

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N0715A270011 – Obrábění, aditivní
technologie a zabezpečování kvality

Studijní specializace: Bez specializace

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Zvýšení kvality broušeného povrchu z materiálu Inconel 718

Autor: Bc. Šimon ŘEZNÍČEK

Vedoucí práce: doc. Ing. Miroslav ZETEK, Ph.D.

Akademický rok 2020/2021

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Šimon ŘEZNÍČEK**
Osobní číslo: **S19N0107P**
Studijní program: **N0715A270011 Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality**
Studijní obor: **Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality**
Téma práce: **Zvýšení kvality broušeného povrchu z materiálu Inconel 718**
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

Zásady pro vypracování

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

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

Seznam doporučené literatury:

- MARINESCU, Ioan D. et al. Handbook of machining with grinding wheels. Boca Raton: CRC Press, ©2007. 596 s. Manufacturing engineering and materials processing; 72. ISBN 978-1-57444-671-5.
- MARINESCU, Ioan D., ed. et al. Tribology of abrasive machining processes. 2nd ed. [Waltham]: William Andrew, 2013. xiv, 586 s. ISBN 978-1-4377-3467-6.
- MIKOVEC, Miroslav. Obrábění materiálů s velkou pevností a tvrdostí. Praha: SNTL, 1982.
- ROWE, W. B. Principles of modern grinding technology. Norwich: William Andrew, 2014. ISBN 978-0-323-24271-4.
- STANĚK, Jiří a Jiří NĚMEJC. Metodika zpracování a úprava diplomových (bakalářských) prací. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. ISBN 80-7043-363-9.

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

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

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2021**

L.S.

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

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

V Plzni dne 15. října 2020

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Miroslavu Zetkovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při realizaci diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Tomášovi Bakšovi za skvělé poradenství a komunikaci během tvorby diplomové práce a stejně tak patří velké díky obsluze stroje Pavlovi Adámkovi za jeho výpomoc při experimentech.

V neposlední řadě bych rád poděkoval mé celé rodině, skvělým spolužákům a mé přítelkyni Bc. Ivetě Lávičkové za podporu během studia, trpělivost a vytvoření potřebného zázemí, a především za psychickou podporu v časech koronaviru.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Řezníček	Jméno Šimon	
STUDIJNÍ PROGRAM	N0715A270011 Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) doc. Ing. Zetek, Ph.D.	Jméno Miroslav	
PRACOVISŤE	ZČU – FST – KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Zvýšení kvality broušeného povrchu z materiálu Inconel 718		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2021
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	70	TEXTOVÁ ČÁST	50	GRAFICKÁ ČÁST	20
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p style="text-align: center;">ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Tato diplomová práce se zabývá zvýšením jakosti broušeného povrchu materiálu Inconel 718 na nástrojářské 5osé brusce. Cílem je navrzení nových chladících trysek pro přívod řezné kapaliny vyrobených pomocí 3D tisku z kovu. Bylo dosaženo neuspokojivých výsledků, co se týče drsnosti povrchu v případě většiny použitých trysek. Tryska s jednodušší geometrií inspirovaná designem podle Webstera z roku 1995 dosáhla nejlepších výsledků.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>Inconel 718, superslitina, broušení, chladící kapalina, chladící trysky, nástrojářská bruska, povrch, integrita povrchu, brousitelnost, 3D tisk</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Řezníček	Name Šimon		
STUDY PROGRAMME	N0715A270011 Machining, additive technology and quality assurance			
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) doc. Ing. Zetek, Ph.D.	Name Miroslav		
INSTITUTION	ZČU – FST – KTO			
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable	
TITLE OF THE WORK	Increasing of the surface quality when Inconel 718 is grinded			

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machining technology	SUBMITTED IN	2021
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	70	TEXT PART	50	GRAPHICAL PART	20
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This thesis deals with increasing of the surface quality when Inconel 718 is grinded on a 5-axis tool grinder. The aim is to design new cooling nozzles for the supply of cutting fluid manufactured using 3D metal printing. Unsatisfactory results were obtained in terms of surface roughness for most of the nozzles used. Nozzle with the simplest geometry inspired by the design from Webster from 1995 achieved the best results.
KEY WORDS	Inconel 718, superalloy, grinding, cutting fluid, cooling nozzles, tool grinding machine, surface, surface integrity, grindability, 3D printing

Obsah

Přehled použitých zkratk a symbolů.....	10
Seznam obrázků	11
Seznam tabulek	13
Seznam grafů.....	13
1 Úvod.....	14
2 Rozbor současného stavu	16
2.1. Superslitina Inconel 718	16
2.1.1. Základní charakteristika	16
2.1.2. Tepelné zpracování	17
2.1.3. Obrobitelnost.....	17
2.2. Integrita broušeného povrchu Inconelu 718	18
2.2.1. Zbytková napětí.....	19
2.2.2. Zpevňovací schopnost Inconelu 718	20
2.2.3. Tepelná vodivost Inconelu 718 a změna struktury.....	21
2.2.4. Tepelné změny – opaly	21
2.2.5. Tepelné změny – bílá vrstva.....	22
2.3. Způsoby chlazení Inconelu 718 při broušení.....	24
2.3.1. Minimum Quantity Lubrication	24
2.3.2. Konvenční záplavové chlazení (nízkotlaké)	25
2.3.3. Vysokotlaké více tryskové chlazení.....	26
2.3.4. Chlazení vnitřkem brusného kotouče	27
2.4. Přívod procesní kapaliny do místa broušení.....	29
2.4.1. Tlak procesní kapaliny	30
2.4.2. Průtok procesní kapaliny	30
2.5. Zásady pro konstrukci chladicí trysky	31
3 Návrh vlastního řešení a jeho realizace.....	33
3.1. Analýza problémů během dřívějších experimentů	33
3.1.1. Příčná vlnitost.....	33
3.1.2. Zalepování kotouče	34
3.2. Návrh a konstrukce trysek pro přívod procesní kapaliny	35
3.2.1. Design Webster/Rouse trysky	36
3.2.2. Orientace a poloha Webster/Rouse trysky	39
3.2.3. Design pomocné trysky pro čištění brusného kotouče.....	40
3.2.4. Návrh a design dvoutryskových rezervoárů.....	41

3.3.	Použité vybavení experimentu a vstupní faktory	42
3.3.1.	Nástrojářská bruska ANCA MX7	42
3.3.2.	Brusný kotouč	43
3.3.3.	Experimentální vzorek	43
3.3.4.	Řezné podmínky	44
3.4.	Přípravy a realizace experimentu	44
3.4.1.	3D tisk trysek	44
3.4.2.	Příprava a nastavení trysek do stroje	46
3.4.3.	Experimentální broušení součásti z Inconelu 718	49
4	Zhodnocení výsledků	52
4.1.	Vyhodnocení drsnosti povrchu	52
4.1.1.	Měřicí přístroj	52
4.1.2.	Vyhodnocení profilové drsnosti povrchu experimentálních vzorků	53
4.1.3.	Vyhodnocení plošné drsnosti povrchu experimentálních vzorků	55
4.2.	Vyhodnocení metalografické zkoušky	58
4.2.1.	Analýza mikrostruktury materiálu optickým mikroskopem	58
4.2.2.	Mikrotvrdot materiálu pod povrchem	60
	Závěr	62
	Seznam použitých zdrojů	64
	Příloha č. 1	i

Přehled použitých zkratk a symbolů

AMS	[-]	Aerospace material standart
Ac1	[°C]	Bod teploty překrytalizace materiálu
ae	[mm]	Hloubka řezu v radiálním směru nástroje
ap	[mm]	Hloubka řezu v axiálním směru nástroje
Al ₂ O ₃	[-]	Oxid hlinitý
CBN	[-]	Kubický nitrid boru
Cr ₂ O ₃	[-]	Oxid chromitý
ČSN	[-]	Česká technická norma
DMLS	[-]	Direct Metal Laser Sintering
Fe ₂ O ₃	[-]	Oxid železitý
SiC	[-]	Karbid křemíku
HRSA	[-]	Heat resistant super alloys – Žáruvzdorné super slitiny
hBN	[-]	Hexagonální nitrid boru
ISO	[-]	Mezinárodní organizace pro normalizaci
MQL	[-]	Minimum Quantity Lubrication
MoS ₂	[-]	Sulfid molybdečnatý
NiO	[-]	Oxid nikelnatý
Pa	[μm]	Aritmetický průměr absolutních hodnot
Qw	[mm ³ /(mm*s)]	Objem odebraného materiálu
RTI	[-]	Regionální technologický institut
Ra	[μm]	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu
Rq	[μm]	Průměrná kvadratická úchylka profilu
Rz	[μm]	Největší výška profilu
Sa	[μm]	Aritmetický průměr výšky povrchu omezené stupnicí
Sq	[μm]	Základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu
Sp	[μm]	Maximální výška piku omezené stupnice povrchu
Sv	[μm]	Maximální hloubka prohlubně omezené stupnice povrchu
Sz	[μm]	Maximální výška omezené stupnice povrchu
vc	[m/s]	Řezná rychlost
vp	[mm/s]	Posuv nástroje
WS2	[-]	Wolfram disulfid
Wa	[μm]	Průměrná aritmetická úchylka vlnění profilu
λ	[W/m*K]	Součinitel tepelné vodivosti
λc	[μm]	Mezní vlnová délka

Seznam obrázků

Obrázek 1: Hloubkové rozložení zbytkového napětí u superslitiny Inconel 718 po broušení [14]	19
Obrázek 2: Tvrdost po zpevnění materiálu Inconel 718 při obrábění [16]	20
Obrázek 3: Tepelné rozložení při broušení u Inconelu 718 [14].....	21
Obrázek 4: Mikroskopické snímky poškozeného a nepoškozeného povrchu Inconelu 718 [19]	22
Obrázek 5: Mikrostruktura povrchu Inconel 718: a) normální podmínky, b) zhoršené podmínky [21]	23
Obrázek 6: Hloubkové rozložení tvrdosti obou povrchů [21].....	23
Obrázek 7: Schéma mechanismu působení Al ₂ O ₃ nanočástic s procesní kapalinou v místě broušení [27]	25
Obrázek 8: Poměr drsnosti Rq/Ra broušeného povrchu Inconel 718 za pomoci různých procesních kapalin [28]	25
Obrázek 9: Drsnost povrchu IN718 a šedé litiny při odlišných chladičích technologiích v závislosti na hloubce řezu [29]	26
Obrázek 10: Porovnání drsnosti broušeného povrchu v závislosti na typu chlazení při ae= 10 μm [30].....	27
Obrázek 11: Ukázka vzduchové bariéry a použití přípravku v podobě protivzduchové desky [31], [32].....	27
Obrázek 12: Pohled příčným řezem segmentovým kotoučem s komorami [33]	28
Obrázek 13: Schématický obrázek brusného kotouče s vnitřním chlazením [27]	28
Obrázek 14: Drsnost povrchu s mikroskopickými snímky za jiného tlaku přívodu procesní kapaliny s odlišnými konstrukčními typy drážek [34]	29
Obrázek 15: Závislost užitečného průtoku na vzdálenost chladičí trysky od místa řezu [32].	30
Obrázek 16: Vnitřní rychlost průtoku procesní kapaliny v Rouse/Webster trysce [32]	31
Obrázek 17: Vliv počtu pomocných trysek na drsnost povrchu při broušení [23]	32
Obrázek 18: Detail broušeného povrchu Inconelu 718 s příčnou vlnitostí [10]	33
Obrázek 19: Zalepování brusného kotouče po 1 přejezdu, 10 přejezdech, 20 přejezdech [10]34	
Obrázek 20: Ukázka neefektivního použití ručně zdeformovaných trubek pro přívod procesní kapaliny	35
Obrázek 21: Porovnání použití vhodné trysky připájené na měděné trubce s koherentním paprskem proudu oproti použití samostatné měděné trubky [39]	36
Obrázek 22: Geometrie konvenční trysky s fenoménem "vena contracta " [40]	36
Obrázek 23: Design koherentní trysky podle Rouseho z roku 1952 [40]	37
Obrázek 24: Design navržené trysky pro experiment v programu Inventor	37
Obrázek 25: Ostrý přechod výstupu trysky	38
Obrázek 26: Návrh a design trysky v pracovním prostoru stroje.....	39

Obrázek 27: Optimalizovaný tvar obdélníkové trysky podle Webster/Rouse trysky [43]	40
Obrázek 28: Design navržené čistící trysky v CAD softwaru	40
Obrázek 29: Návrh a design čistící trysky v pracovním prostoru stroje	41
Obrázek 30: Design dvoutryskových rezervoárů použitých v experimentu zobrazených v řezu: Rezervoár I (vlevo), Rezervoár II (uprostřed), rezervoár III (vpravo).....	41
Obrázek 31: Kinematika nástrojářské brusky ANCA MX7 (vlevo) a samotný stroj zvnějšku (vpravo)	42
Obrázek 32: Rádiusový CBN brusný kotouč 1LL1 (vlevo) + přípravek brusné sestavy (vpravo)	43
Obrázek 33: Experimentální vzorek v podobě tyčinky z tištěného Inconelu 718.....	43
Obrázek 34: 3D tiskárna EOS M290.....	45
Obrázek 35: Vytisknuté trysky pro experiment: a) základní Webster/Rouse tryska, b) čistící pomocná tryska, c) rezervoár I, d) rezervoár II, e) rezervoár III.....	45
Obrázek 36: Způsob přívodu řezného oleje ve stroji do místa broušení.....	46
Obrázek 37: Vytištěná Webster/Rouse tryska spolu s klasickou měděnou trubicou	46
Obrázek 38: Připravené tryska nalepené do měděných trubek	47
Obrázek 39: Přípravek sestavy nástroje s přívodem chladicí kapaliny	47
Obrázek 40: Instalovaný přívod chladicí kapaliny: a) Konvenční chlazení, b) Webster/Rouse tryska, c) Rezervoár I, d) Rezervoár II, e) Rezervoár III	48
Obrázek 41: Simulace programu v softwaru CIMulator3D	49
Obrázek 42: Rozdělení trysek s vzorky připravené na experiment.....	50
Obrázek 43: Pracovní prostor při experimentu broušení	50
Obrázek 44: Přívod chladicí kapaliny ze zkoumaných trysek a rezervoárů	51
Obrázek 45: Měřicí přístroj Alicona IFM G4	52
Obrázek 46: Nasnímaná textura povrchu u konvenčního chlazení (horní) a rezervoáru III (dolní)	57
Obrázek 47: Optické srovnání povrchů.....	57
Obrázek 48: Nosné (Abbotovo) křivky profilu pro Webster/Rouse trysku a rezervoár III	58
Obrázek 49: Snímky mikrostruktury vzorků z metalografické analýzy: a) Konvenční chlazení, b) Webster/Rouse tryska, c) Rezervoár I, d) Rezervoár II, e) Rezervoár III	59

Seznam tabulek

Tabulka 1: Chemické složení Inconelu 718 [6]	16
Tabulka 2: Mechanické vlastnosti Inconelu 718 [5]	17
Tabulka 3: Třídění niklových slitin dle obrobitelnosti [7]	18
Tabulka 4: Specifikace brusného kotouče.....	43
Tabulka 5: Parametry řezných podmínek pro experiment broušení	44
Tabulka 6: Parametry experimentu broušení Inconelu 718	49
Tabulka 7: Hodnoty vybraných statistických údajů měřené plošné drsnosti.....	56

Seznam grafů

Graf 1: Naměřené hodnoty drsnosti povrchu Ra.....	53
Graf 2: Naměřené hodnoty drsnosti povrchu Rq	54
Graf 3: Naměřené hodnoty drsnosti povrchu Rz.....	54
Graf 4: Naměřené hodnoty plošné drsnosti parametrů Sa a Sq.....	55
Graf 5: Naměřené hodnoty plošné drsnosti parametrů Sp, Sv a Sz	56
Graf 6: Průběh mikrotvrdoti pod povrchem Inconelu 718 u jednotlivých typů chlazení	60
Graf 7: Hodnoty mikrotvrdotí průměrných, minimálních a maximálních pro jednotlivé typy chlazení.....	61

1 Úvod

Většina technologií a jejich vývoj byly vždy závislé na znalostech v oblasti materiálů a jejich zpracování. V dnešní době se průmysl snaží o vytvoření nových materiálů, které by dokázaly splňovat vysoká kritéria a přání klientů. Materiály představující vynikající mechanické vlastnosti s dlouho životností spolu s energetickou a finanční úsporou. Vývoj takových materiálů zapříčiňuje z velké míry automobilový, energetický, letecký nebo např. kosmický průmysl, jež jsou v dnešní době vzkvétající strojírenské odvětví.

Výsledkem vývoje takových materiálů jsou tzv. superslitiny, známé také jako žáruvzdorné superslitiny nebo vysokoteplotní slitiny. Vysoce legované superslitiny na bázi niklu (Ni) jako Inconel se dnes dostávají do širokého uznání a používají se po celém světě díky svým vynikajícím vlastnostem. Slitiny na bázi Ni tvoří téměř 50% z celkového materiálu potřebného pro výrobu leteckého motoru, a proto jsou všeobecně známé jako letecké a kosmické materiály. Vysoká únavová pevnost slitin na bázi niklu i při vysokých provozních teplotách z nich dělá ideální volbu pro několik průmyslových odvětví včetně leteckého sektoru. Žádný materiál však není dokonalý. Historicky jedna nevýhoda superslitin byla vždy jejich špatná obrobitelnost. Praskání, vysoké zbytkové napětí v tahu, opaly na povrchu a tvorba bílé vrstvy jsou některé z hlavních souvisejících problémů s obráběním těchto slitin.

Velmi důležitý krok pro každého procesního inženýra je rozhodnutí pro použití správné technologie obrábění ve svém podniku. Například elektrojiskrové obrábění (EDM) je relativně pomalá metoda pro obrábění složitých součástí, které jsou velmi časté pro letecký průmysl. Frézování slitin na bázi niklu je velmi finančně náročné z hlediska nákladů na rychle se kazící nástroje a s pokrokem v CBN brusných materiálech začínají výrobci součástí z niklových superslitin přecházet na broušení. Kvalita povrchu a dosahování přesných rozměrů a tolerancí pomocí dokončovacích technologií jako např. broušení, je v dnešní době velmi žádaná, a právě například v leteckém průmyslu zpravidla nezbytná.

