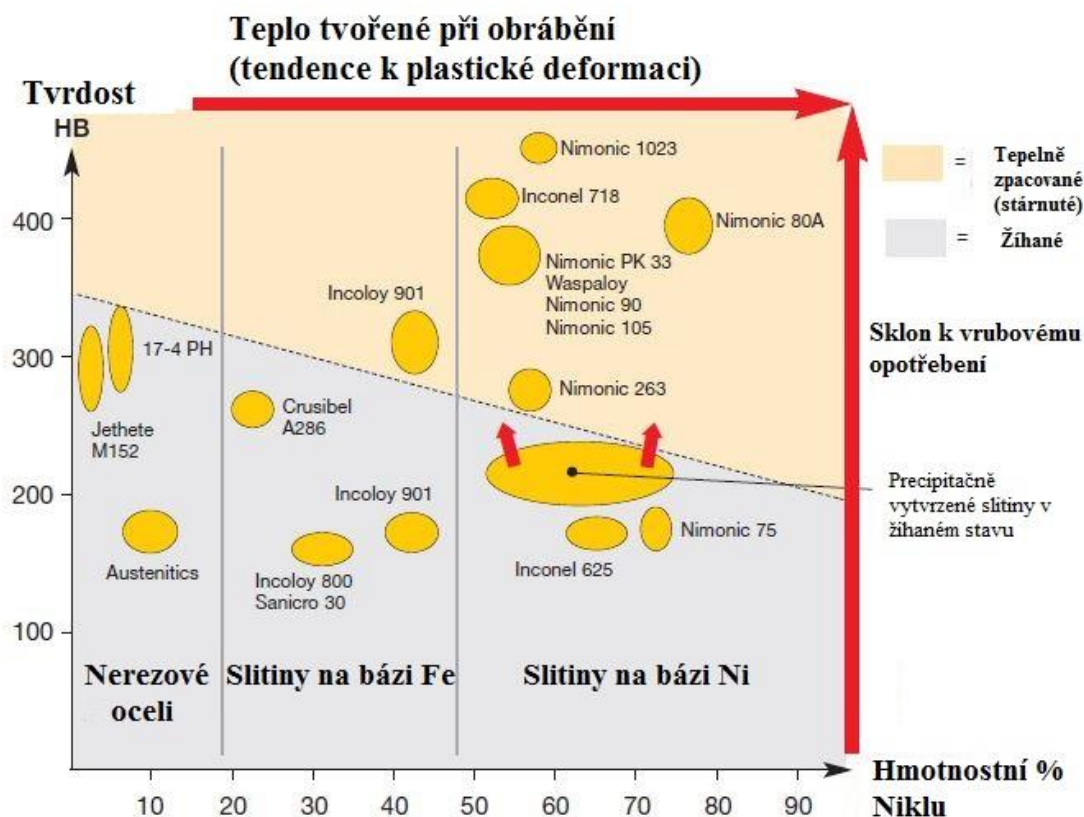
Vlastnosti Inconelu jsou přesně těmi vlastnostmi, které potřebují materiály používané v leteckém průmyslu. Části používané v letadlových motorech jsou vystavovány velmi vysokým teplotám, kdežto kryogenním teplotám jsou vystavovány plechové díly letadla a přesto tyto rozdílné díly mohou být vyrobeny z téhož materiálu. Dalšími hlavními představiteli, kde se Inconel 718 hojně používá, jsou spalovací turbíny, spalovací motory a ropná zařízení. U spalovacích turbín a motoru jsou lopatky namáhány mnoha vlivy, ale mezi nejnáročnější patří teplotní namáhání, vysokoteplotní koroze, creep, cyklické namáhání a z toho plynoucí únavové namáhání. Hlavně v těchto nesmírně náročných provozech se uplatní specifické vlastnosti Inconelu 718. [25],[32]



Obr. 3 Použití Inconel 718 v leteckém průmyslu [34]

2.1.6 Obrobitelnost superslitin

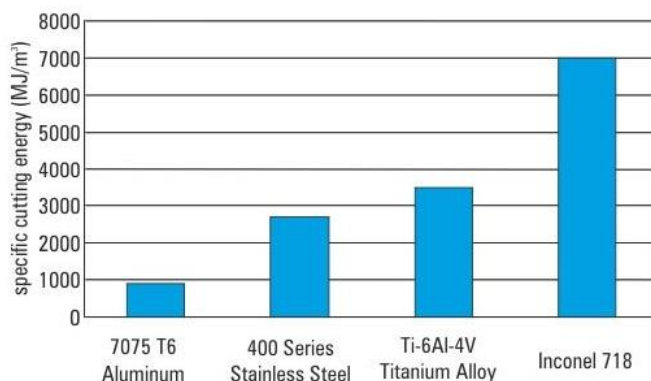
Obrobitelnost superslitin je bezprostředně závislá na stavu materiálu. Pokud superslitina bude normalizačně žíhaná, lze předpokládat mnohem lepší obrobitelnost, než když bude precipitačně vytvrzená. Ovšem charakteristickou vlastností vysokoteplotní pevnost mají všechny jmenované slitiny, díky tomu se při jejich obrábění tvoří krátká článkovitá tříška a vznikají velmi vysoké řezné síly, které se pohybují v rozmezí 2400-3100 N/mm². Problémem z hlediska obrobitelnosti je špatná tepelná vodivost, která zapříčiňuje špatný odvod tepla při obrábění, a to má za následek, že v místě řezu vznikají velmi vysoké teploty. V neposlední řadě má značný vliv i zpevňování povrchu v důsledku obrábění. [35],[36]



Graf 1 Obrobitelnost superslitin [37]

2.1.7 Obrobitelnost Inconelu

Obrobitelnost Inconelu 718 je velmi obtížná. Jedná se o materiál, který patří mezi nejhůře obrobitelné superslitiny. Konvenčními metodami je tato slitina velmi obtížně obrobitelná díky svým vynikajícím mechanickým vlastnostem. Inconel 718 má základní vlastnost a to tu, že při kontaktu s nástrojem dochází k jeho mechanickému zpevňování. Vzhledem k této nevhodné vlastnosti je potřeba co nejvíce omezit obrábění na co nejmenší počet pracovních přejezdů či cyklů. Pokud to není možné, doporučuje se, aby se při každém dalším obrábění rezná část nástroje dostala pod zpevňovanou vrstvu. Při obrábění této slitiny vzniká velké množství tepla, proto je téměř nutné při obrábění chladit, a to velkými tlaky a objemy. [33]



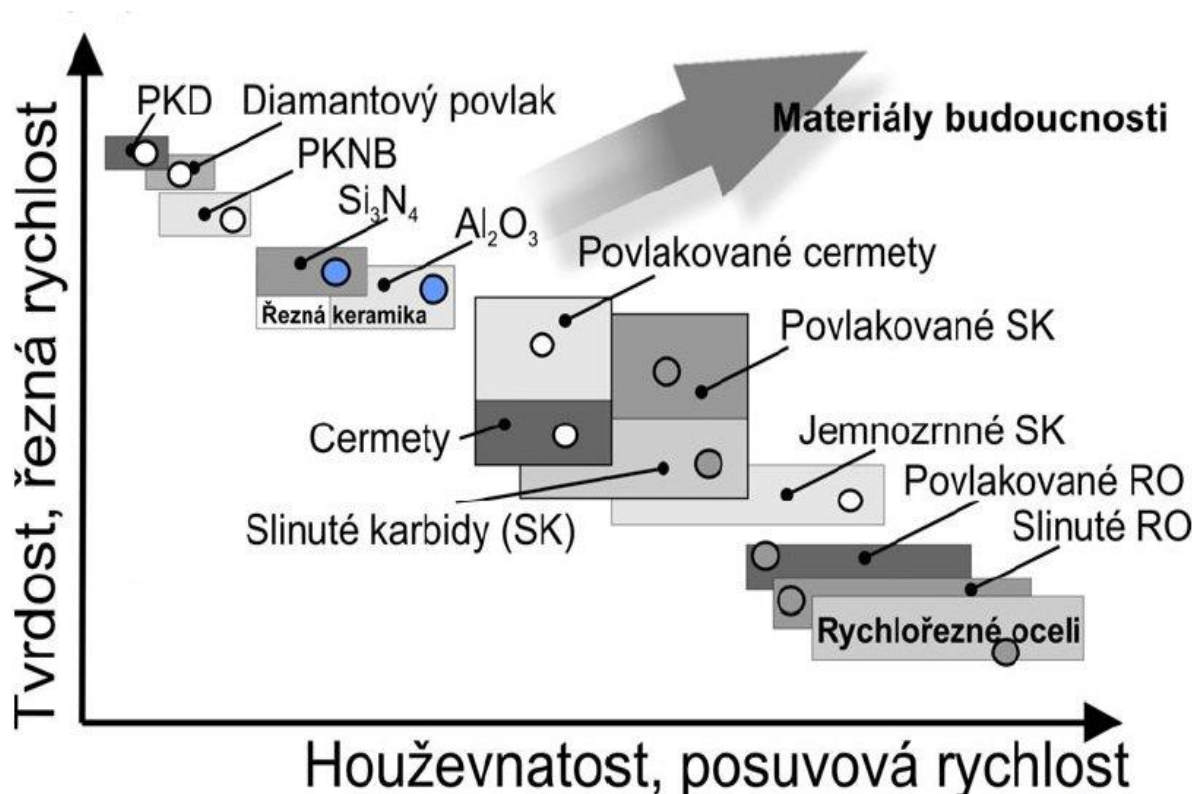
Graf 2 Porovnání obrobitelnosti různých materiálů [38]

2.1.8 Obecné doporučení při obrábění superslitin

Při obrábění niklových superslitin je vhodné používat řezné nástroje s pozitivním ostřím, neboť rychle vyčerpá plastickou deformaci ve skluzové rovině, tím dochází k řezání a nikoli k hnutí materiálu. Kdyby docházelo k hnutí materiálu, povrchová vrstva obrobku by se zpevnila a následné obrábění by bylo velice obtížné. Jestliže k hnutí materiálu dochází, je to impuls, že nástroj není dost pozitivní. Ovšem nelze řezný břit dělat stále více a více pozitivní, protože by nebyl dostatečně tuhý a docházelo by k jeho destrukci, popřípadě k nadměrnému opotřebení, například plastickou deformací břitu nástroje. Plynulý odchod třísek je velmi důležitý, neboť pokud by se tříska, která je protvářená a zpevněná, dostala do kontaktu s ostřím, mohlo by docházet k nadměrnému opotřebení, nebo by mohlo docházet k vyламování ostří. Plynulý odchod třísek je zajištěn chlazením. Je vhodné použít vysokotlaké chlazení, což napomáhá vhodně dělit třísku, která je následně lépe odváděna z místa řezu. Pokud je to možné, je vhodné přivádět vysokotlaké chlazení vnitřkem nástroje. Vysokotlaké chlazení se rozumí 70barů, což se v dnešní době začíná v moderních obráběcích strojích brát za standard. Díky chlazení vnitřkem nástroje se více kapaliny dostane do místa řezu a to napomáhá snížit teplotu řezání. Teplotu v místě řezu velmi ovlivňuje radius špičky nástroje, čím větší radius, tím se lépe rozloží teplo do břitu nástroje. Charakteristické pro obrábění superslitin jsou malé řezné rychlosti v řádech pouze desítek metrů za minutu, ale jsou požadovány velmi vysoké výkony při těchto nízkých otáčkách, což může být pro některé vysokootáčkové stroje velký problém. Soustava stroj - nástroj - obrobek by měla mít co největší tuhost. Nejvíce trvanlivost nástroje ovlivňuje řezná rychlost. [39],[40]

2.2 Řezné materiály

V současné době je známo několik řezných materiálů, které se svými vlastnostmi od sebe značně liší. Každý určitý materiál vykazuje nejlepší výsledky v určitém druhu materiálu a použití. Řezné materiály, které se dnes používají, jsou rychlořezná ocel, slinutý karbid, cermet, řezná keramika, kubický nitrid bóru a diamant. Během řezného procesu na řezný břit působí velký měrný tlak, namáhání, jak tlakové, tak ohybové, a to za vystavování břitu vysokým teplotám. Základní požadavky kladené na řezné materiály jsou tvrdost za tepla, houževnatost, pevnost v ohybu, chemická stálost, ořezuvzdornost, odolnost vůči tepelnému šoku, tepelná roztažnost, tepelná vodivost a další... [41],[42]



Graf 3 Diagram řezných materiálů [43]

2.2.1 Řezné materiály pro monolitní nástroje

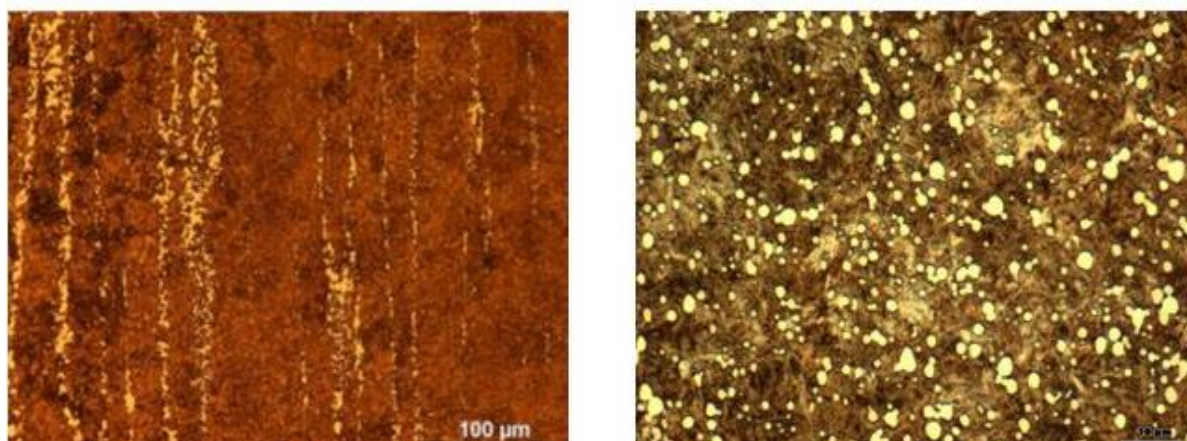
Materiál u monolitních nástrojů je totožný s řezným materiálem, kdežto u nástrojů s vyměnitelnými destičkami je z řezného materiálu pouze destička a držák destičky je ze zušlechtné oceli. Na monolitní nástroje se s výhodou používají především rychlořezná ocel a slinuté karbidy. Další řezné materiály, jako jsou cermety, řezná keramika a diamant, se v monolitních nástrojích povětšinou nevyskytují. Rychlořezná ocel a slinuté karbidy se používají především díky svým mechanickým vlastnostem, hlavně díky houževnatosti, a dalším velmi významným kritériem je cena. Vyrobit například monolitní vrták z řezné keramiky v dnešní době není taková utopie, ale byl by zřejmě velmi křehký a jeho cena by byla astronomická. Proto se tyto ostatní řezné materiály používají převážně na výrobu řezných destiček. [41],[44]

2.2.2 Rychlořezné oceli

Rychlořezné oceli jsou slitiny železa a legujících prvků. Mezi hlavní legující prvky patří wolfram, kobalt, chrom, molybden a vanad. Obsah uhlíku je v rozmezí 0,7 až 1,3%. Označení HSS, kterým jsou rychlořezné oceli označovány, je z anglického High speed steel. Tyto oceli se vyznačují několikanásobnou trvanlivostí a větším výkonem nežli nástrojové oceli. Mezi hlavní přednosti rychlořezných ocelí patří velmi dobrá houževnatost a dostatečná pevnost, výborná prokalitelnost a odolnost proti popuštění. Je potřeba také zmínit, že tento materiál je cenově velmi dostupný, proto se z něho vyrábí především monolitní nástroje. Rychlořezné oceli lze rozdělit dle ČSN na tři druhy, a to oceli s vysokým výkonem, oceli výkonné a oceli pro běžné použití. Pro nejvíce namáhané nástroje je vhodné použít oceli s vysokým výkonem, které dokáží odolat i teplotám do 650°C. Mezi oceli s vysokým výkonem je možné zařadit tyto představitele dle ČSN 19850, 19851 až 19861. Jedná se o

oceli s vyšším obsahem legujících prvků, především kobaltu, jehož koncentrace se může pohybovat i okolo 10%. Pro správné využití rychlořezných nástrojů je potřeba zvolit vhodné řezné prostředí, jako jsou řezné emulze s EP přísadami a řezné oleje. [41],[42],[44],[45]

Zlepšení vlastností bez použití povlaku v dnešní době není tak mnoho, neboť vývoj rychlořezných ocelí už je zřejmě na vrcholu. Pro zlepšení vlastností se využívá především práškové metalurgie, přetavování ocelí a kryogenního tepelného zpracování. Všechny tyto operace mají za účel co nejvíce zjemnit strukturu a zbavit strukturu nečistot. Při práškové metalurgii se do rychlořezné oceli přidá větší podíl tvrdých částic. Tvrdé částice jsou karbidy, které jsou velice malé 3-5 μm a vytváří velmi jemnou strukturu. [44],[46]

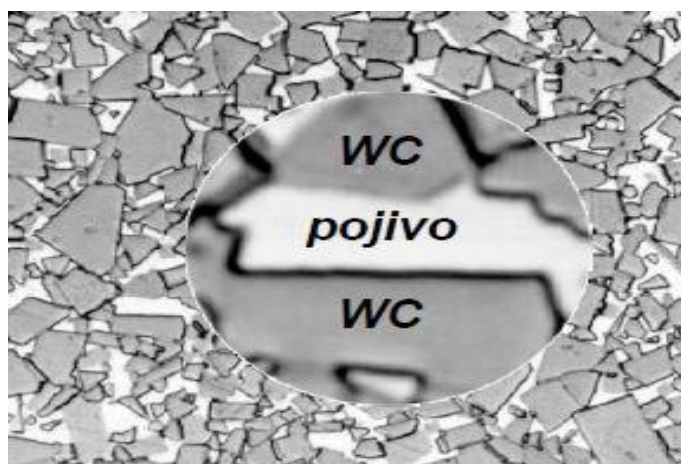


Obr. 4 Porovnání klasická rychlořezná ocel versus prášková rychlořezná ocel [43]

Největší nevýhodou rychlořezných ocelí je jejich velká náchylnost ke ztrátě vlastností vlivem zvýšené teploty. Rychlořezné oceli dokáží pracovat přibližně do 600°C, poté dochází k překročení popouštěcí teploty a tím ocel ztratí svou tvrdost a rychle dochází ke ztrátě mechanických vlastností. Se ztrátou mechanických vlastností jde ruku v ruce degradace nástroje. [40],[44],[46]

2.2.3 Slinuté karbidy

Slinuté karbidy jsou vyráběné pomocí práškové metalurgie metodou slinování, od níž je odvozen název. Slinuté karbidy se skládají z tvrdé fáze a pojiva. Tvrdou fází nejčastěji bývá karbid wolframu WC, ale existují i další, jako například karbid titanu, niobu a tantalu (TiC, NbC, TaC). Pojivo se v drtivé většině používá kobalt (Co), popřípadě nikl (Ni) nebo železo (Fe). Použitím slinutých karbidů vzrostl řezný výkon několikanásobně, a to díky unikátním vlastnostem slinutých karbidů. Mezi hlavní přednosti slinutých karbidů patří homogenita rozložení tvrdých částí, řízené chemické složení, čistota, slinování kovů s vysokou teplotou tavení (Mo, Ta, Nb, W) a další. [41],[45],[47]



Obr. 5 Složení Slinutého karbidu [47]

V současné době jsou slinuté karbidy nejpoužívanějším řezným materiálem pro výrobu monolitních nástrojů, jako jsou hlavně vrtáky a frézy. Slinuté karbidy, které se používají pro obrábění, musí v sobě obsahovat alespoň 80% tvrdých částic (karbidů). S rostoucím obsahem tvrdých částic klesá houževnatost slinutého karbidu, ale tvrdost a odolnost proti opotřebení vzrůstá. Tvrdost slinutých karbidů může být 780 až 2125 HV. Jak již bylo řečeno, tvrdost je závislá na obsahu karbidů, ale také na velikosti zrna této fáze. Pro řezné nástroje je nutné, aby si udržely tvrdost i při vysoké teplotě, která v místě řezu bezpochyby je. Proto se používají velmi jemné struktury slinutých karbidů, které si dokáží udržet přijatelnou pevnost i v teplotách 800 až 900°C. [47],[48],[49],[50]

Zmitost		Střední velikost zrn WC [μm]
Terminologie	český ekvivalent	
Nano Series	nanometrická	0,1 ÷ 0,3
Ultra Fine	utrajemná	0,3 ÷ 0,5
Extra Fine	zvlášť jemná	0,5 ÷ 0,9
Fine	jemná	1,0 ÷ 1,3
Medium	střední	1,4 ÷ 2,0
Medium Coarse	středně hrubá	2,1 ÷ 3,4
Coarse	hrubá	3,5 ÷ 4,9
Extra Coarse	zvlášť hrubá	5,0 ÷ 7,9
S-Grades	superhrubá	8,0 ÷ 14

Obr. 6 Velikost zrn ve slinutém karbidu [41]

Hlavní výhodou oproti rychlořezným ocelím je jejich vyšší tvrdost za vysokých teplot, vyšší pevnost, odolnost proti opotřebení a další. Řezné nástroje vyrobené ze slinutého karbidu mají opravdu širokou škálu působnosti. Využívají se na obrábění materiálů od velice měkkých, mezi ně lze zařadit například slitiny hliníku, mědi atd., až po velice obtížně obrobitelné, jako mohou být superslitiny na bázi niklu. Pro tyto diametrálně rozdílné materiály je potřeba správně zvolit vhodný druh slinutého karbidu, který je pro obráběný materiál nejvhodnější. K tomu slouží rozdělení slinutých karbidů podle ISO. [44],[51],[48]

2.2.4 Slinuté karbidy povlakované [42],[52],[53]

V současné době se povlakuje téměř každý monolitní nástroj. Na nástroj ze slinutého karbidu je nanesen termochemicky stabilní povlak na bázi karbidů, nitridů, oxidů, popřípadě jejich kombinací. Při použití povlaku na řezný nástroj se v drtivé většině rapidně zvýší jeho trvanlivost a také řezivost. S povlakem se nástroj stává produktivnější, snese vyšší řeznou a posuvovou rychlost. Cílem povlaků je snížit součinitel tření třísky s nástrojem, vytvořit velmi tvrdou vrstvu na povrchu při zachování houževnatého jádra, lépe snášet přerušovaný řez. Povlaky mají značně vyšší tvrdost z důvodu absence jakéhokoliv pojiva. Jedná se pouze o vrstvičku tvrdých částic a ve většině případů jsou tvořeny velmi jemnozrnnou strukturou.

2.2.5 Metody depozice tenkých vrstev

Povlakování je zpravidla konečný proces výroby nástroje. Materiál nástroje je již po tepelném zpracování a po předdepoziciční úpravě. K nanesení tenkých vrstev se používá několik metod, ale za základní se považují dvě a to metoda PVD – Physical Vapour Deposition a metoda CVD – Chemical Vapour Deposition. Od těchto dvou základních metod jsou pak odvozeny další metody, jako jsou MT-CVD - Middle Temperature Chemical Vapour Deposition a metoda PACVD Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition. Základní rozdíl mezi metodami PVD a CVD je v nanášecím mediu. Velmi významnou metodou depozice je pro tento druh obráběného materiálu metoda CVD, díky možnosti vytvořit ostřejší geometrie a nižším teplotám depozice.

2.2.6 Metoda depozice PVD

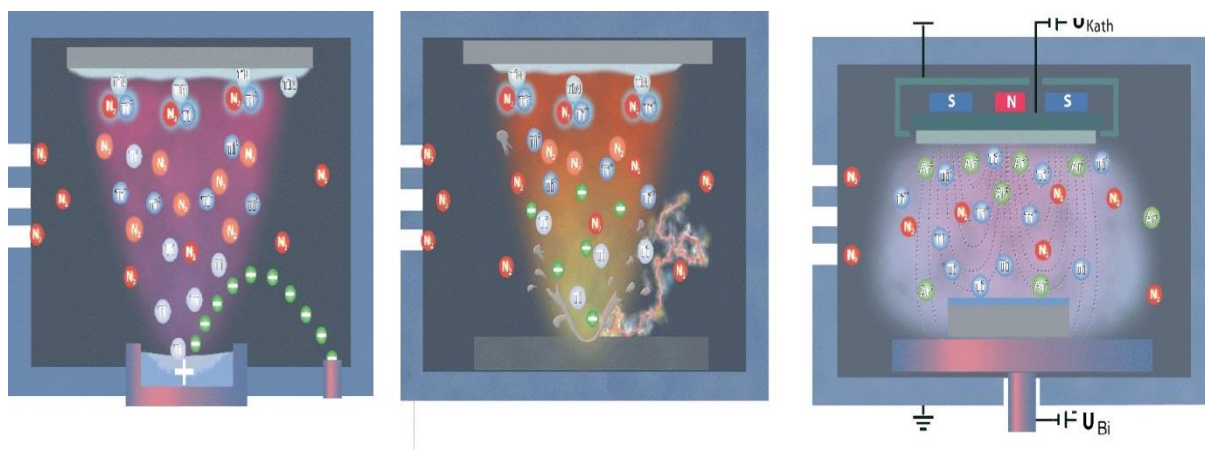
Jedná se o metodu založenou na fyzikální podstatě vypařování a napařování. Tato metoda se hojně rozmohla v 80. letech a byla výhradně určena na povlakování nástrojů z rychlořezných ocelí. Metoda PVD je charakteristická svými nízkými teplotami a nízkými tlaky. Teplota při povlakování bývá 150 – 550°C a tlak do 10 Pa, avšak nejčastěji je depozice prováděna ve vakuu. Touto metodou je možné vytvořit povlaky i na exotických materiálech pro povlakování, jakož může být plast, hliník, ale i sklo a mnoho dalších. Čas deponování tenké vrstvy je velmi krátký, proto je možné povlakovat velmi ostré nástroje bez teplotních deformací a tepelného ovlivnění. [53],[54],[55],[56]

K povlakování se používá pevná fáze materiálu, který je odpařován v atmosféře aktivního plynu. Plynem nejhojněji používaným pro tuto aplikaci je dusík, popřípadě argon. Dusík či argon reaguje s kovovými výpary, které vznikají z pevné fáze, a tím dochází ke vzniku chemické sloučeniny. Tato sloučenina je napařována na nástroj a vytváří na něm tenkou vrstvu. Tloušťka povlaku je zpravidla okolo 5 μ m. [53],[54],[55],[56]

Metoda povlakování PVD může být provedena třemi základními způsoby, kterými jsou:

- Naprašování
- Napařování
- Iontová implantace

Vyjmenované metody se dají dále dělit podle různých způsobů vytvoření povlaku.



Obr. 7 Způsoby PVD povlakování – Napařování s přidavnou ionizací, Napařování obloukem, Magnetronové napařování [56]

Mezi hlavní kovy v pevném skupenství, které jsou základem nadeponované sloučeniny, patří titan, chrom, hliník a další. Touto metodou je možné vytvářet jak monolitní vrstvy, tak i vícevrstvé povlaky. Mezi hlavní představitelé nanášených povlaků lze zařadit například TiN, TiAlN, TiAlSiN, CrN, CrAlSiN a další. [53],[56]

2.2.7 Druhy povlaků nástrojů používaných při obrábění Inconelu 718

Pro povlakování nástrojů vhodných pro obrábění Inconelu 718 se používá hlavně povlakovací metody PVD, a to díky možnosti vytvoření ostřejších řezných břitů, což je pro tento druh obráběného materiálu výhodné. [57]

2.2.7.1 TiN a TiCN

Povlak TiN byl dlouho nepřekonatelným povlakem ne díky svým vlastnostem, ale díky zlaté barvě, kterou tento povlak má. I v současné době se jedná o velice rozšířený a stále hojně používaný povlak. Mezi hlavní výhody vrstvy patří vynikající přilnavost k povrchu substrátu, velice dobrá houževnatost, chemická stabilita a nízký součinitel tření. Tenká vrstva má poměrně nízkou tvrdost, která se pohybuje okolo 20 až 25GPa, což je v porovnání s moderními vrstvami takřka poloviční tvrdost. Teplotní odolnost vrstvy je taktéž nízká, její použití je vhodné do 550°C. Tloušťka vrstvy je 2 – 3 μm . Využití tohoto povlaku v řezných nástrojích je především u závitování a vrtání. [58]



Obr. 8 Závitník Widia VariTap s povlakem TiN [59]

Povlak TiCN je další vývojovou řadou povlaku TiN. Jedná se o povlak se zvýšenou tvrdostí, vyšší odolností proti opotřebení, avšak s nižší pracovní teplotou nežli má povlak TiN. Tvrdost tenké vrstvy přesahuje hranici 30GPa a přitom vykazuje vysokou houževnatost. Frikční vlastnosti vrstvy zůstaly na stejné hodnotě 0,4. Barva tenké vrstvy se radikálně změnila z populární zlaté na modrošedou. Tloušťka tenké vrstvy je deponována v rozmezí 1 - 4 μ m. Pracovní teplota by neměla přesahovat 400°C. Tento povlak se uplatňuje na přerušovaný řez, ale doménou jsou závitníky. [58],[60]

2.2.7.2 Vrstva TiAlN

Jedná se o velmi často volenou vrstvu na vrtací nástroje, které jsou používány při vyšších teplotách a velkém zatížení. Barvu vrstvy nelze jasně stanovit, neboť je závislá na poměru Ti a Al. V závislosti na tomto poměru se barva mění od černé až k černohnědé. Tu vrstvu lze řadit také mezi nanovrstvy, protože rozměry krystalů TiAlN mohou dosahovat velikosti v řádu nanometrů. Vrstva TiAlN za zvýšených teplot vytváří na svém povrchu velmi tenkou vrstvičku oxidu Al₂O₃, která se při opotřebení částečně obnovuje. Obnovování oxidu je možné díky hliníku, který je hojně obsažen ve vrstvě TiAlN. Ovšem vhodné použití této vrstvy je do 800°C. Tloušťka vrstvy se nejčastěji pohybuje v rozmezí 2-4 μ m a tvrdost přesahuje 30GPa. Koeficient tření dosahuje hodnoty 0,4. Vrstva TiAlN se vyznačuje svými rozdílnými vlastnostmi a v závislosti na obsahu Al. Při obsahu hliníku cca 60% dosahuje vrstva velmi dobrého řezného výkonu. [44],[61],[62],[63]

„Rozdíl mezi povlakem TiAlN a povlakem AlTiN je v procentním obsahu prvku v povlaku. Prvek na prvním místě je obsažen ve větší míře než prvky ostatní.“ [58]

Do této kategorie lze zařadit i vrstvu Darwin vynalezenou společností SHM. Jedná se o povlak AlTiN, který disponuje vynikající přilnavostí k povrchu substrátu, velmi nízkým zbytkovým napětím vrstvy, zvýšenou tvrdostí a tvorbou velmi hladkého povrchu povlaku. Využití tento povlak našel především ve vrtání a závitování. [61]

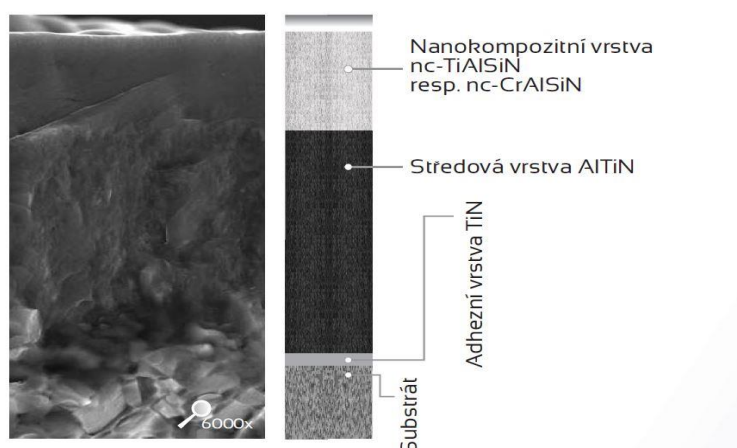
2.2.7.3 TripleCoatings

Tenké vrstvy s názvem TripleCoatings patří mezi nejvýkonnější vrstvy, které dnešní trh s tenkými vrstvami nabízí. Jedná se o nanokompozitní vrstvený povlak, jež spojuje silné stránky jednotlivých povlaků v této tenké vrstvě. Mezi hlavní přednosti vrstvy patří houževnatost, tepelná odolnost a především extrémní tvrdost. Povlak TripleCoatings je na trhu dostupný ve dvou variantách. Rozdíl mezi vrstvami je především v použité svrchní vrstvě. První varianta svrchní vrstvy je založena na chromu a nazývá se TripleCoatings Cr. Druhá dostupná varianta se nazývá TripleCoatings Ti a jak je již zřejmé, jejím základní prvek je titan.

Vrstva TripleCoatings je tvořena ze tří vrstev. První vrstva, jež je deponována na substrát, je TiN díky jejím velice dobrým adhezním vlastnostem. Tloušťka této vrstvy se pohybuje okolo 0,2 – 0,3 μ m. Další vrstvou je multivrstva AlTiN popř. (TiAlN). Tato vrstva zajišťuje houževnatost a její tloušťka se pohybuje okolo 3 μ m. Svrchní vrstvu tvoří nanopovlak TiAlSiN a nebo CrAlSiN. Tato vrstva je tvořena dvěma fázemi. Matrici tvoří kovová fáze TiAlN a po hranicích zrn je amorfní fáze Si₃N₄. Celková tloušťka vrstvy se pohybuje v rozsahu 1 - 7 μ m a její tvrdost dosahuje hodnot až 45 GPa.

