

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Obrábění niklových superslitin

Diplomová práce

Autor: Bc. Mistr Jan
Studijní obor: Výrobní inženýrství
Vedoucí práce: Ing. Vítězslav Rázek, CSc.

Praha 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Mistr** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **459192**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Obrábění niklových superslitin

Název diplomové práce anglicky:

Cutting of nickel superalloys

Pokyny pro vypracování:

1. Rozbor zadané problematiky
2. Obrobitelnost niklových slitin
3. Experimentální měření
4. Vyhodnocení a závěr

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: **30.04.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **29.07.2021**

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 svou diplomovou práci vypracovával samostatně pod vedením svého vedoucího diplomové práce a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne

.....

Bc. Mistr Jan

Poděkování

Tímto děkuji panu Ing. Vítězslavu Rázkovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování mé diplomové práce. Dále děkuji Ing. Michalu Slanému za pomoc při provedení praktické části diplomové práce. V neposlední řadě děkuji Ing. Richardu Stankovi za pomoc při překladu anglických textů a také mé rodině, která mě podporovala.

Anotace

Tato práce pojednává o parametrech, které ovlivňují obrobitelnost niklových superslitin a jejich vlivu na jednotlivé složky integrity povrchu. V práci jsou popsány jednotlivé parametry ovlivňující obráběcí proces niklových superslitin a jejich působení jsou diskutována na již provedených experimentech.

Dále pak byl proveden rozbor silového zatížení při frézování hranolů z Inconelu 713LC (Low Carbon) při třech různých řezných rychlostech a třech různých řezných prostředích. Řezná prostředí a řezné rychlosti byly porovnány z hlediska sil vznikajících při frézování, dosahované drsnosti, profilu povrchu a opotřebení nástroje.

Klíčová slova

Metody obrábění, parametry obrobitelnosti, niklové superslitiny, Inconel 713LC

Annotation

This thesis deals with parameters, which affect machinability of nickel superalloys and their affect on individual components of surface integrity.

In the thesis we describe individual parameters which affect the machining process of nickel superalloys and their influence are discussed on experiments which were already done.

Another study which was done, was the analysis of force load in milling prisms made of Inconel 713LC, which was done with 3 different cutting speeds and 3 different cutting instruments. These speeds and instruments were compared from the point of forces emerging during milling, achieved roughness, surface profile and instrument wear.

Key words

Methods of machining, machinability parameters, nickel based superalloys, Inconel 713LC

Obsah

Prohlášení	3
Poděkování	4
Anotace	5
Annotation	5
1. Seznam použitých symbolů a vzorců.....	8
2. Úvod	9
3. Superslitiny	10
4. Niklové superslitiny	11
4.1. Chemické složení niklových superslitin	11
4.2. Rozdělení niklových superslitin	13
4.2.1. Žáruvzdorné (korozivzdorné) niklové superslitiny	13
4.2.2. Žárupevné niklové superslitiny.....	13
5. Obráběcí metody	15
5.1. Konvenční obráběcí metody.....	15
5.1.1. Volba materiálu nástroje	16
5.1.2. Volba řezného prostředí.....	17
5.1.3. Síly při obrábění	19
5.1.4. Opotřebení nástroje	21
5.2. Nekonvenční obráběcí metody.....	25
5.2.1. ECM – Elektrochemické obrábění.....	25
5.2.2. EDM – Elektroerozivní obrábění	26
5.2.3. WEDM – Drátové elektroerozivní obrábění.....	27
5.3. Hybridní obráběcí metody	28
5.3.1. Obrábění laserem (LAM) / asistované obrábění laserem.....	28
5.3.2. AWJM – obrábění abrazivním vodním paprskem	29
6. Integrita povrchu	31
6.1. Drsnost a profil	31
6.2. Tepelné jevy	33
6.3. Zbytková napětí	34
6.4. Defekty povrchu	37
7. Experimentální část	39
7.1. Parametry experimentu	39
7.2. Použité stroje.....	40

7.3. Metodika měření a zpracování dat	45
7.4. Frézování na sucho	49
7.5. Frézování s minimálním množstvím mazání (MQL)	52
7.6. Frézování s kryogenním chlazením	56
7.7. Porovnání suchého frézování s MQL a kryogenním chlazením	61
7.7.1. Porovnání $v_c = 30$ m/min	61
7.7.2. Porovnání $v_c = 50$ m/min	62
7.7.3. Porovnání $v_c = 70$ m/min	64
7.8. Zhodnocení experimentu	65
8. Závěr	68
9. Seznam literatury	70
10. Seznam tabulek	76
11. Seznam grafů	77
12. Seznam obrázků	78
13. Přílohy	80

1. Seznam použitých symbolů a vzorců

$T_m...$	teplota tání
$v_c...$	řezná rychlost
$f...$	posuv
$a_p...$	hloubka odebírané vrstvy
$r_\beta...$	poloměr ostří
HRC...	zkouška tvrdosti podle Rockwella
$VB_{max}...$	opotřebení hřbetu maximální
$V...$	volt
$A...$	ampér
$v_w...$	obvodová rychlost
$F_c...$	řezná síla
$F_f...$	posuvová síla
$F_p...$	pasivní síla
$F_{CN}...$	normálová složka řezné síly
$F_x...$	silová složka dynamometru v ose X
$F_y...$	silová složka dynamometru v ose Y
$F_z...$	silová složka dynamometru v ose Z
$R_a...$	střední aritmetická úchylka profilu
$R_z...$	největší výška profilu
$R_{max}...$	maximální výška profilu

2. Úvod

Práce se zabývá studiem problematiky obrobitelnosti niklových superslitin. Počátek vývoje niklových superslitin se datuje do období první světové války, kdy se začaly hledat materiály vhodné pro konstrukci motorů bojových letadel. Prudkého rozvoje tyto superslitiny pak dosáhly v období druhé světové války. V roce 1940 byla patentována historicky první niklová superslitina pod názvem Nimonic.

Své uplatnění niklové superslitiny nacházely dříve hlavně v motorech bojových letadel a raketových motorech. V současné době nacházejí své uplatnění v energetice, jaderné energetice, chemickém či petrochemickém průmyslu, těžebním průmyslu a dalších průmyslových odvětvích. Poněvadž se však jedná o drahé materiály, používají se nad teplotu 650 °C.

Niklové superslitiny jsou těžkoobrobitelné materiály, které však disponují vysokou pevností i za vysokých teplot a dobrou pevností při tečení. Odolávají nízkocyklové i vysokocyklové únavě, korozi i erozi v agresivním prostředí.

Tyto vlastnosti, kvůli kterým se niklové superslitiny využívají v náročných provozních podmínkách, vedou k těžké obrobitelnosti. Během obráběcího procesu může docházet ke zpevnování povrchové vrstvy, vysokému opotřebení nástroje a kvůli nízké tepelné vodivosti dochází ke kumulaci velkého množství tepla v místě řezu. To může mít za následek vznik velkých tahových napětí, která mohou vést až k selhání obrobku.

Studium obrobitelnosti niklových superslitin je důležité zejména proto, že tyto materiály nacházejí stále větší uplatnění v mnoha odvětvích průmyslu. Z tohoto důvodu je třeba znát parametry, které ovlivňují nejen samotný obráběcí proces, ale také výslednou jakost obrobku. [1; 2]

3. Superslitiny

Superslitiny jsou slitiny, které se používají při teplotách přibližně nad 540 °C. Jedná se o slitiny na bázi kobaltu, niklu a kombinaci železa s niklem.

Vlastnosti superslitin lze ovlivnit legujícími přísadami. Hliník, chrom a titan snižují jejich hustotu, zatímco rhenium, tantal a wolfram jejich hustotu zvyšují. Korozní odolnost závisí na přidaných legujících prvcích, a hlavně na prostředí, ve kterém jsou použity. Za dobu své existence bylo vynalezeno a patentováno velké množství superslitin, avšak své uplatnění našla jen malá část z nich.

Superslitiny lze použít v litých, válcovaných, extrudovaných, kovaných a práškově zpracovaných formách. Své využití nacházejí v leteckých, průmyslových a námořních plynových turbínách, jaderných reaktorech, při konstrukci letadel a kosmických lodí, v petrochemické výrobě, v ortopedii a stomatologii a v aplikacích na ochranu životního prostředí. [3]

4. Niklové superslitiny

Niklové superslitiny se řadí mezi materiály, které dokážou odolat široké škále náročných provozních podmínek jako korozní prostředí, vysoká teplota, vysoké namáhání a jejich kombinace. Díky těmto vlastnostem se jedná o životně důležitý materiál pro moderní průmysl.

Čistý nikl je tvárný a houževnatý materiál, který má až do svého bodu tání ($T_m = 1453 \text{ °C}$) kubickou plošně středěnou mřížku. Z toho důvodu lze výrobky z niklu a jeho slitin vyrábět konvenčními metodami tvárné, lité a práškové metalurgie.

Nikl má dobrou odolnost proti korozi v normální atmosféře, v přírodních sladkých vodách a v neoxidujících kyselinách. Dále vykazuje vynikající korozivzdornost při působení louhů. Nikl proto nabízí velmi užitečnou korozivzdornost a je vynikajícím základem pro vývoj speciálních slitin, které mohou těžit z jedinečných vlastností konkrétních legujících prvků.

Své uplatnění nacházejí komponenty z niklových superslitin v chemickém a petrochemickém průmyslu, v zařízeních pro kontrolu znečištění, v systémech zplyňování a zkapalňování uhlí, v dílech používaných v celulózkách a papírnách, v plynových turbínách letadel, v parních turbínách elektráren, v turbodmychadlech a ventilech v pístových motorech, v elektrických a elektronických aplikacích a zařízeních pro tepelné zpracování.

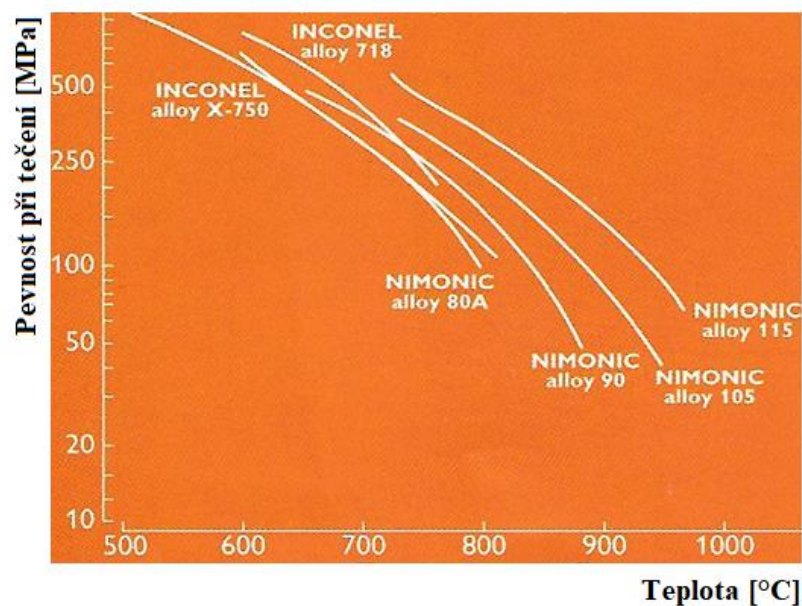
Řada dalších aplikací pro superslitiny niklu zahrnuje jedinečné fyzikální vlastnosti speciálních slitin, jako jsou slitiny s kontrolovanou roztažností, slitiny s požadovaným elektrickým odporem, magneticky měkké slitiny a slitiny s tvarovou pamětí. [1]

4.1. Chemické složení niklových superslitin

Nikl tvoří kompletní tuhý roztok s mědí a má téměř úplnou rozpustnost se železem. V niklu může dojít k rozpuštění až 35 % chromu, 20 % molybdenu a wolframu a 5 až 10 % hliníku, titanu, manganu a vanadu. V niklu tudíž může dojít k rozpuštění velkého množství prvků, jejichž kombinace zlepšuje vytvrzení

roztoku a zlepšuje odolnost vůči korozi a oxidaci. Stupeň vytvrzení roztoku souvisí s rozdílem atomových velikostí mezi niklem a legujícím prvkem. Kompletní rozmezí obsahu legujících prvků je shrnut v tabulce 1.

Wolfram, molybden, niob, tantal a hliník jsou prvky, které silně zpevňují roztok. Naopak železo, kobalt, titan, chrom a vanad jsou prvky, které roztok zpevňují méně. Wolfram, niob, tantal a molybden jsou účinné prvky také při teplotách nad $0,6 T_m$, kde je velice důležitá pevnost při tečení materiálu. V grafu 1 je znázorněna pevnost při tečení pro některé superslitiny Nimonic a Inconel. [4]



Graf 1 – Pevnost při tečení pro 1000 hodin [5]

Tabulka 1 – Rozmezí množství legujících prvků niklových superslitin [6]

Prvky	Obsah (hm %)		Prvky	Obsah (hm %)	
	min	max		min	max
Cr	1	30	Co	5	20
Ti	0,2	5	Mo	1,5	20
Al	0,15	6	W	0,6	10
Nb	1	5,1	Hf	0,7	1,8
Ta	1	4,5	C	0,02	0,3

4.2. Rozdělení niklových superslitin

Superslitiny lze rozdělit dle jejich vlastností na žárupevné a žáruvzdorné. Toto rozdělení se zaměřuje na to, zda složení a mikrostruktura slitiny jsou optimalizovány pro odolnost vůči korozi nebo pro provoz při zvýšené teplotě. V praxi dochází ke značnému překrývání vlastností, a proto některé univerzální slitiny jsou schopné účinně pokrýt větší množství požadavků. [4]

Polotovary ze superslitin niklu lze vyrábět tvářením, litím nebo metodami práškové metalurgie. Lité slitiny dosahují lepších pevnostních vlastností než slitiny tvářené. Lité slitiny se obvykle dále tepelně nezpracovávají. Tvářené se dále vytvrzují. [5]

4.2.1. Žáruvzdorné (korozivzdorné) niklové superslitiny

Tyto slitiny jsou obecně vyráběny za účelem optimalizace odolnosti proti korozi a jejich mechanické vlastnosti jsou druhotné. Lze je dělit podle toho, zda jsou určeny především pro odolnost proti korozi v horkém agresivním prostředí nebo pro optimální pevnost a metalurgickou stabilitu.

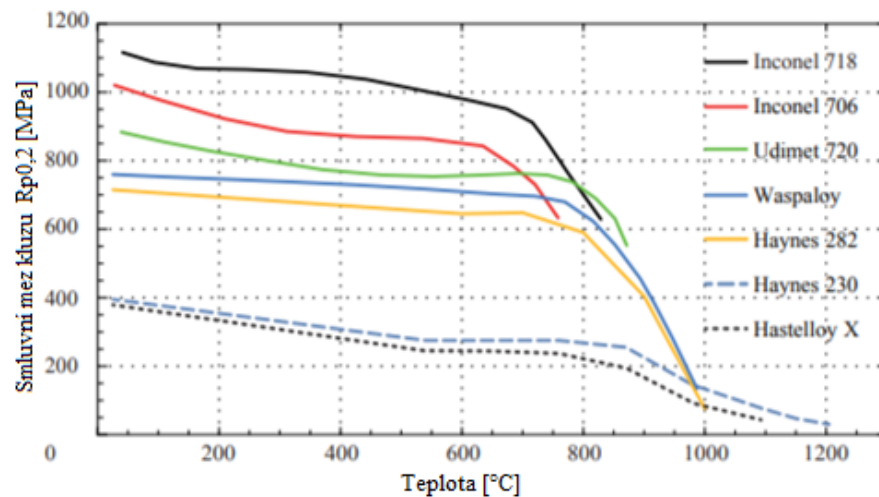
Stejně jako korozivzdorné oceli nabízejí širokou škálu odolnosti proti korozi. Nikl však může v tuhém roztoku pojmout větší množství legujících prvků (zejména chrom, molybden a wolfram) než železo. Proto lze tyto slitiny použít oproti nerezovým ocelím v náročnějších provozních podmínkách, kde je důležité udržovat čistotu produktu.

Ke slitinám tohoto typu lze řadit slitiny na bázi Ni-Cr-, případně Ni-Cr-Fe- s dalšími legujícími prvky jako jsou molybden, kobalt nebo wolfram. Obsah chromu, který udržuje žáruvzdornost, se pohybuje v intervalu od 15 % do 30 %. Obsah železa se pohybuje v rozmezí od 3 do 20 %. [4]

4.2.2. Žárupevné niklové superslitiny

Žárupevné slitiny niklu se používají při teplotách v rozmezí od 850 do 1150 °C. Jedná se o slitiny na bázi Ni-Cr. Jejich žárupevnost je způsobena legováním chromem do 20 %, titanem a hliníkem do 5 %. Teplotám okolo 1100 °C odolávají

jen slitiny legované 2 až 11 % molybdenu a 2 až 10 % wolframu. Dalšího nárůstu žárupevnosti lze dosáhnout legováním kobaltem v rozmezí od 14 do 16 %. Dále mohou být slitiny legovány bórem nebo zirkoniem. V grafu 2 je znázorněna změna smluvní meze kluzu v závislosti na měnící se teplotě u daných niklových superslitin. [4]



Graf 2 – Změna smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ v závislosti na měnící se teplotě [7]

5. Obráběcí metody

Nejdůležitější vlastností slitin na bázi niklu ve srovnání s jinými materiály je, že jsou při řezných teplotách mnohem tvrdší. Jsou velmi citlivé na vyšší teplotu, která se vytváří během konvenčních obráběcích procesů. Důsledkem vlastností niklových slitin a požadavků na stroj je to, že je třeba zvolit nástroje, které minimalizují řezné síly, mají maximální pevnost břitu a jsou schopny odolat vysokým řezným teplotám. Kromě zhodnocení základních vlastností samotných superslitin niklu má pro úspěšné obrobení zásadní význam pochopení základních principů, které vstupují do procesu ve vztahu ke konkrétní superslitině a použité metodě obrábění nebo nástrojů. Například nástroje, které jsou optimální pro žíhaný stav, nemusí být tou nejlepší volbou pro tvrzený materiál.

Nejpoužívanějšími a nejzákladnějšími obráběcími procesy ve výrobním průmyslu jsou soustružení, řezání, vrtání, vyvrtávání, frézování a broušení.

Jelikož konvenční obrábění představuje různé výzvy související s drsností povrchu, vysokou mírou opotřebení nástroje, předčasným selháním nástroje a integritou povrchu, existuje požadavek na využití jiných metod než těchto konvenčních. Toho bylo dosaženo nekonvenčními obráběcími procesy. V posledních letech proběhly určité studie, které analyzovaly obrobiteľnosť superslitin na bázi niklu v nekonvenčních procesech obrábění.

Mezi obráběcí metody se řadí ještě hybridní metody, které využívají ohřev nekonvenčními metodami a k obrábění dochází konvenčními metodami. [2; 4]

5.1. Konvenční obráběcí metody

Konvenční procesy obrábění niklových superslitin jsou náročné, vzhledem k jejich austenitické struktuře. Kvůli tomu jsou tyto superslitiny houževnaté a při jejich obrábění dochází k deformačnímu zpevňování. Kromě toho zůstávají tvrdé i při teplotách tvorby třísek a jejich tepelná vodivost je mnohem menší než u ocelí a mnoha dalších materiálů. Z tohoto důvodu při obrábění dochází ke tvorbě vysokých teplot v místě řezu, což nakonec způsobí opotřebení samotného nástroje. [2; 4]

Při obrábění superslitin niklu je třeba obrábět tak, aby nedocházelo ke zbytečně velkému deformačnímu zpevnění. To může být způsobeno použitím již výše zmíněného opotřebovaného nástroje, který oproti neopotřebovanému nástroji více plasticky deformuje povrchovou vrstvu. Takto zpevněnou vrstvou je pak obtížné proniknout při dalších průchodech nástroje nebo dalších operacích.

Mezi techniky, které minimalizují deformační zpevnění materiálu, patří použití ostrých břitů, kladných úhlů čela, přiměřených úhlů hřbetů, vyhýbání se zastavování stroje během obráběcího procesu a použití strojů s dostatečným výkonem a tuhostí, aby se minimalizovaly vibrace. Velikost posuvu a hloubka řezu by měly být nastaveny tak, aby při následujících průchodech docházelo k odříznutí již zpevněné vrstvy. Vibrace lze minimalizovat použitím největších možných nástrojů a držáků s omezeným vyložení nástroje. [4]

5.1.1. Volba materiálu nástroje

Volba materiálu řezného nástroje musí odpovídat vybrané operaci obrábění, obrábění superslitině niklu a jejím metalurgickým podmínkám (široký rozsah tvrdosti, pevnosti a abrazivity).

Pro obrábění niklových superslitin se používají nástroje vyrobené ze slinutých karbidů, z kubického nitridu bóru (PCBN) a nástrojů z keramiky.