Jednou z nejdominantnějších superslitin je Inconel 718. Často se uvádí, že zastoupení ze 70% výroby slitin na bázi Ni představuje právě Inconel 718. Z těchto zmíněných důvodů je velmi důležité zabývat se broušením Inconelu 718 a dále zkoumat a experimentovat s cílem lepších výsledků broušených součástí z tohoto těžce brousitelného materiálu. Jedním z nejúčinnějších způsobů, jak zlepšit proces broušení je lepší aplikace procesní chladicí kapaliny. V procesech broušení se řezné kapaliny primárně používají k ochlazení a promazání kontaktní oblasti mezi brusným kotoučem a obrobkem. Výsledkem je vyšší kvalita obrobku, zvyšující se produktivita procesu a snížené opotřebení nástroje, jež jsou základem úspěšné výroby součástí v jakémkoliv průmyslu.

Jedním z nejdůležitějších a často přehlížených faktorů účinné dodávky řezné kapaliny je typ a design chladících trysek. Použitím vhodné trysky pro konkrétní proces broušení s požadovaným průtokem řezné kapaliny lze dosáhnout vyšší kvality broušeného povrchu i z takového materiálu jako je Inconel 718.

A právě problematikou zvýšení kvality broušeného povrchu z Inconelu 718 pomocí zdokonalení přívodu řezné kapaliny se zabývá tato práce. Cílem této diplomové práce bude zvýšení jakosti broušeného Inconelu 718 především z hlediska snížené drsnosti a absence nežádoucích změn pod povrchem oproti předešlým experimentům proběhlým na Regionálním technologickém institutu (RTI).

Proces broušení bude prováděn na nástrojářské 5osé brusce ANCA MX7, na které bude navrhnout a použít nový design trysek oproti stávajícím měděným trubkám, jež mohou být nedostačující pro broušení Inconelu 718. Samotné trysky budou zhotoveny pomocí 3D tisku,

díky čemuž lze využít nesporné výhody této inovativní technologie jako je geometrická volnost nezávislá na konvenční výrobě, která umožňuje generovat mnohem složitější tvary.

V této diplomové práci bude nejdříve proveden rozbor současného stavu v oblasti porozumění materiálu Inconel 718 jako takového. Dále pak řešerše již provedených experimentů broušení Inconelu 718 a výsledky vlivu procesní kapaliny na výslednou jakost povrchu. V neposlední řadě teoretické části diplomové práce budou popsány základní pravidla návrhu a konstrukce trysek a přívodu chladicí kapaliny během broušení.

Dále bude práce obsahovat návrh vlastního řešení a samozřejmě jeho realizace s detailním popisem experimentu a použitého vybavení. Poslední část této diplomové práce bude náležet zhodnoceným výsledkům a možným návrhům na zlepšení.

2 Rozbor současného stavu

2.1. Superslitina Inconel 718

2.1.1. Základní charakteristika

Inconel je registrovanou obchodní známkou americké společnosti Special Metals Corporation. Číselné označení 718 udává poměr použitých prvků. Patří do skupiny tzv. HRSA materiálů neboli žáruvzdorných a žárupevných slitin, jež jsou vysoce náročné pro obrobění. Díky jejich unikátním vlastnostem jsou hojně používány v leteckém, energetickém, těžebním průmyslu a v medicíně. Tyto vlastnosti, které je dělají atraktivními, jsou především zachování pevnosti a tvrdosti při vysokých teplotách a korozní odolnost. Průběh obrábění a fyzikální vlastnosti jednotlivých slitin se značně liší, proto se HRSA materiály často dělí na [1], [2], [3]:

- slitiny na bázi železa,
- slitiny na bázi niklu,
- slitiny na bázi kobaltu.

Inconel 718 patří do skupiny slitin na bázi niklu. Jedná se o velmi často používanou niklovou superslitinu a obvykle tvoří 50 % hmotnosti tryskového motoru, kde lze využít jejich nesporných výhod. Například v takových prostředích jako je působení extrémně vysokých teplot, kde je vyžadována pevnost a odolnost vůči tečení (creepu). Nebo naopak v prostředí s teplotami hluboko pod bodem mrazu, kde je potřeba vysoká houževnatost materiálu, či v agresivním prostředí, kde je zase vyžadována korozní odolnost. Inconel 718 lze použít v rozsahu teplot od -250 °C do +700 °C při udržení stálých vlastností a má dokonce vynikající svařitelnost v porovnání s ostatními superslitinami.

Základní vzorec Inconelu 718 je NiCr19NbMo, z čehož vyplývá, že je tato slitina tvrzená niobem a molybdenem. Podrobné chemické složení, které výrazně přispívá na jedinečných vlastnostech Inconelu 718, lze vidět v tabulce č. 1, dle specifikace AMS (aerospace material standard). [2]

Tabulka 1: Chemické složení Inconelu 718 [6]

Prvek	Min [%]	Max [%]
C	-	0,080
Mn	-	0,350
Nb + Ta	4,75	5,500
Cr	17,00	21,000
Ni	50,00	55,000
B	-	0,006
Fe	Zbytek	Zbytek
Co	-	1,000
Ti	0,65	1,150
Al	0,20	0,800
Mo	2,80	3,300
Zr	0,02	0,120
Cu	-	0,100
S	-	0,015

Metodou výroby polotovaru Inconelu 718 dochází k jiným mechanickým vlastnostem a tím se mění i obrobiteľnosť. Výkovky mají jemnější zrnitost, díky tomu má slitina vyšší pevnost a obrobiteľnosť se pohybuje ve středních hodnotách v porovnání s ostatními niklovými superslitinami. Odličky bývají naopak nižší pevnosti a zhoršené obrobiteľnosti. Nejlepší obrobiteľnosť má Inconel 718 jako normalizovaný polotovar v podobě trubek, tyčí, plechů, pásů, polygonů atd. [4]

Mechanické vlastnosti a jejich vliv na změnu teploty lze vidět v tabulce č. 2.

Tabulka 2: Mechanické vlastnosti Inconelu 718 [5]

Teplota [°C]	Mez kluzu – Rp 0,2 [MPa]	Pevnost v tahu – Rm [MPa]	Tažnost [%]
93	1172	1407	21
204	1124	1365	20
316	1096	1344	20
427	1076	1317	19
538	1069	1276	18
649	1027	1158	19
760	758	758	27

2.1.2. Tepelné zpracování

Na mechanické vlastnosti Inconelu 718 má vliv tepelné zpracování, a tudíž s tím spojitá změna obrobiteľnosti materiálu. Pro většinu aplikací je slitina tepelně zpracována tzv. vytvrzením, jehož cílem je rovnoměrná distribuce precipitátů γ' Ni₃(Al, Ti) základních vytvrzujících fází v matici, kterou tvoří γ fáze, jež je základní strukturní složkou. Vytvrzení se skládá z rozpouštěcího žíhání a následného precipitačního vytvrzení (často se používá název stárnutí). Během precipitačního vytvrzení dochází ke zpevnění vytvrzující fáze γ'' (Ni₃Nb) v kovové matici. [6]

U slitiny Inconel 718 se využívají dva způsoby tepelného zpracování:

1. Rozpouštěcí žíhání na teplotě 930–1010 °C, rychlé chladnutí ve vodě, precipitační žíhání na teplotě 720 °C po dobu 8 hodin, chladnutí v peci na teplotu 620 °C po dobu 18 hodin a následné chladnutí na vzduchu.
2. Rozpouštěcí žíhání na teplotě 1040–1065 °C s následným rychlým ochlazením ve vodě, precipitačním vytvrzováním při teplotě 760 °C po dobu 10 hodin, pomalé chladnutí v peci na teplotu 650 °C a výdrž na teplotě po dobu 20 hodin s následným chladnutím na vzduchu.

Každý způsob získává jiné mechanické vlastnosti. Obrábění materiálu pouze v žíhaném stavu zaručuje delší životnost nástroje. Zatímco při obrábění vytvrzené slitiny se tvoří lepší tříska a provádějí se lépe dokončovací operace. Ještě lepší kvality povrchu se dosáhne při předběžném opracování před vytvrzením a následném dokončení povrchu po vytvrzení. [3]

2.1.3. Obrobiteľnosť

Jak již bylo řečeno, niklové superslitiny mají obecně špatnou obrobiteľnosť a jinak tomu není ani u materiálu Inconel 718. Dle literatury [7] se obrobiteľnosť niklových slitin klasifikuje do pěti skupin, viz. tab. 3. Inconel 718 patří do skupiny D-2 pro především precipitačně vytvrzené slitiny. Dle ISO lze zařadit Inconel 718 do třídy S. [8]

Tabulka 3: Třídění niklových slitin dle obrobitelnosti [7]

Skupina	Označení materiálu
A	Nickel 200, 201, 204 atd.
B	Monel 400, 401, 402 atd.
C	Nickel 270, Monel K-500, Inconel 600 atd.
D-1	Permanikel 300 (nevystárnutý) atd.
D-2	Inconel 718 , 700, 702 atd.
E	Monel R-405

Inconel 718 je velmi obtížně obrobitelný konvenčními metodami kvůli svým vynikajícím mechanickým vlastnostem. Mezi největší výzvy během obrábění této slitiny patří:

- Vysoká pevnost při obrábění způsobující vysoké řezné síly, které generují vysoké teploty na nástroji.
- Nízká tepelná vodivost, která přenáší teplo produkované během obrábění na nástroj a materiál samotný, způsobuje nadměrné opotřebení nástroje a deformace v materiálu.
- Deformační zpevnování povrchové vrstvy materiálu.
- Přítomnost tvrdých abrazivních karbidů a intermetalických sloučenin.
- Kontrola odvodu a tvaru zpravidla dlouhých nesouměrných třísek. [9], [10], [11],

2.2. Integrita broušeného povrchu Inconelu 718

Finální vlastnosti výrobků jsou do značné míry ovlivňovány vlastnostmi povrchových a podpovrchových vrstev. Objem provozních lomů v současnosti tvoří více než z 90 % únavová poškození. Tento problém je o to důležitější, pokud je součást tepelně zpracována, přičemž dochází v povrchových oblastech k tlakovým napětím, která přechází poměrně náhle v tahová. Po takovém tepelném zpracování často následuje operace broušení, která vytváří další zbytková napětí. [12]

V důsledku řezného procesu dochází ke změnám mechanických vlastností povrchové vrstvy obrobené plochy s výstupními parametry, které tvoří komplexní soubor vlastností povrchu a jsou nazývány integrita povrchové vrstvy. Vlivů působících na složky integrity povrchové vrstvy je spousta. Ty nejdůležitější vlivy nastávající při broušení Inconelu jsou:

- Brousící nástroj – kotouč vytváří složité podmínky vzniku třísky. Velikost oblasti primárních plastických deformací závisí zvláště na geometrii nástroje, která je u broušení v podobě zrna s většinou záporným úhlem čela. U brousících nástrojů je geometrie zrna ovlivnitelná pouze výběrem materiálu zrna. CBN zrna mají například pravidelnější tvar i menší rádius břitu.
- Prostředí – je vytvářeno zpravidla procesní kapalinou. Jeho vliv je dán poměrem ochlazování a snížením tření, které přispívá ke snížení množství vznikajícího tepla. Dalším důležitým parametrem je množství, tlak a teplota přiváděného média.
- Zalepování brousícího kotouče – jedná se o vyplňování mezer mezi zrny z důvodu navaření materiálu vlivem působení vysokých teplot a tlaků. Dochází tak ke ztrátě řezivosti kotouče. Tento jev se často stává při broušení austenitických ocelí (Inconel 718) za nevhodných podmínek nebo nevhodným zrnem (monokrystalický korund). Vyřešením problému může být volba materiálu zrna či pojiva s nižší vazbou k obráběnému materiálu, či změna řezných podmínek. [13]

Integritu broušeného povrchu tvoří jednotlivé složky, které se vzájemně ovlivňují a doplňují a jsou to především:

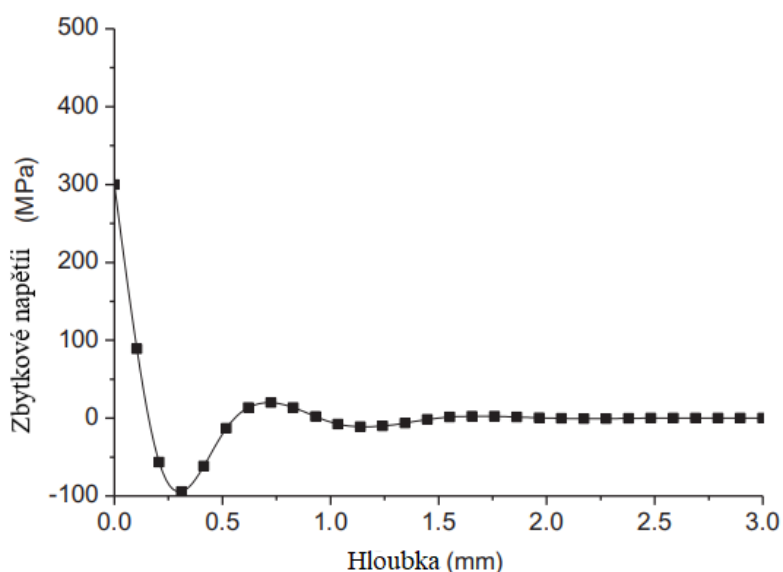
- geometrická přesnost,
- drsnost povrchu,
- zbytková napětí v povrchové vrstvě,
- změny tvrdosti v povrchové vrstvě,
- změny struktury v povrchové vrstvě,
- tepelné změny – opaly,
- trhliny. [13]

V následujících kapitolách budou popsány jen ty složky, které se vyskytují a jsou největším problémem při broušení superslitiny Inconel 718.

2.2.1. Zbytková napětí

Broušení je provázáno vznikem velkého množství tepla a vysokých tlaků díky působení jednotlivých zrn brusného kotouče na povrch obrobku. Výsledkem těchto jevů je vznik zbytkových napětí v broušeném povrchu Inconelu 718. Tato napětí lze obecně definovat jako víceosá napětí, působící v materiálu po velmi dlouhou dobu, i přesto že na materiál již nepůsobí žádné vnější síly. Tento nežádoucí jev je často zdrojem technologických vrubů a celkově ovlivňuje životnost výrobku. [12], [13]

Pokud převažuje při obrábění plastická deformace (bez výrazného tepelného účinku), zpravidla dochází k vytvoření tlakového napětí na povrchu. To je výhodné z hlediska funkce součásti, protože tlaková napětí zvyšují únavovou pevnost a zpomalují, případně uzavírají růst trhlin na povrchu. Při broušení ovšem dochází současně jak k mechanickému, tak tepelnému zatěžování povrchu. Při chladnutí pak vznikají tahové napětí, díky kterým dochází ke snížení únavové pevnosti součásti a urychlují růst trhlin. Dále se mohou objevit při broušení navíc strukturní změny materiálu a chemické procesy, díky kterým je průběh zbytkových napětí v povrchové vrstvě složitý, a ještě více nežádoucí. Dle obr. 1 lze vidět hloubkové rozložení zbytkového napětí v materiálu Inconel 718 po broušení. Na úplném povrchu začíná tahové napětí, které se rychle přemění na tlakové napětí do hodnoty -100 MPa a až v hloubce 0,7 mm pod povrchem se zbytkové napětí ustálí na nulu. [14], [15], [13]



Obrázek 1: Hloubkové rozložení zbytkového napětí u superslitiny Inconel 718 po broušení [14]

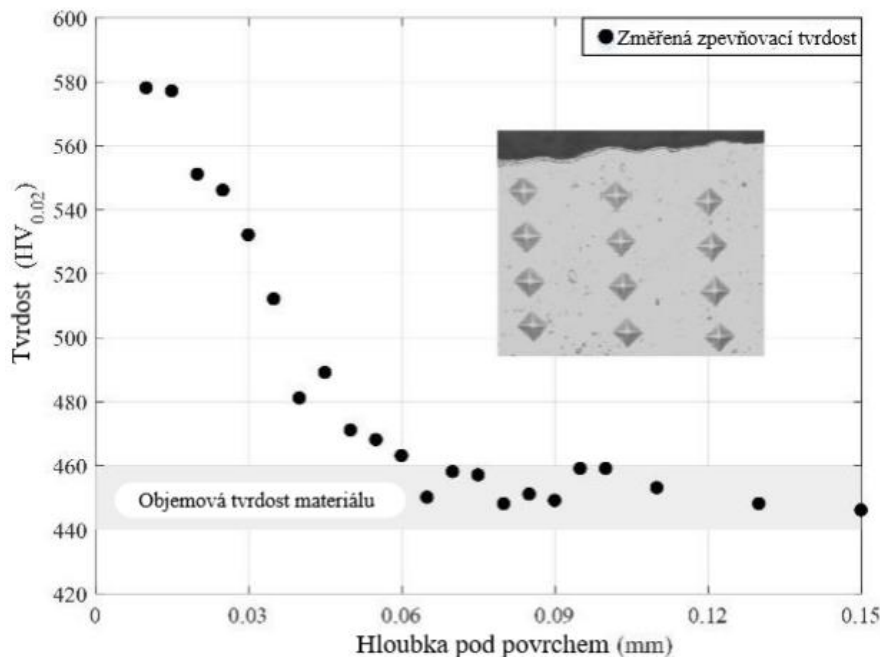
Průběh zbytkových napětí pod povrchem broušené součásti může být i opačný, kdy se na povrchu vytvoří tlaková a níže pod povrchem tahová napětí. Takový průběh vytváří největší nebezpečí pro vznik trhlin. Je důležité si taky uvědomit, že vlivem předcházejících technologií, které taky značně vytváří zbytkové napětí v materiálu, může dojít k navýšení tahových napětí v povrchové vrstvě a tím ke vzniku trhlin. [12]

Zbytková napětí jsou ovlivňována tepelným a mechanickým zatížením broušeného povrchu a na jejich velikost a smysl působí spousta vlivů. Inconel 718 jakožto hůře brousitelný materiál, díky svým mechanickým a fyzikálním vlastnostem má hned několik nežádoucích vlivů na tvorbu zbytkových napětí. Ty nejčastější jsou popsány níže.