Vrstva TripleCoatings je vytvářena PVD metodou povlakování. Díky unikátnosti této nanovrstvy je možné použití řezných nástrojů o vyšších řezných parametrech a v aplikacích, kde ostatní vrstvy nanášené PVD metodou selhávaly. Tato vrstva se vyznačuje nízkým

koeficientem tření, vysokou otěruvzdorností, vysokou teplotní odolností a chemickou stálostí. Především díky těmto vlastnostem je možné dosáhnout delší životnosti nástrojů, zvýšení produktivity obrábění, snížení řezných sil a možnosti obrábění bez procesních kapalin. Vrstva TripleCoatings je nasazována při obrábění kalených materiálů, nerezí, těžkoobrobitelných slitin a v dalších velmi náročných aplikacích. [42],[64],[61],[62],[65]

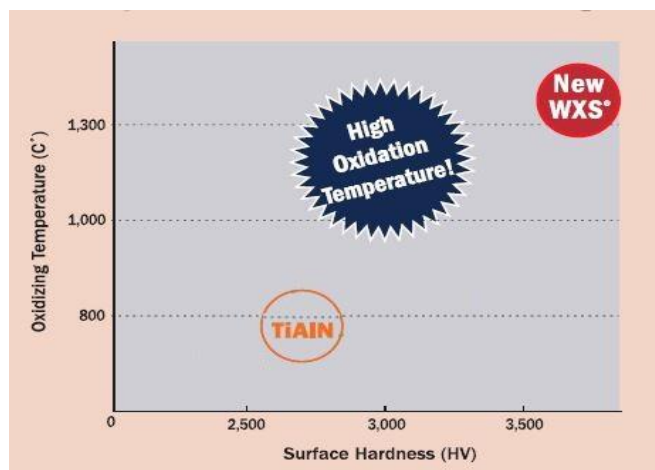


Obr. 9 Struktura nanokompozitní vrstvy TripleCoatings [64]

Skupina povlaků TripleCoatings obsahuje povlaky $n\text{ACo}$, $n\text{ACo}^3$, $n\text{ACrO}^3$, $n\text{ACOX}^3$ a další. Číslo indexu 3 značí, že se jedná o povlak ze skupiny depozice TripleCoatings. [65]

2.2.7.4 WXS

Jedná se o velmi produktivní povlak, který je vytvořen na základě nanotechnologického povlakování. Oproti standardnímu povlaku TiAlN má tento povlak WXS zvýšenou přilnavost k substrátu, vyšší oxidační teplotu, zvýšenou tvrdost a snížený koeficient tření. Povlak je schopný odolávat teplotám na hranici 1300°C . Velkou předností tohoto povlaku je vysoká odolnost proti opotřebení. Díky těmto vlastnostem vznikl unikátní povlak, jenž vykazuje vynikající výsledky především v obrábění tepelně odolných superslitinách, jejímž hlavním představitelem je, již tolikrát zmíněný, Inconel 718. [66]



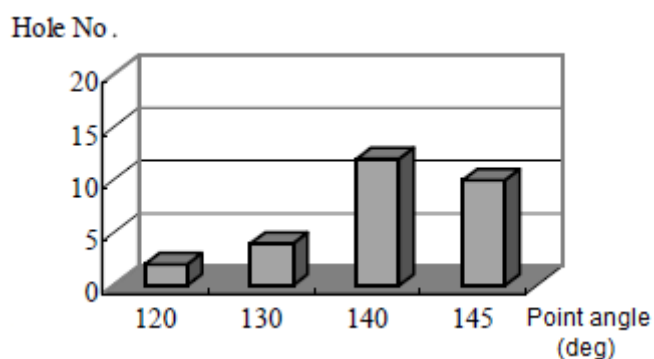
Graf 4 Porovnání teplotní odolnosti a tvrdosti povlaků TiAlN a WXS [66]

2.3 Vrtání Inconelu

Vrtání se řadí mezi jednu z nejvíce obtížných obráběcích operací, neboť má určitá specifika, kterými se velkou měrou odlišuje například od soustružení či frézování. Mezi zásadní odlišnosti od jmenovaných způsobů obrábění patří například proměnlivá řezná rychlost podél hlavního ostří, ztížený odvod třísek a špatný přístup procesní kapaliny do místa řezu. [10]

Vrtání Inconelu je charakteristické značnými obtížemi, které se při procesu vyskytují. V následujících odstavcích budou tyto obtíže zmapovány.

Vrcholový úhel vrtáku je vhodné použít tupější, nežli se používá u běžného obrábění, kdy velikost vrcholového úhlu bývá nejčastěji 118°. Nejvíce se osvědčil úhel v rozmezí 135°-140°. Jak je možné vidět na následujícím grafu. Díky této změně dochází ke zmenšení stykové plochy břitu s obrobkem, což je velmi příznivé díky vysokému řeznému odporu této slitiny.



Graf 5 Velikost vrcholového úhlu vrtáku pro Inconel [15]

V závislosti na řezném materiálu může teplota v místě řezu vystoupat až k 1200°C, což je velkým problémem pro většinu běžně používaných nástrojů. Další vlastnost, která je z hlediska obrábění velmi nevhodná, je taktéž spojena s teplotou. U této slitiny se stoupající teplotou stoupá i její tažnost. Kupříkladu při teplotě 800°C je tažnost přibližně 30%, což znamená značné potíže při oddělování třísky. [10],[15]

Soustava stroj - nástroj - obrobek by měla být co možná nejužší a kdykoli je možné použít vrtacích přípravků je vhodné této možnosti využít. Jedním z velmi důležitých faktorů, který může ovlivnit bezpečnost a spolehlivost vrtání, je vyložení nástroje. Délka vyložení nástroje by měla být pouze nezbytně nutná k vyvrtání příslušné hloubky díry a bezpečnému odvodu třísky. [10],[15]

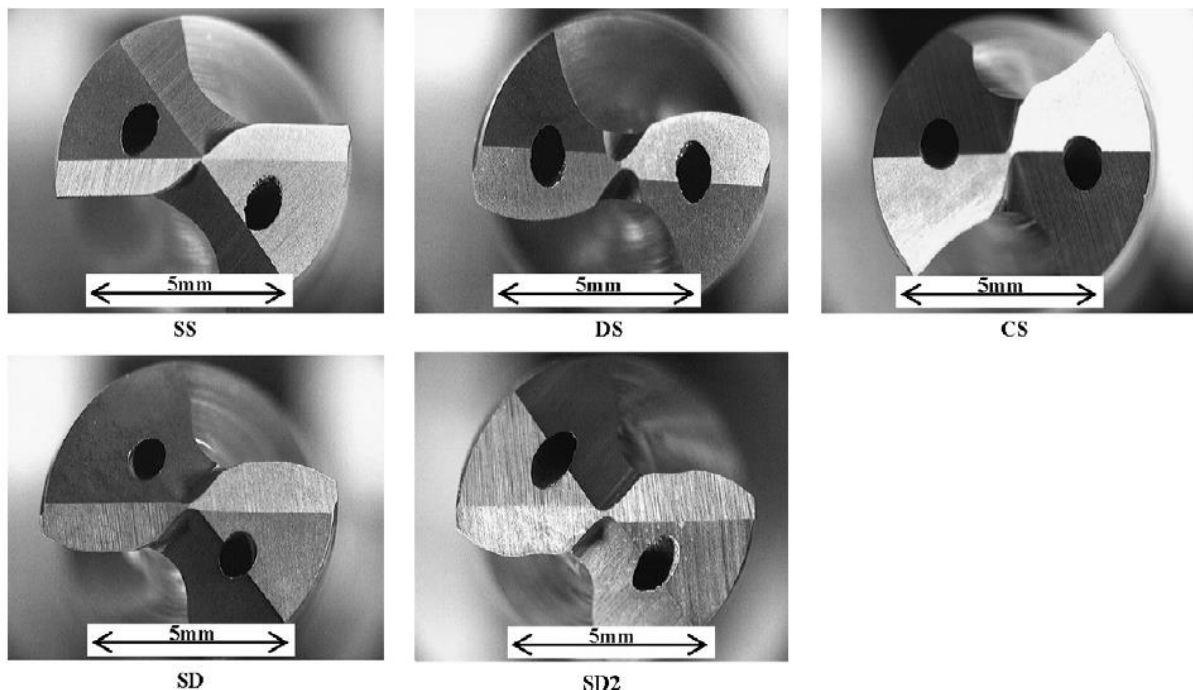
V případě že se vrták zastaví z důvodu přerušení řezu a zůstane na stejné hloubce, kde se hřbet nástroje tře o dno již vyvrtané díry, nastává zde zpevnění dna díry obrobku. V závislosti na tomto zpevnění je opětovné započítí řezu velmi obtížné, neboť břit nástroje musí nejprve překonat zpevněnou vrstvu materiálu. Tento jev patří mezi nejčastější příčiny selhání nástroje a to většinou ve formě zalomení, v lepším případě vyštípnutí části ostří nebo nadměrným opotřebením. Proto by měl být posuv nastaven na konstantní hodnotu, a pokud to situace dovoluje, díru vrtat najedenou bez přerušení. [27],[33],[10]

Pro vrtání Inconelu se doporučuje volit nástroje dle následujících doporučení.

- Vrcholový úhel jak je zde výše uvedeno je vhodné volit v rozmezí 135 – 140°.
- Úhel hřbetu v rozmezí 7-10°

- Úhel čela v rozmezí 8 – 12°
- Rádus řezné hrany by měl být malý, optimálně 15 μ m
- Volit vhodný tvar břítu
- Příčný břit je vhodné minimalizovat
- Úhel šroubovice volit v rozmezí 10 - 35°, ideálně však do 20°
- Velký zpětný kužel a malé vodící fazetky vrtáku
- Drážky je vhodné vyleštit

[10],[11],[13],[15]



Obr. 10 Tvary břitů vrtáků používaných pro Inconel [13]

Jak je z obrázků zřejmé, žádná geometrie vrtáku, jež se používá na vrtácích pro Inconel 718, nemá výrazné příčné ostří. Zredukováním, popřípadě odstraněním, příčného ostří byla značně zvýšena trvanlivost vrtacích nástrojů, při vrtání Inconelu 718, až několikrát, jak uvádí zdroj [14]. Prvotní podbroušení hrotu vrtáku je vidět na geometrii s popisem DS. Další geometrie vznikly postupnou modifikací podbroušení. Vliv změny podbroušení na trvanlivost nástroje byl během vývoje vrtacích nástrojů pro Inconel potvrzen testy. Geometrie, které vykazují nejlepší výsledky během testů, jsou SS a SD. Tyto dvě geometrie byly vybrány pro nástroje, které budou předmětem praktické části této diplomové práce.

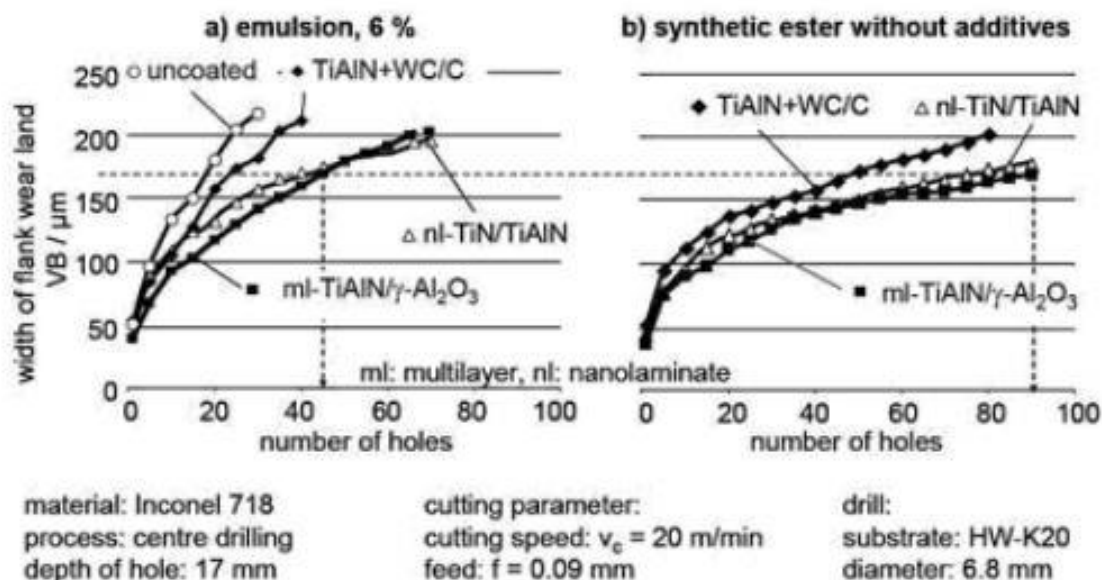
2.3.1 Procesní kapaliny

Během procesu vrtání je více než vhodné použít procesní kapaliny, neboť neplní jen funkci chladící, jež je u vrtání Inconelu velmi podstatná, ale i další své funkce. Mezi další funkce kapaliny patří funkce mazání a čisticí. Všechny tyto jmenované funkce procesních kapalin přispívají ke kvalitnějšímu a bezpečnějšímu procesu vrtání. [67]

„Aplikace procesní kapaliny výrazně ovlivňuje velikost osové síly a krouticího momentu při vrtání. Vzhledem na intenzivní tření v kontaktu nástroje s obráběným materiálem je žádoucí

používat při vrtání niklových slitin procesní kapaliny s výrazným mazacím účinkem.“ [68] Díky mazacímu účinku se snižuje tření třísky o čelo břitů, snižuje intenzitu tvorby nárůstku a přispívá k menšímu tření třísky s drážkou vrtáku při odchodu z díry. Kvůli těmto vlastnostem je velmi často používáno řezných olejů, které obsahují zvýšenou koncentraci síry, neboť síra zlepšuje jak kluzné vlastnosti, tak i tvorbu třísky. Pro malé řezné rychlosti a vysoké zatížení, což je pro závitování charakteristické, se s výhodou používá tuhých maziv. Mezi tuhá maziva lze zařadit například pasty a gely, popřípadě minerální oleje. Ovšem nejčastěji se jako procesní kapaliny používají olejové emulze na základě vody. Velmi dobrých výsledků je dosažováno s emulzí v poměru 8 – 12% oleje. Tyto vodou ředitelné řezné kapaliny se používají především díky vhodnému poměru chladících a mazacích účinků. Do těchto emulzí se přidávají EP aditiva a další přísady, které velkou měrou ovlivňují výsledné vlastnosti kapaliny. [69],[67]

Při vrtání Inconelu 718 je vhodné použít syntetické oleje, jak ukazuje následující obrázek. Z obrázku je zřejmé, že mazací účinek oleje má příznivější vliv na velikost opotřebení nežli chladící účinek, který je dominantní u olejových emulzí. [1]

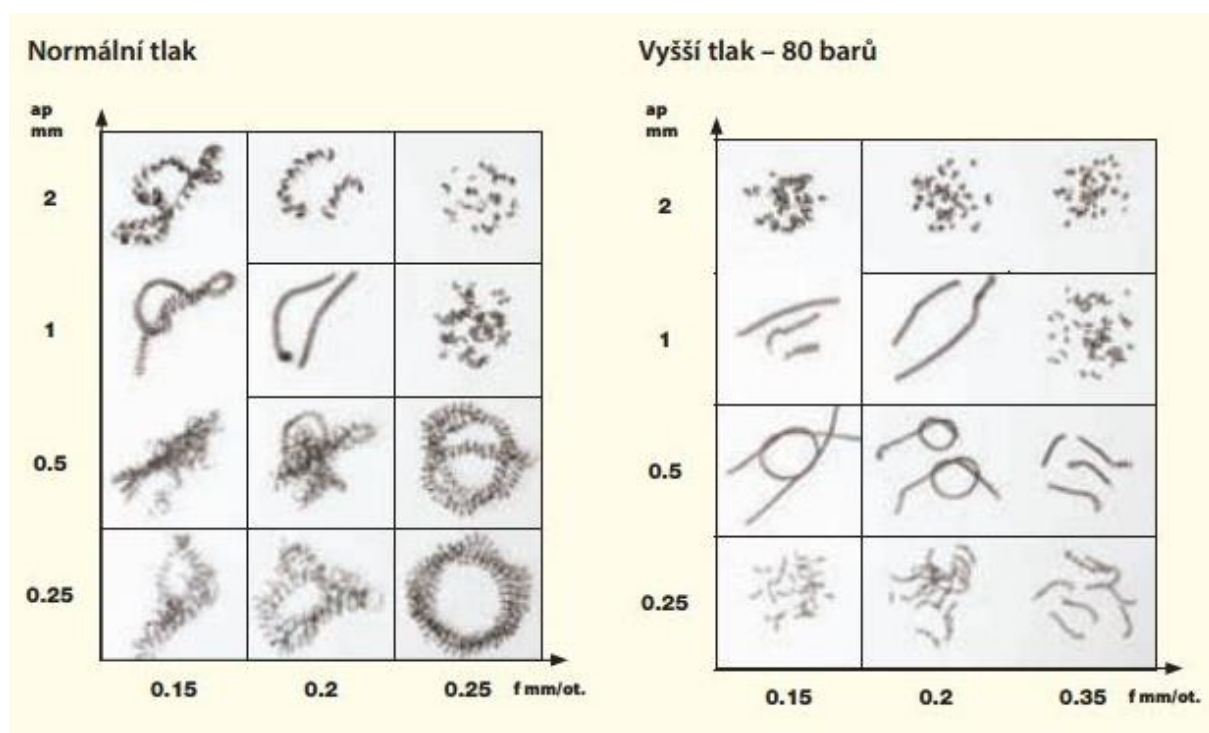


Obr. 11 Porovnání trvanlivosti nástrojů v závislosti na řezné kapalině [1]

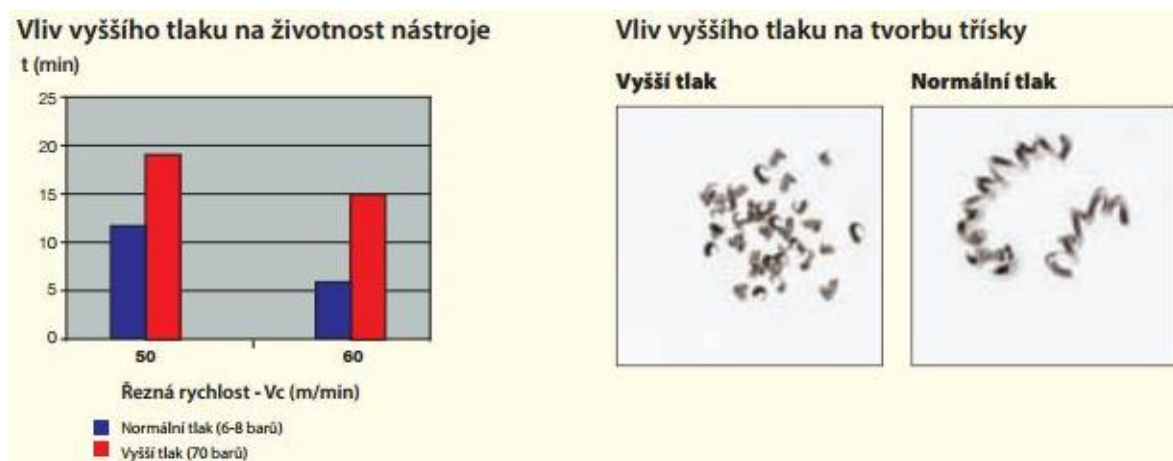
Velmi výrazný vliv na výsledek obrábění za použití procesních kapalin má tlak a způsob přivádění kapalin. Vnější chlazení, neboli záplavové chlazení, není zcela vhodný způsob pro technologii vrtání, neboť se řezná kapalina nedostane do inkriminovaného místa. Oproti tomu chlazení vnitřkem nástroje je velmi výhodné. Řezná kapalina se kvůli tomuto způsobu přívodu dostane přímo do místa řezu, kde ovlivní teplotu řezání, tření hřbetu nástroje o obráběný materiál a v neposledním případělepší odvod třísky z místa řezu. Dalším již zmíněným parametrem je tlak chlazení. U vrtání je vidět nejmarkantnější rozdíl mezi použitím běžného tlaku procesních kapalin, jež se pohybuje někde na hranici 1MPa, a vysokotlakého chlazení. Za vysokotlaké chlazení je považováno chlazení s tlakem okolo 7MPa. Rozdíl je především při tvorbě třísky, kdy vysoký tlak napomáhá utváření a lámání třísky a následně ji lépe odvádí z místa řezu. [67],[70]

Princip soustružení je velice podobný s principem vrtání, proto je možné zde hledat určité podobnosti. Následující obrázek ukazuje vzniklou třísku z procesu soustružení různými posuvy a velikostí přísuvů za normálního tlaku a za zvýšeného tlaku. Je zde naprosto zřejmé,

že vyšší tlak napomáhá utvářet vhodný tvar třísky. Další obrázek potvrzuje fakt, že s vyšším tlakem je možné dosáhnout vyšší životnosti nástroje.



Obr. 12 Vliv velikosti tlaku kapaliny na tvar třísky při soustružení Inconelu 718 [12]

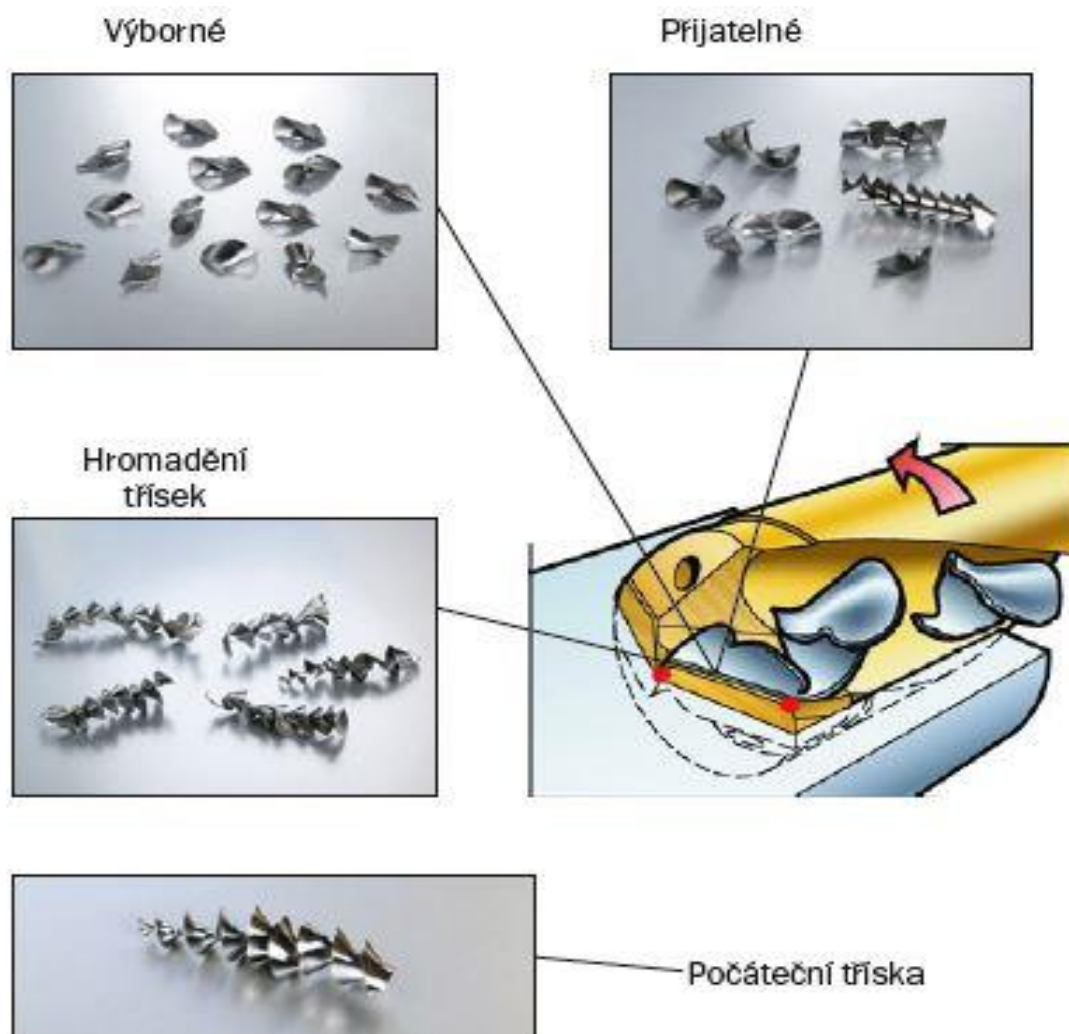


Obr. 13 Vliv vyššího tlaku na trvanlivost nástroje při soustružení Inconelu 718 [12]

2.3.2 Třísky

Tříška patří mezi základní ukazatel řezného procesu, z tvaru, barvy či velikosti je možné usoudit, zda je proces obrábění nastaven vhodně či nikoliv. Počáteční tříška je vždy dlouhá a je tvořena od obvodu vrtáku k jeho středu. Tato tříška netvoří žádné potíže, neboť vzniká na povrchu obrobku a nevzniká u ní problém s odvodem z místa řezu. Na dalších třískách a jejich tvaru velice záleží, neboť mohou velkou měrou ovlivnit proces vrtání. Nejvhodnější je krátká článkovitá tříška, jež je na následujícím obrázku znázorněna jako první. Největším problémem z hlediska vrtání je dlouhá tříška. Tvar a velikost třísky je možné ovlivnit změnou

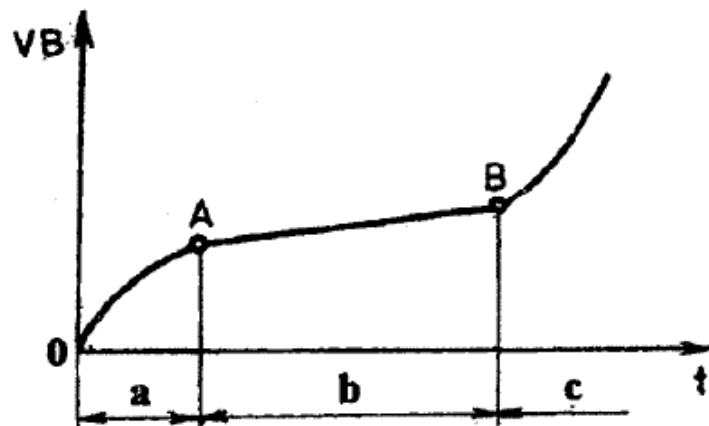
řezné rychlosti a posuvu. Místa vrtáku, která jsou nejvíce namáhána, jsou na následujícím obrázku vyznačena červenou barvou. Jedná se o hrot a špičku vrtáku. [8]



Obr. 14 Tvorba třísky [8]

2.3.3 Opotřebení nástrojů

Opotřebení je závislé na mnoha faktorech, ale mezi hlavní ovlivňující faktory patří druh obráběného materiálu, druh řezného materiálu, řezné podmínky a řezné prostředí. Během procesu obrábění vzniká velký tlak a velké množství tepla, což vytváří příznivé podmínky pro chemické reakce mezi řezným břitem a materiálem obrobku a vznik difúzního opotřebení. Opotřebení břitu nástroje ovlivňuje mnoho parametrů, mezi ně je možné zařadit přesnost rozměrů, jakost povrchu a mnoho dalších. Dalším úskalím obrábění Inconelu je fakt, že dochází ke zpevňování materiálu, a tím se stává velice tvrdým a při kontaktu s břitem nástroje vzniká opotřebení abrazivního charakteru a to především na hřbetě nástroje. Kombinací těchto zmiňovaných faktorů dochází k zatěžování břitu velmi složitým způsobem. Otupení vrtacích nástrojů se projevuje především na hřbetu břitu, ale určité změny lze pozorovat i na čele, na hrotu vrtáku a na vedlejších ostřích. Opotřebení se projevuje zvětšováním poloměru zaoblení ostří, změnou geometrie a zhoršením drsnosti povrchu břitu. Otupování je postupný proces, který se nechová lineárním způsobem, ale má svůj notoricky známý průběh, jež je vidět na následujícím obrázku. [2],[3],[18]



Obr. 15 Časový průběh opotřebení VB [3],[4]

Graf časového průběhu opotřebení lze rozčlenit na 3 oblasti podle průběhu opotřebení.

Oblast a je charakterizována rychlým nástupem opotřebení. Tato oblast je časově poměrně krátká a vyznačuje se značnými vibracemi a zvýšenou řeznou silou. Oblast se dá označit za záběh nástroje neboli zařiznutí nástroje.

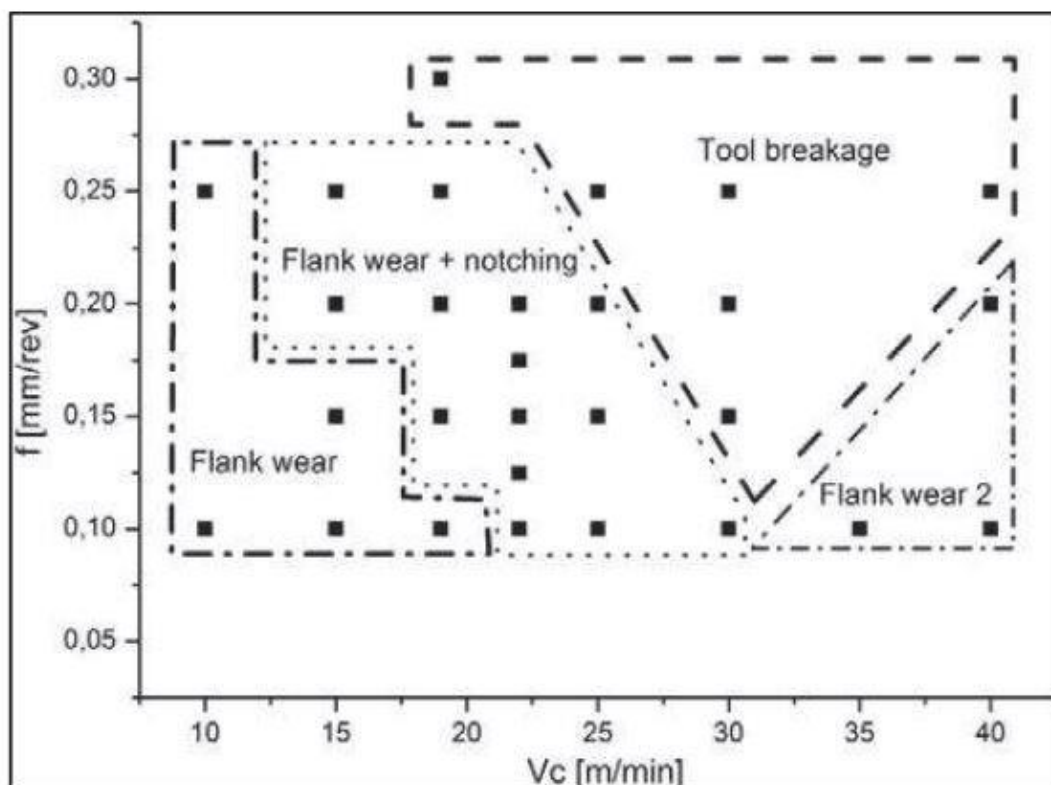
Oblast b je význačná svým lineárním opotřebením. Vibrace a řezná síla se ustálí na předpokládané hodnotě. Jedná se o oblast, kdy nástroj bezpečně pracuje a opotřebení je zde předvídatelné.

Oblast c se vyznačuje svým progresivním charakterem opotřebení. To je způsobeno velkými silami, které vznikají kvůli velké stykové ploše břítu s obrobkem a to především díky geometrické změně ostří vlivem opotřebení. [3],[5]

2.3.3.1 Druhy mechanismů vzniku opotřebení u Inconelu 718

Druhy mechanismů vzniku opotřebení u slitiny Inconel 718 pokrývají celou škálu mechanismů, jež se u vrtání mohou vyskytnout, ale některé typy jsou charakteristické, jako například: opotřebení hřbetu, tvorba nárůstku, vznik vrubu, opotřebení na příčném ostří nebo dokonce zlomení nástroje. Největší měrou se na opotřebení nástroje podílí vznik vrubu a opotřebení příčného ostří. [16]

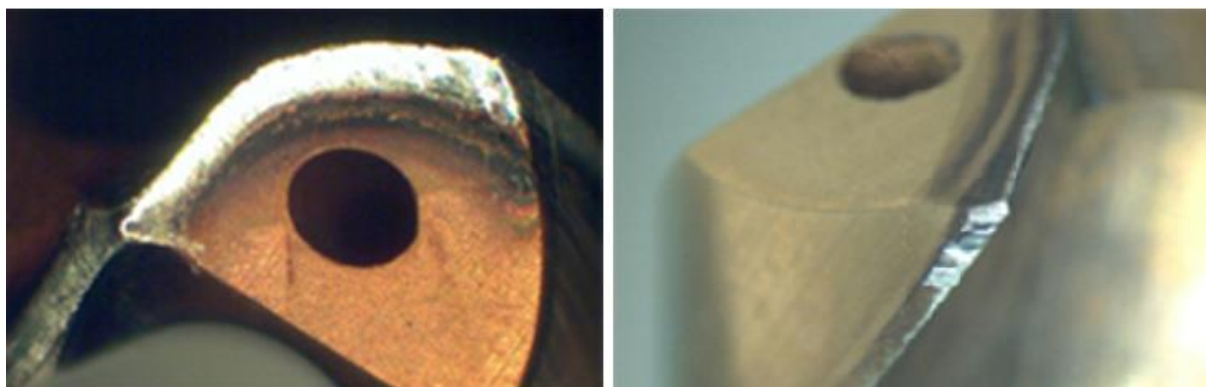
Následující obrázek ilustruje vyskytující se typy opotřebení břítu při vrtání Inconelu 718 v závislosti na řezné rychlosti a velikosti posuvu na otáčku. Z grafu je zřejmé, že nejvíce zastoupeným typem opotřebení je zde opotřebení hřbetu nástroje a opotřebení ve tvaru vrubu.



Graf 6 Závislost druhu opotřebení vzhledem k řezné rychlosti a posuvu [16]

2.3.3.2 Opotřebení hřbetu

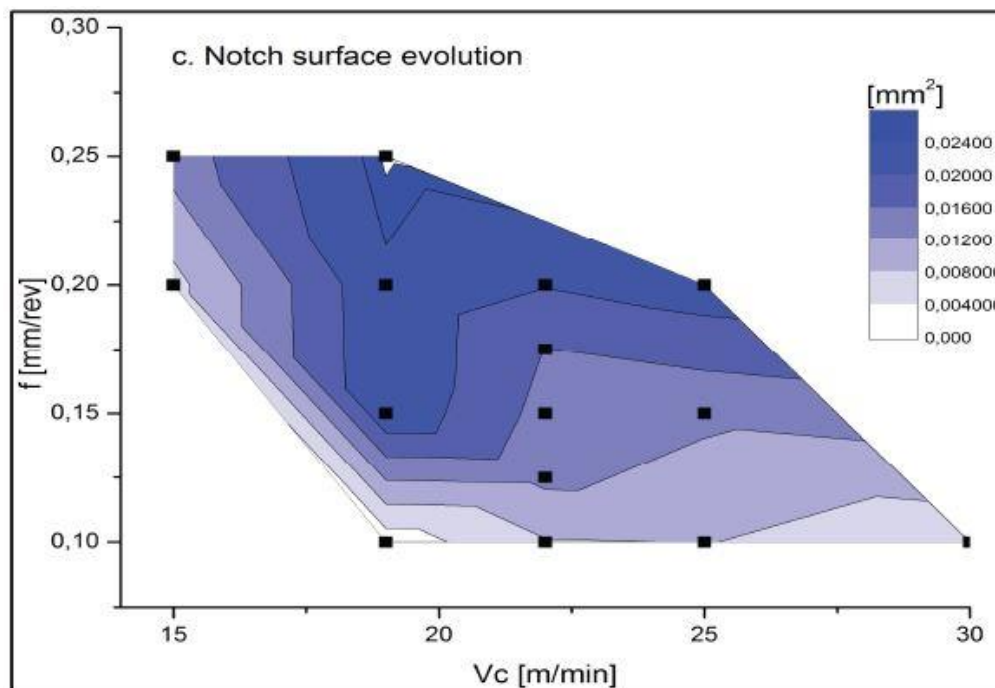
Nejvýznamnějším druhem opotřebení při vrtání Inconelu 718 je bezpochyby opotřebení na hřbetě nástroje. Opotřebení na hřbetě vzniká důsledkem vysokých teplot a díky velkému podílu abrazivních částic ve složení Inconelu k čemuž přispívá velký obsah niklu a chromu. Vzhledem k velice nepříznivým podmínkám na hřbetu nástroje často dochází k obroušení nadeponované tenké vrstvy. Tyto faktory se podílejí na snížení životnosti nástroje a způsobují značné deformace řezného břitu nástroje. Vlivem změny geometrie řezného břitu dochází ke zvětšování plochy styku nástroje s obrobkem a tím se zvyšuje teplota v místě řezu a tato skutečnost se odráží na větším namáhání nástroje. Opotřebení na hřbetu má charakter pomalého a předvídatelného nárůstu opotřebení. Tento druh opotřebení bývá povětšinou doplněn vznikem vrubu, který značně snižuje předvídatelnost opotřebení. [16],[17]



Obr. 16 Opatření hřbetu břitu [6]

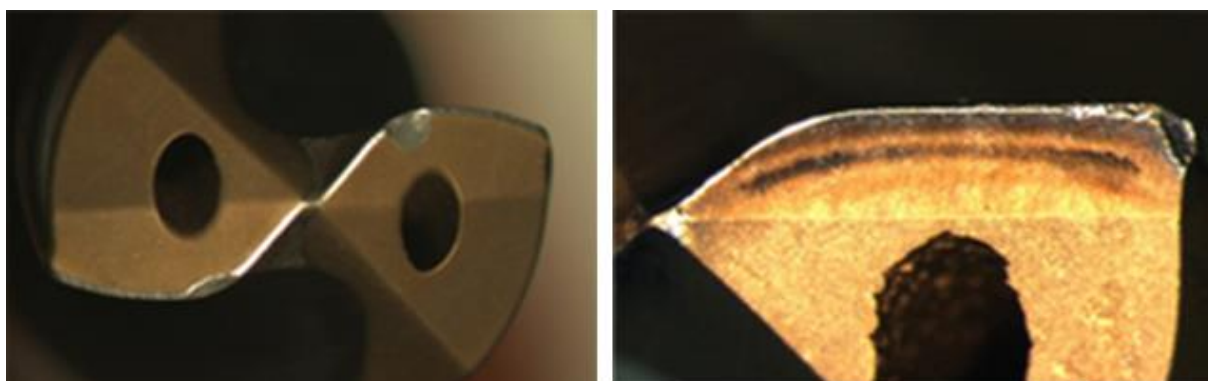
2.3.3.3 Opotřebení ve tvaru vrubu

Při určitém nastavení řezné rychlosti a velikosti posuvu vzniká současně abrazivní opotřebení na hřbetě a opotřebení ve tvaru vrubu. Pokud je vrub velký může vést k částečnému odlomení vrtáku popřípadě jeho destrukci.



