

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Obrábění niklových superslitin

Machining of Nickel based super-alloys

AUTOR:

Bc. Zdeněk Tobiáš

STUDIJNÍ PROGRAM:

NVI Výrobní inženýrství

VEDOUCÍ PRÁCE:

Ing. Vítězslav Rázek, CSc.

PRAHA, 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Tobiáš** Jméno: **Zdeněk** Osobní číslo: **466479**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Obrábění niklových superslitin

Název diplomové práce anglicky:

Machining of Nickel based super-alloys

Pokyny pro vypracování:

1. Rozbor zadané problematiky
2. Charakteristiky niklových slitin
3. Nástroje a technologické možnosti
4. Možnosti experimentálního hodnocení

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Vítězslav Rázek, CSc. ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **16.03.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **29.07.2022**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Vítězslav Rázek, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto Diplomovou práci na téma „Obrábění niklových superslitin“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Vítězslavu Rázkovi, CSc. a všechny informace a podklady použité v této práci jsou řádně odkázány v seznamu literatury.

V Praze dne: _____

Bc. Zdeněk Tobiáš

Poděkování

Tímto bych rád poděkovat panu Ing. Vítězslavu Rázkovi, CSc. za odborné vedení a rady při vypracování této diplomové práce. Stejně tak bych chtěl poděkovat panu Ing. Michalu Slanému za pomoc při provádění experimentální části diplomové práce.

Anotační list

Jméno autora:	Bc. Zdeněk Tobiáš
Český název:	Obrábění niklových superslitin
Anglický název:	Machining of Nickel based super-alloys
Akademický rok:	2021/2022
Studijní program:	NVI Výrobní inženýrství
Škola, fakulta:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	12 134 Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí DP:	Ing. Vítězslav Rázek, CSc.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 78 Počet obrázků: 50 Počet tabulek: 9 Počet grafů: 24 Počet literárních zdrojů: 40
Klíčová slova:	Obrábění, Frézování, Niklové slitiny, Silové složky, Drsnost povrchu, Inconel 713LC.
Keywords:	Machining, Milling, Nickel alloys, Forces, Surface roughness, Inconel 713LC.
Anotace:	Tato diplomová práce se zabývá obrobiteľnosťou niklových superslitin. Konkrétne sa zameriava na superslitinu Inconel 713LC, ktorá nemá príliš veľké zastoupenie vo vedeckej sfére oproti typickej niklovej superslitine Inconel 718.
Abstract:	This diploma thesis deals with the machinability of nickel superalloys. Specifically, it focuses on the nickel-based superalloy Inconel 713LC, which is not very well represented in the scientific sphere compared to the typical nickel-based superalloy Inconel 718.

Bibliografická citace:

TOBIÁŠ, Zdeněk. Obrábění niklových superslitin. Praha. 2022. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie. Ing. Vítězslav Rázek, CSc.

Obsah

1	Úvod	10
2	Metody obrábění	11
2.1	Soustružení	11
2.2	Frézování	12
2.2.1	Kinematika při frézování	12
2.3	Procesní kapalina (PK)	13
3	Nástroj.....	15
3.1	Volba materiálu rezného nástroje	15
3.1.1	Slinuté karbidy.....	16
3.1.2	Řezná keramika	16
3.1.3	Kubický nitrid boru	17
3.2	Konstrukce rezných částí nástrojů.....	17
3.2.1	Monolitní nástroje.....	17
3.2.2	Nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami	17
3.3	Povlakování	18
3.4	Upínání nástrojů	19
3.4.1	Upnutí soustružnického nože.....	19
3.4.2	Upnutí frézy	20
3.4.3	Upínací mechanismus VBD dle ISO	21
3.5	Opotřebenění nástroje.....	22
3.6	Trvanlivost.....	23
4	Niklové slitiny.....	25
4.1	Čistý nikl.....	25
4.2	Superslitiny na bázi niklu	26
4.2.1	Mikrostruktura niklových superslitin	27
4.2.2	Účinky legujících prvků	28
4.2.3	Tepelné zpracování.....	29
4.3	Slitina Inconel 713.....	30
4.3.1	Použití.....	30
5	Charakteristika obrábění	31
5.1	Obrobitelnost	31
5.2	Mechanika tvorby třísky	32
5.2.1	Silové účinky při obrábění.....	33
5.2.2	Tepelné jevy při obrábění	36
5.2.3	Parametry drsnosti a jejich ovlivnění rezným procesem	37

5.2.4	Zbytkové napětí	41
6	Experimentální měření.....	43
6.1	Silové účinky při obrábění.....	46
6.1.1	Drsnosti obrobené plochy	47
6.1.2	Vyhodnocení struktury povrchu	49
7	Návrh a realizace experimentu.....	50
7.1	Vliv jednotlivých vrstev na obrábění.....	52
7.2	Vliv řezného prostředí na obrábění.....	56
7.2.1	Frézování bez procesní kapaliny	56
7.2.2	Frézování pomocí minimálního množství maziva.....	58
7.2.3	Frézování při záplavě syntetickou procesní kapalinou	61
7.3	Porovnání řezných prostředí	64
7.3.1	Porovnání měrné řezné síly	64
7.3.2	Porovnání pasivní síly	65
7.3.3	Porovnání střední aritmetické odchyly profilu	66
7.3.4	Porovnání maximální výšky profilu	67
7.3.5	Porovnání maximální hloubky drsnosti	68
7.3.6	Porovnání střední šířky rýh.....	69
8	Shrnutí výsledků experimentu	70
9	Závěr	72
	Seznam literatury:	73
	Seznam obrázků	77
	Seznam tabulek	78
	Seznam grafů.....	78

Seznam použitých symbolů a zkratek

Označení	Legenda – zkratky
ČSN	Česká technická norma
PVD	Fyzikální metoda depozice vrstev
GPS	Geometrické požadavky na výrobky
CVD	Chemické metoda depozice vrstev
KBN	Kubický nitrid bóru
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
ML	Minimální množství maziva
R	Parametr drsnosti povrchu
W	Parametr vlnitosti povrchu
P	parametr základního profilu
CAM	Počítačová podpora obrábění
PKD	Polykrystalický diamant
PK	Procesní kapalina
HSS	Rychlořezná ocel
ŘK	Řezná keramika
SK	Slinutý karbid
LC	Snížený obsah uhlíku
VBD	Vyměnitelná břitová destička

Označení	Jednotka	Legenda – symboly
a_p	[mm]	Axiální hloubka řezu (Hloubka záběru)
l_n	[μm]	Celková měřená dráha
$D_{\dot{\tau}}$	[mm]	Efektivní (řezný) průměr
k_{c1}	[MPa]	Jednotkový měrný řezný odpor
R_{max}	[μm]	Maximální hloubka drsnosti
h_{max}	[mm]	Maximální šířka třísky
R_z	[μm]	Maximální výška profilu
D_m	[mm]	Maximálním průměr nástroje
k_c	[MPa]	Měrný řezný odpor
h_N	[mm]	Naměřená výška
Z_V	[μm]	Nejhlubšího místa drsnosti

R_t	[μm]	Největší hloubka drsnosti
n	[ot/min]	Otáčky
F_p	[N]	Pasivní síla
f_n	[mm/ot]	Posuv na otáčku
f_z	[mm/zub]	Posuv na zub
E_e	[J]	Práce řezného procesu
a_e	[mm]	Radiální hloubka řezu (Šířka záběru)
F_{CN}	[N]	Radiální složka síly
h_r	[mm]	Referenční výška bloku
v_c	[m/min]	Řezná rychlost
F_C	[N]	Řezná síla
R	[N]	Řezný odpor
F_x	[N]	Síla působící v ose X
F_y	[N]	Síla působící v ose Y
F_z	[N]	Síla působící v ose Z
a_{pi}	[mm]	Skutečná hloubka řezu
S_i	[mm ²]	Skutečný průřez třísky
R_a	[μm]	Střední aritmetická odchylka profilu
R_{SM}	[μm]	střední šířka rýh
σ_{\perp}	[MPa]	Tahové napětí ve směru posuvu
σ_{\parallel}	[MPa]	Tahové napětí ve směru řezu
h_T	[mm]	Teoretická výška bloku
$Q_{\text{čelo}}$	[J]	Tepla vzniklé v oblasti čela nástroje
Q_{PIEl}	[J]	Tepla vzniklé v oblasti plastické a elastické deformace
$Q_{\text{Nástroj}}$	[J]	Teplo odvedené nástrojem
Q_{Obrobek}	[J]	Teplo odvedené obrobkem
$Q_{\text{Prostředí}}$	[J]	Teplo odvedené řezným prostředím
$Q_{\text{Třísky}}$	[J]	Teplo odvedené třískou
$Q_{\text{Hřbet}}$	[J]	Teplo vzniklé na přechodové ploše obrobku
Q_e	[J]	Teplo vzniklé při obrábění
Z_p	[μm]	Výška nejvyššího vrcholu drsnosti
l_r	[μm]	Výška profilů drsností jednotlivých měřicích drah
HRC	[HRC]	Zkouška tvrdosti dle Rockwella

1 Úvod

Nacházíme se v době, kdy se zvyšují požadavky na součástky, z čehož vyplývá i rozvoj materiálů, nástrojů, strojů a postupů pro jejich zpracování. Tyto oblasti jsou součástí rozvoje všech průmyslových odvětví od farmaceutického, přes zemědělský a potravinářský až po strojírenský průmysl.

Jednou z oblastí, která prošla velkým rozvojem je vývoj materiálů, kam spadá rozvoj superslitin, které splňují vysoké požadavky výrobců a zákazníků. Jedná se o lehké, ale zároveň pevné materiály s vysokou odolností a velmi dobrými mechanickými vlastnostmi a dlouhou životností. Tyto materiály jsou proto hojně využívány v leteckém či energetickém průmyslu pro jejich vlastnosti, které představují silnou finanční úsporu. Pro účely této diplomové práce se budu soustředit na niklové slitiny, které jsou známé v širší společnosti pod obchodními názvy jako Monel, Incoloy či Inconel. V experimentální části se budu věnovat konkrétním niklovým slitinám a Inconel 713.

Jedná se o velmi kvalitní materiály obsahující legující prvky, které přispívají k lepší struktuře, každopádně mají i negativní dopad z pohledu zpracování. Legující prvky, které jsou zde obsaženy rapidně zhoršují obrobiteľnost, díky čemuž tyto materiály řadíme do kategorie těžkoobrobiteľných materiálů. Hlavními důvody jsou především nízká tepelná vodivost a pevnost, která se udržuje s rostoucí teplotou až do kritické hodnoty. Tento jev má za následek rychlé opotřebení nástroje při porovnání s obráběním běžného kovového materiálu.

Při obrábění je třeba zvolit vhodnou konstrukci nástroje, materiál nástroje a geometrii řezné části. Každý z těchto aspektů nástroje je důležité důkladně vyhodnotit a určit, jak bude nástroj vypadat. V případě obrábění těžkoobrobiteľných materiálů jde zejména o zajištění lepšího odvodu tepla a kvalitnějšího řezu z čehož vyplývá i hospodárnost ve výrobě. Pro eliminaci různorodosti výsledku bude nástroj osazen vždy pouze jednou vyměnitelnou břitovou destičkou.

Cílem této diplomové práce je sledování obrobiteľnosti niklových slitin při vycentrovaném frézování. Experimentální část je zaměřena na obrábění niklové superslitiny Inconel 713LC. Výsledkem bude lepší pochopení chování materiálu při odlišných řezných podmínkách a v různých řezných prostředích. Pro experiment bylo uvažováno o niklové superslitině Inconel 718, každopádně o ní je již mnoho vědeckých prací, zatímco o Inconel 713LC nikoli.

2 Metody obrábění

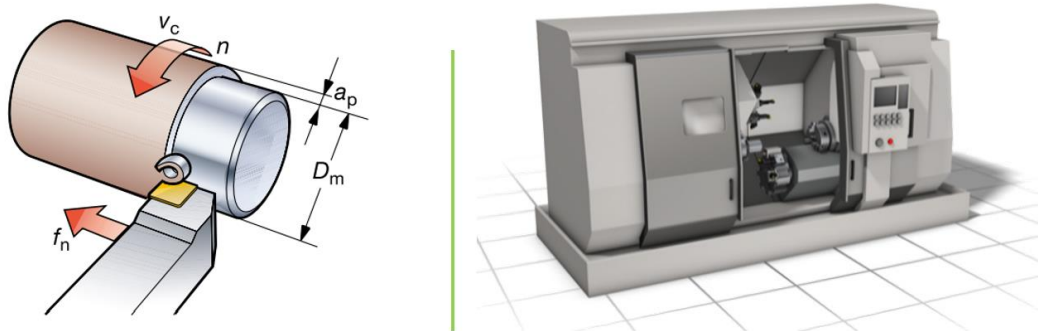
Pro dosažení požadovaného rozměru a tvaru obrobku se využívá technologií konvenčního a nekonvenčního obrábění. Mezi konvenční technologie obrábění patří soustružení, frézování, vrtání či broušení. Pod nekonvenční technologie obrábění se řadí elektroerozivní obrábění, elektrochemické či obrábění za pomoci paprsku plazmy, laseru nebo svazku elektronů. Niklové slitiny spadají do kategorie těžkoobrobitelných materiálů především kvůli stálosti mechanických vlastností za vysokých teplot a nízké tepelné vodivosti. Pro přesné a precizní obrobení součásti je třeba zvolit vhodné kombinace rezných parametrů, správné strategie obrábění, vhodné procesní kapaliny a nástroje, který bude schopen obrobit danou součást.

2.1 Soustružení

Soustružení je technologie obrábění, která spočívá v obrábění rotačních součástí za použití většinou jednobřítých nástrojů. Jedná se o univerzální technologii pro obrábění vnějších i vnitřních válcových, kuželových či tvarových ploch.

Soustružení je jednou z nejstarších technologií obrábění, kde hlavním rezným pohybem je rotace obrobku, vedlejším rezným pohybem je posuv nástroje po obrobku a přísuv, kterým zajišťujeme hloubku řezu (Obr. 1). Pro soustružení běžných strojních součástí se využívá univerzálního hrotového soustruhu. Dnešním trendem je využití soustružnických center pro přesnou a precizní výrobu strojních součástí na jedno upnutí a za pomoci jednoho stroje.

Soustružení těžkoobrobitelných materiálů představuje nejméně problematickou část z pohledu konvenčního obrábění. Pro tyto materiály je třeba využít nástroj, který zajistí vysoké tvrdosti i při vyšších teplotách. [14, 18]



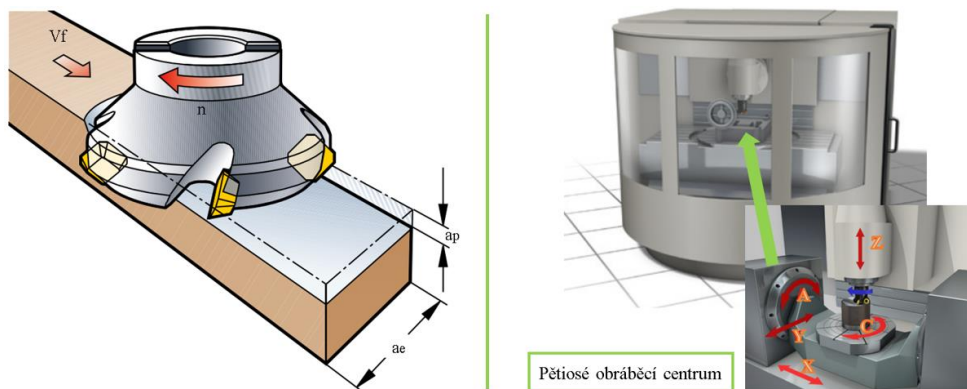
Obr. 1 Technologie soustružení včetně obráběcího centra (Upraveno) [18]

2.2 Frézování

Frézování je technologie obrábění, která spočívá v odebírání materiálu obrobku, za pomoci vícebřitého nástroje, který se otáčí. Jedná se o technologii, kterou lze vytvořit například rovinné plochy, tvarové plochy, drážky či ozubená kola. S příchodem CAM programů došlo k velkému pokroku, hlavně v efektivitě obrobení a zjednodušení obrobení součástí.

Frézování je mladší technologií oproti soustružení, kde hlavní řezný pohyb vykonává nástroj, zatímco vedlejší přímočarý či kruhový pohyb provádí obrobek. Dalším pohybem, který je prováděn obrobkem je přísuv, čímž zajišťuje axiální a_p a radiální a_e hloubky řezu (Obr. 2). Pro frézování běžných strojních součástí se využívá svislé konzolové frézky. V dnešní době se spíše přechází na číslíkově řízená centra či Pětiosé frézky, které zvládají zefektivnit výrobu součástí.

Frézování těžkoobrobitelných materiálů představuje obtížnou volbu zpracování obrobku kvůli tomu, že se převážně jedná o přerušované řezy. Při obrábění je třeba zajistit přesnost pohybu obrobku na velké manipulační ploše a docílení hladkého povrchu součástí. [14, 18]



Obr. 2 Čelní frézování (Upraveno) [18]

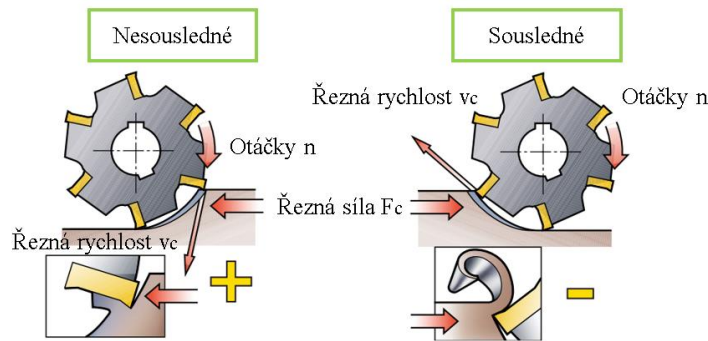
2.2.1 Kinematika při frézování

Kinematika při frézování se dělí na frézování sousledné a nesousledné (Obr. 3).

Při sousledném frézování se fréza otáčí ve směru posuvu obrobku, kdy úběr třísky probíhá plynule od maxima do minima. Tento způsob úběru třísky má pozitivní vliv na snížení řezné síly, díky čemuž lze použít jednoduššího upínacího přípravku. Největší nevýhodou jsou především silové rázy při záběru zubu. Především se tento problém vyskytuje při použití šikmých zubů.

Při nesousledném frézování se fréza otáčí proti směru posuvu obrobku, kde dochází k zadrhávání třísky při jejím úběru z nulové hodnoty do maximální. Z tohoto důvodu se zvyšují

nároky na upínací síly, protože má nástroj tendenci vytrhnout obrobek z přípravku. Tento problém souvisí i s velkým opotřebením materiálu čímž se i zhoršuje kvalita povrchu. [14, 18]



Obr. 3 Rozdíl mezi sousledným a nesousledným frézováním (Upraveno) [18]

2.3 Procesní kapalina (PK)

Pomocí procesní kapaliny lze výrazně ovlivnit proces obrábění a tím i zlepšit trvanlivost nástroje a zlepšit kvalitu povrchu. Nejdůležitějšími funkcemi PK jsou chladicí, mazací a čisticí účinky. Díky chladicím účinkům dochází k odvodu tepla z místa řezu jinou formou než za pomoci třísky, nástroje a obrobku, popřípadě okolí. Mazací a čisticí účinky PK pak snižují tendence tvorby nárůstku a zlepšují vlastnosti povrchové vrstvy.

Využití PK je důležité v případě, že se obrábí těžkoobrobitelné materiály, které jsou tvrdé, houževnaté a mají špatnou tepelnou vodivost. Při použití správného způsobu chlazení lze docílit vyšší produktivity. Využitím PK dosahujeme lepších výsledků obrobeného povrchu oproti obrábění bez PK.

Mezi nejčastější konvenční PK patří PK smíšená s vodou a řezné oleje. V dnešní době jsou spíše tendence přecházet na udržitelné obrábění. Udržitelné obrábění je šetrnější k přírodě, je nezávadné, a nedochází k plýtvání zdrojů. Udržitelné obrábění se dělí do tří kategorií, obrábění bez použití PK, minimální množství maziva (MQL) a kryogenní obrábění (Obr. 4). [20, 27]



Obr. 4 Rozdělení udržitelného obrábění (Upraveno) [20]

Prvním způsobem je obrábění bez použití procesní kapaliny tzv. suché obrábění. Tento ekologický trend přináší výhody jako je eliminace nákladů na pořízení, recyklaci a skladování PK. Další výhodou je, že nedochází ke kolísání teplot na povrchu nástroje. To je přínosné hlavně při obrábění řeznou keramikou, která nesnese velké změny teplot. Na druhou stranu dochází k vyšším teplotám v místě řezu a tím i snížení trvanlivosti nástroje. [20, 27]

Další variantou, která se využívá za účelem snížení ekologické zátěže je minimální množství maziva (MQL). Jedná se o technologii, při které se spotřebuje nižší množství maziva na bázi oleje či chladicí kapaliny. Při tomto způsobu se tak využívá předem stanoveného množství maziva, čímž nedochází k tak zásadní kontaminaci půdy oproti klasickému využití chladicí kapaliny. [20]

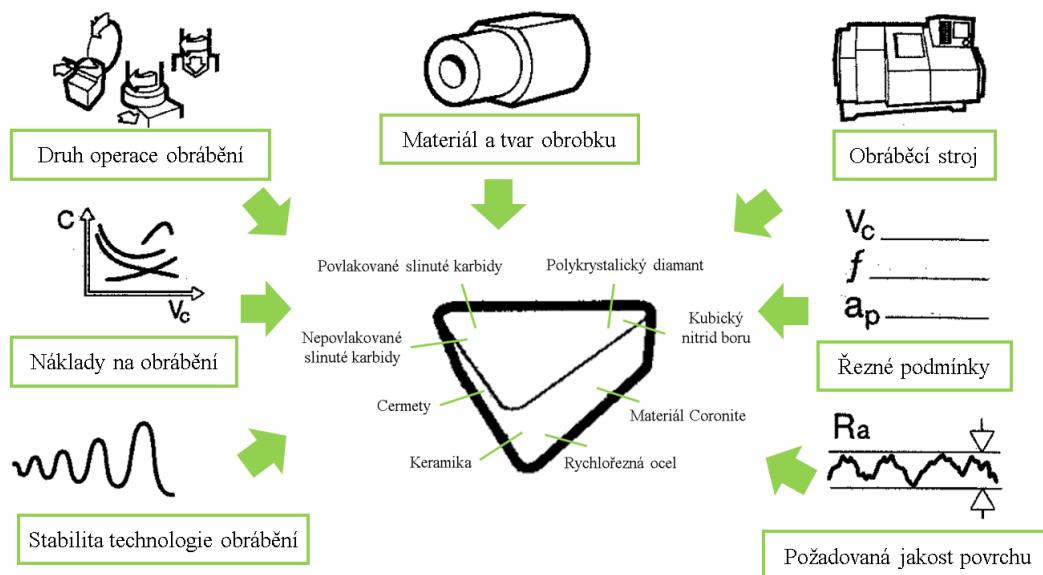
Kryogenní chlazení je jednou z nejlepších alternativ oproti konvenčním PK. Nejčastěji se využívá dvou variant, působení tekutého dusíku LN_2 nebo paprsku oxidu uhličitého CO_2 , které slouží pro chlazení nástroje a obrobku. Jednou z největších výhod LN_2 je, že jeho teplota se pohybuje okolo $-196^\circ C$, zatímco bod varu permanentních plynů bývá okolo $-180^\circ C$. Další možností kryogenního chlazení je použití kapalného paprsku CO_2 s teplotou $-78^\circ C$. Při obrábění těžkoobrobitelných materiálů se často využívá kryogenního chlazení, pro snížení termického zatížení břitu nástroje, které způsobuje opotřebení. [20, 28].

3 Nástroj

V současné době se přednostně využívají monolitní nástroje či nástroje osazené vyměnitelnou břitovou destičkou (VBD). Pro nástroje platí, že musí být tvrdší nežli obráběný materiál, přitom musí odolávat vysokým teplotám. Pro niklové slitiny se nejčastěji využívá slinutých karbidů (SK), řezné keramiky (ŘK), kubického nitridu bóru (KBN) popřípadě při dokončovací operaci lze využít i polykrystalického diamantu (PKD). Doposud se nepodařilo vytvořit materiál, který by vyhovoval všem požadavkům. Velkou inovací pro obrábění jsou povlaky, které se začaly nanášet na řeznou část nástroje, čímž lze docílit lepších vlastností oproti nepovlakovaným. [6, 22]

3.1 Volba materiálu řezného nástroje

Pro obrábění niklových slitin je třeba zajistit, aby nástroj odolával vyšším řezným teplotám a byl tvrdší oproti obráběnému materiálu. Požadavky na nástroj jsou kladeny především kvůli vlastnostem materiálu, který má vysokou pevnost i za vysokých teplot. Pro hrubovací operace se využívá zvláště SK, které zvládají přerušovaný řez a velké hloubky řezu. Kvalitnějším materiálem, určeným pro hrubovací operace je KBN, který je tvrdší ale dražší než SK. Pro obrábění na čisto se přednostně využívá ŘK, která je tepelně stabilní a dosahuje vysokých tvrdostí, každopádně není vhodná pro přerušované řezy. Firmy se často předháněly ve vývoji lepších materiálů, které budou zajišťovat houževnatost rychlořezné oceli (HSS) a tvrdost PKD, kde při volbě řezného nástroje je třeba brát v potaz základní faktory (Obr. 5). [6, 22]



Obr. 5 Faktory ovlivňující volbu řezného nástroje (Upraveno) [22]

3.1.1 Slinuté karbidy

Slinuté karbidy se využívají většinou pro hrubovací operace, protože odolávají vysokým řezným a posuvovým rychlostem a nemají problém s vyšší hloubkou řezu a přerušovanými řezy. Jedná se o velký pokrok oproti rychlořezným ocelím, kde lze nastavit až 5ti násobek řezné rychlosti. Jedná se o velmi přesné výrobky (velikost, tvar a složení), proto je nutná výroba pomocí práškové metalurgie pro zajištění potřebné mikrostruktury. Slinuté karbidy si drží tvrdost (88–98 HRC) až do teploty 1000°C. Podle složení se dělí SK do 3 skupin: [9]

Skupina K: Jednokarbidové – WC + Co

Skupina P: Dvojkarbidové – WC + TiC + Co

Skupina M: Kombinované – WC + TiC + TaC/NbC + Co

Slinuté karbidy se ve výjimečných případech používají bez povlaku, každopádně dominantní zastoupení nástrojů je s povlakem pro zajištění lepších vlastností obrobenej plochy a zároveň zvýšení životnosti nástroje, čímž se sníží náklady při výrobě. [9]

3.1.2 Řezná keramika

Destičky z řezné keramiky jsou využívány zejména při dokončovacích operacích. Pro hrubovací operace se nevyžívají především kvůli problému při obrábění většího průřezu třísky při přerušovaném řezu, kde může dojít díky vysoké křehkosti k lomu destičky. Destičky jsou velmi tvrdé a odolávají teplotám až do 1600°C. Při vysokých teplotách zároveň vynikají otěruvzdorností, proto lze využít vysoké řezné rychlosti při obrábění. Řezná keramika se všeobecně dělí do následujících skupin: [9, 10]

Keramika na bázi oxidu hlinitého (Al_2O_3): tato skupina má nejlepší termochemickou stabilitu a vysokou odolnost proti opotřevení, což je vykoupeno nízkou odolností proti vydírání ostří.

Smíšená keramika – ($Al_2O_3 + ZrO_2$, $Al_2O_3 + ZrO_2 + CoO$): jedná se o keramiku, která je vyztužena přísadou kubických karbidů či karbonitridy (TiC, Ti (C, N), čímž je dosažena vyšší houževnatost a lepší tepelná vodivost.

Vyztužená keramika – ($Al_2O_3 + TiC$, $Al_2O_3 + ZrO_2 + TiC \dots$): jedná se o tzv. Whiskery, které obsahují karbidy křemíku (SiC_W), čímž dosahuje vyšší houževnatosti a dovoluje použití řezné kapaliny, díky čemuž jsou tyto keramiky ideální pro obrábění niklových slitin.