2.2.2. Zpevňovací schopnost Inconelu 718

Jedná se o schopnost zvýšení pevnosti a tvrdosti materiálu působením mechanického zatížení. Zpevňovací schopnost běžných materiálů závisí na teplotě, protože při teplotě překrystalizace materiálu dochází k zotavení materiálu a jeho rekystalizaci a díky tomu je zpevnění teplotou eliminováno. Při zpevňování materiálu dochází k poklesu tažnosti a všeobecně plasticity. Materiály s výraznou zpevňovací schopností jsou zejména austenitické oceli jako je i Inconel 718. Vstupní struktura materiálu součásti ovlivňuje také velikost a průběh zbytkových napětí a to tím, že při působení tepla během broušení může dojít k přeměně struktury a ke vzniku nerovnovážných složek. [13]

Zpevněná vrstva při broušení Inconelu 718 je způsobena efektem prudké deformace a tepelně-mechanického zatížení povrchu. Tvrdost povrchu je vyšší než objemová tvrdost a poté klesá na vstupní objemovou tvrdost v orientační hloubce 10 μm , jak lze vidět dle obr. 2. [16]



Obrázek 2: Tvrdost po zpevnění materiálu Inconel 718 při obrábění [16]

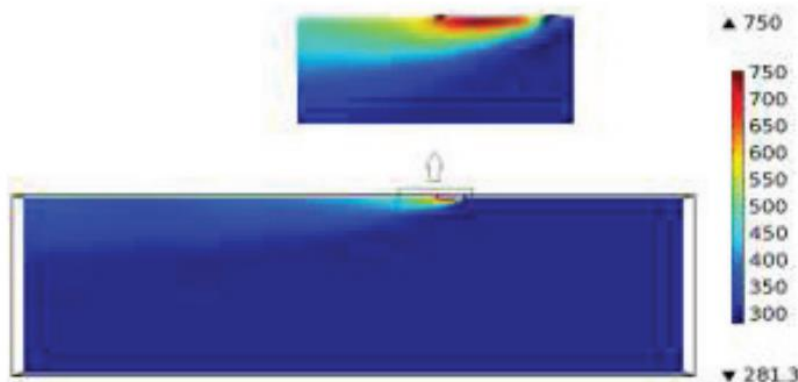
Některé studie zjistili [17], že hloubka zpevnění a jeho velikost tvrdosti je ovlivněna řeznou rychlostí a rychlostí posuvu. Hloubka zpevnění materiálu klesá s řeznou rychlostí, zatímco hodnoty tvrdosti rostou s nárůstem řezné rychlosti. Zvýšením posuvu se zvýší i tvrdost povrchu. Pro eliminaci zpevněné vrstvy se často při obrábění volí větší hloubka odebíraného materiálu tak, aby se řezná hrana nástroje dostala pod zpevněnou povrchovou vrstvu po předchozím obrábění. Pro takový případ se může použít tzv. hloubkové broušení, které používá nezvykle vysoké hodnoty hloubky řezu a_e .

2.2.3. Tepelná vodivost Inconelu 718 a změna struktury

Ke změnám struktury při obvyklých podmínkách obrábění nedochází, protože nedochází k potřebným teplotám jako například u soustružení či frézování. Strukturální změny jsou charakteristické zejména pro broušení, kdy dosažené teploty převyšují teploty fázových změn. Zvláště citlivými na strukturální změny jsou materiály s nízkou tepelnou vodivostí, jako jsou korozivzdorné materiály či žárupevné a žáruvzdorné slitiny, mezi které patří právě Inconel 718. Hodnota součinitele tepelné vodivosti λ Inconelu 718 je $14,2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ při teplotě $20 \text{ }^\circ\text{C}$. [13]

Špatná tepelná vodivost broušeného materiálu má nepříznivé účinky na zbytkové napětí. Je důležité, zda je teplo soustředěno přímo na broušeném povrchu, nebo zda proniká hlouběji do materiálu a vznikne pozvolný přechodový pás. V prvním případě dochází ke změnám struktury povrchu a tím vznikají zbytková tahová napětí. Ve druhém případě není situace jednoznačná a mohou nastat jak tahové, tak tlakové zbytkové napětí. Rozhodující je především velikost mechanického zatížení. [13]

Špatná tepelná vodivost Inconelu 718 zapříčiní vysokou akumulaci tepla v místě broušení a má za následek tepelné poškození povrchu. [11] Obrázek 3 ukazuje teplotní rozložení v materiálu Inconel 718 při broušení za normálních rezných podmínek ($v_c = 20 \text{ m/s}$, $a_p = 0,01 \text{ mm}$, $v_p = 50 \text{ mm/s}$). Teplota se v zóně styku nástroje s obrobkem postupně zvyšuje ve směru broušení. Děje se tak, protože materiál před brusným zrnem díky vysokému tření a silovému působení zvyšuje teplotu. Jakmile se brusné zrno oddálí od obrobku, teplota klesá přenosem tepla. Po oddálení brusného kotouče od materiálu povrchová teplota značně rychle klesá (od 780 K do přibližně 500 K za $0,1 \text{ s}$), a poté se klesání teploty zpomalí na počáteční hodnotu. Teplota v místě broušení se významně mění podle rychlosti posuvu nástroje. Čím vyšší posuv tím nižší teplota. [14]



Obrázek 3: Tepelné rozložení při broušení u Inconelu 718 [14]

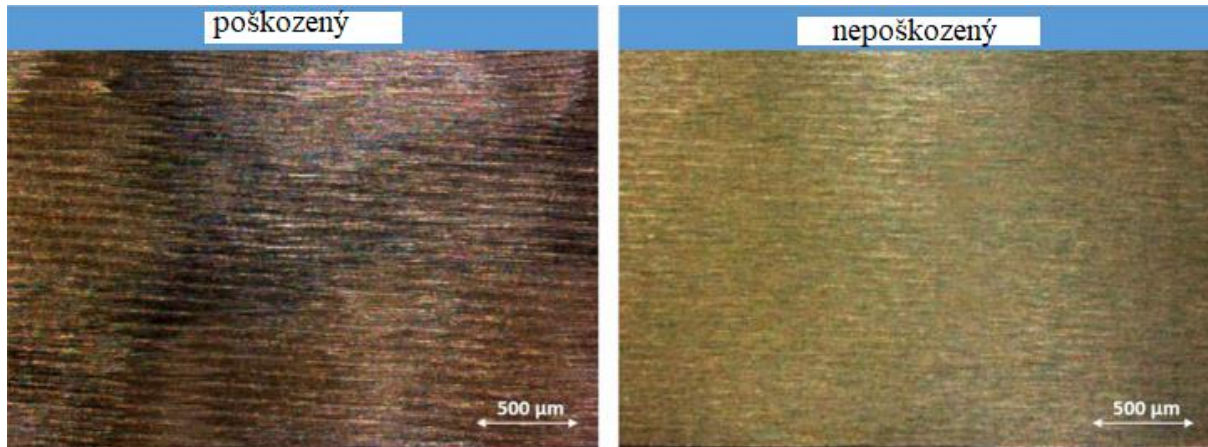
U materiálů s nižší tepelnou vodivostí, jako je Inconel 718, mohou vznikat trhliny. Každá trhlina se stává koncentrátorem napětí a potenciálním zdrojem šíření až do stádia lomu. Mohou se často nacházet na okrajích opalů v místě přechodu tepelně zatížené oblasti nebo mohou být jejich příčinou pouze strukturální změny. Právě objemové změny struktury při ochlazování stojí za vytvoření trhliny. Materiály citlivé na tyto objemové změny je potřeba brousit nízkými reznými rychlostmi. [13]

2.2.4. Tepelné změny – opaly

Tepelné změny souvisí se změnami struktury a tvoří se díky vysokému tepelnému zatížení povrchu, které je při broušení běžné, zvláště pro materiály s nízkou tepelnou vodivostí. Takové vysoké tepelné zatížení způsobí vznik tzv. opalů, což jsou v podstatě oxidy kovů na povrchu broušeného materiálu. Tyto opaly mohou mít různorodou barvu, často podle tepelného zatížení,

kde dochází k překročení teplot až k A_{c1} . Vznikají především při snížení množství nebo odstranění procesní kapaliny. Ovšem nelze konstatovat, že vznik opalů je jednoznačně závislý na snížení množství procesní kapaliny. Často vzniká při broušení nástrojem s nízkou tepelnou vodivostí. Proto se často vyskytují při nevhodném použití brusného kotouče. [13], [18]

Viditelné opaly na povrchu Inconelu 718 lze vidět na obr. 4 v porovnání s neporušeným povrchem po broušení. Tyto opaly vznikly po broušení brusným kotoučem karbidu křemíku (SiC) v naprosté většině testovaných případů dle studie [19]. Za stejných řezných podmínek byl také broušen Inconel 718 brusným kotoučem umělého korundu (Al_2O_3), který nevykazoval žádné poškození na povrchu. Především díky menšímu třecímu koeficientu, který sníží tepelné zatížení povrchu způsobující povrchové vady v podobě opalů. [19]



Obrázek 4: Mikroskopické snímky poškozeného a nepoškozeného povrchu Inconelu 718 [19]

Na poškozeném povrchu Inconelu 718 se vytvoří při různých teplotách vrstvy z různých oxidů jako je oxid nikelnatý (NiO), oxid železitý (Fe_2O_3) a oxid chromitý (Cr_2O_3), který se vytváří při teplotách až 980 °C. Z toho vyplývá, že teploty při broušení Inconelu 718 dosahují až 1000 °C. Hlavní důvod takto poškozeného povrchu je akumulace tepla na povrchu obrobku kvůli nižší tepelné vodivosti Inconelu 718. Problémem je tedy spíše akumulace tepla, než k jak vysokým teplotám dochází.

Takovéto poškození povrchu nemá samozřejmě pouze negativum z vizuální stránky. Dochází hned k několika nežádoucím jevům v případě Inconelu 718:

- poškozený povrch vykazuje průměrně vyšší drsnost (R_a) než povrch bez známek opalů,
- tvrdost poškozeného povrchu je nižší v důsledku vytvoření vrstvy oxidů,
- změna chemického složení a tvorba nových chemických sloučenin na poškozeném povrchu, což může vyústit v odlišné mechanické vlastnosti. [19]

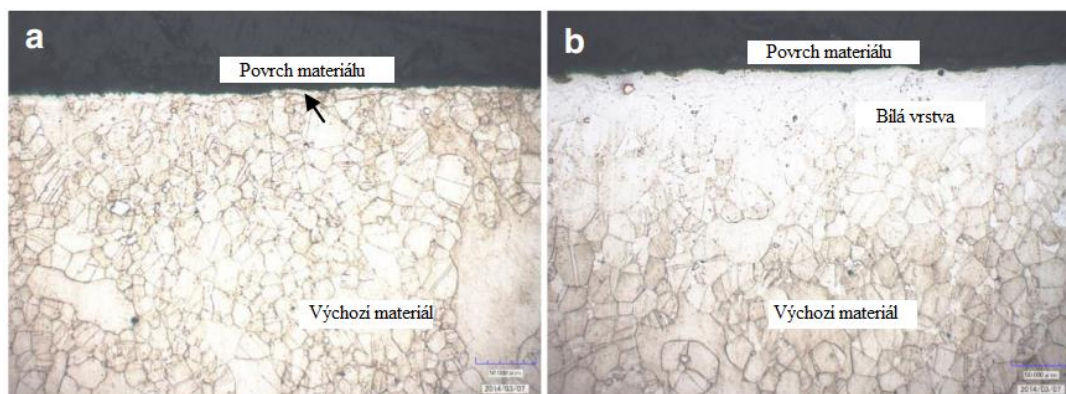
2.2.5. Tepelné změny – bílá vrstva

Procesy ohřevu a chlazení na povrchu při broušení probíhají v krátkých časech a pouze tenká vrstva materiálu je ovlivněna. Pokud dochází při broušení k vysokým teplotám, nejčastěji vyšším než 750 °C, může dojít k jakémusi zakalení povrchu a následnému poškození povrchu. Během broušení dojde k mechanické deformaci povrchu. Následné rychlé ochlazení vytvoří na povrchu bílou vrstvu. Pod touto vrstvou je silnější temperovaná vrstva, která je považována za tmavou vrstvu. Tato tmavá vrstva je výsledkem nižší maximální teploty v podpovrchové vrstvě a nižší rychlosti ochlazování než na povrchu. [18]

Obecně se předpokládá, že bílá vrstva je primárně velmi tvrdá a křehká martenzitická struktura s velmi malou velikostí zrna, která může také obsahovat zbytkový austenit. Tato vrstva je

koncentrátorem tahových napětí primárně díky teplotní roztažnosti při ohřevu a následné kontrakci během ochlazení. Jedná se o tvrdou a křehkou vrstvu materiálu, která je do určité doby odolná proti opotřebení ale při únavovém zatížení dochází rychle k trhlinám. [18]

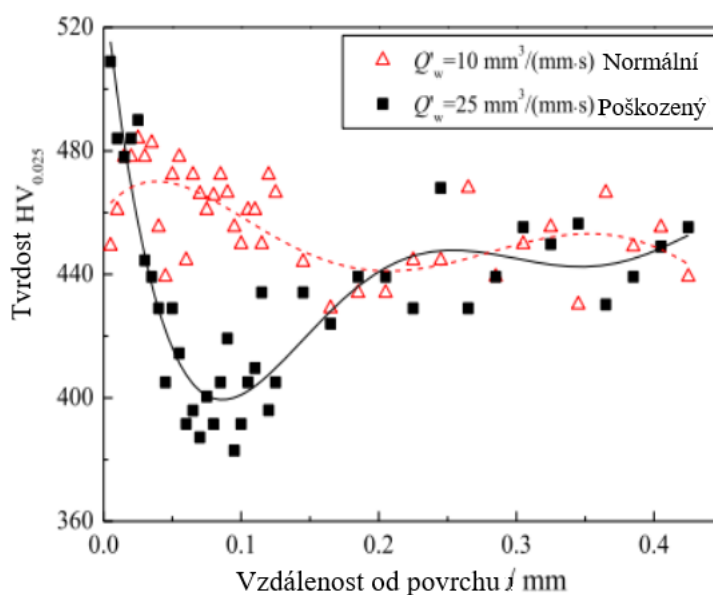
Během broušení Inconelu 718 se za nevhodných podmínek může objevit tato nežádoucí bílá vrstva. Za teplot vyšších než 850 °C, které mohou nastat u materiálu jako je Inconel 718 lehce, dojde k vysokému teplotnímu zatížení. Následně dojde k prudkému ochlazení často pomocí vysokotlakého chlazení. Dojde k rozpuštění fáze materiálu γ' a vytvoří se ostré rozhraní mezi bílou vrstvou a spodním materiálem. Příklad vytvoření bílé vrstvy na povrchu Inconelu 718 po broušení lze vidět dle obrázku 5. [20]



Obrázek 5: Mikrostruktura povrchu Inconel 718: a) normální podmínky, b) zhoršené podmínky [21]

Obrázek 5a znázorňuje metalografickou mikrostrukturu Inconelu 718 po broušení se středními řeznými podmínkami, kdy rychlost úběru materiálu dosahuje $10 \text{ mm}^3/(\text{mm}\cdot\text{s})$. Teplota v místě styku broušení dosahovala 600 °C. Žádná bílá vrstva není viditelná. Na obr. 5b lze vidět materiál při vyšších řezných podmínkách o úběru $25 \text{ mm}^3/(\text{mm}\cdot\text{s})$. Teplota v tomto případě dosáhla 878 °C a vytvořila se bílá vrstva do hloubky 100 μm . [21]

Na obr. 6 lze vidět porovnání změny tvrdosti těchto dvou povrchů. V poškozeném povrchu s bílou vrstvou (černě značený) je materiál zakalen o 15 % do hloubky 25 μm a poté následuje změkčení materiálu o 10 % do hloubky 0,1 mm. Takovýto povrch je tvrdší ale velmi křehký. [21]



Obrázek 6: Hloubkové rozložení tvrdosti obou povrchů [21]

2.3. Způsoby chlazení Inconelu 718 při broušení

Řezné prostředí tvořené zpravidla procesní kapalinou, je důležitým parametrem, který ovlivňuje významně přesnost a jakost obrobené plochy. Řezné prostředí snižuje množství tepla přecházejícího do obrobku, nástroje, třísky a množství tepla odváděné vlastní procesní kapalinou. Význam chlazení při broušení je vyvolán také vlastnostmi materiálů, které se při broušení používají. Jak materiály brousících zrn, tak i pojiva těchto zrn v kotoučích mají většinou velmi nízkou tepelnou vodivost. Jak velký dopad na proces broušení má právě brusný kotouč, lze vidět dle studie [22], kde 20 % celkové energie při broušení bylo přeneseno do obrobku v podobě tepla při broušení s CBN kotoučem, zatímco s kotoučem z oxidu hlinitého dokonce až 60-75 %. Proto je velmi důležité, aby procesní kapalina dokázala odvést teplo pryč z místa broušení. [13]

Pokud se nebere v úvahu ekonomické hledisko a cena kotouče, lze konstatovat podle naprosté většiny zdrojů, že CBN kotouče jsou nejvhodnější pro broušení Inconelu 718. Dle publikace [23], nejnižšího opotřebení při broušení Inconelu 718 lze dosáhnout CBN kotoučem se skelnatým pojivem (vitrified CBN). Ovšem vysoký vliv na celkový průběh broušení s CBN kotouči má i použití vhodné procesní kapaliny. Životnost CBN kotouče se může drasticky snížit díky chemickým reakcím při použití procesní kapaliny na bázi vody oproti použití oleje jako brusné medium. CBN kotouče jsou také reaktivní vůči oxidům alkalických kovů, zvláště při teplotách vyšších 900 C°, které mohou při broušení Inconelu 718 lehce nastat. Použitím oleje jako procesní médium lze zvýšit životnost CBN kotouče při broušení Inconelu 718 až 50tinásobně. Některé experimentální studie [24], [25] tento problém potvrzují. [23]