Slinuté karbidy jsou v současnosti nejběžněji používanými nástrojovými materiály při obrábění superslitin na bázi niklu. Nejčastěji se používají slinuté karbidy s povlakem, a to díky jejich vynikající rovnováze mezi náklady a výkonem. Povlak poskytuje delší životnost nástroje a déle odolává opotřebení nástroje. To však nemusí být pravda, pokud je použit nesprávný povlak. Pro tyto nástrojové materiály jsou vhodné dokončovací operace a střední hodnoty řezných rychlostí.

Materiály z řezné keramiky se používají pro vysokorychlostní obráběcí operace a lze je použít pro hrubovací operace. Tyto materiály lze využít při velkých řezných rychlostech, a to i nad hodnotu řezné rychlosti 1000 m/min. Oproti nástrojovým materiálům ze slinutého karbidu není potřeba chladicí kapalina a hloubka odebírané vrstvy je oproti nim větší. Při nastavení výše zmíněných parametrů je třeba mít k dispozici stroj s dostatečným výkonem a tuhostí.

Pro dokončovací a polodokončovací operace je možné použít nástroje z kubického nitridu bóru (PCBN). Tento materiál disponuje vyšší chemickou stálostí a tepelnou odolností až do 1 200 °C. [8]

5.1.2. Volba řezného prostředí

Volba řezné kapaliny se z primárního hlediska odvíjí od toho, zda má mít chladicí nebo mazací účinek. Při soustružení s vysokou rychlostí úběru materiálu, kde je nezbytný odvod tepla, se používají kapaliny na bázi vody. Tyto kapaliny se používají také při soustružení s nástroji z keramiky. Některé nástroje z keramiky však nevydrží teplotní šok a vyžadují obrábění bez řezné kapaliny. Vzhledem k nebezpečí vznícení se pro nástroje z keramiky nedoporučují oleje jako řezné kapaliny.

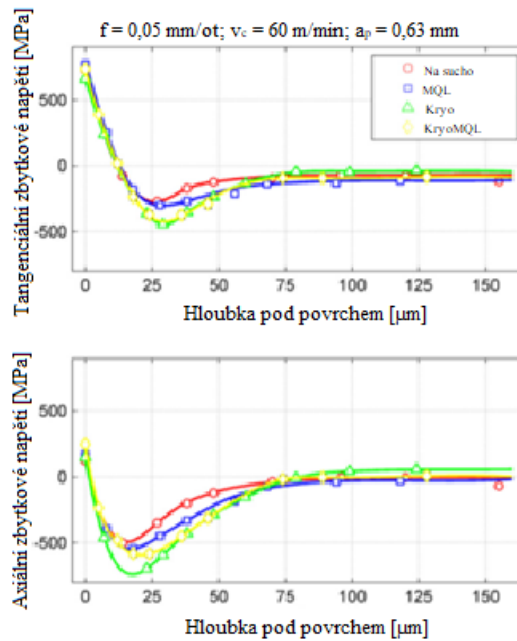
U ostatních nástrojů se velice často používají oleje s obsahem síry. Síra zlepšuje kluzné vlastnosti a také tvorbu třísky. Vysoké teploty obrábění však mohou od síry způsobit hnědé skvrny na obrobku. Ty by měly být odstraněny před jakýmkoli následným tepelným zpracováním, včetně svařování, nebo před použitím ve vysokoteplotních aplikacích, protože síra by mohla způsobit mezikystalové napadení kovového povrchu. [4]

V poslední době bylo zkoumáno využití metody MQL (minimální množství mazání) a kryogenního chlazení při obrábění. V případě metody MQL je malé množství maziva rozstříkováno na rozhraní nástroje a obrobku stlačeným vzduchem. Ve srovnání s jinými tradičními způsoby bylo zjištěno, že metoda MQL více snižuje tření a teplotu řezání. Tradiční řezné kapaliny obsahují olej, který nepříznivě ovlivňuje životní prostředí a může ohrozit i obsluhu stroje. V dnešní době se používá koncept čistého obrábění, při kterém se pro obrábění používá minimální množství chladicích kapalin nebo chladiv šetrných k životnímu prostředí. Snížení teploty je v řezné zóně dosaženo díky chladicímu účinku stlačeného vzduchu a odpařování. Při odpařování maziv se uvolňuje značné množství tepla, čímž se snižuje teplota v oblasti řezání. Metoda MQL má potenciál pro přesné obrábění při vysoké rychlosti. Hlavním problémem této techniky je vznik mlhy, která může být pro obsluhu stroje nebezpečná. To však lze minimalizovat použitím kvalitních odsávačů mlhy. [9]

V případě kryogenního chlazení se jedná o chlazení na bázi kapalného dusíku nebo CO₂. Toto chlazení vykazuje vysoký potenciál v procesech obrábění díky zvýšení životnosti nástroje a přesnosti rozměrů, snížení řezných teplot, drsnosti povrchu a množství energie spotřebované v procesu obrábění niklových superslitin, čímž dojde ke zlepšení produktivity.

K tématu kryogenního chlazení lze uvést experiment Jani Kendi a kolektivu (Slovinsko, 2011). Experiment byl proveden při soustružení superslitiny Inconel 718. Pro soustružení byla zvolena čtyři řezná prostředí – soustružení na sucho, soustružení s MQL (120 ml/h – Coolube 2210EP), kryogenní chlazení pod tlakem 1,5 MPa a kombinace kryogenního chlazení s MQL. Jako polotovar byla zvolena bezhrotá tyč o průměru 32 mm a délce 150 mm. Po celou dobu byly nastaveny konstantní řezné podmínky – $v_c = 60$ m/min; $f = 0,05$ mm/ot a $a_p = 0,63$ mm. Experiment byl zaměřen na měření zbytkových napětí, plastické deformace, měření tvrdosti a drsnosti povrchu.

Z výsledků experimentu vyplývá, že zbytková napětí pod povrchem obrobené plochy jsou výrazně tlaková. To je prospěšné z hlediska životnosti výrobku. V případě soustružení na sucho byla ovlivněná zóna do hloubky 40 μ m pod povrchem obrobené plochy. U zbylých prostředí tato hodnota dosahovala 70 μ m. To představuje větší kompresní zónu pod obrobenou plochou. Na obrázku 1 jsou zaznamenány grafy tangenciálních a axiálních zbytkových napětí vztažených k hloubce obráběného materiálu. V kladné části osy Y jsou zaznamenána tahová napětí, v záporné části napětí tlaková. Více je o zbytkových napětích popsáno v kapitole šest – „Integrita povrchu – Zbytková napětí“.



Obrázek 1 – Měření napětí v axiálním a tangenciálním směru [10]

Ze všech čtyř vybraných řezných prostředí vyplývá jako nejlepší volba kryogenní chlazení. U tohoto prostředí vzniká více tlakových zbytkových prostředí v obroběném materiálu než u ostatních prostředí. Navíc dochází k poklesu zbytkových napětí v hloubce materiálu až o 60 %. [10]

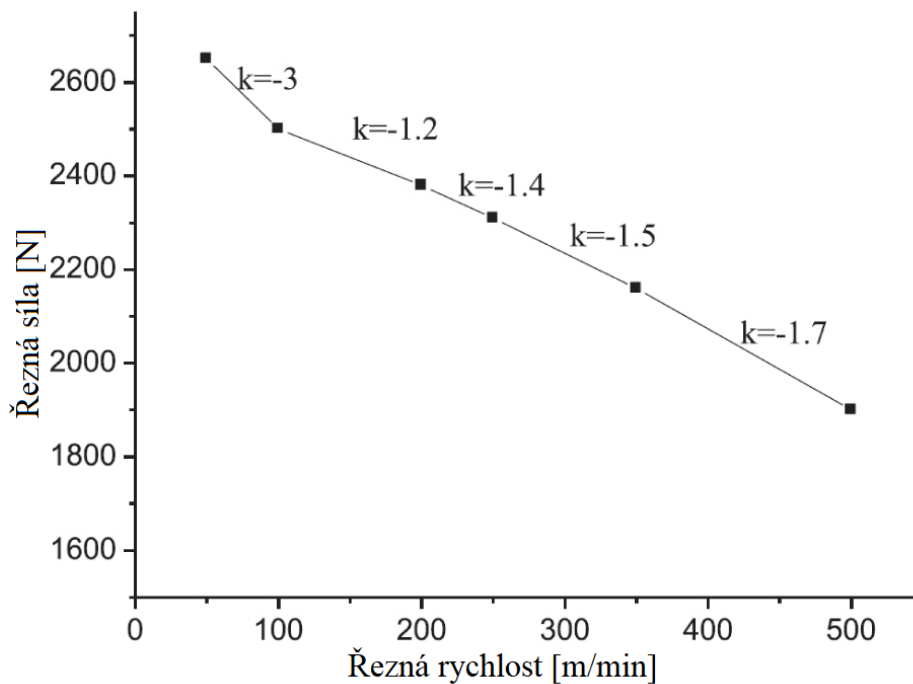
5.1.3. Síly při obrábění

Měření sil má při obrábění zásadní význam, a to hlavně z důvodu spotřeby energie, kterou je nutno na obrábění vynaložit. Dále řezné síly ovlivňují vznik zbytkového napětí, teplotu vznikající při obrábění, míru opotřebení nástroje a další. Pro jejich měření se nejčastěji využívají dynamometry a tenzometry.

Ze studií vyplývá, že hodnota řezných sil se snižuje při vyšších řezných rychlostech. K tomu dochází z důvodu snižování tvrdosti obrobku v důsledku zvýšených řezných teplot. [11]

Příklad chování řezných sil je možné uvést na experimentu ZhaoPeng Hao a kolektivu (Čína, 2017). Experiment spočíval v měření řezných sil při frézování Inconelu 718 nástroji na bázi SiAlON. Frézování probíhalo při konstantních hodnotách posuvu na zub, hloubce řezu a šířce frézování. Řezná rychlost se pohybovala v intervalu od 50 do 500 m/min. Dle experimentu vedla zvýšená řezná

rychlost ke snížení řezné síly. V grafu 3 je možné vidět sklon křivky mezi dvěma řeznými rychlostmi. Poměr změny řezné síly byl větší mezi 50-100 m/min ($k = -3$), což mohlo být způsobeno rychlým poklesem napětí v toku materiálu v důsledku zvýšení teploty. Zbylé změny řezných sil v závislosti na řezných rychlostech odpovídají skoro až přímo úměrnému poklesu. [12]

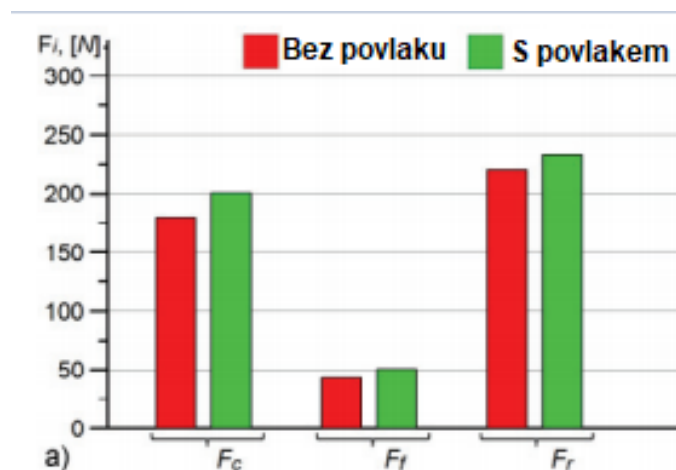


Graf 3 – Závislost řezné síly na řezné rychlosti [11]

Z vědeckých experimentů vyplývá, že výsledná řezná síla závisí na účincích technických a tepelných zatížení. Při použití nástrojů s povlaky se očekává nižší síla v důsledku nižšího koeficientu tření a vyšších řezných teplot. [11]

Velikost řezných sil může kromě povlaků ovlivnit také mikrogeometrie nástroje. To ukazuje experiment Volodymyra Bushlya a kolektivu (Švédsko, 2012), kdy vědci zkoumali vlivy řezných podmínek na obrobitelnost Inconelu 718 při vysokorychlostním soustružení s nástroji s povlakem (TiN) a bez povlaku z kubického nitridu bóru PCBN. Hodnoty rychlosti řezání byly 250, 300 a 350 m/min, hodnoty rychlosti posuvu 0,1; 0,15 a 0,2 mm/ot a hloubka řezu byla po celou dobu experimentu 0,3 mm. Řezné síly byly o 10 % vyšší u nástrojů s TiN povlaky než u nepotažených nástrojů, a to za všech řezných podmínek (viz Graf 4). Vědci připisovali tento neočekávaný výsledek právě změnám v mikrogeometrii nástrojů.

3D optická měření odhalila, že nástroje bez povlaku měly poloměr ostří $r\beta = 15-18 \mu\text{m}$, zatímco u nástrojů s povlakem byl poloměr $r\beta = 20-22 \mu\text{m}$. Ačkoli neexistuje přesná definice mikrogeometrie nástroje, definice obecně implikuje geometrii řezné hrany nebo konkrétněji poloměr ostří. Dva různé nástroje se mohou zdát geometricky identické (např. poloměr špičky, úhel čela a úhel hřbetu), ale díky různým úpravám ostří mohou vykazovat velmi odlišný řezný výkon. Ostřejší břit by s největší pravděpodobností usnadnil řezání, ale zároveň by došlo k oslabení nástroje. [11]



Graf 4 – Porovnání řezných sil pro $v_c = 350 \text{ m/min}$; $f = 0,15 \text{ mm/ot}$ [11]

5.1.4. Opotřebení nástroje

Opotřebení nástroje je jednou z hlavních příčin špatné obrobitelnosti superslitin. Během obrábění je tento jev nevyhnutelným procesem a trvá po celou dobu životnosti nástroje. Opotřebení nástroje může vést k předčasnému selhání nástroje. Míru opotřebení nástroje však lze minimalizovat preventivními opatřeními na základě znalosti typu, rychlosti a působení samotného opotřebení.

Výsledné opotřebení nástroje je složeno z mechanických a chemických interakcí mezi nástrojem a pracovní částí během obrábění. Na řezných nástrojích určených pro obrábění superslitin lze pozorovat následující mechanismy opotřebení: adhezivní, abrazivní, difúzní a oxidační.

Při obrábění se vytváří opotřebení na hřbetě vyměnitelné břitové destičky a současně také žlábek na jejím čele. Na nástroji vzniká také opotřebení ve formě žlábků při nízkých řezných rychlostech. Opotřebení špičky je však menší. [11]

Při obrábění superslitin niklu lze nejčastěji pozorovat mechanicky aktivované mechanismy opotřebení. Vyskytují se jak při nízkých, tak při vysokých řezných teplotách. Jejich výskyt závisí na podmínkách mazání, kontaktním zatížení mezi nástrojem a obráběným materiálem a jejich kombinací. Při nižších řezných rychlostech dochází pouze k těmto mechanicky aktivovaným mechanismům opotřebení. Pokud se však řezné rychlosti a tím i řezné teploty zvýší, dojde k výskytu i tepelně aktivovaného opotřebení. Když se nástroj zahřívá, ztrácí svou pevnost a aktivuje se difúze s chemickým opotřebením a zvyšuje se rychlost opotřebení nástroje. [13]

Abrazivní opotřebení nástroje se při obrábění niklových superslitin objevuje u všech typů nástrojových materiálů. Podle vědců je to způsobeno tvrdými abrazivními částicemi karbidu, které superslitiny niklu obsahují. Kromě těchto částic způsobují abrazivní poškození nástroje otřepy na povrchu obráběného materiálu, které zde vznikly po předchozím průchodu nástroje. Abrazivní opotřebení lze identifikovat podle rovnoběžných drážek na čelní ploše čela a výrazným vrubováním v hloubce místa řezu.

Adhezivní opotřebení je způsobeno přilnavostí materiálu obrobku k povrchům nástroje působením zvýšené teploty a napětí. Při působení vysokých napětí se materiál přivaří k boku nástroje a povrchu čela ve formě nárůstku. Tento nárůstek není stabilní a je neustále odstraňován proudícími třískami na čelní ploše a zpevněným obráběným materiálem na čelní straně. Zároveň dochází k otěru nástrojového materiálu a poškozování obráběného materiálu. Na poškozeném povrchu se vyskytují řady drážek a podpovrchové trhliny. Při nízkých rychlostech nedochází k adhezi, poněvadž teplota není natolik vysoká, aby plasticky deformovala materiál v atomovém měřítku. Při velmi vysokých rychlostech se však stávají dominantními mechanismy difúze a chemického opotřebení. Nejpříznivější podmínkou pro adhezi je proto střední rychlost řezání.

Difúzní opotřebení zahrnuje elementární difúzi mezi materiálem obrobku a nástrojem. Proces je aktivován vysokými teplotami a je pozorován hlavně na

rozhraní nástroje a třísky. Při vysoké řezné rychlosti se na tomto rozhraní zvyšuje teplota a dochází tak k přenosu materiálu mezi materiál a nástrojem, čímž dojde k opotřebení nástroje.

Chemické opotřebení nástrojů probíhá chemickou reakcí prvků nástroje s okolním prostředím, například reakce prostředí a materiálu obrobku při vysokých teplotách. Jelikož atomy materiálu nástroje jsou při nízké teplotě velmi stabilní, existuje velmi omezená možnost chemického opotřebení. Proto téměř vždy dochází k chemickému opotřebení při velmi vysokých teplotách. Proces opotřebení začíná od povrchu nástroje, což způsobuje, že materiál nástroje měkne a ztrácí své vlastnosti, takže je náchylný k jiným mechanismům opotřebení, například adhezi. Chemické opotřebení je obvykle poznamenáno velmi hladkým opotřebovaným povrchem. [13]

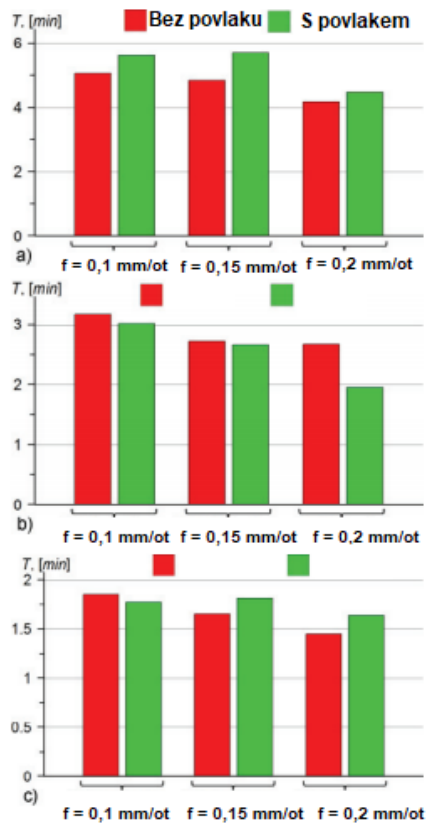
K tomuto tématu lze uvést experiment Volodymyra Bushlyya a kolektiv (Švédsko, 2012). Jako obráběcí operace bylo zvoleno kontinuální podélné soustružení. Všechny zkoušky byly prováděny na moderním CNC soustruhu. Materiálem obrobku byla žáruvzdorná superslitina Inconel 718 v žíhaném stavu a ve stavu po procesu stárnutí (45 HRC). Tyč o průměru 70 mm a délce 250 mm byla opracována nástroji z kubického nitridu boru (PCBN). Nástroje PCBN byly vybrány bez povlaku a s povlakem na bázi nitridu titanu (TiN). Byly vybrány řezné podmínky pro pokrytí dokončovacích operací. Tři zvolené rychlosti byly $v_c = 250, 300$ a 350 m/min a tři rychlosti posuvu $f = 0,1; 0,15$ a $0,2$ mm/ot. Hloubka řezu byla u všech zkoušek stanovena na hodnotu rovnou $a_p = 0,3$ mm. Všechny testy byly prováděny s použitím 8 % polosyntetického chladiwa Sitala D 201-03 (Shell) přiváděného při 5 barech a 40 litrech za minutu.

Z výsledků experimentu je patrné, že u PCBN nástrojů s povlakem odpovídají relativně nízké hodnoty drsnosti vyšší životnosti nástroje. Obrázek představuje srovnání grafů životnosti nástrojů s povlakem a bez povlaku pro všechny zkušební podmínky při kritériu opotřebení $VB_{max} = 0,3$ mm. Ukázalo se, že životnost nástrojů pro PCBN nástroje má omezenou závislost na rychlosti posuvu, což ukazuje malé (přibližně 15 %) snížení se zvýšením posuvu. To lze vysvětlit současným působením mechanických a tepelných zatížení. Dle vědců po dokončení soustružení superslitin na bázi niklu pomocí PCBN nástrojů vede zdvojnásobení

rychlosti posuvu ke zvýšení řezné teploty přibližně o 40–60 °C. Očekává se, že se tak zvýší změkčení materiálu nástrojů a chemické opotřebení PCBN nástrojů.