Graf 7 Řezných rychlostí pro vznik opotřebení ve tvaru vrubu [16]

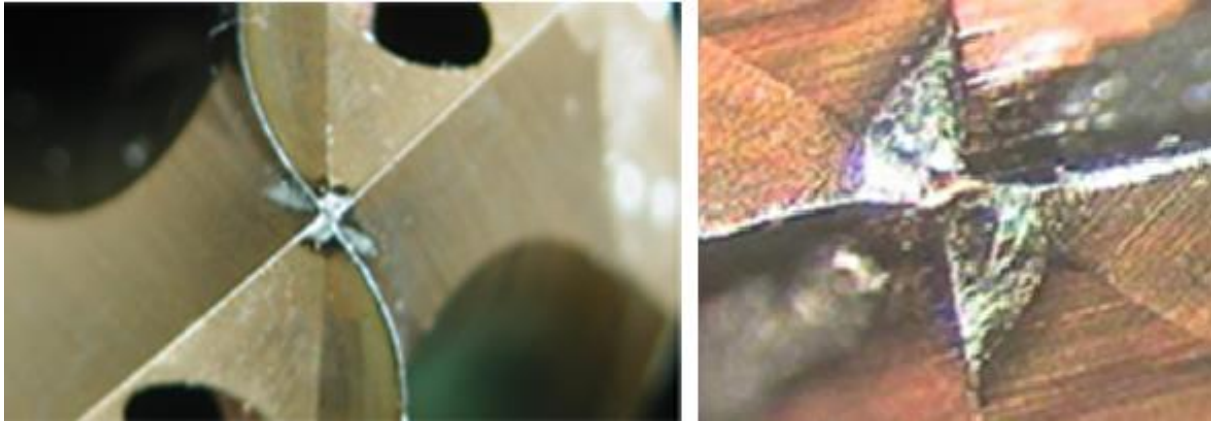
Jak je zřejmé z grafu, největší opotřebení ve tvaru vrubu se vytváří při vyšších hodnotách posuvů a středních řezných rychlostech. K takovému to opotřebení dochází v důsledku adheze, čili tlakového navařování třísek, a deformačním zpevněním obrobku. „Vrub na ostří může vznikat inkluzí tvrdých mikročástic nebo drobnými nepravidelnostmi řezu. Vzniku vrubu přispívá i místní koncentrace zatížení“. [72] Jedná se o velice častý druh opotřebení u materiálů, které jsou náchylné na vytváření nárůstku a zpevnění. Toto opotřebení zpravidla nemá postupný nárůst, ale po určité době dochází k odlomení navařeného materiálu na břit a tento navařený materiál vyštípne část ostří. Opotřebení ve tvaru vrubu může vznikat na jakémkoli místě břitu, ale často se vyskytuje na charakteristických místech, jak je vyobrazeno na následujícím obrázku. [6],[16],[17]



Obr. 17 Opatření vylamováním ostří - vrub[6]

2.3.3.4 Opotřebení hřbetu na příčném ostří

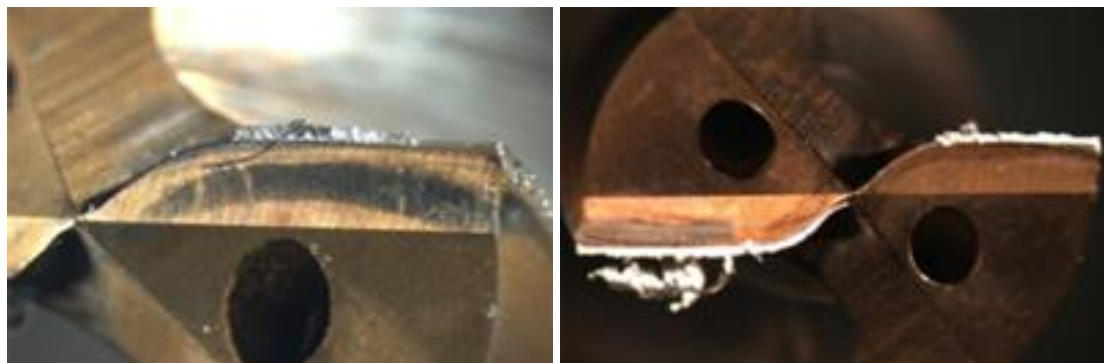
Tento typ opotřebení vzniká na příčném ostří, popřípadě na hrotu vrtáku. Opotřebení vzniká v místě nulové řezné rychlosti vlivem značně velkého posuvu, který je pro obrábění těchto materiálů typický. Dalším aspektem, který na tento druh opotřebení má vliv je obvodové házení. Následující obrázek ilustruje, jakým způsobem opotřebení příčného ostří může vypadat.[6]



Obr. 18 Opotřebení příčného ostří [6]

2.3.3.5 Nárůstek

Dalším druhem opotřebení, který je pro vrtání Inconelu 718 charakteristický, je tvorba nárůstku. Jedná se o adhezní typ opotřebení, kdy obráběný materiál ulpívá na břitu nástroje. Nárůstek se vytváří na břitu nástroje hlavně díky působení vysokých teplot a velmi vysokého tlaku. Vzniká v místě řezu tam, kde je pro něj výhodná souhra těchto faktorů: chemická afinita, velmi vysoký tlak a vysoká teplota. Nárůstek ulpívá na břitu nástroje a po určitém čase dochází k jeho odlomení. Při odlomení nárůstku dochází k odlomení i části břitu, takto dochází k vyštipování ostří a nerovnoměrnému opotřebení. Na tvorbu nárůstku má velký podíl druh povlaku nástroje, neboť při nevhodně zvoleném druhu povlaku může materiál mít větší tendenci ke tvoření nárůstku vlivem chemické příbuznosti. K tvorbě nárůstku dochází v určitém rozmezí řezné rychlosti. Vzhledem ke snižování řezné rychlosti vlivem průměru nelze tento jev zcela odstranit, neboť zvýšením řezné rychlosti se nárůstek pouze posouvá směrem k ose, kde je řezná rychlost nulová. A při snížení řezné rychlosti se nárůstek posouvá směrem k vnějšímu okraji nástroje. Pokud by bylo nutné nárůstek zcela odstranit, mohlo by se obrábění dostat do řezných rychlostí, kde by nebylo produktivní, a proto ve většině případů se volí optimální řezná rychlost, kdy je nárůstek na vhodném místě a je stabilní. [6],[18],[72]



Obr. 19 Opotřebení ve tvaru nárůstku[6]

2.3.3.6 Zalomení nástroje

Zlomení nástroje je limitní stav, kdy nástroj nedokáže přenést sílu, které je vystaven při obrábění. Jestliže dojde k tomuto stavu opotřebení, tak se ve většině případů jedná o nevhodně zvolenou řeznou rychlost a velikost posuvu, popřípadě špatný typ tvořené třísky, jež může způsobit zahlcení šroubovitě drážky vrtáku. K destrukci nástroje často též dochází při překročení optimální velikosti opotřebení, kdy se vlivem opotřebení výrazně zvýší řezný odpor, který může být pro nástroj destruktivní. Díky tomuto způsobu opotřebení vznikají často značné náklady na odstranění části zalomeného vrtáku v díře. Při obrábění Inconelu 718 je důležité zajistit spolehlivost obrábění, neboť samotný materiál je velice drahý a při destrukci nástroje mohou vzniknout neopravitelné zmetky. [6],[19]



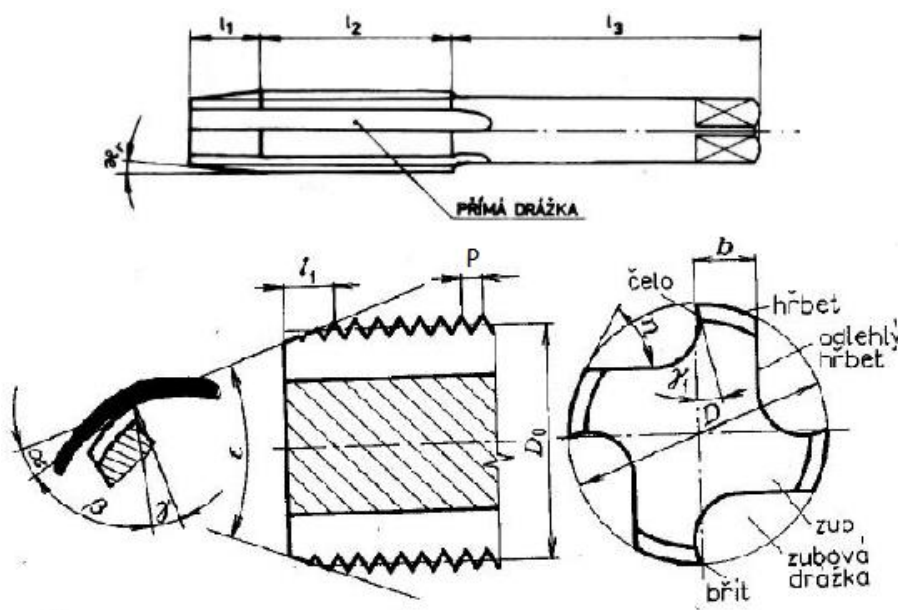
Obr. 20 Lom nástroje [6]

2.4 Závitování

Možností výroby závitů je celá řada, ale tato práce se zaměří pouze na výrobu vnitřních závitů řezáním pomocí závitníků. Metoda řezání vnitřních závitů závitníky je zřejmě nejznámější metodou, a také v současné době asi nejpoužívanější. Její použití je velice univerzální, jak z hlediska materiálů tak strojů. [74]

Jestliže se hovoří o závitníku, jedná se o mnohabřitý nástroj, který má břity ve tvaru určitého typu závitů. Jak tvar, tak i konstrukce závitníku je závislá na několika faktorech, do kterých je možné zařadit například druh, velikost, tvar závitů, ale také druh obráběného materiálu a mnoho dalších. Při závitování je nutné brát v potaz, že není prioritní mít nástroj co možná nejtvrdší, ale je potřeba zajistit dostatečnou houževnatost. Jestliže tato podmínka nebude splněna, může docházet ke zlomení nástroje. S ohledem na tuto skutečnost je výběr řezných materiálů omezen. Materiály, jež se využívají pro závitníky, jsou rychlořezná ocel a slinitý karbid. Pro závitování těžkoobrobitelných materiálů se s výhodou používá rychlořezná ocel vyrobená práškovou metalurgií, která dosahuje lepších vlastností nežli rychlořezná ocel zpracovaná klasickým způsobem. Dělení závitníků se neprovádí podle druhu závitů k jakému je závitník vyroben, ale dělí se na ruční, strojní, maticové, kalibrovací a speciální závitníky. [75],[77]

Závitník se skládá z několika částí, které musí mít správnou velikost a tvar pro jeho správnou funkci. Základní části závitníku jsou pracovní a upínací část. Pracovní část je složena z řezného kužele a vodící části, kde se nachází několik kalibrovacích závitových zubů. [20],[77]



Obr. 21 Řezné úhly na zavitníku [75],[76]

Velikost řezného kuželu, čili nastavení úhlu κ_r , je závislá především na druhu obráběného materiálu. Na druhu materiálu závisí i další náležitosti zavitníku jako například tvar a velikost drážky, velikost jádra, způsob chlazení a další. Pro správný výběr zavitníku je nutné znát nejen hloubku závitů, ale také zda připravená díra je průchozí či neprůchozí. [20],[77]

Typ	Počet chodů v náběhu	Provedení drážek pro odvod třísky	Použití převážně pro
A	6 - 8 chodů	s přímým drážkováním	Průchozí otvory v materiálech tvrdých střední, příp. dlouhou třísku
B	3,5 - 5 chodů	s přímým drážkováním s lamačem s náběhem	Průchozí otvory v materiálech tvrdých střední, příp. dlouhou třísku
C	2 - 3 chody	s přímou nebo šroubovitou drážkou	Slepé otvory v materiálech tvrdých dlouhou a střední třísku a průchozí otvory v materiálech tvrdých krátkou třísku
D	3,5 - 5 chodů	s přímou nebo šroubovitou drážkou	Slepé otvory s dlouhým výběhem závitů a průchozí otvory
E	1,5 - 2 chody	s přímou nebo šroubovitou drážkou	Slepé otvory s velmi krátkým výběhem závitů

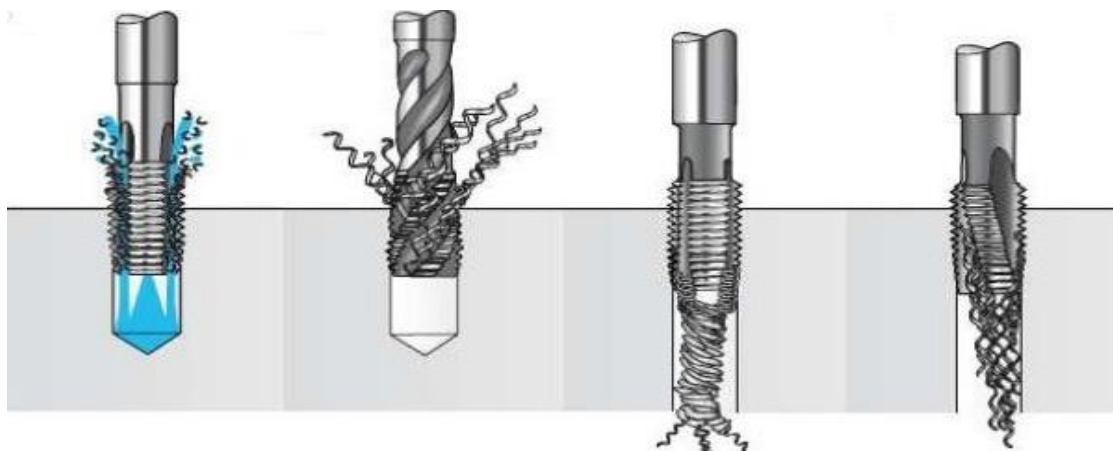
B

C

Tab. 3 Typy náběhů řezacích zavitníků [78]

Při zavitování neprůchozí díry musí být řezný kužel strmější a drážka je buď přímá nebo pravotočivá pro správný odchod třísky. Kdežto při zavitování do průchozí díry může být řezný kužel pozvolnější a drážka levotočivá, která způsobuje, že tříška je tlačena před zavitníkem skrz díru. Při špatně zvoleném zavitníku se může špatný odvod třísky stát velkým

problémem při nahromadění na dně neprůchozí díry. Nahromaděné třísky na dně mohou způsobit poškození závitu a v krajním případě až zalomení nástroje. Následující obrázek demonstruje odchod třísky v závislosti na chlazení a typu drážky. [20],[71],[77]



Obr. 22 Odchod třísky při závitování [71]

2.4.1 Mazání a chlazení

U závitování je prioritní mazací účinek procesní kapaliny nežli její chladicí účinek, proto jsou procesní media specifická. U některých závitníků je součástí vnitřní chlazení, jak je vidět na předešlém obrázku. Při použití vnitřního chlazení se použití procesních medií značně tenčí a to na řezné emulze a oleje. Řezné emulze se používají spíše pro odplavování třísky z místa řezu, kvůli jejich nízkému mazacímu účinku. Při použití řezných olejů mazací účinek značně roste a tím se zvyšuje i životnost nástroje. Při použití nástrojů bez vnitřního chlazení se sortiment mazacích médií rozšíří o řezné pasty a gely. Tato mazací média se používají pro speciální a velmi náročné aplikace při řezání závitů. Pasty jsou v dnešní době bez přídavků chlóru, čímž nevznikají škodlivé výpary a tím je použití past ekologičtější. Při použití past dochází ke zvýšení životnosti, řezného výkonu a zlepšuje kvalitu povrchu. Pasty a gely se s výhodou používají především při závitování těžkoobrobitelných materiálu, kterým je samozřejmě i Inconel 718. [20],[74],[78]

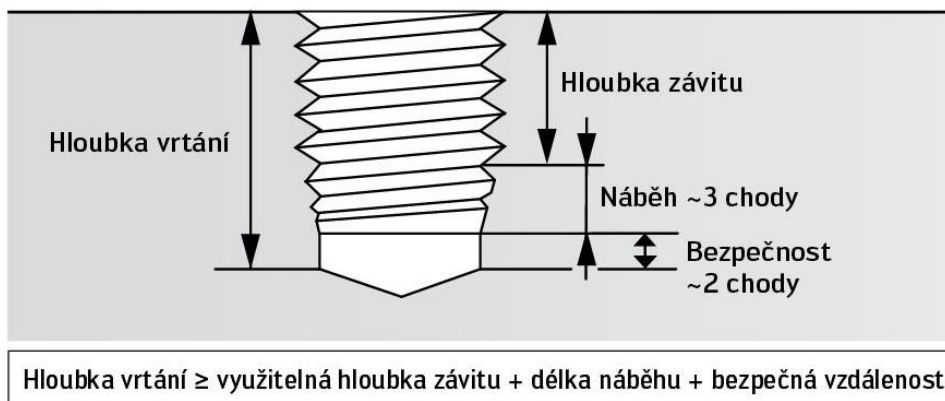
2.4.2 Příprava otvoru pro závit

Pro řezání závitu pomocí závitníků je nesmírně důležité se soustředit na předchozí technologii přípravy otvoru pro závit, jíž je vrtání. Vrtání otvoru pro závit může značně ovlivnit následné závitování, ale hlavně životnost závitníku. Během procesu vrtání díry jsou stěny otvoru, jak mechanicky tak tepelně namáhány, což může mít za následek zpevnění povrchu otvoru, k čemuž je Inconel 718 velmi náchylný. Zpevnění povrchu díry se zvětšuje se zvětšující se mírou opotřebení vrtáku. Vzhledem ke zvětšujícímu se opotřebení dochází ke zvýšení teploty v místě řezu a také zvětšení mechanického namáhání. Tato skutečnost může ovlivnit životnost závitníku až v řádech desítek procent, a proto je nutné do procesu závitování zahrnout i přípravu díry pro závitník. Je nutné se snažit minimalizovat možné zpevnění povrchu při vrtání. Zpevnění povrchu díry vlivem otupeného vrtáku je vidět na následujícím obrázku. Dalším aspektem, jenž může velkou měrou ovlivnit proces závitování, je kruhovitosť a především válcovitost předvrtaného otvoru. Pro správné zavedení závitníku do předvrtané díry, je vhodné u díry před samotným závitováním srazit hranu o velikosti stoupání závitu. Samozřejmostí je použití správného průměru vrtáku, který je určený normou pro zvolený závit. [20],[76],[78]



Obr. 23 Rozdíl mezi novým vrtákem a opotřebeným při ovlivnění povrchové vrstvy [79]

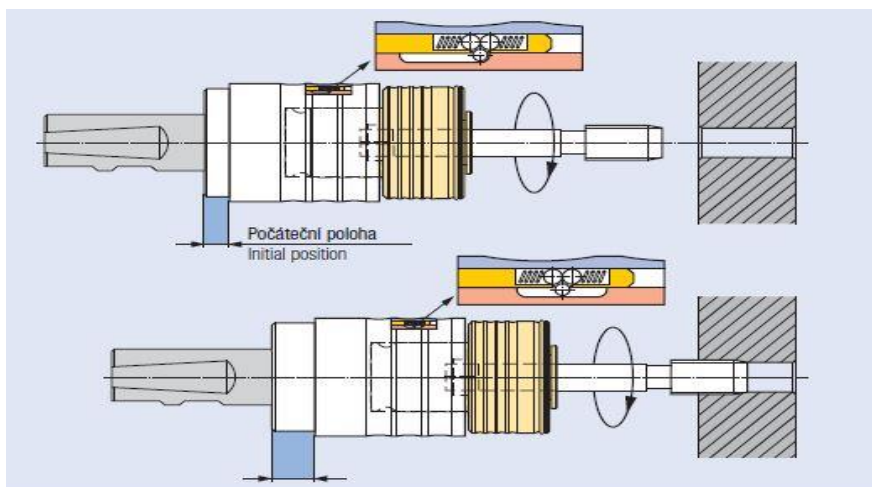
Při vrtání otvoru pro závit je důležité, aby hloubka díry byla dostatečná a závit mohl být bezproblémově vyříznut. Dostatečnou hloubku vrtané díry popisuje následující obrázek.



Obr. 24 Řez otvorem se závitem [78]

2.4.3 Upínání závitníků

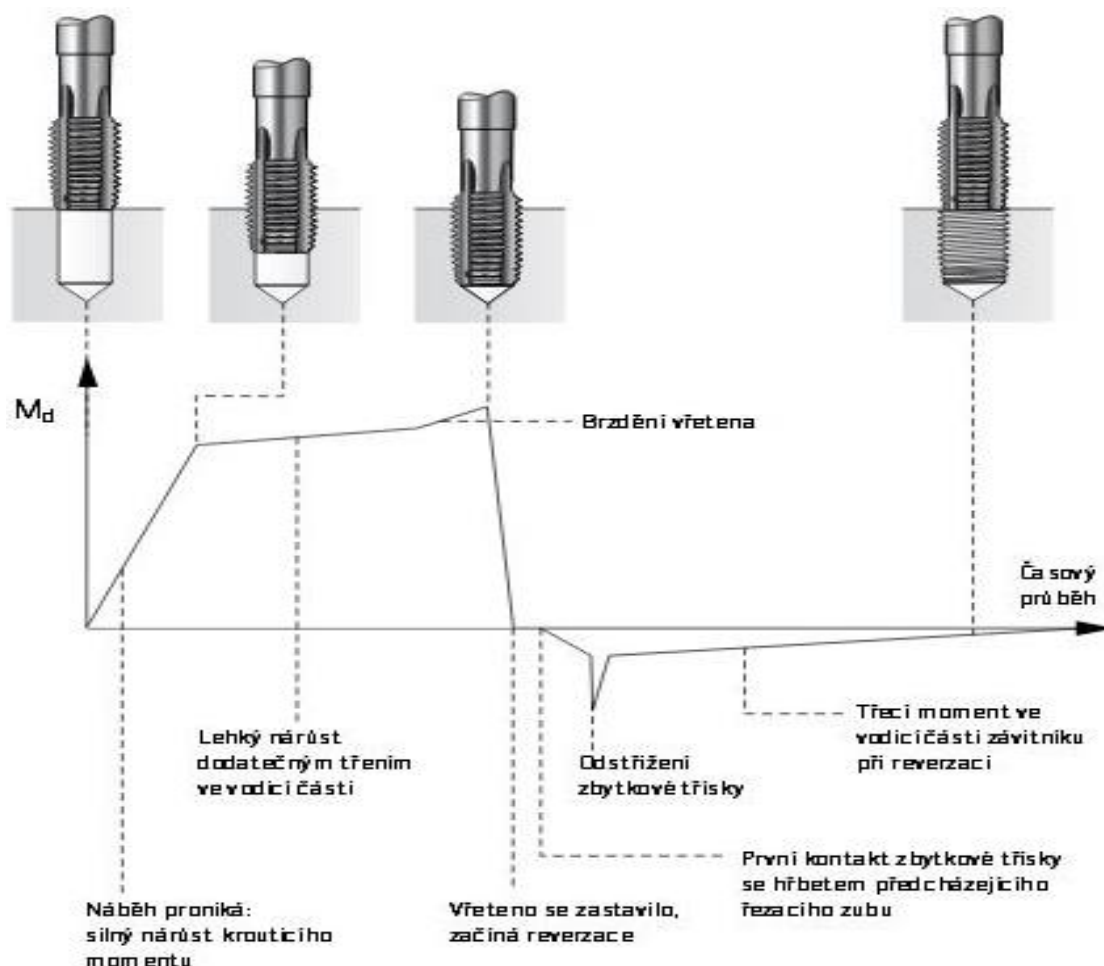
Upínání nástrojů u závitování má určité odlišnosti od upínání u klasických způsobů obrábění jako je vrtání či frézování. Odlišnosti jsou způsobené především nutností synchronizace otáček vřetena a posuvů stolu, což je při závitování nezbytné. Z tohoto důvodu není vhodné použít naprosto tuhé upnutí, například tepelným či hydraulickým upínačem. Vhodné upnutí závitovacího nástroje je pomocí vyrovnávacího pouzdra. Vyrovnávací pouzdra, která se hojně využívají, mají za úkol kompenzaci tahu a tlaku při závitování. Mezi další výhody vyrovnávacího pouzdra patří momentová spojka proti přetížení, pojistka proti vytržení nástroje a další. V současné době je na trhu mnoho typů upínačů pro závitování, ale princip zůstává shodný. Princip vyrovnávacího pouzdra je zřejmý z následujícího obrázku. [74],[78]



Obr. 25 Princip vyrovnávacího pouzdra [74]

2.4.4 Průběh krouticího momentu při závitování

Průběh krouticího momentu během závitování pomocí závitníků je velmi specifický, jak je vidět na následujícím obrázku. Průběh krouticího momentu se dá rozdělit do několika částí. Nejprve dochází k prudkému nárůstu momentu, což je zapříčiněno postupným zařezáváním jednotlivých řezných zubů. Následuje proces vlastního řezání, kdy už jsou všechny řezné zuby v záběru a krouticí moment stoupá pouze lehce a to díky zvyšování tření mezi břity a obráběným materiálem. Před koncem závitované díry dochází k nárůstu momentu a to kvůli brzdění vřetena stroje. Poté dochází k poklesu momentu na nulovou hodnotu, což je způsobeno zastavením řezného procesu. Nyní dochází k reverzaci otáček a to má za následek, že krouticí moment bude nabývat záporných hodnot. Při opačném pohybu závitníku dochází ke kontaktu mezi zbytkovými třískami se hřbetem řezacích zubů a to způsobí zvýšení krouticího momentu. Při odstřížení zbytkové třísky dochází k prudkému nárůstu a následnému prudkému poklesu momentu. Poté se krouticí moment postupně zmenšuje a to je způsobeno postupným vybíháním jednotlivých závitů závitníku, a tím snížení třecí plochy mezi závitem a závitníkem. [74],[78]



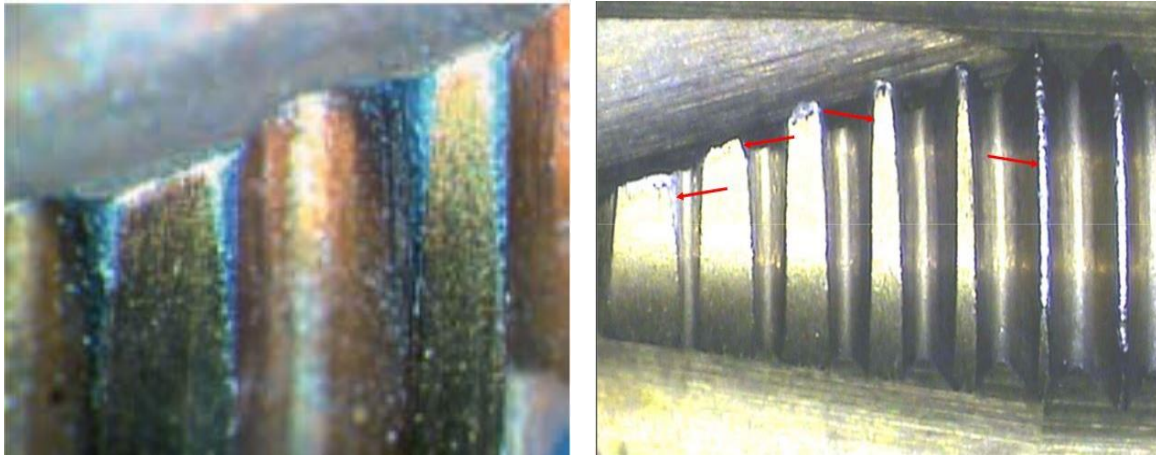
Obr. 26 Průběh krouticího momentu při závitování [78]

2.4.5 Závítování Inconelu 718

Při řezání závitů do Inconelu 718 pomocí závitníků musí být nástroj připraven na úskalí, které skýtá závítování tohoto materiálu, tj. vysoká pevnost, zpevňování a především svírání. Pro úspěšné zvládnutí těchto nepříznivých vlivů je potřeba, aby nástroj byl především houževnatý a měl negativní úhel čela, velký úhel hřbetu a velmi tvrdý povlak. Povlak musí být nejen velmi tvrdý, ale musí disponovat i velmi dobrými kluznými vlastnostmi. [20],[74],[78]

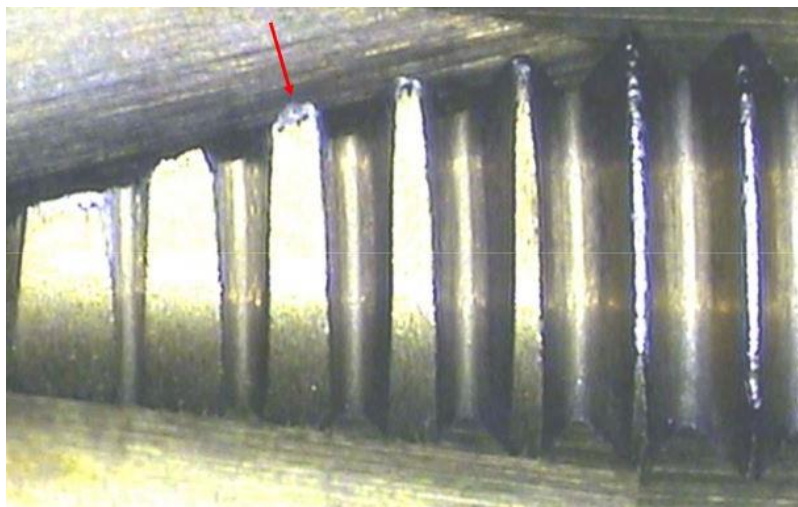
2.4.6 Opotřebení závitníků

Pro závítování platí v zásadě stejné mechanismy opotřebení jako u vrtání, jež jsou popsány výše. Ale i přesto je vhodné zde uvést alespoň obrázky, jak se tyto opotřebení klasifikují na závitnicích. Při obrábění abrazivních materiálů, jímž Inconel 718 bezpochyby je, vzniká opotřebení na bocích řezných zubů (na hřbetě boční řezné hrany). Tento typ opotřebení je vyobrazen na následujícím obrázku. [74],[79]



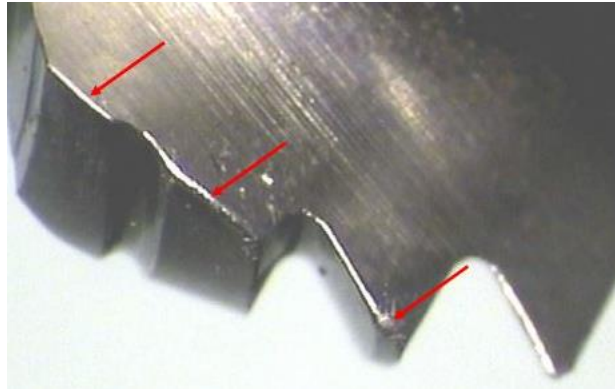
Obr. 27 Opotřebení boků zubů [79],[82]

Mezi domény typu opotřebení pro tyto materiály patří bezpochyby i tvorba nárůstku. Tento druh opotřebení je vyobrazen na následujícím obrázku. Na obrázku je možné vidět více typů opotřebení, proto je nárůstek pro snadnější identifikaci označen červenou šipkou.



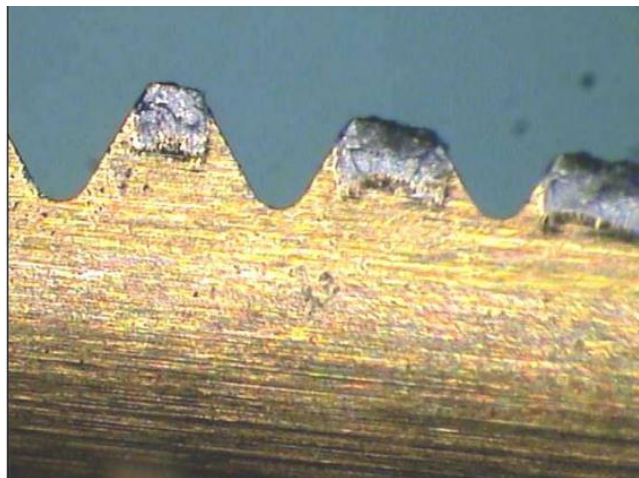
Obr. 28 Nárůstek [82]

V určitých případech může docházet k zaoblení řezné hrany, jež je vidět na následujícím obrázku. Vznik tohoto opotřebení je podmíněn mnoha faktory, ale zásadní je, aby byl materiál řezného nástroje dostatečně houževnatý.



Obr. 29 Zaoblení řezné hrany [82]

Kdyby materiál řezného nástroje nebyl dostatečně houževnatý, docházelo by k vydrolování ostří, tvorbě kráterů a v krajním případě až k vylomení zubů nástroje. Na následujícím obrázku je možné si prohlédnout opotřebení ve formě kráterů. Na dalším obrázku je možné vidět vylomení zubů nástroje. Toto opotřebení je mezní stav, ke kterému by nemělo docházet a pokud ano, tak pouze ve výjimečných případech.



Obr. 30 Opotřebení ve formě kráteru [82]



Obr. 31 Vylomení zubů [82]

3 Návrh a realizace vlastních experimentů

Cílem experimentů bylo porovnat dva nástroje od různých výrobců pro operace vrtání, závitování a především stanovit, které nástroje je nejvýhodnější použít při vrtání a závitování Inconelu 718. Pro každý nástroj bylo provedeno pouze jedno opakování, nejen z důvodu vysoké ceny nástrojů, ale také ceny samotného testovaného materiálu.