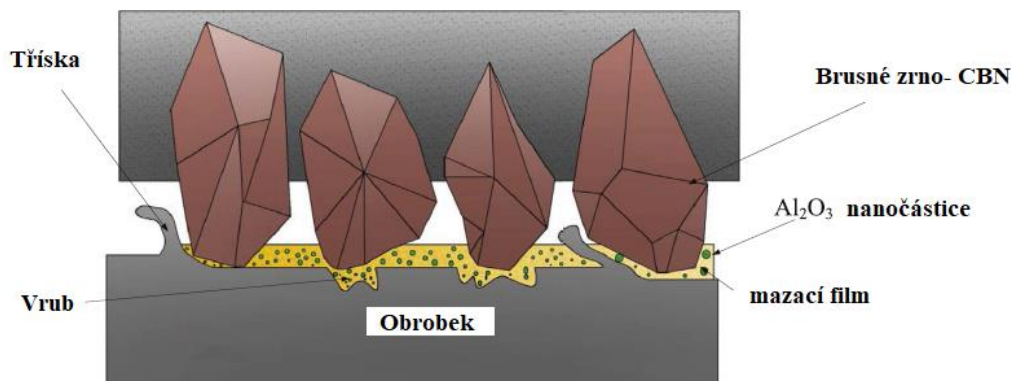
U materiálu jako je Inconel 718, kde dochází k vysokým teplotám při broušení díky špatné tepelné vodivosti je přítomnost procesní kapaliny nezbytná. Způsob, jakým lze problém špatné tepelné vodivosti eliminovat, může být právě zvýšením tepelné vodivosti přiváděné řezné kapaliny. Zvýšením Reynoldsova čísla a vytvořením turbulentního proudění kapaliny dojde k nárůstu tepelné vodivosti řezné kapaliny a tím lepšímu odvedení tepla z oblasti řezu. Turbulentní proudění je ale nežádoucí pro přívod procesní kapaliny z důvodu horší kvality koherence paprsku kapaliny čímž se ztratí jeho hybnost a přesnost. Kromě odvodu tepla z místa plastické deformace má použití procesní kapaliny vliv na snížení tření mezi brusným zrnem a broušeným povrchem, odvod třísek a zamezení ucpávání pórů brousících kotoučů či dokonce zamezení korozi. [2]

Způsob přívodu procesní kapaliny do místa řezu má vliv na charakter samotného procesu obrábění. Kapalina může být přivedena standartním způsobem pomocí trysky (dýzy) skrze čerpadlo a rozvodové potrubí. Dalším způsobem je přivedení kapaliny přímo skrze nástroj v podobě brusného kotouče s vnitřním chlazením. Chladicí a mazací účinek procesní kapaliny je pro broušení vysokoteplotní slitiny Inconel 718 zásadní. Existuje několik strategií chlazení při broušení Inconelu 718, z toho některé konvenční způsoby mohou vykazovat horší výsledky. [13], [2]

2.3.1. Minimum Quantity Lubrication

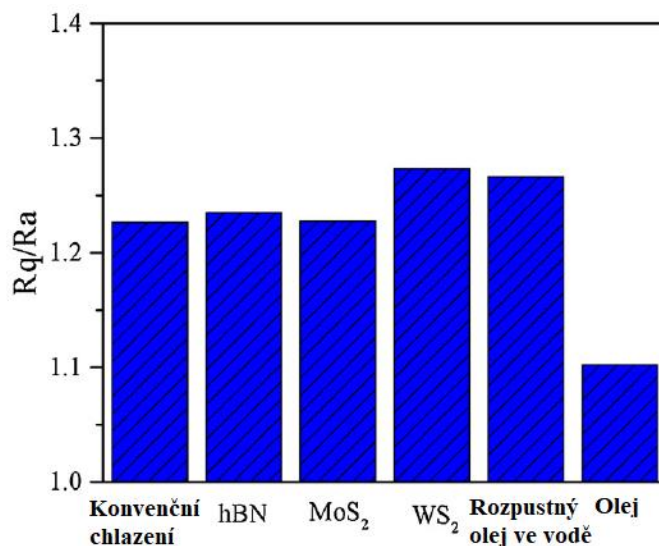
Použití procesní kapaliny při broušení je velmi aktuální problém. Je nutno hledat cesty k tzv. ekologizaci procesu, což může vést ke snížení objemu procesní kapaliny. Použití obrábění za sucha bohužel není výhodné u těžce obrobitelné superslitiny. V tu chvíli lze použít techniku tzv. MQL (Minimum Quantity Lubrication), při které minimální množství maziva představuje cca. 200 ml/h s přiváděním vzduchem pod určitým tlakem. I přesto, že technika MQL je úspěšná při broušení vzhledem k snižování drsnosti povrchu a energie, u materiálů s horší brousitelností neposkytuje požadované chlazení v místě obrábění. Proto se do chladicí kapaliny přidávají nanočástice s vysokou kapacitou přenosu tepla, díky kterým lze odvést teplo z řezu

účinněji i u hůře obrobitelných materiálů. Dle studie [26] bylo zjištěno, že nejnižších drsností a nejvyšší jakosti broušeného povrchu Inconelu 718 bylo změřeno u technologie MQL s použitím právě nanočástic. Procesní kapalinou byl použit palmový olej s nanočásticemi Al_2O_3 , viz. obr. 7.



Obrázek 7: Schéma mechanismu působení Al_2O_3 nanočástic s procesní kapalinou v místě broušení [27]

Použitím nejvhodnějšího typu procesní kapaliny při MQL broušení Inconelu 718 se zabývala studie [28], podle které nejlepší výsledků dosáhl minerální olej. Při použití oleje bylo dosaženo nejnižší drsnosti povrchu, viz. obr. 8, nejnižšího koeficientu tření, nejnižších zbytkových napětí a povrch obsahoval nejnižší množství nerovností, vrubů. I přesto, že chladicí schopnost čistého oleje je nižší než u ostatních testovaných kapalin, díky vynikajícím mazacím vlastnostem bylo dosaženo lepších výsledků. Procesní kapaliny hBN, MoS₂ a WS₂ jsou kapaliny destilované vody s obsahem nanočástic pro MQL technologii. Broušení bylo prováděno za konvenčních řezných podmínek a pomocí CBN brusného kotouče, který je pro broušení Inconelu 718 nejvhodnější podle naprosté většiny zdrojů.



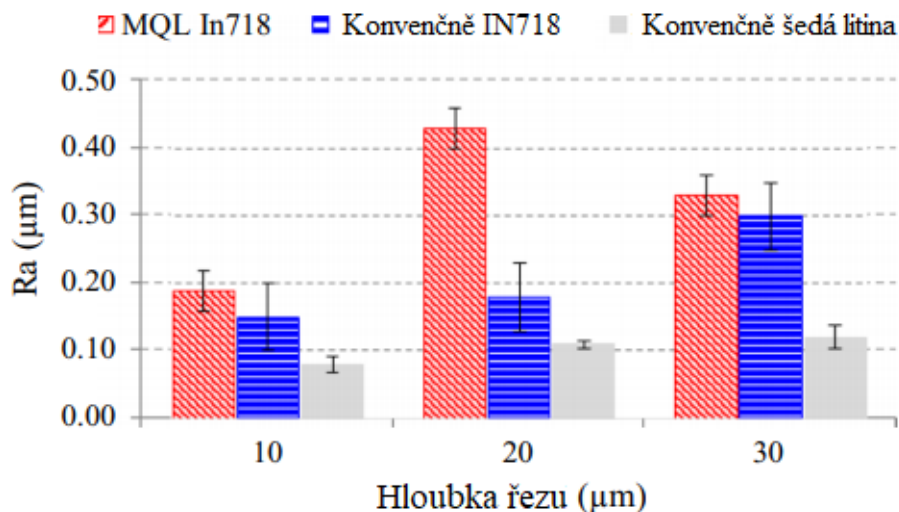
Obrázek 8: Poměr drsnosti Rq/Ra broušeného povrchu Inconel 718 za pomoci různých procesních kapalin [28]

2.3.2. Konvenční záplavové chlazení (nízkotlaké)

V případě konvenčního chlazení (flood cooling) je řezná kapalina aplikována do procesu broušení při nízkém tlaku ale vyšším průtoku pomocí konvenční trysky. Aby se jednalo o konvenčním chlazení průtok by měl být vyšší než 2 l/min. V praxi se množství aplikované tekutiny obvykle pohybuje mezi 10 až 100 l/min. Pomocí konvenčního chlazení dochází často

k lepšímu chladicímu účinku, tedy i k nižšímu tepelnému poškození a geometrické nepřesnosti obrobku v porovnání s MQL ale také k lepšímu vyplachování třísek z místa řezu a čištění brusného kotouče. Dochází ovšem k o mnoho vyššímu úbytku procesní kapaliny než u MQL. Díky vyššímu objemovému průtoku spotřeba procesní kapaliny může v extrémních případech dosáhnout i 300 L/min, což se může projevit jak na ceně, tak na ekologičnosti celého procesu. [29]

Dle studie [29] bylo porovnáno použití konvenčního chlazení oproti MQL chlazení při broušení Inconelu 718. Díky vyšší dodávce chladiva do prostoru broušení při konvenčním chlazení bylo dosaženo nižších drsností, jak lze vidět na obr. 9. Pro porovnání byla testována i šedá litina. Co se týče změny tvrdosti po broušení ani jedna technika chlazení nevykazovala výraznou změnu, tudíž nedošlo k žádnému tepelnému ovlivnění. Studie tedy dokázala, že použití konvenčního chlazení je v případě jakosti povrchu výhodnější pro broušení těžce obrobitelného Inconelu 718. Hodnoty drsností byly změřeny za různých hloubek řezu. Nejvyšší hodnota drsnosti překvapivě nevznikla při nejvyšší hloubce řezu, což se ale dá vysvětlit nalepováním a opotřebením kotouče či nerovností povrchu atd.

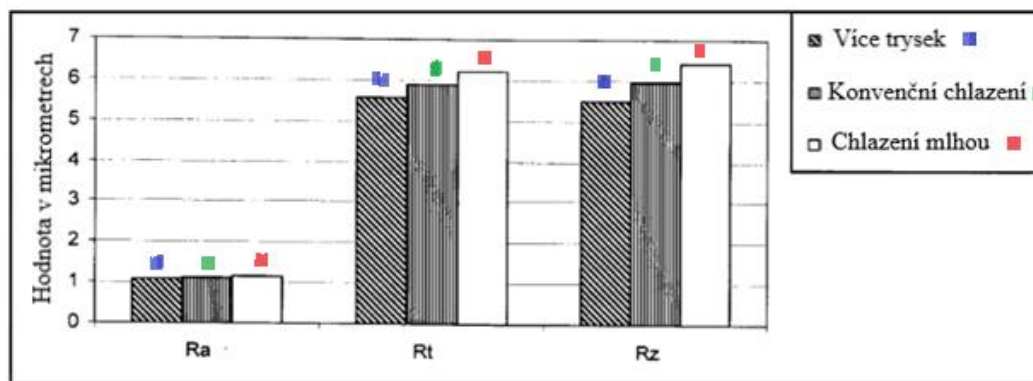


Obrázek 9: Drsnost povrchu IN718 a šedé litiny při odlišných chladících technologiích v závislosti na hloubce řezu [29]

2.3.3. Vysokotlaké více tryskové chlazení

Možností nedávného vývoje je použití vysokotlakého chladicího systému ke zlepšení rychlosti odvodu tepla z broušené zóny. Procesní kapalina pod vysokým tlakem až 120 barů, často ale 80 barů je přivedena do místa řezu speciálně konstruovanou tryskou. Průměr výstupní trysky bývá 0,3 až 1 mm. Tento způsob chlazení je vhodný tam, kde má vzniklé teplo prokazatelně špatný vliv.

Dodávka tekutiny do zóny broušení je často znemožněna tvorbou jakési vzduchové vrstvy kolem brusného nástroje z důvodu vysokých otáček kotouče. Tento jev má za následek nedostatečné pronikání a závažné plýtvání procesní kapalinou. Při vysokotlakém chlazení tento jev nevzniká, což je jedna z velkých výhod oproti konvenčnímu chlazení. V některých případech je nemožné vysokotlaké chlazení použít z důvodu vysoké ceny a složitějšího vybavení. V případě Inconelu 718, kde dochází při broušení k vysokým teplotám je použití vysokotlakého chlazení vhodné tak jako použití více trysek pro přívod procesní kapaliny. Použitím více trysek lze eliminovat problém vzduchové kapsy vytvořené okolo rychle se otáčejícího brusného kotouče. Použití více tryskového chlazení má také kladný dopad na nižší zalepování kotouče a drsnost povrchu dle studie [30], jak lze vidět na obr. 10. [18]

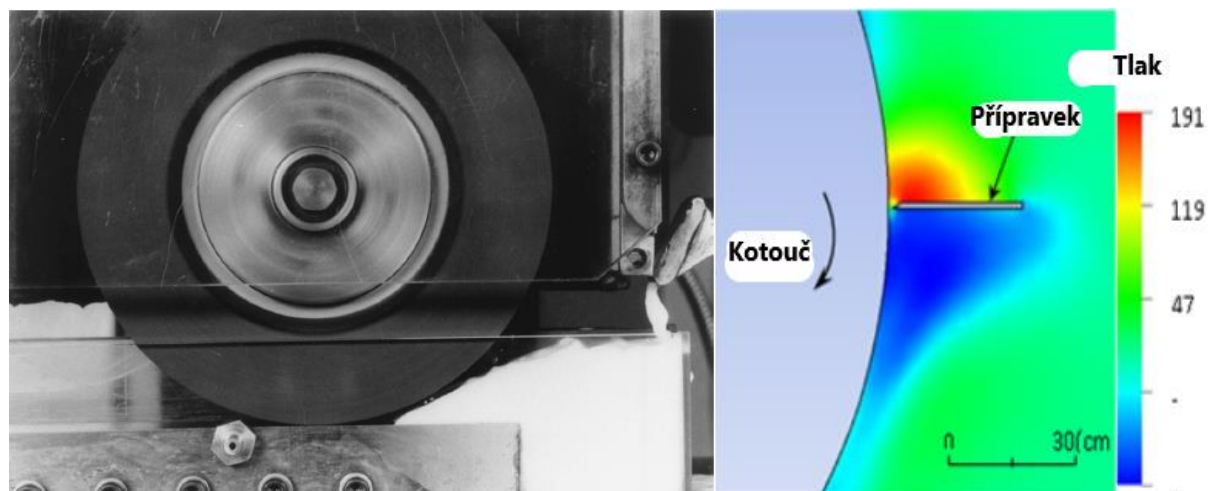


Obrázek 10: Porovnání drsnosti broušeného povrchu v závislosti na typu chlazení při $a_e = 10 \mu\text{m}$ [30]

2.3.4. Chlazení vnitřkem brusného kotouče

Chemické přísady v procesních kapalinách a nadměrné použití těchto kapalin, například při vysokotlakém chlazení, kriticky působí na environmentální znečištění a zvyšují náklady na jejich likvidaci. Tento problém je ještě více umocněn při broušení těžce obrobitelných materiálů s požadavkem vysoké kvality povrchu, kdy je často jediným řešením použití velkého množství procesní kapaliny.

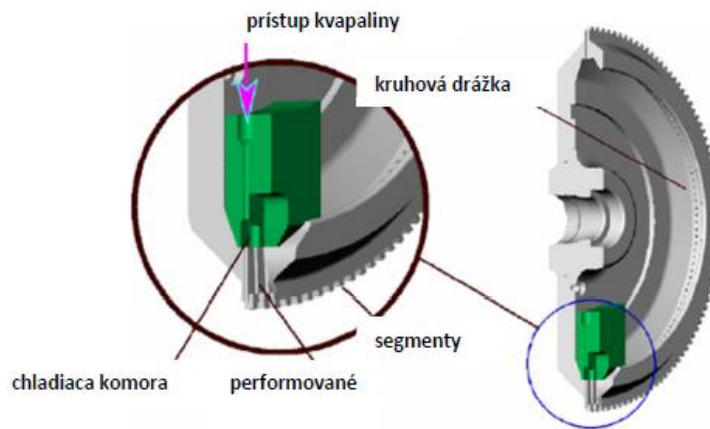
Další problém nastává během procesu broušení, kdy se při vysokorychlostním otáčení brusného kotouče vytváří vířící proudění vzduchu kolem něj, které brání chladicí kapalině do místa broušení. Čím vyšší je rychlost otáčení brusného kotouče, tím výraznější vzduchová bariéra je. U vysoce porézních brusných kotoučů, které se často používají u broušení těžce brousitelných materiálů z důvodu nižšího tření, je vzduchová bariéra ještě silnější. Avšak tento jev vzniká u všech brusných kotoučů bez výjimky. Tímto fenoménem se věnovala studie [31] a dle obrázku 11 ho lze vidět ve zřetelné míře. Vzduchovou bariéru lze účinně eliminovat použitím jakéhokoliv přípravku například v podobě desky, která zamezí prostupu vzduchu, viz. obr 11. [18]



Obrázek 11: Ukázka vzduchové bariéry a použití přípravku v podobě protivzduchové desky [31], [32]

Z výše uvedených důvodů byly k broušení těžkoobrobitelných materiálů vyvinuty segmentové brousící kotouče s perforovanými zářezy pro přivedení kapaliny do kontaktní zóny kotouče a obrobku skrze samotný kotouč. Pro lepší rozvod kapaliny se používají tlakové komory na zlepšení toku kapaliny přes perforované otvory nástroje. Díky tomuto poměrně novému systému může kotouč dosahovat zlepšené kvality broušeného povrchu obrobku, dokonce i při snížení použité procesní kapaliny o 30 % v porovnání s konvenčním systémem chlazení.