Rovněž je možné vidět na obrázku v grafu a), že při rychlosti 250 m/min mají PCBN nástroje s povlakem přibližně o 20 % delší životnost než nástroje bez povlaku. Rozdíl se rychle snižuje s nárůstem rychlosti a při rychlosti 350 m/min se stává zanedbatelným. Toto chování lze vysvětlit skutečností, že ochranný mechanismus povlaku TiN má teplotně omezený rozsah. Nitrid titanu začíná oxidovat tvorbou rutilu (TiO_2) již při 650 °C.

Stejný účinek je přičítán významnému snížení životnosti nástroje se zvýšením řezné rychlosti, jak je patrné u všech řezných podmínek na obrázku. Zvýšení rychlosti z 250 m/min na 350 m/min vede ke snížení životnosti nástroje o více než 250 %. Při těchto teplotách se předpokládá chemické opotřebení v důsledku reakcí PCBN nástroje s legujícími prvky (Cr, Ni, Fe, Nb atd.). [14]



Obrázek 2 – Porovnání životnosti nástrojů pro všechny řezné podmínky experimentu [14]

- a) $v_c = 250$ m/min
- b) $v_c = 300$ m/min
- c) $v_c = 350$ m/min

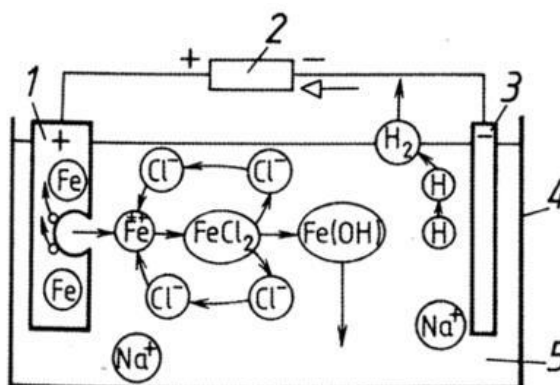
5.2. Nekonvenční obráběcí metody

Vzhledem k náročnosti konvenčních metod obrábění je snaha využít k obrábění niklových superslitin nekonvenční metody obrábění. Na toto téma byly provedeny v posledních letech studie, které analyzovaly obrobiteľnost niklových superslitin v daných procesech.

Pro obrábění superslitiny nekonvenčními metodami bylo použito ECM (Elektrochemické obrábění), EDM (Elektrojiskrové obrábění) a WEDM (Obrábění drátovým elektroerozivním výbojem). [2]

5.2.1. ECM – Elektrochemické obrábění

Elektrochemické obrábění je metoda beztliskového (bezsilového) řízeného obrábění elektricky vodivých materiálů. Jedná se o řízený proces oddělování materiálu prostřednictvím anodického rozpouštění v elektrolytu, který proudí mezerou mezi elektrodami. Obráběný materiál je zapojený jako anoda, použitý nástroj je pak zapojený jako katoda. Obě elektrody jsou napájeny stejnosměrným zdrojem nízkého napětí od 4 V do 30 V, a to při vysoké hodnotě proudu od 50 A až do 20 000 A. Princip elektrochemického obrábění je znázorněn na obrázku 3.



Obrázek 3 – Princip elektrochemického obrábění [15]

1 – obrobek (anoda), 2 – napájecí zdroj, 3 – nástroj (katoda), 4 – pracovní vana, 5 – elektrolyt

Jako elektrolyt se u elektrochemického obrábění využívá například chlorid sodný (NaCl), dusičnan sodný (NaNO₃), chlorečnan sodný (NaClO₃), chlorovodík (HCl), hydroxid sodný (NaOH) a kyselina sírová (H₂SO₄).

Intenzita rozpouštění je závislá na hustotě elektrického proudu, kdy její zvyšování nepříznivě ovlivňuje úběr obráběného materiálu, protože na povrchu elektrod se začínají usazovat oxidy, které vytvářejí pasivační vrstvu, zabraňující dalšímu rozpouštění materiálu obrobku.

Nevhodná volba složení elektrolytu a podmínek obrábění může způsobit mezi-kystalickou korozi obráběného materiálu a tím snížit únavovou pevnost obráběné součásti. Negativní vliv může mít i nevhodné vyústění děr a štěrbin pro přívod elektrolytu do pracovní mezery. Nevhodné víření elektrolytu má za následek nerovnoměrné rozpouštění obráběného materiálu a nižší rozměrovou přesnost vyrobené součásti. [16]

Vzhledem k tomu, že obrábění ECM prakticky nemá opotřebení nástroje, je pro výrobní společnosti velmi atraktivní. Proces a vývoj nástrojů jsou nicméně velmi zdlouhavé, a proto nákladné. Kromě toho je obtížné splnit úzké geometrické tolerance. [17]

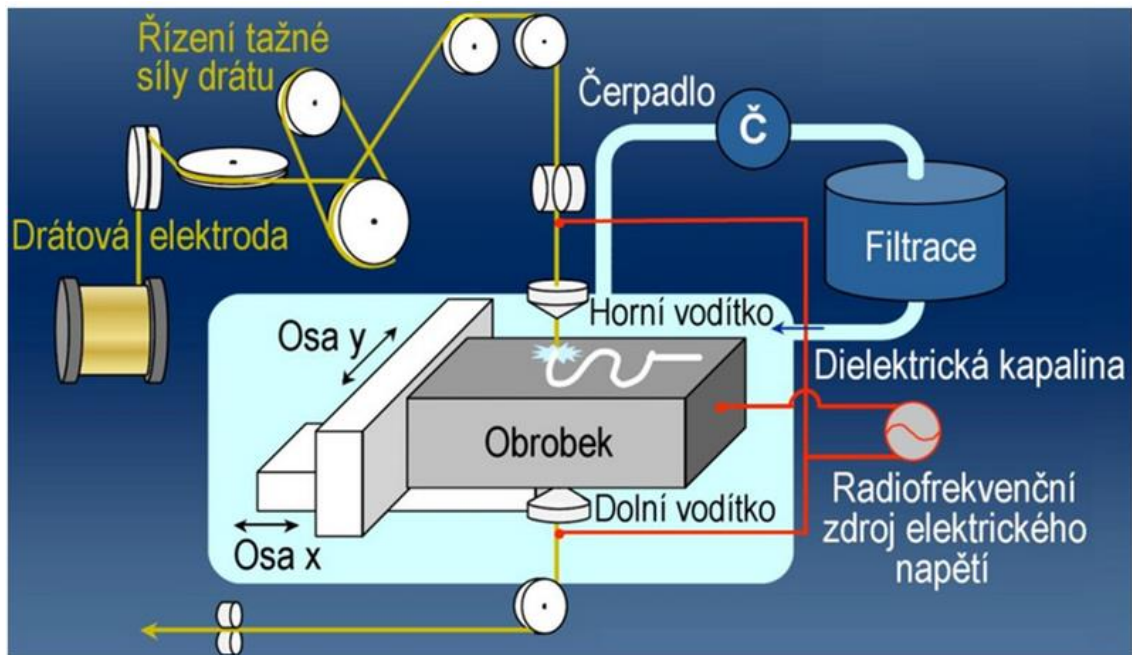
5.2.2. EDM – Elektroerozivní obrábění

Tento proces lze úspěšně použít k obrábění elektricky vodivých dílů bez ohledu na jejich tvrdost, tvar a houževnatost. Princip práce je založen na termoelektrické energii, která se ve formě jiskry vytváří mezi obrobkem a elektrodou ponořenou v dielektrické tekutině vedením elektrického proudu. Obrobek a elektroda jsou odděleny specifickou malou mezerou (tzv. „jiskřiště“) a v této mezeře vyplněné izolačním médiem dochází k pulzním výbojům. Izolační účinek dielektrického média má částečnou důležitost při předcházení špatným účinkům elektrolyzy na elektrody během procesu obrábění. Elektroda se pohybuje směrem k obrobku, dokud není mezera natolik malá, aby aplikované napětí bylo dostatečně vysoké k ionizaci dielektrické tekutiny. Pro dosažení přesného obrábění je nutné zvolit takovou dielektrickou kapalinu, aby se minimalizovala mezera (10–100 μm). Je však třeba určit minimální šířku mezery, což zabrání zkratu zejména u elektrod, které jsou citlivé na vibrace (drátové elektrody) nebo deformace. Zapálení výboje je iniciováno vysokým napětím, čímž se překoná dielektrická průrazová pevnost malé mezery. Krátkodobé výboje se generují v kapalně dielektrické mezeře, která odděluje elektrodu a obrobek. Materiál je odstraňován erozivním účinkem

elektrických výbojů z nástroje a obrobku. V tomto procesu nedochází k přímému kontaktu mezi elektrodou a obrobkem, což eliminuje mechanické namáhání, chvění a problémy s vibracemi během obrábění. Zrcadlový obraz elektrody je kopírován s posunem rovným velikosti mezery. Mezi elektrodami se vytvoří kanál plazmy (ionizovaný, elektricky vodivý plyn s vysokou teplotou) a dále se vyvíjí s dobou výboje. Protože úběr kovu na jeden výboj je velmi malý, výboje by se měly vyskytovat při vysokých frekvencích (103–106 Hz). U každého pulzu dochází k výboji na jednom místě, kde se elektrodové materiály odpařují nebo rozpouštějí v roztavené fázi. Ve výsledku se vytvoří malý kráter jak na nástrojové elektrodě, tak na povrchu obrobku. Odstraněný materiál je následně odplaven z mezery dielektrickým tokem. Po skončení výboje teplota plazmy a povrchu elektrod rychle klesá, což má za následek rekombinaci iontů a elektronů a obnovení pevnosti při rozpadu dielektrika. [18]

5.2.3. WEDM – Drátové elektroerozivní obrábění

Jedná se o nekonvenční termoelektrický proces, který slouží k řezání složitých tvarů u všech těžko obrobitelných vodivých materiálů. Mechanismus odstraňování materiálu spočívá v erozi materiálu v důsledku výboje jiskry mezi drátem a obrobkem, ponořeným do kapalného dielektrického média (viz Obrázek 4). Mikroprocesor také neustále udržuje mezeru mezi drátem a obrobkem, která se pohybuje od 0,025 do 0,05 mm. Nejdůležitějšími měřítky výkonu u tohoto procesu jsou rychlost úběru materiálu nebo řezná rychlost, povrchová úprava, řezná šířka a rychlost opotřebení drátu. Tyto veličiny jsou ovlivněny mnoha parametry obrábění, jako je špičkový proud, doba zapnutí impulzu, doba vypnutí impulzu, napětí drátu, rychlost posuvu drátu, napětí jiskřiště, nastavení posuvu servomotoru, průměrné pracovní napětí a podmínky dielektrického proplachu. [18; 19]



Obrázek 4 – Princip WEDM [20]

5.3. Hybridní obráběcí metody

Hybridní obrábění je další metodou obráběcího procesu, která si získává pozornost vědců. V této metodě je obráběný materiál zahříván nekonvenčním přístupem a konvenční proces provádí proces obrábění. [2]

5.3.1. Obrábění laserem (LAM) / asistované obrábění laserem

Laserové obrábění je jedním z pokročilých obráběcích procesů určených pro řezání široké škály materiálů s vysokou rozměrovou přesností a dobrou kvalitou povrchu. Tato metoda využívá vysoce intenzivního laserového paprsku k řezání požadovaného množství materiálu tavením a odpařováním. Kromě toho se laser používá pro částečné změkčení materiálů v kombinaci s řeznými nástroji při konvenčním obrábění. Použití laseru před řezným nástrojem vede k přesné kontrole oblasti ohřáté laserem. Díky tomu dochází ke zlepšení výhod obrábělnosti, jako je snížení řezných sil, zlepšení drsnosti povrchu a zvýšení životnosti řezného nástroje. V případě samotného laserového obrábění nedochází k žádnému opotřebení nástroje, protože neexistuje žádný skutečný nástroj, který by se během

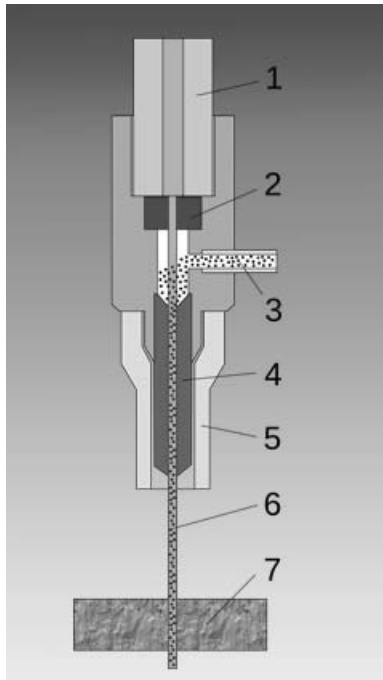
obrábění dostal do kontaktu s obrobkem. Pro tuto metodu obrábění se využívají CO₂ lasery, Nd:YAG (pevnotlátkový laser), vláknové a ultrakrátké pulzní lasery.

Další formou obrábění podobné laserovému paprsku je plazmová řezačka. Ta je v podstatě výkonnější než typický laserový paprsek, protože plazma je schopna generovat teploty mnohem vyšší než laserové paprsky.

Při obrábění laserem jsou do stroje nejprve exportována data profilu řezu. Laserové ukazovátko poté prochází dráhou profilu a současně dochází k přenosu vysokoteplotního laserového paprsku na obrobek. V důsledku extrémně zvýšených teplot se materiál obrobku začne tavit a dojde k odříznutí požadovaného materiálu z obrobku. [21; 22; 23]

5.3.2. AWJM – obrábění abrazivním vodním paprskem

Jedná se o kombinaci vodního a abrazivního obrábění. Princip AWJM spočívá v tom, že využívá vysokorychlostní proud vody při rychlosti asi 200 m/s spolu s různou tvrdostí abrazivních materiálů dopadajících na obrobek tryskou. Se-stava pro metodu AWJM je znázorněna na obrázku 5. Celý proces probíhá při zachování vzdálenosti mezi tryskou (nástrojem) a obrobkem (tzv. odstupová vzdálenost). Nežádoucí materiály jsou tedy odstraněny v důsledku kinetické energie abrazivních částic získané vysokou rychlostí vodního paprsku. K odebrání materiálu dochází mikrořezáním. Během této metody obrábění nedochází ke generování tepla a oproti konvenčním metodám dochází k nízkému opotřebení nástroje. Výsledná kvalita metody AWJM závisí na vlivu zvolených parametrů, jako je tlak vody, rychlost pojezdu, rychlost abrazivního toku a odstupová vzdálenost. Výkony a obrobitelnost jsou hodnoceny s ohledem na sklon stěn řezu a rychlost úběru materiálu. Tato metoda je vhodná pro obrábění tvrdých materiálů do maximální tloušťky 70–75 mm. Optimální tlak vodního paprsku a rychlost posuvu trysky mohou při obrábění silných vzorků zajistit lepší výslednou kvalitu povrchu. Nesprávný výběr řezných parametrů může vést ke špatnému sklonu stěn řezu a špatné výsledné kvalitě povrchu. Ta se po abrazivním řezání může lišit v důsledku velikosti zrna erodované částice a její polohy. [24; 25]



Princip obrábění abrazivním vodním paprskem AWJM

1. Vysokotlaký přívod vody
2. Rubínová a diamantová tryska
3. Abrazivo
4. Směšovací trubička
5. Výstupní tryska
6. Vodní paprsek s abrazivem
7. Obráběný materiál

Obrázek 5 – Princip obrábění abrazivním vodním paprskem [26]

6. Integrita povrchu

Integrita povrchu obrobené součásti má přímý vliv na její provozní kvalitu a životnost. Vzhledem k tomu, v jak náročných podmínkách se niklové superslitiny využívají, je třeba se na toto téma zaměřit. Niklové superslitiny jsou během obrábění podrobeny mechanickým, tepelným, topologickým a stejně tak i metalurgickým změnám. Mechanické změny zahrnují změnu tvrdosti, plastické deformace a tvorbu zbytkového napětí. Tepelné ovlivnění vrstvy je způsobeno teplotními změnami, ke kterým během procesu obrábění dochází, přičemž výchozí změny pokrývají hlavně změny povrchové morfologie. Metalurgické změny spočívají ve fázové transformaci, rekystalizaci na povrchu a pod povrchem, což ovlivňuje mikrostrukturální změnu.

Tyto uvedené typy změn přímo ovlivňují kvalitu povrchu nebo blízké oblasti pod povrchem obrobené součásti. Existují také nežádoucí vlivy korozního praskání vlivem zbytkového napětí, poruchy způsobené únavou a tečením na povrchu součásti. [27]

6.1. Drsnost a profil

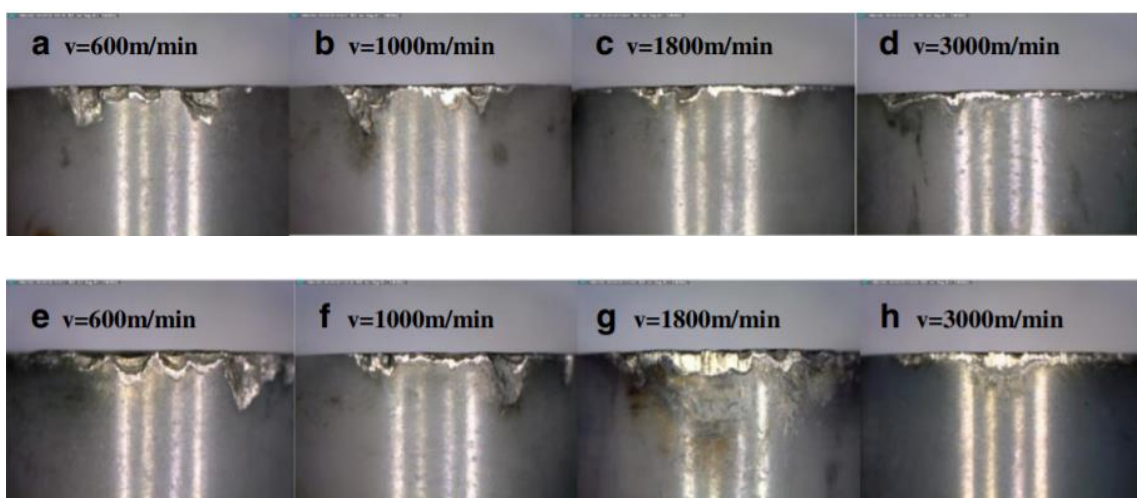
Měření drsnosti povrchu je jednou z nejpoužívanějších metod pro hodnocení kvality povrchu součásti. Konvenční metody obrábění nemusí při obrábění superslitin vždy dosahovat požadovaných hodnot konečné drsnosti povrchu. Proto může být zapotřebí některých dalších metod úpravy povrchu, aby došlo k dosažení požadovaných hodnot kvality povrchu. Hlavní parametr, který ovlivňuje výslednou drsnost povrchu, je rychlost posuvu. Vyšší hodnoty rychlosti posuvu vedou k vyšší drsnosti povrchu.

Další parametr, který ovlivňuje výslednou drsnost, je řezná rychlost. S vyšší řeznou rychlostí je dosahováno lepších hodnot drsností.

Ohledně rychlosti posuvu lze uvést experiment Darwish s kolektivem (Saudská Arabie, 1997). Byly zkoumány účinky různých parametrů řezání na drsnost povrchu při soustružení válců ze superslitiny Supermet 718. Jako nástroje byly použity soustružnické nože s keramickými destičkami a PCBN destičkami.