Keramika na bázi nitridu křemíku – ($Si_3N_4 + Y_2O_3$, $Si_3N_4 + TiC$, Sialony): jedná se o materiály, které díky podlouhlým krystalům tvoří schopnost samovyztužení a zároveň zajišťují

vysokou houževnatost. Kvůli své chemické nestabilitě je vhodná především pro obrábění litiny s lupínkový grafitem. [9, 10]

3.1.3 Kubický nitrid boru

Kubický nitrid boru se využívá jako řezný materiál podobný diamantu. Má velmi příznivé vlastnosti, především extrémní tvrdost, která je stabilní až do teploty 2000°C. Dosahuje vysoké odolnosti proti opotřebení, ale je relativně křehký. Mechanické vlastnosti jsou především závislé na obsahu KBN, kde s rostoucím objemem KBN roste houževnatost, tepelná vodivost či tvrdost. Na druhou stranu se snižuje pevnost v tlaku a hustota. Přínosné vlastnosti jsou vykoupěny cenou materiálu. Je vhodný hlavně pro dokončovací operace, především pro obrábění tepelně odolných slitin. [14]

3.2 Konstrukce řezných částí nástrojů

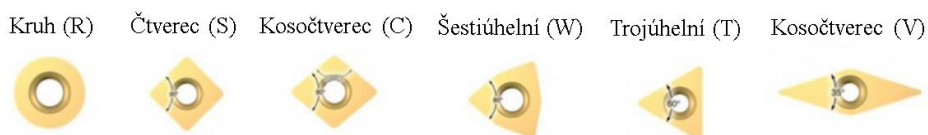
Nástroje osazené VBD se v dnešní době používají především kvůli nízké pořizovací ceně destičky, snadné výměně a možnosti využít více řezných hran destičky. V případě monolitního nástroje jsou velkou výhodou malé rozměry nástroje, díky čemuž nevznikají tak vysoké náklady na výrobu nástroje. Při volbě vhodné konstrukce je třeba dbát na velikosti nástroje, produktivitu výroby, technologii výroby, popřípadě na další podmínky odvozené od konkrétní situace. [9]

3.2.1 Monolitní nástroje

Monolitní nástroje hrají velkou roli jak v historii, tak v dnešní době. Velkou výhodou je výroba malých nástrojů pro obrábění. Příkladem může být frézování lopatek, které mají zaoblení, kde se běžný nástroj nedostane. Tyto prvky není možné obrábět pomocí vyměnitelných břitových destiček kvůli robustnosti upínacího mechanismu. [9]

3.2.2 Nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami

Použití VBD je vhodné pro sériovou výrobu především kvůli jednoduchosti upnutí. Velkou výhodou jsou mechanismy upínání, které zaručují upnutí různých tvarů destiček. Vyrábí se destičky s otvorem (především pro houževnaté materiály) a destičky bez otvoru (křehké materiály), kde se využívá různého upínacího mechanismu. Při použití VBD se eliminuje potřeba přebrousit břit nástroje. Tvar musí být v souladu s úhlem hlavního nastavení ostří, a měl by zajistit použití všech břitů na destičce. Destičky se dělí dle tvaru a velikosti úhlu špičky (Obr. 6). [9, 11].



Obr. 6 Rozdělení destiček dle tvaru (Upraveno) [11]

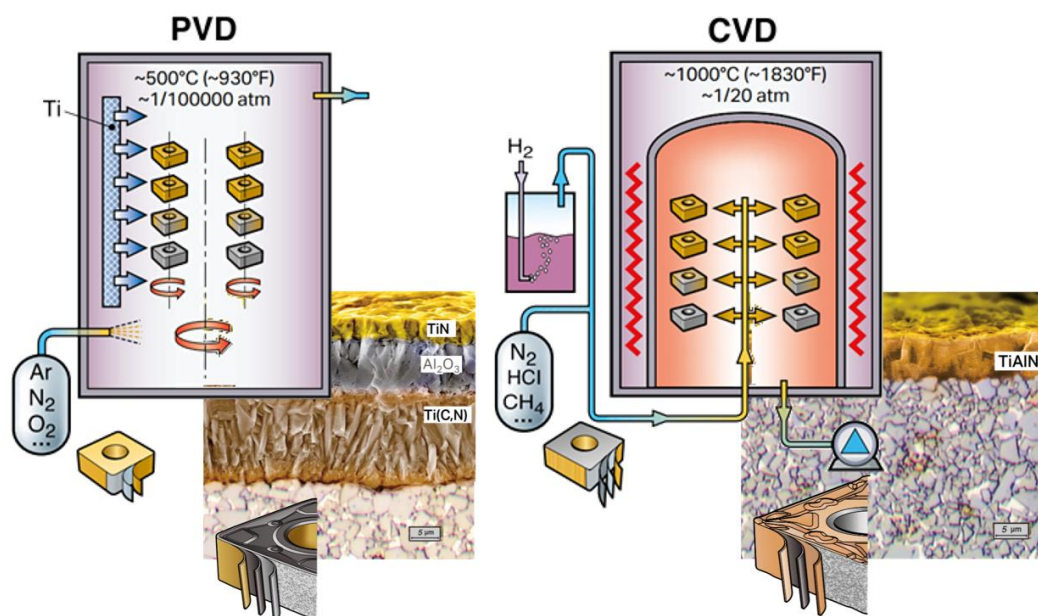
Největší úhel špičky má destička kruhového tvaru (R) a nejmenší destička kosočtvercového tvaru (V). S rostoucím úhlem špičky je destička pevnější, čímž je možné použít vyšších posuvových rychlostí. Nežádoucím je však nárůst řezných sil a vibrací v řezné soustavě. Použitím malého úhlu špičky se snižuje sklon ke vzniku vibrací, dochází k lepšímu přístupu do místa řezu a má razantně nižší řezné síly. [9, 11]

3.3 Povlakování

Povlakování je nanášení vrstev materiálu na povrch pro zlepšení mechanických, fyzikálních či chemických vlastností. Systém povlakování se skládá ze 3 hlavních částí: povrch materiálu, mezivrstva (která zajišťuje přilnavost) a samotný povlak. Povlakuji se veškeré řezné materiály, například při povlakování ŘK je cílem zajistit vyšší houževnatost. [14, 18]

CVD – Jedná se o nejrozšířenější typ povlaků, kde nanášení na řeznou část nástroje probíhá za pomoci různých plynů při teplotě nástroje okolo 1000°C. CVD povlaky jsou vhodné pro hrubovací nástroje kvůli možnosti více vrstev a rovnoměrnému nanesení na destičku.

PVD – Jedná se o přesné nanášení povlaků za pomoci odprašování, odpařování, či ionizací materiálu při poloviční teplotě, čímž dochází ke kopírování geometrie břitu. PVD povlaky jsou vhodné pro tvarově složité a dokončovací nástroje. [14, 18]



Obr. 7 Vizualizace struktury povlaků (Upraveno) [18]

Povlaky ovlivnily proces třískového obrábění pomocí zvýšení trvanlivosti nástroje a možnosti využít vyšší řezné rychlosti. Při správné kombinaci vrstev lze docílit lepší kvality obrobeného povrchu a obrábět hůře obrobitelné materiály. Do té doby, kdy povlaky nebyly používány hrála roli geometrie břitu a obráběný materiál, ale díky povlakům, které můžou

dosahovat až 200 vrstev se změnil celý svět. Při nanášení je třeba dbát na konkrétní potřeby vrstev, kde každý povlak nese odlišné vlastnosti (Tab. 1). [9, 14]

Tab. 1 Vlastnosti povlakovaných nástrojů [14]

Povlak	Tvrdost [HV]	Součinitel tepelné vodivosti [kW/mK]	Maximální teplota použití [°C]
TiN	2200	0,07	600
TiCn	3000	0,1	450
TiAlN	3300	0,05	800
Diamant	10000	2	600

3.4 Upínání nástrojů

Upnutím nástroje zajistíme požadovanou polohu nástroje a tím i tuhost soustavy pro zamezení defektů obráběného materiálu. Využívá se mnoha mechanismů v závislosti na zvolené technologii. Soustružení používá převážně mechanického upnutí pomocí ustavujících šroubů na nožové hlavě nebo upnutí do revolverové hlavy. Při frézování je možností více, lze využít tepelného, hydraulického, mechanického nebo nástrčného upnutí, které funguje na principu samosvornosti.

3.4.1 Upnutí soustružnického nože

Soustružnický nůž (Obr. 8) je upnutý za držák soustružnického nože pomocí ustavujících šroubů, které zajišťují nepohyblivost nože. Na noži je připevněna VBD, které má různou geometrii pro zajištění odlišného typu povrchu. Jedná se o obecný držák, převážně pro hrubovací destičky nebo dokončovací destičky. Volba správné geometrie nástroje může zajistit velkou výhodu při obrábění niklových slitin. V případě, že se využije kladného úhlu čela, eliminuje se tendence k pěchování třísky čímž zamezujeme tvorbě nárůstku a dochází k plynulému odřezávání třísky. [14, 18]

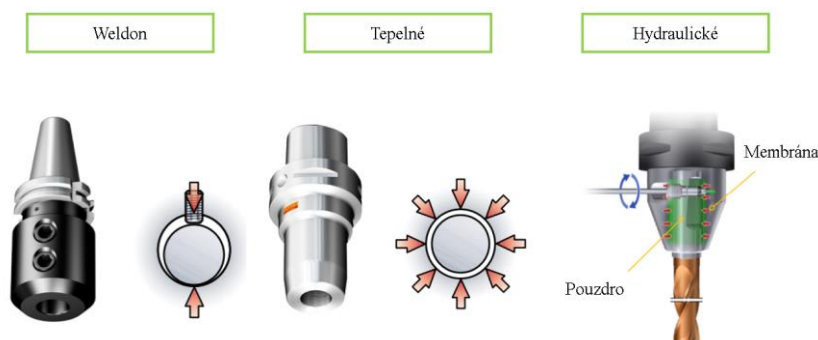


Obr. 8 Soustružnický nůž s destičkou (Upraveno) [18]

3.4.2 Upnutí frézy

Frézy se vyrábí s různými stopkami nástroje. Postupem času se měnily strategie, jak se dá upnout fréza, pro zajištění lepšího komfortu při obrábění. Snahou je zvyšování rezných rychlostí, které se neshodovali se starými způsoby zajištění. Pro upínání se využívaly dva způsoby, nástrčné upnutí frézy a upnutí za válcovou stopku. V případě nástrčného upínání se fréza upíná pomocí frézovacího trnu. Pro zajištění samosvornosti bylo využito morse kuželu (1:19) nebo metrického (1:20), kde kuželové plochy zajišťovaly přenos kroutícího momentu z frézovacího trnu do dutiny vřetene. [14]

Pro válcové stopky se využívá více variant, například kleštinové, hydraulické, weldon či tepelné upínání. První zmíněné je upínání do kleštiny, které se skládá z ocelového kaleného pouzdra kuželového tvaru a tažného šroubu. K sevření dochází šroubováním tažného šroubu, který vtáhne válcovou část do kuželové dutiny čímž zajistí správné sevření. Kleštiny se vyrábí v sadách, pro konkrétní rozmezí průměrů válcové stopky. Tento typ je každopádně na ústupu, spíše se využívá dalších variant (Obr. 9). [14, 18]



Obr. 9 Přehled držáků pro frézování (Upraveno) [18]

Weldon jsou nejjednodušší formou upínače, tedy cenově nejdostupnější. Jedná se o upínání za pomoci jednoho či dvou stavěcích šroubů, kde je potřeba dosáhnout přesné díry a stopky nástroje. Existuje druhá varianta, whistle notch, kde jsou otvory pro stavěcí šrouby nakloněné přibližně o 2°. Nevýhodou tohoto systému je nízká životnost nástroje a horší kvalita povrchu. [14, 18]

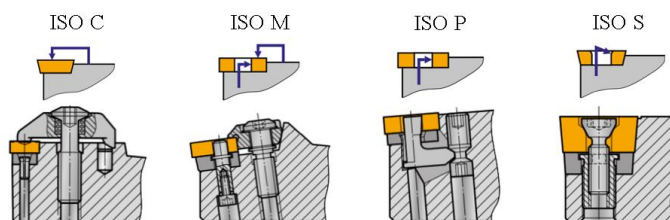
Tepelné upínače fungují na principu tepelné dilatace upínacího pouzdra. Po rychlém ohřátí, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění nástroje se do pouzdra vloží nástroj, který má nižší koeficient tepelné roztažnosti než upínač. Po ustavení je třeba soustavu chladit proudem vzduchu. To zajistí bezpečné a přesné upnutí při použití malých průměrů stopky oproti ostatním metodám. [14, 18]

Hydraulický upínač funguje na principu zvyšování tlaku média, které působí na stopku nástroje. Utahováním šroubu, který je zakončený válcovou plochou se stlačuje médium, jež rovnoměrně tlačí na pouzdro, čímž dochází k upnutí nástroje. Jedná se o nejlepší způsob upnutí

na trhu, především kvůli možnosti opakovaného použití bez deformace stopky nástroje a jednoduchosti při upínání, která zajišťuje velkou bezpečnost upnutí. Nevýhodou je rozsah upnutí, kde lze upnout prakticky pouze jeden průměr a nelze používat stopky pro weldon a whistle upnutí. [14, 18]

3.4.3 Upínací mechanismus VBD dle ISO

Vyměnitelné břitové destičky je potřeba mechanicky připevnit k držáku za pomoci mechanismu, který je volen podle druhu operace a velikosti obrobku a destičky. Z tohoto důvodu se držáky pro VBD vyrábí s lůžkem, které zajišťuje stykové (opěrné) plochy mezi držákem a destičkou. V případě, že je destička uložena v lůžku, je potřeba zvolit vhodný upínací mechanismus, aby vyhovoval technologickému postupu při obrábění a zajišťoval stabilitu soustavy. Pro různé operace je třeba zvolit vhodné upnutí. Mechanismy pro upínání se dělí na ISO C, D, G, F, M, P, S, W (Obr. 10). [12]



Obr. 10 Upínací systémy (Upraveno) [12]

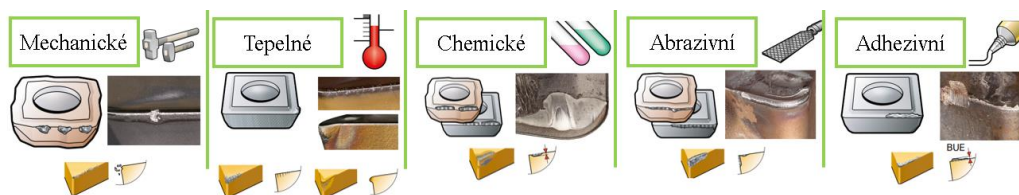
Po zvolení destičky je nutno znát i doporučený způsob upnutí, který je odvozen od použité technologie. Při obrábění existují systémy C a S (Obr. 10), které se dají využít jak pro soustružení, tak pro frézování. Kvůli univerzálnosti budou popisovány pouze tyto dva systémy. [12]

Systémové upínání ISO C je vhodný pro jakékoli VBD bez otvoru. Nezáleží na tom, jakou geometrii má destička (pozitivní, negativní) ale jestli se jedná o vnitřní či vnější obrábění. Jedná se o nejstarší upínací systém pro VBD. Destička je zajištěna šroubovanou svorkou, která zatlačuje destičku do lůžka přes čelní plochu. Tím, že je destička zajištěna pouze přes čelo a nedochází k zajištění destičky z boku se snižuje přesnost při ustavení destičky v lůžku. Nejčastěji je využíváno pro ustavení keramické destičky. [12]

Systémové upínání ISO S je vhodné pro nástroje malého průřezu jak pro vnitřní, tak vnější obrábění. Destička je upnuta pomocí speciálního šroubu, který dosedá do kuželového zahloubení v jejím otvoru což, zajišťuje vycentrování destičky. Kvůli své velikosti je vhodné pro obrábění, kde je omezený prostor do stran, například při tvarovém obrábění. Tento způsob upnutí je velmi výhodný, zejména protože nepřekáží při odvodu třísky. Velkou nevýhodou jsou vysoké nároky na přesnost výroby lůžka a otvoru pro šroub. [12]

3.5 Opotřebení nástroje

Obráběním součásti dochází ke vzniku mechanických a tepelných vlivů, které působí na geometrii břitu nástroje. Působením těchto vlivů dochází k postupné změně geometrie řezné hrany (zvětšování poloměru ostří), která se nazývá opotřebení nástroje. U břitu nástroje dochází k mechanickému, tepelnému, chemickému a brusnému opotřebení nebo také k opotřebení způsobenému navařováním cizích částic na břit (Obr. 11). Při obrábění dochází často k abrazivnímu otěru především kvůli karbidům, které mají stejnou či vyšší tvrdost než materiál břitu nástroje. Opotřebením břitu dochází ke zhoršení odvodu tepla, mění se geometrie břitu a zároveň se mění struktury nástroje. [14, 15, 18]



Obr. 11 Vizualizace opotřebení VBD (Upraveno) [18]

V závislosti na obráběném materiálu a řezných parametrech rozdělujeme mechanismy opotřebení břitu na:

Abrazivní opotřebení – jedná se o velmi rozšířené opotřebení, které se vyskytuje převážně při nižších řezných rychlostech. Dochází k němu působením vměstků (karbidů), jež jsou zejména tvrdší části v obráběném materiálu, kde záleží na tvrdosti břitu nástroje.

Adhezní opotřebení – při adhezním opotřebení dochází k tlakovému navařování částic obráběného materiálu. Dochází tak ke tvorbě nárůstku mezi břitem a třískou, který může vést až ke znehodnocení nástroje formou vydrolení či vylomení břitu.

Difuzní opotřebení (chemické opotřebení) – vzniká kvůli afinitě některých prvků mezi nástrojem a obrobkem, kde hraje velkou roli jejich složení. Dochází tak k přestupu atomů prvku z nástroje na obráběný materiál a zpět z čehož vzniká nežádoucí chemické složení.

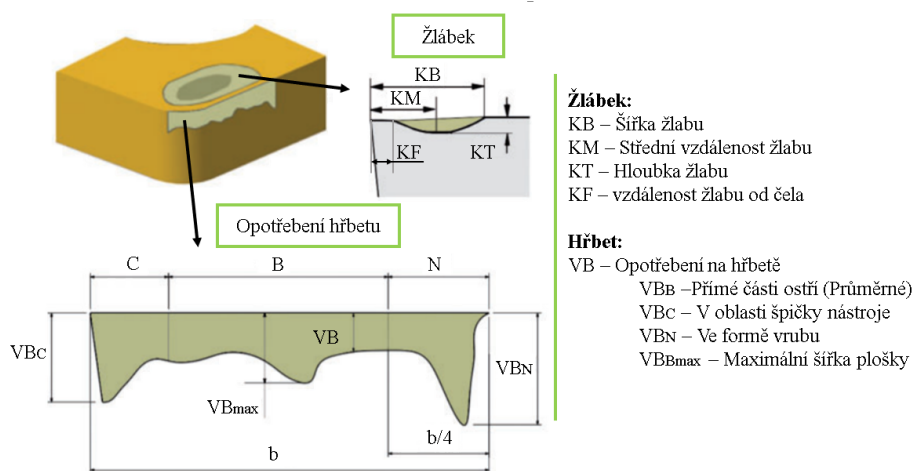
Oxidace (chemické opotřebení) – důsledkem vysokých teplot řezného prostředí a určité koncentraci kyslíku v okolí dochází ke vzniku sloučenin, které vedou k degradaci řezného materiálu.

Křehký lom (mechanické opotřebení) – dochází k tomu v důsledku zvýšení řezného odporu způsobeným například přerušovanými řezy, čímž dojde až k vylomení břitu, popřípadě vzniku povrchových trhlin.

Plastická deformace (tepelné opotřebení) – dochází k vysoké koncentraci napětí před a pod břitem nástroje, což má za následek vznik pružné a plastické deformace. Deformace je způsobena

kumulací mechanického a tepelného zatížení, které může vést až k lavinovému opotřebení. [14, 15, 18]

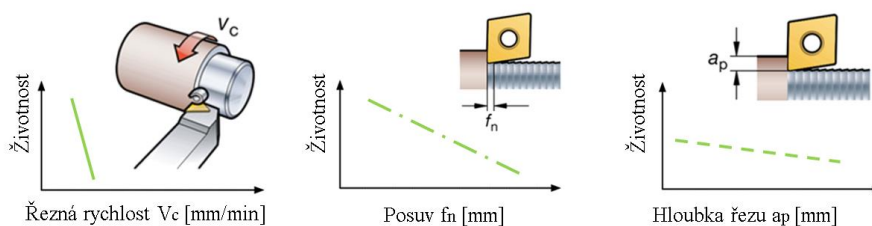
Vyhodnocení míry opotřebení řezné části nástroje vychází z mezinárodní normy ISO 3685:1993 o zkoušení trvanlivosti soustružnických nástrojů s jednou řeznou hranou. Norma obecně popisuje vnější projevy opotřebení, tudíž ji lze využít nejen pro monolitní soustružnické nástroje ale i pro frézovací nástroje s VBD. Měření opotřebení se dělí na přímé (hmotnostní, radioizotopová, stínová...) a nepřímé (nárůst sil, teploty, výkonu, zhoršení drsnosti...). Nejčastěji se provádí přímou metodou pomocí mikroskopu, kde se vyhodnocuje hloubka opotřebení (Obr. 12). [15, 30, 31]



Obr. 12 Kritéria opotřebení dle normy ISO 3685:1993 (Upraveno) [31]

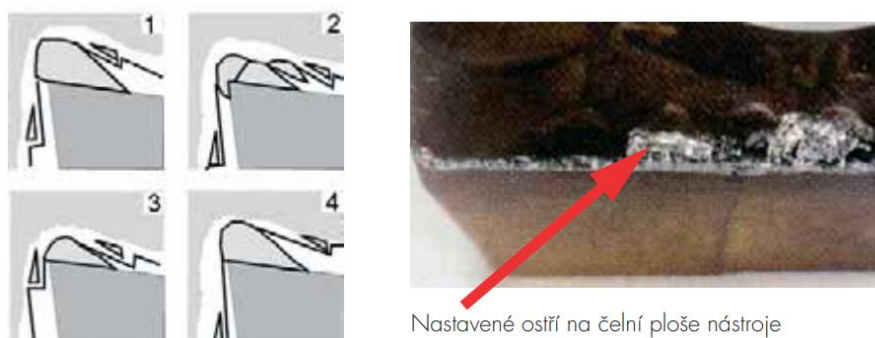
3.6 Trvanlivost

Trvanlivost je součet všech strojních časů, po které je nástroj schopen efektivně obrábět daný obrobek do stanovené hodnoty opotřebení. Hodnota opotřebení je dána výrobcem, který vytvoří doporučené řezné parametry pro použití konkrétního nástroje. Trvanlivost nástroje se liší u monolitních nástrojů, které je možno znovu naostrit a u VBD, kde může být použito až 8 řezných hran. V případě životnosti se jedná o součet všech trvanlivostí nástroje neboli celkovou dobu funkce nástroje od prvního uvedení do činnosti až do výměny nástroje. V průběhu obrábění mají významný vliv řezné podmínky na trvanlivost potažmo životnost nástroje (Obr. 13). [15, 18]



Obr. 13 Vliv řezných podmínek na životnost nástroje (Upraveno) [18]

V případě soustružení je zřejmé, že řezná rychlost má zásadní vliv na životnost nástroje. Proto je třeba zvolit vhodné řezné podmínky tak, aby bylo využito plného potenciálu stroje a nástroje. Při využití nízké řezné rychlosti dochází k nevyužití plného potenciálu stroje a nástroje což vede k nehospodárnosti a tvorbě nárůstku. V průběhu obrábění dochází k pravidelnému střídání stabilního a nestabilního nárůstku, kde stabilní sice zhoršuje drsnost povrchu, ale zlepšuje trvanlivost řezné části nástroje. Ke tvorbě nárůstku dochází působením tlaků mezi čelem břitu nástroje a třískou, která se navaňuje na břit, čímž dochází k tvorbě nové geometrie břitu (Obr. 14). [9, 15, 18]



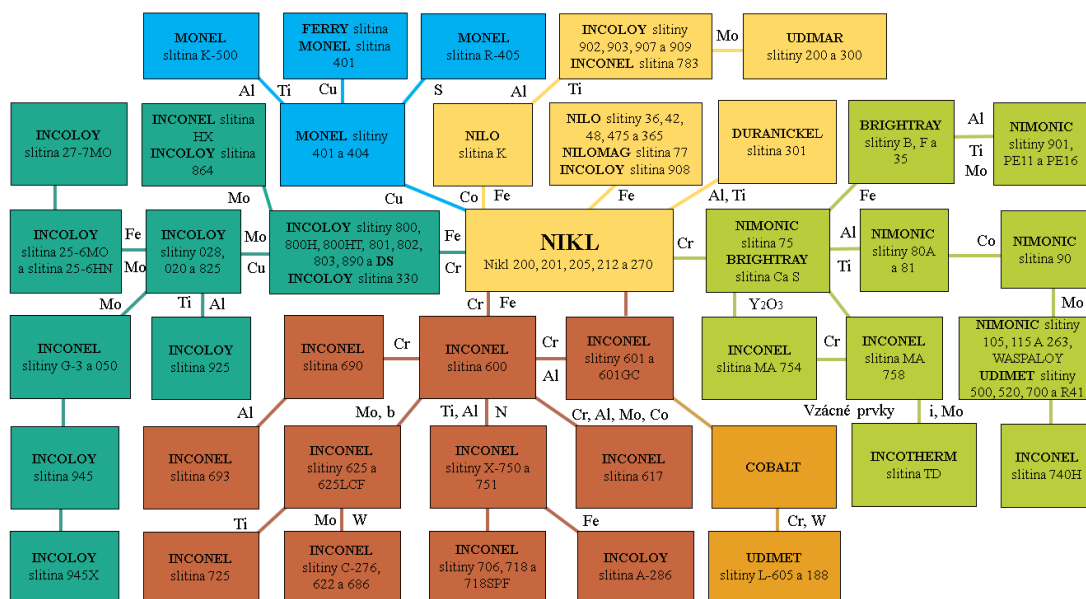
Obr. 14 Schéma tvorby nárůstku [14]

Dalším parametrem, který má poměrně silný vliv na trvanlivost nástroje je posuv, kde je snaha používat hodnoty posuvu maximálně do poloviny hodnoty zaoblení břitu. Nicméně u niklových superslitin se spíše využívá vyšších posuvů, především kvůli legujícím prvkům, díky kterým dochází k deformačním zpevněním materiálu. [9, 15, 18]

Hloubka řezu má menší vliv na trvanlivost nástroje oproti řezné rychlosti a posuvu, každopádně má stejně významný vliv na obrábění. Při obrábění pomocí VBD je třeba volit větší hloubky řezu, než je poloměr špičky destičky pro správnou tvorbu třísky. Použitím malé hloubky řezu dochází k nehospodárnosti výroby způsobené vyšším strojním časem. Při použití minimální hloubky řezu dochází k vibracím způsobeným zpevňováním povrchové vrstvy z předchozího úběru. Při použití velké hloubky řezu je potřeba vyšších řezných sil, s čímž souvisí i velké náklady na výkon stroje. Kvůli velkým řezným silám může dojít až k lomu nástroje. [9, 15, 18]

4 Niklové slitiny

Niklové slitiny se využívají hlavně kvůli odolnosti proti korozi a udržení svých mechanických vlastností i za vysokých teplot. Dělí se dle dominantně zastoupených legujících prvků obsažených ve slitině. Firma Special Metals sestavila strom niklových slitin (Obr. 15), kde modře je vyznačena linie slitin Ni-Cu a zeleně Ni-Cr. Následují slitiny legované větší škálou prvků jako například Inconely, které budou objektem této diplomové práce. Všechny niklové slitiny se charakterizují vlastnostmi jako je vysoká pevnost a zároveň zaručená vysoká žáruvzdornost a žarupevnost. [2]



Obr. 15 Rozdělení slitin niklu a obchodní názvy (Upraveno) [2]

4.1 Čistý nikl

Nikl se v přírodě vyskytuje jako stříbřitě bílý kov lesklého vzhledu. Jedná se o sedmý nejrozšířenější kov na zemi, který je výjimečný svou tvrdostí, tvárností či kujností. Na druhou stranu má velmi nízkou tepelnou a elektrickou vodivost. V průmyslu je využíván především kvůli své korozní odolnosti v zásaditém prostředí (naopak není odolný vůči silným kyselinám). Vyhledáván je také pro schopnost tvořit slitiny s ostatními kovy. [1]