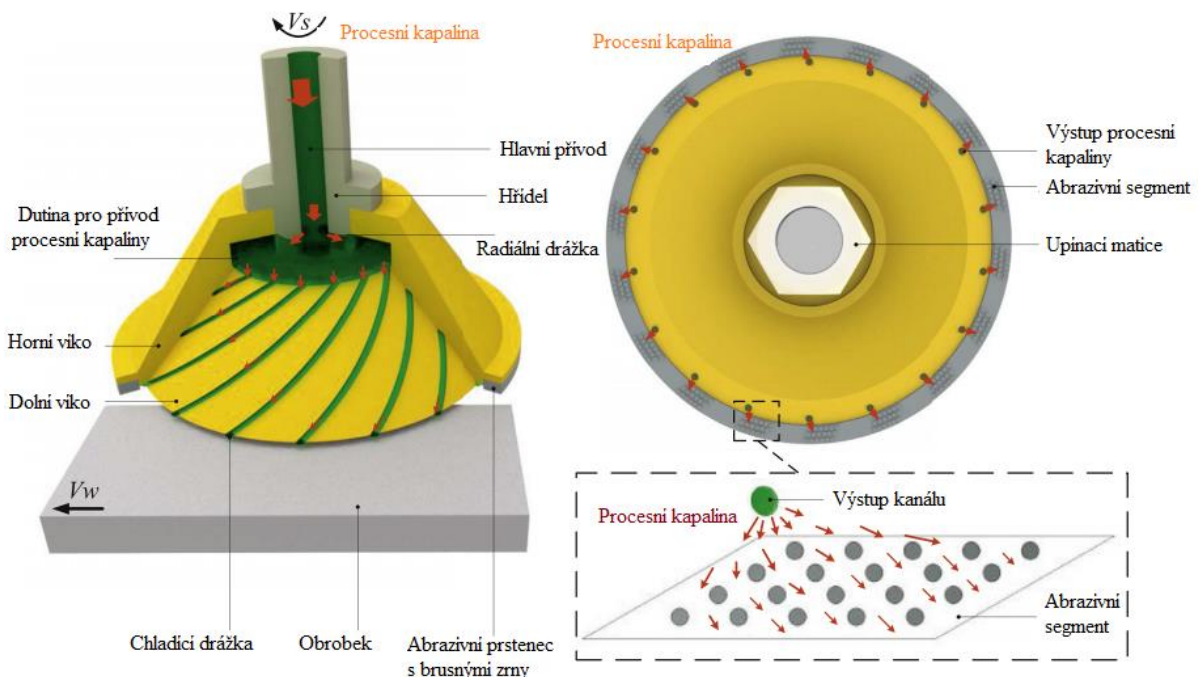
Adheze třísek na povrchu kotouče není přítomná a povrchová zbytková napětí způsobená tepelnými deformacemi byla eliminována. Konstrukční řešení segmentového kotouče lze vidět na obrázku 12 v příčném řezu. [33]



Obrázek 12: Pohled příčným řezem segmentovým kotoučem s komorami [33]

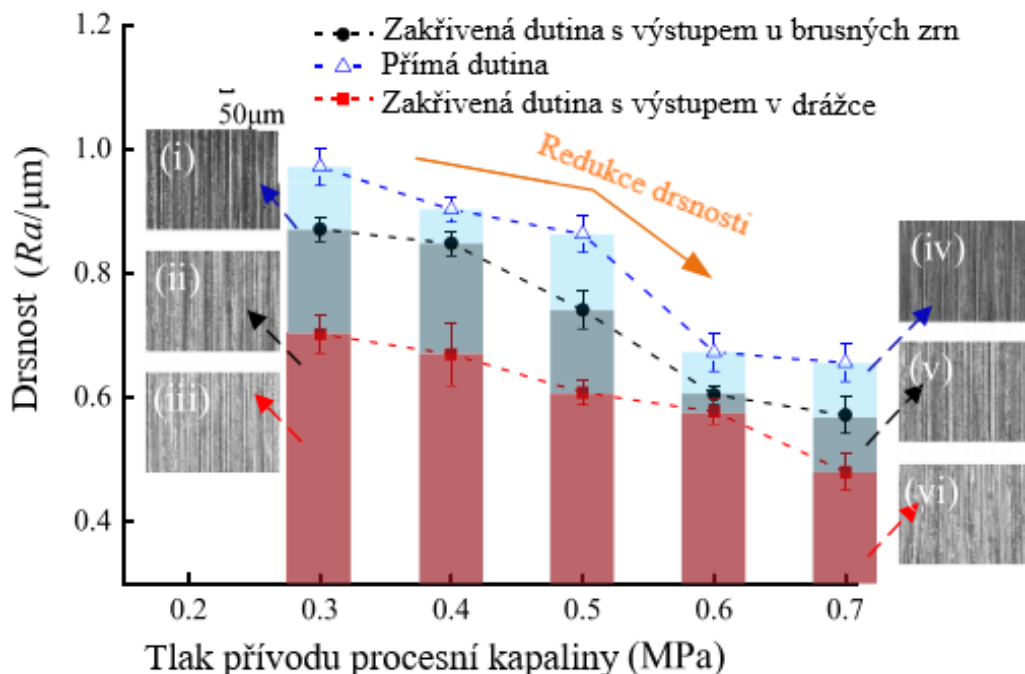
Jiný konstrukční typ brusného kotouče s vnitřním chlazením lze vidět na obrázku 13 používaný pro broušení Inconelu 718. Procesní kapalina je přivedena externím tlakovým zařízením skrze hlavní přívod do dutin v brusném kotouči, které mohou být lineárního přímého tvaru nebo jako v tomto případě zakřiveného tvaru. Otáčením brusného kotouče vzniká odstředivá síla, která vhání procesní kapalinu dále dutinami vysokou rychlostí a pod vysokým tlakem přímo do zóny broušení. Tento systém díky tomu eliminuje problém vzduchové bariéry, snižuje množství procesní kapaliny a rychle snižuje vytvářené teplo v místě styku kotouče s obrobkem.

Díky zakřiveným chladicím drážkám pro přívod procesní kapaliny je brusný kotouč při broušení Inconelu 718 vystaven maximální teplotě 61,5 °C a drsnost broušeného povrchu je snížena o více než 25 % oproti dřívějším brusným kotoučům s vnitřními chladicími drážkami v přímém směru. Výsledky měření drsnosti povrchu navíc ukázaly, že zakřivené drážky zesilují účinek proplachování třísek, čímž se prodlužuje životnost brusného prstence. [34]



Obrázek 13: Schématický obrázek brusného kotouče s vnitřním chlazením [27]

Na zlepšování jakosti broušeného povrchu má vliv zvýšení tlaku vstřikování procesní kapaliny, jak lze vidět na obrázku 14. Nejnižší drsnosti broušeného povrchu Inconelu 718 bylo dosaženo při nejvyšším tlaku přívodu procesní kapaliny (0,7 MPa) v zakřivené chladicí drážce s výstupem dutiny v drážce, což je prostor na abrazivním prstenci mezi brusnými segmenty. [34]



Obrázek 14: Drsnost povrchu s mikroskopickými snímky za jiného tlaku přívodu procesní kapaliny s odlišnými konstrukčními typy drážek [34]

2.4. Přívod procesní kapaliny do místa broušení

Broušení spotřebuje třikrát až pětkrát více řezné energie než jiné obráběcí operace, aby odstranilo stejný objem materiálu. Množství tepla, které vstupuje do obrobku musí být rychle ochlazeno, aby se zabránilo vzniku vysokých místních teplot a fázových transformací, které jsou zodpovědné za zbytková napětí v tahu, tvorbu bílé vrstvy, vrstvy oxidů a povrchové a podpovrchové praskání. Chlazení procesu se dosahuje dostatečným přívodem procesní kapaliny co nejpřesněji do místa řezu, kde může docházet k teplotám okolo 1000 °C při broušení Inconelu 718. V takto vysokých teplotách může dokonce docházet k odpařování samotné procesní kapaliny (film boiling), kdy se mezi obrobkem a kotoučem vytvoří pára, která silně brání přenosu tepla. Takto teplotně zatížený obrobek po ochlazení zanechává na povrchu hluboké zčernalé vruby. Tento efekt může nastat dokonce i při použití minerálních olejů, které mají i přesto vyšší bod odpařování. [20]

Přívod kapaliny do místa řezu je zpravidla přiváděn pomocí trysky a parametry charakterizující správnost přívodu jsou:

- Tlak [MPa, bar] – udává rychlost kapaliny.
- Průtok, množství [l/min] – spolu s teplotou řídí rychlost přenosu tepla do kapaliny.
- Směr – umožňuje kapalině překonat vzduchovou bariéru, která se pohybuje kolem kotouče.
- Výtoková rychlost [m/s] – udává rychlost výtoku kapaliny měřenou co nejbližší u výstupu trysky. [35]

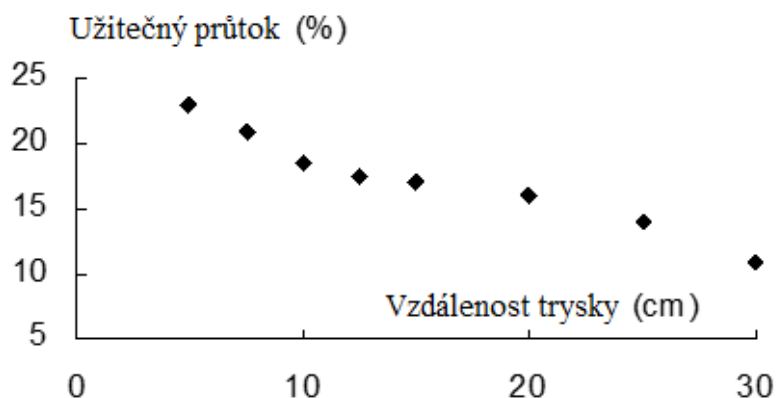
2.4.1. Tlak procesní kapaliny

Trysky jsou často zničeny při zvýšeném tlaku z čerpadla jen proto, aby se zvýšila rychlost proudu vytékající kapaliny. Potenciální energie v chladicí kapalině při jejím průchodu tryskou se přemění na kinetickou energii ve formě paprskového proudu, která je ovšem nižší než potenciální. Vztah mezi tlakem a výtokovou rychlostí určuje Bernoulliho rovnice a dá se díky ní tlak určit. Při broušení materiálu jako Inconel je důležité čištění kola stejně jako chlazení procesu. Materiál má totiž tendenci se nalepovat na brusný kotouč při vysokých teplotách. Zejména pak s méně kluznými chladicími kapalinami na bázi vody. Obecně se volí použití chladicí kapaliny o tlaku 4 až 5,5 MPa při průtoku 7,5 l/min. [36]

2.4.2. Průtok procesní kapaliny

Neexistuje žádný jednoduchý princip, který stanovuje požadavek na průtok pro uspokojivý brusný výkon. Mohlo by se zdát, že čím větší průtok tím lépe. Ovšem čerpání velkých objemů tekutin při zvýšeném tlaku vytváří teplo. Ideální je proto adekvátní dostatečný přísun procesní kapaliny. Pouze některé zdroje uvádějí dobře osvědčený model průtoku pro broušení, který aplikuje 5,7 až 7,6 l/min na výkon vřetena 800 W. Jednoznačně platí pravidlo, čím vyšší úběry materiálu a tím vyšší brusný výkon tím vyšší průtok. Při dokončovacím broušení načisto kde dochází k vysokým přesnostem povrchu a malým úběrům materiálu je v některých případech dokonce potřeba naopak snížit průtok.

Část průtoku ovšem nedosáhne brousícího kontaktu mezi nástrojem a obrobkem. Pouze tzv. užitečný průtok, který se dostane do místa broušení, může zabránit opotřebení, ucpání kotouče, udržet nízkou drsnost povrchu a zabránit nadměrným teplotám broušení. Při použití konvenční trysky se užitečný průtok rovná pouze 5–30 % průtoku změřeného u výstupu trysky. Tento užitečný průtok závisí na poloze trysky, rychlosti toku kapaliny vycházející z trysky a pórovitosti brusného kola. Bylo zjištěno že tento užitečný průtok v místě broušení obvykle zabírá přibližně 50% prostoru povrchových pórů kotouče. Kola s vyšší pórovitostí mají tendenci umožňovat vyšší procento užitečného průtoku než kola s nízkou pórovitostí. Průtok tvořený tryskou by měl být tedy 4x vyšší, než je dosažitelný užitečný průtok. Dle experimentální studie bylo také potvrzeno, že rychlost výtoku kapaliny z trysky by měla být 80-100% rychlosti otáčení brusného kola, aby odpovídala dosažitelnému užitečnému průtoku. Jakým způsobem ovlivňuje poloha trysky užitečný průtok lze vidět na obrázku 15. Čím dále je tryska nastavena od řezu tím se rapidně snižuje užitečný průtok. Proto obecně platí použití trysky s přívodem procesní kapaliny co nejbližší k brusnému kotouči. [32], [18]



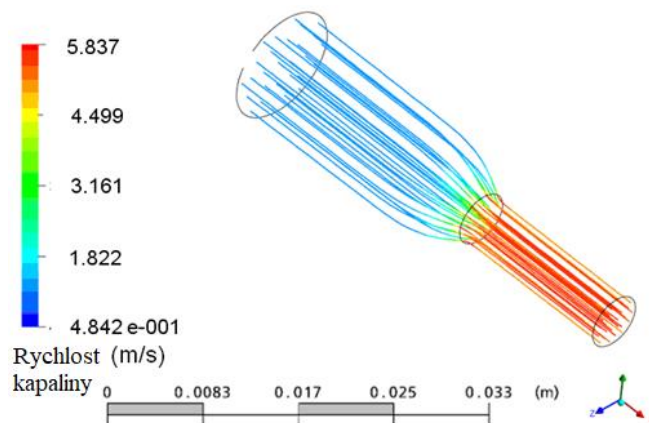
Obrázek 15: Závislost užitečného průtoku na vzdálenost chladicí trysky od místa řezu [32]

Kromě vzdálenosti mezi tryskou a brusným kotoučem je důležitá orientace paprsku vzhledem ke kotouči. Paprsek proudu by neměl směřovat přesně na brusný kotouč, ale měl by na něj mířit tangenciálně neboli tečně, přibližně mezi úhlem 10° až 25°. Dle experimentů vychází

s nejlepšími výsledky použití 10° . Příliš velký úhel nebo vzdálenost od povrchu kotouče způsobí odklonění kapaliny ven z místa broušení nebo se odrazí od povrchu nástroje a dojde k rozptýlení kapaliny. [37]

2.5. Zásady pro konstrukci chladicí trysky

Kromě výběru typu řezné kapaliny a strategie přívodu kapaliny je také důležité zvolit vhodný typ trysky za účelem zlepšení procesu broušení. Obecně se používá několik tvarově odlišných trysek lišících se podle způsobu chlazení. Nejčastěji se dělí podle dodaného objemu procesní kapaliny. Konvenční trysky pro vyšší dodání procesní kapaliny a nekonvenční trysky např. pro MQL strategii či naopak pro vysokotlaké chlazení s přesným paprskovitým tokem. Pro konvenční trysky, které se hojně využívají je důležitý výběr parametrů přívodu kapaliny jako je vysoký průtok z důvodu vzduchové bariéry, která může omezit přívod kapaliny do řezu. Hojně používaná tryska, která problém vzduchové bariéry eliminuje je tzv. shoe tryska, která je umístěná těsně u brusného kotouče a svým tvarem ho kopíruje. Navíc poskytuje delší kontakt mezi řeznou kapalinou a brusným kotoučem. Nicméně její nevýhodou je malá flexibilita. Speciální tryska s malým průměrem výstupu, díky kterému dochází k vysoké rychlosti řezné kapaliny se jmenuje Rouse/Webster tryska, viz. obr. 16. Tato hojně používaná tryska se vyznačuje konkávními vnitřními stěnami, které zlepšují soudržnost a vysokou koherenci toku řezné kapaliny, kterou má podle experimentů i teoretických výpočtů nejlepší oproti jiným konvenčním tvarům trysek. [38]



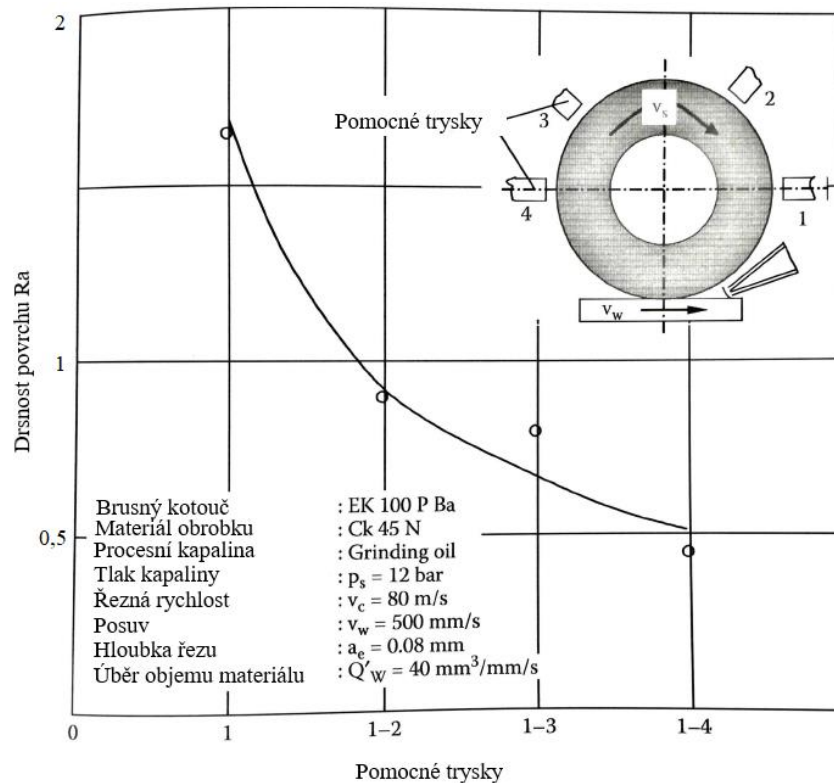
Obrázek 16: Vnitřní rychlost průtoku procesní kapaliny v Rouse/Webster trysce [32]

Provedení trysky má vliv na koherenci toku řezné kapaliny, která by měla být co nejméně turbulentní pro zvýšení množství tekutiny dodávané do kontaktní zóny a dále na dostatečné rychlosti řezné kapaliny vycházející z výstupu trysky pro proražení vzduchové bariéry. Turbulentní proudění lze zjistit podle Reynoldsova čísla, přičemž čím vyšší číslo tím větší turbulentní proudění, a tedy horší kvalita toku. Přívod chladicí kapaliny bude ovšem vždy turbulentní, laminární (vláknový) přívod kapaliny je vzácný a téměř se nevyskytuje. Turbulence a ztráta tlaku kapaliny vzniká totiž v ohybech přívodového potrubí, změnou průměru trubek či vysokou drsností vnitřních průměrů celého přívodového systému.