Soustružení probíhalo za sucha. Zkoumanými parametry soustružení byly rychlosti posuvu mezi hodnotami 0,075 - 0,6 mm/ot, řezná rychlost 32 a 125 m/min a hloubka řezu 0,5 a 2 mm. Celkem bylo provedeno 16 měření. Výsledky experimentu ukázaly, že rychlost posuvu měla mezi zkoumanými parametry dominantní vliv na kvalitu povrchu. Vyšší hodnoty rychlosti posuvu vedly k vyšší drsnosti povrchu. [28]

Ke vlivu řezné rychlosti na výslednou drsnost lze uvést experiment Xianhua Tian s kolektivem (Čína, 2013). Jednalo se o vysokorychlostní frézování čelem obdélníkových bloků z Inconelu 718 s nástroji na bázi SiAlON. Při experimentu bylo použito jak sousledné, tak nesousledné frézování. Oba typy frézování byly uskutečněny za sucha. Posuv na zub byl stanoven na 0,09 mm/zub, axiální hloubka řezu na 1 mm a radiální hloubka řezu na 15 mm. Pro experiment bylo použito sedm různých řezných rychlostí, 600, 1 000, 1 400, 1 800, 2 200, 2 600 a 3 000 m/min. Výsledkem experimentu bylo, že drsnost povrchu vykazovala tendenci se snižovat se zvýšenou rychlostí řezání, s výjimkou $v_c = 3000$ m/min. Tato výjimka byla přičítána ztrátě mechanických vlastností nástrojů při velmi vysokých řezných teplotách. Navíc u tohoto experimentu byla patrná horší kvalita povrchu při sousledném frézování, což vědci přisuzovali vysokému zatížení na počátku řezu v závislosti na nízké houževnatosti a pevnosti keramických nástrojů. Na počátku řezu jsou síly a tloušťka třísky na maximálních hodnotách. Porovnání výsledné kvality povrchu je ukázáno na obrázku 6. [29]



Obrázek 6 – Porovnání výsledných drsností povrchu – nahoře nesousledné frézování, dole sousledné frézování [29]

Výsledky z různých experimentů provedených na toto téma ukazují, že zvýšením řezné rychlosti je možné docílit snížení drsnosti povrchu. Nadměrné zvýšení řezné rychlosti však způsobí nepříznivé opotřebení nástroje, které následně negativně ovlivní drsnost povrchu předmětů. [11]

6.2. Tepelné jevy

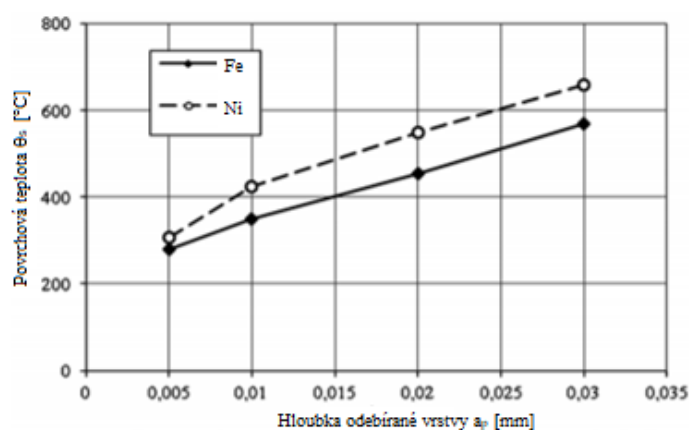
Jak již bylo popsáno výše, niklové superslitiny dokážou odolat široké škále provozních podmínek. Navzdory vynikajícím mechanickým a tepelným vlastnostem však nízká tepelná vodivost, náchylnost ke zpevňování obráběného povrchu nebo abrazivita materiálu vedou k produkci velkého množství tepla na břitu nástroje. To má za následek krátkou životnost nástroje a samozřejmě vznik vysokých hodnot řezných sil.

Většina tepla produkovaného během obrábění se přenáší na nástroj. Vysoké teploty hrotu nástroje mohou způsobit nadměrné opotřebení nástroje, což může omezit řezné rychlosti a snížit produktivitu. Teploty vznikající během obrábění se mohou pohybovat v rozmezí 1100 °C až 1300 °C. Kvůli generovanému intenzivnímu teplu se některé částice přivaří k hraně řezného nástroje, což zvyšuje opotřebení nástroje a způsobuje plastickou deformaci břitu. Tan a kolektiv (Čína, 1986) uvedli, že teplota v oblasti řezání byla hlavní příčinou opotřebení nástroje při soustružení čistého niklu. Během obráběcího procesu by tudíž měla být zajištěna kontrola opotřebení nástroje vzhledem k optimálním parametrům procesu. Generování tepla během obráběcího procesu lze minimalizovat vhodnými řeznými podmínkami, vhodnou volbou řezné kapaliny a materiálu nástroje. [11; 30]

Teplo generované v řezné zóně se koncentruje v povrchové vrstvě obráběného materiálu a vytváří tak velmi vysoký teplotní gradient. Tento teplotní gradient je rozhodujícím faktorem pro vznik tahového zbytkového napětí po obráběcích operacích, což může následně způsobit až selhání výrobku.

Miroslav Neslušan a kolektiv (Slovensko, 2012) ve své práci uvádí, že množství generovaného tepla během obráběcího procesu ovlivňuje hloubka odebírané vrstvy a správná volba materiálu obráběcího nástroje. Při experimentu byla broušena ocel 14 209 a niklová slitina EI 698VD. K broušení byly použity brusné

kotouče na bázi Al_2O_3 , PCBN a diamantu. Po celou dobu experimentu byly nastaveny konstantní řezné podmínky $v_c = 25 \text{ m/s}$, $v_w = 4 \text{ m/min}$, $a_p = 0,02 \text{ mm}$. Broušení probíhalo na sucho a s Emulzínem H 2 %. Jak je patrné v grafu 5, s většími hodnotami odebírané hloubky vrstvy docházelo ke zvyšování povrchové teploty θ_s . Z experimentu je dále patrné, že při použití brusných kotoučů na bázi PCBN a diamantu došlo ke snížení produkce tepla v rozmezí 35–50 % při broušení na sucho oproti kotouči na bázi Al_2O_3 . V případě použití Emulzínu H–2 % došlo u PCBN kotouče a diamantového kotouče k poklesu produkce tepla o 35–40 % oproti brusnému Al_2O_3 kotouči. [31]



Graf 5 – Závislost hloubky odebírané vrstvy a_p na povrchové teplotě θ_s [31]

6.3. Zbytková napětí

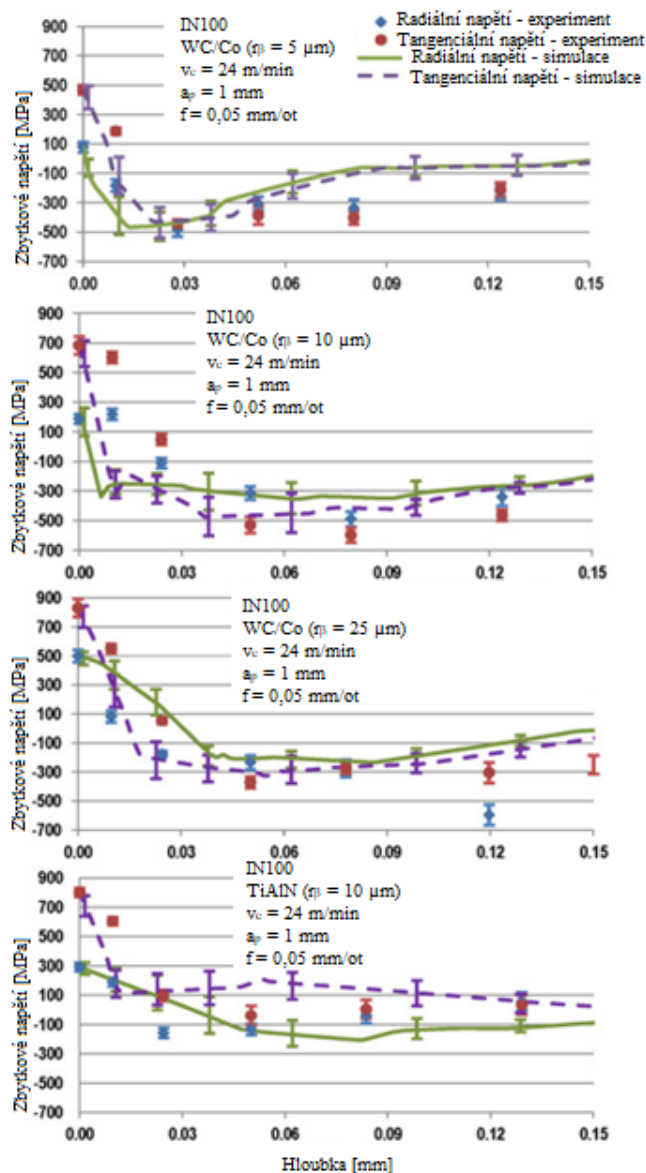
Zbytková napětí jsou velmi důležitou a v praxi velmi často opomíjenou záležitostí. Než se z počátečního materiálu vytvoří finální součást, projde daný materiál celou řadou operací, postupů a zpracování. Pokud je materiál při některé z těchto operací vystaven působení vnějších sil, tj. je přetvářen, dochází ke vzniku zbytkových napětí. [32]

Zbytková napětí jsou taková napětí, která v materiálu existují i bez použití vnějších sil. Jejich velikost a smysl jsou různé podle použité technologie. Zbytková napětí lze rozdělit na napětí tlaková a napětí tahová. Tahová jsou kladná, tlaková jsou záporná. Daná napětí se označují v absolutních hodnotách, čímž dochází ke kumulaci napětí. Uvádí se, že tlaková zbytková napětí jsou pro únavový výkon příznivá, zatímco hodnoty v tahu mohou být škodlivé. Hodnoty v tahu mohou

představovat potenciální riziko z hlediska iniciace trhlin, jejich šíření únavového selhání konečných produktů. Často je nutné přeměnit tahová zbytková napětí v materiálu na napětí tlaková. Toho se docílí technikami post-processingu jako kuličkování nebo leštění, případně zabránit vzniku tahových napětí již během obráběcího procesu. Některé výzkumy ukázaly, že frézování s nástroji z keramiky vyvolává velmi vysoká tahová napětí v povrchu, která překračují nominální mez kluzu materiálu. [32; 11]

Přehled výzkumných studií o účincích parametrů obrábění poukazuje na to, že se zvyšováním řezné rychlosti při obrábění Inconelu dochází ke zvyšování tlaku v důsledku větších plastických deformací, zatímco zvýšení hloubky řezu, rychlosti posuvu a změna mikrogeometrie mají určitý vliv na zvyšování napětí v tahu na povrchu a zvyšování tlaku pod povrchem. [33]

Uvádí se, že zásadní vliv na vznik napětí má poloměr ostří nástroje a poloměr špičky nástroje. K tomuto tématu byl proveden experiment Özel a Ulutan (USA, 2012). Při obrábění Inconelu 100 byly použity karbidové destičky bez povlaku a s povlakem na bázi TiAlNi s různými poloměry ostří. Bylo zaznamenáno, že povrchové tahové napětí vykazovalo nárůst se zvyšujícím se poloměrem ostří pro radiální i tangenciální směr. Nástroj s povlakem vykazoval menší napětí, než tomu bylo u nástrojů bez povlaků. Výsledky jsou patrné na obrázku 7. Jedná se o grafické závislosti zbytkového napětí na hloubce povrchu. Z grafů je patrné, že se zvyšujícím se poloměrem špičky dochází ke zvyšování hodnot v již zmíněných směrech. Jak bylo zmíněno již výše, kladná část osy jsou tahová napětí, záporná naopak napětí tlaková. [34]



Obrázek 7 – Zbytkové napětí [34]

Zbytková měření lze měřit za pomoci destruktivních a nedestruktivních zkoušek. V případě destruktivních zkoušek dochází během měření k poškození obrobku. Nejčastěji používanými destruktivními metodami jsou odleptávání povrchových vrstev a vrtání otvorů. V případě metody odleptávání dochází k odstranění povrchu odleptání a následně se měří projevená deformace v dané hloubce. Poté může být provedeno další měření.

U metody vrtání díry je do obrobku před provedením jakýchkoli měření vyvrtán slepý otvor (obvykle o průměru 1 nebo 2 mm v závislosti na velikosti měřidla) a podél tohoto otvoru jsou prováděna měření se vzdálenostmi 100 μm až 1 mm

od sebe, a to pomocí tenzometrické růžice přilepené k otvoru na povrchu materiálu.

V případě nedestruktivních metod se k měření využívá zbytkových napětí neutronová a rentgenová difrakce. Při difrakci dochází k pronikání paprsku do materiálu. Úhly ohnutí paprsků poskytují kvantitativní informace o přetvoření v materiálu, takže meziatomové vzdálenosti v materiálu fungují jako tenzometr. [33]

6.4. Defekty povrchu

Jak bylo již výše uvedeno, niklové superslitiny jsou materiály, které dokážou odolávat vysoké škále provozních podmínek, avšak obrobiteľnosť týchto materiálů je velice náročná. Kvůli tomu může dojít ke značnému poškození obrobeného povrchu. To v některých případech zasahuje až k úrovním podpovrchových ploch.

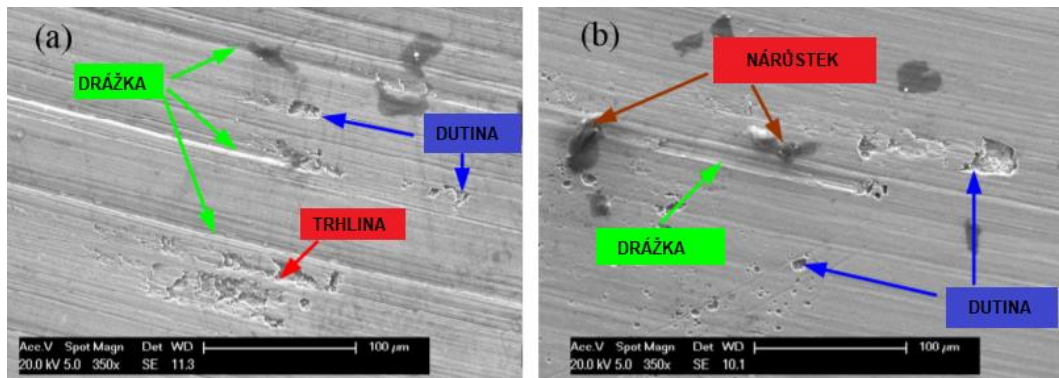
Výsledná drsnost obrobeného povrchu a jeho poškození mají významný vliv na vlastnosti spojené s povrchem jako je únava, odolnost proti korozi při namáhání a pevnost v tečení. To ve výsledku ovlivňuje životnost, spolehlivost a výkon celé součásti během provozu. Z toho důvodu je kladen velký důraz na výslednou kvalitu povrchové integrity.

Řezné síly mají důležitý podíl na generování napětí a teploty na obráběných plochách. Dále ovlivňují napětí a teplotu podél rozhraní nástroj-tříška a nástroj-obrobek. Všechny tyto účinky nakonec vedou ke špatné integritě povrchu, pokud nejsou správně zvoleny pracovní podmínky. Proto je důležité znát parametry obrábění, které snižují řezné síly a vytvářejí příznivé vlastnosti povrchu.

Obecně lze tedy říct, že povrchové poškození je výsledkem interakce procesních energií, zejména mechanických a termochemických, s takovými vlastnostmi materiálu, jako je pevnost v tahu, tažnost a tvrdost. Rozsah poškození povrchu, ke kterému dochází během obrábění, a způsob jeho vývoje jsou důležité informace. [35]

Na obrobeném povrchu se mohou objevit trhliny, drážky nebo dutiny (viz Obrázek 8). Tyto defekty mohou být dále šířeny tahovými zbytkovými napětími. Na

povrchu se dále mohou objevit zbytky materiálu z nárůstku a použitého nástroje a také stopy po posuvu.



Obrázek 8 – Defekty obrobené plochy [35]

Výslednou kvalitu obrobené plochy niklových superslitin ovlivňuje mnoho faktorů – velikost řezné rychlosti, řezných sil, řezná teplota, hloubka odebírané vrstvy, opotřebení nástroje a další. V případě asistovaného obrábění laserem (LAM) může docházet ke tvorbě mikrotrhlin při tuhnutí obráběného materiálu. [36]

Ve studii provedené Ezugwu a Tangem (Velká Británie, 1995) byl při obrábění Inconelu 718 použit nástroj na bázi keramiky. Při obrábění byla použita řezná rychlost 152 m/min. Z experimentu vyplývá, že řezná teplota indukovaná během obrábění hrála hlavní roli v povrchových deformacích a změnách mikrostruktury, ke kterým došlo. [37]

John Bailey (USA, 1977) při čelním soustružení niklové slitiny uvedl, že znatelný podíl na defektech povrchu měla nízká rychlost obrábění (0,3 – 80 m/min). [38]

Pawade a kolektiv (Indie, 2007) analyzovali poškození povrchu u Inconelu 718 ve formě kovových úlomků a rozmazaných částic materiálu na obrobeném povrchu obrobeném pomocí řezných nástrojů PCBN. Výsledkem experimentu bylo, že vysoké řezné teploty při obrábění na sucho mohly vést k přilnutí zbytkového třískového materiálu nebo částic nástroje k obrobenému povrchu. [35]

7. Experimentální část

Jak již bylo popsáno v rešeršní části práce, proces obrábění niklových superslitin ovlivňuje mnoho parametrů. Z důvodů epidemiologické situace v České republice byly při experimentu sledovány změny pouze těchto parametrů – řezná rychlost, řezné prostředí, řezné síly, drsnost obrobené povrchu, vliv zpevnění předchozího obrobení na velikost řezných sil a opotřebení nástroje.

7.1. Parametry experimentu

Pro experiment bylo zvoleno sousledné frézování Inconelu 713LC (Low Carbon) v podobě kvádrů o rozměrech 38 x 193 x 40 mm. Délka kvádrů je rozdělena na deset shodných částí, resp. ploch. Jednotlivé plochy jsou vzájemně odstupňovány po 15 mm, aby nedocházelo k ovlivňování měření sil tělem frézy a k opotřebení části těla frézy. Vše je patrné na obrázku 9. Nejnižše položená plocha je na obrázku vpravo, nejnižše položená vlevo. Rozmezí legujících prvků v Inconelu 713LC je uvedeno v tabulce 2.



Obrázek 9 – Zkušební kvádr z Inconelu 713LC

Tabulka 2 – Rozmezí legujících prvků v Inconelu 713LC [39]

	Min [%]	Max [%]
Ni	Základ	Základ
Cr	11,0	13,0
Ti	0,4	1,0
Al	5,5	6,5
Mo	3,8	5,2
Ta	0,75	1,1
Nb	0,75	1,1

	Min [%]	Max [%]
Fe	0	0,5
Si	0	0,5
Mn	0	0,25
C	0,03	0,07
Cu	0	0,5
Zr	0,05	0,1
B	0,005	0,015

Hodnoty řezných rychlost v_c byly zvoleny 30, 50, 70 m/min, a to v různých pořadích. Posuv na zub byl nastaven na hodnotu 0,095 mm/zub. Hloubka odebírané vrstvy a_p byla nastavena na hodnotu 0,5 mm.

Frézování probíhalo na sucho, s minimálním množstvím mazání (metoda MQL) a při kryogenním chlazení. Teplota při experimentu byla 23,7 °C.

7.2. Použité stroje

Pro frézování byl použito pětiosé frézovací centrum Okuma MU – 400 V II (viz Obrázek 10)



Obrázek 10 – Frézovací centrum Okuma

Technická data frézovacího centra jsou popsána v následující tabulce 3.

Tabulka 3 – Technické parametry frézovacího centra Okuma [40]

Pracovní stůl	
Průměr upínací plochy	400 (6x T 18H7) mm
Max. rozměry obrobku	Ø 600 x H 400 mm
Max. otáčky	50 ot/min
Max. zatížení stolu	300 kg
Rozsah pojezdů os	
Osa X	762 mm
Osa Y	460 mm
Osa Z	460 mm
Osa A	+20 až -110 °
Osa C	360° (neomezeně)
Posuvy	
Rychloposuv	X/Y/Z: 40/40/32 m/min
Rychloposuv rotačních os	A/C: 18.000/14.400 °/min
Max. pracovní posuv	X/Y/Z: 32 m/min
Pracovní vřeteno	
Rozsah otáček	15 (20, 25, 35) tis. ot/min

K frézování byla použita nástrčná rovinná čelní fréza Sandvik Coromat R200-068Q27-12M pro 6 frézovacích vyměnitelných destiček. Během celého procesu byla na fréze vždy jedna vyměnitelná destička (viz Obrázek 11).



Obrázek 11 – Frézovací hlava s jednou vyměnitelnou břitovou destičkou

Jako frézovací destička byla použita frézovací destička Ceratizit RPHX 1204M8EN-M31 CTC 5240 (viz Obrázek 12). Jedná se o destičku s CVD povlakem TiN + TiB₂ o tloušťce 4 μm. [41]



Obrázek 12 – Použitá frézovací destička Ceratizit

Pro měření sil byl použit dynamometr Kistler 9265B (viz Obrázek 13). Dynamometr lze využít pro technologie broušení, frézování, hoblování a soustružení. Vzorkovací frekvence při frézování byla nastavena na 2000 Hz.