V přírodě ho lze objevit v několika formách. Nález v ryzí formě je vzácný, především se nachází ve sloučeninách s jinými prvky čili takzvanými laterity (oxidické, silikátové, sulfidické či arsenidové rudy). Nejčastěji lze nikl nalézt společně se železem v pozůstatcích komet a meteoritů. [1]

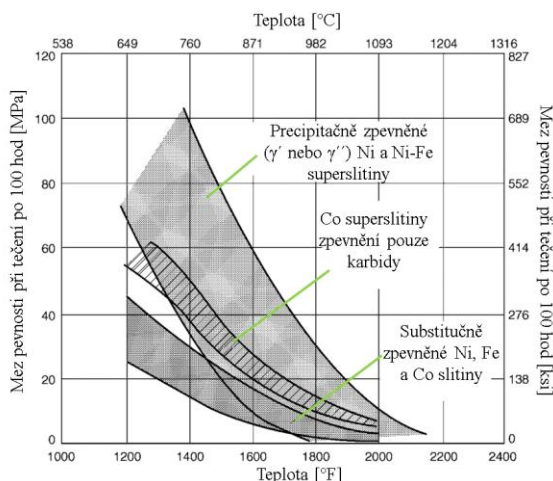
Teprve ve 20. století se nikl začal používat jako legující prvek v ocelích. U těchto materiálů se zjistilo, že díky niklu obsaženému v oceli se razantně zvyšuje odolnost vůči korozi a vysokým

teplotám. Oceli se tak daly využít například pro chemické účely nebo proudové motory. V důsledku tohoto vývoje se nikl v uplynulém století těšil velmi silné oblibě, který pokračuje dodnes, protože nikl se využívá v mnoha technologiích. [1]

Nikl je velmi využívaným materiálem společně s chromem a dalšími kovy. S rostoucím využitím niklu roste i celosvětová produkce. Pro slitiny je využito až 80 % světové produkce. Zbýlých 20 % je využito na pokovování, elektroniku či v bateriích jako katalyzátor. Neexistuje mnoho alternativ, které by se daly využít místo niklu. Ke změně nedochází převážně kvůli vysoké ceně alternativních materiálů a nízké účinnosti oproti niklu. [1]

4.2 Superslitiny na bázi niklu

Superslitiny na bázi niklu jsou materiály žáruvzdorné a žárupevné. Samotná výroba těchto materiálů je obtížná a velmi drahá kvůli nákladům na výrobu nástroje a pro jejich zpracování. Existuje mnoho superslitin na bázi Co, Ni, a Fe, které mají odlišné vlastnosti (Graf 1). [25]



Graf 1 Závislost pevnosti superslitin na teplotě (Upraveno) [25]

Niklové superslitiny se využívají v místech, kde se při práci dosahuje vysokých teplot. Při těchto teplotách je třeba zajistit udržení mechanických vlastností a zamezit vysokoteplotní korozi a oxidaci. Výhodou pro aplikace niklových superslitin je, že si udržují mechanické vlastnosti až do teploty 1050°C (v některých případech až do 1200°C). Superslitiny na bázi niklu se dělí na 3 základní podskupiny dle chemického složení na: [25]

Monel – Jedná se o obchodní název niklové superslitiny, která se skládá z Ni (64-67 %) a Cu (30-32 %). Vykazují výborné mechanické a chemické vlastnosti za vysokých teplot v korozně agresivním prostředí kde již nestačí vlastnosti nerezových ocelí. [3]

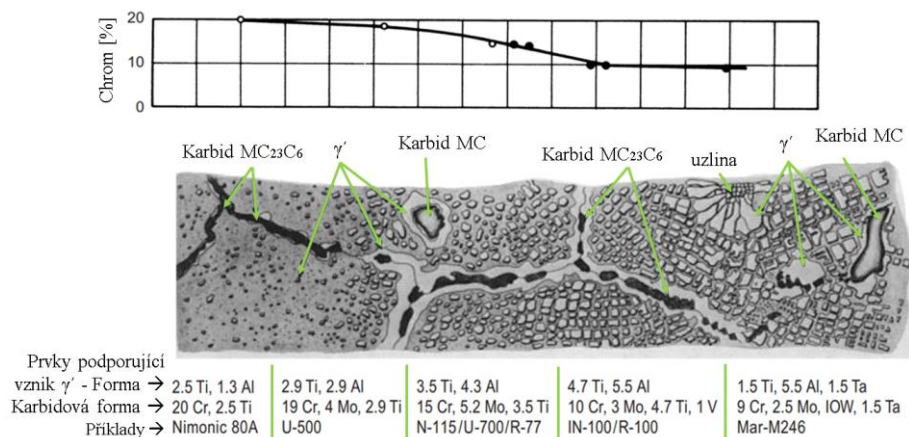
Incoloy – Jedná se o obchodní název niklové superslitiny, která se skládá z Ni (32-44 %), Cr (0-22 %) a Fe (28-46 %). Využívají se převážně v oblastech, kde je třeba odolávat kyselinám, především kyselině solné. [3]

Inconel – Jedná se o obchodní název niklové superslitiny, která se skládá z Ni (42-76 %), Cr (13-29 %) a Fe (0-38 %). Využívá se převážně v místech, kde se koncentruje vysoký podíl kyseliny sírové. [3]

4.2.1 Mikrostruktura niklových superslitin

Mikrostruktura superslitin na bázi niklu je tvořena primární austenitickou fází matricí γ neboli substitučním tuhým roztokem Ni s přísadami a sekundární fází. Matrice je nejčastěji obohacena prvky Ti, Cr, Mo, Co, či Al pro lepší zpevňovací účinky, kde největší vliv na zpevňovací proces má W, Mo, Nb či Ta. Při precipitaci dochází k odtržení Ti a Al od matrice v podobě fáze γ' které matrici intersticiálně vytvrzují. V případě, že dojde k přesycení fáze γ pomocí prvků Cr, W či Mo, může dojít k negativnímu ovlivnění niklových slitin za pomoci vyloučení Lavesovy fáze nebo intermetalických fází μ a σ . [3, 5, 6]

Nikl sám o sobě není karbidotvorný prvek. Uhlík reaguje s ostatními prvky ve slitině, díky čemuž vznikají karbidy, kvůli kterým je dobré znát karbidické fáze a jejich morfologii. Mezi nejčastějšími karbidy, které se vyskytují v niklových slitinách, patří primární karbidy MC, které jsou tvořeny uhlíkem a prvky Mo, W, Ta, Ti či Nb. Rozpad primárního karbidu na sekundární karbid provází oslabení síly meziatomárních vazeb způsobený rozpouštěním Cr, W, či Mo v primárních karbidech, čímž vznikají sekundární karbidy $M_{23}C_6$, nebo vzácný M_7C_3 (kde M vyznačuje metalický prvek či prvky karbidotvornosti). Karbidy se tvoří v závislosti na chemickém složení slitiny, s kterým souvisí i tepelné zpracování. Postupem času se začal snižovat obsah chromu v niklových slitinách, čímž došlo k vývoji nových slitin včetně jejich mikrostruktury (Obr. 16). [3, 5, 6]



Obr. 16 Schématický vývoj mikrostruktury niklových superslitin (Upraveno) [3]

V případě niklových superslitin, které jsou dlouhodobě zatěžovány při vysokých teplotách, je důležité dbát na pravidelnou kontrolu součástí, především jejich chemického složení kvůli tvorbě nežádoucích fází, které vedou ke zkřehnutí niklových slitin a zhoršení mechanických vlastností. [3, 5, 6]

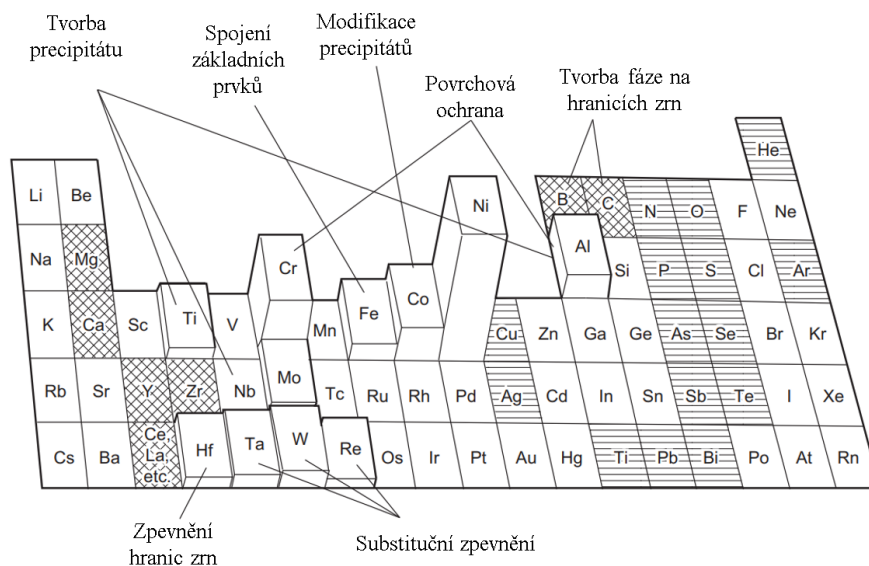
4.2.2 Účinky legujících prvků

Legování je proces, při kterém je do čistého kovu či slitiny vnesen legující prvek, popřípadě kombinace více prvků pro modifikaci struktury, čímž se změní i vlastnosti dané slitiny. Legující prvky jsou implementovány v nižším poměru, než je dominantní čistý kov pro zlepšení jeho mechanických, fyzikálních či chemických vlastností. Mezi nejčastější legující prvky se řadí Cu, Cr, Fe, Co, Mo, W či Si. Vesměs se dá konstatovat, že niklové slitiny mají určité množství legujících prvků (Tab. 2). [17]

Tab. 2 Rozložení legujících prvků u niklových slitin [17]

Obsah prvků [hm. %]								
Prvky	min	max	Prvky	min	max	Prvky	min	max
Fe	0	67	Co	5	21	Nb	0	5,1
Cr	1	30	W	0,6	15	Ti	0,3	5
Mo	0	28	Al	0,2	6	C	0,1	0,35

Různé prvky mají odlišný vliv na strukturu slitiny. Na (Obr. 17) jsou znázorněny legující prvky použité v superslitinách, kde výška sloupce značí množství, které může být přítomno ve slitině. Prvky označené křížkovým šrafováním jsou příznivé pro slitiny, naopak prvky škodlivé pro slitiny jsou označené vodorovným šrafováním. [25]

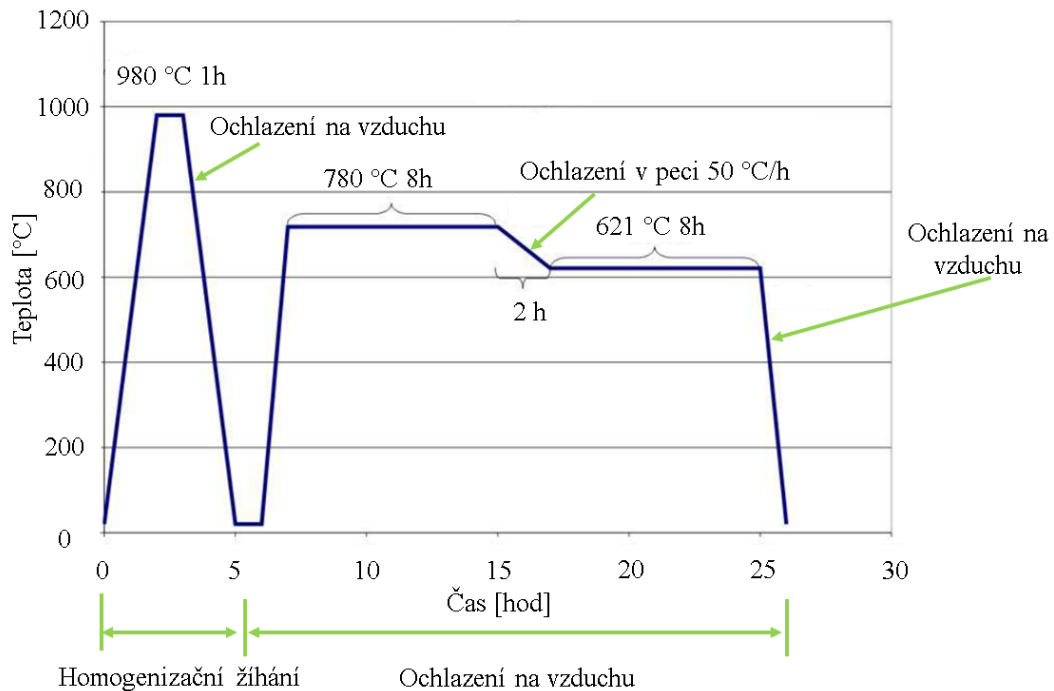


Obr. 17 Vliv legujících prvků na strukturu a vlastnosti niklových slitin (Upraveno) [3]

V superslitinách niklu má vliv již samotný Ni. Zajišťuje vysoké mechanické vlastnosti a chemickou stálost za vysokých teplot. Společně s Cr, Mo, Fe a Ta zvyšuje pevnost. V případě využití Zr a C lze zlepšit odolnost vůči tečení a Al s Ti se zvyšuje vysokoteplotní pevnost. [25]

4.2.3 Tepelné zpracování

Tepelné zpracování (Graf 2) se provádí kvůli modifikaci mikrostruktury, zlepšení mechanických, únavových, creepových či chemických vlastností součástí, popřípadě pro snížení pnutí v případě, že se jedná o litou součást. Pro superslitiny se nejčastěji využívá homogenizační žihání (rozpuštěcí) a precipitační vytvrzování (stárnutí). Jedná se převážně o konečnou operaci výrobního procesu. [6]



Graf 2 Tepelné zpracování Inconel 718 (Upraveno) [26]

Homogenizační žihání probíhá v inertní atmosféře nebo ve vakuových pecích. Teplota se pohybuje od 925°C do 1065°C v závislosti na chemickém složení, předchozím zpracování a požadovaných vlastnostech. Cílem je rozpustit jednu či více fází (fáze γ' , karbidy) pro vyrovnání chemického složení a následné zchlazení pro zajištění výsledné struktury. [6]

Precipitační vytvrzování se provádí při teplotě od 540°C do 1138°C na vzduchu, inertní atmosféře či ve vakuu při výdrži na teplotě po dobu od 4 do 24 hodin. Cílem je vyloučit karbidy a fáze γ' v požadované úrovni a velikosti. Princip spočívá v procesu přeměny precipitační fáze z matrice na fázi γ' za pomoci legujících prvků jako je Al a Ti. Dále dochází k precipitaci dalších fází, jako jsou Lavesovy fáze a nitridy. V případě kvalitnější slitiny se může uplatnit víceúrovňové vytvrzování, protože fáze γ' a jednotlivé karbidy mají různé teploty precipitace. [6]

4.3 Slitina Inconel 713

Jedná se o superslitinu na bázi niklu, která je žárovevná a žáruvzdorná, díky čemuž je vhodná pro aplikaci při vyšších provozních teplotách oproti obvyklé žárovevné oceli. Slitina má velmi dobrou slévateľnost, pozoruhodnou odolnost proti oxidaci a za vysokých teplot vyniká svou strukturní stabilitou a odolností proti poškození. Každopádně kvůli některým legujícím prvkům, které zajišťují teplotní a strukturní stabilitu dochází ke snížení tvářitelnosti v kovacíh operacích, které můžou být prováděny při teplotě v rozpětí od 1040°C do 1205°C. [6]

Tvorba polotovarů niklových slitin původně probíhala odléváním na vzduchu. Vývojem vakuové techniky se začalo využívat vakuového lití. Dochází tak ke zlepšení vlastností slitiny za vysokých teplot, převážně pevnosti do teploty 982°C. Při snaze o svaření klasickými způsoby se zjistilo, že danou slitinu není možné tímto způsobem svařovat. Jednou z možností, jak eliminovat tento problém je svařování plazmou. [6]

Vlastnosti niklové superslitiny Inconel 713 se dají zlepšit za pomoci precipitačního vytvrzení. Chemické složení Inconelu 713 (Tab. 3) je dáno nominální hodnotou prvků včetně jejich rozsahů. [6]

Tab. 3 Chemické složení Inconel 713 [6]

Obsah prvků [hm. %]							
Prvky	Nominál	Rozsah		Prvky	Nominál	Rozsah	
Cr	12,5	12	14	B	0,012	0,005	0,015
Mo	4,2	3,8	5,2	Zr	0,1	0,05	0,15
Nb+Ta	2,2	1,8	2,8	Si	-	Max 0,5	
Al	6,1	5,5	6,5	Mg	-	Max 0,25	
Ti	0,8	0,5	1	Fe	-	Max 2,5	
C	0,	0,03	0,2	Cu	-	Max 0,5	

4.3.1 Použití

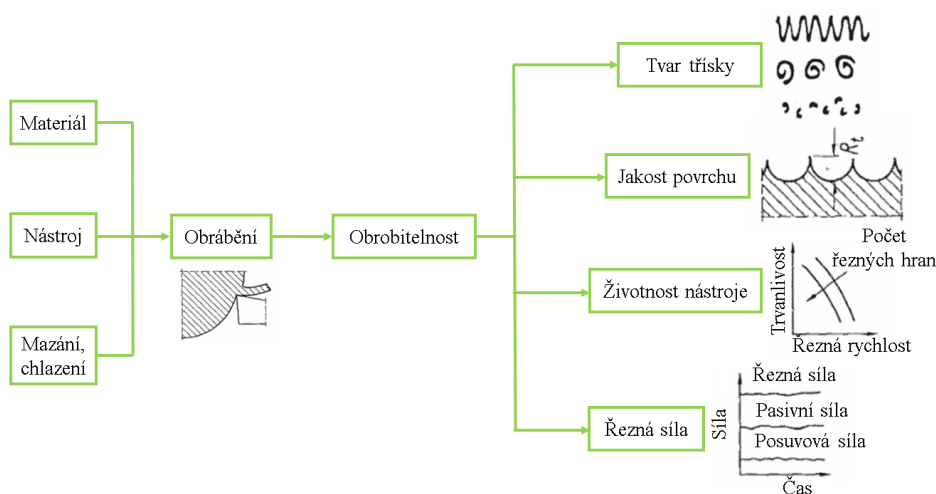
Inconel se využívá v mnoha aplikacích, kde běžná ani žárovevná ocel nestačí. Jedná se o aplikace, které vyžadují vysoké a stabilní pevnosti při vysokých teplotách. Tato slitina se využívá hojně v leteckém průmyslu, například pro lopatky prvního stupně proudových letadel, lopatky pro průmyslové turbíny či formy pro lisování, kování či vytlačování. [6]

5 Charakteristika obrábění

Obrábění je technologický proces, při kterém dochází k úběru materiálu za pomoci plastické deformace za účelem dosažení předepsaného rozměru a tvaru obrobku. Pro překonání plastické deformace je třeba vykonat určitou práci, která se transformuje v teplo a následně odvádí do tepelné soustavy. V důsledku plastické deformace, která souvisí s velkými třecími silami mezi čelem nástroje a třískou vzniká nárůstek. Tento nárůstek může mít zásadní vliv na trvanlivost nástroje. V případě, že se firma rozhodne zakoupit obráběcí centrum, je pro ni efektivní využít plný potenciál stroje na úkor trvanlivosti nástrojů. Tímto krokem se optimalizuje řezný proces, při kterém dochází k úpravě řezných parametrů a volbě správné geometrie nástroje s využitím vhodné procesní kapaliny.

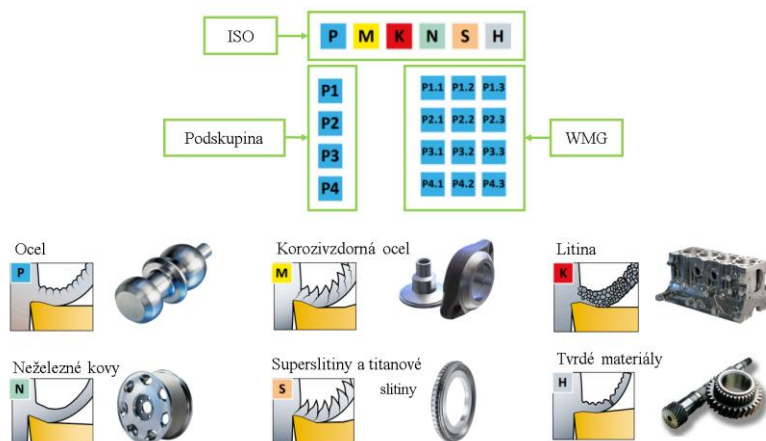
5.1 Obrobitelnost

Obrobitelnost je souhrn technologických vlastností, které charakterizují vhodnost materiálu k obrábění. Jedná se o celkové účinky chemického složení a fyzikálních vlastností konkrétního materiálu na kvalitu procesu obrábění. Faktory ovlivňující obrobitelnost jsou zejména chemické složení a zpracování polotovaru, volba nástroje a použitá PK, od kterých se odvozují další faktory (Obr. 18). [15, 18]



Obr. 18 Parametry charakterizující obrobitelnost (Upraveno) [8]

Obráběné materiály se dělí dle normy ČSN ISO 513 (Obr. 19), která slouží pro vyhodnocení obrobitelnosti. Podle systému ISO se materiál Inconel 713 řadí do skupiny S. Každá z těchto skupin se označuje písmenem a barvou, zároveň skupiny mají vlastní podskupinu, která se značí dvojcíslím, jež charakterizuje relativní opotřebení a pevnosti. S klesající hodnotou dvojcíslí roste otěruvzdornost řezné části nástroje. Lze použít vyšší řezné rychlosti a obrábět materiály o vyšší pevnosti jako jsou například těžkoobrobitelné materiály. Opakem je použití nástroje s vyšší hodnotou dvojcíslí, kde lze využít vyšších posuvů, protože nástroj má vyšší houževnatost řezného materiálu. [15, 18]

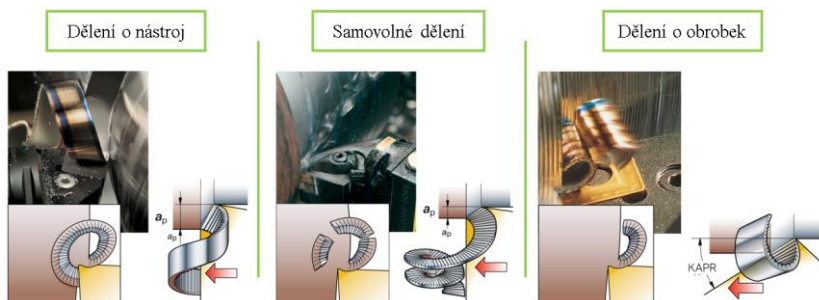


Obr. 19 Rozdělení materiálů dle normy ČSN ISO 513 (Upraveno) [18]

Pro poskytování kvalitnějších služeb se rozhodla společnost Sandvik Coromant vytvořit odlišné podskupiny pro zvýšení produktivity výroby (Obr. 19). Základní rozdělení pro volbu rezného nástroje a geometrie zůstala zachována dle normy ČSN ISO 513 (písmeno a barva). Novinkou se stala změna prvního doprovodného čísla za písmenem. Jedná se o podskupinu, která dělí nástroje dle obráběných materiálů a číslo označuje materiálové skupiny dle struktury a složení materiálu. Druhá číslice za tečkou určuje skupinu materiálu obrobku (WMG), které se dělí dle tvrdosti a meze pevnosti v tahu, kde rozsah rezných rychlostí je přibližně $\pm 10\%$. [12]

5.2 Mechanika tvorby třísky

Vnikáním rezné části nástroje do obrobku dochází k přetváření elastické deformace na plastickou deformaci. Intenzivní plastická deformace vzniká podél smykových rovin materiálu obrobku, které vytváří břit nástroje za pomoci tření mezi materiály. Pohybem nástroje do obrobku dochází k pýchování materiálu ve směru řezu. Ukončením plastické deformace je tak oddělení třísky, která je vedlejším produktem obrábění. Působením nástroje na materiál dochází ke tvorbě 3 základních způsobů (Obr. 20), jak se tvoří třísky a to samovolně, o obrobek a o nástroj. Mezi faktory, které mají vliv na dělení třísky patří rezná rychlost, posuv, úhel nastavení ostří a obráběný materiál. [14, 18]

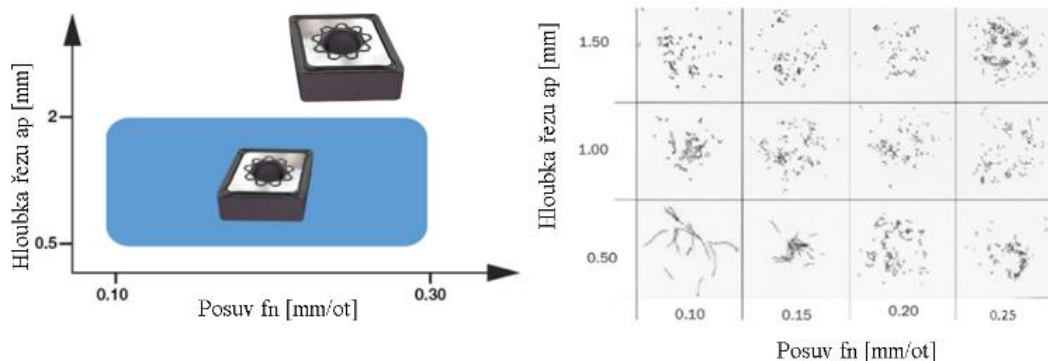


Obr. 20 Základní dělení třísky (Upraveno) [18]

Při tvorbě nových obráběcích nástrojů je důležité zjistit, jak se tvoří třísky při určitých rezných parametrech. Pro tyto účely se následně vytvoří graf oblasti utváření třísky. Hodnoty do

graf se získají z obrábění určité hloubky řezu v závislosti na posuvu. Následně se vyhodnotí doporučené hloubky řezu při stanoveném posuvu obrábění určitého materiálu. [14, 18]

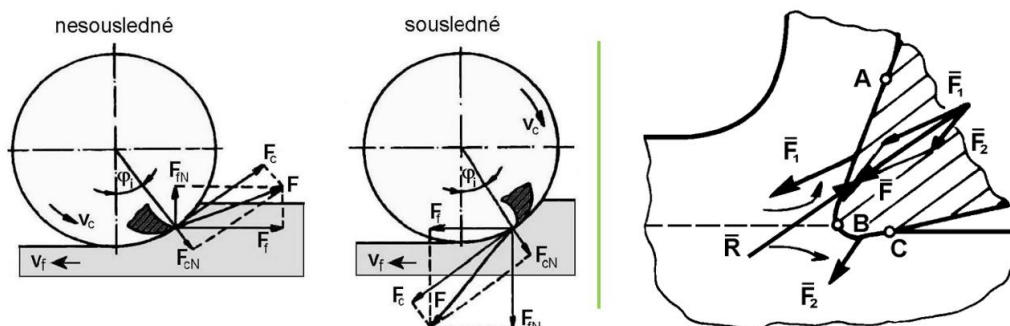
Firma Iscar před uvedením destičky CNMG 120404 - F3S na trh udělala řadu pokusů pro zjištění, jak se tvoří tříska při obrábění niklové slitiny Inconel 718. Pokus probíhal při řezné rychlosti 60 [m/min], posuvu na otáčku 0,05-0,3 [mm/ot], a hloubce řezu 0,3-3 [mm]. Zjistilo se, že je destička vhodná pro dokončovací operace při posuvu na otáčku 0,1-0,3 [mm/ot], a hloubce řezu 0,5-1,5 [mm]. (Obr. 21). [19].