Několik konstrukčních principů dle literatury lze vidět níže:

- Výstup trysky s ostrými hranami a vstup trysky ideálně kulatý.
- Hladké, konkávní nebo parabolické přechody na konci trysky.
- Úhel větší než 7° pro všechny úkosy a přechody.
- Vysoká kvalita povrchu a drsnost uvnitř trysky.
- Co nejmenší přímá délka trysky. [38]

Kromě jedné trysky dodávající chladicí mazivo do kontaktní zóny se doporučuje použít pomocné trysky, někdy nazývané čistící trysky v radiálním směru ke kotouči. Jejich úkolem je odstraňovat třísky a další zatížení z povrchu kola, stejně jako hasit jiskry. Navíc přispívají ke snížení nalepování broušeného materiálu na brusný kotouč, což je jeden z problémů při broušení Inconelu 718. Účinnost závisí více na tlaku kapaliny než na objemovém průtoku. Typicky je maximální doporučený tlak s těmito čistícími tryskami 40–50 barů pro kotouče se skelnatým pojivem a pojivem na bázi pryskyřice a 100 barů pro odolnější elektrolyticky pokovené superabrazivní kotouče. Velikost průtoku závisí zejména na šířce kotouče. Ovšem použití příliš vysokého průtoku na sekundární pomocné trysce je v některých případech třeba se vyhnout, protože může snížit průtok z primární trysky z důvodu omezení čerpadla. Proud kapaliny by měl směřovat radiálně nebo mírně proti směru otáčení brusného kotouče, aby se účinně odstranily nalepené třísky z přední části brusného zrna. Na obr. 17 lze vidět snížení drsnosti broušeného povrchu podle počtu použití pomocných trysek. [23]



Obrázek 17: Vliv počtu pomocných trysek na drsnost povrchu při broušení [23]

K rozsáhlé úpravě trysek podle konkrétního úkolu broušení lze využít technologii 3D tisku. Při tvorbě trysky pomocí 3D tisku dochází k nesporným výhodám jako je geometrická volnost nezávislá na výrobě, která umožňuje generování mnohem složitějších geometrií, než je možné u konvenčních technologií. Tím je získáno dostatečné zásobení procesní kapaliny do místa broušení do hůře přístupných míst. Pomocí 3D tisku lze obejít problémy s montážním prostorem, kolizemi anebo třeba ztrátou třením v potrubí. Díky možnosti výroby trysky z jakkoliv složité geometrie, je možné docílit jedinečné trysky s dostatečně kvalitními parametry pro dosažení uspokojivého chladicího a mazacího efektu při broušení Inconelu 718.

3 Návrh vlastního řešení a jeho realizace

V této kapitole je představeno vlastní navržení experimentu s využitím znalostí nabytých z předchozí teoretické části. Cílem je dosažení co nejideálnějších podmínek při broušení těžce obrobitelného materiálu Inconelu 718 tak, aby se dosáhlo, pokud možno nejvyšší jakosti broušeného povrchu, především nízké drsnosti. Konkrétně se jedná o vnější broušení do kulata zkušební válcové tyčinky z Inconelu 718 na nástrojařské 5osé brusce. Tato práce se především zabývá problematikou přívodu chlazení k místu broušení. Předmětem této kapitoly je tedy navržení zvýšení intenzity chlazení a proplachu místa řezu pomocí nových chladících trysek pro přívod procesní kapaliny vyrobených pomocí 3D tisku. Díky dřívějším neuspokojivým výsledkům má tato cesta ke zlepšení podmínek u broušení Inconelu 718 velký potenciál. První část je zaměřena na analýzu problémů vyskytujících se u dřívějších experimentů provedených na Regionálním technologickém institutu (RTI) za stejných podmínek. V následující kapitole je prezentován návrh a design nových chladících trysek a jejich napolohování do místa řezu. Dále je popsán samotný experiment spolu s měřením a analýzou výsledků jako je plošná a profilová drsnost a metalografie pro zjištění tepelného zatížení broušeného povrchu.

3.1. Analýza problémů během dřívějších experimentů

3.1.1. Příčná vlnitost

Dřívější experimenty vnějšího broušení do kulata Inconelu 718 na nástrojařské brusce představily hned několik problémů, díky kterým broušený povrch nevykazoval uspokojivých výsledků. Jedním z nich byl výskyt tzv. příčné vlnitosti na broušeném povrchu, která se projevuje jako vznik plošek na obvodě válce, viz. obr. 18. Díky příčné vlnitosti může dojít k odchylkám drsnosti povrchu až v desítkách procent a svým ovlivněním povrchu může být dokonce zdrojem např. koroze. Vlnitost povrchu je vyvolána chvěním soustavy, nestejným orovnávaním a tím způsobenou excentricitou brusného kotouče nebo například kopírováním již předešlé vlnitosti povrchu při každém následujícím záběru.



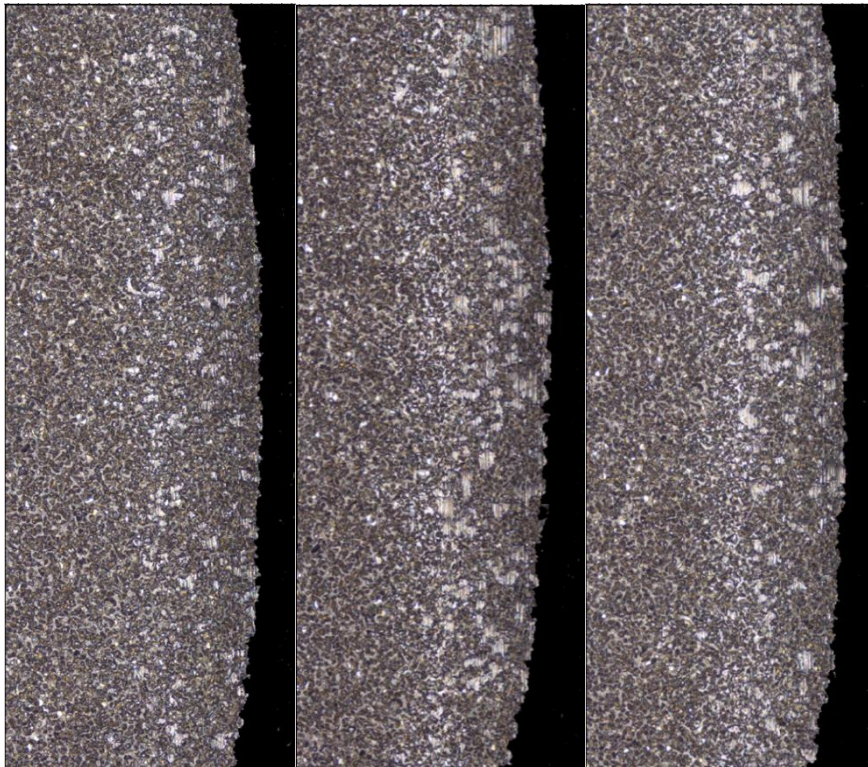
Obrázek 18: Detail broušeného povrchu Inconelu 718 s příčnou vlnitostí [10]

Poměrně velkou náchylnost k příčné vlnitosti mají tenkovrstvé kotouče, tj. kotouče s tenkou vrstvou abraziva např. CBN nanesené na nejčastěji kovové těleso nástroje. Tyto kotouče si často odnáší z výroby určitou chybu vlivem excentricity osy rotace kotouče. Žádný kotouč nelze ani vyrobit bez alespoň malé excentricity. Právě takový kotouč s jednou vrstvou CBN brusiva galvanicky pokovený byl použit při experimentu. S takovým kotoučem dochází k příčné vlnitosti díky poměru otáček mezi brousícím kotoučem a otáčející se součástí. Zrno brousícího kotouče s excentricitou pracuje na určitém poloměru r , jehož hodnota se mění a dochází ke změně tloušťky odebírané vrstvy povrchu obrobku ve frekvenci dané otáčkami brousícího kotouče. K nejvyšší vlnitosti dochází zákonitě v případě, že poměr tvoří celé číslo a jednotlivé body kotouče odebírají materiál na stále stejných místech obrobku. Velikost vlnitosti je dána velikostí excentricity brousícího kotouče. Změnou poměru otáček nástroje a obrobku došlo k eliminaci příčné vlnitosti. Zvolený poměr byl 5,28, který je použit i při experimentu v této práci, viz. rovnice 1. [13]

$$i = \frac{n[\text{ot/min}]}{n_f[\text{ot/min}]} = \frac{6366,2}{1206} = 5,28 \quad (1)$$

3.1.2. Zalepování kotouče

Dalším problémem bylo zalepování brusného kotouče díky čemuž nástroj ztrácí řezivost. Na obr. 19 lze vidět povrch CBN kotouče a průběh zalepení po prvním přejezdu (vlevo), po deseti přejezdech (uprostřed) a po dvaceti přejezdech (vpravo). U broušení Inconelu 718 je tento problém velmi častý z důvodu vysokých teplot v místě řezu. Za působení vysokých teplot dochází k nalepování horkých třísek na materiál kotouče a rychlému nabalování těchto třísek na sebe až vzniknou jakési hrudky na povrchu brusného kotouče. U super abrazivních materiálů jako je CBN je tento problém znatelnější, protože se méně opotřebovává díky vyšší tvrdosti, a tudíž neodpadávají zrna s nalepenými třískami během procesu pryč a dále se akumulují na povrchu kotouče. Navíc super abrazivní kotouče mívají nižší pórovitost čímž se docílí ještě snazšího nalepování třísek na povrch.



Obrázek 19: Zalepování brusného kotouče po 1 přejezdu, 10 přejezdech, 20 přejezdech [10]

Nejlepší způsob, jak zamezit nalepování kotouče je použití kvalitnějšího chlazení do místa řezu. Konkrétně zajistit rychlost přívodu procesní kapaliny z trysky stejné hodnoty jako je rychlost otáčení brusného kotouče. Dle literatury alespoň 80–100 % rychlosti brusného kotouče. Ovšem u vnějšího broušení do kulata v některých případech stačí menší rychlost. Další možností je použití kvalitní trysky v co nejbližším místě řezu tak, aby docházelo k účinnému snížení teploty třísek a povrchu obrobku a nástroje mezi nimi. Pokud rozhraní stroje dovolí nastavení více trysek, dobrou volbou je použití pomocných čistících trysek, které zaplavují pouze brusný kotouč. Zlepšení přívodu chladicí kapaliny významně pomáhá i při nalepování kotouče díky chemickým reakcím mezi materiálem brusného zrna a materiálem obrobku. V této práci díky zoptimalizovanému přívodu procesní kapaliny pomocí navržené nové trysky, lze problém zalepování nástroje při broušení Inconelu 718 odstranit.

3.2. Návrh a konstrukce trysek pro přívod procesní kapaliny

Jeden z klíčových prvků pro dostatečné chlazení v místě broušení je design samotných trysek pro přívod procesní kapaliny. Vhodná kvalitní tryska dokáže regulovat teplotu součásti, udržovat brusný kotouč čistý a správně odvádět třísky z místa broušení, což jsou kritéria, které je potřeba při broušení Inconelu 718 hlídat. V extrémních případech může být proces broušení u drahého kvalitního stroje vybaveného sofistikovaným filtračním systémem s použitím drahého CBN kotouče ohrožen pouze špatně zvolenými tryskami. Často používané plastové modulární trysky mohou být dostačující při nízkých tlacích a broušení s lehce brousitelnými materiály. Avšak při vyšších tlacích nemusí vykazovat dobré stability, a navíc je potřeba umístění takové trysky blízko k místu broušení z důvodu rozptýleného nekvalitního toku proudu.

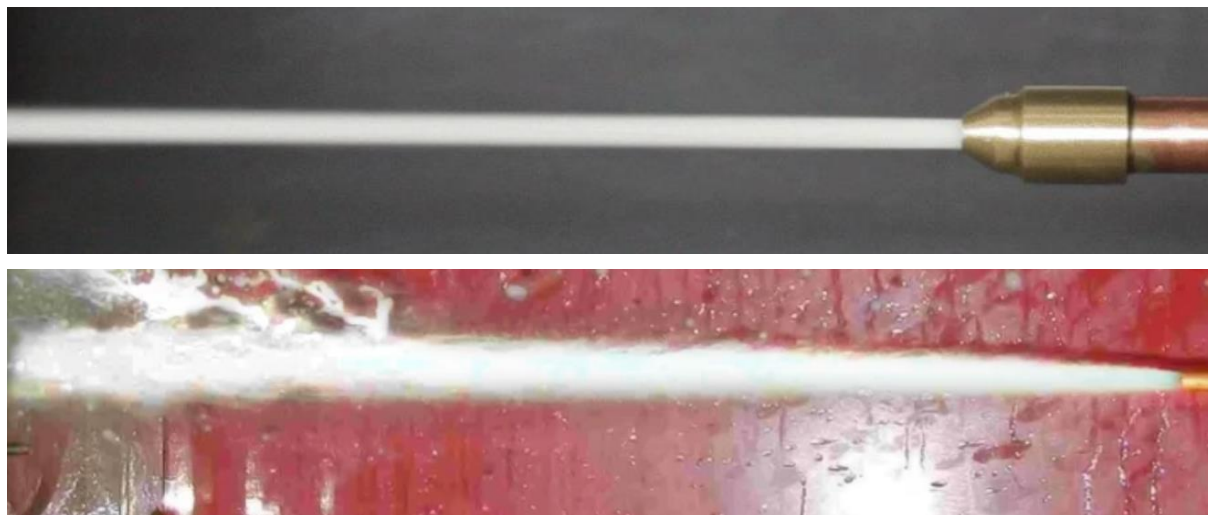
To samé platí i pro přívod kapaliny pomocí pouhých kovových nebo často měděných trubek, které jsou používány i na nástrojařské brusce pro tento experiment. Tyto hojně používané trubky jsou nevhodné především díky rozptýlenému toku proudu, který nemusí postačit pro dostatečný přívod kapaliny do místa broušení. Děje se tak z důvodu otřepů na vyústění trubky z důvodu předešlého nařezání trubky na požadovaný rozměr. Ohýbání a drcení konce trubek obsluhou pro zmenšení průměru vyústění, aby docházelo ke zvýšení tlaku přiváděné kapaliny má bohužel často opačný nežádoucí efekt. Dochází k ještě většímu rozptýlenému toku procesní kapaliny, který může být více než 10krát větší v místě mezi brusným kotoučem a obrobkem než tloušťka toku u vyústění trubky. Takto rozptýlený nekoherentní proud kapaliny nezajistí dostatečný tlak a chlazení v místě broušení. Použití měděných trubek s ručně ohýbanými konci na nástrojařské 5osé brusce ANCA MX7 lze vidět na obr. 20.



Obrázek 20: Ukázka neefektivního použití ručně zdeformovaných trubek pro přívod procesní kapaliny

Jedním z řešení je použití trubek s připájenou vhodně zvolenou tryskou na konci pro zajištění koherentního paprsku proudu, viz. obr. 21. Efektivní použití této trysky zahrnuje mnoho výhod jako je:

- Zvýšený tlak, který zajišťuje vysokou rychlost proudění kapaliny čímž se odstraní vzduchová bariéra na obvodě kotouče, zlepši čištění brusného kotouče a zvýší se účinnost chlazení místa broušení.
- Trysku lze umístit dále od místa broušení s menší pravděpodobností poškození trysky.
- Koherentní paprsek proudu je lépe soustředěn do kritického místa broušení, kde dochází k vysokým teplotám, čímž se zvyšuje užitečný průtok a snižuje spotřeba celkového průtoku.

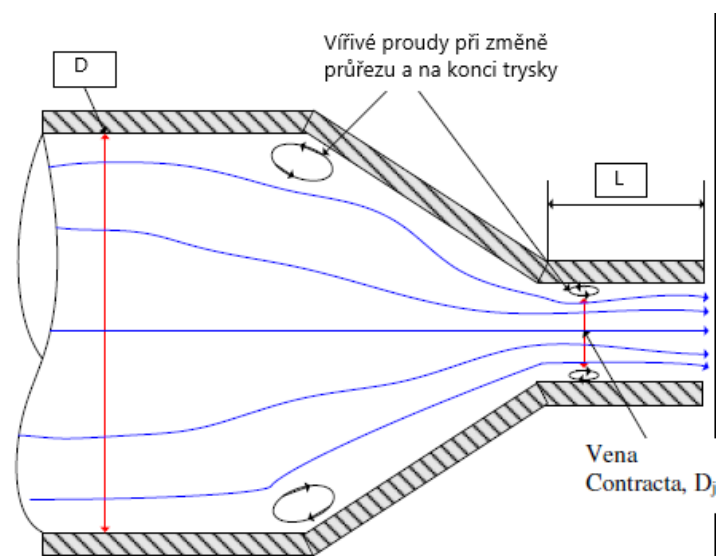


Obrázek 21: Porovnání použití vhodné trysky připojené na měděné trubce s koherentním paprskem proudu oproti použití samostatné měděné trubky [39]

3.2.1. Design Webster/Rouse trysky

Trysky s koherentním paprskem proudu poskytují lepší brusný výkon, protože koncentrují vyšší množství procesní kapaliny do místa broušení. Jejich výhoda spočívá v laminárním proudění, respektive jejich design tvaru zajišťuje nižší Reynoldsovo číslo protékající kapaliny a tím dochází ke kvalitnějšímu koherentnímu proudu. Samozřejmě na velikost Reynoldsova čísla a tím kvalitu proudu má vliv i typ protékajícího média, konkrétně jeho viskozita. Vnitřní geometrie tvaru těchto trysek poskytuje nízkou disperzi a tím nedochází k nežádoucímu přísunu vzduchu do paprsku proudu procházejícího tryskou.