Obrázek 13 – Dynamometr Kistler 9265B [42]

Dynamometr disponuje těmito parametry: [42]

- Měření ve třech osách
 - F_x v rozsahu 0–1500 N
 - F_y v rozsahu 0–1500 N
 - F_z v rozsahu 0–3000 N
- Piezoelektrický princip
 - citlivost F_x v rozsahu ≈ 8 pC/N
 - citlivost F_y v rozsahu ≈ 8 pC/N
 - citlivost F_z v rozsahu $\approx 3,7$ pC/N
- Vysoká vlastní frekvence
 - frekvence $f_0(x) \approx 1,5$ kHz
 - frekvence $f_0(y) \approx 1,5$ kHz
 - frekvence $f_0(z) \approx 2,5$ kHz
- Vysoká vlastní tuhost
 - tuhost $c_x \approx 0,8$ kN/ μ m
 - tuhost $c_y \approx 0,8$ kN/ μ m
 - tuhost $c_z \approx 2$ kN/ μ m

K dynamometru byl připojen zesilovač Kistler 5019 a převodník Kistler 5697A. Celá aparatura byla připojena k notebooku. Oba přístroje jsou společně s notebookem na obrázku 14. K měření sil byl použit program DynoWare.



Obrázek 14 – Použitý zesilovač a převodník Kistler

K měření drsnosti byl použit přenosný drsnoměr Mahr MarSurf PS 10 (viz Obrázek 15). Technické parametry drsnoměru jsou uvedeny v tabulce 4.



Obrázek 15 – Drsnoměr Mahr [43]

Tabulka 4 – Technické parametry drsnoměru [43]

Rychlost polohování	0.5; 1.0
Princip měření	Dotyková metoda
Snímač	Indukční snímač s patkou
Měrová jednotka	metrický/inch
Rozsah měření mm	0,35
Rozlišení profilu	8 nm
Rychlost polohování	0.5; 1.0

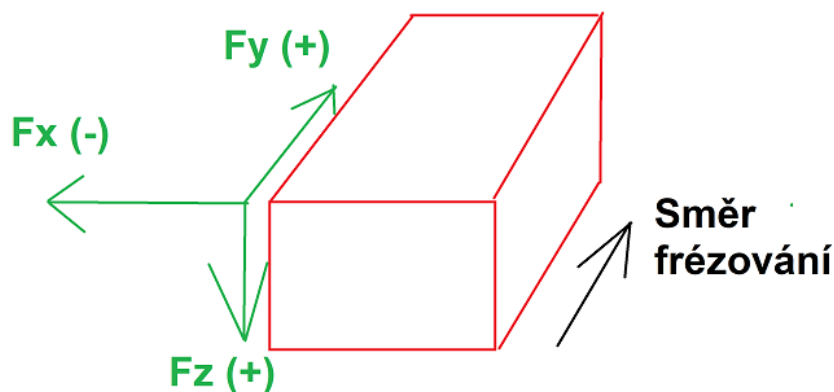
Pro porovnání mikrostruktury frézovacích destiček byl použit digitální mikroskop Keyence VHX – 6000 (viz Obrázek 16).



Obrázek 16 – Keyence VHX – 6000 [44]

7.3. Metodika měření a zpracování dat

Řezné síly byly dynamometrem měřeny ve třech směrech – F_x (řezná síla F_c), F_y (posuvová síla F_f), F_z (pasivní síla F_p). Souřadný systém dynamometru je znázorněn na obrázku 17. Síly byly zaznamenány za pomoci programu Dynoware. Jeden cyklus v programu odpovídal obrobení jedné z deseti ploch na kvádru. Před každým měřením byla provedena kalibrace dynamometru. Ukázka zaznamenaných sil je na obrázku 18.



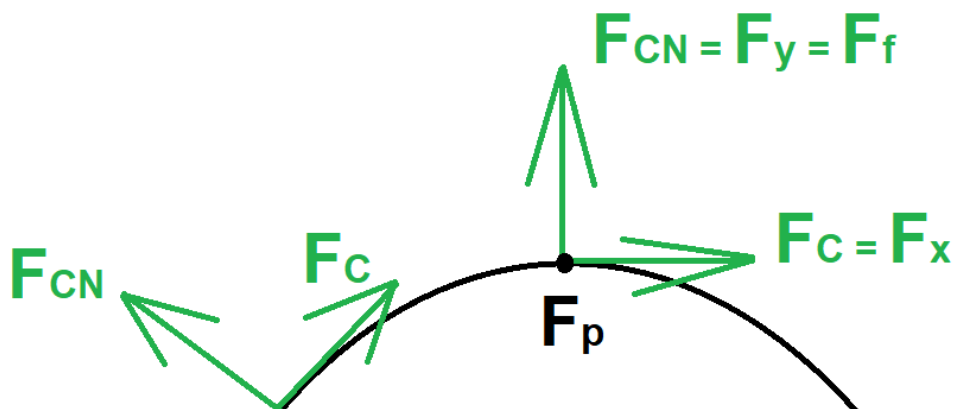
Obrázek 17 – Souřadný systém dynamometru

Po každém cyklu byla pootočená vyměnitelná destička, a to tak, aby další plocha byla obráběna vždy novým břitem.



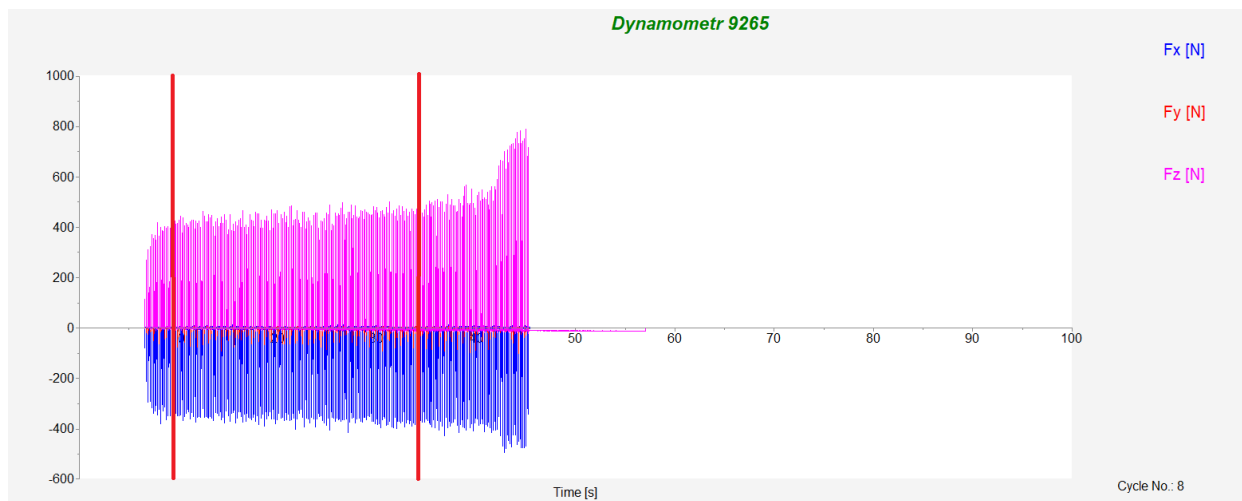
Obrázek 18 – Zaznamenané síly během jednoho cyklu

Použitý dynamometr měří ve třech kolmých osách. Břítová destička se však nepohybuje po přímce, ale po zakřivené dráze. Vstupuje tedy do materiálu pod úhlem, nikoli kolmo. Tudíž jediné místo, kde měřená síla dynamometrem bude odpovídat reálné síle na břítové destičce, je uprostřed dráhy. V tomto místě jsou si vektory sil F_{CN} (normálová složka řezné síly), F_y (silová složka dynamometru) a F_f (posuvová síla) rovny. Vektory sil F_x (silová složka dynamometru) a F_c (řezná síla) jsou na tyto vektory kolmé (viz Obrázek 19). Pasivní síla (F_p) je v daném místě kolmá na všechny zmíněné vektory a směřuje směrem do materiálu.



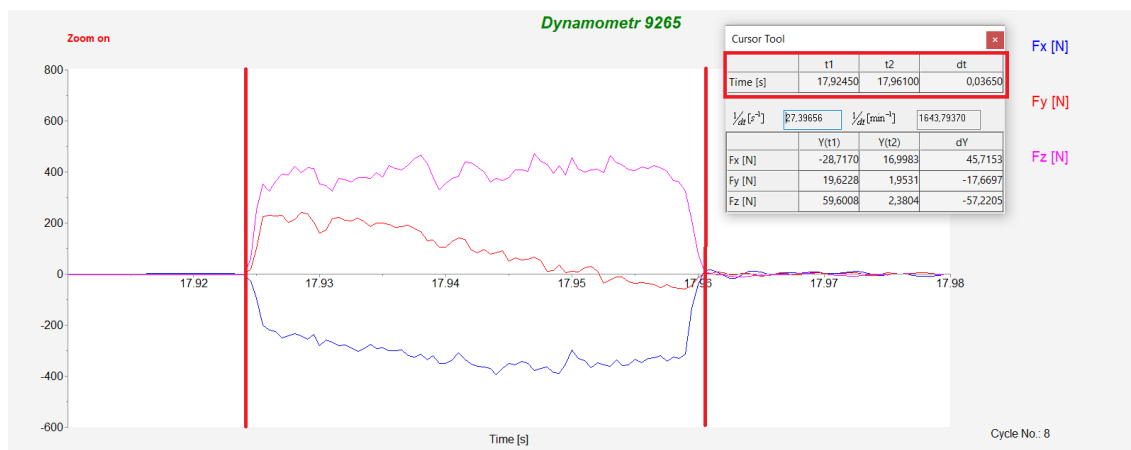
Obrázek 19 – Průběh síly po dráze břítové destičky

Z tohoto důvodu bylo třeba v získaných datech najít průměrnou hodnotu pro každou měřenou sílu (F_x , F_y , F_z) v oblasti výše popsaného místa. Pro získání průměrné hodnoty síly byla v grafu daného cyklu vybrána oblast, kde nedocházelo k výkyvu sil nebo k náhlým změnám hodnot sil (viz Obrázek 20).



Obrázek 20 – Vhodná oblast pro získání průměrné síly

V této oblasti bylo posléze vybráno 5 náhodných grafů záběrů, u kterých došlo ke změření průměrných sil. V daném grafu záběru byla změřena délka záběru a z času záběru byla určena jeho polovina – přibližné místo kolmosti vektorů (viz Obrázek 21).



Obrázek 21 – Určení poloviny záběru při frézování

Následně byla vytvořena oblast v okolí poloviny bodu, nejčastěji mezi vrcholy grafu a získaná hodnota byla zaznamenána (viz Obrázek 22).



Obrázek 22 – Vybraná oblast pro získání průměrných hodnot

Takto získané průměrné hodnoty z pěti náhodných grafů (3 průměrné hodnoty tří sil z jednoho grafu záběru, 15 průměrných hodnot třech sil za jeden graf cyklu) byly zprůměrovány. Tímto postupem došlo k získání tří průměrných hodnot sil (F_x , F_y a F_z) z jednoho cyklu měření (viz Obrázek 23).

	FX	FY	FZ
1	335,3	90,199	363,3
2	338,9	91,02	375,8
3	339,8	81,73	376,4
4	336,5	95,71	367,2
5	346	90,55	381,4
Součet	1696,5	449,209	1864,1
Průměr	339,3	89,8418	372,82

Obrázek 23 – Získání průměrných hodnot sil

V případě frézování na sucho byly hodnoty všech cyklů v daném měření následně zprůměrovány a výsledná hodnota byla přiřazena k danému měření, resp. k dané rezné rychlosti.

Po každém měření byla změřena výsledná drsnost obrobené plochy. Drsnost byla měřena drsnoměrem Mahr a na každé ploše byly vždy provedeny tři měření drsnosti. Z daných třech protokolů byl při zpracování dat zjištěn průměr a výsledné hodnoty R_a , R_z a R_{max} byly zaznamenány k danému cyklu.

V případě frézování na sucho bylo získáno sedm hodnot pro každou měřenou veličinu drsnosti (R_a , R_z a R_{max}). Z těchto získaných hodnot byly vytvořeny průměrné hodnoty a následně byly porovnány se získanými hodnotami při frézování MQL a při frézování s kryogenním chlazením.

7.4. Frézování na sucho

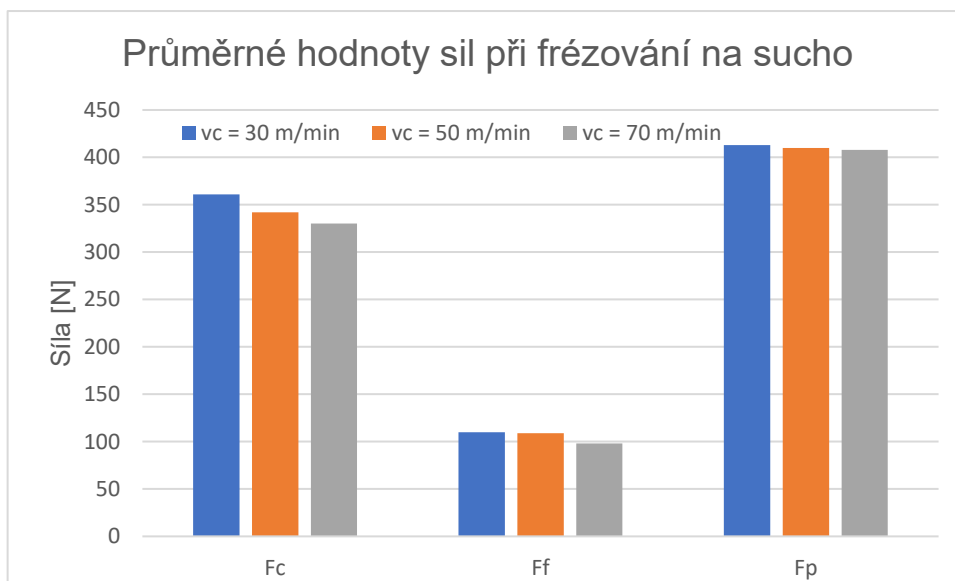
U tohoto typu prostředí byla provedena tři měření po 21 cyklech při různé kombinaci řezných rychlostí. Jeden cyklus odpovídá jedné z deseti částí na frézovaném kvádru z Inconelu 713LC. Posuv na zub byl vždy nastaven na 0,095 mm/zub a hloubka odebírané vrstvy na 0,5 mm.

První měření obsahovalo 9 cyklů. Řezná rychlost byla nastavena v kombinaci 30-50-70-30-50-70-30-50-70 m/min.

Druhé měření obsahovalo také 9 cyklů. Řezná rychlost byla nastavena v kombinaci 50-70-30-50-70-30-50-70-30 m/min.

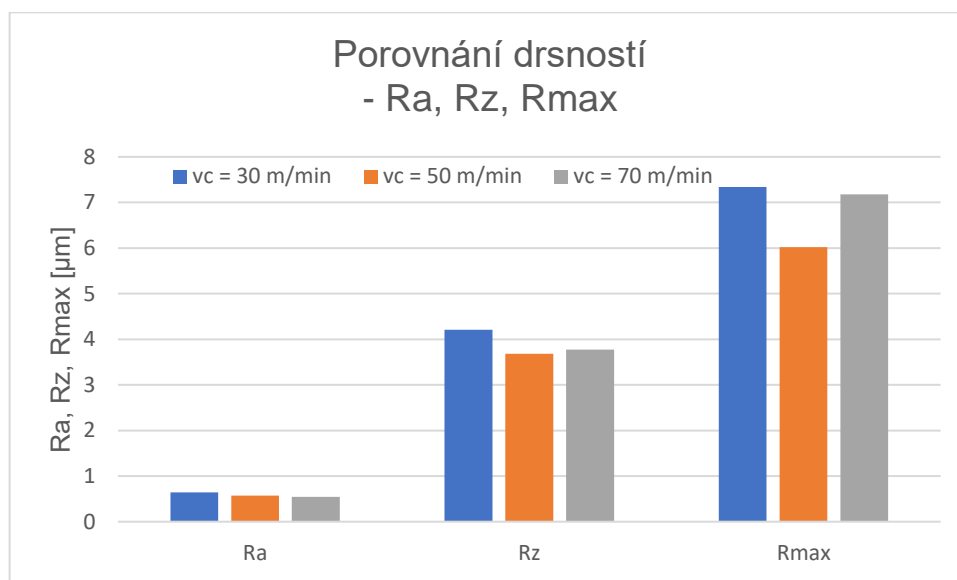
Třetí měření obsahovalo 3 cykly. Řezná rychlost byla nastavena v kombinaci 50-70-30 m/min.

V grafu 6 jsou zaznamenány průběhy průměrných sil v závislosti na řezné rychlosti při frézování na sucho. Jak je z grafu patrné, se vzrůstající řeznou rychlostí došlo k poklesu řezných sil.



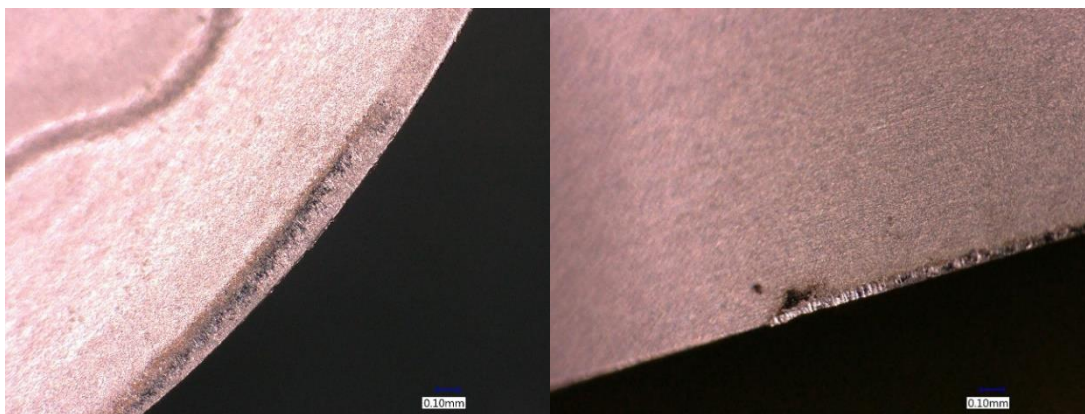
Graf 6 – Síly při frézování na sucho

V grafu 7 jsou zaznamenány průběhy průměrných parametrů drsnosti v závislosti na řezné rychlosti při frézování na sucho. Jak je z grafu patrné, parametr Ra se vzrůstající řeznou rychlostí klesal. Parametry Rz a Rmax nejprve klesly, ale následně došlo ke vzrůstu hodnoty.

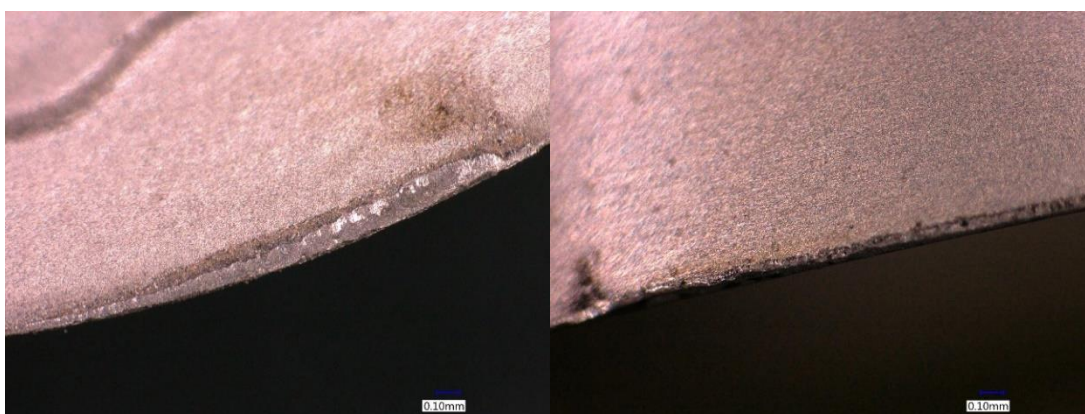


Graf 7 – Parametry drsnosti při frézování na sucho

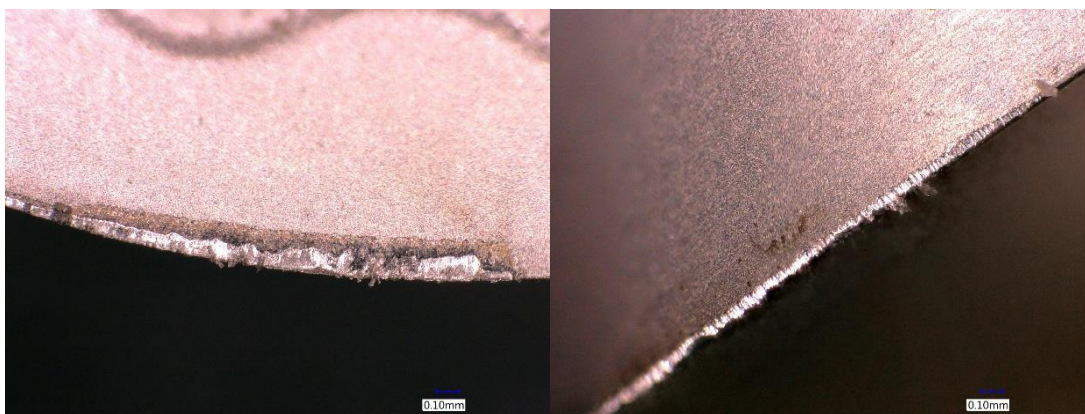
Na obrázcích 24 až 26 jsou zachycena opotřebení na břitových destičkách během jednotlivých rychlostí frézování. Na levé straně je zachyceno opotřebení na čele destičky, na pravé opotřebení na hřbetě destičky. Je patrné, že opotřebení je úměrné zvyšující se rychlosti. Zatímco při rychlosti 30 m/min je na čele poškozen pouze povlak, při rychlosti 70 m/min je již patrné poškození pod úrovní povlaku, a to v délce několika jednotek mikrometru. Stejně tak je patrné i větší opotřebení i tepelné ovlivnění na hřbetu destičky než u rychlosti 30 m/min. Na obrázku 27 je zachycen nárůstek, který během frézování vznikl na břitu destičky.