Obr. 21 Oblast utváření třísky destičky CNMG 120404 - F3S (Upraveno) [19]

5.2.1 Silové účinky při obrábění

Působením řezné části nástroje do obrobku se vyvodí určité množství řezného odporu R , které je nutno překonat řeznou silou pro tvorbu a odvod třísky z místa řezu. Dochází tak k silovým účinkům, které mají vliv na teploty při obrábění a opotřebení nástroje. Díky vyššímu zatížení oproti běžnému stavu, kdy je stroj v klidu, dochází k nárůstu energie, kterou je nutno vynaložit na obrábění. Proto je třeba zajistit dostatečnou tuhost soustavy pro snížení až odstranění kmitání, které způsobuje zhoršení drsnosti povrchu, nárůst řezných sil a možné zničení nástroje. Celkové řezné síly se rozkládají do jednotlivých složek (Obr. 22) v závislosti na použité technologii. [14, 15, 18]



Obr. 22 Složky síly při frézování a rozklad při soustružení (Upraveno) [14]

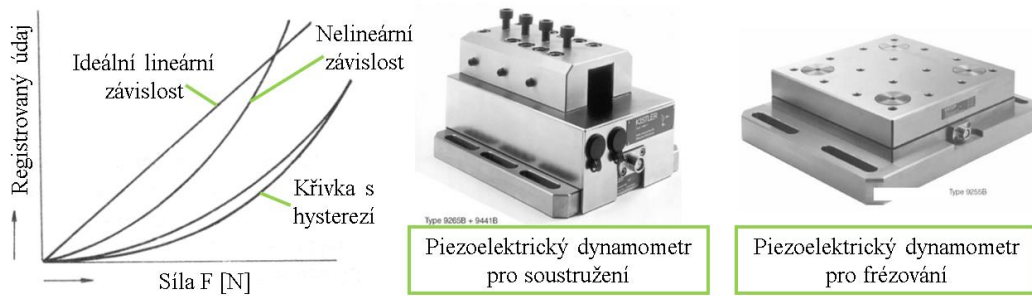
Měrná řezná síla (měrný řezný odpor) k_c [MPa] je materiálová konstanta, která se využívá pro výpočet kroutícího momentu potažmo pro stanovení potřebného výkonu pro konkrétní operaci. Měrnou řeznou sílu lze vyjádřit jako hlavní složku řezné síly vztaženou na průřez odebírané třísky. Nejčastěji se využívá jednotková měrná řezná síla k_{c1} , která je stanoven jako měrná řezná síla vztažená na 1 [mm²] průřezu třísky při hloubce řezu 1 [mm]. Lze konstatovat, že s rostoucí hloubkou řezu klesá měrná řezná síla. Pro niklové superslitiny se hodnota k_{c1} pohybuje v rozmezí od 2400 do 3100 [MPa]. [18]

Pro měření sil se využívá jak přímého, tak nepřímého měření. Přednostně se využívá přímého měření síly, které zajišťuje přesnější měření silových účinků oproti nepřímému, kde stačí střední hodnota řezné síly. Nepřímé měření však zajišťuje značnou úsporu v pořízování a nastavování dynamometru. [14, 18]

V případě nepřímé metody dochází ke sledování výkonu elektromotoru obráběcího stroje pomocí wattmetrů. S rostoucí řeznou silou roste i výkon v závislosti na použité řezné rychlosti, čímž lze získat početně hodnotu řezné síly. [14, 18]

Pro přesnější měření je třeba zvolit přímou metodu pomocí dynamometru. Jedná se o zařízení, které je určené pro měření sil, kroutícího momentu či výkonu. Na dynamometry jsou kladeny požadavky, aby byly dostatečně tuhé v případě vyšších sil, zajišťovaly dostatečnou citlivost a reprodukovatelnost údajů. Dále je důležité zvolit vhodnou konstrukci tak, aby se složky řezné síly vzájemně neovlivňovaly. Dělí se na dynamometry s pružným členem a bez pružného členu. U dynamometru s pružným členem je vyhodnocena síla na základě změřené deformace elastického členu, která je převedena na výslednou hodnotu silového zatížení. Patří sem mechanické, pneumatické, indukční a tenzometrické dynamometry. V případě dynamometru bez pružného členu dochází k přesnějšímu měření silových účinků kvůli absenci pružného členu, který zkresluje sledované hodnoty. Jedním z nejpoužívanějších dynamometrů bez pružného členu je piezoelektrický dynamometr. [14, 18]

Před měřením pomocí dynamometru je třeba provést cejchování, čemu se rozumí ověření dynamometru pomocí zatěžování předem stanovenými silami. V průběhu měření se zaznamenává síla v závislosti na velikosti odchylky měřené pomocí měřidla. Měření probíhá při zatěžování i odlehčování, aby bylo možné ověřit, že je dynamometr vhodný a netrpí paměťovým efektem způsobeným nadměrným použitím. Z hodnot se následně vytvoří cejchovací křivka (Obr. 23), která vyjadřuje závislost zatěžující síly na odpovídající veličině, která může být v [mV], [mA], a podobně. [14, 15, 18]

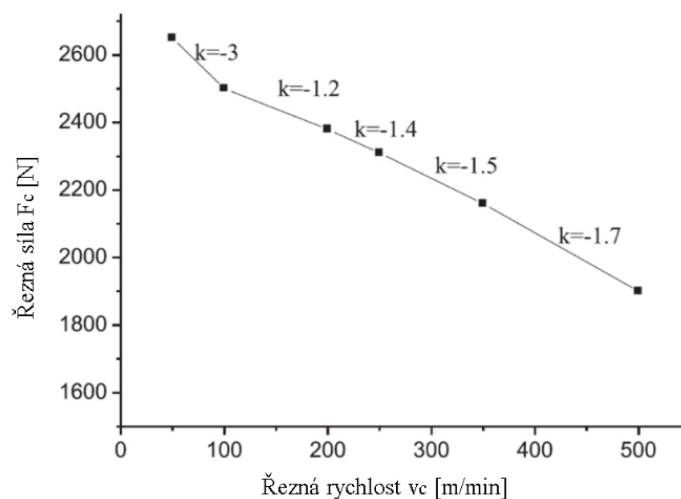


Obr. 23 Stanovení sil s příklady dynamometrů (Upraveno) [15]

Piezoelektrické dynamometry (Obr. 23) jsou nejpoužívanějšími moderními senzory pro snímání deformace za pomoci piezoelektrického jevu (vzniká elektrický náboj při silovém zatížení na specifický materiál v určitém směru), který zajišťuje silnou citlivost a široké spektrum využití. [15]

Ze studie, při které byl frézován materiál Inconel 718 vyplývá, že s rostoucí řeznou rychlostí klesá hodnota řezné síly. Dochází k tomu kvůli poklesu tvrdosti povrchu obrobku v důsledku zvýšení řezných teplot (tzv. tepelné měknutí), čímž se i snižuje potřebná řezná síla. [21]

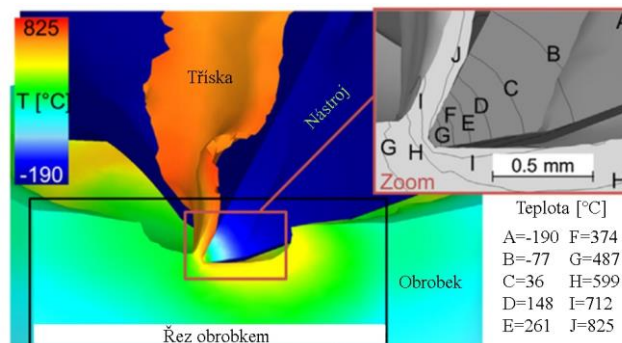
Experiment probíhal při řezné rychlosti 50, 100, 200, 250 a 500 [m/min], posuvu na zub 0,09 [mm/zub], axiální hloubce řezu 1 [mm] a radiální hloubce řezu 30 [mm] pomocí keramického nástroje se samočinným vyztužením SiAlON. Ze závislosti řezné síly na řezné rychlosti (Graf 3) je zřejmé, že hodnota sklonu křivky (k) nabývá k největšího spádu mezi rychlostmi 50-100 [m/min] což je způsobeno rychlým poklesem napětí toku materiálu v důsledku zvýšení teploty. [21]



Graf 3 Vliv řezné rychlosti na řezné síle (Upraveno) [21]

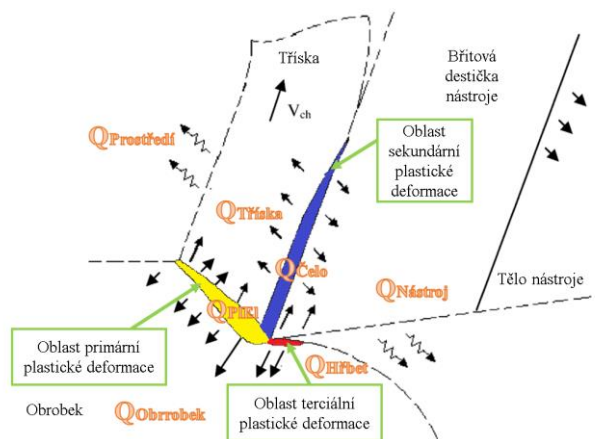
5.2.2 Tepelné jevy při obrábění

Při vnikání břitu nástroje do obrobku dochází ke vzniku třísky, kterým je vyvinuto velké množství tepla. Teplo vznikne za pomoci přeměny práce, která je vynaložena na odebrání utvářené třísky a k tomu na odvedení třísky z místa řezu. Celkové teplo vzniklé při obrábění je součtem jednotlivých částí, které vchází do procesu a následně i vychází. Jedná se o teplo vzniklé prací spotřebovanou na počáteční třísku, teplo vzniklé třením o čelo hřbetu a teplo vzniklé třením o hřbet kde dochází k rozkladu teplot do určitých částí tepelné soustavy. V případě, že se využije chlazení, například tekutého dusíku, dochází k rozložení teplot po celé části soustavy, kde nejvíce přebírá samotná tříska (Obr. 24). [15, 18, 20]



Obr. 24 Tepelné pole při obrábění (Upraveno) [20]

V průběhu obrábění dochází k transformaci většiny mechanické práce na teplo. Teplo Q_e (J) vzniká při odebrání vrstvy materiálu, které se rovná přibližně práci řezného procesu E_e (J). Hlavní zdroj tepla je v oblasti plastické a elastické deformace Q_{PIEI} (J) při tvorbě třísky. Dalším zdrojem tepla je odchod třísky po čele nástroje $Q_{Čelo}$ (J), kde dochází ke tření hřbetu nástroje o přechodovou plochu obrobku $Q_{Hřbet}$ (J). Vzniklé teplo je třeba odvést, největší část tepla je odvedena pomocí třísky $Q_{Tříska}$ (J). Dále se teplo odvádí do obrobku $Q_{Obrobek}$ (J), nástroje $Q_{Nástroj}$ (J) a nakonec pomocí řezného prostředí $Q_{Prostředí}$ (J). Z bilance tepelné soustavy (Obr. 25) je možné vyloučit řezné prostředí v případě, že se využije suchého obrábění. [17, 20]



Obr. 25 Vznik a odvod tepla při obrábění (Upraveno) [17]

Podíl jednotlivých složek, které odvádí teplo při procesu obrábění je závislý na různých parametrech jako jsou řezné podmínky, materiál obráběné součásti, materiál nástroje, geometrie břitu či řezné prostředí. [17, 20]

5.2.3 Parametry drsnosti a jejich ovlivnění řezným procesem

Veškeré strojní součásti, které projdou procesem obrábění mají dle výkresové dokumentace předepsanou kvalitu povrchu. Na výrobním výkrese jsou předepsány tvarové a rozměrové přesnosti, drsnost povrchu či vlastnosti povrchové vrstvy. Při třískovém obrábění hraje roli několik faktorů, které silně ovlivňují strukturu: [15, 16]

Zaoblení špičky – čím větší je poloměr špičky, tím menší je drsnost obrobené plochy, převážně při malých posuvech a malé hloubce záběru. [15, 16]

Velikost úhlu nastavení hlavního a vedlejšího ostří – velké úhly nastavení ostří mají při zvolení vyšších posuvů větší drsnost obrobené plochy, zatímco když se zvolí menší posuvy a vyšší poloměr špičky, eliminuje se tím vliv úhlů na jakost obrobené plochy. [15, 16]

Posuv – posuv má největší vliv na drsnost povrchu, čím je posuv vyšší, tím se zvyšuje i drsnost obrobené plochy. [15, 16]

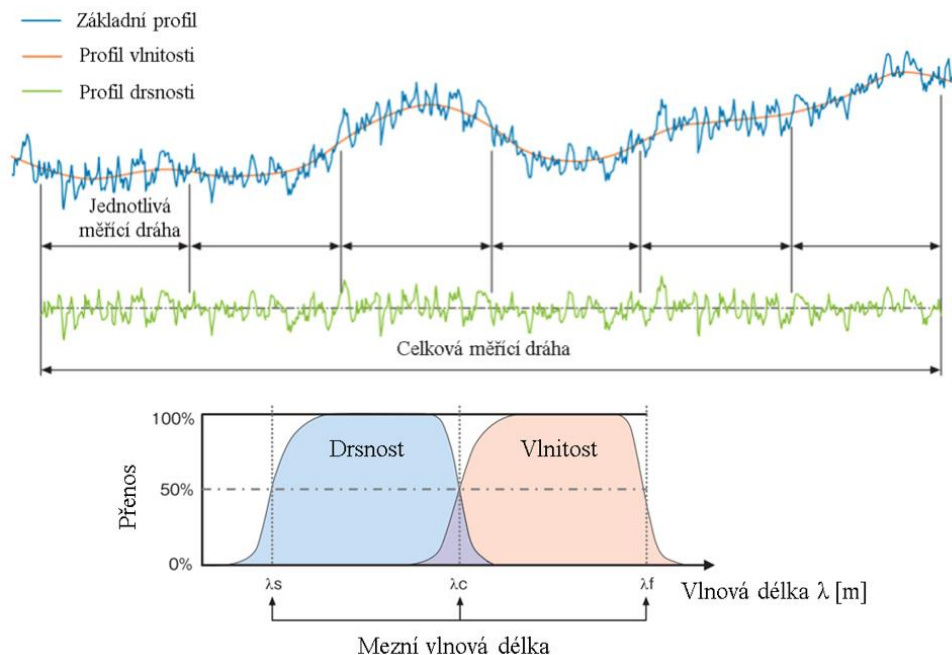
Řezná rychlost – řezná rychlost má razantně nižší vliv na drsnost povrchu než posuv, každopádně při nastavení nižších řezných rychlostí roste drsnost povrchu. [15, 16]

Tuhost soustavy – tuhost soustavy má velký vliv na přesnost ale zároveň i na drsnost obrobené plochy. V případě, že není obrobek dostatečně upnutý, nástroj je nadměrně vyložený nebo stroj špatně ustavený, dochází k chvění, které způsobuje znehodnocení jak povrchu, tak samotné součásti. [15, 16]

Řezné prostředí – příznivý vliv na drsnost povrchu obrobené plochy má vhodně zvolený druh řezného prostředí. [15, 16]

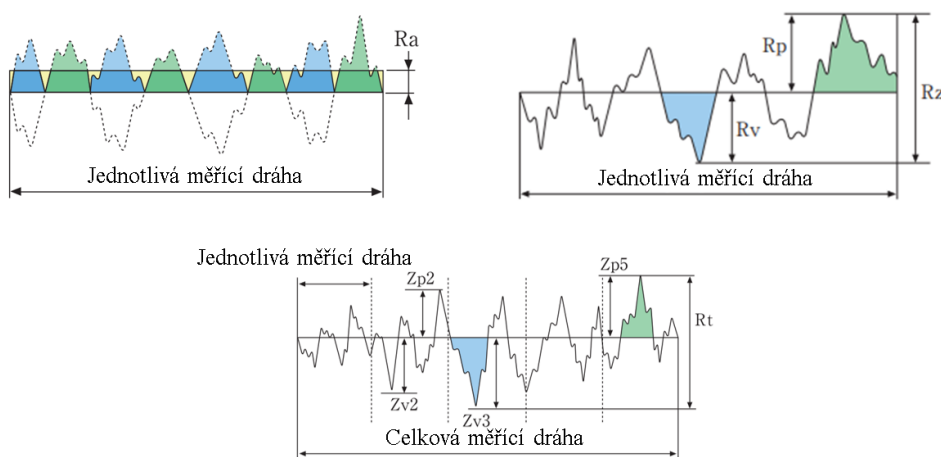
Vlastnosti polotovaru – při obrábění hraje roli i zvolení vhodných parametrů při obrábění především kvůli materiálové charakteristice polotovaru, zejména jeho vlastnostem jako je tepelná vodivost, houževnatost či oxidace při použití špatně zvolené chladicí kapaliny. [15, 16]

Pro hodnocení struktury povrchu se využívá normalizovaných parametrů, které jsou určeny pro dvourozměrné metody měření drsnosti povrchu. Dle normy ČSN EN ISO 4287, která se zabývá geometrickými požadavky na výrobky (GPS) se parametry profilu (Obr. 26) dělí na parametr základního profilu (P), parametr vlnitosti (W) a parametr drsnosti povrchu (R). [15, 16]



Obr. 26 Obecná struktura povrchu (Upraveno) [23]

Nejčastější parametr profilu povrchu zastoupený v technické praxi při měření ploch a předepisováním povrchových vlastností součástí je měření drsnosti povrchu. Drsnost je důsledkem procesu třískového obrábění, kde řezný nástroj zanechává na povrchu stopy. Pro posuzování drsnosti povrchu se využívá tří základních parametrů, délkových, tvarových a výškových, kde nejčastějším je parametr výškových profilů. Níže jsou uvedeny nejčastěji využívané parametry s vizualizací (Obr. 27): [15, 16]



Obr. 27 Parametry drsnosti povrchu R_a , R_z , R_t (Upraveno) [23]

Střední aritmetická odchylka profilu (R_a [μm]) – Jedná se o zdaleka nejpoužívanější parametr kvality povrchu pro kvalifikaci drsnosti součástí. I přes četnost využití tohoto parametru je v některých případech nedostatečný, proto se využívá i dalších parametrů drsnosti povrchu. Parametr není ovlivněn poškrábáním či znečištěním povrchu oproti následujícím parametrům.

Konvenčním obráběním lze dosáhnout parametrů (Tab. 4), které jsou sepsány pro soustružení a frézování.

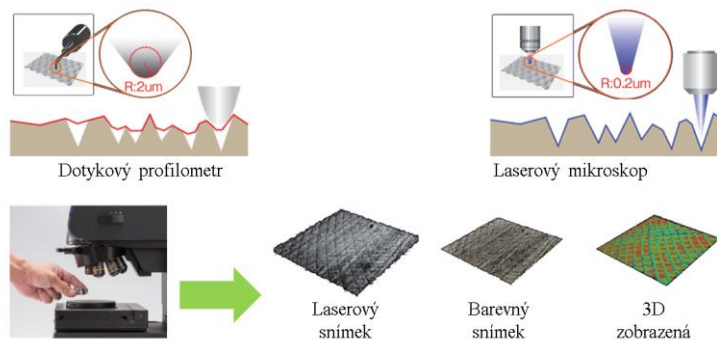
Tab. 4 Dosahované parametry při obrábění [29]

Způsob obrábění	Hrubování		Na čisto		Jemné obrábění	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Soustružení [μm]	6,3	25	1,6	3,2	0,2	0,80
Čelní frézování [μm]	12,5	25	1,6	6,3		0,8
Válcové frézování [μm]		25	12,5	25		1,6

Maximální výška profilu (R_z [μm]) – V některých případech aplikací se můžou chovat součástky se stejnou hodnotou R_a odlišně, proto je třeba přistoupit k hodnocení i jiným parametrem jako je například R_z . Jedná se o aritmetický průměr výšky profilů drsností jednotlivých měřících drah (l_r), konkrétně pěti drah v rozsahu celkové měřené dráhy (l_n).

Největší hloubka drsnosti (R_t [μm]) – Hodnota představuje výšky nejvyššího vrcholu (Z_p) a nejhlubšího místa (Z_v) v rámci celkové měřené dráhy (l_n), nikoli pouze jednotlivé měřící dráhy (l_r). Jedná se o přísnější hodnocení povrchu oproti hodnotě R_z z důvodu, že se provádí na celkové délce, nikoli na jednotlivých drahách. Tento parametr je ovlivněn škrábanci či znečištěním povrchu součásti. [16, 23]

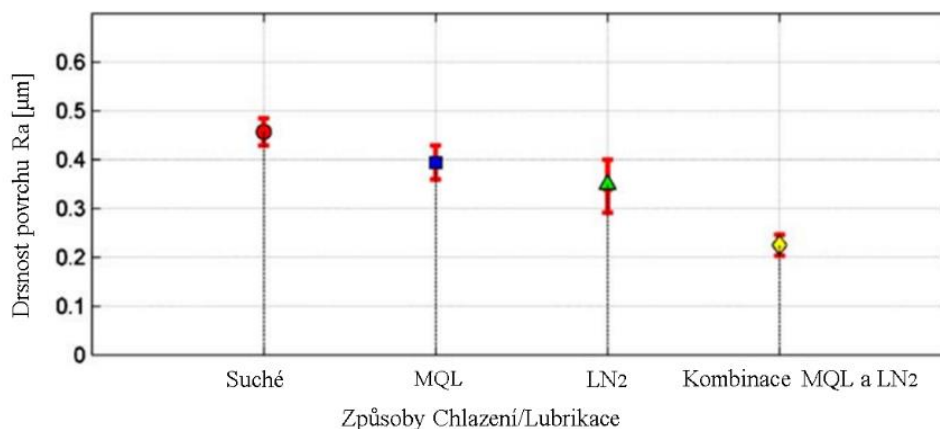
Měření pomocí profilometru je jednou z nejrozšířenějších metod měření drsnosti povrchu. Profilometry se dělí na kontaktní a bezkontaktní vyhodnocování drsnosti povrchu. Kontaktní měření spočívá v kontaktu hrotu špičky přes měřený povrch po předepsané dráze uvedené v normě. Délka může představovat jak celkovou měřenou dráhu (l_n), tak jednotlivé měřící dráhy (l_r), čímž je možné vyhodnotit různé parametry profilu. Další možností vyhodnocení drsnosti povrchu je použití bezkontaktního profilometru. Měření probíhá pomocí laserového zařízení. Ve srovnání s kontaktním profilometrem je schopný lépe vykreslovat reliéf daného povrchu, čímž se získá kvalitnější představa o textuře dané součásti (Obr. 28). [22]



Obr. 28 Možnosti měření drsnosti (Upraveno) [23]

Ze studie, kde se zkoumal vliv PK na Ra při soustružení Inconel 718 se dospělo k závěru, že kombinace MQL a LN₂ dosahuje nejnižší hodnoty Ra včetně jejího rozpětí, zatímco suché obrábění vyšlo nejhůře (Graf 4).

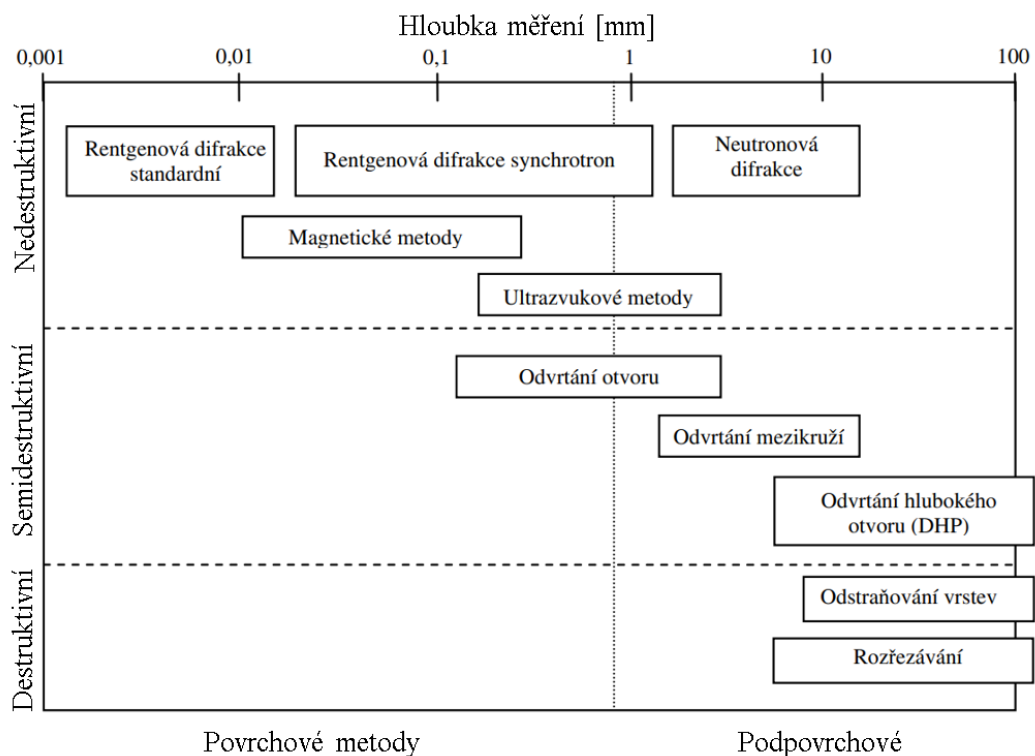
Experiment probíhal při řezné rychlosti 60 [m/min], posuvu na otáčku 0,05 [mm/ot] a hloubce řezu 0,63 [mm] pomocí karbidové destičky CNMG120404. Použitím MQL je dosaženo lepší drsnosti oproti suchému obrábění zejména kvůli zlepšenému mazacímu účinku. Při chlazení pomocí LN₂ došlo ke zmražení obrobku před samotným řezem. To vedlo ke zvýšení tvrdosti povrchu obrobku, což způsobilo zhoršení Ra a nárůst řezných sil při obrábění.[24]



Graf 4 Drsnost povrchu (Upraveno) [24]

5.2.4 Zbytkové napětí

Pojmem zbytkové napětí se rozumí napětí, které vznikne při zpracování materiálu (mechanické a tepelné zpracování či při provozu součásti), které zde zůstává i po dokončení jejího zpracování. V případě obrábění dochází ke tvorbě zbytkového napětí působením plastické deformace. Jedná se o velmi opomíjenou veličinu, na kterou se do nedávné doby nebral v praxi zřetel tak, jako například na drsnosti a síly při obrábění. Napětí má významný vliv na mechanické vlastnosti materiálu. Zbytková napětí se dělí na tahová (+) a tlaková (-), kde z pohledu obrábění jsou prospěšnější tlaková napětí, ovšem do určité hodnoty, při které dochází k degradaci materiálu. Zbytkové napětí se dále dělí do kategorií dle velikosti objemu napětí na makroskopické, mikroskopické a submikroskopické, kde se zpravidla vyskytují všechny tři druhy současně. [13, 15]



Graf 5 Metody měření zbytkového napětí (Upraveno) [13]

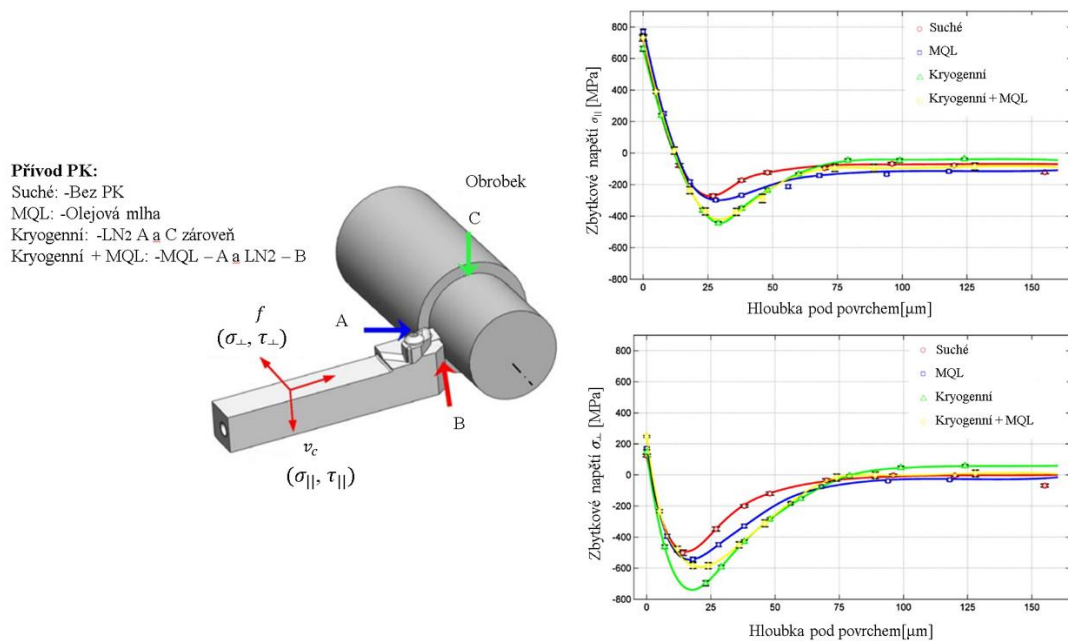
Zbytkové napětí lze měřit pouze nepřímými metodami, které jsou závislé na rozsahu měřené hloubky (Graf 5). Zbytkové napětí se dělí dle porušení celistvosti součásti na nedestruktivní, semidestruktivní a destruktivní. [13, 15]

U nedestruktivních metod nedochází k zásahu do povrchu součásti, kam spadají metody na principu měření fyzikálních veličin, například rentgenová difrakce, ultrazvuk či magnetická metoda.