Při návrhu experimentu bylo třeba experiment důkladně naplánovat a připravit veškerá doprovodná měření. Pro naplánování experimentu bylo zapotřebí určit, co bude mít na připravovaný experiment vliv a díky tomu je nutné tento vliv monitorovat a zaznamenávat. Z rešerše bylo vytipováno několik charakteristik, které je nezbytné monitorovat během procesů vrtání a následného závitování. Další charakteristiky a vlivy vyplynuly z logiky věci. Nejprve byly provedeny materiálové testy, aby bylo možné materiál jednoznačně klasifikovat a zjistit jeho chemické složení. Chemické složení materiálu bývá častým problémem při obrábění, neboť každý materiál má určité procentuální rozmezí jednotlivých prvků, a pokud je obsah na spodní nebo na horní hranici, může být obrovský rozdíl v obrobiteľnosti. Po ověření materiálu se postupovalo dál směrem k nástrojům a samotnému procesu. Nežli se přešlo k obrábění, bylo zapotřebí naskenovat jednotlivé nástroje na optickém mikroskopu, aby byl zdokumentován výchozí stav. Po naskenování nástrojů již následoval přechod k obrábění a sním spojených měření. Pro měření řezných sil byla použita soustava pro měření řezných sil a momentů. Tato sestava je důkladněji rozklíčována v samostatné kapitole této práce. Byly měřeny jednotlivé složky řezné síly a to jsou síla posuvová F_f , síla pasivní F_p a krouticí moment M_c . Tyto řezné síly byly měřeny jak pro vrtání, tak i pro závitování. Pro kontrolu a rychlé měření opotřebením byl použit dílenský optický mikroskop. Pro detailnější hodnocení opotřebením byly nástroje přeskenovány na optickém mikroskopu IFM G4 po první vyrobené díře, a poté až po opotřebením, které bylo diagnostikováno pomocí dílenského optického mikroskopu. Od nástrojů se pozornost přesouvala k vyrobeným dířám a závitům. Aby bylo možné hodnotit na jednom vzorku parametry vrtané díry i závitů, byla zvolena hloubka vrtané díry 30mm a hloubka závitů pouze 20mm. U vybraných vzorků byla třídítkovým mikrometrem změřeny průměry jednotlivých děr. Pro detailní měření bylo vybráno pouze několik vzorků od každého nástroje 1 až 2. U těchto vzorků byl odsoustružen materiál ze spodní strany válečku, aby se díra stala průchozí. Tento krok byl zvolen z důvodu, aby bylo jednoduchým způsobem možné změřit parametry díry pod závitem. Po proměření díry následovalo rozříznutí válečku elektroerozivním řezáním, aby bylo možné hodnotit drsnost a další parametry jak díry, tak závitů pomocí Optického mikroskopu IFM G4.

Při realizaci experimentů byly jednotlivé nástroje k sobě spjaty, to znamená, že určitý vrták byl spárován s určitým závitníkem, aby byly zachovány stejné podmínky po celou dobu testování. Následující tabulka ukazuje související dvojice nástrojů.

Vrták	Závitník
A1	C1
A2	D1
B1	C2
B2	D2

Tab. 4 Kombinace nástrojů.

3.1 Použité zařízení

Během experimentů bylo využíváno především zařízení a vybavení, jimiž disponuje Fakulta strojní.

3.1.1 Použité nástroje

3.1.1.1 Vrtáky

Při výběru nástrojů byly osloveny přední firmy na trhu s vrtacími nástroji, zda by mohly doporučit některé ze svých nástrojů, které by nasadili na vrtání Inconelu 718. Z finančních důvodů byly zakoupeny vrtáky pouze od 2 oslovených firem. Bohužel při definování jednotlivých parametrů vrtání se stala chyba, kdy vrtaná hloubka byla zvolena více nežli 3D, vlivem tohoto omylu jsou vrtáky rozdílné délky. Takže vrták A1 je výrazně delší, neboť je určený pro hloubky děr do 5D. Jeho konkurent B1 je značně kratší, protože má sloužit pro tvorbu děr o hloubce 3D. I přesto, že se vrtáky výrazně odlišují v délce, ostatní parametry jsou velmi podobné, a proto je možné vrtáky mezi sebou porovnávat. V následující tabulce jsou uvedeny některé z údajů, které jsou možné dohledat v katalogích výrobců.

Označení	materiál	Délka řezné části	Vrcholový úhel	Úhel stoupání šroubovice	Povlak	Vnitřní chlazení
A1	Slinutý karbid	96 mm	140°	12°20'	WXS	Ano
B1	Slinutý karbid	55 mm	140°	32,2°	TiAlN	Ano

Tab. 5 Základní parametry vrtáků



Obr. 32 Testované vrtáky A1 a B1

3.1.1.2 Závitníky

Taktéž jako u vrtáků, tak i u závitníků probíhal výběr stejným způsobem. Doporučené závitníky se od sebe odlišují především počtem náběžných zubů a smyslem šroubovice. Jak je možné si všimnout v následující tabulce.

Označení	materiál	Počet náběžných zubů	Smysl šroubovice	Povlak	Procesní kapalina	Přesnost závitů
C1	Prášková ocel (Co5+V5)	3	Levá	TiCN	Řezný olej, pasta	6HX
D1	Prášková ocel HSS	4-5	Pravá	TiCN	Řezný olej, pasta	6HX

Tab. 6 Základní parametry závitníků



Obr. 33 Testované závitníky C1 a D1

3.1.1.3 Volba řezných podmínek

Volba řezných podmínek vyplynula z provedené rešerše, kdy bylo porovnáno několik zdrojů zabývajících se vrtáním a závitováním Inconelu 718 s katalogy výrobců. Volené podmínky byly korigovány vlivem tvrdosti materiálu.

Typ operace	Řezná rychlost V_c [m/min]	Posuv na otáčku f_{ot} [mm/ot]	Přerušení řezu	Technologická kapalina	Tlak vnitřního chlazení [MPa]
Vrtání	22	0,19	bez	Hydrol	2
Závitování	5	2	bez	blasomill CMP, Řezná pasta	-

Tab. 7 Zvolených řezných podmínek

Pro každou operaci byly zvoleny jednotné podmínky, které během testování zůstaly konstantní.

3.1.2 Použité stroje a přístroje

3.1.2.1 Stroj

Veškeré experimenty byly prováděny v halových laboratořích Fakulty strojní, která disponuje strojovým parkem. Stroj, který byl zvolen na provedení experimentu, byl 3osé vertikální frézovací centrum MCV 750A.



Obr. 34 Frézka MVC750A

3.1.2.2 Upínač vrtáků

Pro tuhé upnutí byl zvolen hydraulický upínač s možností vnitřního chlazení. Upnutí nástroje do hydraulického upínače je vidět na následujícím obrázku.



Obr. 35 Upnutí vrtáků do hydraulického upínače

3.1.2.3 Upínač závitníků

Pro veškeré experimenty vztahující se k závitování byla použita vyrovnávací hlava. Princip vyrovnávací hlavy byl vysvětlen v teoretické části práce. Na následujícím obrázku je vyobrazeno upnutí závitovacího nástroje do vyrovnávací hlavy.



Obr. 36 Upínání závitníků – vyrovnávací hlava

3.1.2.4 Optický mikroskop Multicheck 500 PC

Optický mikroskop Multicheck 500 Pc je dílenský mikroskop sloužící pro rychlé měření opotřebení nástrojů. Mikroskop je schopný měřit s přesností až 0,005mm. Jedná se o mikroskop s automatickou výměnou objektivů, což zvyšuje uživatelský komfort. Mikroskop je vybaven přípravkem pro upínání nástrojů s možností různého natočení. Pro nastavení polohy měření slouží ruční posuvy v osách y a z. Mikroskop je dále vybaven jednotkou pro možnost nastavení intenzity světla, jež je potřebné pro správné nasvětlení místa opotřebení. Mikroskop je propojen s počítačem, ve kterém je díky softwaru možné měřit opotřebení nástrojů.



Obr. 37 Optický mikroskop Multicheck 500 Pc

3.1.2.5 Optický mikroskop Infinite Focus measurement G4

Optický mikroskop Infinite Focus measurement G4 (IFM G4) je zařízení od firmy Alicona, která patří mezi světovou špičku v oblasti optických mikroskopů. Toto zařízení je schopné měřit s přesností na 0,0001mm. Zařízení slouží pro optické skenování povrchu a následné vyhodnocení jednotlivých parametrů povrchu. Například k hodnocení jednotlivých druhů drsností povrchu. Další užitečnou funkcí, kterou je IFM G4 vybaveno, je diferenční analýza. Diferenční analýza se s výhodou používá pro řezné nástroje. Princip diferenční analýzy je založen na proložení naskenovaného nového povrchu nástroje se skenem opotřebovaného nástroje, kdy se projeví difference mezi jednotlivými skeny.



Obr. 38 IFM G4 od firmy Alicona

3.1.2.6 Zařízení pro měření řezných sil a momentů

Zařízení pro měření řezných sil a momentů se skládá z několika částí. Hlavní části soustavy pro měření řezných sil a momentů jsou:

- Čtyř - složkový dynamometr
- Odstíněný kabel pro přenos signálu z dynamometru do zesilovače
- Zesilovač signálu
- Řadič
- Měřicí karta
- Pc s příslušným softwarem pro měření řezných sil

Pro měření byl použit 4 složkový dynamometr KISTLER 9272, na kterém bylo připevněno tříčelistové sklíčidlo, pomocí něhož byl upnut testovaný vzorek. Na propojení dynamometru a zesilovače byl použit odstíněný kabel, který je vidět na následujícím obrázku vlevo dole.



Obr. 39 Dynamometr se sklíčidlem a vzorkem

Do zesilovače byl zapojen odstíněný kabel, který propojuje dynamometr se zesilovačem. Mezi řadičem a zesilovačem byly zapojeny 3 kabely, každý slouží pro přenos jednotlivých signálů složek řezných sil. Na zesilovači bylo zapotřebí nastavit jednotlivé konstanty, které se

nachází v tabulce na řadiči. Následně bylo potřeba nastavit rozsahy jednotlivých kanálů. Do zesilovače bylo zapojeno přídavné tlačítko pro resetování signálu.



Obr. 40 Zesilovač

Z řadiče vedl kabel, který byl vstupem do měřicí karty. Měřicí karta byla zapojena do notebooku, v němž je nainstalován software LabVIEW, který slouží k zaznamenávání řezných sil. Vyhodnocení řezných sil poté probíhá v programu Nasomer, který byl vytvořen v programu Matlab, kvůli zvýšení uživatelského komfortu při vyhodnocování řezných sil. Na následujícím obrázku je možné vidět téměř celou soustavu pro měření řezných sil a momentů.



Obr. 41 Soustava pro měření řezných sil a momentů

3.1.3 Polotovary zkušebních vzorků

Při prvním experimentu byl k dispozici Inconel 718 ve formě dlouhých tyčí o průměru 25,5mm. Z těchto tyčí bylo zapotřebí vytvořit zkušební vzorky, které budou vhodné pro následný experiment. Z tyče byly vytvořeny osazené válečky, které měly výšku 37,5mm a průměr osazení byl 24mm do poloviny výšky válečku. Osazení bylo zvoleno z důvodu

povrchových okují, které by při upnutí do sklíčidla dynamometru mohly zkreslovat výsledky. Zkušební váleček je vidět na následujícím obrázku.



Obr. 42 Zkušební vzorek

Pro hlavní experiment bylo použito jak těchto válečků, tak kruhové desky o průměru 120mm a výšce 35mm. Jedná se o materiálový vzorek, který byl nejprve žíhaný a následně precipitačně tvrzený.



Obr. 43 Zkušební vzorek – deska

3.1.3.1 Chemické složení a mechanické vlastnosti použitého materiálu

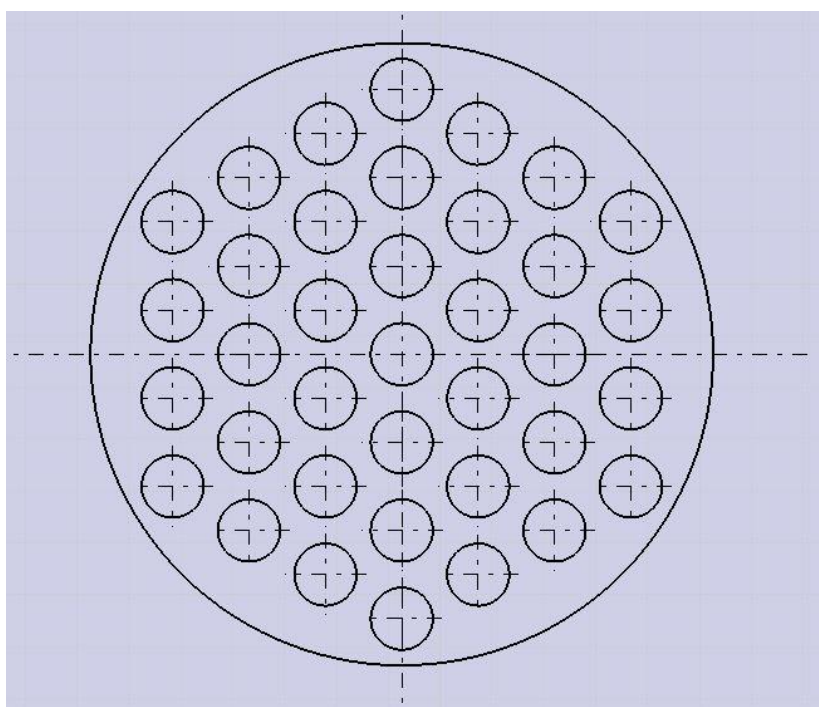
Inconel 718							
Nikl	Chrom	Železo	Niob (+Tantal)	Molybden	Titan	Hliník	Kobalt
53,15	18,5	18,53	4,936	2,84	1,06	0,49	0,02
Magnesium	Křemík	Měď	Uhlík	Fosfor	Síra	Bór	
0,08	0,14	0,02	0,024	0,009	0,001	0,0028	
Hodnoty v tabulce jsou uvedeny v procentuálním podílu ve sloučenině							

Tab. 8 Chemické složení zkušební vzorku

Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A4 [%]	Z [%]	Tvrдость [HB]	Rázová práce [J]
938	1227	27	36	353 - 358	68

Tab. 9 Mechanické vlastnosti

Pro kruhovou desku bylo nutné vytvořit vhodné rozložení děr. Návrh rozložení děr byl ovlivněn několika kritérii, mezi které patřilo maximalizovat počet děr v desce a dostatečná síla stěny mezi jednotlivými dírami. Při síle stěny bylo potřeba uvažovat o možnosti vytvoření závitů do jednotlivých děr. Díky těmto omezením bylo navrženo schéma, které poskytuje rozumný kompromis. Deska obsahuje 37 děr, jež mají mezi sebou minimálně 5mm silnou stěnu, což znamená, že při řezání závitů je stěna mezi jednotlivými dírami se závitěm 3mm. Na následujícím obrázku je návrh vyobrazen.



Obr. 44 Rozložení děr v desce

3.2 Vyhodnocení experimentů

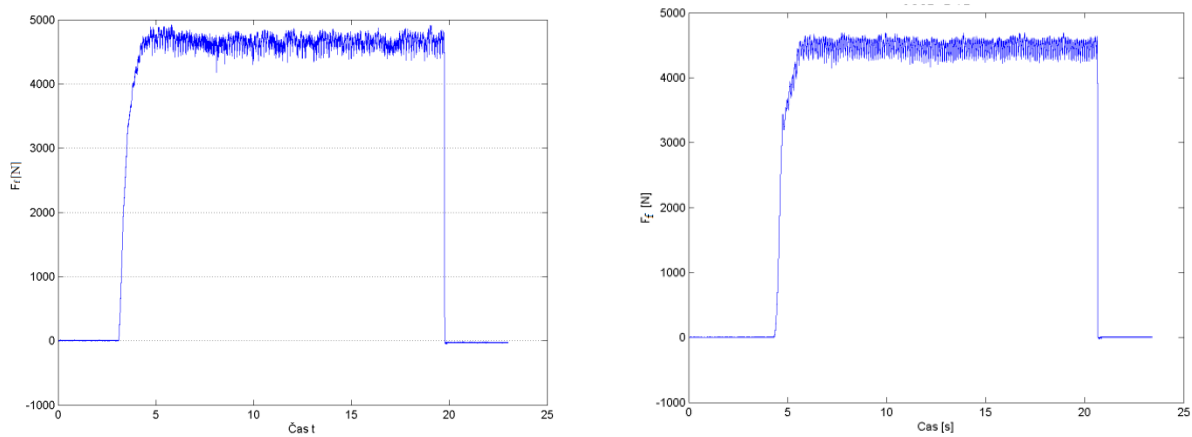
Při testování bylo zaznamenáno mnoho výsledků, které budou v této kapitole jednotlivě rozpracovány a zhodnoceny, aby měly dostatečnou vypovídací hodnotu.

3.3 Vyhodnocení řezných sil

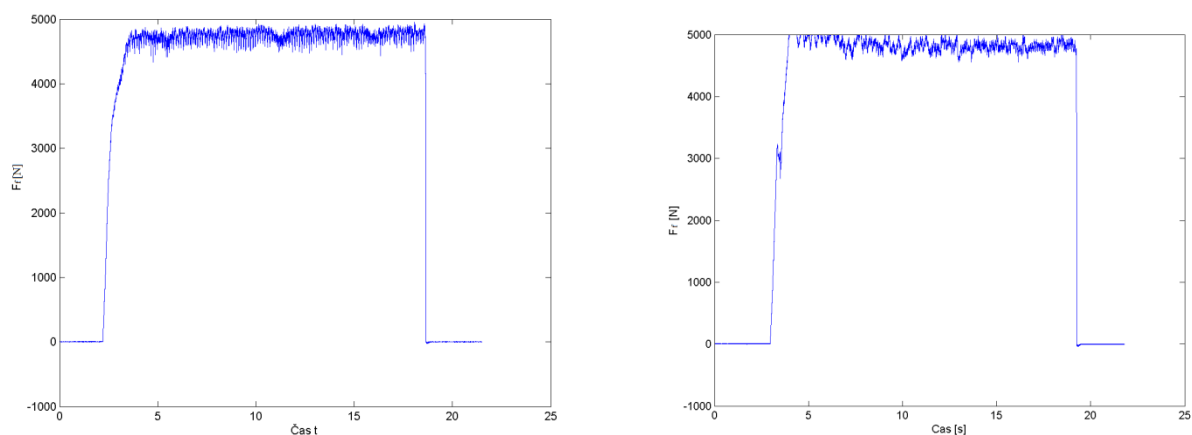
Při každém z procesů byly měřeny řezné síly a krouticí moment z důvodů možnosti sledování změny velikosti řezných sil a momentu v průběhu obrábění. Byla měřena posuvová složka řezné síly F_f , pasivní složka řezné síly F_p a celkový krouticí moment M_c . Jednotlivé složky odpovídají směřům, ve kterých působily. Kdy F_f je složka ve směru osy z, F_p je složka ve směru osy y a M_c je moment působící okolo osy z. Velikosti jednotlivých řezných sil a momentů se měřenou metodou obrábění diametrálně lišily. Proto je vyhodnocení rozděleno do jednotlivých technologických procesů.

3.3.1 Řezné síly při vrtání

Při vrtání vznikaly velké řezné síly především v ose z, proto se bude vyhodnocení zabývat především vyhodnocení složky řezné F_f krouticího momentu M_c . Průběh síly a momentu se vlivem opotřebení řezných nástrojů postupně zvyšoval.

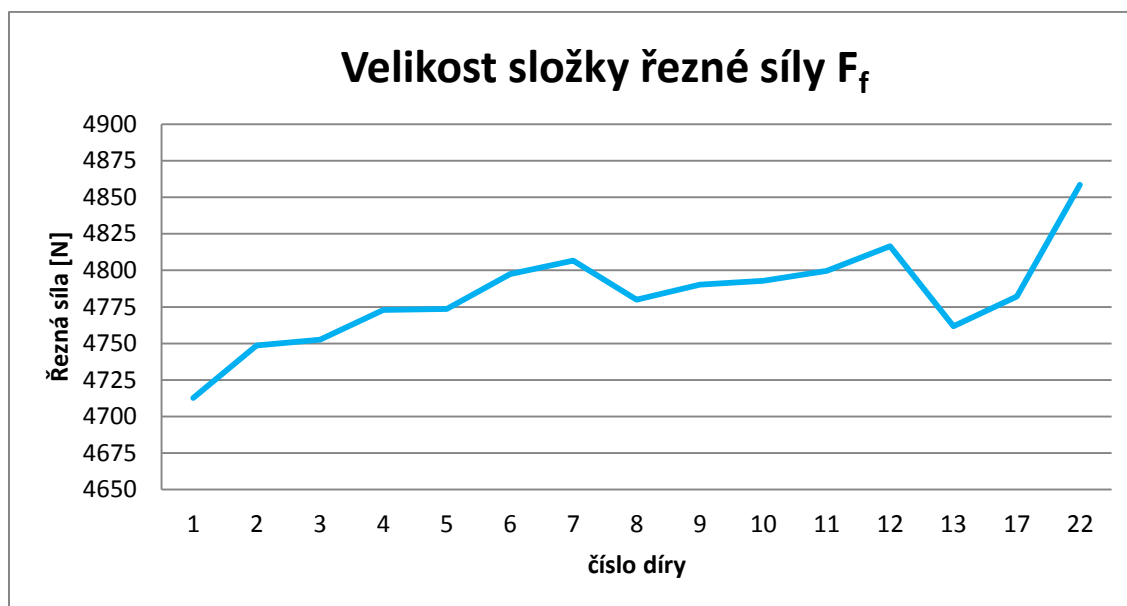
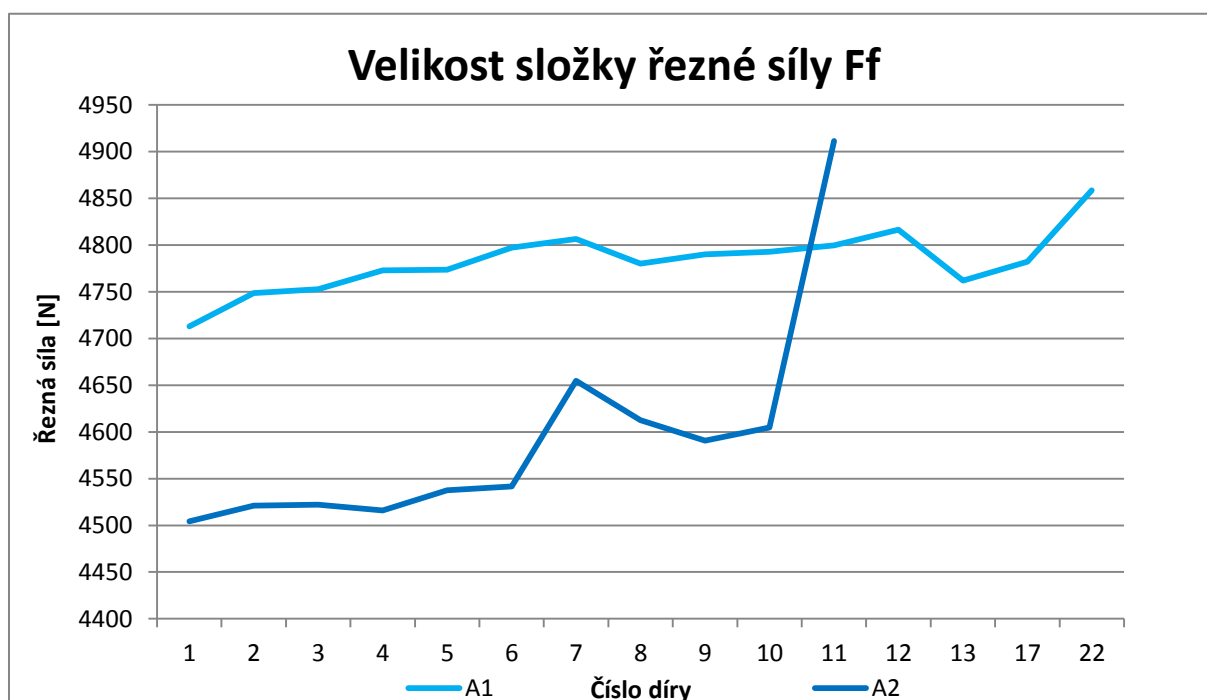


Graf 8 Porovnání při vrtání 1 díry vrtákem A1 a A2



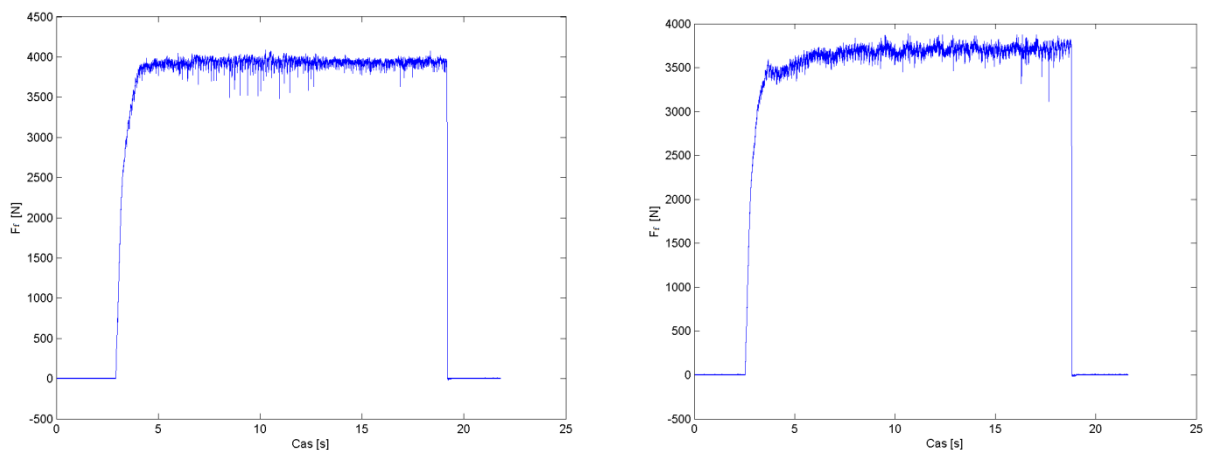
Graf 9 Porovnání při vrtání 11 díry vrtákem A1 a A2

Aby bylo možné velikost řezné složky vynést do grafu porovnání jednotlivých děr, bylo nutné z každého průběhu vytknout 5 hodnot, které vždy reprezentují průměrnou hodnotu v daném místě. Z těchto pěti hodnot byl vytvořen průměr a tato hodnota jednotlivých průběhů složky řezné síly je reprezentována v následujících grafech.

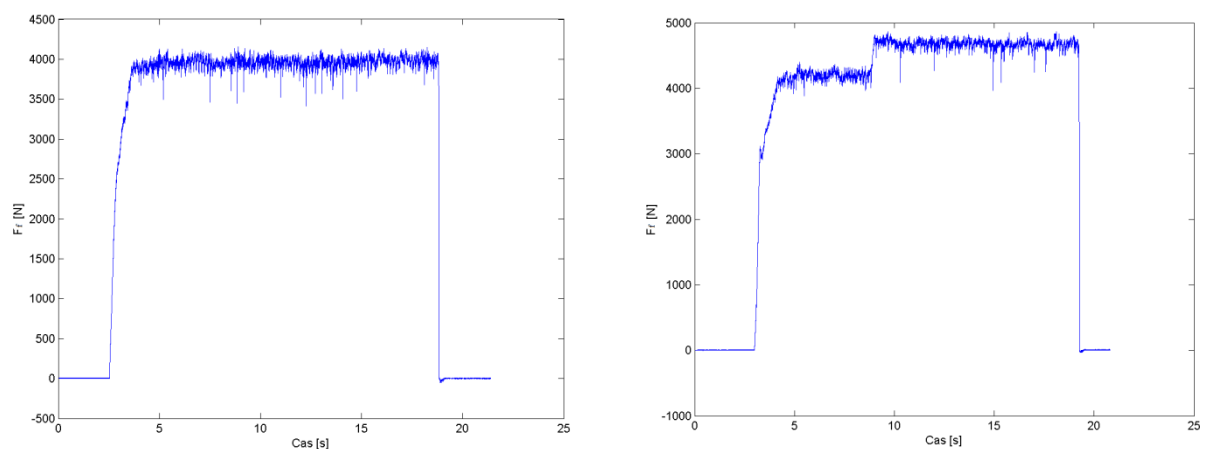
Graf 10 Velikost složky řezné síly F_f Graf 11 Porovnání složek řezné síly F_f – A1 a A2

Průběh řezné síly má stoupající charakter což je naprosto správně, neboť řezná síla je úzce spjata s opotřebením. Z těchto grafů vyplývá, že se zvyšujícím se opotřebením se zvyšuje i řezná síla F_f .

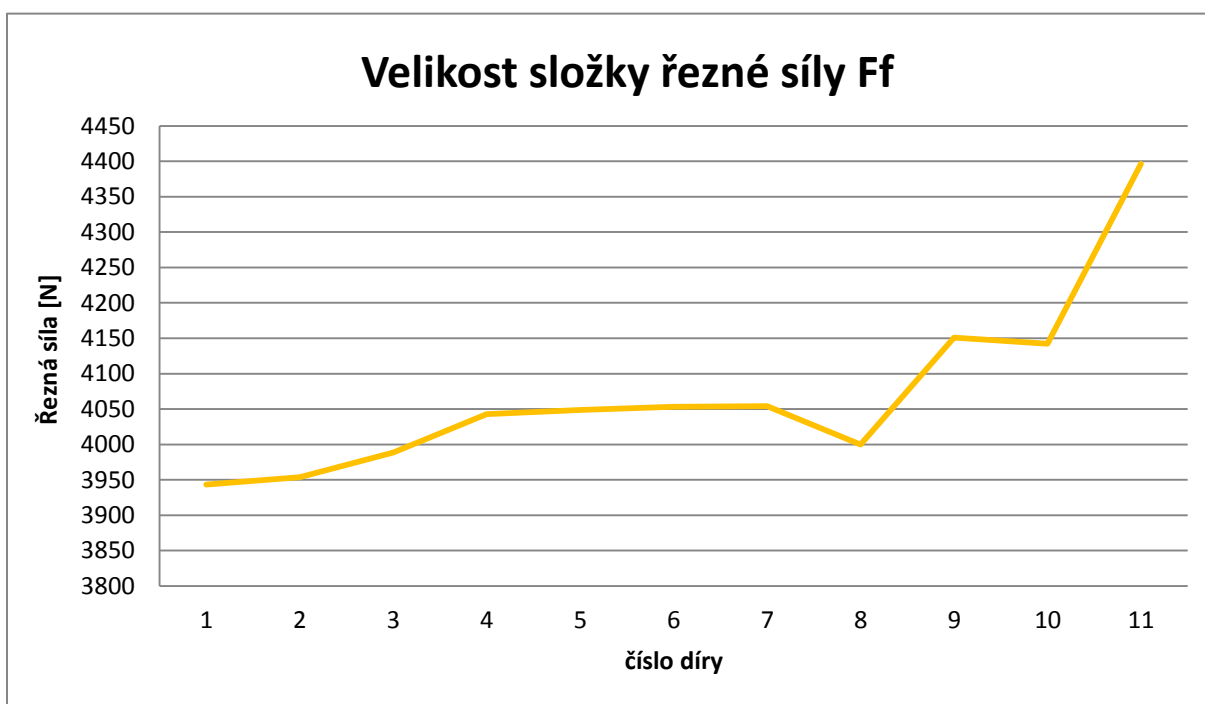
Na následujících grafech jsou vyobrazeny průběhy řezné síly F_f při vrtání nástroji série B. Jsou zde vyobrazeny grafy z měření první a osmé díry a následně porovnání jednotlivých velikostí řezné síly F_f v průběhu trvanlivosti.



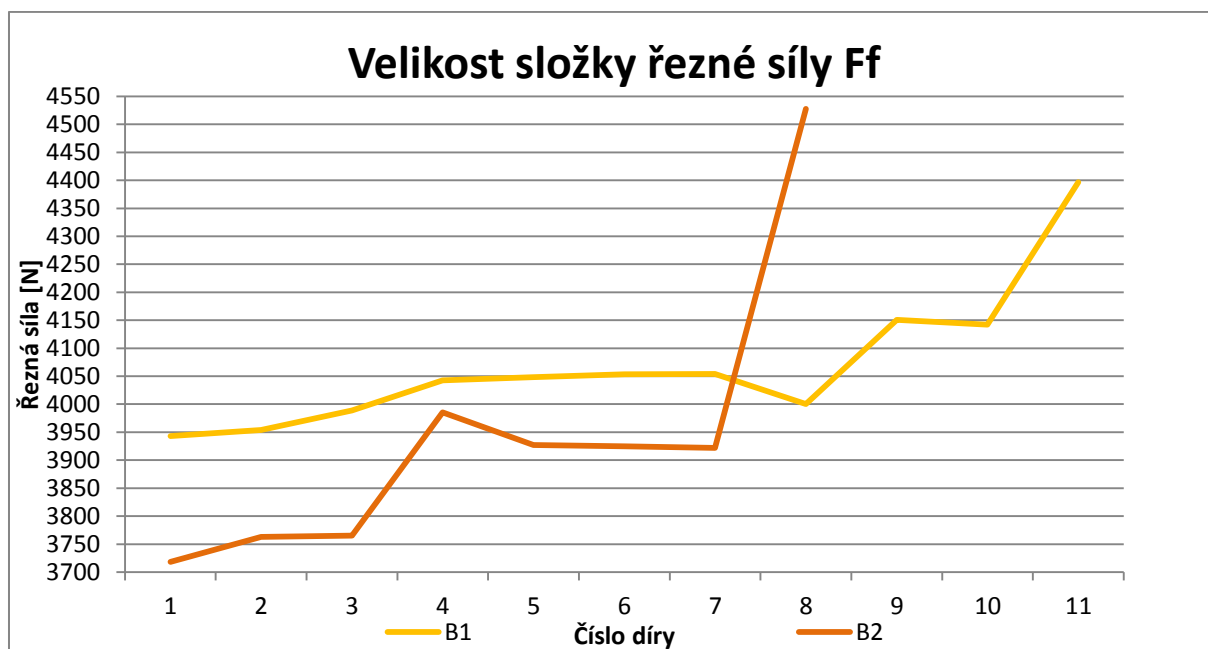
Graf 12 Porovnání grafů F_f při vrtání 1 díry vrtákem B1 a B2



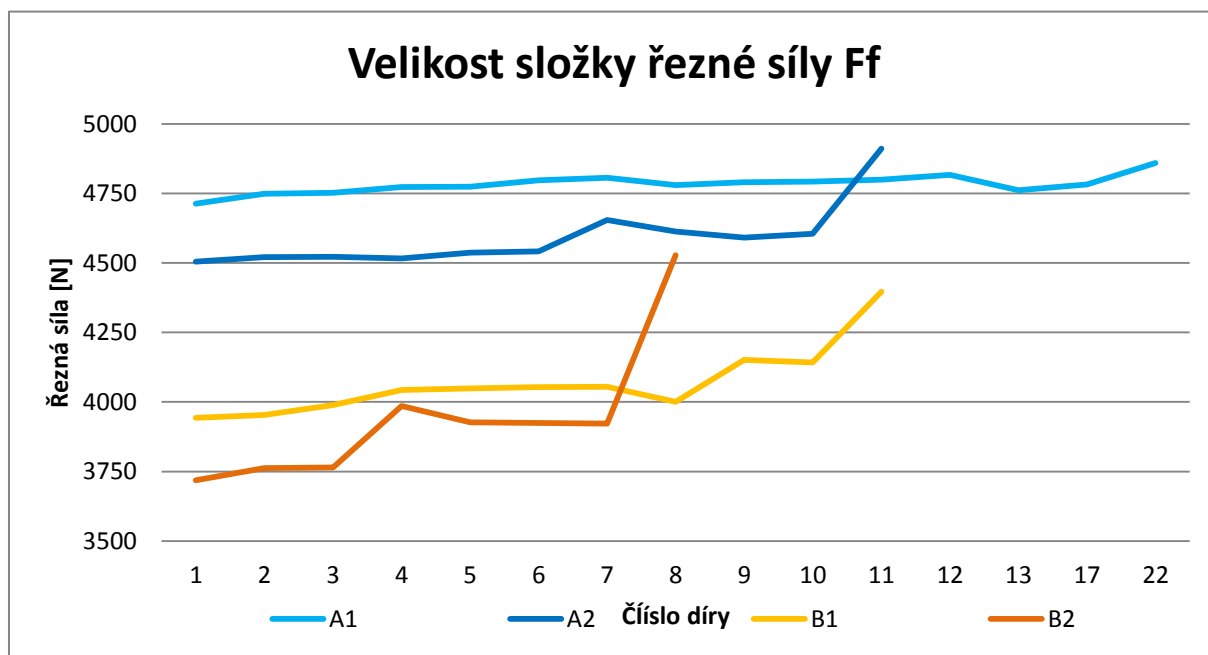
Graf 13 Porovnání grafů F_f při vrtání 8 díry vrtákem B1 a B2



Graf 14 Průběh složky řezné síly F_f - B1

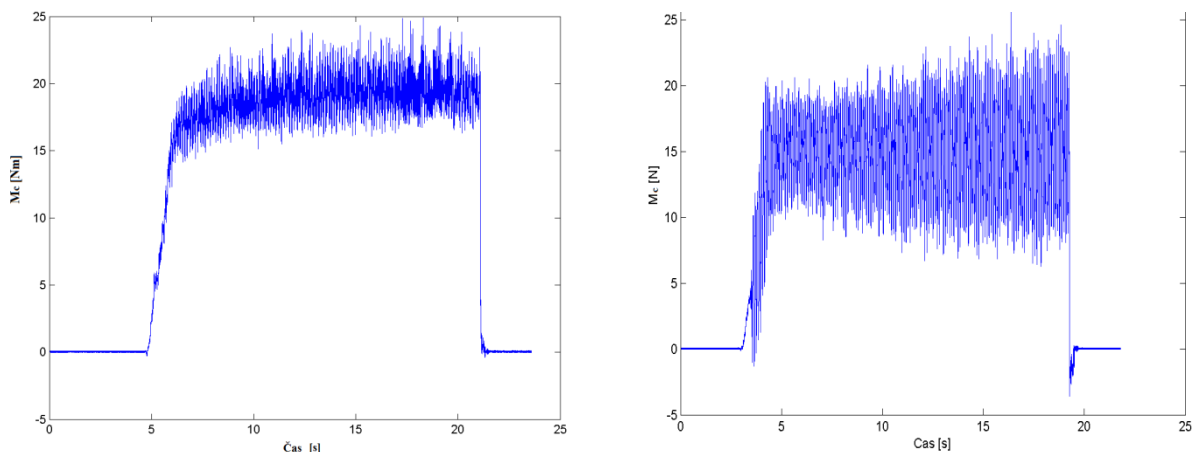
Graf 15 Porovnání složek řezné síly F_f – B1 a B2

Následující graf ukazuje rozdílnost velikosti řezné síly F_f mezi jednotlivými vrtáky. Jak je vidět na grafu i zdánlivě totožné nástroje nemají rovnocennou velikost řezné síly F_f .