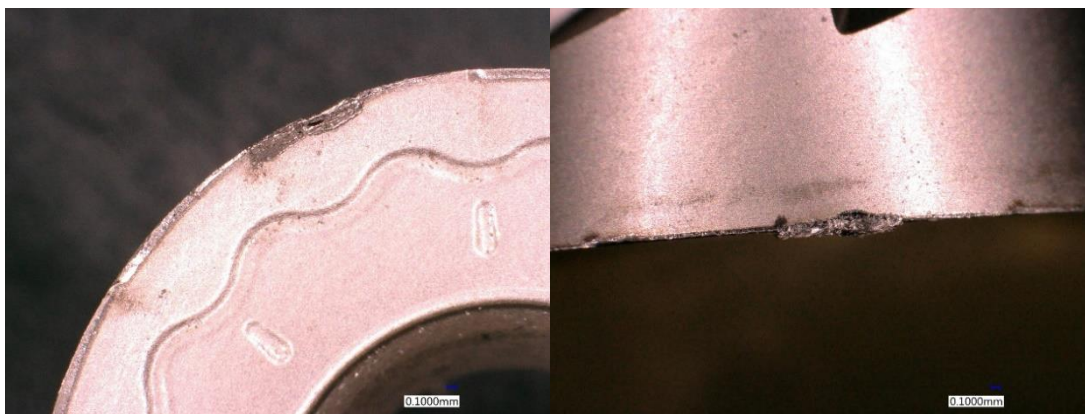
Obrázek 24 – Opotřebení destičky při rychlosti 30 m/min měření na sucho



Obrázek 25 – Opotřebení destičky při rychlosti 50 m/min měření na sucho



Obrázek 26 – Opotřebení destičky při rychlosti 70 m/min měření na sucho



Obrázek 27 – Nárůstek při rychlosti 70 m/min měření na sucho

7.5. Frézování s minimálním množstvím mazání (MQL)

U tohoto typu prostředí bylo provedena jedno měření po 3 cyklech při jedné kombinaci řezných rychlostí.

Řezná rychlost byla nastavena v kombinaci 30-50-70 m/min. Posuv na zub byl nastaven na 0,095 mm/zub a hloubka odebírané vrstva na 0,5 mm. Pro mazání byl použit olej Paramo Cut 3. Spotřeba oleje byla přibližně do 2 g za minutu. Parametry oleje jsou popsány v tabulce 5 níže. Technický list použitého oleje je v příloze práce.

Tabulka 5 – Parametry oleje Paramo Cut 3 [45]

Parametr	Jednotka	Hodnoty	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 ISO 3016
Test koroze (mosaz 80 °C, 3 hod)		Negativní	ČSN 65 6074
Test koroze (ocel 20 °C, 24 hod)		Negativní	ČSN 65 6074

Olej byl při frézování za pomoci vzduchu z kompresoru rozptýlován dvěma tryskami přímo do místa kontaktu destičky s obrobkem. Směr trysek byl opačný vůči pohybu frézy. Nastavení trysek je zobrazeno na obrázku 28. Olej byl za pomoci hadic přiváděn z nádoby s olejem. Nádoba byla umístěna v držáku po pravé straně vřetene. Držák byl umístěn tak, aby nedošlo ke kolizi při frézování nebo při výměně nástrojů. Celá sestava použitá při MQL frézování je zachycena na obrázku 29.

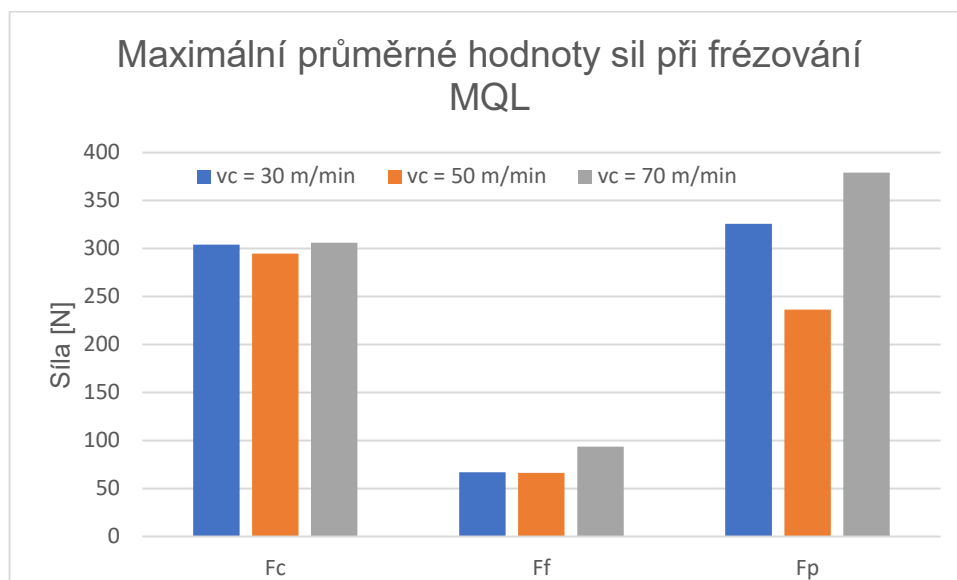


Obrázek 28 – Nastavení trysek při frézování s MQL



Obrázek 29 – Kompletní sestava použitá při frézování s MQL.

V grafu 8 jsou zaznamenány naměřené síly během frézování s MQL. Každá barva v grafu znamená znázornění jedné ze tří řezných rychlostí. Je patrné, že nejnižších hodnot řezné síly F_c a pasivní síly F_p bylo zaznamenáno během rychlosti 50 m/min. Naopak nejvyšších hodnot daných sil bylo zaznamenáno u řezné rychlosti 70 m/min.

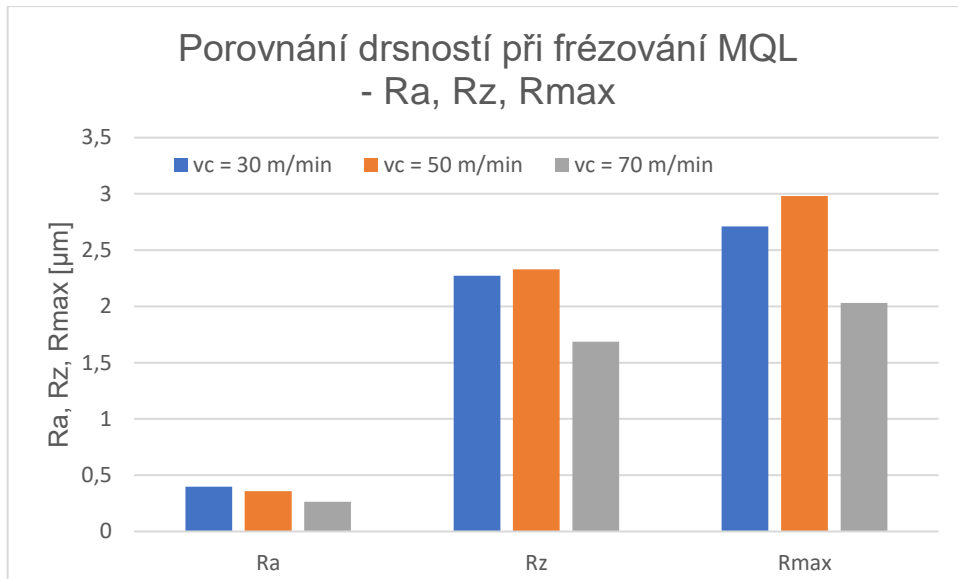


Graf 8 – Naměřené hodnoty sil při jednotlivých řezných rychlostech

V grafu 9 jsou zaznamenány naměřené parametry drsností během frézování s MQL. Stejně jako u předchozího grafu znázorňuje barva v grafu jednu ze tří řezných rychlostí.

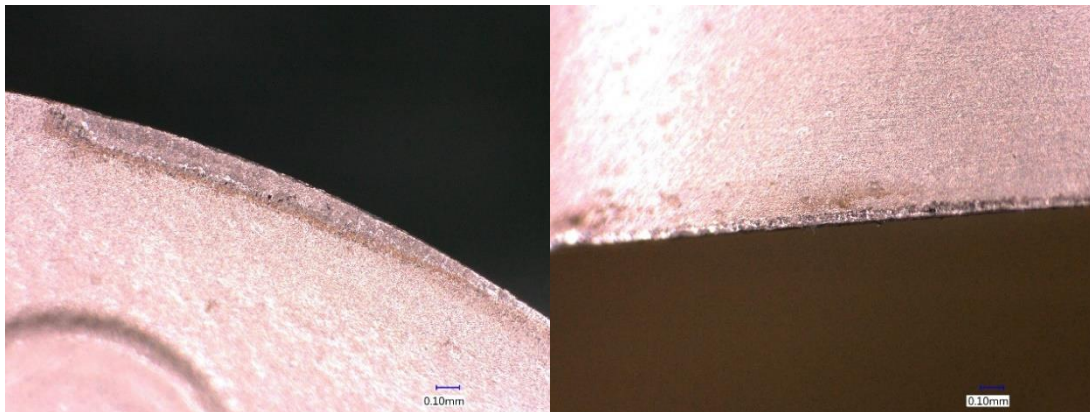
Je patrné, že nejnižších hodnot parametrů drsnosti bylo dosaženo při rychlosti 70 m/min. Této rychlosti odpovídají nejvyšší hodnoty naměřených sil u této metody frézování.

Dále je patrné, že nejnižších hodnot řezné síly F_c a pasivní síly F_p bylo zaznamenáno během rychlosti 50 m/min. Naopak nejvyšších hodnot daných sil bylo zaznamenáno u řezné rychlosti 70 m/min. Hodnota parametru R_a u rychlosti 70 m/min je o 27% nižší než u rychlosti 50 m/min (druhá nejnižší hodnota).

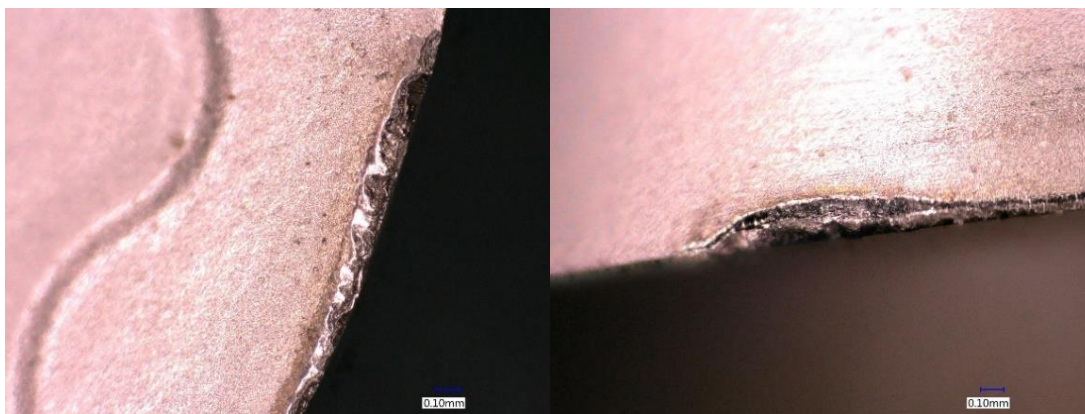


Graf 9 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti při jednotlivých řezných rychlostech

Na obrázcích 30 a 31 jsou zachycena opotřebení během frézování s MQL. Stejně jako u frézování na sucho je vlevo znázorněno opotřebení na čele destičky, vpravo opotřebení na hřbetu destičky. Je zřejmé, že opotřebení je úměrné řezné rychlosti.



Obrázek 30 – Opotřebení destičky při rychlosti 30 m/min měření MQL



Obrázek 31 – Opatření destičky při rychlosti 70 m/min měření MQL

7.6. Frézování s kryogenním chlazením

U tohoto typu prostředí bylo provedeno jedno měření po 3 cyklech při jedné kombinaci řezných rychlostí.

Řezná rychlost byla nastavena v kombinaci 30-50-70 m/min. Posuv na zub byl nastaven na 0,095 mm/zub a hloubka odebírané vrstvy na 0,5 mm. Pro chlazení byl použit oxid uhličitý. V případě rychlosti 30 m/min byla spotřeba oxidu 229 g/min. Dále u rychlosti 50 m/min byla spotřeba 300 g/min a u rychlosti 70 m/min dosáhla spotřeba 301 g/min.

Oxid uhličitý byl při frézování přiváděn z tlakové láhve hadicí do trysky umístěné za frézou. Tryska měla tři otvory, kterými byl oxid přiváděn do místa kontaktu destičky s obrobkem. Směr otvorů, a tudíž i směr proudění oxidu byl opačný vůči pohybu frézy. Tryska je zachycena na obrázku 32. Tlaková láhev s oxidem uhličitým byla umístěna v totožném držáku, který byl použit při metodě MQL. Celá sestava použitá při frézování s kryogenním chlazením je zachycena na obrázku 33.

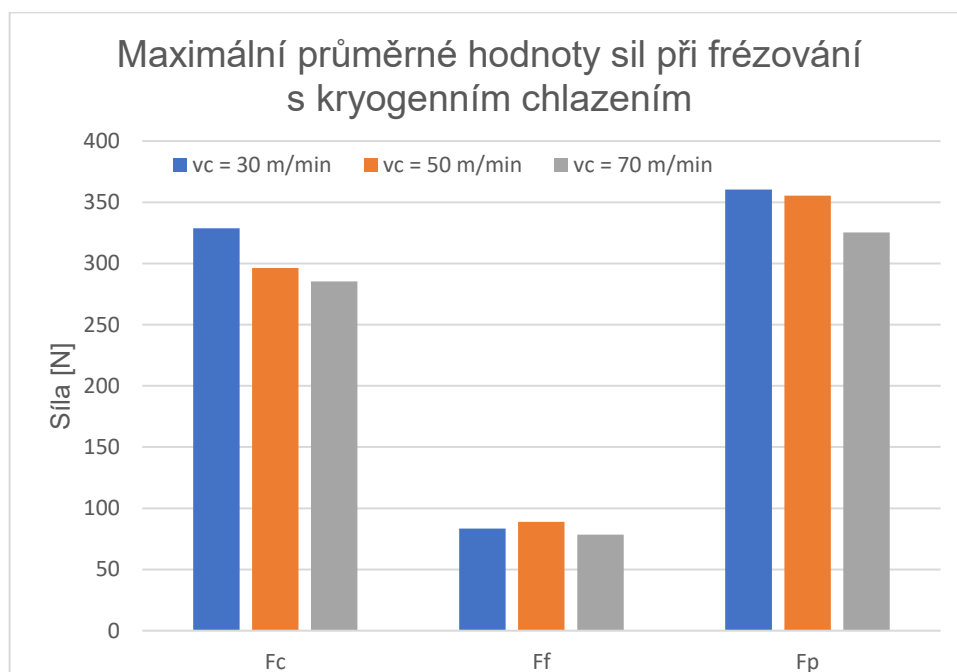


Obrázek 32 – Tryska použitá při frézování s kryogenním chlazením



Obrázek 33 – Kompletní sestava použitá při frézování s kryogenním chlazením

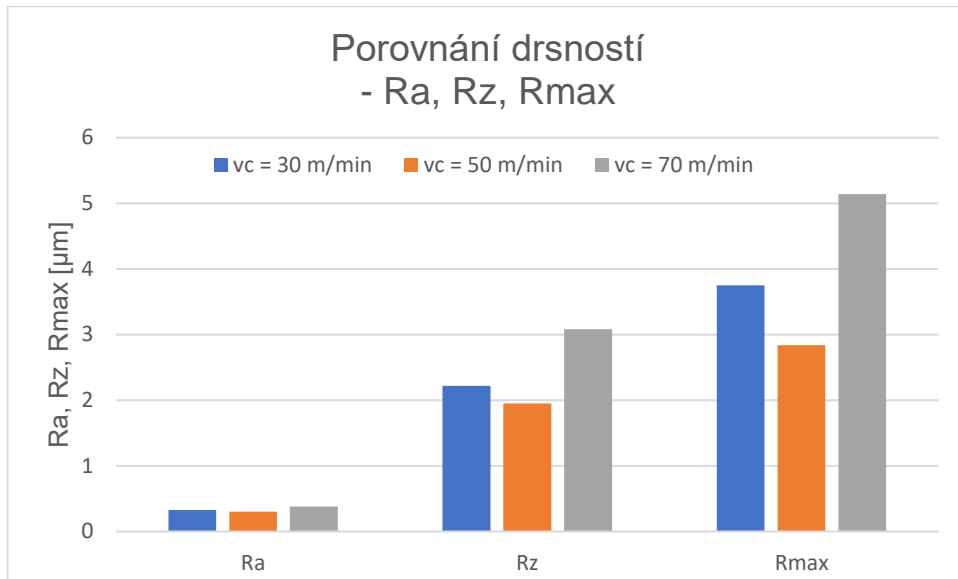
V grafu 10 jsou zaznamenány naměřené síly během frézování s kryogenním chlazením. Každá barva v grafu znamená znázornění jedné ze tří řezných rychlostí. Z grafu vyplývá, že se vzrůstající řeznou rychlostí docházelo ke snižování řezné a pasivní síly.



Graf 10 – Naměřené hodnoty sil při jednotlivých řezných rychlostech

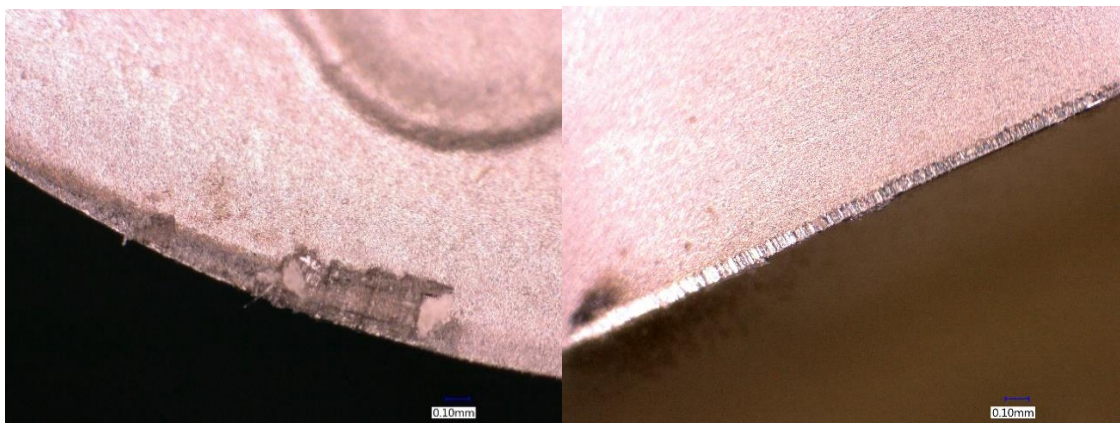
V grafu 11 jsou zaznamenány naměřené parametry drsností během frézování s kryogenním chlazením. Stejně jako u předchozího grafu znázorňuje barva grafu jednu ze tří řezných rychlostí.

Je patrné, že nejnižších hodnot parametrů drsnosti bylo dosaženo při rychlosti 50 m/min. Této rychlosti odpovídají střední hodnoty naměřených sil u této metody frézování. Náhlé zvýšení parametrů drsnosti při řezné rychlosti 70 m/min může být způsobeno přechlazením chladicí soustavy, tj. zmrazením hadic, kterými byl přiváděn CO_2 do místa frézování.