Semidestruktivní metody se využívají v místě kde je možné přidat materiál, který je na konci měření odebrán, každopádně v průběhu měření nesmí dojít k ovlivnění funkčnosti měřené součásti. Nejčastější metodou je odvrtání otvoru či mezikruží, kde se napětí měří na přídavném materiálu.

V případě destruktivních metod se jedná o poškození povrchu součásti, kam spadá většina mechanických zkoušek jako je měření mikrotvrdosti či odřezávání vrstev. [13, 15]

Ve studii zaměřené na udržitelné obrábění se zjišťovala závislost zbytkového napětí na hloubce při použití různých PK (Obr. 29). Měření zbytkového napětí probíhalo pomocí rentgenové difrakce po dobu 10 [s]. Soustružil se materiál Inconel 718 při použití karbidové destičky CNMG120404. Parametry experimentu byly posuv za otáčku 0,05 [mm/ot], hloubka řezu 0,63 [mm] a řezná rychlost 60 [m/min]. [24]



Obr. 29 Zbytkové napětí po obrábění Inconel 718 (Upraveno) [24]

Z naměřených hodnot vyplývá, že obráběním došlo k plastickým deformacím, které narušili povrch součásti. Díky narušení celistvosti došlo k nárůstu tahových napětí ve směru řezu σ_{\parallel} na povrchu součásti, kde hodnota napětí činila 800. [MPa]. Ve směru posuvu σ_{\perp} dosahovala hodnota napětí 200. [MPa]. Vzniklé tahové napětí na povrchu součásti může způsobovat prohlubně a další povrchové artefakty. Při zkoumání zbytkových napětí je zajímavá hloubka od 40[μm] do 75[μm], kde se napětí začíná stabilizovat oproti samotnému povrchu součásti. [24]

6 Experimentální měření

V předchozích kapitolách byla sepsána teorie vztahující se k obrábění niklových slitin a vyhodnocování různých parametrů integrity povrchu. Pro experiment byla zvolena superslitina Inconel 713LC (se sníženým obsahem uhlíku), u kterého bylo změřeno pomocí přenosného RTG spektrometru Delta standard přesné chemické složení určitých prvků (Tab. 5).

Tab. 5 Změřené chemické složení Inconel 713LC

Obsah prvků [hm. %]					
Prvek	Naměřeno	Rozsah	Prvek	Naměřeno	Rozsah
Ni	75,8 ± 0,19	67,1 – 81,9	Ti	0,75 ± 0,04	0,5 – 1
Cr	11,63 ± 0,08	12 – 14	Fe	0,18 ± 0,01	0 – 2,5
Al	5,15 ± 0,22	5,5 – 6,5	Zr	0,091 ± 0,004	0,05 – 0,15

Experiment probíhal v laboratořích ČVUT fakulty strojní, kde se sousledně frézovalo na pětiosém vertikálním obráběcím centru OKUMA MU400 II s otočným stolem pro naklápění v osách A, C. Vysoká tuhost frézky zajišťuje velké přesnosti a produktivitu při obrábění. Technické parametry frézky jsou popsány níže (Obr. 30).



Pracovní stůl	
Průměr upínací plochy [mm]	400 (6x T18H7)
Max. rozměry obrobku [mm]	∅ 600 x H 400
Max. otáčky [ot/min]	50
Max. zatížení stolu [kg]	300
Rozsah pojezdů os	
Osa X, Y, Z [mm]	762, 460, 460
Osa A, C [°]	+20 až -110, 360 (neomezené)
Posuvy	
Rychloposuv [m/min]	X/Y/Z: 40/40/32
Rychloposuv rotačních os [°/min]	A/C: 18.000/14.400
Max. pracovní posuv [m/min]	X/Y/Z: 32
Pracovní vřeteno	
Rozsah otáček [tis. ot/min]	15 (20, 25, 35)
Výkon motoru (10 min/trvale) [kW]	22/18,5 (15t), 30/22 (20t), 15/11 (25t), 15 (35t)
Strojní data	
Výška, Šířka, Hloubka [mm]	2946, 2160, 2810
Objem nádrže PK [L]	170
Hmotnost [kg]	7700

Obr. 30 Technické parametry obráběcího centra OKUMA MU 400 II (upraveno) [32]

Obrábělo se pomocí obráběcí hlavy Sandvik Coromant R200 – 068Q27-12M, kde efektivní (řezný) průměr D_f činí 63 [mm], maximálním průměrem D_m je 80 [mm]. Před obráběním byla proměřena geometrie nástroje (Obr. 31) pomocí souřadnicového měřicího stroje Zeiss UMC 850. U použitého nástroje byl změřen negativní úhel čela (-7°).



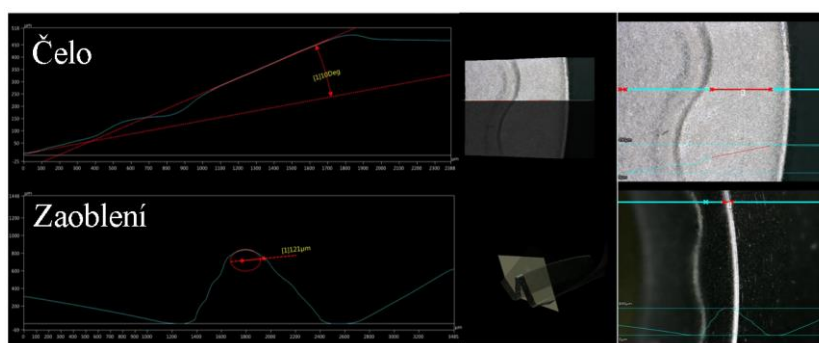
Obr. 31 Měření úhlů obráběcí hlavy

Za účelem experimentálního měření byla frézovací hlava osazena jednou destičkou pro detailní vyhodnocení v jednotlivých fázích záběru bříty. Jednalo se o kruhovou destičku Ceratizit RPHX 1204M8EN-M31 CTC 5240 (Obr. 32), která je určena pro hrubovací a dokončovací operace. Výrobce uvádí jen základní informace jako jsou průměr destičky 12 [mm], výška destičky 4,76 [mm] a úhel hřbetu (+11°), ale zbylé bylo potřeba změřit.

	CoroMill® 200			RPHX	
	Průměr řezání [mm]	68		Průměr destičky [mm]	12
	Maximální průměr řezání [mm]	80		Upínacího otvoru [mm]	Ø 4,4
	Úhel natočení hřbetu [°]	7		Výška destičky [mm]	4,76
	Maximální hloubka řezu [mm]	6		Úhel hřbetu [°]	11
	Celková délka [mm]	50			
Maximální úhel rampování [°]	3,5				
Účinný průměr řezání [mm]	63				

Obr. 32 Specifikace nástroje a destičky (Upraveno) [33, 34]

Na destičce bylo provedeno měření úhlů u poloměru bříty pomocí mikroskopu Keyence VHX – 6000. Pro měření se dále použilo plastické hmoty pro ustavení destičky. Hodnoty, které se doměřily jsou úhel čela (+10°) a poloměr bříty 0,12 [mm] (Obr. 33). Zohledněním úhlu čela na nástroji (-7°) a úhlu čela na destičce (+10°) vychází skutečný úhel čela (+3°)



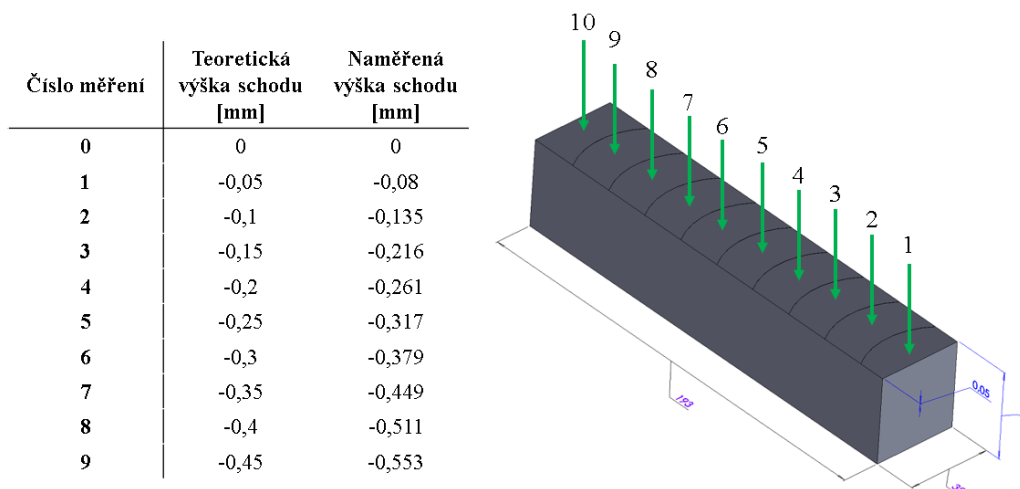
Obr. 33 Naměřené rozměry destičky

Destička je opatřena utvářečem třísky pro kvalitní tvorbu třísky v průběhu obrábění při vyšších řezných rychlostech. Je možné využít až 10 řezných hran destičky. Destička je vhodná pro obrábění materiálů třídy S, kam spadají těžkoobrobitelné materiály a jejichž představiteli jsou například niklové slitiny.

Pro experiment byly stanoveny konstantní parametry posuv na zub f_z , hloubka řezu a_p a řezná rychlost v_c byla nastavena ve třech úrovních. Parametry experimentu byly řezné rychlosti 30, 50 a 70 [m/min], posuv na zub 0,095 [mm/zub] a hloubka řezu 0,5 [mm]. Dalším krokem bylo monitorovat dynamické účinky v průběhu obrábění. Po obrobení plochy následovalo vyhodnocení skutečné výšky schodu a drsnosti povrchu na obrobené ploše.

Experiment se skládal ze dvou částí, kde první část reprezentovala obrábění 3 vrstev bez použití procesní kapaliny (bez PK). Zkoumalo se, zdali existuje spojitost mezi obráběním jednotlivých vrstev při nastavování různých řezných rychlostí v závislosti na měrné řezné síle a pasivní síle. Jedná se o možnosti, kde u niklu a jeho slitin může docházet k odpružení nástroje či zpevňování povrchové vrstvy, kde každý z těchto aspektů může výrazně ovlivnit obrobek a jeho následná zpracování. V druhé části experimentu byl sledován vliv řezného prostředí. Pro experiment byla zvolena tři prostředí – frézování bez použití PK, MQL, a nakonec záplava syntetickou PK. Cílem bylo vyhodnotit závislosti měrné řezné síle a pasivní síly na řezné rychlosti a tím i lépe pochopit chování superslitiny Inconel 713LC při obrábění. Dále pak obrobitelnost materiálu při těchto řezných podmínkách z pohledu struktury povrchu.

Obráběl se blok o rozměrech 40 × 38 × 193 [mm] (šířka × výška × délka), kde nejdelší strana byla rozdělena do 9 shodných ploch s délkou 20 [mm] a jedné ploše o délce 13 [mm]. Tyto části byly výškově odstupňovány po 0,05 [mm]. Po vytvoření ploch ve tvaru schodů se provedlo první měření převýšení schodů, za účelem stanovení referenční výšky h_r , která je stanovena na desátém schodu a následném změření zbylých naměřených výšek h_N pro zjištění skutečné hloubky řezu a_{pi} . Při měření bylo zjištěno, že teoretická výška schodu h_T a naměřená výška schodu h_N se poměrně liší (Obr. 34). Postup pro výpočet skutečné hloubky řezu bude popsán v další kapitole.



Obr. 34 Výškové parametry ploch

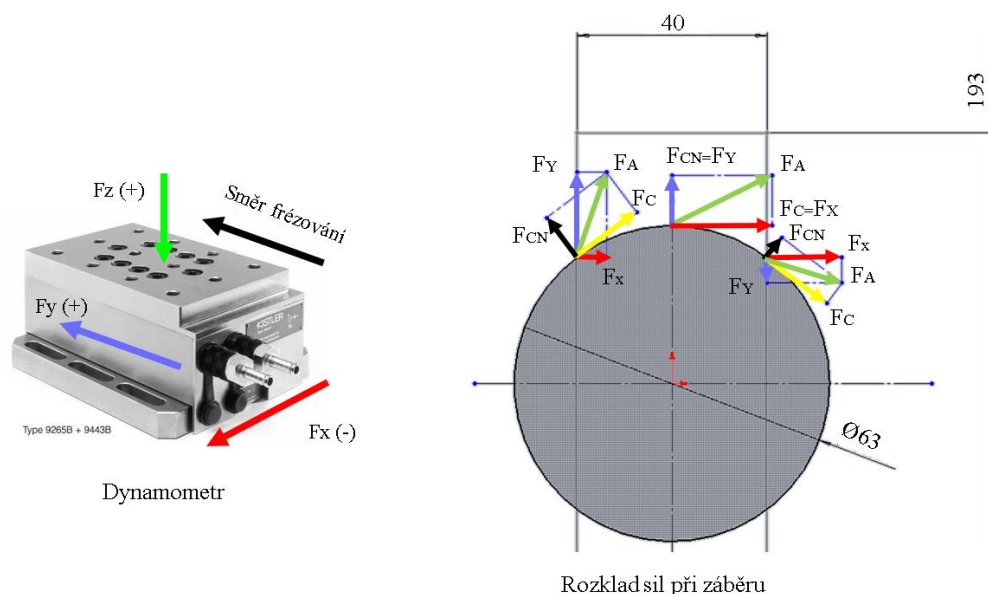
6.1 Silové účinky při obrábění

Před začátkem experimentální části byl do obráběcího centra OKUMA MU 400 II na otočný stůl upnut piezoelektrický dynamometr Kistler 9265B s upínací částí 9443B pro možnost upnutí obrobku přímo do dynamometru, čímž je zajištěno přesné zaznamenávání silových účinků. Dynamometr byl zapojen do nábojového zesilovače 5019, následně spojeným s A/D převodníkem 5697, který odesílá data do přenosného počítače, kde byla vyhodnocována závislost jednotlivých silových složek v programu DynoWare v reálném čase. Specifikace dynamometru jsou uvedeny níže (Tab. 6).

Tab. 6 Parametry dynamometru Kistler 9265B [35]

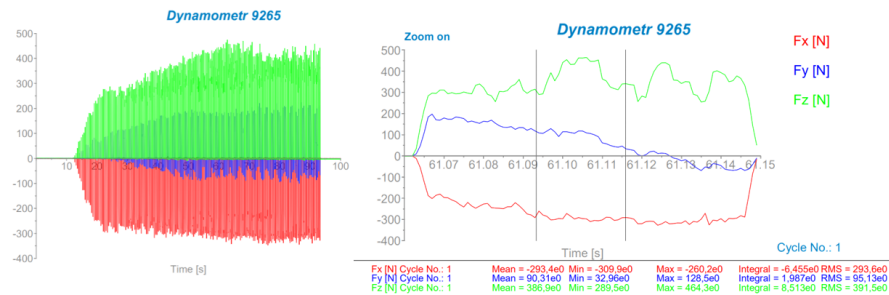
	Zkratka	Rozsah
Rozsah [kN]	F_X, F_Y	0 - 1,5
	F_Z	0–3
Citlivost [pC/N]	F_X, F_Y	≈ 8
	F_Z	≈ 8
Tuhost [kN/μm]	C_X, C_Y	≈1
	C_Z	≈2

Pro účely diplomové práce se zaznamenávaly všechny silové složky, každopádně důležité byly především silová složka ve směru dynamometru v ose X a Z ve střední části záběru destičky. Pro jednodušší vyhodnocení se zvolilo vycentrované frézování, které představuje obrábění, kdy osa nástroje kopíruje střed obrobku (Obr. 35).



Obr. 35 Rozložení jednotlivých složek sil při obrábění [35]

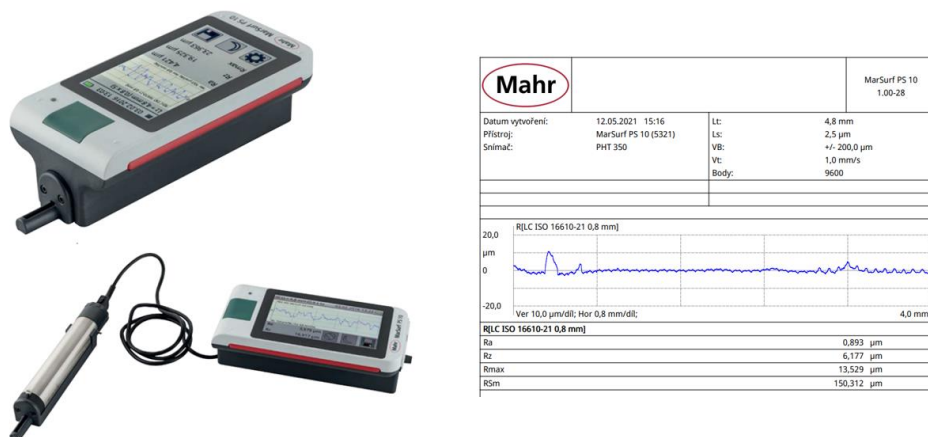
Dle (Obr. 35) je zřejmé, že hodnota tangenciální síly se ve střední části záběru rovná řezné síle F_C a axiální síla je shodná s pasivní silou F_P . Při obrobení plochy se vytvoří graf závislosti sil na čase (Obr. 36). Pro vyhodnocení sil se následně využívá analýzy v jednotlivých záběrech, kde je třeba se soustředit na střední část záběru, jak bylo znázorněno výše, pro získání správných hodnot. Před počátkem měření byla provedena kalibrace pomocí zkušebního tělíska (ruční siloměr), kterým byly naměřeny jednotlivé složky sil pro stanovení opravných hodnot.



Obr. 36 Ukázka průběhu při měření sil z DynoWare

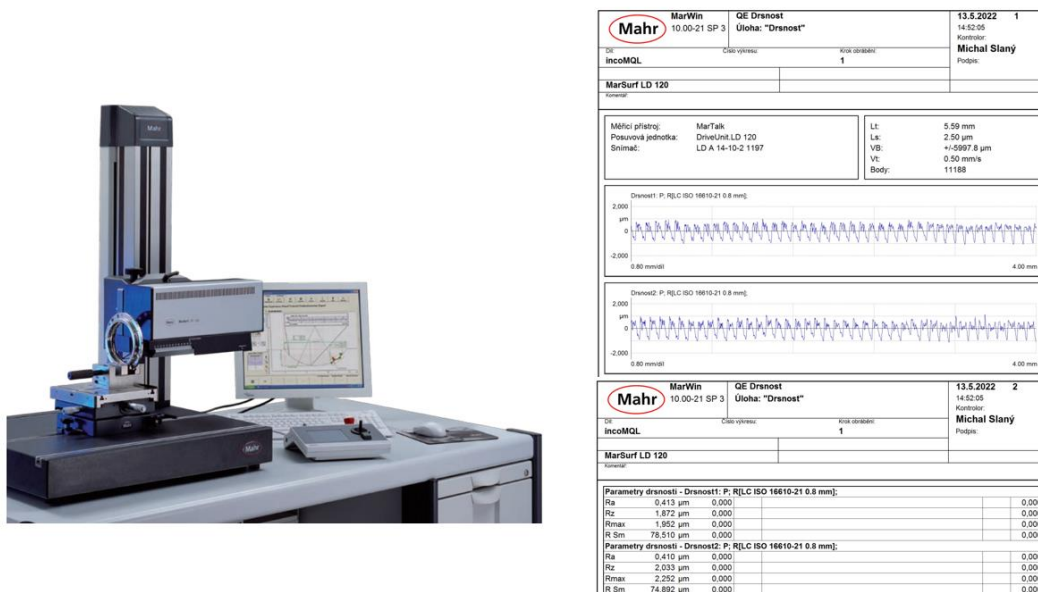
6.1.1 Drsnosti obrobené plochy

V první části experimentu byl použit pro měření drsnosti obrobené plochy přenosný drsnoměr MarSurf PS 10 (Obr. 37). Bylo důležité dbát na dostatečnou délku plochy pro správné vyhodnocení struktury povrchu. Délka plochy pro měření struktury povrchu vychází z normy ČSN EN ISO 4287. Měření probíhalo na 9 obrobených plochách, kde se zaznamenávaly základní parametry drsnosti. Vyhodnocovala se střední aritmetická odchylka profilu R_a , maximální výška profilu R_z , maximální hloubka drsnosti R_{max} a střední šířka rýh R_{Sm} . Všechny záznamy byly zpracovány do protokolu o měření struktury povrchu (Obr. 37), kde je znázorněn i grafický průběh profilu. [36]



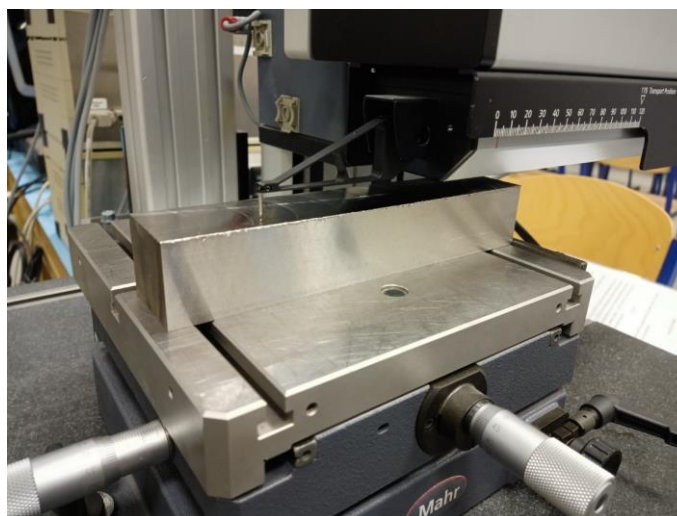
Obr. 37 Drsnoměr s protokolem o měření drsnosti [36]

Pro druhou část experimentu byl použit snímací systém MarSurf LD 120 (Obr. 38), který je schopen kontroly profilu v jednom směru. Jedná se o stacionární měřicí přístroj, který je připojený k počítači, na kterém se ukládají data, jež je možné uložit do PDF souboru. Oproti přenosnému drsnoměru MarSurf PS 10 má tu výhodu, že může měřit předměty o různých délkách, kdežto u přenosného drsnoměru je potřeba pokládací plocha a zkušenost pracovníka pro přesné a precizní změření drsnosti. Výhodou je i možnost vytvořit program pro měření, který zjednoduší samotné vyhodnocování drsnosti povrchu.



Obr. 38 Snímací systém s protokolem o měření drsnosti [40]

Měření probíhalo na všech plochách (Obr. 39). Pro účely experimentu byl vytvořen program, který vyhodnotil 5 různých drah na ploše a následně vytvořil záznam o měření. Z těchto hodnot se následně určil průměr pro eliminaci nepřesností při měření.



Obr. 39 Měření drsnosti pomocí snímací systém MarSurf LD 120

6.1.2 Vyhodnocení struktury povrchu

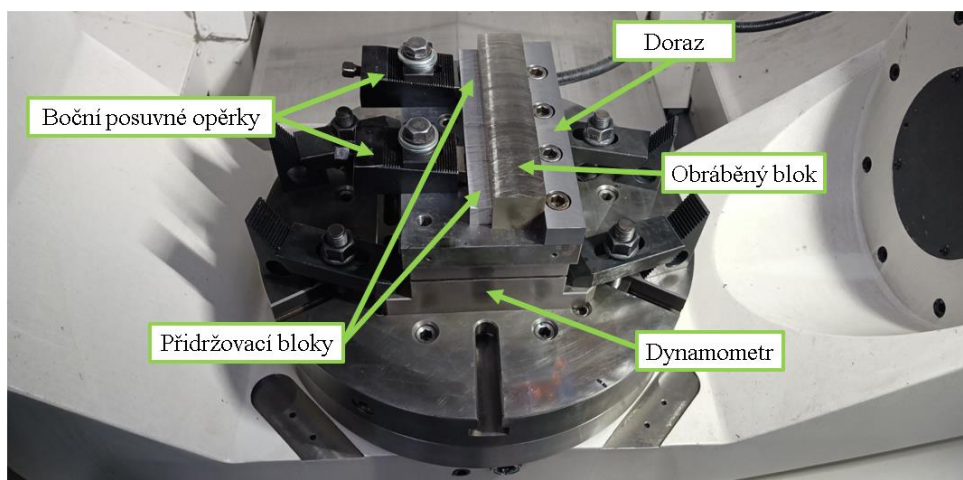
Pro vyhodnocení struktury povrchu obráběného bloku a změření úhlů destičky včetně zaoblení špičky byl využit mikroskop Keyence VHX - 6000 (Obr. 40), který dokáže jednak pracovat s 2D projekcí ale zároveň vykreslit i 3D reliéf pro měření složitějších částí objektu. Struktura povrchu může nabývat různých stavů, kde záleží na poměrně dosti parametrech při obrábění. Již posuv ovlivňuje samotnou drsnost, kde na (Obr. 40) je znázorněn posuv na zub pomocí odsazených rýh, které zanechala destička při obrábění, přesněji při posuvu na zub 0,095 [mm/zub]. Program pro měření je velmi intuitivní, proto bylo možné se rychle zorientovat v jeho funkcích, odměřit potřebné části a vytvořit záznam. [37]



Obr. 40 Digitální mikroskop s ukázkou vyhodnocení struktury obrobené plochy [37]

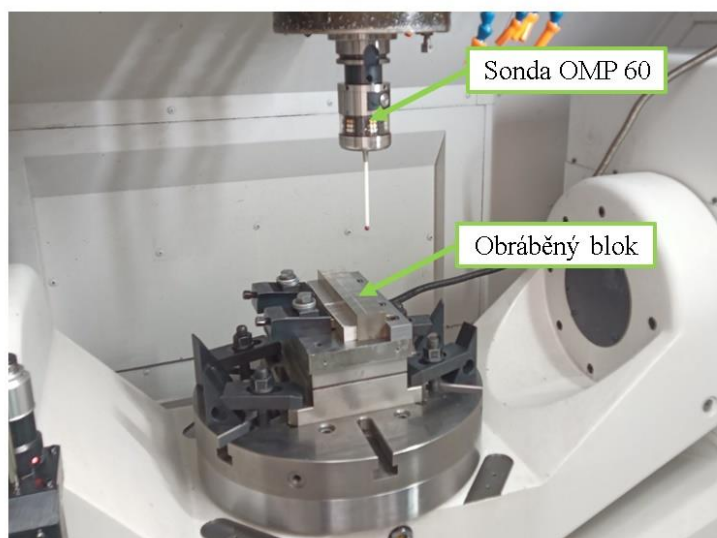
7 Návrh a realizace experimentu

Před samotným měřením bylo potřeba zajistit adekvátní ustavení dynamometru a obráběného bloku. Samotný dynamometr byl ustaven na otočné desce obráběcího centra. Upnutý byl pomocí sady upínek, která se skládala z 20 kusů (4 T-matice, 4 spojovací matice, 4 svorníky, 4 upínky a nakonec 4 stupňové bloky pro přesné výškové ustavení). Po upnutí dynamometru se na dynamometr přidal doraz, aby se zajistilo správné měření silových účinků, dále se přidaly hliníkové přídržovací bloky, aby nedocházelo k deformaci obráběného bloku od opěrky a nakonec opěrka, která odebírala obráběnému bloku stupeň volnosti. Uložení dynamometru na desce včetně popisu upnutí je znázorněno níže (Obr. 41).