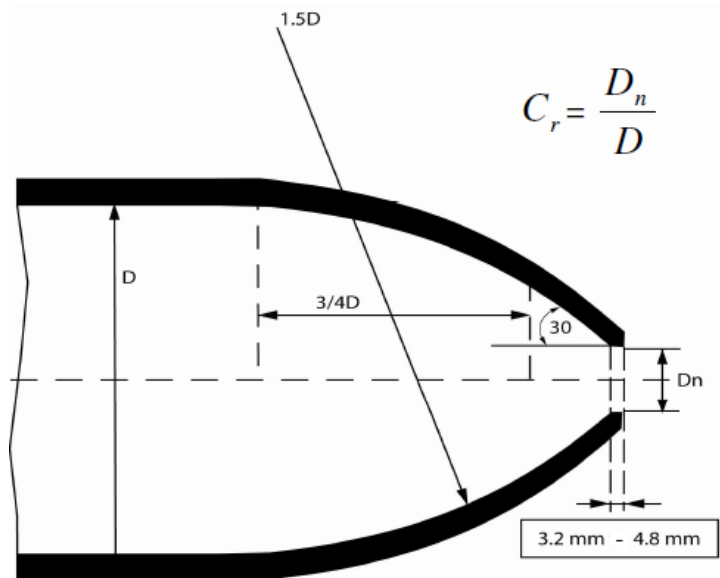
Nepříznivou geometrii trysky lze vidět na obr. 22. Jedná se o častý problém u chlazení pomocí měděných trubek či konvenčních nedostačujících trysek. Uvnitř trysky dochází k tzv. efektu „vena contracta“, ke kterému dochází typicky na vyústění či u náhlé změny řezu. Tekoucí kapalina se přestane držet okrajů u vyústění otvoru, čímž se zmenší samotná velikost otvoru. U typického otvoru může tento efekt zmenšit průměr až o 60-80% velikosti. Dochází k tvorbě vířivých proudů, tekutina se pohybuje pozadu v kruzích a tím se zvyšuje rozptýlení paprsku proudu. [40]



Obrázek 22: Geometrie konvenční trysky s fenoménem "vena contracta" [40]

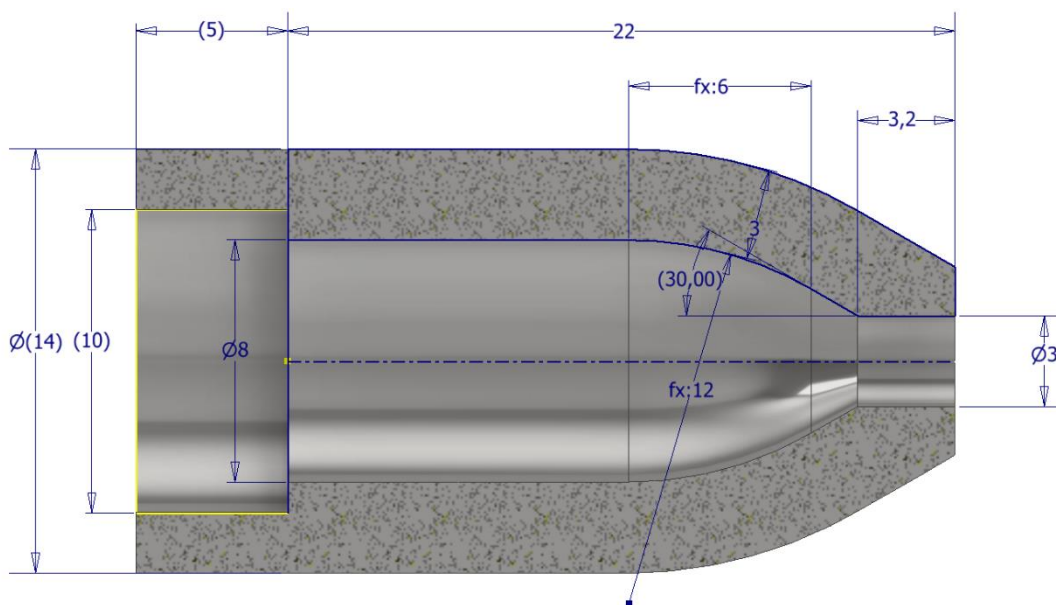
Pro odstranění těchto problémů Webster a kol. v roce 1995 navrhli nový design trysky pro přívod chladicí kapaliny založený na designu požární hadice od Rouseho a kol. z roku 1952. Použitím této trysky došlo dle studie [41] ke zlepšení produktivity o 40% při broušení Inconelu 718 na plocho. Pro koherentní paprsek proudu tato konstrukce vyžaduje:

- poměr kontrakce C_r (poměr vstupního D a výstupního průměru D_n) alespoň 2:1,
- co nejpřesnější a nejvyšší jakost povrchu vnitřních stěn,
- ostrý výstup trysky,
- použití konkávní vnitřní stěny místo často přítomných konvexních tvarů stěn u konvenčních trysek, viz. obr. 23.



Obrázek 23: Design koherentní trysky podle Rouseho z roku 1952 [40]

Dle experimentů a studií design Webster/Rouse trysky je vysoce účinný a s jeho použitím lze docílit dobrých výsledků. Z toho důvodu je konstrukce a design trysky v této práci založena primárně na této trysce. Design je proveden v CAD programu Autodesk Inventor 2020 a samotnou trysku s rozměry lze vidět na obr. 24.



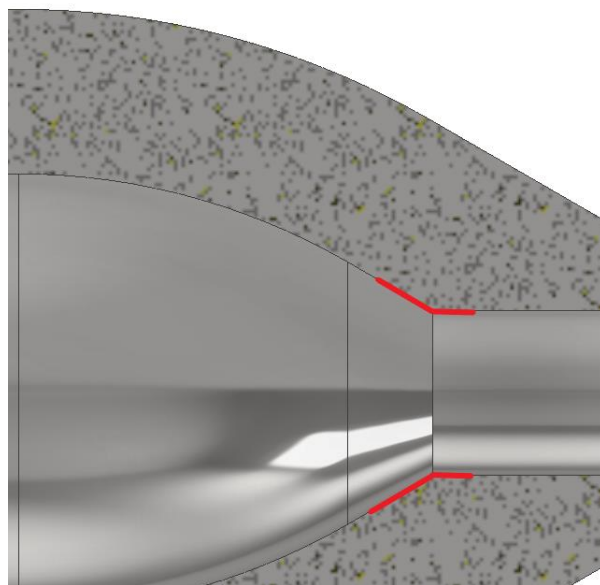
Obrázek 24: Design navržené trysky pro experiment v programu Inventor

Tento design je použit pro primární trysku, která má zajistit dostatečné uchlazení v místě broušení a kvalitní mazací účinek. Vstupní průměr 8 mm je volen dle vnitřního průměru měděné trubky, ke které bude tryska přilepena. Trubka bude přilepena za osazení na délce 5 mm o průměru 10 mm, což je vnější průměr trubky. Koncový výtokový průměr je zvolen 3 mm v délce vyústění 3,2 mm. Pro dostačující zaplavení CBN kotouče o tloušťce 10 mm se zaoblenými rohy je paprsek proudu o tloušťce 3 mm vhodný díky tenkému dotyku kotouče s obrobkem. Ovšem je dobré mít na paměti že skutečný průměr proudu bude o něco menší z důvodu efektu tzv. vena contracta. Poměr vstupního průměru trysky a koncového průměru, který by měl být větší než 2:1 aby došlo ke kvalitnímu toku kapaliny je tedy:

$$C_r = D : D_n = 8 : 3 \Rightarrow \text{poměr kontrakce } C_r > 2 : 1$$

Vnitřní geometrie trysky je ve tvaru poloměru inspirovaná dle Webstera. Dle studie [42], která se zaměřila na výběr nejefektivnějšího vnitřního tvaru trysky u broušení do kulata došlo k závěru, že nejlepších výsledků dosahuje právě tvar rádiusu či splíny se snižujícím se průměrem u vyústění. Tato tryska zaobleného tvaru s vnitřními konkávními stěnami je schopna zaručit lepší soudržnost paprsku minimalizující výskyt poklesu tlaku a turbulence během průchodu a výstupu rezné kapaliny.

Tvar výstupního okraje trysky má významný vliv na kvalitu paprsku proudu a měl by být perfektně ostrý bez jakéhokoliv zaoblení, viz. obr. 25 (žluté zvýraznění). Zaoblení na tomto důležitém okraji, které se často objevuje u konvenčních trysek vytváří malý konvexní tvar vytvářející oddělování proudu u výstupu z trysky a tím dochází k jeho degradaci.



Obrázek 25: Ostrý přechod výstupu trysky

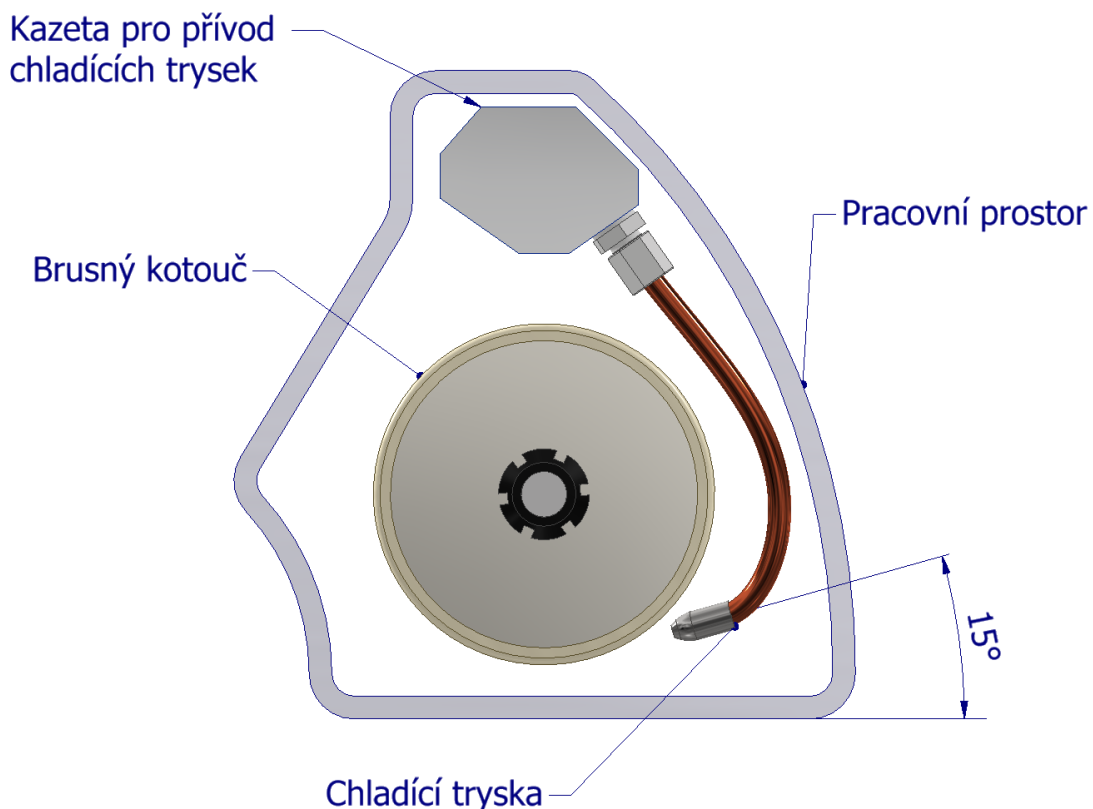
Povrch vnitřní geometrie trysky by měl být co nejnižší drsnosti, nejlépe tedy kvalitně opracován pro vysokou kvalitu povrchu. Působení proudící tekutiny na stěny trysky má vysoký vliv na kvalitu proudění, aby docházelo k co nejmenšímu turbulentnímu proudění. Kapalina má totiž tendenci přilnout k povrchu a sledovat tvar povrchu díky účinkům třecích sil. Takové kapaliny přiléhající k povrchu tělesa se říká mezní vrstva a na její pohyb má také vliv její viskozita. V blízkosti stěn je její rychlost nulová. Třením o povrch zhoršené kvality se snižuje rychlost proudění.

3.2.2. Orientace a poloha Webster/Rouse trysky

V praxi je poloha trysek často víceméně nedefinovaná, resp. napolohování trysky je uskutečněno bez jakýchkoliv pravidel či regulí pouze podle zkušeností obsluhy. Přitom správné umístění zlepšuje přísun procesní kapaliny do místa broušení tím, že zajišťuje, že brusný kotouč může tekutinu zachytit a vtáhnout ji do oblasti styku s obrobkem. Dnes se např. s úspěchem používá nainstalovaný laserový zaměřovač těsně nad tryskou pro jednodušší odhad míření paprsku proudu. Dle literatury ovšem neexistuje jednotné správné řešení s uspokojivými výsledky, především díky několika proměnným hrajících rolí ve výsledcích jako je variabilita viskozit řezných kapalin a jejich rychlostí na výstupu z trysek, jakož i pórovitosti brusných kotoučů.

Nejčastější přístup s kladnými výsledky je trysku přivádět tangenciálně k brusnému kotouči v úhlech od 5° až 30° . Avšak uvádí se, že úhel polohy trysky vůči horizontální rovině nemá takový vliv oproti jiným proměnným. Dalším kritériem je výška trysky ve vzdálenosti od styku brusného kotouče s obrobkem. Ve většině případech se využívá pravidlo co nejnižší, tedy co nejbližší k místu broušení, tím lépe. Při experimentech broušení na plocho se toto pravidlo potvrdilo. Ovšem během broušení do kulata při experimentu [42] nejlepších výsledků došlo ve výšce trysky 12mm. Co se týče horizontální vzdálenosti trysky od brusného kotouče platí podle experimentů, čím blíže k brusnému kotouči, tím lépe.

Navržená poloha trysky pro případ experimentu této práce je na obr. 26 v programu Autodesk Inventor 2020. V úvahu je bráno ohraničení pracovního prostoru nástrojářské brusky ANCA MX7, tak aby nedošlo ke kolizi chladicího systému s kinematikou stroje a v samotném zásobníku stroje. Poloha trysky je zvolena v úhlu 15° tangenciálně k obvodu brusného kotouče mířící co nejpřesněji do pomyslného kontaktu brusného kotouče a obrobku. Tryska je mířena více na brusný kotouč než na samotný obrobek pro efektivnější proražení vzduchové bariéry proudící kolem kotouče.

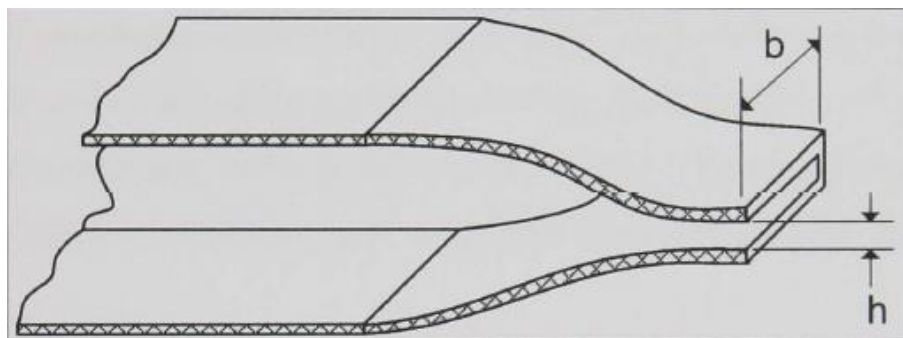


Obrázek 26: Návrh a design trysky v pracovním prostoru stroje

3.2.3. Design pomocné trysky pro čištění brusného kotouče

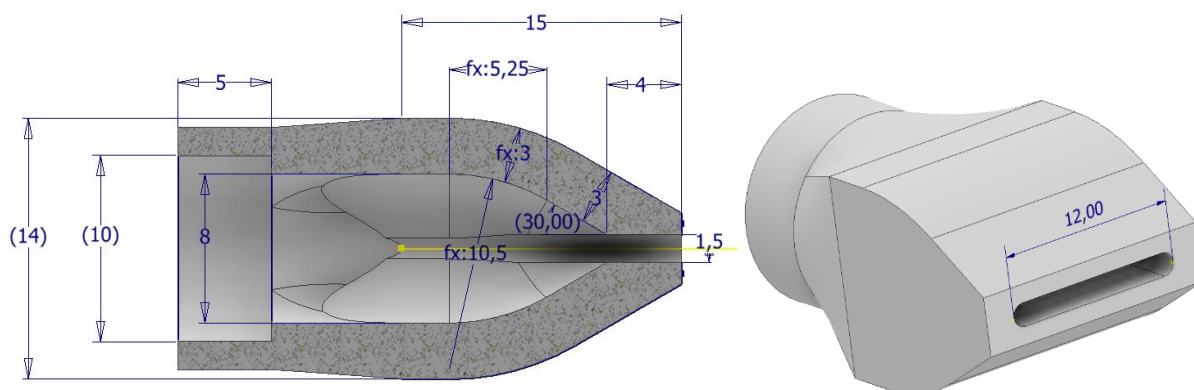
Jak již bylo probráno v teoretické části a prakticky dokázáno v dřívějších experimentech, viz. obr. 19, zalepování brusného kotouče při broušení Inconelu 718 je velmi častý jev. Existuje hned několik řešení, jak zabránit nalepování kotouče. Například použití vyšší pórovitosti samotného kotouče, což ovšem může způsobit jeho menší tvrdost. Opakované orovnávání kotouče vhodné pro CBN kotouče, které nemusí být tak účinné a snižuje produktivitu procesu. Nejlepší metodou je čištění brusného kotouče chladicí kapalinou pomocí čistících trysek, což má za následek i celkového zlepšení kvality broušeného povrchu a zvýšení brusného výkonu.

V této práci je použito speciální čistící trysky s navrženým designem a polohou trysky vůči brusnému kotouči. Dle experimentů lepších výsledků dosahuje při čištění kotouče tvar trysky vejřívitého/obdélníkového tvaru namísto klasického kulatého tvaru který je použit například u hlavní trysky. V této práci je zvolen tvar profilu přizpůsobený Webster/Rouse trysce pouze s obdélníkovým výstupním otvorem namísto kruhového, viz. obr. 28. Poměr mezi šířkou b a výškou h výstupního otvoru by měl být alespoň $\frac{b}{h} > 6$ pro dosažení nejvyšší koherence paprsku proudu, viz. obr. 27. [43]



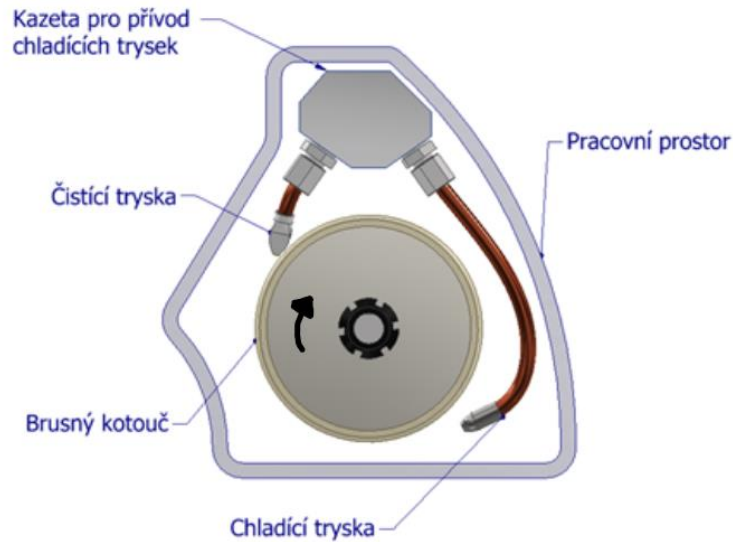
Obrázek 27: Optimalizovaný tvar obdélníkové trysky podle Webster/Rouse trysky [43]

Vzhledem k použití brusného kotouče tloušťky 10mm je zvolena šířka výstupu trysky b 12mm tak, aby dostatečně zaplavila kotouč po celé šířce. Výška výstupního otvoru h je pro dosažení poměru vyššího než 6, (viz. předchozí odstavec) zvolena 1,5mm. Navržená tryska s danými rozměry je zobrazena níže na obr. 28.