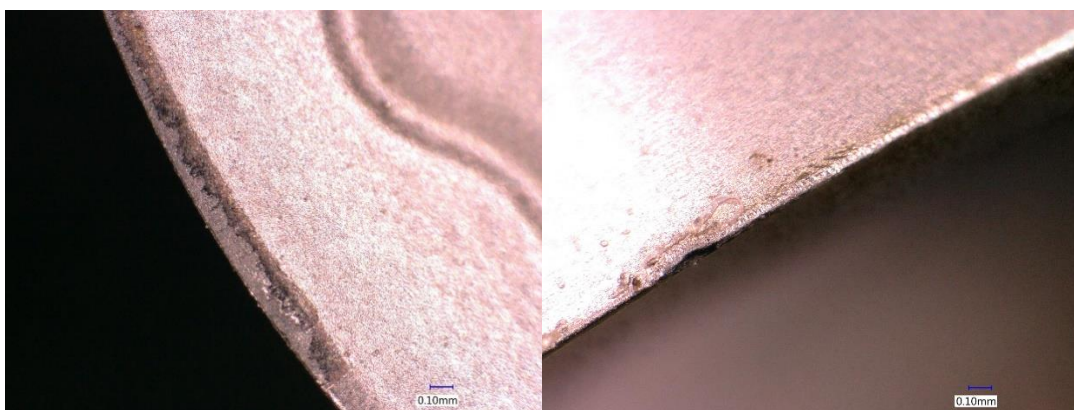


Graf 11 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti při jednotlivých řezných rychlostech

Na obrázcích 34 až 36 jsou zachycena opotřebení během frézování s kryogenním chlazením. Stejně jako u frézování na sucho je vlevo znázorněno opotřebení na čele destičky, vpravo opotřebení na hřbetu destičky. Na rozdíl od předchozích dvou metod frézování jsou na čele destičky patrné šedé zóny. Lze předpokládat, že se jedná o zchlazenou vrstvu odebíraného materiálu.



Obrázek 34 – Opotřebení destičky při rychlosti 30 m/min měření kryogen



Obrázek 35 – Opatření destičky při rychlosti 50 m/min měření kryogen

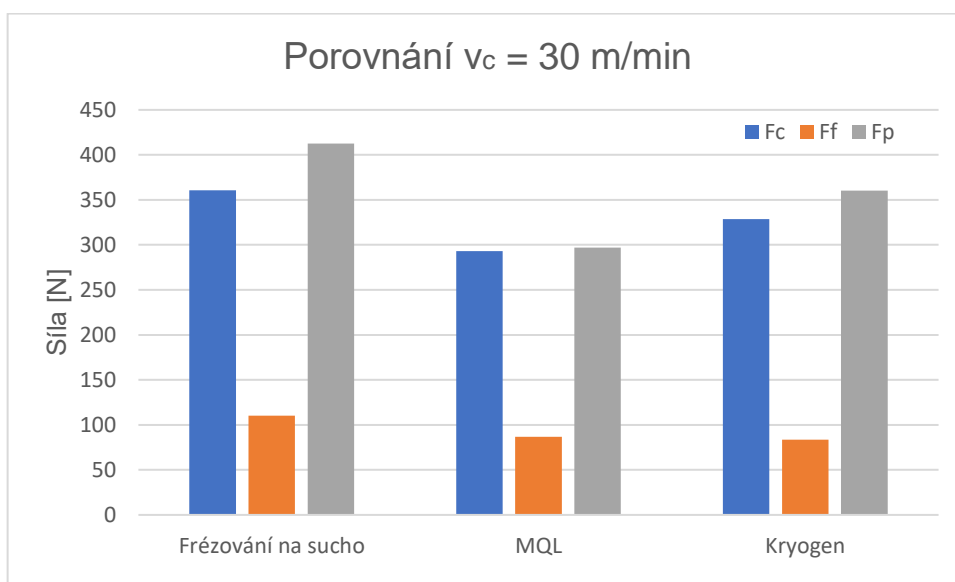


Obrázek 36 – Opatření destičky při rychlosti 70 m/min měření kryogen

7.7. Porovnání suchého frézování s MQL a kryogenním chlazením

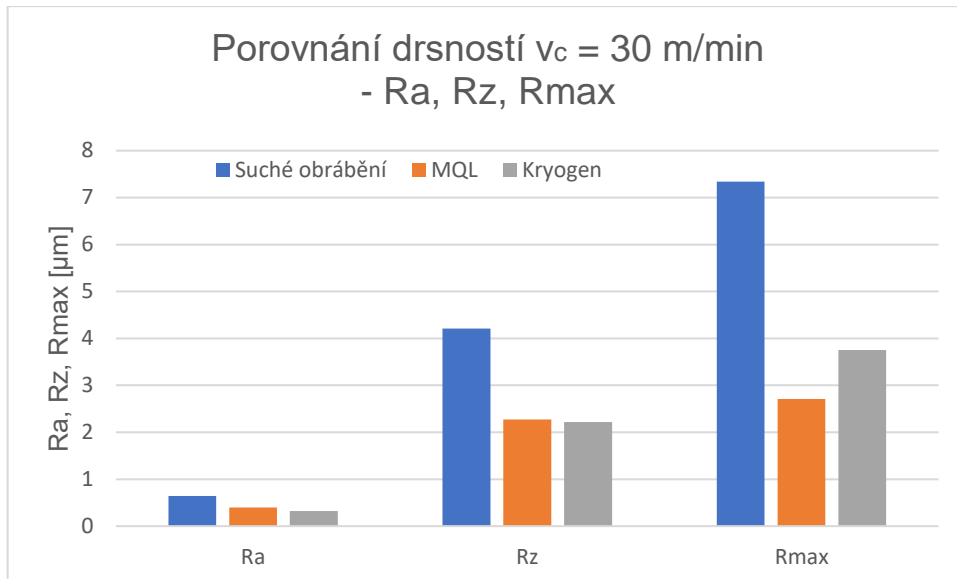
7.7.1. Porovnání $v_c = 30$ m/min

V grafu 12 je porovnání sil získaných během třech různých metod frézování při rychlosti 30 m/min. Každá barva v grafu odpovídá použité metodě frézování. Je evidentní, že nejnižších průměrných hodnot měřených sil u této rychlosti bylo dosaženo během frézování s MQL. Řezná síla F_c byla u této metody o 19 % nižší než u frézování na sucho a o 11 % nižší než u frézování s kryogenním chlazením. Pasivní síla F_p byla u frézování s MQL o 28 % nižší než u frézování na sucho a o 18 % než u frézování s kryogenním chlazením.



Graf 12 – Naměřené hodnoty sil u jednotlivých metod při rychlosti $v_c = 30$ m/min

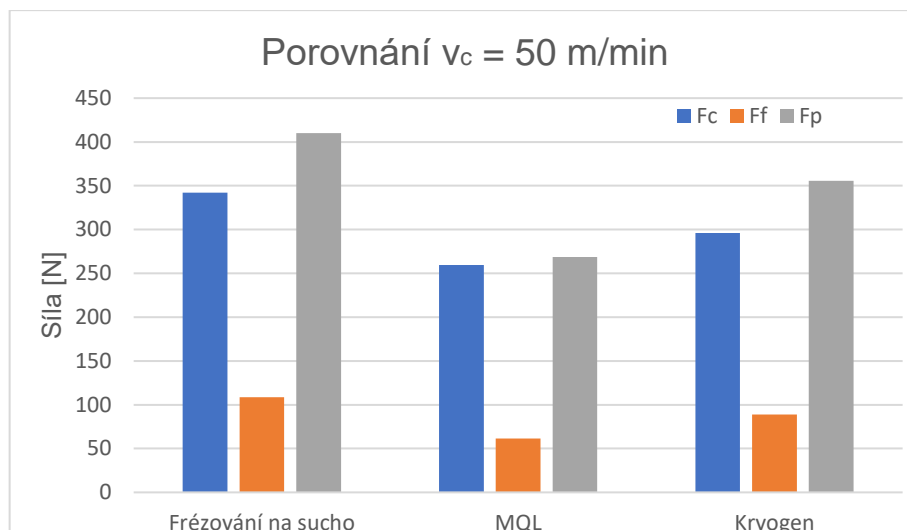
V grafu 13 je porovnání parametrů drsnosti získaných během třech různých metod frézování při rychlosti 30 m/min. Každá barva v grafu odpovídá použité metodě frézování. Z grafu vyplývá, že nejvyšších hodnot měřených parametrů bylo dosaženo během frézování na sucho. Naopak nejnižších hodnot parametrů drsnosti bylo dosaženo během frézování s kryogenním chlazením. Parametry drsnosti byly v případě kryogenního chlazení nižší o skoro 50 % než u suchého frézování. Rozdíl sil však činil maximálně 13 %.



Graf 13 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti u jednotlivých metod při rychlosti $v_c = 30$ m/min

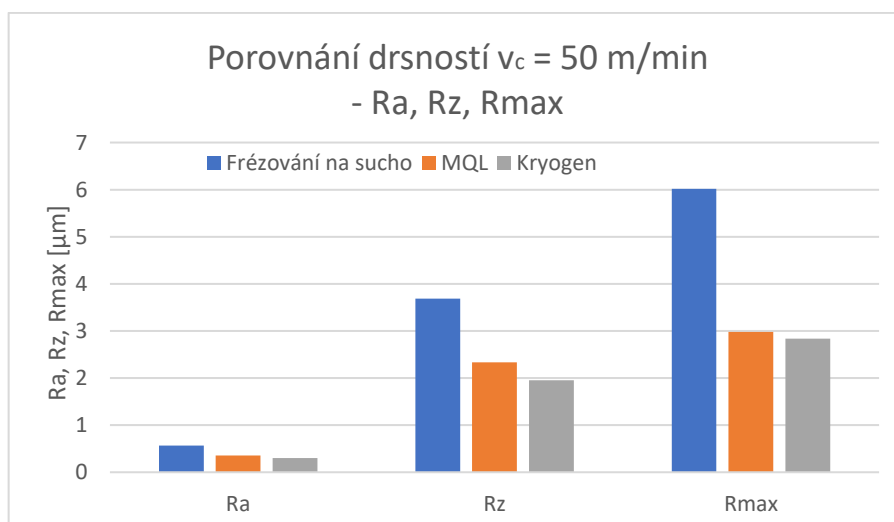
7.7.2. Porovnání $v_c = 50$ m/min

V grafu 14 je porovnání sil získaných během třech různých metod frézování při rychlosti 50 m/min. Každá barva v grafu odpovídá stejně jako v předchozím porovnání použité metodě frézování. Z grafu je patrné, že nejnižších průměrných hodnot měřených sil u této rychlosti bylo dosaženo během frézování s MQL. Řezná síla F_c byla u tohoto frézování o skoro 25 % nižší než u frézování na sucho a o 13 % nižší než u frézování s kryogenním chlazením. Pasivní síla F_p byla u metody MQL o skoro 35 % nižší než u frézování na sucho a o skoro 25 % než u frézování s kryogenním chlazením.



Graf 14 – Naměřené hodnoty sil u jednotlivých metod při rychlosti $v_c = 50$ m/min

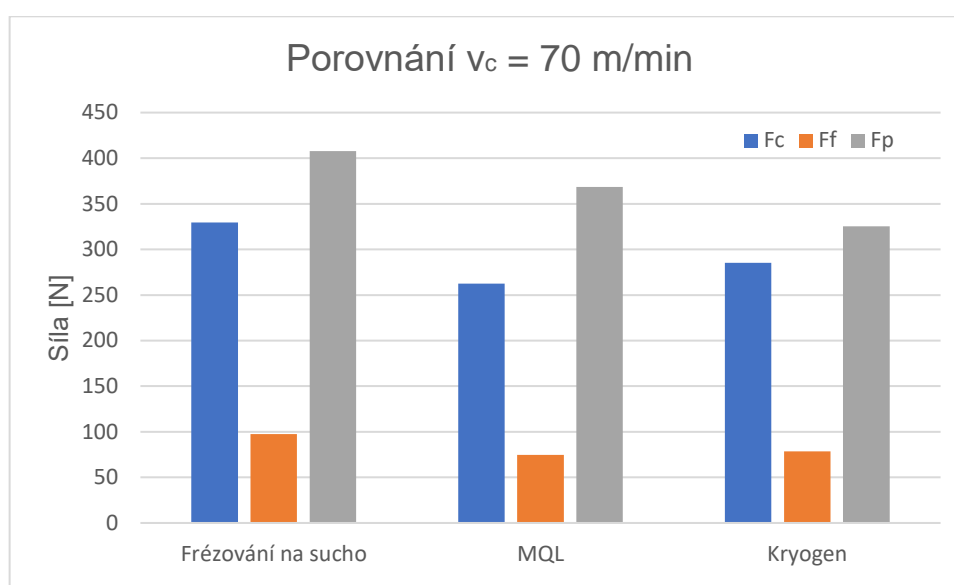
V grafu 15 je porovnání parametrů drsnosti získaných během třech různých metod frézování při rychlosti 50 m/min. Stejně jako u předchozího porovnání odpovídá každá barva v grafu použité metodě frézování. Z grafu vyplývá, že nejvyšších hodnot měřených parametrů bylo opět dosaženo během frézování na sucho. Naopak nejnižších hodnot parametrů drsnosti bylo dosaženo také během frézování s kryogenním chlazením. Parametry drsnosti se v případě kryogenního chlazení pohybovaly o skoro 50 % níže než u suchého frézování. Rozdíl sil však činil 14 %.



Graf 15 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti u jednotlivých metod při rychlosti $v_c = 50$ m/min

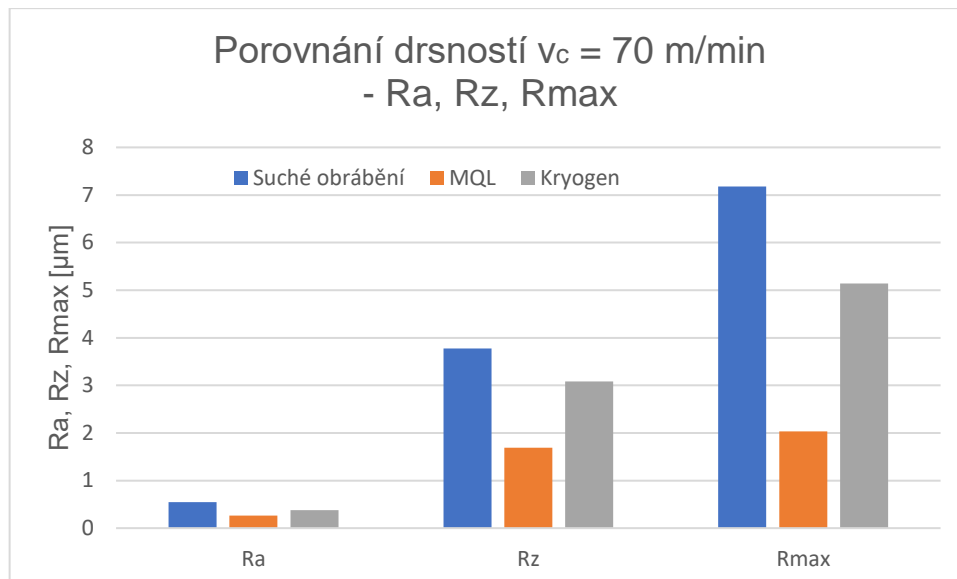
7.7.3. Porovnání $v_c = 70$ m/min

V grafu 16 je porovnání sil získaných během třech různých metod frézování při rychlosti 70 m/min. Každá barva v grafu odpovídá – stejně jako u předchozích porovnání – použité metodě frézování. Je patrné, že nejnižší průměrné hodnoty řezné síly F_c u této rychlosti bylo dosaženo během frézování s MQL. Daná síla byla u této metody o 20 % nižší než u frézování na sucho a o 8 % nižší než u frézování s kryogenním chlazením. Nejnižší průměrné hodnoty pasivní síla F_p bylo dosaženo u frézování s kryogenním chlazením. Daná hodnota byla o 20 % nižší než u frézování na sucho a o 12 % nižší než u frézování s MQL.



Graf 16 – Naměřené hodnoty sil u jednotlivých metod při rychlosti $v_c = 70$ m/min

V grafu 17 je porovnání parametrů drsnosti získaných během třech různých metod frézování při rychlosti 70 m/min. Stejně jako u předchozích porovnání odpovídá každá barva v grafu použité metodě frézování. Z grafu vyplývá, že nejvyšších hodnot měřených parametrů bylo opět dosaženo během frézování na sucho. Naopak nejnižších hodnot parametrů drsnosti bylo dosaženo u frézování s MQL. Parametry drsnosti se v případě frézování s MQL pohybovaly více jak 50 % níže než u suchého frézování. V případě kryogenního chlazení se hodnoty parametrů drsnosti přibližovaly spíše k suchému frézování. Parametr R_a byl u kryogenního chlazení o 30 % vyšší než u frézování s MQL. Parametr R_z byl vyšší o 55 % a parametr R_{max} dokonce o 70 % vyšší.



Graf 17 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti u jednotlivých metod při rychlosti $v_c = 70$ m/min

7.8. Zhodnocení experimentu

V rámci experimentu došlo k porovnání třech různých prostředí – frézování na sucho, frézování s minimálním množstvím mazání (MQL) a frézování s kryogenním chlazením v závislosti na třech různých řezných rychlostech – 30, 50 a 70 m/min.

Během experimentu byly porovnávány výsledné síly vznikající během frézování (řezná síla F_c , pasivní síla F_p a posuvová síla F_f), parametry drsnosti po frézování (Ra, Rz a Rmax), vliv zpevnění předchozího obrobení na velikost řezných sil a opotřebení nástroje.

Z experimentu vyplývá, že při frézování na sucho a při frézování s kryogenním chlazením docházelo se vzrůstající řeznou rychlostí ke snižování řezných sil. Ke stejnému závěru došel při svém experimentu ZhaoPeng Hao s kolektivem (Čína, 2017), jak bylo popsáno v kapitole „Řezné síly“. Zvýšená hodnota sil u frézování s MQL při rychlosti 70 m/min mohla být způsobena nedostatečným mazáním během obráběcího procesu. Výsledná drsnost povrchu po frézování se však se vzrůstající řeznou rychlostí příliš nemění. Nelze tak potvrdit závěr experimentu Xianhua Tian s kolektivem (Čína, 2013) popsaného v kapitole „Drsnost a profil“, že se zvyšující se řeznou rychlostí se zlepšují parametry drsnosti. To může být

způsobeno rozdílnou velikostí řezných hodnot tohoto experimentu (30, 50, 70 m/min) a hodnotami Xianhua Tin (600–3000 m/min). Z experimentu dále vyplývá, že zpevnění po předchozím frézování nemělo vliv na velikost řezných sil vznikajících při novém frézování dané plochy. Ze zaznamenaných fotografií je patrné, že opotřebenění nástroje se zvyšuje s rostoucí řeznou rychlostí. Dále je zřejmé, že dochází k opotřebenění na hřbetě i na čele břitové destičky.

Z porovnání použitých prostředí je zjevné, že nejnižších hodnot naměřených sil bylo dosaženo během frézování s MQL, a to kromě rychlosti 70 m/min. Při této rychlosti byly nižší hodnoty pasivní síly dosaženy u frézování s kryogenním chlazením. V případě MQL byly řezné síly F_c (30 m/min – 293 N; 50 m/min – 260 N; 70 m/min – 263 N) o 19–24 % nižší, než tomu bylo u frézování na sucho a pasivní síly F_p (30 m/min – 297 N; 50 m/min – 269 N; 70 m/min – 368 N) byly nižší o 10–34 %. Výsledné řezné síly F_c byly v případě frézování s kryogenním chlazením o 8–12 % vyšší, než u frézování s MQL a pasivní síly F_p byly vyšší o 18–24 %. Pouze při řezné rychlosti 70 m/min byla pasivní síla u frézování s MQL o 13 % vyšší než při frézování s kryogenním chlazením. Daná odchylka mohla být způsobena nedostatečným mazáním při metodě MQL.

Při frézování rychlostmi 30 a 50 m/min bylo dosaženo nejlepších kombinací hodnot parametrů drsnosti u frézování s kryogenním chlazením. Výsledný parametr R_a (30 m/min – 0,325 μm ; 50 m/min – 0,301 μm) byl o 14–15 % nižší, než u frézování s MQL a o 47–50 % nižší než u frézování na sucho.

Při frézování rychlostí 70 m/min bylo dosaženo nejlepších hodnot parametrů drsnosti při frézování s MQL. Tyto hodnoty drsnosti byly nejlepší ze všech provedených pokusů. Výsledné parametry drsnosti (R_a 0,264 μm ; R_z 1,688 μm ; R_{max} 2,032 μm) byly oproti frézování s kryogenním chlazením o 31–51 % nižší a oproti frézování na sucho nižší o 51–72 %. Vyšších hodnot drsnosti u kryogenního chlazení při řezné rychlosti 70 m/min bylo dosaženo pravděpodobně kvůli zamrznání hadic, které do místa řezu přiváděly CO_2 .

Nejhorších výsledků bylo dosaženo při frézování na sucho. Průměrná řezná síla se pohybovala o 19–25 % výš a průměrná pasivní síla se pohybovala o 20–35 % výš, než tomu bylo u frézování s MQL. Výsledná drsnost byla minimálně o skoro 50 % vyšší než u metody frézování s MQL.