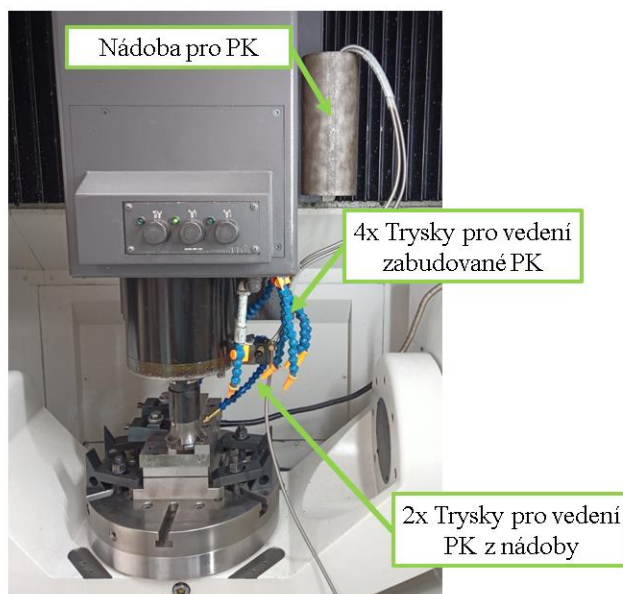
Obr. 41 Ustavení dynamometru s obráběným blokem

Po upnutí bloku na dynamometru byla provedena korekce nástroje, a nakonec i měření výšky deseti ploch na obráběném bloku pomocí sondy OMP 60 (Obr. 42) s optickým přenosem signálu od firmy Renishaw.



Obr. 42 Měření ploch pomocí sondy OMP 60

Po instalaci dynamometru a odměření skutečných hloubek bylo potřeba zaměřit se na umístění nádoby s PK (Obr. 43). Za tímto účelem byla vytvořena ocelová nádoba, která se přidává do horní části stroje, aby nenarušovala průběh obrábění. Tato nádoba byla použita při obrábění pomocí MQL.



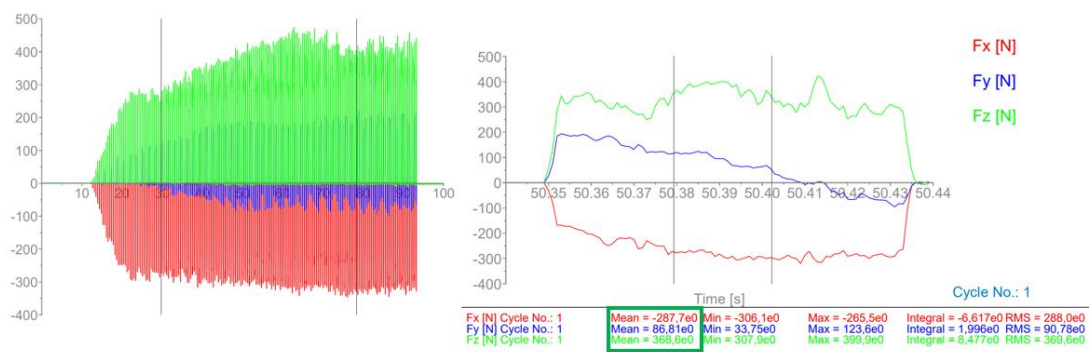
Obr. 43 Příprava pro použití různých řezných prostředí

Experiment byl rozdělen do dvou částí, kde první část zkoumala vliv jednotlivých vrstev při obrábění. Měření reprezentuje obrábění bez použití PK, kde se řešila problematika návaznosti hodnot z jednotlivých obráběných vrstev při monitorování dynamických účinků. Po získání všech hodnot bylo vyvozeno, jaký vliv má použití jednotlivých vrstev na dynamické účinky (měrná řezná síla a pasivní síla).

Druhá část experimentu se zabývala vlivem řezného prostředí na obrábění. Pro účely zkoumání této problematiky bylo zvoleno tří odlišných prostředí, kde dvě reprezentují udržitelné obrábění a poslední je konvenční forma řezného prostředí. Jednalo se o obrábění bez použití procesní kapaliny (bez PK), s minimálním množstvím maziva (MQL) a záplavou pomocí syntetické procesní kapaliny (záplava PK). Obrábělo se vždy 9 ploch pro jedno prostředí za kombinace řezné rychlosti 30, 50 a 70 [m/min]. Z tohoto měření se zjišťovala účinnost různých řezných prostředí na obrábění.

7.1 Vliv jednotlivých vrstev na obrábění

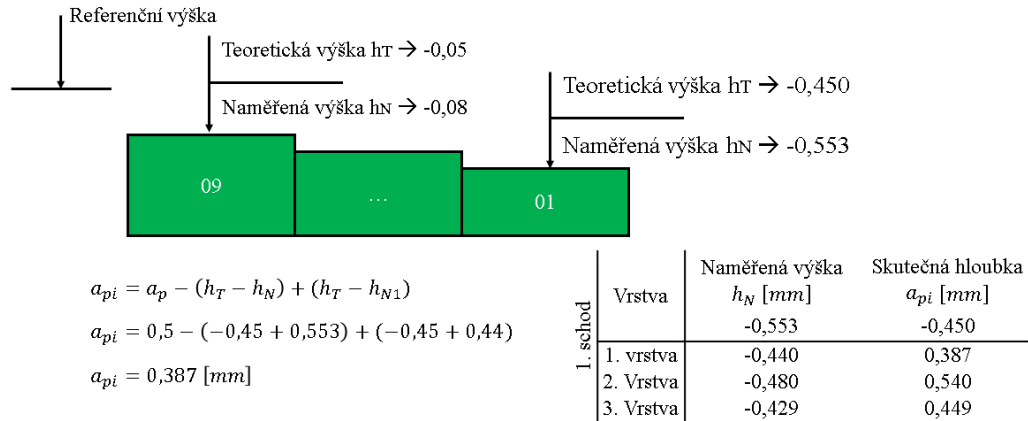
V první části, kdy se obrábělo bez PK byly frézovány 3 vrstvy na 9 plochách pro zjištění především závislost měrné řezné síly na řezné rychlosti. První vrstva se obráběla při řezné rychlosti v cyklu 30-30-30, 50-50-50, 70-70-70 [m/min]. V druhé vrstvě se nastavily řezné rychlosti v cyklu 30-50-70, 30-50-70, 30-50-70 [m/min]. Poslední vrstva byla obráběna při řezné rychlosti v cyklu 50-70-30, 50-70-30, 50-70-30 [m/min]. Po každé obrobené ploše byla otočena destička pro eliminaci špatně vyhodnocených sil způsobených opotřebením destičky z předchozího obrábění, kde jedna destička má možnost až 10 pozic pro natočení. V případě síly bylo zvoleno 7 částí z časové osy se snahou, aby byly hodnoty bez větších výkyvů. Při vyhodnocení se vybraly průměrné hodnoty ve středu záběru pro zajištění správnosti hodnot. Po naměření a určení hodnot se udělal aritmetický průměr (Obr. 44) pro stanovení měrné řezné síly.



1. Cyklus 30 [m/min]	Část záznamu	1/7	2/7	3/7	4/7	5/7	6/7	7/7	Průměr
	Čas [sec]		36	50	62	72	82	90	
Řezná síla Fc [N]		258	282	295	312	306	302	303	294
Pasivní síla Fp [N]		290	370	423	401	371	355	349	365

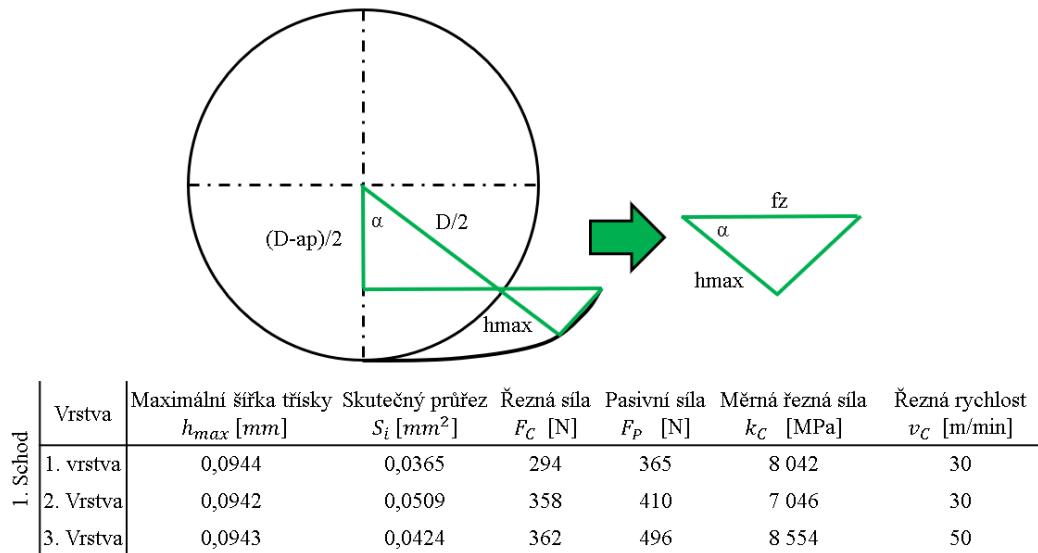
Obr. 44 Ukázka vyhodnocení silových účinků

Stanovení skutečně hloubky plochy předchází několik kroků. Prvním krokem bylo zarovnání ploch z předchozího obrábění, na kterém bylo vyfrézováno deset schodů o výšce 0,05 [mm]. Jakmile se obrobily všechny plochy tvaru schodů, změřily se výšky všech schodů, kde desátý schod reprezentoval referenční výšku. Díky různým okolnostem nebylo možné získat teoretickou výšku -0,450 [mm] na prvním schodu, byla naměřená výška -0,553 [mm] s čímž bylo třeba počítat. Odebráním 1. vrstvy materiálu při hloubce řezu 0,5 [mm] bylo na 1. schodu naměřeno -0,440 [mm] z čehož byla dopočítána, že skutečná hloubka řezu činí 0,387 [mm]. Níže je popsán postup, jak získat skutečnou hloubku řezu, který byl aplikován pro zbylé schody a vrstvy. (Obr. 45).



Obr. 45 Postup při výpočtu skutečné hloubky řezu

Pro výpočet měrné řezné síly bylo nutno získat maximální šířku třísky, jež byla odvozena z (Obr. 46). Po odvození a získání skutečné hloubky řezu a maximální šířky třísky již chybělo dopočítat skutečný průřez třísky, a nakonec i měrnou řeznou sílu.



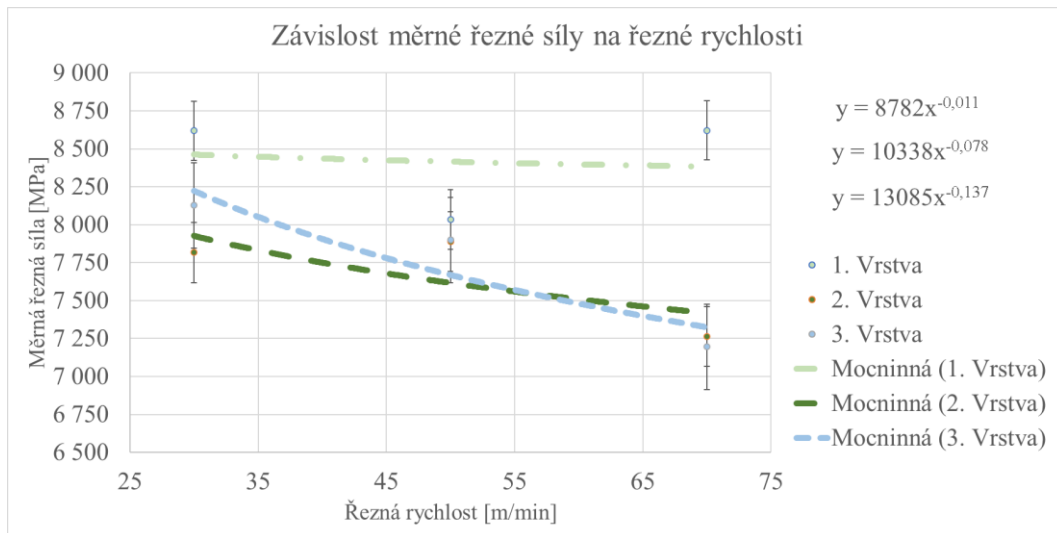
Obr. 46 Postup při výpočtu měrné řezné síly

Po spočtení všech hodnot byla sestavena (Tab. 7), která bude využita pro zjištění závislosti. Po stanovení hodnot pro všech 27 měření se následně se sloučily hodnoty na základě použité řezné rychlosti, z které se vytvořil aritmetický průměr, a následně stanovily závislosti.

Tab. 7 Ukázka tabulky pro první schod

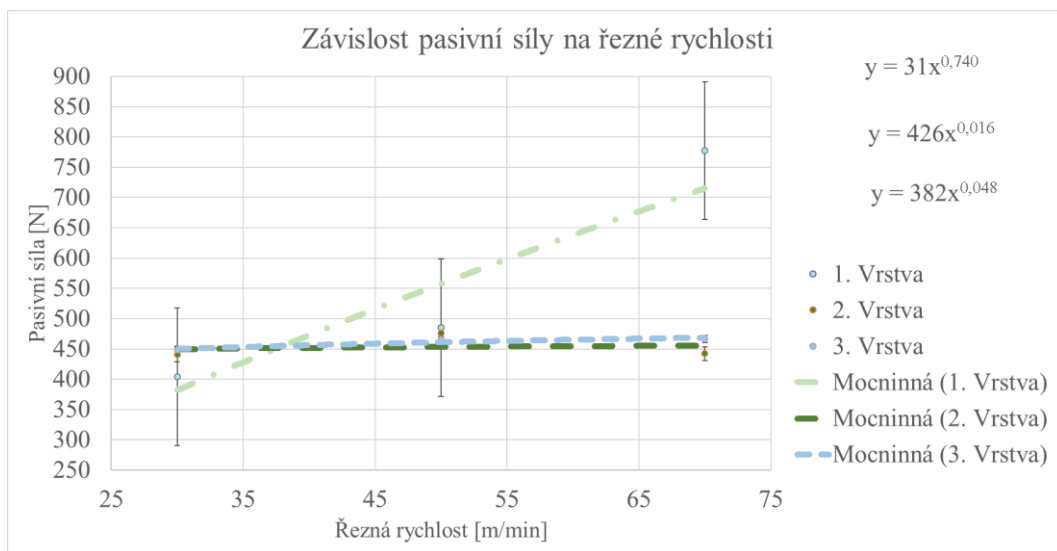
I. schod	Vrstva	Naměřená výška	Skutečná hloubka	Maximální šířka třísky	Skutečný průřez	Řezná síla	Pasivní síla	Měrná řezná síla	Řezná rychlost
		$h_N \text{ [mm]}$	$a_{pi} \text{ [mm]}$	$h_{max} \text{ [mm]}$	$S_i \text{ [mm}^2\text{]}$	$F_C \text{ [N]}$	$F_P \text{ [N]}$	$k_C \text{ [MPa]}$	$v_C \text{ [m/min]}$
	1. vrstva	-0,553	-0,450						
	1. vrstva	-0,440	0,387	0,0944	0,0365	294	365	8 042	30
	2. Vrstva	-0,480	0,540	0,0942	0,0509	358	410	7 046	30
	3. Vrstva	-0,429	0,449	0,0943	0,0424	362	496	8 554	50

Z porovnání jednotlivých vrstev při zjišťování závislosti měrné řezné síly na řezné rychlosti (Graf 6) vyplývá, že první vrstva byla silně ovlivněna tvorbou jednotlivých schodů, při hloubce řezu 0,05 [mm]. Následné vrstvy nenaznačují výrazné výkyvy měrných řezných sil při změně řezné rychlosti. K průniku měrných řezných sil dochází při řezné rychlosti 55 [m/min].



Graf 6 Závislost měrné řezné síly na řezné rychlosti různé vrstvy

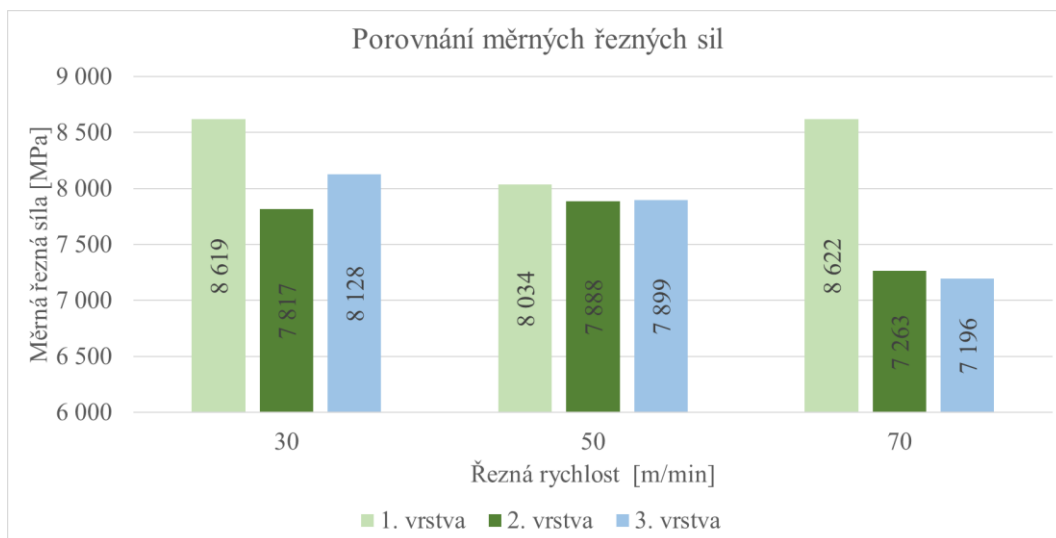
V případě závislosti pasivní síly na řezné rychlosti (Graf 7) je vidět stejně velké ovlivnění první vrstvy jako u měrné řezné síly při srovnání jednotlivých vrstev.



Graf 7 Závislost pasivní síly na řezné rychlosti, různé vrstvy

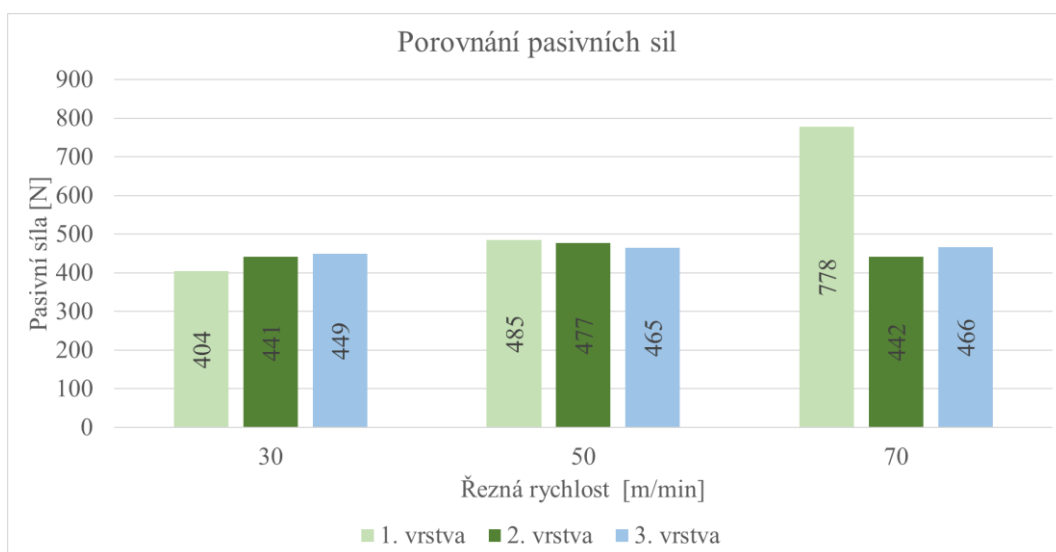
Při zkoumání jednotlivých vrstev, na kterých se zjišťovala závislost měrné řezné síly na řezné rychlosti (Graf 8) jsem dospěl k závěru, že obrábění vrstev při stejných řezných podmínkách nemá významný vliv na následující obrábění. První vrstva byla ovlivněna tvorbou předchozích

ploch tvaru schodů. Tento jev byl způsoben malou hloubkou třísky, kde docházelo ke zpevňování povrchové vrstvy, čímž se zhoršovala obrobiteľnosť dané vrstvy pro následné obrábění.



Graf 8 Porovnání měrné řezné síly na obráběné vrstvy

Níže uvedený (Graf 9) znázorňuje porovnání pasivních sil při obrábění všech 3 vrstev za kombinace 3 řezných rychlostí, kde k jedinému výkyvu dochází při řezné rychlosti 70 [m/min]. Došlo zde k velkému opotřebení destičky, čímž vzrostla i pasivní síla.



Graf 9 Porovnání pasivních sil na obráběné vrstvy

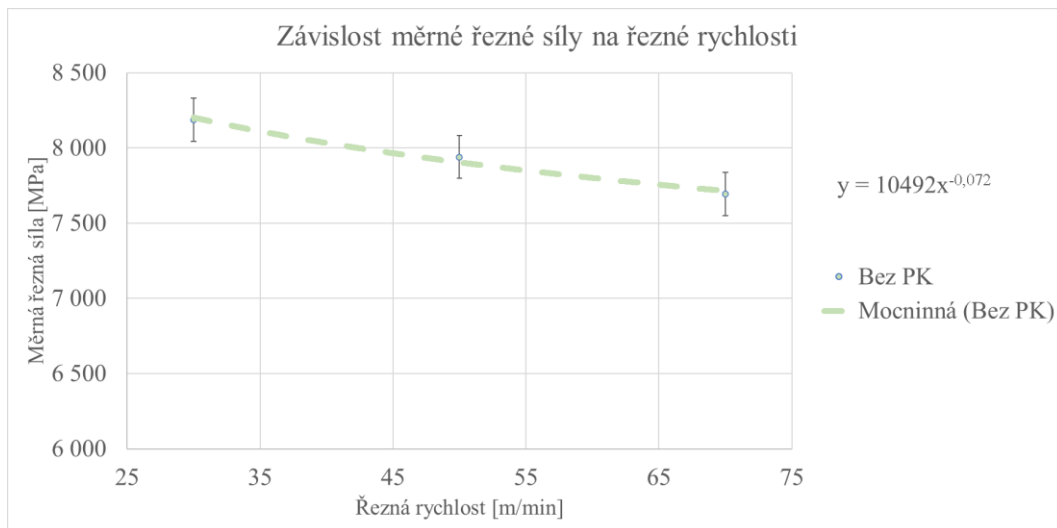
Z výše uvedených výsledků vyvozují, že při obrábění druhé části experimentu v různých řezných prostředích není třeba dávat příliš velký význam obrábění jednotlivých vrstev.

7.2 Vliv řezného prostředí na obrábění

V druhé části byly využity tři řezné prostředí (bez PK, MQL a záplava syntetické PK). Zjišťovala se závislost měrné řezné síly a pasivní síly na řezné rychlosti při použití různých druhů řezného prostředí. Dále se zjišťovalo, jaký dopad měla tato prostředí na parametry drsnosti (R_a , R_z , R_{max} a R_{SM}). Každé prostředí reprezentovalo 9 obráběných ploch s tím, že se shodovaly i cykly řezných rychlostí, které činily 30-50-70, 30-50-70 a 30-50-70 [m/min]. Poslední plocha byla obráběna při řezné rychlosti 90 [m/min] pro vyhodnocení, jak se chová destička při těchto rychlostech. Posuv na zub byl nastaven na 0,095 [mm/zub] a hloubka řezu 0,5[mm]. V případě síly bylo zvoleno opět 7 částí z časové osy se snahou, aby byly hodnoty bez větších výkyvů. Při vyhodnocení se vybraly průměrné hodnoty ve středu záběru pro zajištění správnosti hodnot.

7.2.1 Frézování bez procesní kapaliny

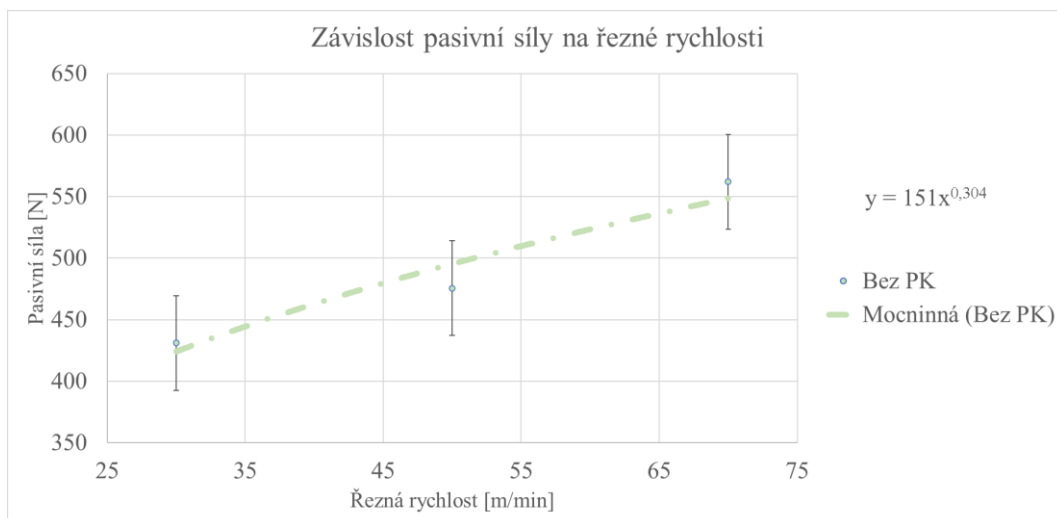
V první fázi druhé části se obrábělo bez PK. Ze závislosti měrné řezné síly na řeznou rychlost (Graf 10) vyplývá, že s rostoucí řeznou rychlostí klesá měrná řezná síla. Z rovnice křivky lze vyčíst, že průběh funkce má mírně klesající tendenci s rychlostí -0,072. Při srovnání měrné řezné síly v celém rozsahu řezné rychlosti došlo k úbytku měrné řezné síly o 494 [MPa] (6 %), což představuje poměrně silný úbytek měrné řezné síly. Tento předpoklad ale bude negativně ovlivňovat opotřebení VBD, která následně bude zvyšovat měrnou řeznou sílu čímž bude docházet ke zploštění křivky. Tato závislost kopíruje předpoklady z teorie, že hodnota vztažená na 1 [mm²] průřez třísky odpovídá hodnotě měrné řezné síly k_{c1} od 2400 až 3100 [MPa].



Graf 10 Závislost měrné řezné síly na řezné rychlosti Bez PK

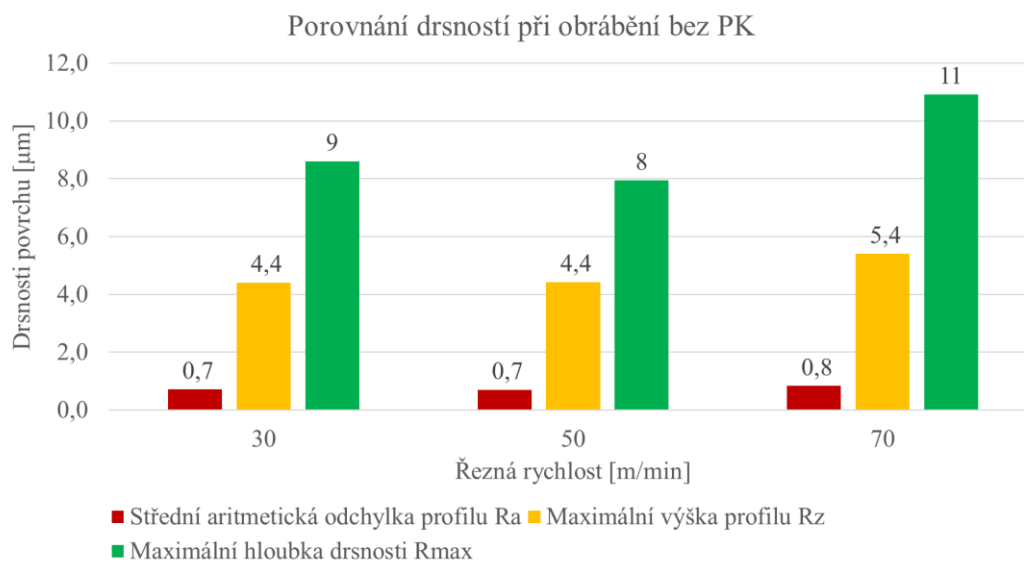
V případě závislosti pasivní síly na řeznou rychlost (Graf 11) dochází k rostoucímu potenciálu křivky o rychlosti 0,304. Tento nárůst pasivní síly je spojen s kumulací tepla, které vede k rychlejším opotřebením destičky, zejména opotřebení čela, čímž se mění geometrie celého

nástroje. Tento jev lze porovnat v celém rozsahu, kdy došlo k nárůstu pasivní síly o 131 [N] (23 %).