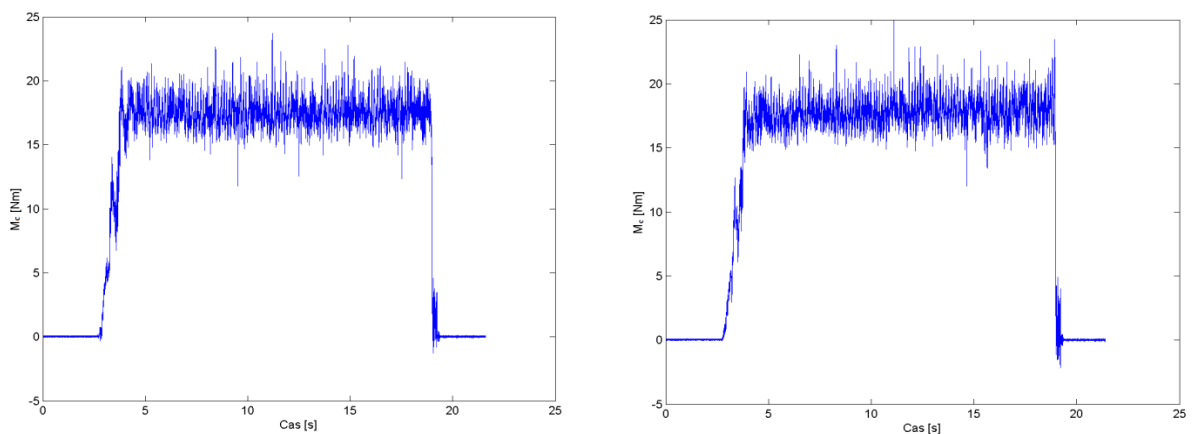
Graf 16 Porovnání složek řezné síly F_f u všech nástrojů

3.3.1.1 Kroučící moment

U kroučících momentů byl zopakován způsob s proložením grafu pěti hodnotami a z nich průměrná hodnota, jež reprezentuje jednotlivé měření. Na následujících grafech jsou vyobrazeny průběhy kroučícího momentu, které jsou svým průběhem specifické, nebo při nich došlo k dosažení nejvyššího kroučícího momentu u jednotlivých nástrojů. Ostatní průběhy měly konstantní charakter, který byl u každého nástroje velice podobný.

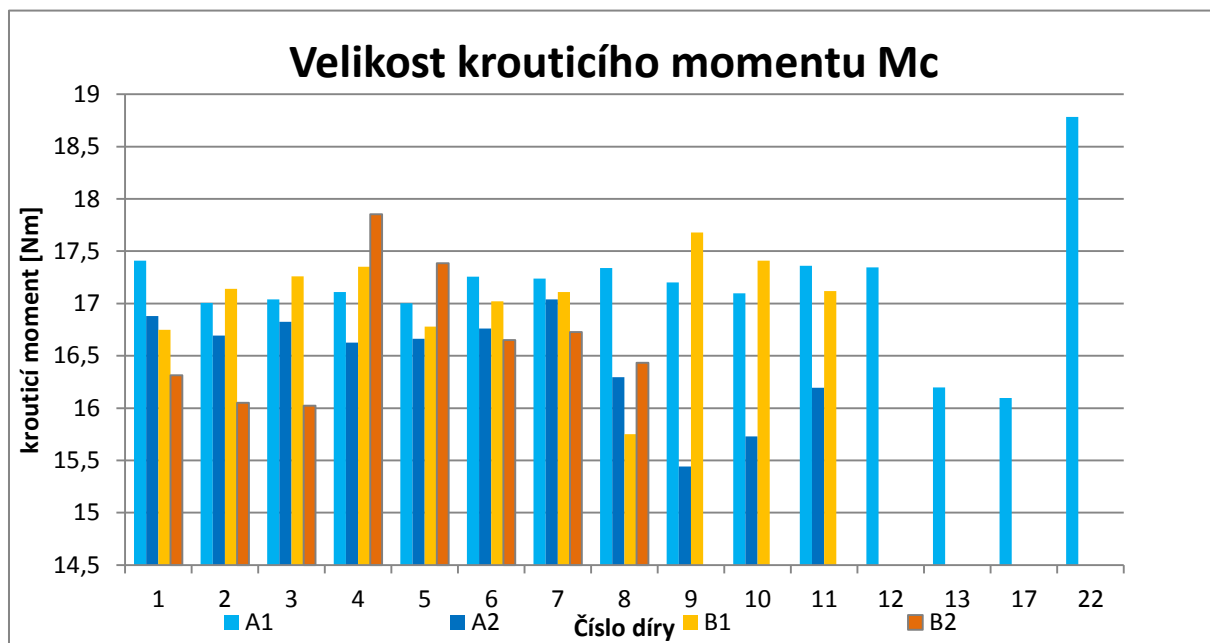


Graf 17 Mezní průběhy krouticích momentů u nástrojů A1 a A2



Graf 18 Mezní průběhy krouticích momentů u nástrojů B1 a B2

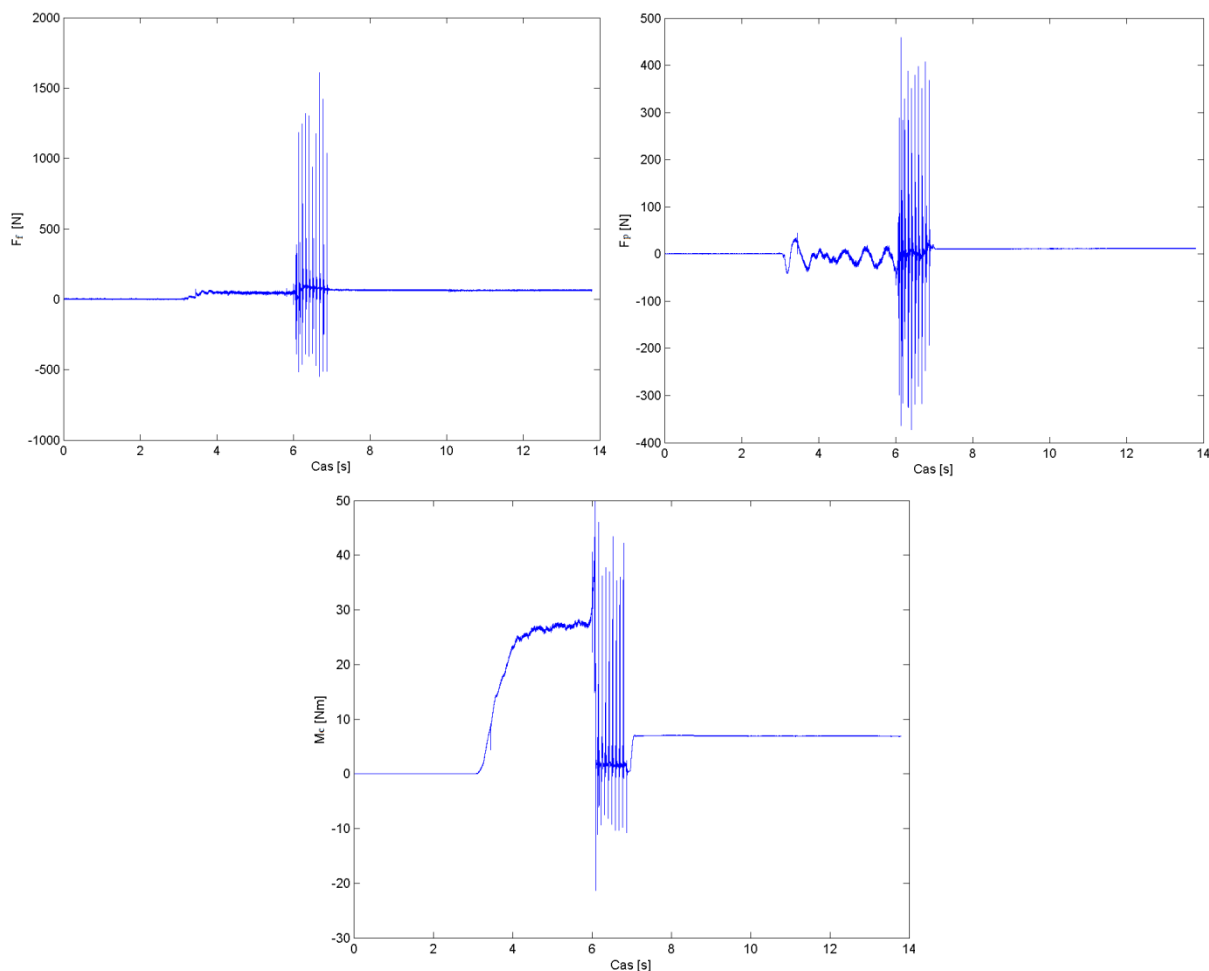
Na následujícím grafu jsou vyobrazeny všechny měřené krouticí momenty jednotlivých vrtacích nástrojů.



Graf 19 Porovnání velikostí krouticích momentů u všech nástrojů

3.3.2 Řezné síly při závitování

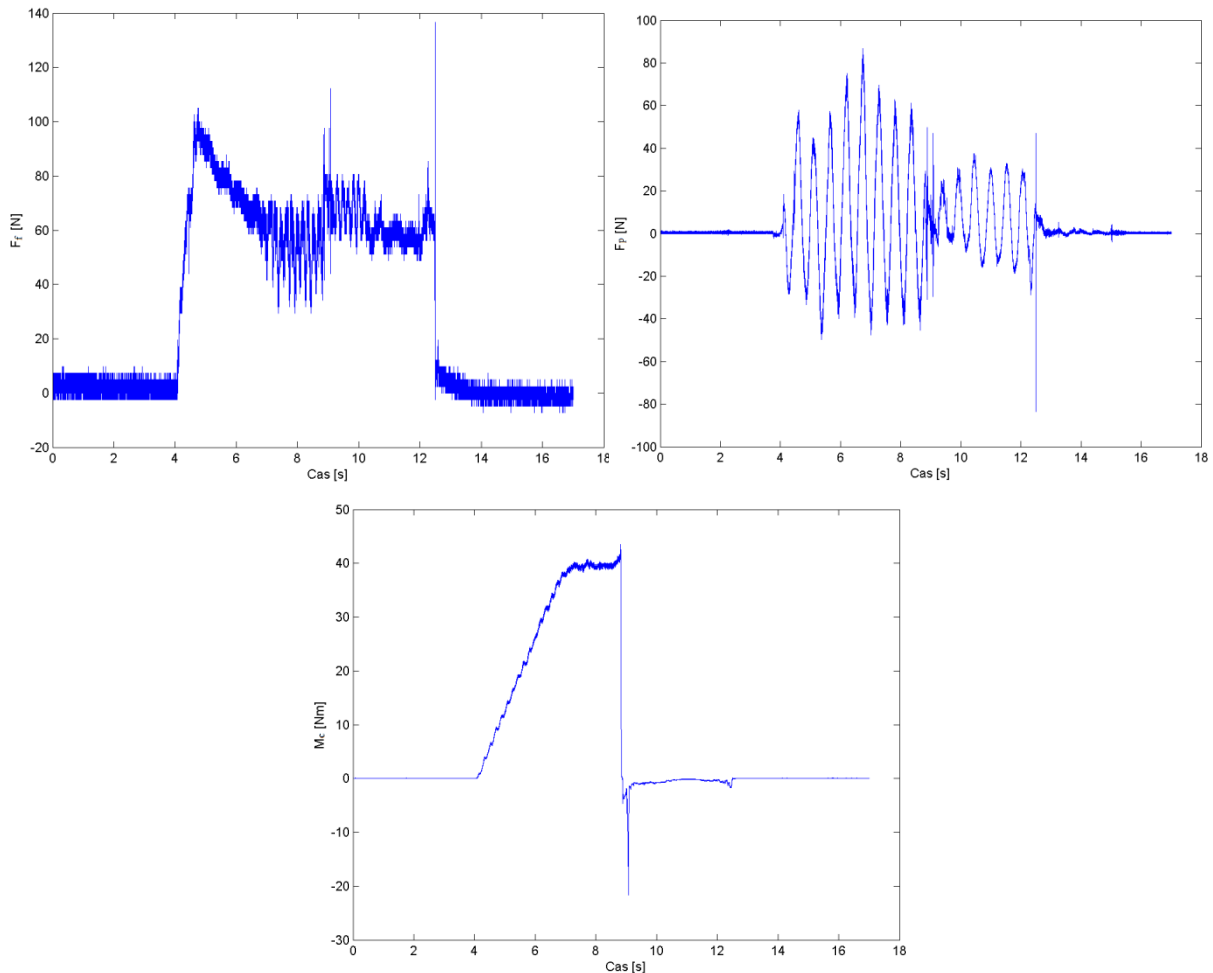
Při měření řezných sil a momentů při závitování byly průběhy jednotlivých sil diametrálně jiné nežli u vrtání, i jejich hodnoty byly řádově jiné, což není nic neobvyklého. Vzhledem tomu, že se jedná o úplně odlišný způsob obrábění. Při závitování závitníky série C byl pořízen pouze jeden záznam z důvodu, toho že při závitování C1 byl nejprve odhadnut a následně chybně měřící rozsah kroučícího momentu a při měření závitníku C2 došlo hned v první díře k zadření a tento náměr byl již zaznamenán. Jak je možné vidět na následujících grafech jednotlivých průběhů řezných sil a momentu. Například u grafu posuvové složky řezné síly je možné si všimnout, že velikost této síly byla prakticky konstantní po celou dobu řezání a to přibližně 100N až do doby, kdy se závitník v díře zadřel a následně momentová spojka začala přeskakovat. Nicméně tento efekt je naprosto zřetelný ze všech třech grafů, kdy jednotlivé síly a momenty dosahují vysokých hodnot a okamžitě nastává prudký pokles sil a momentů. Díky tomu, že se závitník v díře zadřel, není možné zde sledovat celý průběh procesu závitování a to hlavně reverzaci pohybu a tím změny sil a momentů.



Graf 20 Posuvová, pasivní síla a kroučící moment při závitování závitníkem C2

Při závitování pomocí závitníků série D bylo možné sledovat celý průběh procesu závitování a jsou zde jasně zřetelné mezníky jednotlivých pohybů na každém z grafů, nejvíce však na grafu kroučícího momentu. Vlivem téměř žádného opotřebení na závitnících se nijak radikálně jednotlivé grafy řezných sil a momentu neměnily, proto není nutné jednotlivé grafy porovnávat v sumárním grafu, kde by se hodnoty markantně nelišily. Například graf posuvové síly má vždy prudký náběh na hodnotu okolo 100N a poté postupný pokles k hodnotě

přibližně 60N. Zde následuje krátký konstantní průběh a na něj navazuje rychlý nárůst na hodnotu cca 80N a poté mírně klesá k hodnotě cca 60N, kde proces závitování končí a tím síla prudce spadne na nulovou hodnotu. Pasivní složka řezné síly má kmitající charakter a je zde jasně vidět, kdy dochází k zastavení vřetena následné reverzaci otáček.

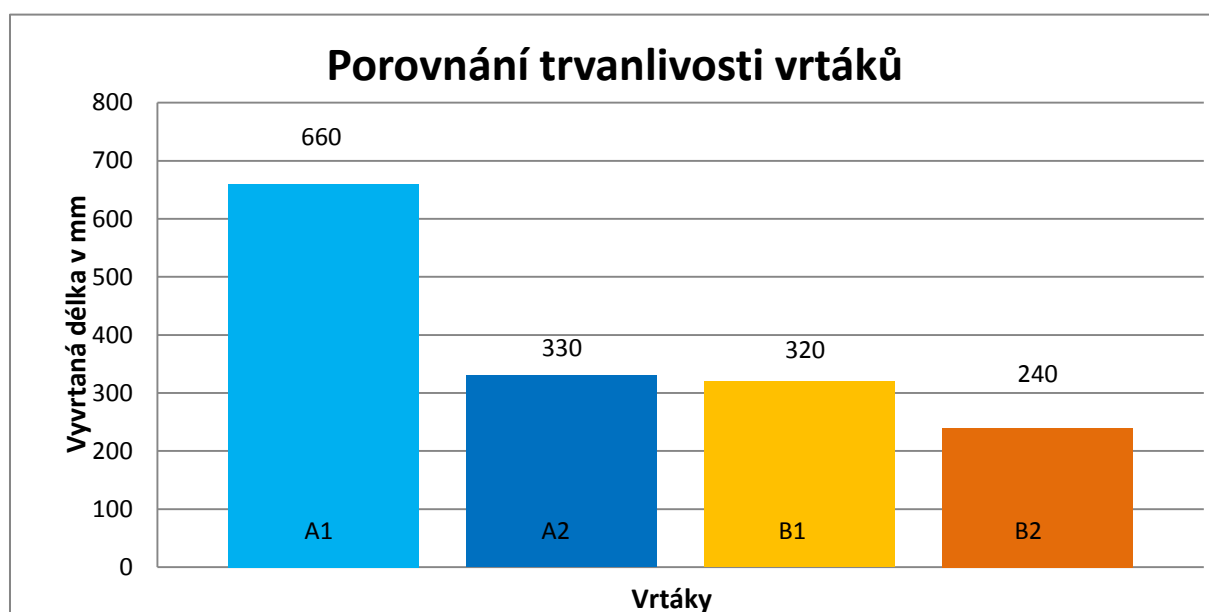


Graf 21 Posuvová, pasivní síla a krouticí moment při závitování závitníkem D1

3.4 Vyhodnocení trvanlivosti nástrojů

3.4.1 Trvanlivost vrtáků

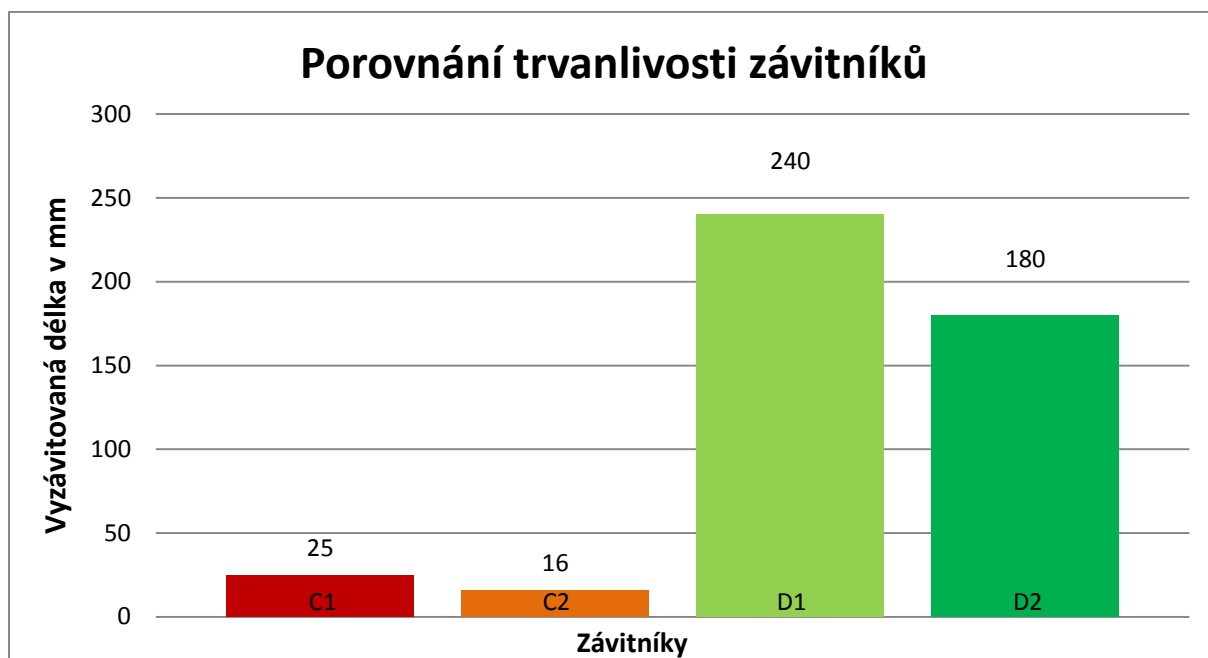
Aby bylo možné vhodně vyjádřit trvanlivost, bylo zvoleno jako hodnotící kritérium délka odvrtné díry. Poté bylo možné jednotlivé trvanlivosti porovnat a vynést do grafu. Vrták označený A1 dosáhl více než 1x vyšší trvanlivosti nežli jeho konkurent B1. Ovšem opakování s vrtákem od stejného výrobce A2 tento rapidní nárůst nepotvrdil. Ale i přesto, že jeho trvanlivost byla poloviční, lze se zde domnívat, že kdyby test neukončilo odštípnutí velké části povrchu vrtáku na příčném ostří, vrták by dosáhl podobné trvanlivosti jako A1. Vrták B1 vyvrtal 320mm, po kterých se vytvořil vrub na příčném ostří, a proto musel být test ukončen. Při opakování testu s vrtákem od stejného výrobce došlo k vytvoření vrubu na příčném ostří již při odvrtání 240mm, proto lze soudit, že tento jev zde není náhodný. Porovnání jednotlivých vrtáků je demonstrováno na následujícím grafu.



Graf 23 Porovnání trvanlivosti vrtáků

3.4.2 Trvanlivost závitníků

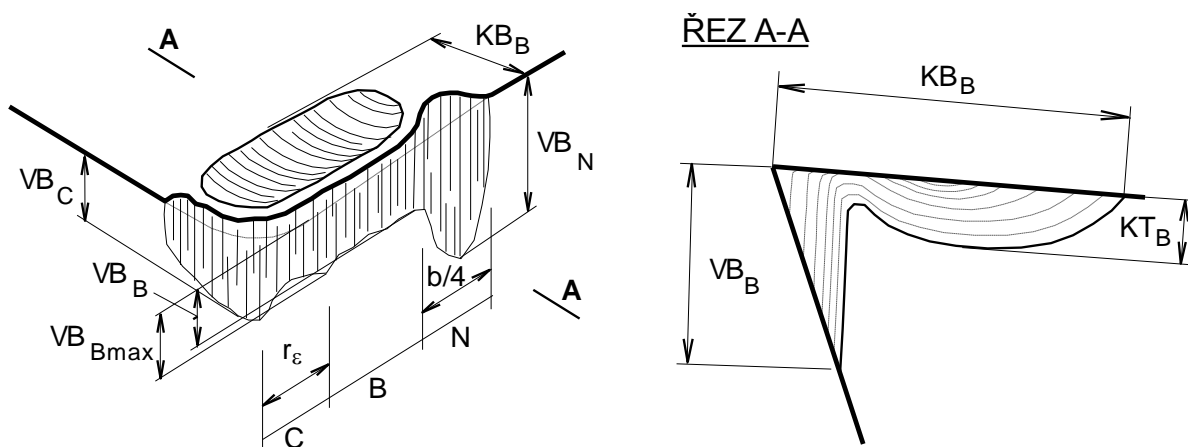
U závitování to bylo obdobné, kdy bylo zvoleno hodnotící kritérium délka vyzávitované díry a to vše následně vyneseno do grafu. Závitník C1 vyzávitoval první díru a ve druhé díře byl zadřen, což znamenalo konec testu s tímto závitníkem. Takže tento závitník v součtu vytvořil přibližně 25mm závitu. Při opakovacím testu se potvrdilo, že to nebyl náhodný jev, když se i druhý závitník zadřel a to hned v první díře po ujetí cca 16mm. Při porovnání s konkurenčním nástrojem je tato trvanlivost hrozivě nízká. První konkurenční nástroj vyzávitoval 12 děr s hloubkou závitu 20mm. Po těchto 240mm byl test zastaven, ale ne kvůli tomu, že by závitník byl na hranici své trvanlivosti, ale protože každý závitník byl spjat s určitým vrtákem a tento už nebyl schopen dále pokračovat. Po vyzávitování 240mm nebylo na závitníku pozorováno opotřebení. To znamená, že závitník D1 má více než 10krát vyšší trvanlivost nežli jeho konkurent závitník C. Při opakovacím testu došlo ke stejné situaci, že vrták, jenž byl spjatý se závitníkem, nemohl pokračovat, tak byl test ukončen na hranici 180 mm. Toto opakování potvrzuje vysokou trvanlivost závitníků D.



Graf 24 Porovnání trvanlivosti závitníků

3.5 Vyhodnocení opotřebení

Pro vyhodnocení jednotlivých druhů opotřebení je vhodné uvádět opotřebení podle normy, která definuje všechny aspekty, jež jsou nutné pro správnou definici polohy a velikosti opotřebení. Následující obrázek definuje značení opotřebení podle normy. Pro rychlé hodnocení opotřebení nástrojů byl použit dílenský mikroskop a pro detailnější hodnocení byl používán opticko-skenovací mikroskop IFM G4.

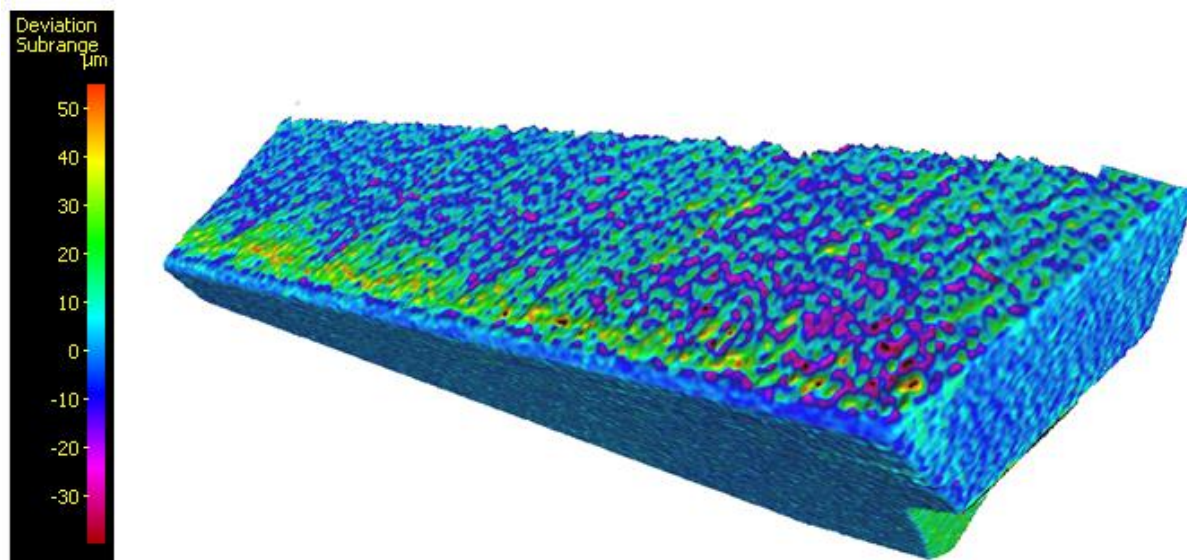


Obr. 45 Značení opotřebení dle normy [5]

3.5.1 Vyhodnocení opotřebení vrtáku A1 a A2

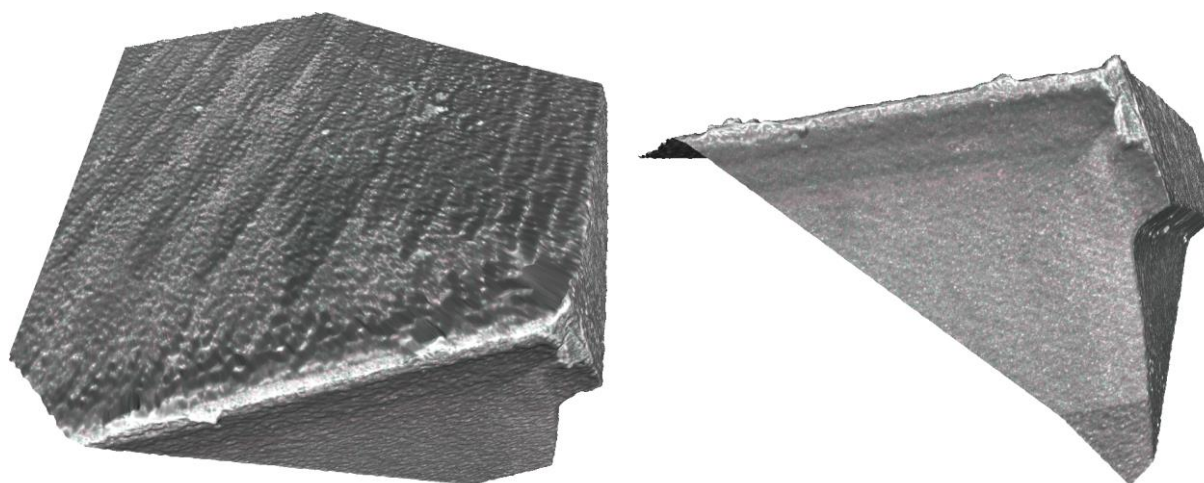
Vyhodnocení opotřebení probíhalo na několik etap. Nejprve se opotřebení kontrovalo po první díře, kdy došlo k velmi rovnoměrnému opotřebení s velmi malou hodnotou. Toto opotřebení se výrazně neměnilo do 330mm, kdy byl nástroj přeskenován a byla provedena diferenční analýza. Výsledek z diferenční analýzy je vidět na následujícím obrázku. Je zde

velmi dobře vidět, kde se materiál na nástroj nalepuje a kde se materiál nástroje opotřebovává a odchází s třískou. V barevné škále je jasně vidět břit hlavního i vedlejšího ostří je i po 330mm bez výrazného opotřebení. Zelenou barvou je vyznačen materiál, který je zde navíc oproti základnímu břitu a tak se jedná o nárůstek. Červenou barvou jsou vyznačena místa, kde materiál nástroje oproti základnímu břitu chybí, což znamená, že zde došlo výraznějšímu opotřebení na čele nástroje, ale jedná se zde o opotřebení v řádu několika setin milimetru.



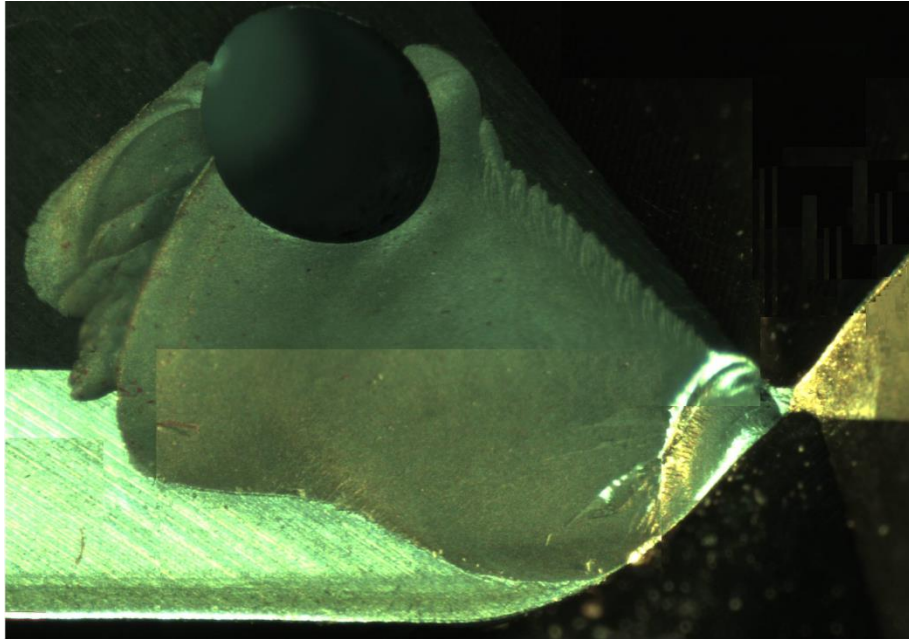
Obr. 46 Diferenční analýza – 330mm

Následně se pokračovalo v testování, kdy bylo opotřebení kontrolováno na dílenském mikroskopu. Během testování se velikost a ani druh opotřebení výrazně neměnily, samozřejmostí byl pomalý lineární růst opotřebení se zvyšujícím se počtem odvrtných milimetrů. Při vrtání 22 díry byla zaznamenána změna řezných sil, a proto byl nástroj zkontrolován na dílenském mikroskopu, kde byl zjištěn vrub na špičce nástroje a kvůli tomu musel být test ukončen. Na následujícím obrázku je vidět sken z IFM G4, kde je zřejmý vrub na špičce nástroje. Na pravém obrázku je velmi dobře vidět rozsáhlost vrubu, která měla velikost VBC = 316 µm. Na tomto obrázku je možné si všimnout i nárůstků, které jasně převyšují břit.