Obrábění metodou MQL nebo s kryogenním chlazením má své výhody v dosažení lepších výsledků parametrů drsnosti nebo nižších sil při obrábění. Je však nutné si uvědomit, že kromě těchto výhod je třeba počítat i s ekonomickou náročností daných metod – pořizovací cena tekutin pro dané rezné prostředí, pořizovací cena aparatury pro přívod tekutiny do místa řezu, která je potřeba pro provozování dané metody v průmyslovém měřítku a také pořizovací cena případného odsávacího zařízení. V neposlední řadě je třeba započítat i ekologický dopad metody MQL a kryogenního chlazení, jakožto likvidaci odpadu po použití těchto rezných prostředí, eventuálně i možné ohrožení zdraví obsluhy strojů při obráběcím procesu.

8. Závěr

Tato diplomová práce se zabývala teorií a problematikou obrobitelnosti niklových superslitin a parametry, které jejich obrobitelnost ovlivňují.

Experimentálně proběhlo frézování hranolů z Inconelu 713LC. Při experimentu sledovány změny těchto parametrů – řezná rychlost, řezné prostředí, síly při frézování (F_c , F_p , F_f), drsnost povrchu po frézování (R_a , R_z a R_{max}), opotřebení nástroje a vliv zpevnění předchozího frézování na velikost sil.

Při experimentu byla porovnána tři řezná prostředí – frézování na sucho, frézování s minimálním množstvím mazání (MQL) a frézování s kryogenním chlazením v závislosti na třech různých řezných rychlostech – 30, 50 a 70 m/min a jejich kombinacích. Frézování proběhlo na pětiosém frézovacím centru Okuma MU – 400 V s využitím karbidových vyměnitelných destiček s CVD povlakem.

Z experimentu je patrné, že nejvyšších hodnot sil a drsností bylo dosaženo při frézování na sucho. Naopak nejnižších hodnot sil bylo dosaženo při frézování s minimálním množstvím mazání (MQL). Nejnižších hodnot drsnosti bylo dosaženo při frézování s MQL, avšak za cenu vyšších sil oproti ostatním měřením při této metodě. U zbývajících měření bylo dosaženo vyšších hodnot drsností, než tomu bylo při frézování s kryogenním chlazením.

Dále je z experimentu patrné, že zpevnění po předchozím frézování nemělo vliv na velikost řezných sil vznikajících při frézování nové plochy. Opotřebení nástroje se zvyšuje s rostoucí řeznou rychlostí, dochází k opotřebení jak na hřbetě, tak na čele vyměnitelné břitové destičky.

Experiment prokázal, že při frézování s minimálním množstvím mazání (MQL) a frézování s kryogenním chlazením je dosahováno nižších hodnot sil a také lepších hodnot parametrů drsnosti oproti frézování na sucho. Oproti frézování na sucho je třeba počítat i s ekonomickou náročností, možnými ekologickými a zdravotními dopady.

V případě dalšího zkoumání dané problematiky by bylo vhodné provést více měření v rámci jednotlivých řezných rychlostí a řezných prostředí. Bylo by tak možné přesněji určit možné odchylky od popsané teorie. Dále by bylo vhodné provést

měření opotřebení břitových destiček a porovnat dané hodnoty v rámci jednotlivých řezných prostředí.

Stanovené cíle diplomové práce byly splněny. V teoretické části byla probána problematika obrobitelnosti niklových superslitin a parametrů, které obrobitelnost ovlivňují. Některé z popsaných parametrů obrobitelnosti byly experimentálně ověřeny při frézování Inconelu 713LC.

9. Seznam literatury

- [1] DONACHIE, Stephen, DONACHIE, Matthew, ed. Nickel and Nickel Alloys. DAVIS, Joseph R. *ASM Specialty Handbook: Heat-Resistant Materials*. ASM International, 1997, s. 609-615. ISBN 978-0-87170-596-9.
- [2] SATISH, G. Jangali, V.N. GAITONDE a Vinayak N. KULKARNI. Traditional and non-traditional machining of nickel-based superalloys: A brief review. *Materials Today: Proceedings*. 2021, 44(1), 1448-1454. ISSN 2214-7853.
- [3] DONACHIE, Matthew a Stephen DONACHIE. Superalloys. DAVIS, Joseph R., ed. *ASM Specialty Handbook: Heat-Resistant Materials*. ASM International, 1997, s. 394-403. ISBN 978-0-87170-596-9.A
- [4] DAVIS, Joseph R., ed. *ASM Specialty Handbook: Nickel, Cobalt, and Their Alloys*. USA: ASM International, 2000. ISBN 0-87170-685-7.
- [5] Vysokopevné a vysokolegované oceli, superslitiny. *Ústav materiálového inženýrství Fakulta strojní* [online]. Praha, 2014 [cit. 2021-07-05]. Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/10/01_pm_vyskopevne_a_vysokolegovane_oceli_a_slitiny_ni_a_co.pdf
- [6] HAKL, Jan a Tomáš VLASÁK. Vývoj žárupevné Ni slitiny pro lopatky plynových turbin se zvýšenými požadavky na životnost a provozní spolehlivost. *Výzkumná zpráva č. 0310011/a*. Praha, 2000
- [7] Yield strength of the wrought alloy compositions. *Cracks in superalloys* [online]. Švédsko, 2018, 2018 [cit. 2021-07-05]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/profile/Jonas-Saarimaeki/publication/322574665/figure/fig2/AS:584125249515520@1516277720369/Yield-strength-of-the-wrought-alloy-compositions-from-Table-22-at-different.png>
- [8] FAN, Wei, Wei JI a Lihui WANG. A review on cutting tool technology in machining of Ni-based superalloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020, 110. ISSN 2863–2879. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1007/s00170-020-06052-9](https://doi.org/10.1007/s00170-020-06052-9)
- [9] TRIVEDI, Dipeshkumar Bansilal. Machining of difficult-to-cut Super alloys: A Review. *International Journal of Advance Engineering and Research*

- Development*. 2017, 4(10), 120-125. ISSN 2348-4470. Dostupné z: doi:10.21090/ijaerd.52509
- [10] KENDA, Jani, Franci PUSAVEC a Janez KOPAC. Analysis of Residual Stresses in Sustainable Cryogenic Machining of Nickel Based Alloy—Inconel 718. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. Slovinsko, 2011, 133(4), 041009 (7 stran). Dostupné z: doi:10.1115/1.4004610
- [11] KAYA, Eren a Birol AKYÜZ. Effects of cutting parameters on machinability characteristics of Ni-based superalloys: a review. *Open Engineering*. 2020, 7(1), 330-342. ISSN 2391-5439. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1515/eng-2017-0037
- [12] ZHAOPENG, Hao a Fan YIHANG. New observations on wear mechanism of self-reinforced SiAlON ceramic tool in milling of Inconel 718. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2017, 17(3), 467-474. ISSN 1644-9665. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.acme.2016.12.011
- [13] WASEEM, Akhtar, Sun JIANFEI a Sun PENGFEI. Tool wear mechanisms in the machining of Nickel based super-alloys: A review. *Frontiers of Mechanical Engineering*. 2014, 9, 106-119. ISSN 2095-0241. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1007/s11465-014-0301-2
- [14] BUSHLYA, Volodymyr. Effect of Cutting Conditions on Machinability of Superalloy Inconel 718 During High Speed Turning with Coated and Uncoated PCBN Tools. *Procedia CIRP*. 2012, 3, 370-375. ISSN 2212-8271. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.07.064
- [15] Princip elektrochemického obrábění. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2021, 9.10.2007 [cit. 2021-07-07]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-2-2
- [16] BHATTACHARYYA, Bijoy a Biswanath DOLOI. Modern Machining Technology: Advanced, Hybrid, Micro Machining and Super Finishing Technology. Academic Press, 2020. ISBN 9780128128947.
- [17] BERGS, Thomas a Bob ROMMES. ECM roughing of profiled grooves in nickel-based alloys for turbomachinery applications. *Procedia Manufacturing*. 2019, 40, 22-26. ISSN 2351-9789. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.005
- [18] BAINDUR, Tejas Ajay a Mayur Vitthal PATIL. WEDM machining on Aerospace Materials for improving Material Properties. *Materials Today*:

- Proceedings*. 2017, 4(8), 9107-9116. ISSN 2214-7853. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.266>
- [19] SHARMA, Neeraj a Khanna RAJESH. WEDM process variables investigation for HSLA by response surface methodology and genetic algorithm. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. Turecko, 2015, 18(2), 171-177. ISSN 2215-0986.
- [20] ELEKTROEROZIVNÍ DRÁTOVÉ ŘEZÁNÍ. KOMAS [online]. Opava, 2021 [cit. 2021-07-07]. Dostupné z: <https://www.komas.cz/cs/elektroerozivni-dratove-rezani/a-98/>
- [21] VENKATESAN, K. Optimization of Surface Roughness and Power Consumption in laser-assisted machining of Inconel 718 by Taguchi based Response Surface Methodology. *Materials Today: Proceedings*. 2018, 5(5/2), 11326-11335. ISSN 2214-7853. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.099>
- [22] KHAN, Adam a Kapil GUPTA. Experimental evaluation of surface quality characteristics in laser machining of nickel-based superalloy. *Optik*. 2019, (196). ISSN 0030-4026. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163199>
- [23] KULKARNI, Vinayak N. a V.N. GAITONDE. A review on conventional and non-conventional machining of titanium and nickel based alloys. *AIP Conference Proceedings*. 2019, (2200). Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1063/1.5141261>
- [24] UTHAYAKUMAR, M. a Adam KHAN. Machinability of Nickel Based Superalloy by Abrasive Water Jet Machining. *Materials and Manufacturing Processes*. 2016, 31(13), 1733-1739. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1103859>
- [25] JEYKRISHNAN, J. a B. Vijaya RAMNATH. Optimization of Process Parameters in Abrasive Water Jet Machining/Cutting (AWJM) of Nickel Alloy using Traditional Analysis to Minimize Kerf Taper Angle. *Materials Today: Proceedings*. 2019, 16(2), 392-397. ISSN 2214-7853.
- [26] Princip řezání vodním paprskem. *MM vodní paprsek* [online]. Morava: Morkus Morava, 2016 [cit. 2021-07-10]. Dostupné z: <http://www.rezani-cnc.cz/princip-rezani-vodnim-paprskem.html>

- [27] THAKUR, A. a S. GANGOPADHYAY. State-of-the-art in surface integrity in machining of nickel-based super alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Velká Británie, 2016, (100), 25-54. ISSN 0890-6955. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.10.001>
- [28] DARWISH, S.M. The impact of the tool material and the cutting parameters on surface roughness of supermet 718 nickel superalloy. *Journal of Materials Processing Technology*. 2000, 97(1-3), 10-18. ISSN 0924-0136. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00365-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00365-9)
- [29] TIAN, Xianhua a Jun ZHAO. Effect of cutting speed on cutting forces and wear mechanisms in high-speed face milling of Inconel 718 with Sialon ceramic tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Čína, 2013, (69), 2669–2678. ISSN 1433-3015. Dostupné z: doi:[10.1007/s00170-013-5206-4](https://doi.org/10.1007/s00170-013-5206-4)
- [30] TAN, M.T. a Y.Z. ZHANG. Groove Wear of Tools in NC Turning of Pure Nickel. *CIRP Annals*. 1986, 35(1), 71-74. ISSN 0007-8506. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61841-1](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61841-1)
- [31] HEAT DISTRIBUTION WHEN NICKEL ALLOY GRINDING. *Tehnički vjesnik*. 2012, 19(4), 947-951. ISSN 1330-3651. Dostupné z: doi:<https://core.ac.uk/download/pdf/10672943.pdf>
- [32] MÁDL, Jan a František HOLEŠOVSKÝ. Vliv dokončovací technologie na chování povrchu strojních součástí při zatížení. Ústí nad Labem, UJEP FVTM, 2012. ISBN 978-80-7414-561-2.
- [33] ARRAZOLA, P.J. a A. KORTABARRIA. On the machining induced residual stresses in IN718 nickel-based alloy: Experiments and predictions with finite element simulation. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2014, (41), 87-103. ISSN 1569-190X. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.simpat.2013.11.009>
- [34] ÖZEL, T. a D. ULUTAN. Prediction of machining induced residual stresses in turning of titanium and nickel based alloys with experiments and finite element simulations. *CIRP Annals*. 2012, 61(1), 547-550. ISSN 0007-8506. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.100>
- [35] PAWADE, R.S. a Suhas S. JOSHI. An investigation of cutting forces and surface damage in high-speed turning of Inconel 718. *Journal of Materials*

- Processing Technology*. 2007, (192-193), 139-146. ISSN 0924-0136. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.04.049>
- [36] HARIHARAN, Avinash. *Precipitation and crack formation behaviour of Ni-based-superalloys produced by Laser Additive Manufacturing*. Německo. Disertační práce. Max-Planck-Institut. Vedoucí práce Dr. Eric Jäggle.
- [37] EZUGWU, E.O. a S.H. TANG. Surface abuse when machining cast iron (G-17) and nickel-base superalloy (Inconel 718) with ceramic tools. *Journal of Materials Processing Technology*. 1995, 55(2), 63-69. ISSN 0924-0136. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/0924-0136\(95\)01786-0](https://doi.org/10.1016/0924-0136(95)01786-0)
- [38] BAILEY, John A. Surface damage during machining of annealed 18% nickel maraging steel Part 2 — Lubricated conditions. *Wear*. 1977, 42(2), 297-303. ISSN 0043-1648. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/0043-1648\(77\)90059-X](https://doi.org/10.1016/0043-1648(77)90059-X)
- [39] DORAZIL, E., *Nauka o materiálu-1.část, číslo publikace 411-33276, 05-048-73, SNTL Praha, únor 1973*
- [40] Okuma MU-400V II. *Misan* [online]. 2021 [cit. 2021-07-08]. Dostupné z: <https://www.misan.cz/okuma/katalog-detail/mu-400v-ii-okuma-mu-400v-ii/?viewpart=2>
- [41] Ceratizit [online]. Cutting tools main catalogue. [cit. 2021-07-10]. Dostupné z: http://www.tectronmetalduro.com.br/pdf/GD_KT_PRO-0607-0714_SUS_ABS_V1.pdf
- [42] Kistler [online]. Kistler – 3 – Component Dynamometer. [cit. 2021-07-10]. Dostupné z: http://www.helmar.com.pl/helmar/plik/9265b_nn3842.pdf
- [43] MARSURF PS 10 PŘENOSNÝ DRSNOMĚR. *Mahr* [online]. Německo, 2021 [cit. 2021-07-10]. Dostupné z: <https://www.mahr.de/cs/Produkty-a-slu%C5%BEby/V%C3%BDrobn%C3%AD-m%C4%9B%C5%99ic%C3%AD-technika/Produkty/MarSurf---Mobiln%C3%AD-za%C5%99%C3%ADzen%C3%AD-na-m%C4%9B%C5%99en%C3%AD-drsnosti/MarSurf-PS-10---P%C5%99enosn%C3%BD-drsnom%C4%9Br/>
- [44] PAGÁČ, Marek. Digitální mikroskop VHX-6000 pomáhá hodnotit kvalitu hliníkových odlitků. *Konstrukter* [online]. 31.1.2018 [cit. 2021-07-10]. Dostupné z: [Digitální mikroskop VHX-6000 pomáhá hodnotit kvalitu hliníkových odlitků – Konstrukter.cz](https://www.konstrukter.cz/digitalni-mikroskop-vhx-6000-pomaha-hodnotit-kvalitu-hlinikovykh-odlitku/)

[45] Technické informace Parmo Cut 3. In: *Parmo Mogul* [online]. 2014 [cit. 2021-7-10]. Dostupné z: https://eshop.parmo.cz/data/VyrobkovaDokumentace/ti_paramo_cut3_z3.pdf

10. Seznam tabulek

Tabulka 1	Rozmezí množství legujících prvků niklových superslitin [6].....	12
Tabulka 2	Rozmezí legujících prvků v Inconelu 713LC [39].....	40
Tabulka 3	Technické parametry frézovacího centra Okuma [40]	41
Tabulka 4	Technické parametry drsnoměru [43].....	44
Tabulka 5	Parametry oleje Paramo Cut 3 [45].....	52

11. Seznam grafů

Graf 1	Pevnost při tečení pro 1000 hodin [5]	12
Graf 2	Změna smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ v závislosti na měnící se teplotě [7]	14
Graf 3	Závislost řezné síly na řezné rychlosti [11]	20
Graf 4	Porovnání řezných sil pro $v_c = 350$ m/min; $f = 0,15$ mm/ot [11]	21
Graf 5	Závislost hloubky odebírané vrstvy a_p na povrchové teplotě θ_s [31]	34
Graf 6	Síly při frézování na sucho	49
Graf 7	Parametry drsnosti při frézování na sucho	50
Graf 8	Naměřené hodnoty sil při jednotlivých řezných rychlostech	54
Graf 9	Naměřené hodnoty parametrů drsnosti při jednotlivých řezných rychlostech	55
Graf 10	Naměřené hodnoty sil při jednotlivých řezných rychlostech	58
Graf 11	Naměřené hodnoty parametrů drsnosti při jednotlivých řezných rychlostech	59
Graf 12	Naměřené hodnoty sil u jednotlivých metod při rychlosti $v_c = 30$ m/min.	61
Graf 13	Naměřené hodnoty parametrů drsnosti u jednotlivých metod při rychlosti $v_c = 30$ m/min.	62
Graf 14	Naměřené hodnoty sil u jednotlivých metod při rychlosti $v_c = 50$ m/min.	63
Graf 15	Naměřené hodnoty parametrů drsnosti u jednotlivých metod při rychlosti $v_c = 50$ m/min.	63
Graf 16	Naměřené hodnoty sil u jednotlivých metod při rychlosti $v_c = 70$ m/min.	64
Graf 17	Graf 17 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti u jednotlivých metod při rychlosti $v_c = 70$ m/min.	65

12. Seznam obrázků

Obrázek 1	Měření napětí v axiálním a tangenciálním směru [10]	19
Obrázek 2	Porovnání životnosti nástrojů pro všechny řezné podmínky experimentu [14]	24
Obrázek 3	Princip elektrochemického obrábění [15]	25
Obrázek 4	Princip WEDM [20]	28
Obrázek 5	Princip obrábění abrazivním vodním paprskem [26]	30
Obrázek 6	Porovnání výsledných drsností povrchu [29]	32
Obrázek 7	Zbytkové napětí [34]	36
Obrázek 8	Defekty obrobené plochy [35]	38
Obrázek 9	Zkušební kvádr z Inconelu 713LC	39
Obrázek 10	Frézovací centrum Okuma	40
Obrázek 11	Frézovací hlava s jednou vyměnitelnou břitovou destičkou	42
Obrázek 12	Použitá frézovací destička Ceratizit	42
Obrázek 13	Dynamometr Kistler 9265B [42]	43
Obrázek 14	Použitý zesilovač a převodník Kistler	44
Obrázek 15	Drsnoměr Mahr [43]	44
Obrázek 16	Keyence VHX – 6000 [44]	45
Obrázek 17	Souřadný systém dynamometru	45
Obrázek 18	Zaznamenané síly během jednoho cyklu	46
Obrázek 19	Průběh síly po dráze břitové destičky	46

Obrázek 20	Vhodná oblast pro získání průměrné síly	47
Obrázek 21	Určení poloviny záběru při frézování	47
Obrázek 22	Vybraná oblast pro získání průměrných hodnot	48
Obrázek 23	Získání průměrných hodnot sil	48
Obrázek 24	Opotřebení destičky při rychlosti 30 m/min měření na sucho	51
Obrázek 25	Opotřebení destičky při rychlosti 50 m/min měření na sucho	51
Obrázek 26	Opotřebení destičky při rychlosti 70 m/min měření na sucho	51
Obrázek 27	Nárůstek při rychlosti 70 m/min měření na sucho	52
Obrázek 28	Nastavení trysek při frézování s MQL	53
Obrázek 29	Kompletní sestava použitá při frézování s MQL.....	53
Obrázek 30	Opotřebení destičky při rychlosti 30 m/min měření MQL	55
Obrázek 31	Opotřebení destičky při rychlosti 70 m/min měření MQL	56
Obrázek 32	Tryska použitá při frézování s kryogenním chlazením	57
Obrázek 33	Kompletní sestava použitá při frézování s kryogenním chlazením	57
Obrázek 34	Opotřebení destičky při rychlosti 30 m/min měření kryogen	59
Obrázek 35	Opotřebení destičky při rychlosti 50 m/min měření kryogen	60
Obrázek 36	Opotřebení destičky při rychlosti 70 m/min měření kryogen	60

13. Přílohy

1. Technický list Paramo Cut 3 [45]
2. Protokol parametrů drsnosti