Graf 11 Závislost pasivní síly na řezné rychlosti Bez PK

Růst pasivní síly je výrazný a vede ke zhoršení drsnosti obrobeneé plochy (Graf 12), přesnosti při obrábění a možné náchylnosti ke vzniku chvění díky snížení tuhosti soustavy. Porovnáním limitních hodnot drsností se zjistilo, že rozdíl činil - R_a 0,114 [μm] (14 %), R_z 0,996 [μm] (18 %), R_{max} 2,313 [μm] (21 %) a R_{SM} 80 [μm] (29 %).



Graf 12 Porovnání parametrů drsnosti povrchu na řezné rychlosti bez PK

7.2.2 Frézování pomocí minimálního množství maziva

Při frézování pomocí MQL bylo použito řezného oleje Paramo Cut 3 klasifikovaného jako ISO 6743 ISO – L – MHF. Zlepšuje řezné a mazací účinky při obrábění a chrání stroj i obrobek před korozí. Jedná se o velmi výkonný řezný olej vhodný především pro dokončovací operace běžných konstrukčních ocelí. Spotřeba v průběhu obrábění byla přibližně 2 [g/min]. Nádoba s olejem byla umístěna v horní části stroje na konstrukci, aby nedošlo ke kontaktu s nádobou. Parametry použitého oleje jsou v (Tab. 8). [38]

Tab. 8 Charakteristické vlastnosti řezného oleje [38]

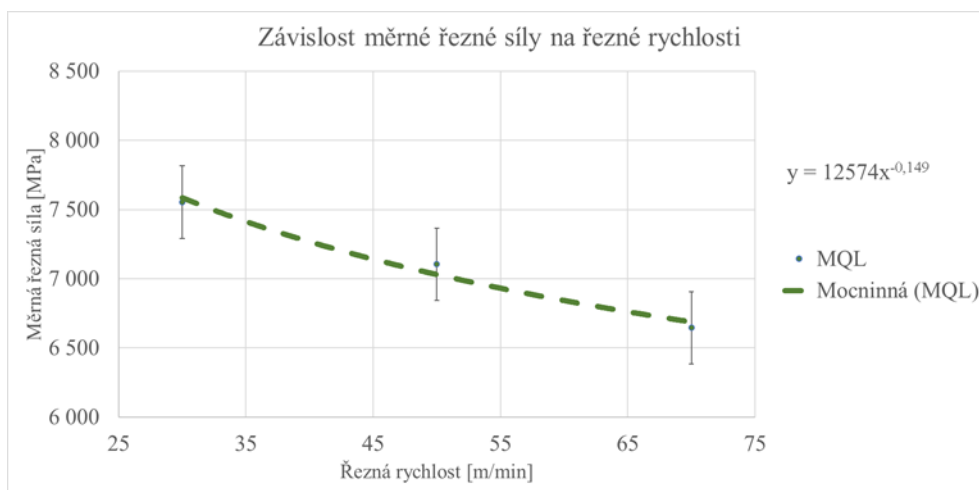
Parametr	Hodnota	Norma
Hustota při 15°C [kg/m ³]	840	ČSN EN ISO 12185
Kinematická viskozita při 40°C [mm ² /s]	4,51	ČSN EN ISO 3104
Bod vzplanutí OK [°C]	141	ČSN EN ISO 2592
Bod tekutosti [°C]	-54	ČSN EN ISO 3016
Test koroze (mosaz 80°C, 3 hod)	Negativní	ČSN 65 6074
Test koroze (ocel 20°C, 24 hod)	Negativní	ČSN 65 6074
Pěnovost/stálost pěny [cm ³ /dm ³]:		
- Při 24°C, max	100/0	ČSN ISO 6247
- Při 93,5°C, max		
- Při 24°C po 93,5°C max		

Olej byl přiváděn do místa řezu pomocí dvou trysek, které vedly olej prostřednictvím vzduchu z kompresoru. Trysky byly nastaveny proti směru pohybu frézy (Obr. 47). Podmínkou správného čerpání oleje je, aby jedna hadice byla kratší, díky čemuž se zajistí sací schopnosti. V případě, že by se jednalo o dvě totožně dlouhé hadice se stane, že nebude docházet k odčerpávání ale nasávání vzduchu do nádoby s olejem.



Obr. 47 Nastavení směru proudění pro MQL

Průběh závislosti měrné řezné síly na řezné rychlosti (Graf 13) v případě použití minimálního množství maziva probíhal v celém rozsahu řezné rychlosti od 30 do 70 [m/min] s mírným poklesem měrné řezné síly. Z rovnice křivky lze vyčíst, že průběh funkce má mírně klesající tendenci s rychlostí -0,149. Této klesající tendenci odpovídá i pokles měrné řezné síly o 908 [MPa] (12%) v limitních hodnotách. Je zřejmé, že při navyšování řezné rychlosti bude dále klesat sklon křivky závislosti měrné řezné síly na řeznou rychlost. Řezný olej Paramo Cut 3 plně zajišťoval řezný i mazací efekt při obrábění, který zlepšoval chování materiálu při obrábění.



Graf 13 Závislost měrné řezné síly na řezné rychlosti MQL

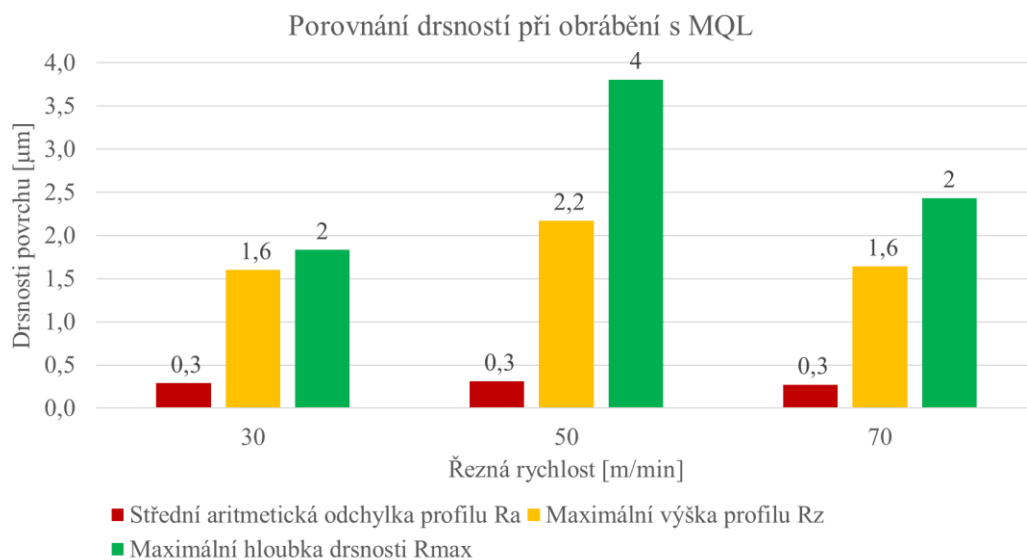
V případě závislosti pasivní síly na řezné rychlosti (Graf 14) dochází k mírnému poklesu pasivní síly jež je způsobeno použitím řezného oleje Paramo Cut 3, který zajišťuje dostatečné řezné a mazací účinky, které snižují opotřebení břitu destičky. Řezný olej zajistil stabilizaci pasivní síly, kdy došlo k rozdílu v limitních hodnotách pouze o 2 [N] (1 %).



Graf 14 Závislost pasivní síly na řezné rychlosti MQL

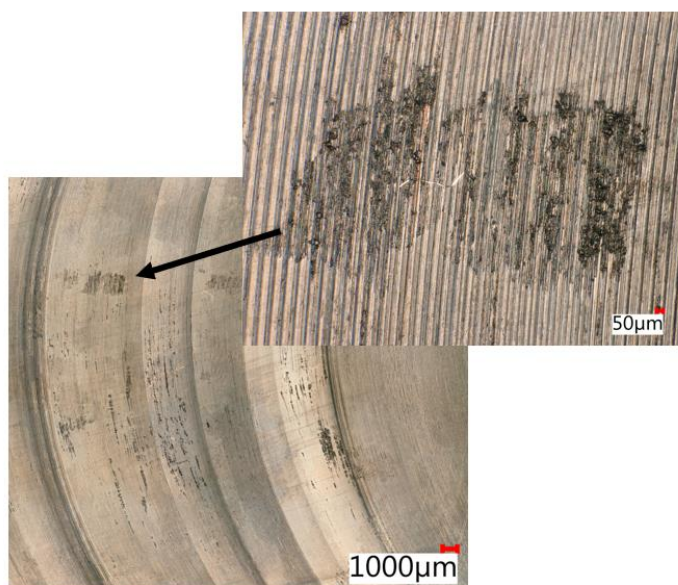
Růst pasivní síly je mírný a nijak závažně neovlivňuje parametry drsnosti obrobené plochy (Graf 15). Je zřejmé, že PK má velmi kladné řezné i mazací účinky, které vedou k dobře

obrobenému povrchu z pohledu povrchových charakteristik drsnosti. Porovnáním limitních hodnot drsností se zjistilo, že rozdíl činil - R_a 0,015 [μm] (5 %), R_z 0,041 [μm] (2 %), R_{max} 0,6 [μm] (16 %) a R_{SM} 0,490 [μm] (1 %).



Graf 15 Porovnání parametrů drsnosti povrchu na řezné rychlosti MQL

V průběhu obrábění docházelo k navařování obráběného materiálu k ploše a zároveň odtrhávání materiálu (Obr. 48).



2. plocha

Obr. 48 Znárodnění povrchu obrobené plochy

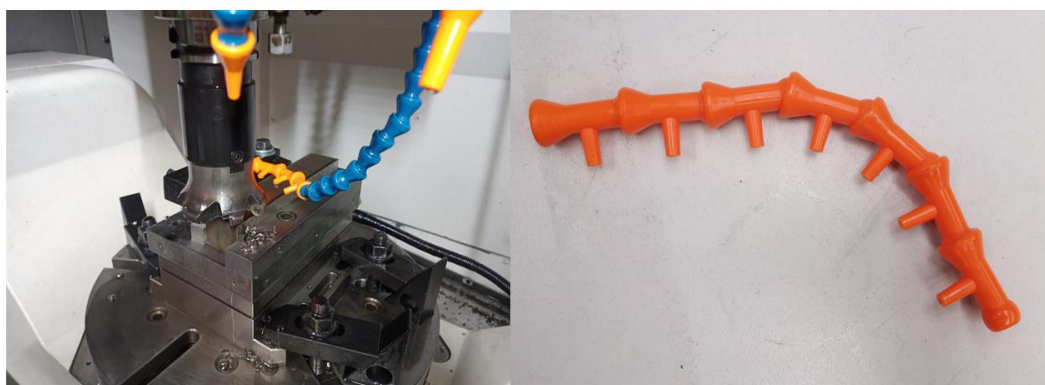
7.2.3 Frézování při záplavě syntetickou procesní kapalinou

Při frézování pomocí záplavy docházelo k chlazení nástroje i obráběného materiálu proudem syntetické bezolejové PK mísitelné s vodou. Jednalo se o 8% roztok PK Blaser Synergy 735, který se převážně používá pro hliníkové slitiny (Tab. 9). Výrobce uvádí, že díky nízké hodnotě pH zajišťuje povrch bez skvrn. Tato PK je vhodná zejména při obrábění hliníkových a titanových slitin, popřípadě nerezových ocelí či niklových slitin. Výrobce uvádí, že daná PK zaručuje minimální pěnivost a průhlednost, která zajišťuje obsluhu možný vhled do místa řezu. Nedoporučuje se kombinace Synergy 735 s jiným přípravkem. Kombinace může vést ke zvýšení pH, čímž se sníží mazací účinky kapaliny.

Tab. 9 Charakteristické vlastnosti syntetické PK [39]

Parametr	Hodnota
Barva	Bezbarvá
Obsah minerálního oleje [%]	0
Hustota při 20°C [g/cm ³]	1,06
Kinematická viskozita při 40°C [mm ² /s].	53
Hodnota pH	7,5 – 8,2

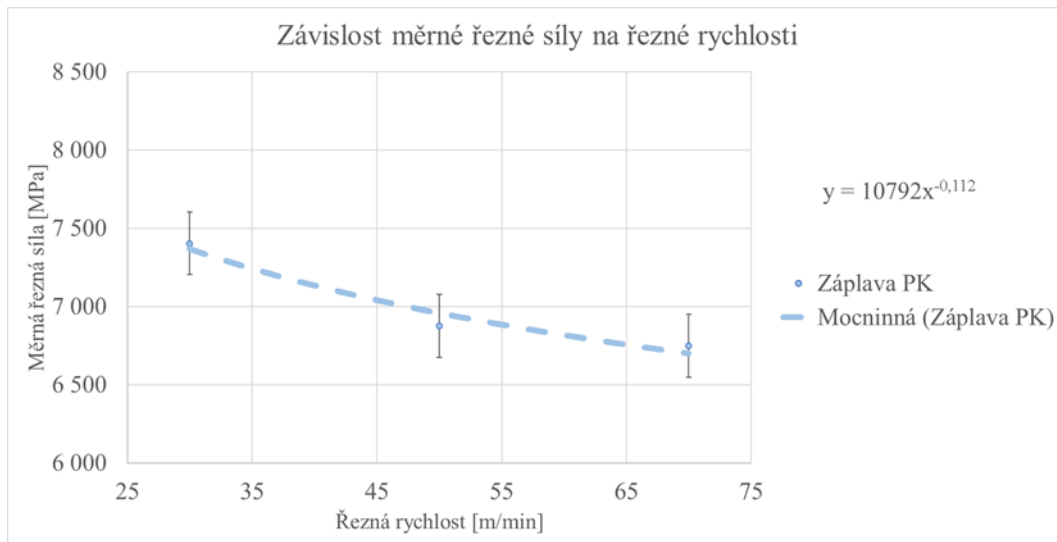
Před samotným obráběním bylo třeba nastavit, aby trysky, které budou vést PK byly správně nastaveny. Použilo se stavebnicového přípravku (Obr. 49), jež vede PK ze zásobníku stroje prostřednictvím trysek do místa řezu. Stavebnice se dá modifikovat z pohledu počtu trysek či nastavení pozic. Trysky ze stavebnice byla směřovány do místa řezu prostřednictvím 7 zúžení pro zajištění dostatečného přívodu PK.



Obr. 49 Nastavení směru proudění pro záplavu PK

Průběh závislosti měrné řezné síly na řezné rychlosti (Graf 16) v případě použití záplavy syntetickou PK probíhalo v celém rozsahu řezné rychlosti od 30 do 70 [m/min] se strmým poklesem měrné řezné síly. Z rovnice křivky lze vyčíst, že průběh funkce má mírně klesající tendenci s rychlostí -0,112. Této klesající tendenci odpovídá i pokles měrné řezné síly o 665

[MPa] (9%) v limitních hodnotách. Je zřejmé, že při navyšování řezné rychlosti bude dále klesat sklon křivky závislosti měrné řezné síly na řeznou rychlost. Roztok 8% PK Blaser Synergy 735, který byl přiváděn do místa řezu pomocí stavebnice plně zajišťoval chladicí efekt při obrábění, jež zlepšoval chování materiálu při obrábění.



Graf 16 Závislost měrné řezné síly na řezné rychlosti při záplavě PK

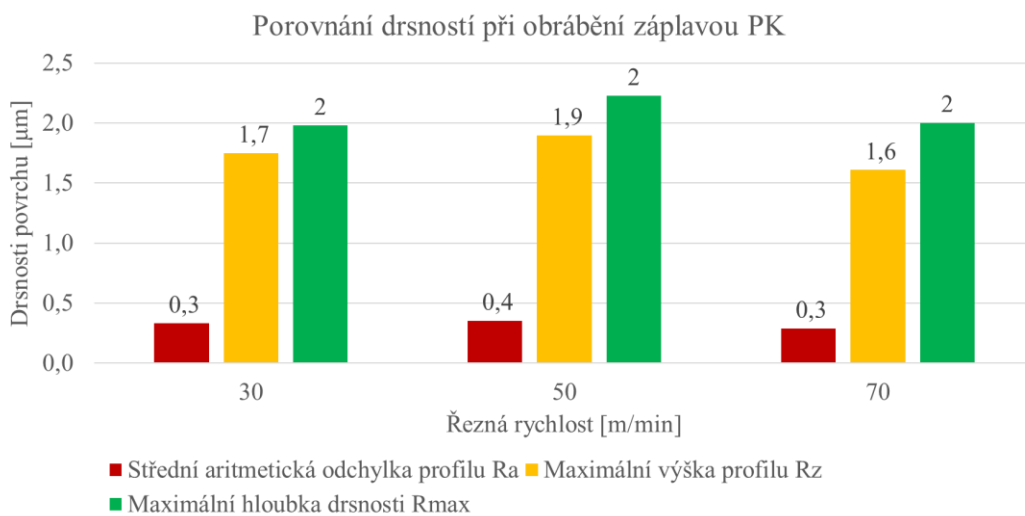
V případě závislosti pasivní síly na řezné rychlosti (Graf 17) dochází k mírnému nárůstu pasivní síly jež je způsobeno absencí mazacího účinku syntetické PK. Syntetická procesní kapalina zajistil stabilizaci pasivní síly, kdy došlo k rozdílu v limitních hodnotách pouze o 2 [N] (1 %).



Graf 17 Závislost pasivní síly na řezné rychlosti při záplavě PK

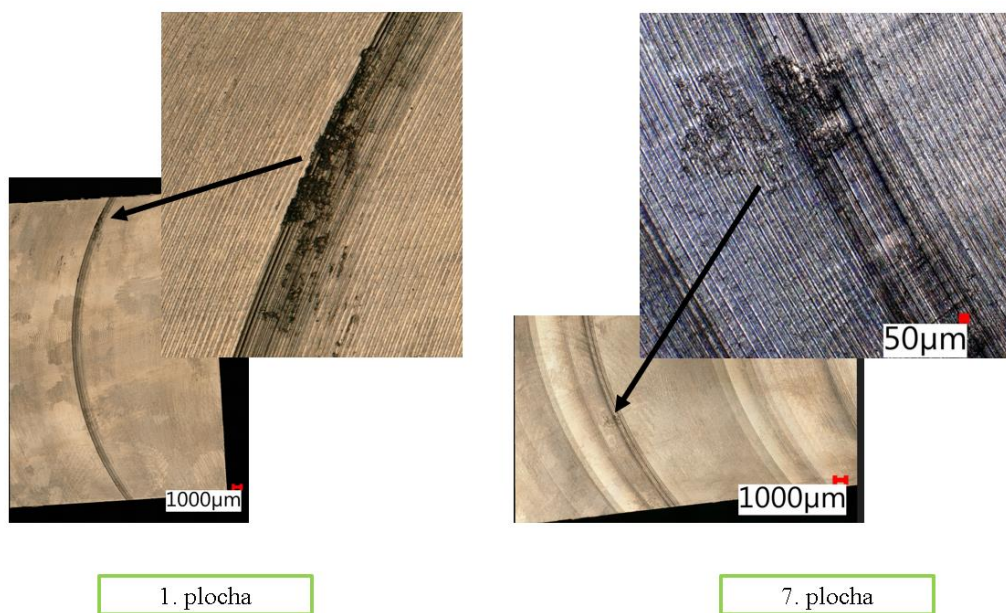
Růst pasivní síly je výrazný a vede ke zhoršení drsnosti obrobenej plochy (Graf 18), přesnosti při obrábění a možné náchylnosti ke vzniku chvění díky snížení tuhosti soustavy. Je zřejmé, že ke zhoršeným výsledkům došlo i z důvodu tvorby nárůstku na destičce, která byla převážně nestabilního rázu čímž deformovala obrobenu plochu. Porovnáním limitních hodnot

drsností se zjistilo, že rozdíl činil - R_a 0,043 [μm] (12 %), R_z 0,142 [μm] (7 %), R_{max} 0,023 [μm] (1 %) a R_{SM} 2,233 [μm] (3 %)



Graf 18 Porovnání parametrů drsnosti povrchu na řezné rychlosti při záplavě PK

V průběhu obrábění docházelo k navařování a zároveň odtrhávání materiálu, který je znázorněn níže (Obr. 50).



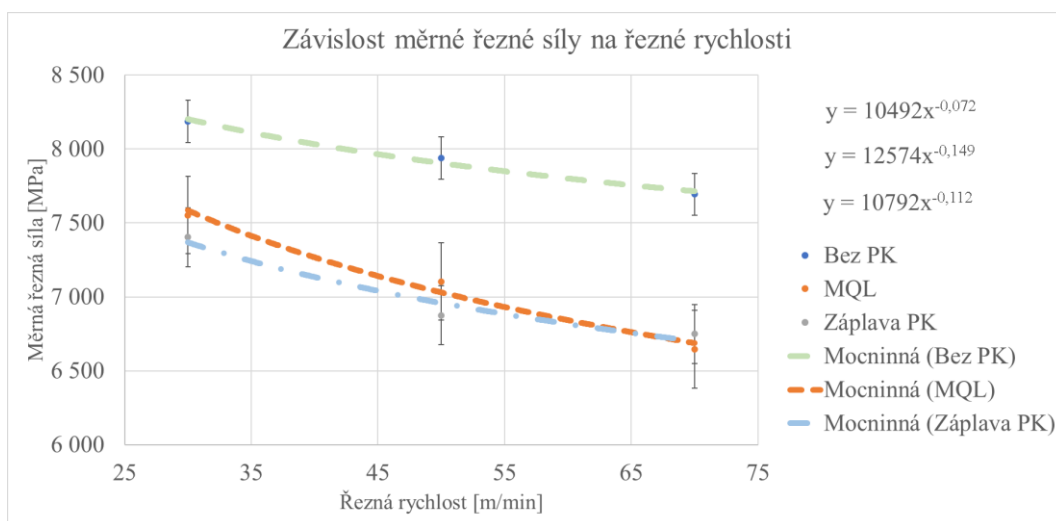
Obr. 50 Znárodnění povrchu obrobené plochy u záplavy PK

7.3 Porovnání řezných prostředí

V experimentu se monitorovaly dynamické ukazatele (měrná řezná síla a pasivní síla) a kvalita povrchu při řezných prostředích, kdy se obrábělo pomocí bez PK, MQL použitím řezného oleje Paramo Cut 3 a záplavou PK použitím syntetické PK Blaser Synergy 735.

7.3.1 Porovnání měrné řezné síly

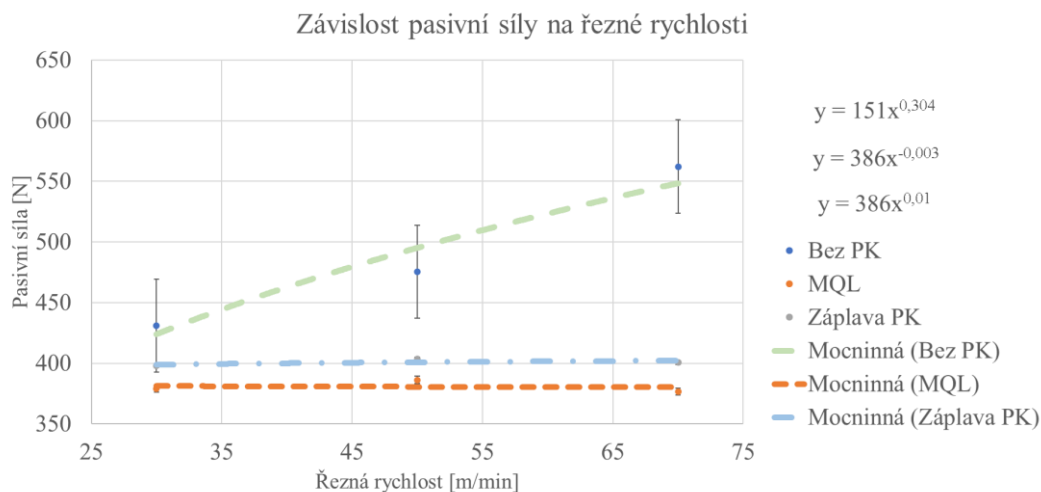
Při porovnání závislostí měrných řezných sil na řezné rychlosti (Graf 19) vyšlo najevo, že nejvyšších měrných řezných sil je dosaženo při frézování bez PK v celém rozsahu měření od 8188 do 7694 [MPa]. Jedná se o formu, kdy je třeba zajistit vyšší tuhost a výkon obráběcího centra z důvodu vyšších řezných sil. V případě obrábění MQL se měrná řezná síla pohybovala v rozsahu od 7404 do 6749 [MPa]. Podobně na tom byly hodnoty měrné řezné síly při záplavě PK, konkrétně od 7554 do 6646 [MPa].



Graf 19 Porovnání měrné řezné síly na použité PK

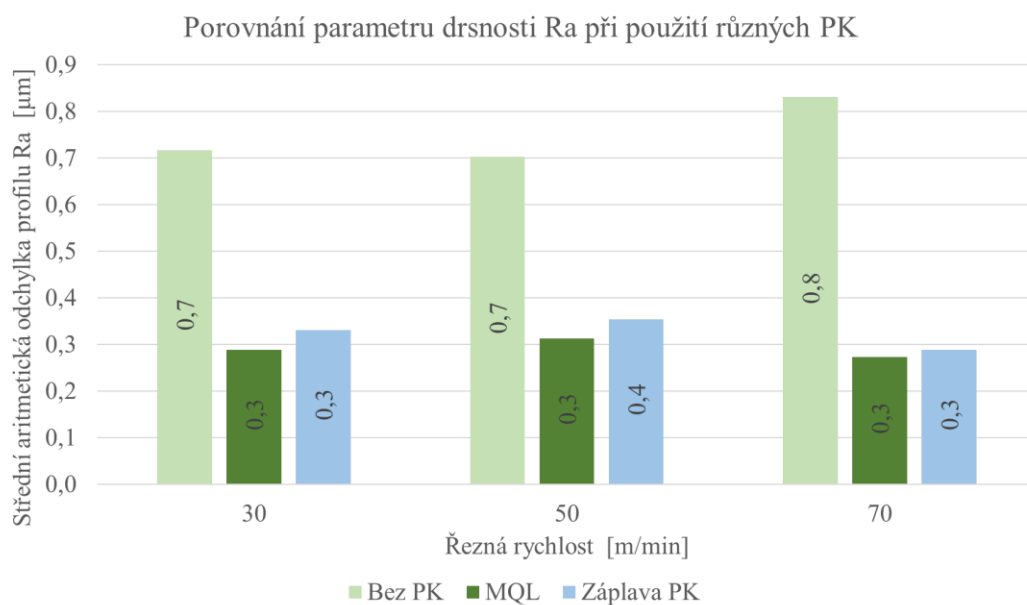
7.3.2 Porovnání pasivní síly

Při porovnání závislosti pasivních sil na řezné rychlosti (Graf 20) vyšlo najevo, že nejvyšších měrných řezných sil je dosaženo při frézování bez PK v celkovém rozsahu měření od 431 do 562 [MPa]. Jedná se o formu, kdy je třeba zajistit vyšší tuhost a výkon obráběcího centra z důvodu vyšších řezných sil. V případě obrábění při MQ se měrná řezná síla pohybovala v rozsahu od 379 do 377 [MPa]. Podobně na tom byly hodnoty měrné řezné síly při záplavě PK, konkrétně od 398 do 401 [MPa].



7.3.3 Porovnání střední aritmetické odchylky profilu

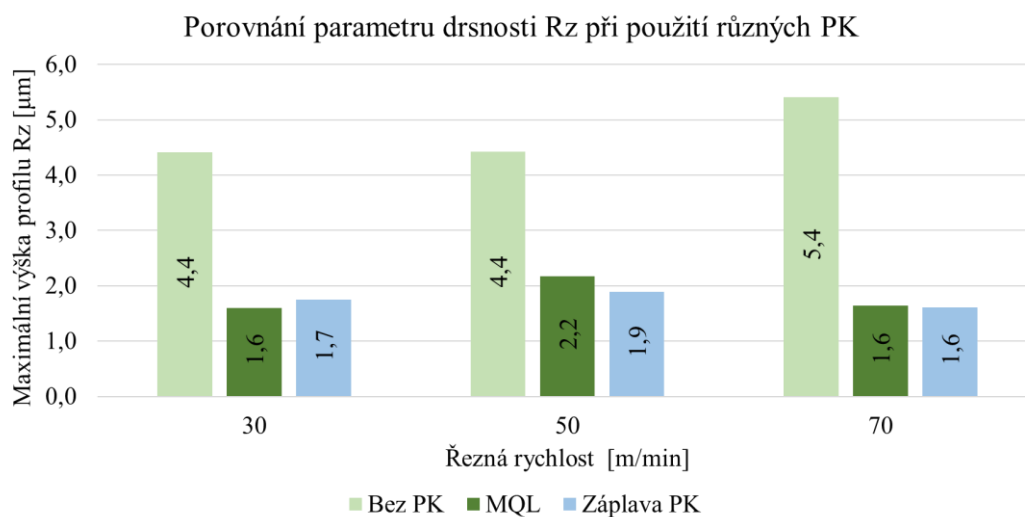
Při porovnávání drsností (Graf 21), konkrétně parametru střední aritmetická odchylka profilu R_a se dosahovalo nehroších hodnot při obrábění bez PK, kde průměrná hodnota dosahovala 0,75 [μm]. Při použití PK došlo ke snížení drsnosti R_a na méně než polovinu, konkrétně u drsnosti při obrábění pomocí MQL vycházela průměrná drsnost R_a 0,29 [μm] a v případě použití záplavy PK vycházela 0,32 [μm].