Obr. 47 Opotřebení špičky po 660mm

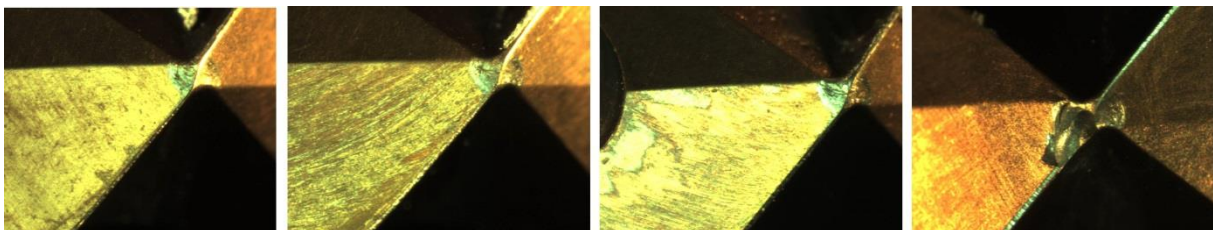
Při hodnocení opotřebení druhého nástroje byl průběh téměř totožný, ovšem po vrtání 7 díry, což bylo 210mm, byl na dílenském mikroskopu zaznamenán vrub na hlavním ostří na pravém břitu. Tento vrub měl velikost $VB_{max} = 73 \mu\text{m}$, jiné opotřebení vrták nevykazoval. Při vrtání dalších děr se tento vrub rapidně nezvětšoval. Kdežto při vrtání 11 díry bylo z měření řezných sil jasné, že se něco v procesu změnilo. Proto byl vrták ihned zkontrolován na mikroskopu, kde byl konstatován konec testu díky náhlému vyštípnutí velké části vrtáku. Toto vyštípnutí nebylo iniciováno z předešlého vrubu, neboť ten je vytvořen na pravém břitu nástroje. Iniciátorem vyštípnutí byl s největší pravděpodobností vznik vrubu na příčném ostří. Vyštípnutí je možné si prohlédnout na následujícím obrázku.



Obr. 48 Vyštípnutí levého břitu A2

3.5.2 Vyhodnocení opotřebení vrtáku B1 a B2

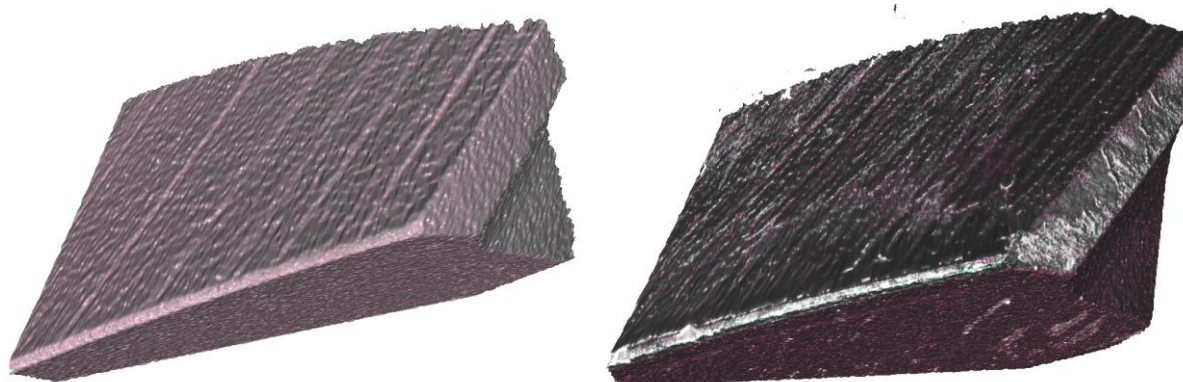
Při hodnocení vrtáků série B bylo použito stejné metodiky jako u série A. Po zhotovení první díry bylo měření provedeno na IFM G4, ale nebylo zde zjištěno žádné výrazné opotřebení a tak hodnocení opotřebení bylo kontrolováno na dílenském mikroskopu. V průběhu testování se opotřebení zvyšovalo lineárně a velmi často se tvořil nárůstek nejprve na hlavním ostří a posléze i na vedlejším ostří. Hrot nástroje se postupem času stával nejvíce opotřebeným místem na vrtáku, jak je vidět na následujícím obrázku.



Obr. 49 Postup opotřebení hrotu nástroje při 1., 5., 8., 11. díře

Vrub, který byl vytvořen při 11 díře, měl hodnotu $VB_{max} = 356 \mu\text{m}$. Díky tomuto faktu byl test ukončen a nástroj byl detailněji proměřen. Na následujícím obrázku je porovnání nového nástroje s nástrojem po odvrtání 320mm. Při porovnání je zřejmé, že opotřebení na hlavním

ostří bylo minimální. Je možné zde spatřit dva malé vruby, ale jinak je hlavní ostří opotřebeno rovnoměrně a minimálním způsobem. Na vedlejším ostří je naprosto zřejmé nalepení obráběného materiálu ve formě nárůstku.



Obr. 50 Porovnání nového nástroje a po ujetí 320mm

Nástroj B2 měl totožný průběh opotřebení, kdy bylo opotřebení minimální na hlavním a vedlejším ostří, ale na hrotu nástroje se stejným způsobem inicioval problém, který vygradoval ve formě vrubu. Jednalo se o shodný průběh jako u nástroje B1, pouze s tím, že vrub se vytvořil o 3 díry dříve, takže test byl ukončen po 8 vyvrtaných dírách čili 240 mm.

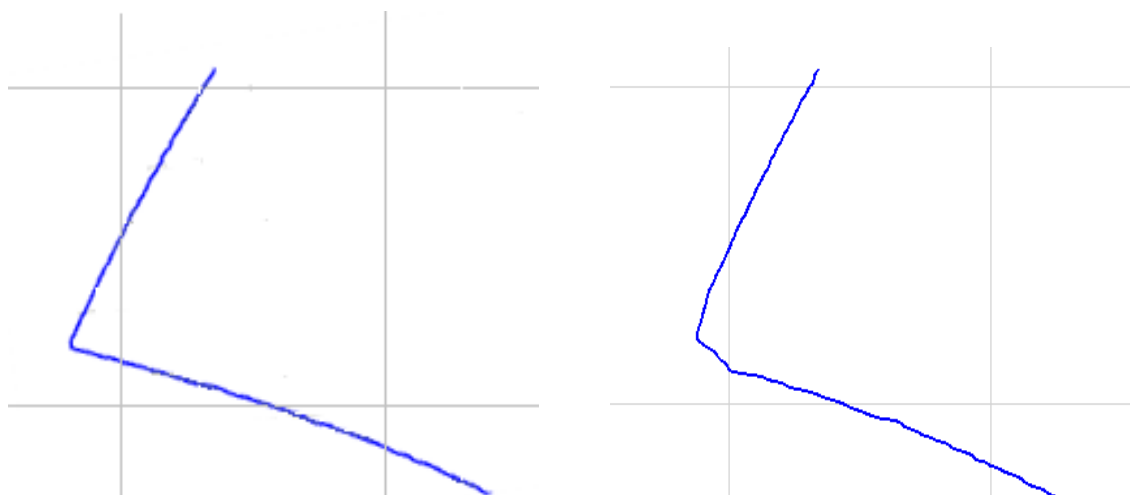
3.5.3 Vyhodnocení opotřebení závitníku C1 a C2

Závitník byl po první vyzávitované díře zkontrolován na dílenském mikroskopu, kde bylo diagnostikováno velké opotřebení, proto byl následně naskenován na IFM G4. Na tomto zařízení byl vysloven jasný verdikt, jenž zněl: Na břitu po ujetí vzdálenosti 20 mm je evidentní výmol na čele ovlivňující i úbytek hřbetní části. Délka výmolu od plochy hřbetu KB = 167 μ m a hloubka výmolu KT = 18 μ m. Opotřebení hřbetu VBC = 158 μ m. Bohužel při závitování byl závitník v díře zadřen, proto nemohlo být provedeno další měření.



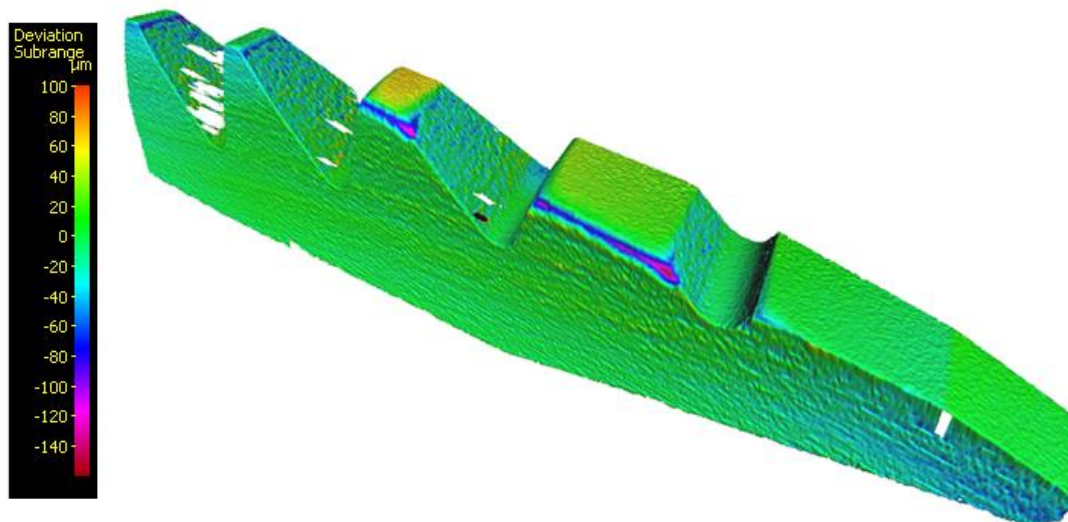
Obr. 51 Sken závitníku C1 – 20mm

Pro názornost úbytku materiálu byl proveden řez na druhém řezacím zubu závitníku nejprve na novém a poté na opotřebeném po první díře. Je zde naprosto jasný výmol na čele, který je naprosto zřejmý i bez překrytí jednotlivých řezů.



Obr. 52 Porovnání řezů na 2 zubu před a po opotřebení

Byla vytvořena diferenční analýza, na které je jasně vidět, kde se nejmarkantněji opotřebovávají jednotlivé řezací zuby závitníku.

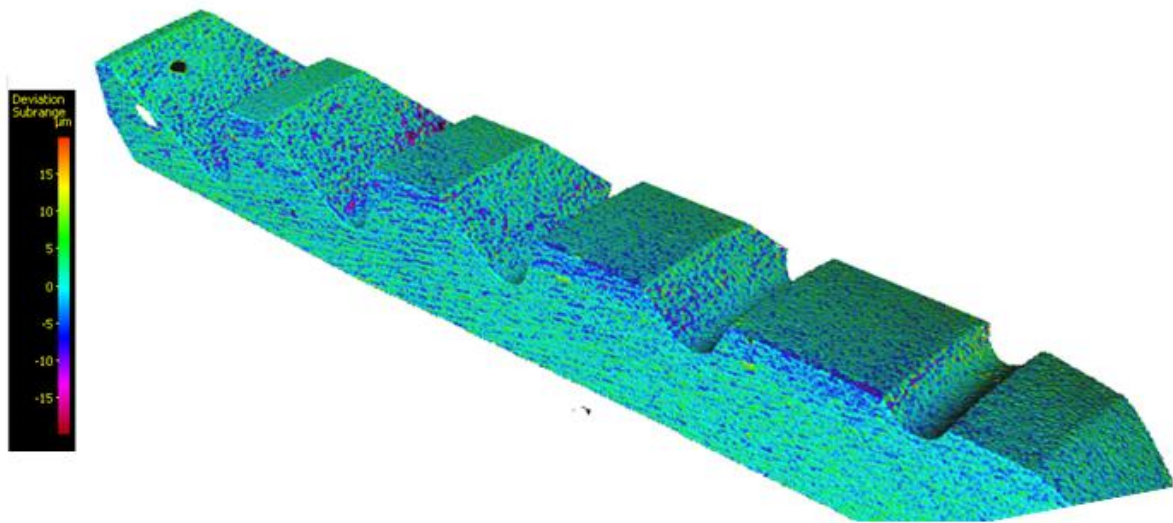


Obr. 53 Diferenční analýza závitníku C1 – 20mm

Bohužel díky skutečnosti, že druhý závitník byl zadřen hned v první díře, nejsou naměřeny žádné záznamy s opotřebením, neboť při pokusech dostat závitník z díry ven byl závitník poškozen.

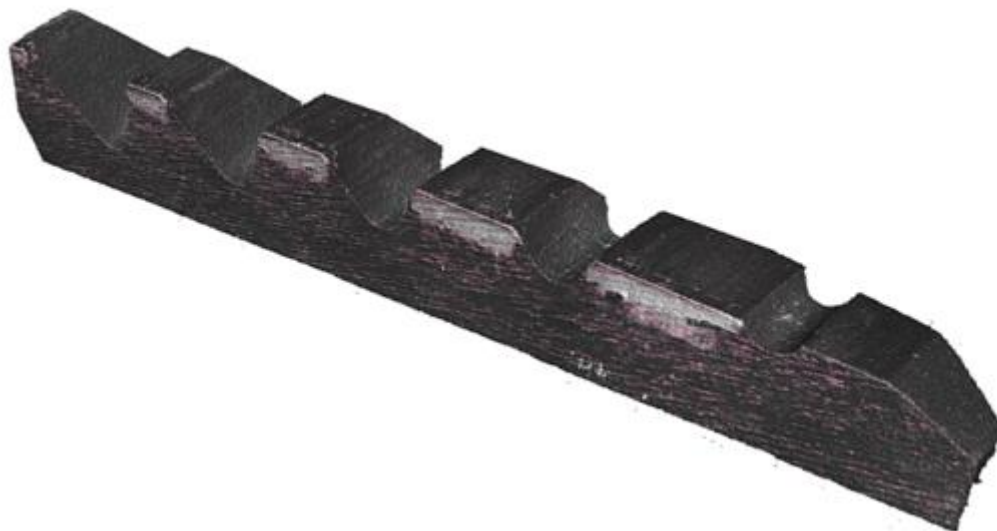
3.5.4 Vyhodnocení opotřebení závitníku D1 a D2

Vlivem zkušeností se závitníky série C bylo měření taktéž provedeno ihned po vyzávitování první díry, kdy se očekávalo opět velké opotřebení, ovšem při měření bylo diagnostikování opotřebení takřka žádné. Jak je vidět na diferenční analýze, která byla následně provedena a je vyobrazena na následujícím obrázku. Jedná se o diferenční analýzu, jež ukazuje opotřebení po vyzávitování 20 mm, je zde jasně vidět, že zde opotřebení opravdu není téměř žádné.



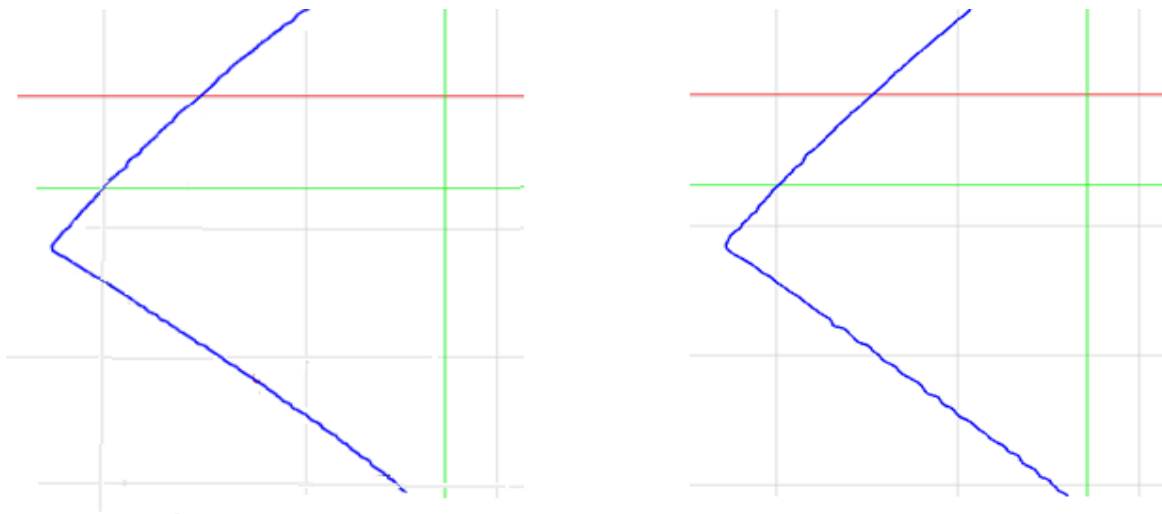
Obr. 54 Diferenční analýza závitníku D1 – 20mm

Kontrola opotřebení tedy byla prováděna ze začátku testu po každé díře minimálně na dílenském mikroskopu. Kupodivu po vyzávitování 12 děr se na závitníku netvořilo opotřebení téměř žádné, ale test byl ukončen z důvodu selhání vrtáku spjatého s tímto závitníkem. Na následujícím obrázku je vidět sken opotřebení po 240mm. Pomyslné opotřebení se tvoří výhradně na čele nástroje. Nikde není zaznamenán žádný vrub ani výmol. Jedná se pouze o opotřebení způsobené otěrem třísky o čelo nástroje.



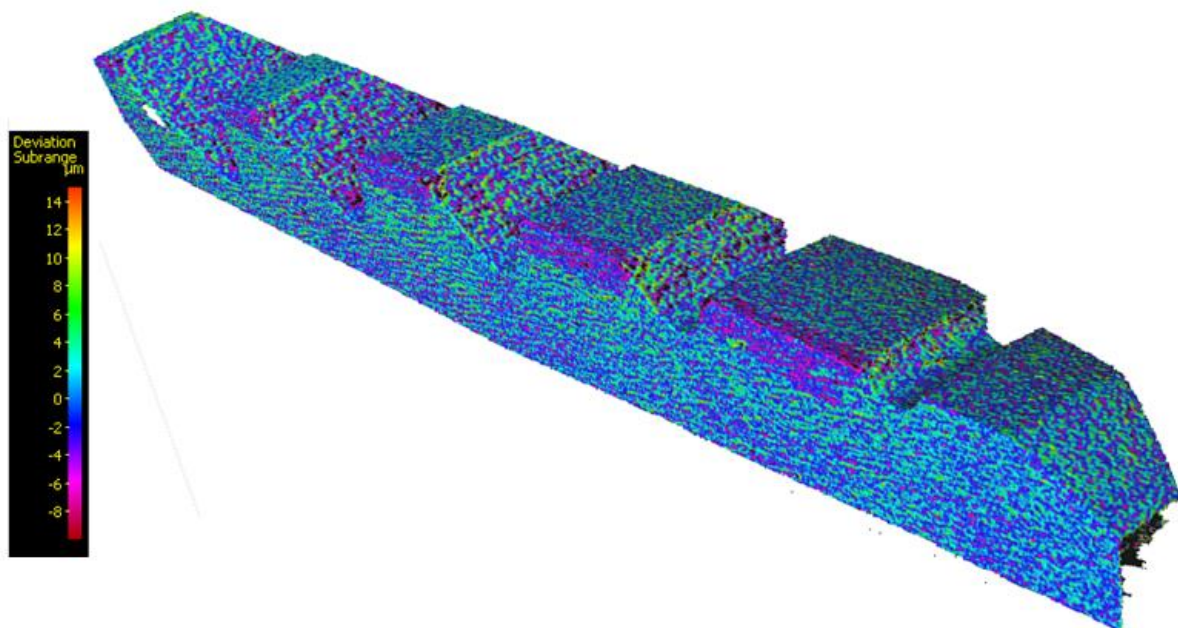
Obr. 55 Sken závitníku D1 – 240mm

Opět bylo provedeno porovnání řezů na druhém řezacím zubu nového a opotřebeného nástroje. I tyto řezy jsou důkazem, že zde opotřebení není téměř žádné. Opět bylo bezpředmětné překládat přes sebe tyto řezy, neboť křivky by byly více méně totožné.



Obr. 56 Porovnání řezů na 2 zuby před a po opotřebení

Při vytvoření diferenční analýzy bylo potřeba nastavit velmi malý rozsah opotřebení, neboť by taktéž nebylo zřejmé, zda tu vůbec nějaké opotřebení nastává. Fialová barva reprezentuje úbytek materiálu o velikosti 8 μm . Úbytek na čele nástroje se pohybuje okolo 6 μm .



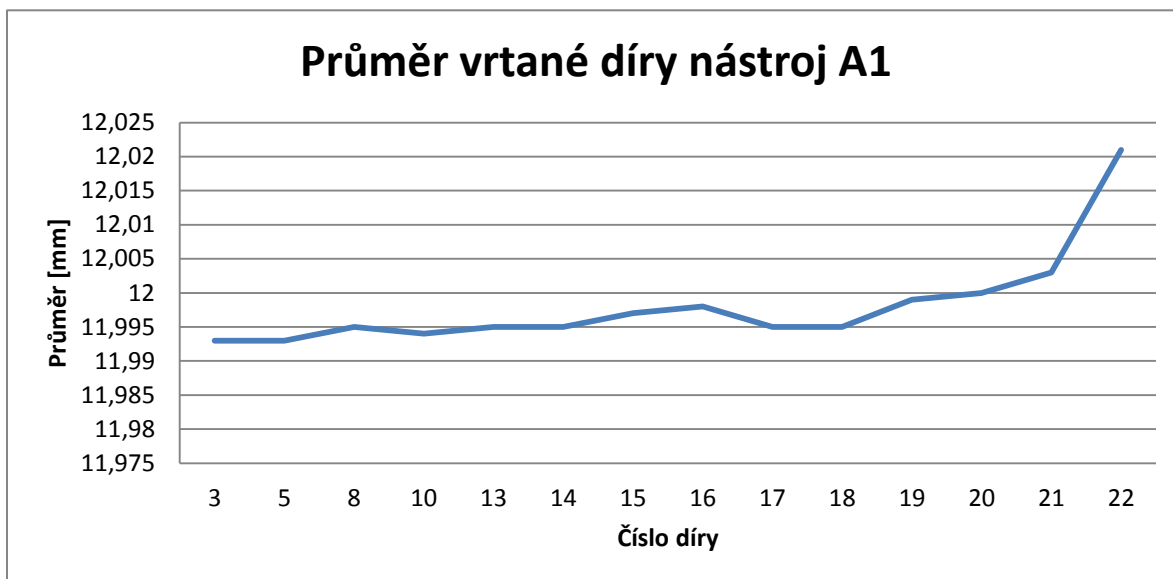
Obr. 57 Diferenční analýza závitníku D1 – 240mm

Druhý nástroj naprosto kopíroval průběh opotřebení prvního nástroje, ale opět musel být test ukončen kvůli vrtáku. Proto závitník vytvořil 9 děr čili 180 mm závitu. Díky absenci opotřebení není nutné zde uvádět další totožné obrázky.

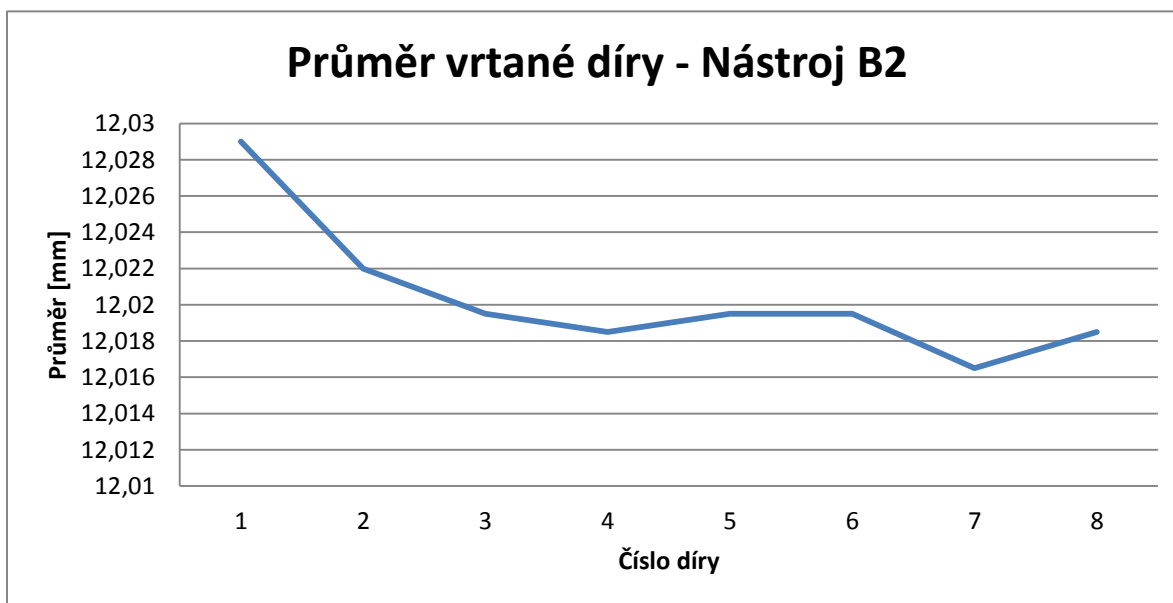
3.6 Průměr vrtaných děr

Pro vyhodnocení průměru děr byl použit třídotekový mikrometr. Při sběru dat bylo stanoveno, že není nutné měřit všechny vrtané díry, ale pouze vybrané díry. Výběr děr byl zvolen podle průběhu obrábění. Vždy byla změřena první díra, jež byla vyrobena jednotlivými vrtáky. Poté

byly zvoleny dva vrtáky, u kterých byly proměřeny jednotlivé díry. Z těchto náměrů byly vytvořeny grafy, ze kterých je zřejmé, že oba konkurenční vrtáky mají rozdílný průběh velikosti díry v závislosti na počtu vyvrtaných děr.

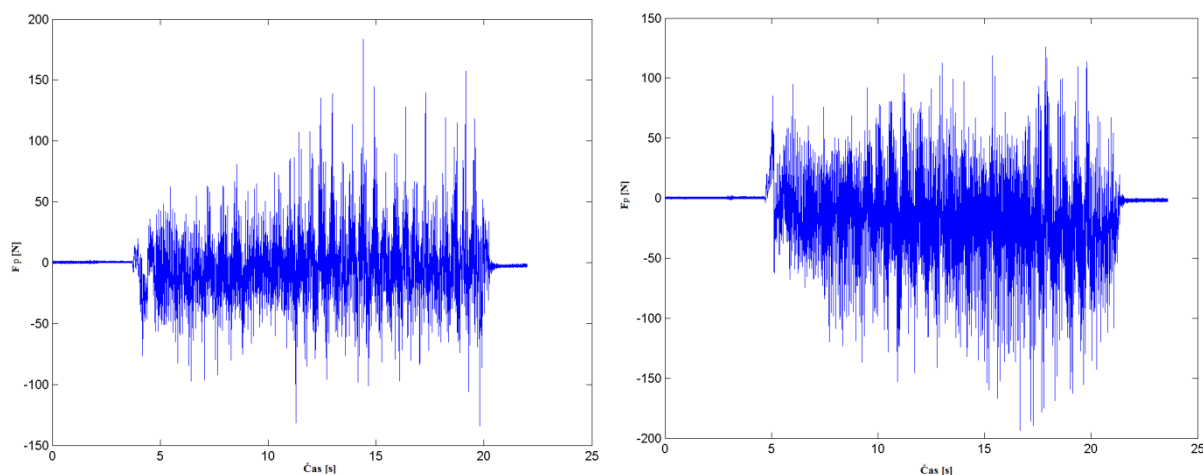


Graf 25 Průměr vrtané díry – Nástroj A1



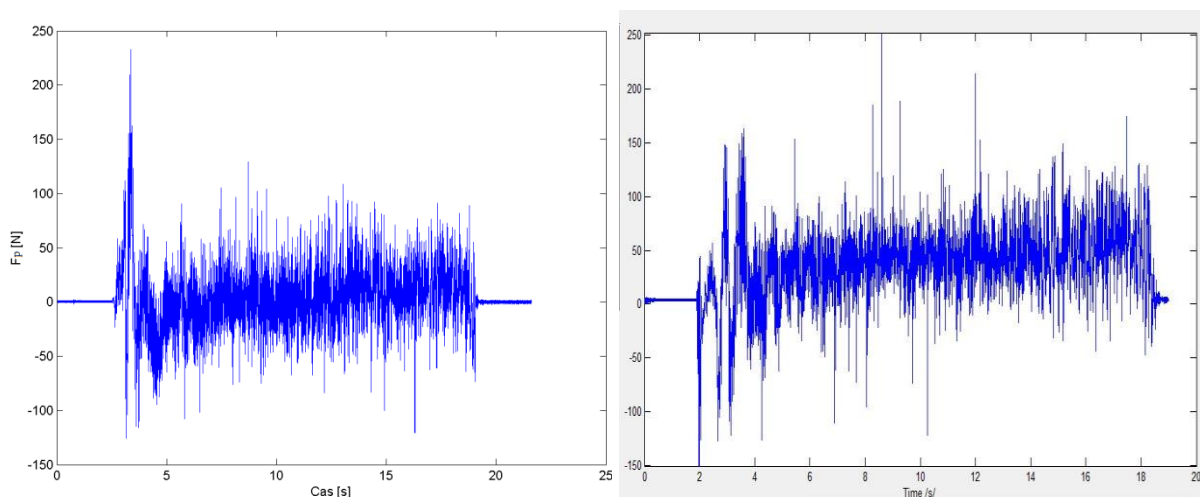
Graf 26 Průměr vrtané díry – Nástroj B2

Na průběh velikosti průměru měla největší vliv pasivní složka řezné síly F_p . Následující grafy pasivní složky řezné síly F_p ukazují změnu průběhu sil při vrtání 17. díry a 22. díry nástrojem A1. Pasivní složky řezné síly u 17. díry jsou poměrně v úzkém pásmu a to má za následek malé odchýlení od požadovaného průměru. Kdežto při vrtání 22. díry je rozptýl pasivní složky řezné síly výrazně větší a díky tomu došlo ke zvětšení průměru vrtané díry cca o 25 μ m. Na takovou změnu průměru mohl mít vliv i nárůstek, ale protože při měření nebyl zaznamenán, tak hlavním důvodem změny velikosti průměrů byl vliv pasivní složky řezné síly.



Graf 27 Pasivní složka řezné síly F_p – nástroj A1 17. a 22. díra

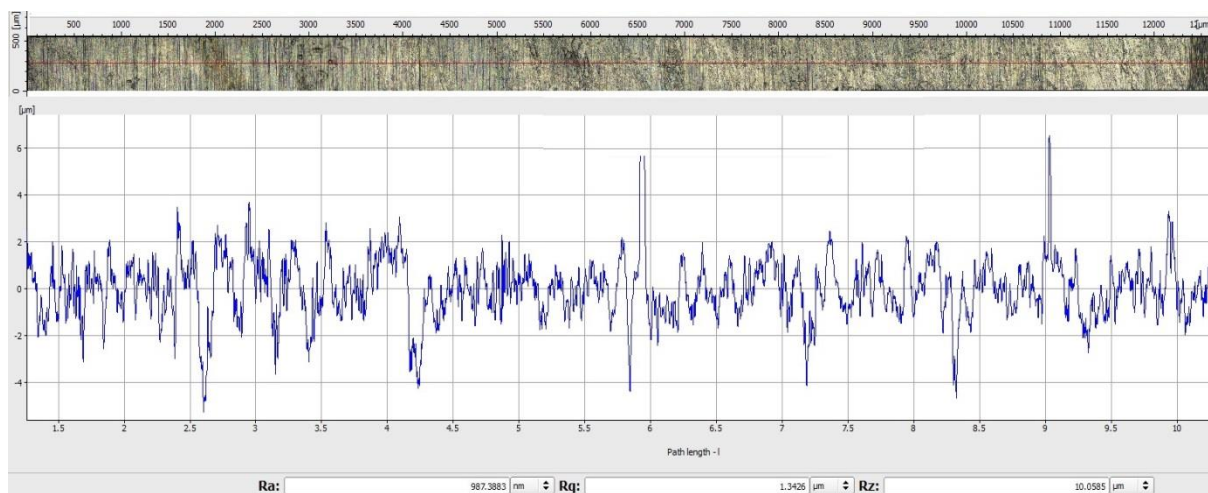
U konkurenčního nástroje byl průběh opačný. Není zde tak rapidní rozdíl mezi pasivními složkami 1. a 7. díry, neboť rozdíl v průměrech byl pouze cca 12 μm , což je polovina oproti předešlému případu. Tento rozdíl v průměrech mohl být také způsobený opotřebením nástroje.



Graf 28 Pasivní složka řezné síly F_p – nástroj B2 1 a 7 díra

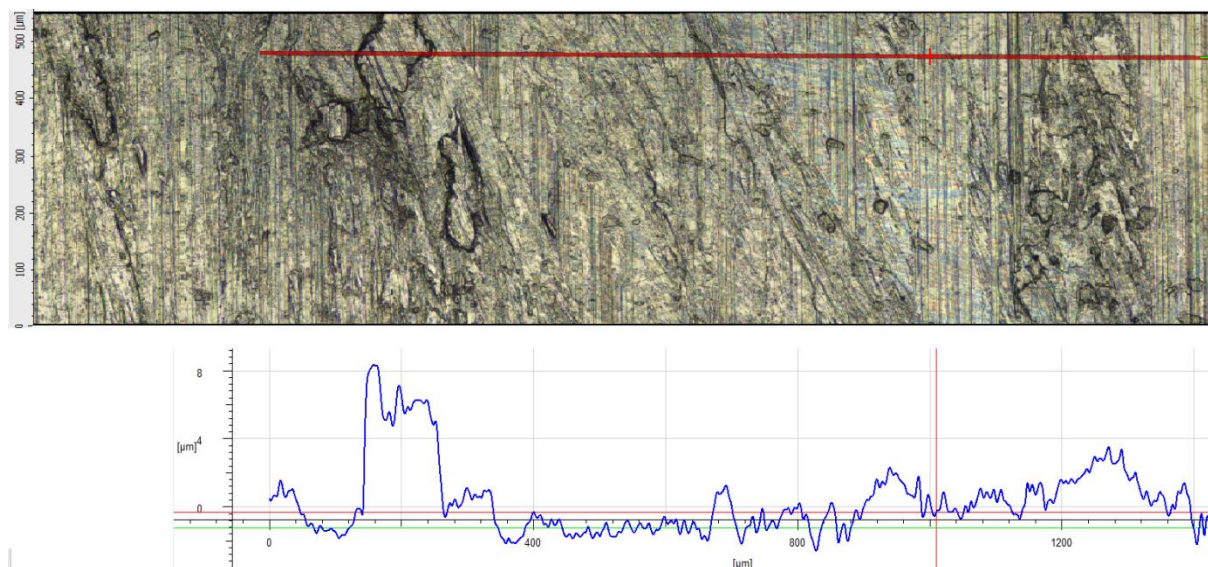
3.7 Vyhodnocení drsnosti povrchu

Pro vyhodnocení drsnosti byl použit opticko-skenovací mikroskop IFM G4, kde byly naskenovány určité části povrchu díry a následně na těchto skenech byla vyhodnocena drsnost povrchu. Parametry drsnosti byly hodnoceny R_a , R_q a R_t . Tyto parametry byly automaticky vyhodnoceny pomocí softwaru obsahující opticko-skenovací mikroskop. Na následujícím obrázku je pro názornost vyobrazen výsledek z měření drsnosti, kdy v horní části je naskenovaný povrch díry. Měřená oblast je vymezena červenou čarou. Pod naskenovaným povrchem se nachází vyhodnocení drsnosti ve formě grafu. A pod tímto vyhodnocením jsou vyhodnoceny parametry drsnosti R_a , R_q a R_t .



Obr. 58 Vyhodnocení drsnosti povrchu

Pro detailnější zobrazení byla zvolena menší měřená oblast. Pro hodnocení drsnosti povrchu, tato oblast se opět vyznačena na obrázku červenou čarou. Na následujícím obrázku je možné vidět reliéf povrchu, kdy v levé části je velmi zřetelně vidět nárůstek v řádu několika mikrometrů. Na další části měřeného úseku je možné vidět standardní povrch vytvořený nástrojem.



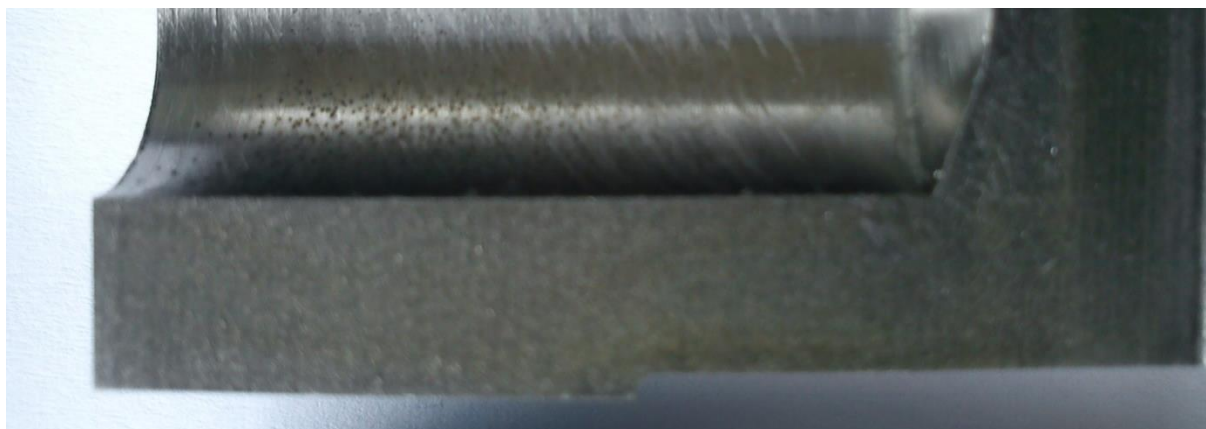
Obr. 59 Vyhodnocení drsnosti první díry nástrojem A1 - detail

Při hodnocení drsnosti první a jedenácté díry vytvořené nástrojem A1, byla naměřena drsnost povrchu, viz následující tabulka

Drsnost	1. díra	11. díra	Jednotky
Ra	1.0451	0.915	μm
Rq	1.62	1.64	μm
Rt	14.4974	23.0286	μm

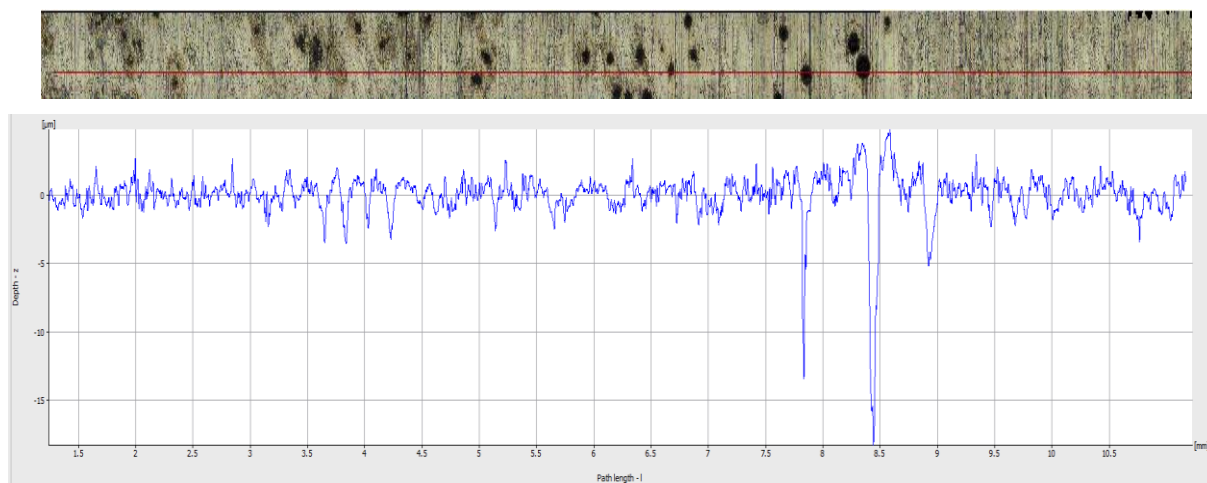
Tab. 10 Hodnoty drsnosti první díry nástrojem A1

Během hodnocení drsnosti povrchu bylo zjištěno, že povrch díry v některých válečcích vykazuje určité odlišnosti od ostatních. Odlišnosti spočívají v tom, že na stěně vyvrtané díry byly zjištěny černé tečky, jež jsou vidět na následujícím obrázku.



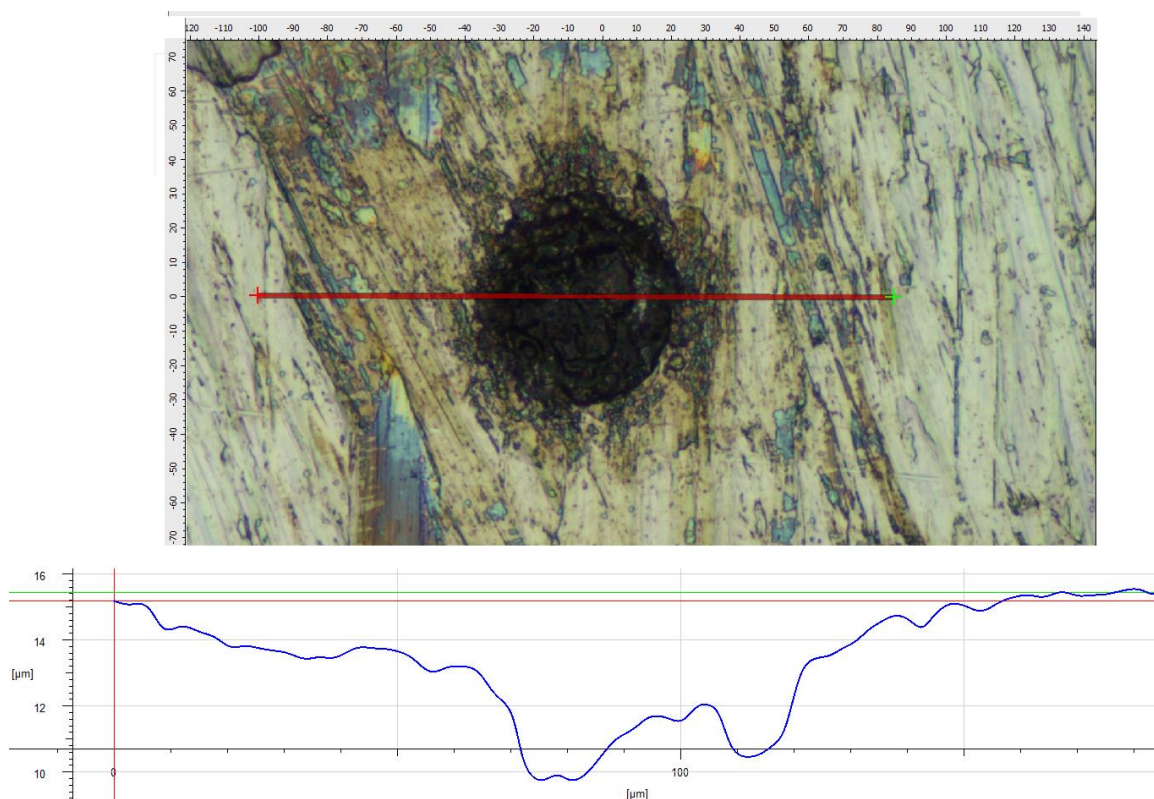
Obr. 60 Drsnost povrchu – černé tečky

V prvotním zkoumání se černé tečky jeví jako rez. Ovšem po detailnějším zkoumání byla tato možnost vyloučena, neboť Inconel 718 by měl být korozivzdorný. Proto bylo zapotřebí dále zjistit více informací pro možné vyhodnocení tohoto jevu. Na následujícím obrázku je vidět vyhodnocení drsnosti povrchu, kdy skrze černé tečky prochází měřená oblast. Z grafu drsnosti povrchu je jasně vidět, že v místě černých teček se nachází prohlubeň o velikosti až 20 mikrometrů.



Obr. 61 Vyhodnocení drsnosti povrchu 11díry nástrojem A1

Pro ještě detailnější zkoumání byla podrobně naskenována jedna černá díra a na ní provedeno vyhodnocení drsnosti povrchu. Toto vyhodnocení je vidět na následujícím obrázku. Z grafu drsnosti povrchu černé díry je zřejmé, že nemá klasický průběh prohlubně, ale uprostřed je značný výstupek.

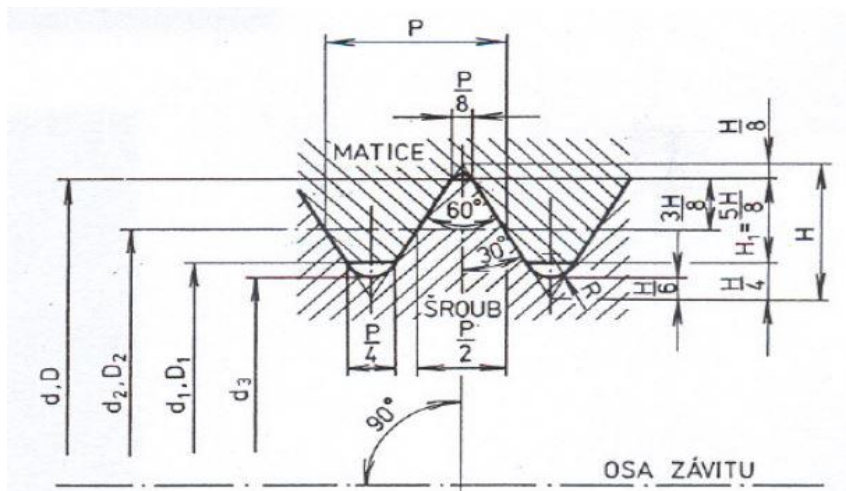


Obr. 62 Černá díra

S největší pravděpodobností se jedná o vměstky, které byly při vrtání vytrženy z povrchu díry. Tento fenomén byl pozorován pouze u materiálu, který byl pro testování připraven ve formě válečků. U druhého materiálu, který byl dodán ve formě kruhových desek, se tyto problémy nevyskytly.

3.8 Vyhodnocení přesnosti závitů

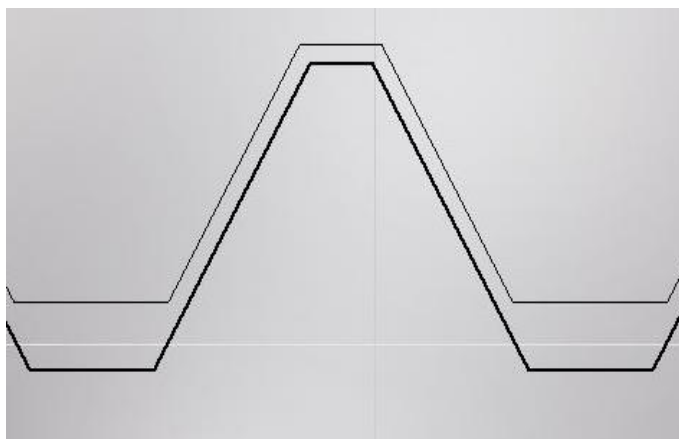
Pro vyhodnocení přesnosti závitů je nejprve nutné správně definovat jednotlivé rozměry závitů podle normy. Tyto jednotlivé rozměry jsou vyobrazeny v následujícím obrázku, jenž je vyjmutý z normy pro měření závitů.



Značka	Význam značky
P	Rozteč závitu
H	Výška základního trojúhelníku
D, d	Jmenovitý průměr závitu
D1, d1, d3	Malý průměr závitu
D2, d2	Střední průměr závitu
R	Poloměr zaoblení dna

Tab. 11 Značení rozměrů závitu [73]

Jako u většiny měřených rozměrů, tak i u měření závitů jsou stanovena toleranční pole, do kterých jsou závity rozřazeny podle velikosti odchylek. Pro toto vyhodnocení bylo stanoveno mezní toleranční pole H7. Na následujícím schématu je silnou čarou vyznačen jmenovitý profil závitu a slabou čarou je vyznačena horní mezní tolerance pro toleranční pole H7.



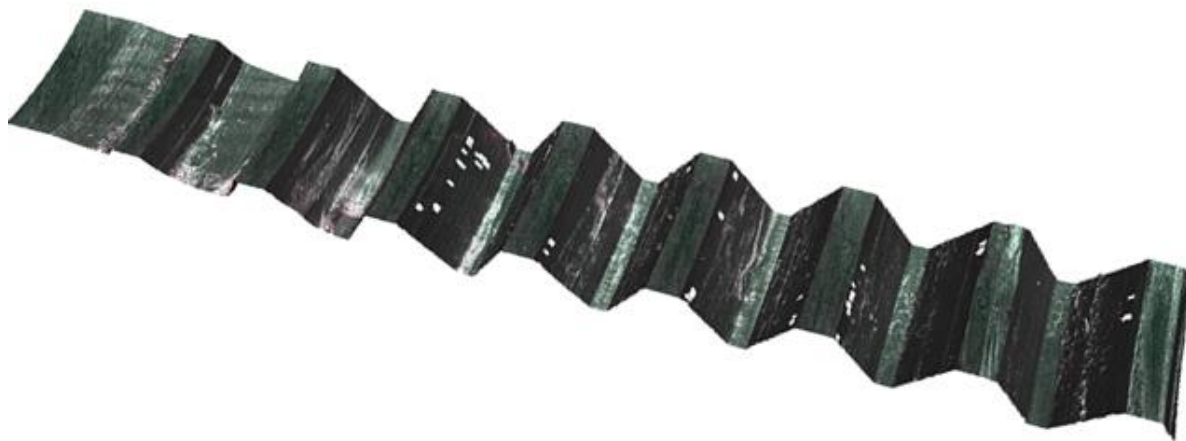
Obr. 64 Profil závitu s vyznačenou horní mezní tolerance H7

Aby mohl být proměřen vnitřní závit, musel být váleček podélně rozříznut přes osu válečku pomocí elektroerozivního řezání, aby byl profil závitu vidět. Rozříznutý váleček je vyobrazen na následujícím obrázku.

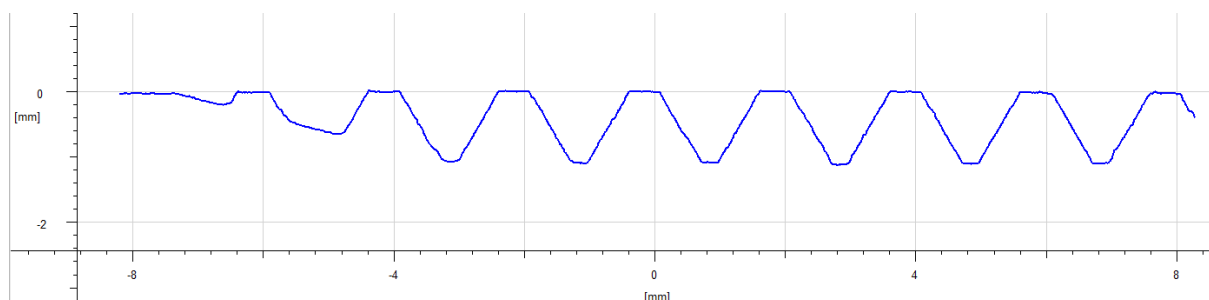


Obr. 65 Rozříznutý váleček A1 – C1 -1

Pro měření závitů byl použit opticko-skenovací mikroskop IFM G4. Nejprve byla naskenována část závitů, jež je vyobrazena na následujícím obrázku. Poté byl proveden řez tímto skenem a tím byl vytvořen profil závitů.

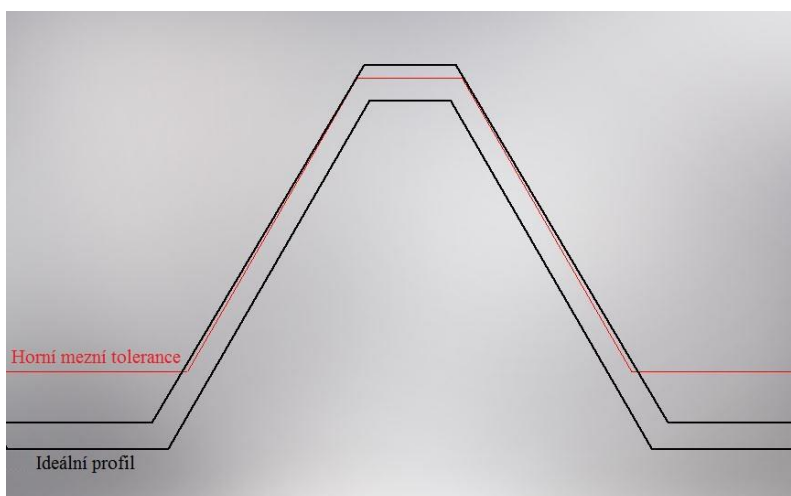


Obr. 66 Sken závitů A1-C1-1



Obr. 67 Profil závitů A1-C1-1

Po této proceduře byl vyhodnocený profil závitů konfrontován s profilem s tolerančním polem, kdy bylo zjištěno, zda je závit v tomto tolerančním poli či nikoliv. Na následujícím obrázku byl konfrontován první závit vytvořený za pomoci vrtáku A1 a závitníku C1. Spodní profil zubu vyznačen tlustou černou čarou je teoretický profil závitů, červenou slabou čarou je vyznačena horní mezní tolerance H7 a druhou černou tučnou čarou je vyznačen naměřený profil. Z této konfrontace jasně plyne, že vytvořený závit nevyhovuje toleranci H7.

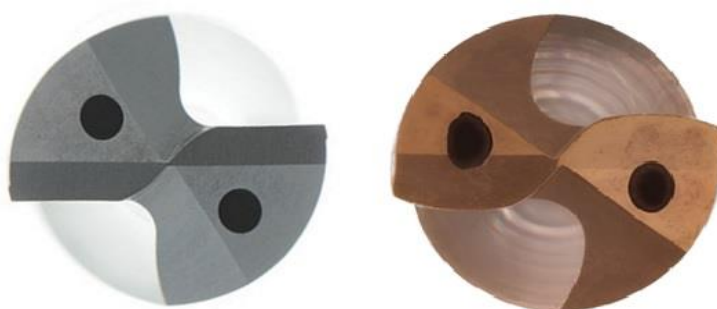


Obr. 68 Konfrontace A1-C1-1 s tolerančním polem H7

4 Zhodnocení výsledků a doporučení

4.1 Zhodnocení výsledků řezných sil

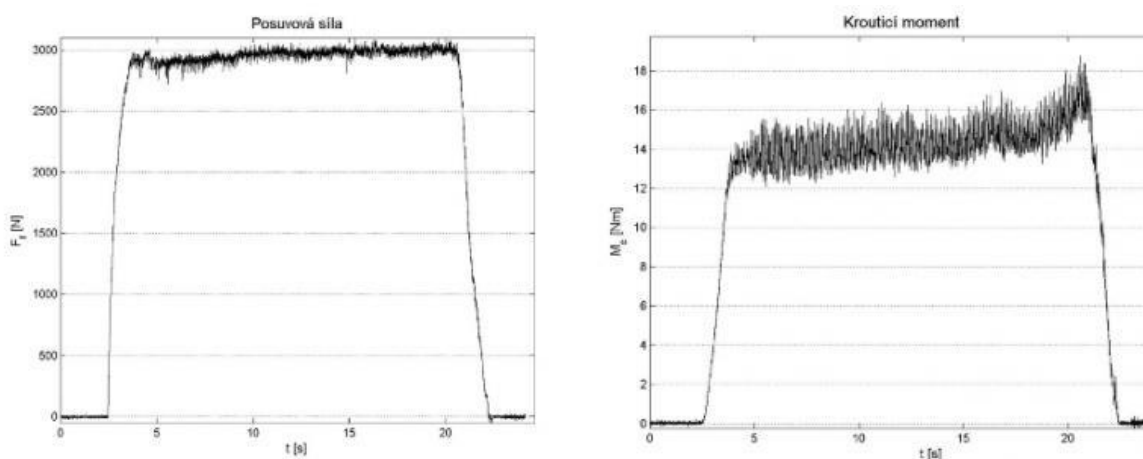
Po delším zkoumání vlivů na tak velký rozdíl řezných sil jednotlivých vrtáků bylo několik vlivů zavrženo díky konstantním řezným podmínkám. Mezi vlivy, které přicházely v úvahu a byly zavrženy kvůli konstantním řezným podmínkám, patří rozdílný materiál, jiná řezná či posuvová rychlost, změna chladicího média a další. Mezi vlivy, které připadaly v úvahu, při respektování konstantních podmínek, mohou být například rozdílný tvar ostří, rozdílná velikost příčného ostří, velikost fazetky, rozdílná tenká vrstva a další. Největší podíl na rozdílné velikosti řezných sil měl s největší pravděpodobností tvar hlavního ostří.



Obr. 69 Porovnání tvaru ostří Al a B1 [80],[81]

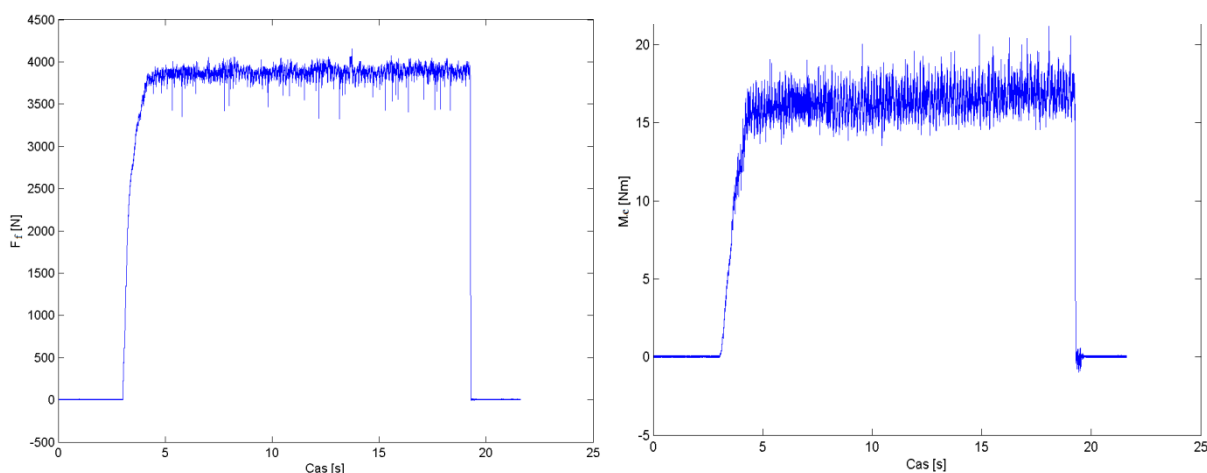
4.1.1 Porovnání řezných sil s experimenty jiné instituce

Na následujících grafech jsou vyobrazeny průběhy posuvové síly a krouticího momentu při vrtání Inconelu 718 vrtákem průměru 12mm. Jedná se o shodnou velikost průměru vrtané díry, proto jsou výsledky vhodné pro porovnání a určení, zda jsou výsledky shodné či určit, proč se jejich velikosti rozcházejí.



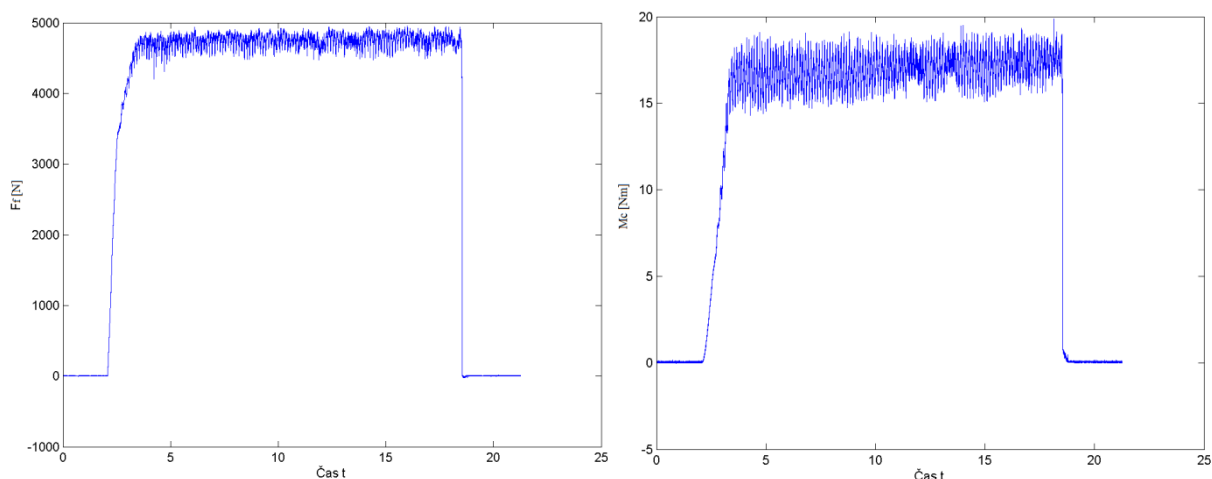
Graf 29 Průběhy posuvové síly a krouticího momentu porovnávacích experimentů [10]

Dle dostupných informací z experimentu se posuvová síla pohybovala v rozmezí 2900 – 3300N, ale průměrná hodnota byla odhadována na 3030N. U krouticího momentu byl průběh taktéž rostoucí a průměrná hodnota momentu rostla od 14Nm až k 17Nm.



Graf 30 Posuvová síla a krouticí moment B2 – 6

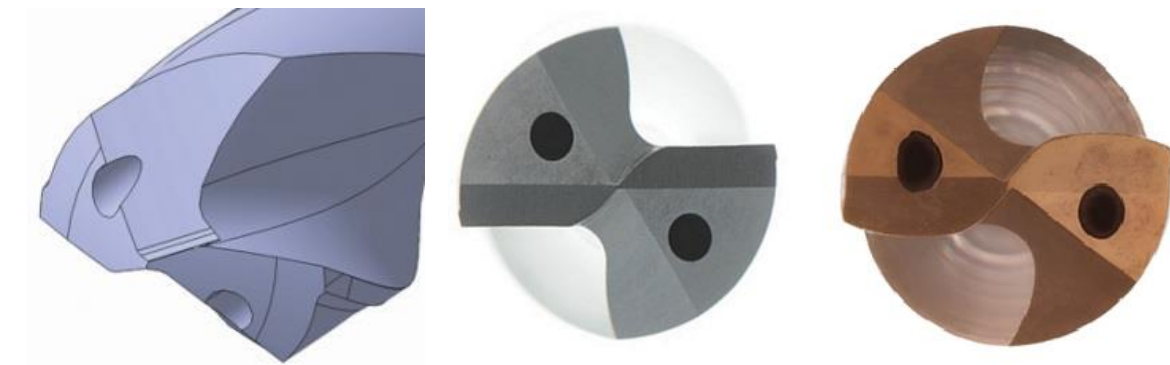
Pro porovnání bylo zvoleno měření při testování nástroje B2 při 6. díře. Posuvová síla nabývala průměrné hodnoty 3925N a krouticí moment 16,6Nm. Při porovnání naměřených výsledků z jiných výzkumů s výsledky posuvových sil a krouticích momentů je na první pohled vidět, že síly v tomto experimentu byly značně vyšší. Posuvová síla při tomto porovnání je vyšší o cca 900N a krouticí moment je vyšší přibližně o 1Nm, ale jeho stoupající charakter není tak výrazný.



Graf 31 Posuvová síla a krouticí moment A1 – 6

Pro objektivní porovnání je nutné porovnat i nástroj A1 při vrtání stejného počtu děr. Posuvová síla je zde značně vyšší a její průměrná hodnota byla stanovena na 4797N. To znamená, že tato hodnota je vyšší o cca 1760N. Ale při porovnání krouticích momentů je průměrná hodnota vyšší pouze o cca 2Nm.

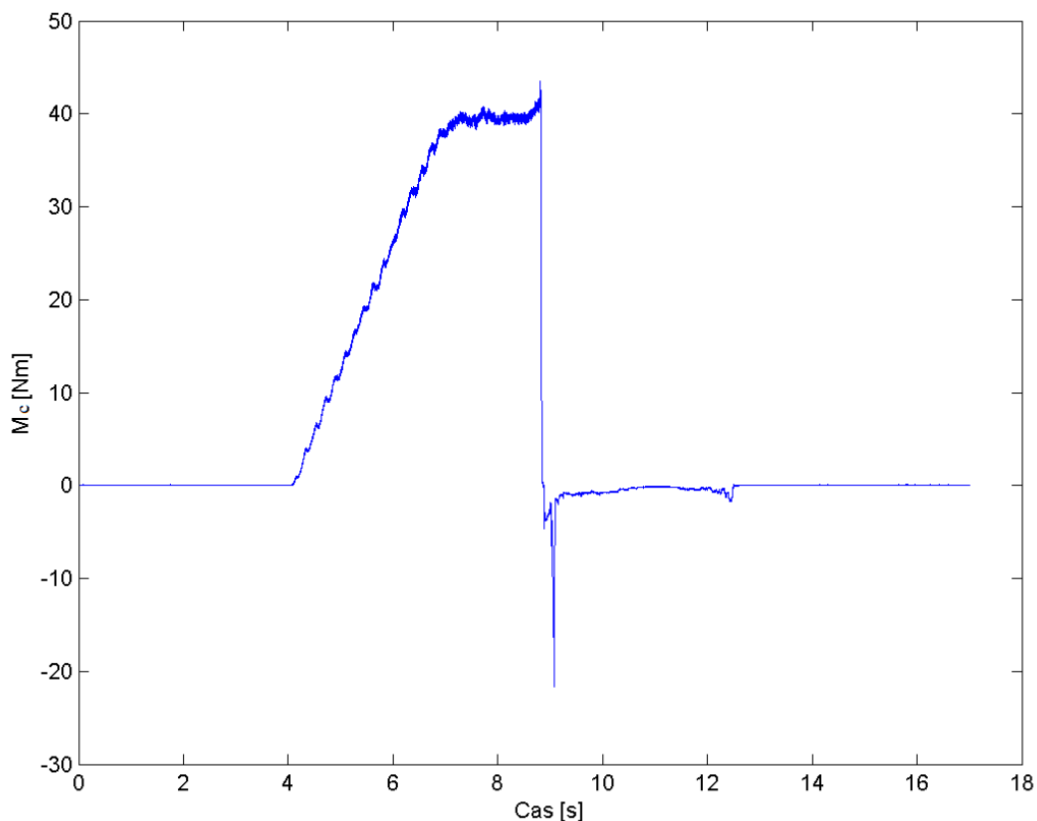
Jak již bylo výše rozebráno, co by mohlo mít na rozdílné řezné síly vliv, tak zde je situace velmi podobná. Rozdíl je ten, že materiál a řezné rychlosti nelze považovat za konstantní, neboť materiálový rozbor i hodnoty tvrdosti a řezné rychlosti byly nastaveny odlišně. Proto nelze přesně určit, co je tím zásadním rozdílem, díky kterému jsou tak markantní rozdíly v řezných silách. Ale jak je patrné z následujícího obrázku, ve kterém je na prvním místě obrázek dostupný ze zprávy vytvořené z experimentu, je zde také jiný tvar hlavního ostří a tím by se daly vysvětlit tak markantní rozdíly.



Obr. 70 Porovnání jednotlivých tvarů ostří [10],[80],[81]

4.1.2 Porovnání průběhu krouticího momentu při závitování

V teoretické části byl vyobrazen průběh krouticího momentu během operace závitování. V experimentu bylo ověřeno, že průběh, který je popsán v teoretické části, je založen na pravdivých datech a jeho jednotlivé části odpovídají skutečnosti. Samozřejmě se v následujícím grafu objevují malé nuance, které jsou zřejmě z konce výjezdu závitníku. Zřejmě zde došlo ke kontaktu třísky a závitníku a díky tomu zde není postupné zmenšování krouticího momentu až do nuly, ale jde zde vidět mírný výskmit krouticího momentu.



Graf 32 Krouticí moment při závitování D1 – 7 díra

4.2 Zhodnocení výsledků opotřebení

4.2.1 Zhodnocení opotřebení při vrtání

Při vrtání jednotlivými nástroji došlo ke stejnému způsobu opotřebení s tím rozdílem, že u jedné skupiny nástrojů došlo k tomuto opotřebení dříve a u druhé déle. Jednalo se o opotřebení ve tvaru vrubu. Jak tyto experimenty dokázaly, jedná se o velmi častý a nepředvídatelný druh opotřebení. Nejčastěji se opotřebení ve tvaru vrubu vytvořilo na hrotu nástroje. Tento jev lze vysvětlit enormním tlakem na hrot nástroje, který při vrtání Inconelu 718 vzniká. Předpokládaným přínosem pro hrot nástroje by bylo snížení posuvové rychlosti, jež by mělo za následek snížení tlaku na hrot nástroje, na který jsou nástroje evidentně dimenzovány. Ovšem při snížení řezných podmínek by se s největší pravděpodobností projevilo typické zpevňování Inconelu, a tím by byl více namáhán hřbet nástroje, kde by vznikalo výraznější opotřebení.

4.2.2 Zhodnocení opotřebení při závitování

Hodnocení opotřebení při závitování z provedených experimentů je značně složité, neboť série závitníků C vytvořila nanejvýše 1 díru, kdežto série D 12 děr bez známek výraznějšího opotřebení. Vliv řezných podmínek, řezného prostředí, materiálu, upnutí zle vyloučit, neboť tyto jmenované vlivy byly pro obě série konstantní. Aspekty, které měly tak výrazný vliv na opotřebení je potřeba hledat na straně nástroje. Vzhledem k tomu, že oba nástroje jsou výrazně odlišné, se s největší pravděpodobností nepovede určit, jaký vliv měl nejvýznamnější podíl na tomto diametrálním rozdílu. Značný podíl je možné přisuzovat výrazně rozdílnému řeznému kuželu, kdy u série C byl řezný kužel odpovídající 2-3 zubům a u série D 4-5 zubům. Mezi další odlišnosti, jež mohly způsobit tento nepoměr, lze zařadit vznikající třísky a její směr odchodu. Na následujícím obrázku jsou porovnány třísky vznikající při závitování jednotlivými nástroji. V levé části obrázku jsou vyobrazeny třísky vznikající při použití nástroje série C a v pravé části třísky při použití nástroje série D.