Graf 21 Porovnání parametru drsnosti R_a na použité PK

7.3.4 Porovnání maximální výšky profilu

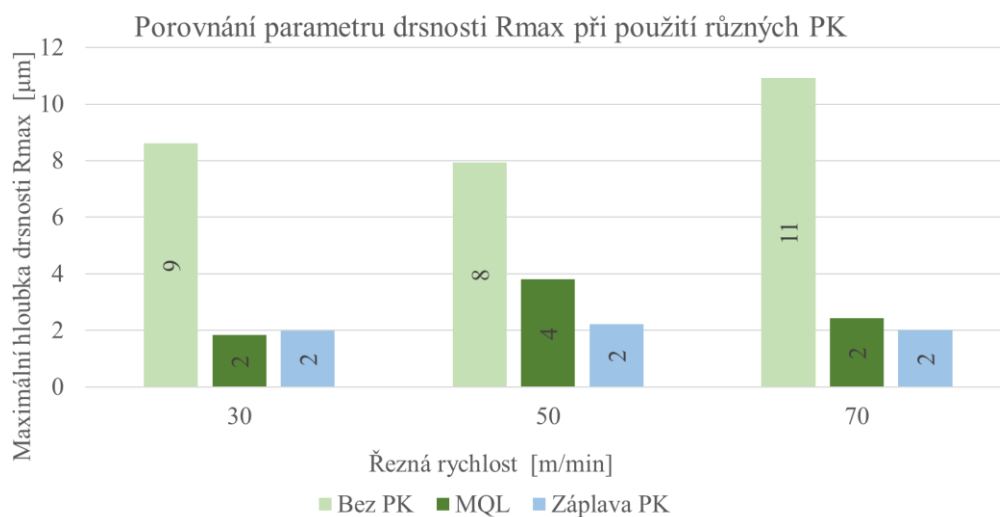
Při porovnávání drsností (Graf 22), konkrétně parametru maximální výška profilu R_z se dosahovalo nehrošících hodnot při obrábění bez PK, kde průměrná hodnota dosahovala 4,75 [μm]. Při použití PK došlo ke snížení drsnosti R_z na méně než polovinu, konkrétně u drsnosti při obrábění pomocí MQL vycházela průměrná drsnost R_z 1,81 [μm] a v případě použití záplavy PK vycházela 1,75 [μm].



Graf 22 Porovnání parametru drsnosti R_z na použité PK

7.3.5 Porovnání maximální hloubky drsnosti

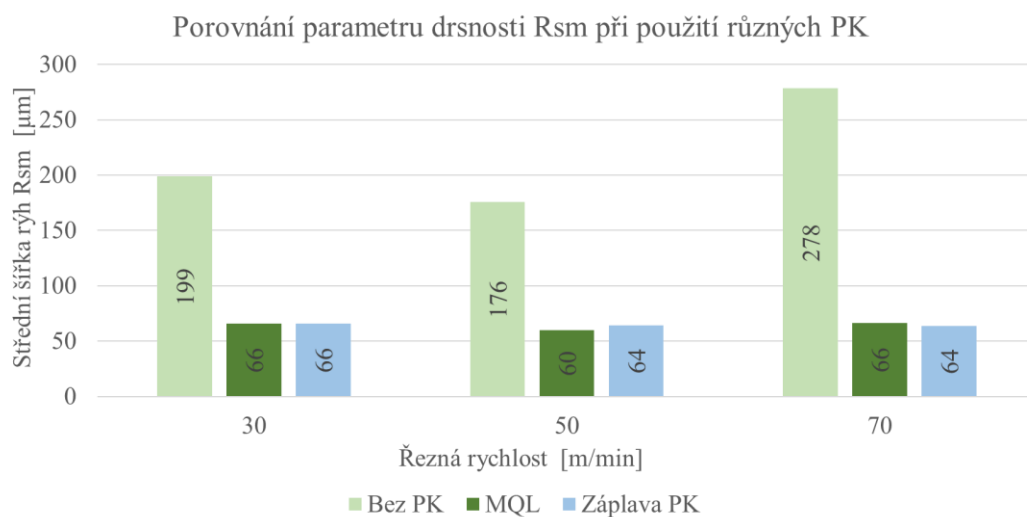
Při porovnávání drsností (Graf 23), konkrétně parametru maximální hloubka drsnosti R_{max} se dosahovalo nehroších hodnot při obrábění bez PK, kde průměrná hodnota dosahovala 9,15 [μm]. Při použití PK došlo ke snížení drsnosti R_{max} na méně než třetinu, konkrétně u drsnosti při obrábění pomocí MQL vycházela průměrná drsnost R_{max} 2,69 [μm] a v případě použití záplavy PK vycházela 2,07 [μm].



Graf 23 Porovnání parametru drsnosti R_{max} na použité PK

7.3.6 Porovnání střední šířky rýh

Při porovnávání drsností (Graf 24), konkrétně parametru střední šířka rýh R_{SM} se dosahovala nehrošících hodnot při obrábění bez PK, kde průměrná hodnota dosahovala 271,7 [μm]. Při použití PK došlo ke snížení drsnosti R_{SM} na méně než čtvrtinu, konkrétně u drsnosti při obrábění pomocí MQL vycházela průměrná drsnost R_{SM} 64 [μm] a v případě použití záplavy PK vycházela 64,6 [μm].



Graf 24 Porovnání parametru drsnosti R_{sm} na použité PK

8 Shrnutí výsledků experimentu

V úvodní části práce byl proveden rozbor současných poznatků při obrábění niklových superslitin a charakteristických parametrů obrábění. Obrábění niklových slitin s sebou nese velká úskalí, zejména v možnosti variací z pohledu řezné rychlosti. Důležitým aspektem při jejich obrábění je správné zvolení řezných podmínek i vhodného řezného prostředí, které může výrazně ovlivňovat výsledky.

První část experimentu reprezentovala vliv jednotlivých vrstev na obrábění, jež se prováděla na niklové superslitině Inconel 713LC. Experiment probíhal při obrábění bez použití procesní kapaliny, při hloubce řezu 0,5 [mm], posuvu na zub 0,095 [mm/zub] při třech úrovních řezných rychlostí 30, 50 a 70 [m/min]. Bylo provedeno měření sil pomocí piezoelektrického dynamometru při různých řezných rychlostech a měření drsností povrchu pomocí přenosného drsnoměru MarSurf PS 10. Při měření bylo důležité porovnání teoretické hloubky řezu se skutečnou hloubkou řezu a následně sledovat závislost měrné řezné síly na řezné rychlosti. Rozdíl mezi první a druhou vrstvou při řezné rychlosti 70 [m/min] dosahoval 1360 [MPa]. Rozdíl mezi druhou a třetí dosahoval pouze 68 [MPa]. Naopak při porovnání pasivní síly na řeznou rychlost docházelo k nárůstu pasivní síly. Rozdíl mezi první a druhou vrstvou při řezné rychlosti 70 [m/min] dosahoval rozdíl 336 [N]. Rozdíl mezi druhou a třetí vrstvou dosahoval pouze 24 [N].

Druhá část experimentu reprezentovala vliv řezného prostředí na obrábění, jež se provádělo na niklové superslitině Inconel 713LC. Experiment porovnával obrábění bez použití procesní kapaliny, s minimálním množstvím maziva a záplavou syntetickou procesní kapalinou. Data z obrábění bez procesní kapaliny byla využita z předchozí části. Pro zbylá dvě prostředí se provedlo měření sil pomocí piezoelektrického dynamometru při třech úrovních řezné rychlosti a měření drsnosti povrchu pomocí stacionárního měřicího přístroje MarSurf LD 120. Při měření bylo důležité porovnání teoretické hloubky řezu se skutečnou hloubkou řezu a následně vyhodnotit závislost měrné řezné síly na řezné rychlosti.

Tato část měla dvě roviny. První rovinou bylo měření hloubky řezu a dynamické účinky z kterých se následně vyvozovaly závěry závislostí měrné řezné síly a pasivní síly na řeznou rychlost. Při porovnání prostředí bez použití procesní kapaliny a s využitím minimálního množství maziva vychází průměrný rozdíl měrných řezných sil v celém rozsahu 839 [MPa] (11 %). Při porovnání minimálního množství maziva a použití záplavy syntetické procesní kapaliny vyšly hodnoty rozdílů pouhých 92 [MPa] (1 %). Porovnáním pasivních sil vychází hodnoty prostředí bez použití procesní kapaliny a s využitím minimálního množství maziva s průměrným rozdílem 109 [N] (22 %), zatímco při porovnání minimálního množství maziva a použití záplavy syntetické procesní kapaliny vyšly hodnoty rozdílů pouze 20 [N] (5 %).

Druhá rovina reprezentovala dosahované drsnosti povrchu v závislosti na použitém řezném prostředí.

Porovnáním rozdílů hodnot dosahovaných v prostředí bez procesní kapaliny a prostředí s minimálním množstvím maziva z pohledu drsností se pohybovaly – střední aritmetické odchylky profilu 0,46 [μm] (61 %), maximální výšky profilu 2,94 [μm] (62 %), maximální hloubky drsnosti 6,46 [μm] (71 %) a střední šířky rýh 154 [μm] (71 %).

Porovnáním rozdílů hodnot dosahovaných v prostředí s minimálním množstvím maziva a záplavou syntetické procesní kapaliny z pohledu drsností se pohybovaly – střední aritmetické odchylky profilu 0,03 [μm] (9 %), maximální výšky profilu 0,06 [μm] (3 %), maximální hloubky drsnosti 0,62 [μm] (23 %) a střední šířky rýh 0,6 [μm] (1 %).

9 Závěr

Tato diplomová práce je zaměřena na hodnocení obrobitelnosti niklových superslitin. Niklové superslitiny se kvůli svým specifickým vlastnostem jako je vyšší pevnost, houževnatost a vysokoteplotní odolnost řadí mezi lepší materiály, na druhou stranu z pohledu obrábění spadají do kategorie těžkoobrobitelných materiálů.

V rámci experimentu byl vyhodnocen vliv vlastností jednotlivých vrstev z hlediska mechanických vlastností a jejich tloušťky na následující obrábění. Dále vliv řezného prostředí na silové poměry a drsnost obrobené plochy při frézování ve variantách bez použití procesní kapaliny, frézování s minimálním množstvím maziva a frézování se záplavou syntetické procesní kapaliny při různých řezných rychlostech. Bylo provedeno monitorování složek síly řezání, měrné řezné síly a kvality obrobené plochy.

Ze závislosti měrných řezných sil a pasivních sil na řezné rychlosti se je možné konstatovat, že vliv při obrábění jednotlivých vrstev existuje, ale rozdíly nejsou příliš výrazné.

Při porovnání vlivu řezného prostředí na obrobitelnost materiálu se zkoumaly dynamické ukazatele, zejména měrná řezná síla a pasivní síla. Následně z pohledu kvality povrchu byly vyhodnocovány parametry drsnosti, konkrétně střední aritmetická odchylka profilu, maximální výška profilu, maximální hloubka drsnosti a střední šířka rýh. Z experimentu vyplývá, že nejhorší výsledky z použitých řezných prostředí byly při obrábění bez použití procesní kapaliny, naopak nejlepší výsledky byly při obrábění pomocí minimálního množství maziva.

Porovnáním dynamických účinků nejlepšího a nejhoršího prostředí vyšel poměr měrných řezných sil 839 [MPa] (11 %) a pasivních sil 109 [N] (22 %). Z pohledu kvality obrobené plochy je vidět znatelný rozdíl u všech charakteristik drsnosti. Rozdíl u střední aritmetické odchylky profilu vychází 0,5 [μm] (63 %), největší hloubka drsnosti 2,9 [μm] (62 %), maximální hloubka drsnosti 6,5 [μm] (71 %) a střední šířka rýh dosahuje hodnoty 154 [μm] (71 %).

V případě dalšího zkoumání této problematiky by bylo vhodné zaměřit se na porovnání více faktorů jako změnu hloubky řezu, posuvu na zub a řezné rychlosti v závislosti na řezném prostředí. Následně věnovat pozornost vlivu na opotřebení bříty, mikrotvrdomosti a zbytkové napětí obráběné plochy a zjistit jejich závislosti. Dále by bylo zajímavé porovnání, jak se bude chovat tento materiál v různých modifikacích po odlévání nebo 3D tisku včetně porovnání obrobitelnosti.

Stanovené cíle této diplomové práce byly splněny. Některé z parametrů obrobitelnosti, které byly uvedeny v teoretické části byly v experimentální části ověřeny při vycentrovaném frézováním niklové superslitiny Inconel 713LC.

- [12] Dormer Pramet, katalog Soustružení 2021-2022. PRAMET TOOLS, s.r.o., ČR. [online]. Copyright © [cit. 28.12.2021]. Dostupné z: <https://www.dormerpramet.com/downloads/dormer-pramet-turning-catalogue-2021-cz.pdf>
- [13] Václavík, J., Bunda, Z., Bohdan, P., Weinberg, O. NDE for Safety / Defektoskopie 2012, 42nd International Conference, Oct 30 - Nov 1, 2012, Seč, Czech Republic. Aplikace vybraných metod pro měření zbytkových napětí. [Online] 2013. [Citace: 25.2.2022.] Dostupné z: http://www.ndt.net/article/defektoskopie2012/papers/271_p.pdf
- [14] HOFFMANN QUALITÄTSWERKZEUGE CZ s.r.o., Ejpovice. GARANT Příručka obrábění. Copyright © [cit. 14.11.2021]. Dostupné z: <http://www.hoffmann-group.com/cz/kompetence-v-oblasti-servisu/stahovani-souboru/prirucka-obrabeni.html>.
- [15] Robert Čep, Jana Petřů, Experimentální metody v obrábění, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Ostrava 2011, 146 str. [online]. Dostupné z https://projekty.fs.vsb.cz/459/ucebniopory/Experimentalni_metody_%20v_obrabeni.pdf
- [16] ČSN EN ISO 4287 (014450), Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1999. 24 str
- [17] N.A. Abukhshim, P.T. Mativenga, M.A. Sheikh. Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high-speed machining. International Journal of Machine Tools and Manufacture. Volume 46, Issues 7–8. 2006. Pages 782-800. ISSN 0890-6955, [cit. 17-10-2021]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.07.024>
- [18] Training Handbook: Metal Cutting Technology [online]. Sandviken: AB Sandvik Coromant Copyright © [cit. 14.10.2021]. Dostupné z: <https://coromantstrgprod.blob.core.windows.net/publications/a93f0199-f68b-43cf-a235-005133232107.pdf?sv=2020-04-08&st=2022-02-12T20%3A28%3A53Z&se=2022-02-12T22%3A33%3A53Z&sr=b&sp=r&rscd=inline%3B+filename%3DC-2920-40.pdf&rsct=application%2Fpdf&sig=qY22MyEdTkyUXXH0rHKb%2BkGRI443CfRr56N5nElyk74%3D>
- [19] New F3S Chip former for Finish Turning On Superalloys and Exotic Materials, Iscar [online]. Copyright © [cit. 05.02.2022]. Dostupné z: <https://www.iscar.ro/newarticles.aspx/countryid/49/newarticleid/2997>
- [20] Jawahir, I.S., Attia, H., Biermann, D., Duflou, J., Klocke, F., Meyer, D., Newman, S.T., Pusavec, F., Putz, M., Rech, J., Schulze, V., Umbrello, D. (2016). Cryogenic manufacturing

processes, CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 65, No. 2, 713-736, [online].

Copyright © [cit. 05.02.2022]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.007>

[21] Kaya, Eren and Akyüz, Birol. "Effects of cutting parameters on machinability characteristics of Ni-based superalloys: a review" Open Engineering, vol. 7, no. 1, 2017, pp. 330-342. [online]. Copyright © [cit. 05.02.2022]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1515/eng-2017-0037>

[22] Příručka obrábění: kniha pro praktiky. Praha: Scientia, 1997. ISBN 91-972299-4-6.

[23] Quality Magazine | Quality Assurance & Process Improvement News [online]. Copyright © [cit. 26.02.2022]. Dostupné z: https://www.qualitymag.com/ext/resources/files/white_papers/Olympus/LEXT-Surface-Roughness.pdf?1604073669

[24] Pusavec F, Hamdi H, Kopac J, Jawahir IS (2011) Surface Integrity in Cryogenic Machining of Nickel Based Alloy-Inconel 718. Journal of Materials Processing Technology 211(4):773–783. © [cit. 05.02.2022]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.12.013>

[25] GANJI, Dileep Kumar a G. RAJYALAKSHMI. Influence of Alloying Compositions on the Properties of Nickel Based Superalloys: A Review [online]. B.m.: Springer Singapore. 2020. [cit. 2022-03-12]. Dostupné z: [doi:10.1007/978-981-15-1071-7_44](https://doi.org/10.1007/978-981-15-1071-7_44)

[26] RENHOF, L., C. KREMPASZKY, E. WERNER a M. STOCKINGER. Analysis of Microstructural Properties of IN 718 after high-speed forging [online]. B.m.: TMS. 2005. Dostupné z: https://doi.org/10.7449/2005/Superalloys_2005_261_270

[27] JERSÁK, Jan a Alexey POPOV. Ekologické obráběcí kapaliny nové generace. [Online]: Technická univerzita v Liberci, 2014. [cit. 21.03.2022]. Dostupné z: <https://publi.cz/download/publication/388?online=1>

[28] Rozhodující je použití efektivního chlazení. MM Průmyslové spektrum [online]. Copyright © 2001 [cit. 21.03.2022]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/rozhodujici-je-pouziti-efektivniho-chlazení>

[29] DRSNOST POVRCHU – Portál pro strojní konstruktéry. Portál pro strojní konstruktéry [online]. Copyright © 2013 [cit. 29.03.2022]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/drsnost-povrchu>

[30] ISO 3685:1993. Zkoušení životnosti soustružnických nožů. 2. vydání. International Organization for Standardization, 1993.

- [31] LOTFI, Mohammad, Hossein ASHRAFI, Saeid AMINI, A AKHAVAN FARID a M JAHANBAKSHSH. Characterization of various coatings on wear suppression in turning of Inconel 625: A three-dimensional numerical simulation [online]. B.m.: SAGE Publications. [cit. 10.04.2022]. Dostupné z: doi:10.1177/1350650116677131
- [32] Okuma MU-400V II. Misan [online]. 2021 [cit. 24.04.2022]. Dostupné z: <https://www.misan.cz/okuma/katalog-detail/mu-400v-ii-okuma-mu-400v-ii/>
- [33] Sandvik-Coromant – R200-068Q27-12M – Square shoulder mills – Tools United [online]. [cit. 24.04.2022]. Dostupné z: <https://www.toolsunited.com/App/EN/Article/ArticleDetailsPage/24696400130636462>
- [34] Ceratizit RPHX. KOMET. [online]. [cit. 10.04.2022]. Dostupné z <https://cuttingtools.ceratizit.com/ie/en/products/50493582.html>
- [35] Kistler Type 9265B. [online]. [cit. 17.04.2022]. Dostupné z: http://www.helmar.com.pl/helmar/plik/9265b_nn3842.pdf
- [36] Měřidla, Měřicích přístroje TESA SA, Měřicí technika, Momentové klíče Systémy kontrol a řízení výroby, [online]. Copyright ©2, [cit. 28.04.2022]. Dostupné z: https://www.pro-control.cz/files/prod_files/katalogovy-list-prenosny-drsnomer-marsurf-ps-10.pdf
- [37] Keyence, Řada VHX-6000 Digitální mikroskop Katalog. [online]. Copyright © 2022 KEYENCE CORPORATION. [cit. 28.12.2021]. Dostupné z: https://axlimperial.com/wp-content/uploads/2018/05/VHX-6000_C_611D51_US_1047-3.pdf
- [38] Technické informace Parma Cut 3. In: Parmo Mogul [online]. 2014 [cit. 28.04.2022]. Dostupné z: https://eshop.paramo.cz/data/VyrobkovaDokumentace/ti_paramo_cut3_z3.pdf
- [39] Technické informace Synergy 735. Blaser Swiss lube [online]. Dostupné z: <http://www.lastuamisnesteet.fi/wp-content/uploads/2019/12/Synergy-735-Esite.pdf>
- [40] Marsurf Marsurf ud 120 / Marsurf Ld 120. Combined contour and roughness measurements [online]. © by Mahr GmbH, Göttingen 2010 [cit. 28.04.2022]. Dostupné z: <https://swissinstruments.com/wp-content/uploads/2018/07/files/marsurf-ud120-ld120-en.pdf>

Seznam obrázků

Obr. 1 Technologie soustružení včetně obráběcího centra (Upraveno) [18]	11
Obr. 2 Čelní frézování (Upraveno) [18].....	12
Obr. 3 Rozdíl mezi sousledným a nesousledným frézováním (Upraveno) [18].....	13
Obr. 4 Rozdělení udržitelného obrábění (Upraveno) [20].....	13
Obr. 5 Faktory ovlivňující volbu rezného nástroje (Upraveno) [22].....	15
Obr. 6 Rozdělení destiček dle tvaru (Upraveno) [11]	17
Obr. 7 Vizualizace struktury povlaků (Upraveno) [18].....	18
Obr. 8 Soustružnický nůž s destičkou (Upraveno) [18]	19
Obr. 9 Přehled držáků pro frézování (Upraveno) [18]	20
Obr. 10 Upínací systémy (Upraveno) [12].....	21
Obr. 11 Vizualizace opotřebenění VBD (Upraveno) [18]	22
Obr. 12 Kritéria opotřebenění dle normy ISO 3685:1993 (Upraveno) [31].....	23
Obr. 13 Vliv rezných podmínek na životnost nástroje (Upraveno) [18]	23
Obr. 14 Schéma tvorby nárůstku [14]	24
Obr. 15 Rozdělení slitin niklu a obchodní názvy (Upraveno) [2]	25
Obr. 16 Schématický vývoj mikrostruktury niklových superslitin (Upraveno) [3]	27
Obr. 17 Vliv legujících prvků na strukturu a vlastnosti niklových slitin (Upraveno) [3].....	28
Obr. 18 Parametry charakterizující obrobitelnost (Upraveno) [8].....	31
Obr. 19 Rozdělení materiálů dle normy ČSN ISO 513 (Upraveno) [18]	32
Obr. 20 Základní dělení třísky (Upraveno) [18].....	32
Obr. 21 Oblast utváření třísky destičky CNMG 120404 - F3S (Upraveno) [19].....	33
Obr. 22 Složky síly při frézování a rozklad při soustružení (Upraveno) [14]	33
Obr. 23 Stanovení sil s příklady dynamometrů (Upraveno) [15]	35
Obr. 24 Tepelné pole při obrábění (Upraveno) [20].....	36
Obr. 25 Vznik a odvod tepla při obrábění (Upraveno) [17]	36
Obr. 26 Obecná struktura povrchu (Upraveno) [23]	38
Obr. 27 Parametry drsnosti povrchu Ra, Rz, Rt (Upraveno) [23]	38
Obr. 28 Možnosti měření drsnosti (Upraveno) [23].....	39
Obr. 29 Zbytkové napětí po obrábění Inconel 718 (Upraveno) [24].....	42
Obr. 30 Technické parametry obráběcího centra OKUMA MU 400 II (upraveno) [32].....	43
Obr. 31 Měření úhlů obráběcí hlavy	44
Obr. 32 Specifikace nástroje a destičky (Upraveno) [33, 34]	44
Obr. 33 Naměřené rozměry destičky	44
Obr. 34 Výškové parametry ploch	45
Obr. 35 Rozložení jednotlivých složek sil při obrábění [35].....	46
Obr. 36 Ukázka průběhu při měření sil z DynoWare	47
Obr. 37 Drsnoměr s protokolem o měření drsnosti [36]	47
Obr. 38 Snímací systém s protokolem o měření drsnosti [40]	48
Obr. 39 Měření drsností pomocí snímací systém MarSurf LD 120.....	48
Obr. 40 Digitální mikroskop s ukázkou vyhodnocení struktury obrobené plochy [37].....	49
Obr. 41 Ustavení dynamometru s obráběním blokem	50
Obr. 42 Měření ploch pomocí sondy OMP 60	50
Obr. 43 Příprava pro použití různých rezných prostředí	51

Obr. 44 Ukázka vyhodnocení silových účinků	52
Obr. 45 Postup při výpočtu skutečné hloubky řezu.....	53
Obr. 46 Postup při výpočtu měrné řezné síly	53
Obr. 47 Nastavení směru proudění pro MQL.....	58
Obr. 48 Znázornění povrchu obrobené plochy.....	60
Obr. 49 Nastavení směru proudění pro záplavu PK	61
Obr. 50 Znázornění povrchu obrobené plochy u záplavy PK	63

Seznam tabulek

Tab. 1 Vlastnosti povlakovaných nástrojů [14].....	19
Tab. 2 Rozložení legujících prvků u niklových slitin [17].....	28
Tab. 3 Chemické složení Inconel 713 [6]	30
Tab. 4 Dosahované parametry při obrábění [29].....	39
Tab. 5 Změřené chemické složení Inconel 713LC.....	43
Tab. 6 Parametry dynamometru Kistler 9265B [35]	46
Tab. 7 Ukázka tabulky pro první schod	53
Tab. 8 Charakteristické vlastnosti řezného oleje [38]	58
Tab. 9 Charakteristické vlastnosti syntetické PK [39]	61

Seznam grafů

Graf 1 Závislost pevnosti superslitin na teplotě (Upraveno) [25]	26
Graf 2 Tepelné zpracování Inconel 718 (Upraveno) [26]	29
Graf 3 Vliv řezné rychlosti na řezné síle (Upraveno) [21].....	35
Graf 4 Drsnost povrchu (Upraveno) [24].....	40
Graf 5 Metody měření zbytkového napětí (Upraveno) [13].....	41
Graf 6 Závislost měrné řezné síly na řezné rychlosti různé vrstvy.....	54
Graf 7 Závislost pasivní síly na řezné rychlosti, různé vrstvy.....	54
Graf 8 Porovnání měrné řezné síly na obráběné vrstvy	55
Graf 9 Porovnání pasivních sil na obráběné vrstvy.....	55
Graf 10 Závislost měrné řezné síly na řezné rychlosti Bez PK	56
Graf 11 Závislost pasivní síly na řezné rychlosti Bez PK	57
Graf 12 Porovnání parametrů drsnosti povrchu na řezné rychlosti bez PK.....	57
Graf 13 Závislost měrné řezné síly na řezné rychlosti MQL	59
Graf 14 Závislost pasivní síly na řezné rychlosti MQL	59
Graf 15 Porovnání parametrů drsnosti povrchu na řezné rychlosti MQL	60
Graf 16 Závislost měrné řezné síly na řezné rychlosti při záplavě PK.....	62
Graf 17 Závislost pasivní síly na řezné rychlosti při záplavě PK.....	62
Graf 18 Porovnání parametrů drsnosti povrchu na řezné rychlosti při záplavě PK.....	63
Graf 19 Porovnání měrné řezné síly na použité PK	64
Graf 20 Porovnání pasivní síly na použité PK	65
Graf 21 Porovnání parametru drsnosti Ra na použité PK	66
Graf 22 Porovnání parametru drsnosti Rz na použité PK	67
Graf 23 Porovnání parametru drsnosti Rmax na použité PK	68
Graf 24 Porovnání parametru drsnosti Rsm na použité PK.....	69