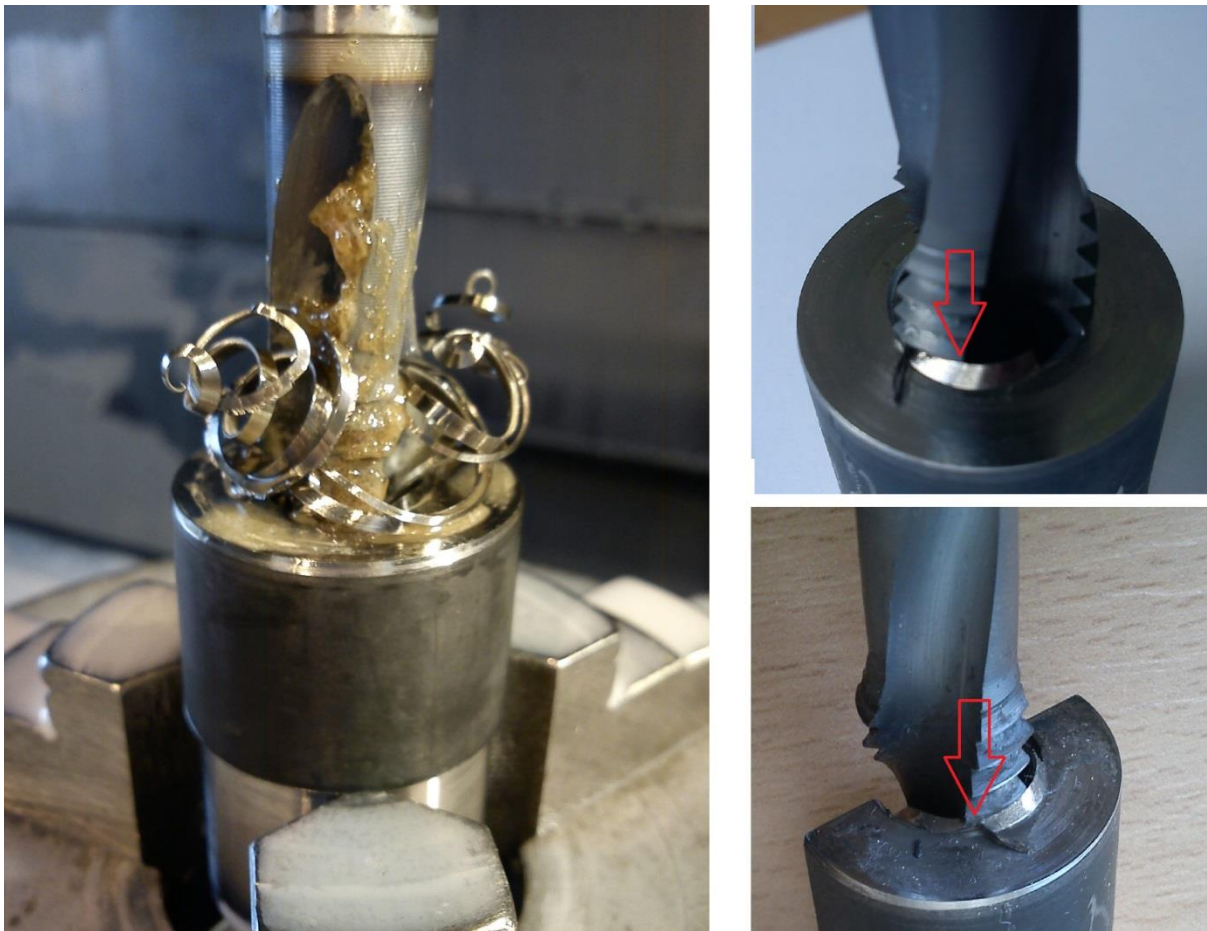


Obr. 71 Vzniklé třísky při závitování

4.3 Doporučení

4.3.1 Doporučení pro závitování závitníkem C

Jak již bylo výše zmíněno, oba závitníky série C ukončily svůj řezný proces tím, že se zadřely v závitované díře. Proto bylo nutné pečlivě analyzovat proces a zjistit, proč k tomuto jevu došlo a specifikovat návrhy na zlepšení tohoto stavu. Z důkladné analýzy vyšel jako nejpravděpodobnější důvod pro zadření nástroje v závitované díře špatný odchod třísky. Na následujícím obrázku je patrné, že odcházející tříška koliduje s dalšími zuby, kde způsobuje enormní namáhání, které vedlo ke zmíněnému zadření.



Obr. 72 Důvod zadření závitníku – tříška

Takto plynulá tříška vzniká z důvodu závitování celé délky závitu najednou, což vyšlo z rešerše jako nejvhodnější způsob z hlediska mechanického zpevnování povrchu tohoto materiálu. Problém by mohlo vyřešit přerušování řezu po $0,5D$ a tím by byla vznikající tříška přerušena. Při použití této strategie by se dle předpokladů měla zvýšit trvanlivost těchto závitníků.

5 Závěr

Tato diplomová práce se věnovala problematice obrábění Inconelu 718. Oblast obrábění tohoto materiálu v rámci práce byla omezena pouze na vrtání monolitními nástroji a závitování pomocí závitníků. Cílem této práce bylo porovnat trvanlivosti jednotlivých nástrojů, kterými byly vrtáky a závitníky. S ohledem na značné odlišnosti mezi jednotlivými vrtáky i závitníky bylo výstupem z experimentů porovnání jednotlivých nástrojů a jejich trvanlivosti v širších souvislostech. Při hodnocení trvanlivosti vyšla lépe série vrtáků A, která dosáhla značně vyšší trvanlivosti oproti sérii B. Vrták označený A1 dosáhl více než 1x vyšší trvanlivosti nežli jeho konkurent B1. Avšak opakování s vrtákem od stejného výrobce, tedy vrták s označením A2, tento rapidní nárůst nepotvrdil. I přesto, že jeho trvanlivost byla poloviční, lze se zde domnívat, že kdyby nedošlo k náhlému selhání, vrták by dosáhl podobné trvanlivosti jako A1. Nástroj B1 dosáhl trvanlivosti 340 mm. Při opakování nástrojem série B bylo dosaženo nižší trvanlivosti o čtvrtinu, nežli dosáhl první testovaný nástroj.

Všechny nástroje vykazovaly stejný způsob opotřebení s tím rozdílem, že u jedné skupiny nástrojů došlo k tomuto opotřebení dříve a u druhé později. Jednalo se o opotřebení ve tvaru vrubu. Vrub nejčastěji vznikl na hrotu vrtáku, pouze v jednom případě vznikl vrub na špičce.

Z experimentů vyplývá, že tvar hlavního ostří má významný vliv na velikost řezné síly. Zásadní vliv zde má posuvová síla, která působí v ose Z. Rozdíly se projevily především při srovnání posuvové síly u vrtáků A1 a B2 u šesté díry. U této díry byl rozdíl v posuvové síle přibližně 850N. V průběhu práce byly naměřené výsledky porovnávány s výsledky, které byly získány z odborné literatury. Rozdíly, které byly naměřeny, vykazovaly vyšší odchylky, než které byly původně očekávány. Není však možné stanovit, zda byly podmínky testů srovnatelné. Z tohoto důvodu nelze naměřené odchylky přisuzovat pouze tvaru hlavního ostří.

Trvanlivosti jednotlivých sérií závitníků byla značně rozdílná. Závitník D1 dosáhl trvanlivosti 240 mm bez známek výrazného opotřebení, kdežto jeho konkurent C2 dosáhl trvanlivosti pouze 20 mm. Nástroje, které byly určeny pro opakování, tyto hodnoty trvanlivosti potvrdily. Z toho vyplývá, že trvanlivost závitníků série D je více než desetkrát vyšší. Závitníky série C byly v díře zadřeny, především kvůli špatnému odchodu vznikající třísky. Tříška se vyskytovala v místě řezu, kde kolidovala s dalšími zuby. Opatření, které řeší zvýšení trvanlivosti těchto závitníků, je přerušení řezu po hloubce půl D. Při přerušování řezu lze očekávat odštíření třísky, čímž následně nedochází k vnikání třísky do místa řezu.

Vytvořený závit byl hodnocen z hlediska přesnosti. Kvůli jeho vrcholovému úhlu, jehož hodnota se pohybovala okolo $61,5^\circ$, byl vytvořený závit nevyhovující v požadované přesnosti. Odchylka závitů přesáhla i velikost mezní úchytky pro tolerančního pole H7, ačkoliv závitník měl vyřiznout závit s tolerancí H6. Při posuzování krouticího momentu při závitování byl průběh shodný s teoretickým průběhem, který je popsán v teoretické části.

Z provedených experimentů vyšla jako nejvýhodnější kombinace vrtáku A2 a závitníku D1. Trvanlivost vrtáku A2 byla 330mm. Závitník D1 dosáhl hodnoty trvanlivost 240mm. Kdyby byly vrtáky a závitníky hodnoceny zvlášť bez ohledu na jejich kombinace, získal by prvenství vrták A1. Trvanlivost vrtáku A1 dosáhla hodnot 660mm.

Jelikož vrtání Inconelu 718, je náročným technologickým úkonem, je nutný další výzkum v této oblasti. V budoucnu je nezbytné hledat vhodnou souhru jednotlivých parametrů, které se podílejí na ovlivnění trvanlivosti. Je nutné hledat takovou kombinaci všech parametrů, které zajistí nejvyšší trvanlivost při maximálním využití nástrojů. Zároveň není možné opomenout zajištění dostatečné bezpečnosti procesu tvorby děr. Problematika vrtání a

závitování Inconelu 718 je natolik zajímavým a aktuálním tématem, že lze předpokládat další výzkum v této oblasti.

Citované zdroje

Literatura

- [1] FISHER, A. BOBZIN, K. Friction, Wear and Wear Protection. Germany 2009. ISBN 987-3-527-32366-1 [cit. 2015-03-24] Dostupný z: <https://books.google.cz/books?id=MjAdBDZf7WkC&pg=PA543&lpg=PA543&dq=drilling+inconel+718&source=bl&ots=ewh4wxcvdW&sig=MX1czyfvjU160yIKy6t53pvBcSs&hl=cs&sa=X&ei=EFoRVcbgHdLfapKugbAO&ved=0CGQQ6AEwCTgU#v=onepage&q=drilling%20inconel%20718&f=false>
- [2] KONDERLA, RYSZARD. Možnosti suchého obrábění niklových slitin. Disertační práce. V Ostravě 2011, Dostupné z: <https://dspace.vsb.cz/handle/10084/89648> , VŠB – Technická univerzita Ostrava, Vedoucí práce doc. Dr. Ing. Ivan Mrkvica
- [3] PECHÁČEK, MIROSLAV. Vliv řezných kapalin na výsledky obrábění. Bakalářská práce. Ve Zlíně 2009. Dostupný z: https://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/8911/pech%C3%A1%C4%8De_k_2009_bp.pdf?sequence=1 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. ONDŘEJ BÍLEK
- [4] KOČMAN, K., PROKOP, J.: Technologie obrábění. Brno. Akademické nakladatelství. CERM, 2005. ISBN 80-214-3068-0
- [5] ŘEHOŘ, JAN. Přednáška z předmětu Technologie Obrábění. [cit. 2015-01-19]. ZČU v Plzni.
- [6] SANDVIK COROMANT. Typy opotřebení. [cit. 2015-03-19] Dostupný z: <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/drilling/wear-and-troubleshooting/wear-types/Pages/default.aspx>
- [7] JM Precision Components and materials. Machining nickel and nickel alloys (including monel, kovar, invar, inconel, & incoloy). [cit. 2015-01-19]. Dostupné z: <http://www.jmprecision.co.uk/media/machiningnickelalloys.pdf>
- [8] SANDVIK COROMANT. Definice pojmů v oblasti Vrtání. [cit. 2015-03-19] Dostupný z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/drilling/formulas_and_definitions/drilling_definitions/pages/default.aspx
- [9] OĞUZ ÇOLAK. Investigation on Machining Performance of Inconel 718 under High Pressure Cooling Conditions. V Turecku 2012. [cit. 2015-03-19]. Journal of Mechanical Engineering 58(2012)11, s. 683-690. Dostupné z: http://www.sv-jme.eu/data/upload/2012/11/07_2012_730_Colak_02.pdf
- [10] KOŽMÍN, P. KŘÍŽ A. ROUD P. Vrtání děr se zvýšenou přesností. MM Průmyslové Spektrum 2011, roč. 2011, č. 5. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vrtani-der-se-zvysenou-presnosti.html>
- [11] KONDERLA, RYSZARD. Možnosti suchého obrábění niklových slitin. Disertační práce. V Ostravě 2011, Dostupné z:

- <https://dspace.vsb.cz/handle/10084/89648> , VŠB – Technická univerzita Ostrava, Vedoucí práce doc. Dr. Ing. Ivan Mrkvica
- [12] ISCAR. ISOTURN JetHPLine uživatelská příručka. [cit. 2015-03-19] Dostupný z: http://www.iscar.cz/Catalogs/zip/CMS%20Catalogs/SOUSTRUZENI_ISCAR.pdf
- [13] A.R.C. Sharman, A. Amarasinghe, K. Ridgway. Tool life and surface integrity aspects when drilling and hole making in Inconel 718. [cit. 2015-03-19]. United Kingdom 2007. Journal of Materials Processing Technology, Volume 200, Issues 1–3, 8 May 2008, Pages 424–432 Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013607008382>
- [14] Astakhov Viktor P., Drills: Science and Technology of Advanced Operations, Michigan State University 2014, ISBN 978-1-4665-8434-1
- [15] Y.C. Chen, Y.S. Liao. Study on wear mechanisms in drilling of Inconel 718 superalloy. [cit. 2015-03-19]. Journal of Materials Processing Technology, Volume 140, Issues 1–3, 22 September 2003, Pages 269–273, Proceedings of the 6th Asia Pacific Conference on materials Processing. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013603007921>
- [16] Popa, Andrei and Baili, Maher and Desein, Gilles and Dutilh, Vincent *Identification of tool failure modes in drilling Udimet® 720 superalloy*. (2011) In: International conference on structural analysis of advanced materials, 7 – 10 Sept 2011, Sinaia, Romania.
- [17] SANDVIK COROMANT. Opatřebení břitu . [cit. 2015-03-19] Dostupný z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting_tool_materials/wear_on_cutting_edges/pages/default.aspx
- [18] ECKHARD WISSUWA A STEFAN SCHOLZE. Povlakované nástroje zaručují vyšší hospodárnost. MM Průmyslové Spektrum 2011, roč. 2011, č. 5. [cit. 2015-03-19] Dostupný z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/povlakovane-nastroje-zarucuji-vyssi-hospodarnost.html>
- [19] TKÁČOVÁ, ALENA. SESTAVENÍ TECHNOLOGIE SOUČÁSTI "CAGE" VE FIRMĚ CCI BRNO. V Brně 2011. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=39279 . Diplomová práce. VYSOKÉ UCENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. MILAN KALIVODA
- [20] ŠTOKMAN, M. Analýza řezných sil při řezání závitů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 77 s. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=84147 Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

- [21] Special Metals Corporation, *High-Performance Alloys for Resistance to Aqueous Corrosion*, [cit. 2015-01-09] Dostupný z: http://www.parrinst.com/wp-content/uploads/downloads/2011/07/Parr_Inconel-Incoloy-Monel-Nickel-Corrosion-Info.pdf
- [22] Special Metals Corporation, *Inconel alloy 718*, [cit. 2015-01-09] Dostupný z: <http://www.specialmetals.com/documents/Inconel%20alloy%20718.pdf>
- [23] SULAK, IVO. *Vliv al a al-si vrstvy na únavové vlastnosti niklové superslitiny in713lc za teploty 800°C*. V Brně, 2011. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=38774, Bakalářská práce. VYSOKÉ UCENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Prof. Ing. TOMÁŠ PODRÁBSKÝ CSc
- [24] SMÉKALOVÁ, JANA. *Vztah Mezi Strukturou A Vlastnostmi Litých Niklových Slitin*. V Brně, 2008. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/4242>, Bakalářská práce. VYSOKÉ UCENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Prof. Ing. TOMÁŠ PODRÁBSKÝ CSc
- [25] DONACHIE, M. J., DONACHIE, S. J.: *Superalloys – A Technical Guide*, Materials Park :ASM International,2002. 2nd ed. x, 437 s. ISBN 0-87170- 749-7
- [26] MASSALSKI, T. B.; et al., *Binary Alloy Phase Diagrams – 2nd ed.*, ASM International, 1996. ISBN 0-87170-403-X
- [27] ŠMÍD, MIROSLAV. *Současné působení únavy a creepu u Ni superslitin a slitiny TiAl*. V Brně, 2013. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/25529>, Dizertační práce. VYSOKÉ UCENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce doc. RNDr. KAREL OBRTLÍK, CSc.
- [28] DURAND-CHARRE, M.: *The Microstructure of Superalloys*. Gordon & Breach Science Publishers, Amsterdam, 1997. 121 s.
- [29] JURČÍK, JAN. *Nové trendy v oblasti konstrukce nástrojů pro soustružení*. V Plzni 2013. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/handle/11025/9333>. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.
- [30] Eiselstein H. L. a D. J. Tillack. *The invention and definition of alloy 625*. Inco Alloys International, Inc. Edited by Edward A. Loria, The Minerals, Metals & Materials Society 1991. http://www.tms.org/superalloys/10.7449/1991/Superalloys_1991_1_14.pdf
- [31] ŠMÍD, MIROSLAV. *Stanovení zkrácených cyklických deformačních křivek superslitiny inconel 738lc při zvýšených teplotách*. V Brně, 2008. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/2382>. VYSOKÉ UCENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. MARTIN PETRENEC, Ph.D

- [32] National Specialty Alloys, Inc. 718/Inconel® Nickel Alloy Bar. [cit. 2015-01-19] Dostupný z: <http://www.nsalloys.com/products/nickel-alloy-bar/718inconel-nickel-alloy-bar>
- [33] SLABÝ, ONDŘEJ. Sestavení technologie rotační součásti materiálu inconel v podmínkách firmy frencken Brno. V Brně, 2009. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=17059 VYSOKÉ UCENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. MILAN KALIVODA
- [34] Polymet. Aerospace. [cit. 2015-01-19] Dostupný z: <http://www.polymet.us/markets-applications/aerospace>
- [35] SANDVIK COROMANT. Obrobitelnost – definice. [cit. 2015-01-19] Dostupný z: <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece-materials/machinability-definition/pages/default.aspx>
- [36] SANDVIK COROMANT. ISO S HRSA a titan. [cit. 2015-01-19] Dostupný z: <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece-materials/iso-s-hrsa-titanium/pages/default.aspx>
- [37] SANDVIK COROMANT. Heat resistant super alloys – HRSA. [cit. 2015-01-19] Dostupný z: http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/pdf/aerospace/gas_turbines/C_2_920_18_ENG_009_042.pdf
- [38] PLATIT, Comparison of Machinability of Different Workpiece Materials, [cit. 2015-02-23]. Dostupný z: <http://www.platit.com/coating-features>
- [39] STAVIARSKÝ, MIROSLAV. Trvanlivost nástroje při obrábění slitiny Nimonic 80A. V Plzni 2012. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/handle/11025/4236> .Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.
- [40] SANDVIK COROMANT. Frézování žárovzdorných slitin a titanu [cit. 2015-01-19] Dostupný z: <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/getting-started/milling-different-materials/hrsa-and-titanium-milling/pages/default.aspx>
- [41] ZETEK, MIROSLAV. Přednáška z předmětu Přípravky a nástroje pro obrábění – Řezné materiály. [cit. 2015-01-25]. ZČU v Plzni.
- [42] SKLENIČKA, JOSEF. Vliv geometrie břitu produktivních vrtacích nástrojů na velikost řezných sil. V Plzni 2009. Dostupné z: www.portal.zcu.cz . Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Doc. Ing. Josef Škarda, CSc.
- [43] KRÍŽ, A. J. ŠIMEČEK. Přednáška z předmětu Materiály v obrábění - Úvodní shrnující přednáška k předmětu. [cit. 2015-01-25]. ZČU v Plzni
- [44] SULDOVÁ, PETRA. Vliv úpravy hlavního břitu monolitního šroubovitého vrtáku na trvanlivost nástroje. V Plzni 2013. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/handle/11025/10260> . Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.

- [45] NOSEK, JAN. Nástroje z rychlořezné oceli a jejich aplikace v současnosti. V Brně, 2008. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/13781> VYSOKÉ UCENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. PETRA CIHLÁŘOVÁ, Ph.D.
- [46] ČERNOHORSKÝ, JIŘÍ. Možnosti zvyšování řezivosti nástrojů z RO. V Plzni 2014. Dostupné z: www.portal.zcu.cz . Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.
- [47] KŘÍŽ. ANTONÍN. Přednáška z předmětu Strojírenské materiály – Prášková metalurgie. [cit. 2015-01-25]. ZČU v Plzni
- [48] DEMBEK, JIŘÍ. Slinuté karbidy a jejich efektivní využití. V Brně, 2010. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29889 . VYSOKÉ UCENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce doc. Ing. ANTON HUMÁR, CSc.
- [49] SANDVIK COROMANT. Povlakovaný slinutý karbid. [cit. 2015-01-25]. Dostupný z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting_tool_materials/coated_cemented_carbide/pages/default.aspx
- [50] HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Praha : MM publishing, s. r. o., 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [51] MALINA JIŘÍ. Rozbor a využití vysoce výkonných vrtacích nástrojů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 47s, Vedoucí práce: Ing. Oskar Zemčík, CSc
- [52] Skripta Technologie II. [cit. 2015-01-25]. VŠB - Technická Univerzita Ostrava. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_1dil.pdf
- [53] FOLTÝN, MICHAL. Povlakované slinuté karbidy. V Brně 2008. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=6370 VYSOKÉ UCENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce doc. Ing. ANTON HUMÁR, CSc
- [54] BŮŽEK, PAVEL. Vliv tenkých vrstev a úpravy mikrogeometrie břitu cermetových VBD na frézování zápustkové oceli. V Plzni 2012. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/handle/11025/4232> . Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.
- [55] BITTNER, JAN. Metody povlakování řezných nástrojů. V Brně 2010. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29100 . Bakalářská práce. VYSOKÉ UCENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce doc. Ing. ANTON HUMÁR, CSc
- [56] NĚNIČKA, JAKUB. Odstraňování původních povlaků řezných nástrojů před novým povlakováním. V Brně 2008. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=6005

- . Diplomová práce. VYSOKÉ UCENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce doc. Ing. ANTON HUMÁR, CSc
- [57] SECO. Material background - The essential material characteristics of Inconel 718. [cit. 2015-02-23]. Dostupný z: <http://www.secotools.com/en/Global/Segment-Solutions/Aerospace-Solutions/AS-Material-main/Heat-resistant-super-alloys/Inconel-71874/>
- [58] DOLEŽALOVÁ, PETRA. Vlastnosti povlaků řezných nástrojů ze slinutého karbidu. V Brně 2013. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=64126 . Diplomová práce. VYSOKÉ UCENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. KAREL OSIČKA PhD.
- [59] NOVÁK, ZDENĚK. EMO Hannover 2013, část 3 - řezné nástroje. MM Průmyslové spektrum roč. 2013, Kód článku: 131113, Dostupné z: <http://firmy.mmspektrum.com/clanek/emo-hannover-2013-cast-3-rezne-nastroje.html>
- [60] ALBA PRECISION, SPOL. S R.O. Hahnreiter - Povlaky závitníků. [cit. 2015-02-23]. Dostupný z: <http://albaprecision.cz/cz/portal/produkty/hahnreiter/zavitniky/povlaky-zavitniku/>
- [61] PAVLOVSKÝ, TOMÁŠ. Povlakované slinuté karbidy a jejich efektivní využití. V Brně 2012. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=55752 . Diplomová práce. VYSOKÉ UCENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce doc. Ing. ANTON HUMÁR, CSc
- [62] ŽELEZNÝ, JAKUB. Progresivní tenké vrstvy v aplikaci na řezné nástroje. V Plzni 2013. Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/8625/DP_Vrstvy_Odevzdani.pdf?sequence=1 . Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Doc.Dr.Ing. Antonín Kříž
- [63] MUSIL, J. Hard and superhard nanocomposite coatings. Surface and Coatings Technology. 125 (2000). pp. 322-330. ISSN 0257-8972.
- [64] SHM. TripleCoatings3® . [cit. 2015-02-23]. Dostupný z: http://www.shm-cz.cz/wp-content/uploads/2013/02/Produktovy_list_TripleCoatings.pdf
- [65] KLUSKOVÁ, MIROSLAVA. Povrchové úpravy nástrojů pro obrábění. V Brně 2014. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=84732 . Bakalářská práce. VYSOKÉ UCENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce prof. Ing. MIROSLAV PÍŠKA, CSc
- [66] OSG Tools. EXOCARB ® - WXS® A Milling Evolution. [cit. 2015-02-23]. Dostupný z: <http://www.osgtool.com/branding/osgtool.com/files/catalogpages/800133ca%201.pdf>

- [67] SANDVIK COROMANT. Řezná kapalina [cit. 2015-03-09]. Dostupný z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/drilling/getting_started/cutting_fluid/pages/default.aspx
- [68] KONDERLA, RYSZARD. Možnosti suchého obrábění niklových slitin. Disertační práce. V Ostravě 2011, Dostupné z: <https://dspace.vsb.cz/handle/10084/89648> , VŠB – Technická univerzita Ostrava, Vedoucí práce doc. Dr. Ing. Ivan Mrkvica
- [69] TEJKL, JAKUB. Obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Bakalářská práce. V Brně 2012. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=53178 , VYSOKÉ UCENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc
- [70] HORT, MARTIN. Technologické, ekonomické a ekologické obrábění s vysoce výkonným chlazením. Diplomová práce. V Brně 2009. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studium/zaverecne-prace?zp_id=21066 , VYSOKÉ UCENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc
- [71] WALTER TOOLS. Walter Prototyp: Produktová příručka Závítování. [online]. 2012 [cit. 2015-03-09]. Dostupné z: www.walter-tools.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/manuals/cs-cz/handbook-prototyp-threading-2012-cz.pdf
- [72] DE VOS, P. Příručka pro technology - Opotřebení se nevyhneme! [online]. MM - Průmyslové spektrum, 2012 [cit. 2015-03-09]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-opotrebeni-se-nevyhneme.html>
- [73] LEINVEBER, J. a VAVRA, P. Strojnické tabulky. 2. doplněné vydání. ALBRA pedagogické nakladatelství, 2005. 921s. ISBN 80-7361-011-6.
- [74] EMUGE FRANKEN, Závítování – upínací technika, Technické informace ke kompletnímu katalogu. [cit. 2015-03-09]. Dostupné z: http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCAQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.emuge-franken3.com%2Fdownload%2Fcontent%2FPrint%2FProspekte%2FZS10038_CZGB_RevA.pdf&ei=Lh5LVem-NsLSU5mkgfgP&usg=AFQjCNFGJC3c1ujt7XLLXWDzjsVHSJ_HS_w
- [75] DRIML, BOHUSLAV. Výroba závitů. Učební podklady.[cit. 2015-03-09]. Dostupné z: http://spssbrno-sokolska.jakubsvestka.cz/files/nas_DROPBOX/STT/Ro%20n%20EDk%201%20-%204,%20kompletn%20skripta%20-%20z%20nich%20u%20E8%20Ing.%20Zden%20ECk%20Voj%20E1%20Ek/R3/Z%20C1VITY.pdf
- [76] ZEMČIK, O. Nástroje a přípravky pro obrábění-učební texty vysokých škol. BRNO: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2002. 193 s.
- [77] STRAKA, JIŘÍ. Možnosti výroby závitů v malé strojírenské firmě. Bakalářská práce. V Brně 2010. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/18718>

VYSOKÉ UCENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce ING. MILAN KALIVODA

- [78] WALTER. Technická příručka – Vrtání a závitování - Dokonalý závit. 2009. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: <http://www.walter-tools.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/manuals/cs-cz/handbook-drilling-threading-2009-cz.pdf>
- [79] WALTER. Product handbook - thearding - Precise, reliable, efficient. 2012. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: <http://www.walter-tools.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/manuals/en-us/handbook-prototyp-threading-us.pdf>
- [80] SANDVIK COROMANT. Vrták R846 .[cit. 2015-02-23]. Dostupný z: <http://www.amazon.com/gp/b2b/amazon-supply/interstitial.html?redirectFrom=%252fsandvik%252dcoromant%252dcorodrill%252ddelta%252dc%252dmultilayer%252fdp%252fB005FXFOJS>
- [81] OSG Tools. EXOPRO® WHO-Ni Drills [cit. 2015-02-23]. Dostupný z: <http://www.osgtool.com/c5950Ni.htm>
- [82] WALTER. Troubleshooting and Wear Patterns. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: http://www.qtstools.com/document_library/tech-resources/Threading/Tapping/Tap%20Troubleshooting.pdf

Seznam obrázků

Obr. 1	Mikrostruktura niklových superslitin vlivem vývoje [25]	2
Obr. 2	Vývoj superslitin [31].....	3
Obr. 3	Použití Inconel 718 v leteckém průmyslu [34]	4
Obr. 4	Porovnání klasická rychlořezná ocel versus prášková rychlořezná ocel [43].....	8
Obr. 5	Složení Slinutého karbidu [47].....	9
Obr. 6	Velikost zrn ve slinutém karbidu [41].....	9
Obr. 7	Způsoby PVD povlakování – Napařování s přídavnou ionizací, Napařování obloukem, Magnetronové napařování [56].....	11
Obr. 8	Závitník Widia VariTap s povlakem TiN [59].....	11
Obr. 9	Struktura nanokompozitní vrstvy TripleCoatings [64]	13
Obr. 10	Tvary břitu vrtáků používaných pro Inconel [13]	15
Obr. 11	Porovnání trvanlivosti nástrojů v závislosti na řezné kapalině [1].....	16
Obr. 12	Vliv velikosti tlaku kapaliny na tvar třísky při soustružení Inconelu 718 [12].....	17
Obr. 13	Vliv vyššího tlaku na trvanlivost nástroje při soustružení Inconelu 718 [12].....	17

Obr. 14	Tvorba třísky [8].....	18
Obr. 15	Časový průběh opotřebení VB [3],[4].....	19
Obr. 16	Opotřebení hřbetu břitu [6]	20
Obr. 17	Opotřebení vylamováním ostří - vrub[6]	21
Obr. 18	Opotřebení příčného ostří [6]	22
Obr. 19	Opotřebení ve tvaru nárůstku[6].....	22
Obr. 20	Lom nástroje [6]	23
Obr. 21	Řezné úhly na závitníku [75],[76].....	24
Obr. 22	Odchod třísky při závitování [71]	25
Obr. 23	Rozdíl mezi novým vrtákem a opotřebovaným při ovlivnění povrchové vrstvy [79] .	26
Obr. 24	Řez otvorem se závitem [78].....	26
Obr. 25	Princip vyrovnávacího pouzdra [74]	26
Obr. 26	Průběh krouticího momentu při závitování [78]	27
Obr. 27	Opotřebení boků zubů [79],[82].....	28
Obr. 28	Nárůstek [82].....	28
Obr. 29	Zaoblení řezné hrany [82]	29
Obr. 30	Opotřebení ve formě kráteru [82].....	29
Obr. 31	Vylomení zubů [82]	29
Obr. 32	Testované vrtáky A1 a B1	31
Obr. 33	Testované závitníky C1 a D1	32
Obr. 34	Frézka MVC750A	33
Obr. 35	Upnutí vrtáků do hydraulického upínače	33
Obr. 36	Upínání závitníků – vyrovnávací hlava.....	34
Obr. 37	Optický mikroskop Multicheck 500 Pc.....	34
Obr. 38	IFM G4 od firmy Alicona	35
Obr. 39	Dynamometr se sklíčidlem a vzorkem	35
Obr. 40	Zesilovač	36
Obr. 41	Soustava pro měření řezných sil a momentů.....	36
Obr. 42	Zkušební vzorek	37
Obr. 43	Zkušební vzorek – deska	37
Obr. 44	Rozložení děr v desce.....	38
Obr. 45	Značení opotřebení dle normy [5].....	47
Obr. 46	Diferenční analýza – 330mm	48
Obr. 47	Opotřebení špičky po 660mm	48

Obr. 48	Vyštípnutí levého břitu A2	49
Obr. 49	Postup opotřebení hrotu nástroje při 1., 5., 8., 11. díře	49
Obr. 50	Porovnání nového nástroje a po ujetí 320mm	50
Obr. 51	Sken závitníku C1 – 20mm	50
Obr. 52	Porovnání řezů na 2 zuby před a po opotřebení	51
Obr. 53	Diferenční analýza závitníku C1 – 20mm	51
Obr. 54	Diferenční analýza závitníku D1 – 20mm	52
Obr. 55	Sken závitníku D1 – 240mm	52
Obr. 56	Porovnání řezů na 2 zuby před a po opotřebení	53
Obr. 57	Diferenční analýza závitníku D1 – 240mm	53
Obr. 58	Vyhodnocení drsnosti povrchu	56
Obr. 59	Vyhodnocení drsnosti první díry nástrojem A1 - detail	56
Obr. 60	Drsnost povrchu – černé tečky	57
Obr. 61	Vyhodnocení drsnosti povrchu 11díry nástrojem A1	57
Obr. 62	Černá díra	58
Obr. 63	Normalizovaný profil závitu [73]	58
Obr. 64	Profil závitu s vyznačenou horní mezní tolerance H7	59
Obr. 65	Rozříznutý váleček A1 – C1 -1	59
Obr. 66	Sken závitu A1-C1-1	60
Obr. 67	Profil závitu A1-C1-1	60
Obr. 68	Konfrontace A1-C1-1 s tolerančním polem H7	60
Obr. 69	Porovnání tvaru ostří A1 a B1 [80],[81]	61
Obr. 70	Porovnání jednotlivých tvarů ostří [10],[80],[81]	63
Obr. 71	Vzniklé třísky při závitování	64
Obr. 72	Důvod zadření závitníku – tříska	65

Seznam grafů

Graf 1	Obrobitelnost superslitin [37]	5
Graf 2	Porovnání obrobitelnosti různých materiálů [38]	5
Graf 3	Diagram řezných materiálů [43]	7
Graf 4	Porovnání teplotní odolnosti a tvrdosti povlaků TiAlN a WXS [66]	13
Graf 5	Velikost vrcholového úhlu vrtáku pro Inconel [15]	14
Graf 6	Závislost druhu opotřebení vzhledem k řezné rychlosti a posuvu [16]	20

Graf 7	Graf řezných rychlostí pro vznik opotřebení ve tvaru vrubu [16].....	21
Graf 8	Porovnání při vrtání 1 díry vrtákem A1 a A2.....	39
Graf 9	Porovnání při vrtání 11 díry vrtákem A1 a A2.....	39
Graf 10	Velikost složky řezné síly F_f	40
Graf 11	Porovnání složek řezné síly F_f – A1 a A2	40
Graf 12	Porovnání grafů F_f při vrtání 1 díry vrtákem B1 a B2	41
Graf 13	Porovnání grafů F_f při vrtání 8 díry vrtákem B1 a B2	41
Graf 14	Průběh složky řezné síly F_f - B1	41
Graf 15	Porovnání složek řezné síly F_f – B1 a B2	42
Graf 16	Porovnání složek řezné síly F_f u všech nástrojů	42
Graf 17	Mezní průběhy krouticích momentů u nástrojů A1 a A2.....	43
Graf 18	Mezní průběhy krouticích momentů u nástrojů B1 a B2	43
Graf 19	Porovnání velikostí krouticích momentů u všech nástrojů	43
Graf 20	Posuvová, pasivní síla a krouticí moment při závitování závitníkem C2	44
Graf 21	Posuvová, pasivní síla a krouticí moment při závitování závitníkem D1	45
Graf 23	Porovnání trvanlivosti vrtáků	46
Graf 24	Porovnání trvanlivosti závitníků	47
Graf 25	Průměr vrtané díry – Nástroj A1	54
Graf 26	Průměr vrtané díry – Nástroj B2	54
Graf 27	Pasivní složka řezné síly F_p – nástroj A1 17. a 22. díra.....	55
Graf 28	Pasivní složka řezné síly F_p – nástroj B2 1 a 7 díra.....	55
Graf 29	Průběhy posuvové síly a krouticího momentu porovnávacích experimentů [10]	61
Graf 30	Posuvová síla a krouticí moment B2 – 6.....	62
Graf 31	Posuvová síla a krouticí moment A1 – 6.....	62
Graf 32	Krouticí moment při závitování D1 – 7 díra	63

Seznam tabulek

Tab. 1	Chemické složení Inconel 718 [22].....	3
Tab. 2	Mechanické vlastnosti Inconel 718 [10]	3
Tab. 3	Typy náběhů řezacích závitníků [78]	24
Tab. 4	Kombinace nástrojů.....	30
Tab. 5	Základní parametry vrtáků	31

Tab. 6	Základní parametry závitníků.....	32
Tab. 7	Zvolených řezných podmínek	32
Tab. 8	Chemické složení zkušebního vzorku	37
Tab. 9	Mechanické vlastnosti	38
Tab. 10	Hodnoty drsnosti první díry nástrojem A1	56
Tab. 11	Značení rozměrů závitu [73]	59