Obrázek 28: Design navržené čistící trysky v CAD softwaru

Tryska by měla být orientována proti směru otáčení kotouče tak aby docházelo k odstranění třísek z přední části brusných zrn. Navržení polohy čistící trysky spolu s primární chladicí tryskou lze vidět na obr. 29. Jedná se o pracovní prostor CNC nástrojářské brusky ANCA MX7, která je použita v experimentu.

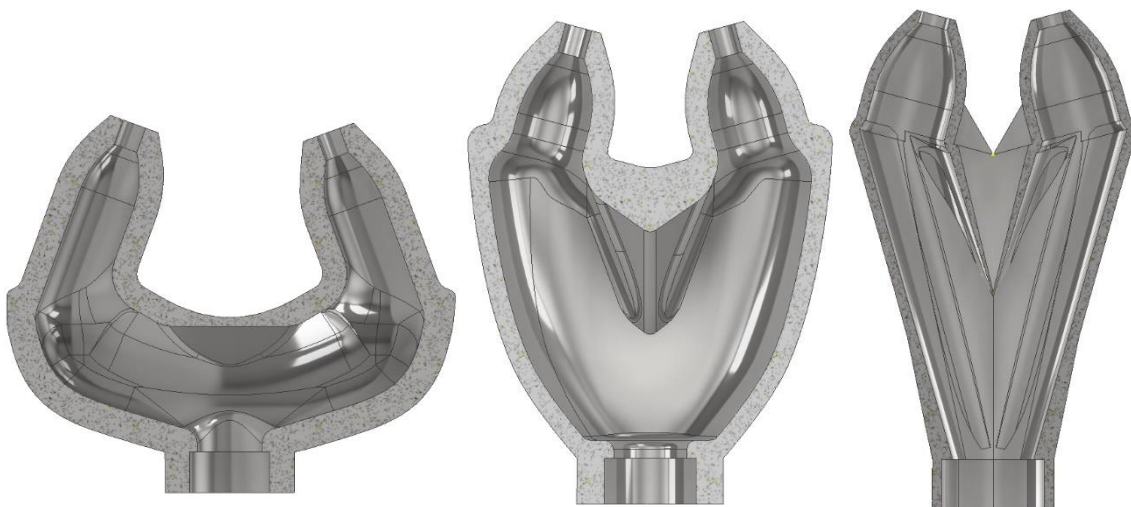


Obrázek 29: Návrh a design čistící trysky v pracovním prostoru stroje

3.2.4. Návrh a design dvoutryskových rezervoárů

Pro experiment broušení Inconelu 718 za pomoci nových tištěných trysek je navíc k čistící trysce a jednoduché chladící primární trysce zvolena varianta tří prototypů rezervoárů s dvojitým vyústěním v podobě designu Webster/Rouse trysky. Jedná se o takové větší objemnější trysky s dvojitým paprskem proudu, díky čemuž lze paprsek směřovat na dvě místa. Důvodem pro návrh takovýchto dvojitých trysek (rezervoárů) je, pokud možno směřovat jeden paprsek chlazení na přední rádius zaoblení kotouče (první rádius vstupující do řezu) a druhý paprsek na přilehlou spojovací rovinnou plošku mezi zaobleními. Tyto dvě plochy kotouče jsou nejvíce času v záběru a nejvíce se stýkají v místě řezu s materiálem.

Jsou provedeny tři druhy lišící se primárně tvarem, jak lze vidět dle obr. 30. Společným představitelem pro všechny tři návrhy je stejný tvar dvojitého vyústění, čímž je v podstatě Webster/Rouse tryska a objem hlavní komory, která by měla být vyšší než objem daného dvojitého vyústění. Osazení pro přilepení měděné trubky je stejné jako u předešlých trysek. Napolohování rezervoárů je navrženo stejně jako u primární chladící trysky dle obr. 26. Modely všech trysek jsou vloženy na CD v CAD formátu STEP.



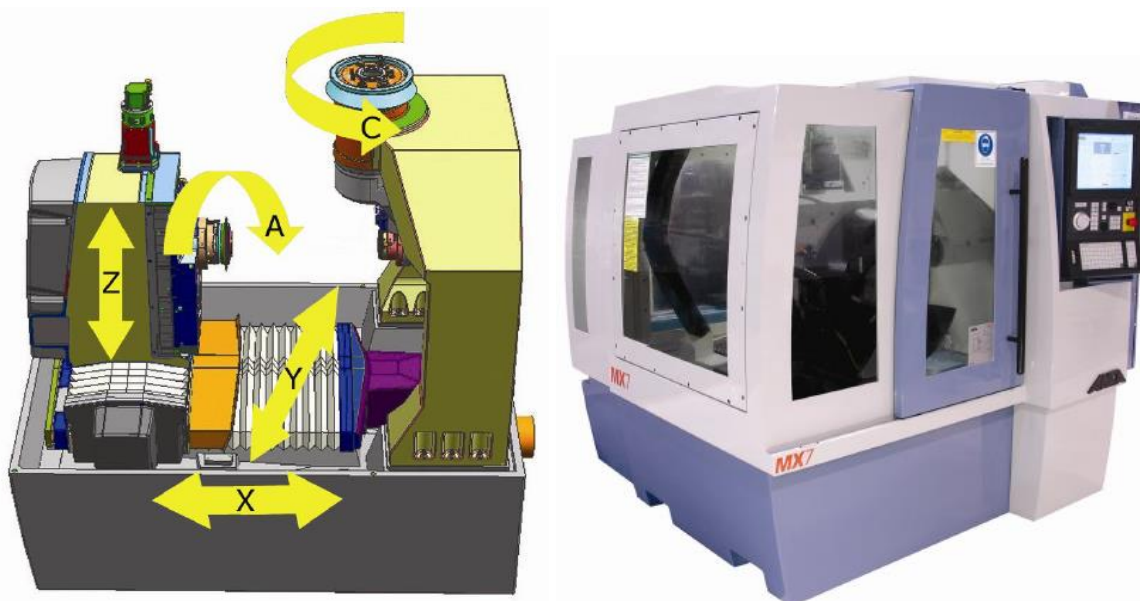
Obrázek 30: Design dvoutryskových rezervoárů použitých v experimentu zobrazených v řezu: Rezervoár I (vlevo), Rezervoár II (uprostřed), rezervoár III (vpravo)

3.3. Použité vybavení experimentu a vstupní faktory

Experimentální testování vlivu přívodu chlazení pomocí tištěných trysek na integritu povrchu při broušení bylo provedeno v halových laboratořích Regionálního technologického institutu (RTI). V této kapitole je představeno vybavení a vstupní podmínky pro provedení experimentu.

3.3.1. Nástrojářská bruska ANCA MX7

Samotný experiment broušení je proveden na nástrojářské brusce ANCA MX7, která je primárně určena pro broušení a ostření řezných nástrojů od průměru 0,5 mm, ale dá se využít při broušení jakýchkoliv tvarově složitých obrobků. Především díky číslíkovému řízení a pohybu v 5 osách. Tři pohyby v lineárních osách X, Y, Z a dva pohyby rotační A a C, jež je jediný pohyb, který vyvozuje nástroj, tedy brusný kotouč, viz. obr. 31.



Obrázek 31: Kinematika nástrojářské brusky ANCA MX7 (vlevo) a samotný stroj zvnějšku (vpravo)

Díky svému primárnímu účelu, čímž je přesné broušení řezných nástrojů, lze do vřetena stroje vkládat pouze již předpřipravené obrobky s přesností alespoň h6. Proto je tato bruska nevhodná pro klasické konvenční broušení nepřesných polotovarů. Stroj používá software iGrind přímo od výrobce ANCA specializovaný pro broušení řezných nástrojů. Pro zobrazení simulace programu broušených drah slouží program CIMulator3D, který lze vidět na obr. 41, kde je spuštěna simulace broušení zkušební vzorku pro tento experiment.

Možnost kontroly a programování přívodu chlazení je bohužel u tohoto stroje omezená, proto nelze operovat s tlakem přívodu chladicí kapaliny a ani určit jeho hodnotu u výstupu z trysek. Chladicí systém je řešený externě mimo stroj napájený samostatně. Jednotka používá systém filtrace od jiné společnosti s minimální potřebnou údržbou a maximálním tlakem čerpadla 120 Bar. Chlazení je přiváděno do prostoru stroje pomocí kazety s několika výstupy pro připojení měděných trubek s tryskami. Poloha jednotlivých trysek z kazety musí být ověřena na externím přípravku, aby se zabránilo kolizím během provozu, a především kolizím ve výměníku brusných sestav. Přípravek kde lze nastavit kazetu s brusným kotoučem a tryskami lze vidět na obr. 32. Používaným chladicím médiem je minerální olej dle normy DIN 51524/525 s doporučenou viskozitou 46 mm²/s při 40 °C dle ISO – VG 46. Řezné oleje na bázi ropy jsou zakázány pro nebezpečí výbuchu. Součástí celého chladicího systému je aktivní odsávání mlhy přiváděné ze stropu stroje kvůli bezpečnosti díky obecně vysokému riziku výbuchu při použití řezného oleje.

3.3.2. Brusný kotouč

Pro experiment byl použit brusný kotouč z CBN brusiva s galvanickým pojivem (jedna vrstva brusiva nanesená na ocelové tělo) od společnosti CAFRO a jeho specifikaci lze vidět v tab. 4 a samotný kotouč je zobrazen na obr. 32.

Tabulka 4: Specifikace brusného kotouče

Tvar kotouče	Průměr [mm]	Šířka kotouče [mm]	Rádus [mm]	Brusivo	Zrnitost	Pojivo	Upínací průměr [mm]
1LL1	150	10	3	CBN	B46	Galvanické	20

Kotouč má rovný obvodový tvar se zaoblenými rohy s rádiusem 3 mm. Rovná část uprostřed kotouče zajistí lepší překrytí drah a dochází k lepší drsnosti při vyšších posuvech. Zaoblené části profilu umožňují broušení složitějších tvarů. Brusné kotouče z CBN brusiva galvanicky pokovené vykazují velmi dobré výsledky při broušení Inconelu 718 především při použití chlazení jako minerální olej s kterým dochází o několikanásobnou vyšší životnost kotouče oproti použití chlazení na bázi vody. Pro broušení Inconelu 718 při chlazení pomocí minerálního oleje je proto tento typ brusného kotouče ideální volba. [23]



Obrázek 32: Rádusový CBN brusný kotouč 1LL1 (vlevo) + přípravek brusné sestavy (vpravo)

3.3.3. Experimentální vzorek

Experiment broušení se provádí na tištěném Inconelu 718 pomocí 3D tiskové technologie DMLS z práškové niklové slitiny s označením EOS NickelAlloy IN718 od společnosti EOS GmbH. Vzorek je v podobě tyčky s pozvolným zúžením uprostřed a je předpřipraven v přesnosti h6 pro správné upnutí do nástrojářské brusky. Experiment broušení a samotné měření výsledků probíhá pouze v místě zúženého profilu (v krčku). Průměr tyčky je 10 mm v místě krčku je průměr 5 mm a celková délka je 123 mm. Každý vzorek má na čele svoje vlastní číslo vypálené laserem pro jeho identifikaci v experimentu a při vyhodnocení výsledků.



Obrázek 33: Experimentální vzorek v podobě tyčky z tištěného Inconelu 718

3.3.4. Řezné podmínky

Vzhledem k tomu, že cílem experimentu je zvýšení kvality broušeného povrchu pomocí zlepšení přívodu procesní kapaliny, všechny ostatní řezné podmínky jsou konstantní po celou dobu experimentu. Parametry řezných podmínek jsou zvoleny podle minulých experimentů broušení Inconelu 718 na RTI, za kterých docházelo nejvyšší jakosti povrchu a jsou vypsány níže dle tab.5.

Tabulka 5: Parametry řezných podmínek pro experiment broušení

Parametr	Hodnota
Řezná rychlost v_c	50 [m/s]
Otáčky brusného kotouče n	6366,2 [ot/min]
Otáčky obrobku n_f	1206 [ot/min]
Poměr otáček n/n_f	5,28
Posuvová rychlost v_f	100 [mm/min]
Hloubka řezu a_e	0,01 [mm]
Strategie broušení do kulata	Sousledné
Procesní kapalina	Syntetický olej SintoGrind IG 540

3.4. Přípravy a realizace experimentu

3.4.1. 3D tisk trysek

Pro provedení experimentu broušení Inconelu 718 je zapotřebí nejprve zhotovit samotné trysky pro přívod řezného oleje do místa řezu. Trysky jsou vyrobeny pomocí 3D tisku díky čemuž lze využít nesporné výhody této inovativní technologie jako je geometrická volnost nezávislá na konvenční výrobě, která umožňuje generovat mnohem složitější tvary. Díky tomu je návrh designu trysek takřka neomezuující a lze zkonstruovat trysky, které by nebylo možno vytvořit konvenční technologií.

Navržené trysky jsou vyrobeny na 3D tiskárně kovů EOS M290, která pracuje na principu technologie DMLS, viz. obr. 34. Tato technologie vytváří kovové díly postupným vrstvením jemných vrstev práškových kovů, kde je materiál roztaven pomocí koncentrovaného paprsku energie, v tomto případě paprsku laseru. Každá vrstva se taví tak, aby přesně zapadala do definované geometrie modelu 3D CAD. Proces umožňuje rychlou výrobu dílců velmi složitých tvarů bez jakýchkoliv nástrojů nebo přípravků a bez odpadního materiálu.

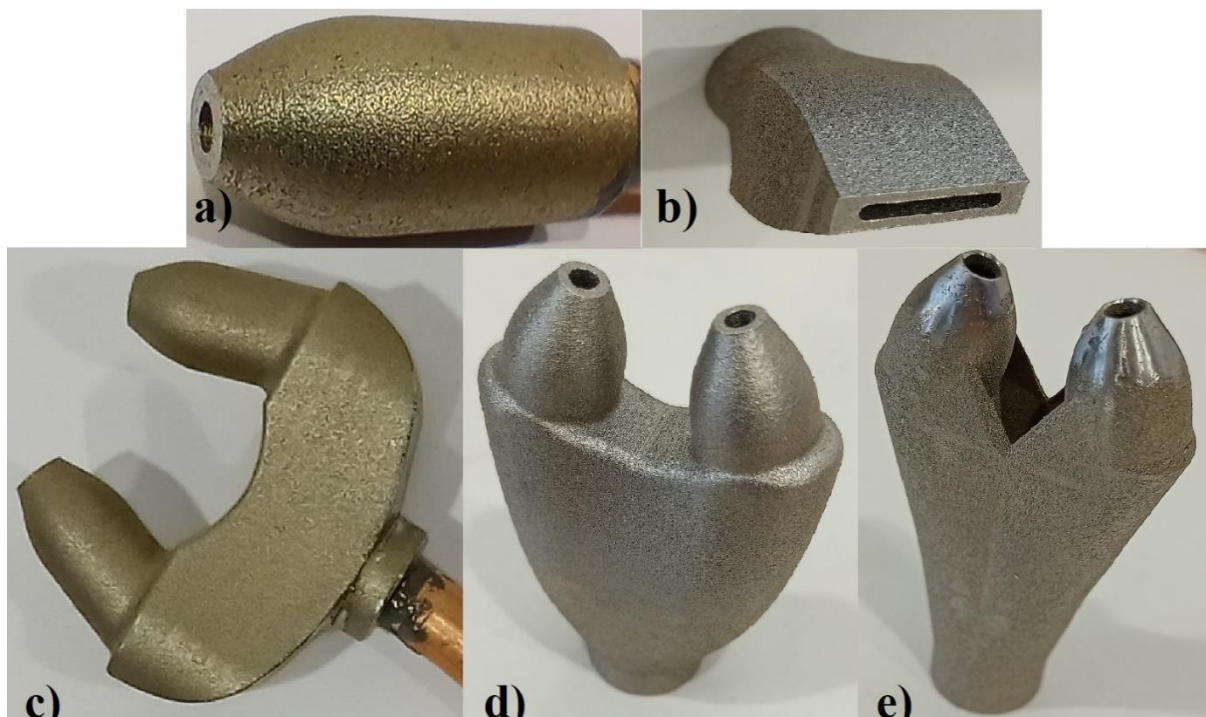
Pro výrobu kovových dílů tiskárna na RTI v současnosti používá nástrojovou ocel MS1, Inconel 718 a nerezovou ocel 316L. Pro případ tištění trysek pro tento experiment byl vybrán prášek z nerezové oceli 316L tištěný po 40 μ m vrstvách. Jedná se o vysoce houževnatou a pevnou austenitickou nerezovou ocel legovanou molybdenem pro zvýšení koroze. Pro případ trysek přivádějících chladicí kapalinu v obráběcím stroji naprosto dostačující.



Obrázek 34: 3D tiskárna EOS M290

Pro experiment byly vytištěny všechny navrhované trysky z předešlých podkapitol, tedy primární Webster/Rouse tryska, obr. 35 a), čistící pomocná plochá tryska na čištění a ochlazování brusného kotouče, obr. 35 b) a tři dvoutryskové rezervoáry, obr. 35 c), d), e).

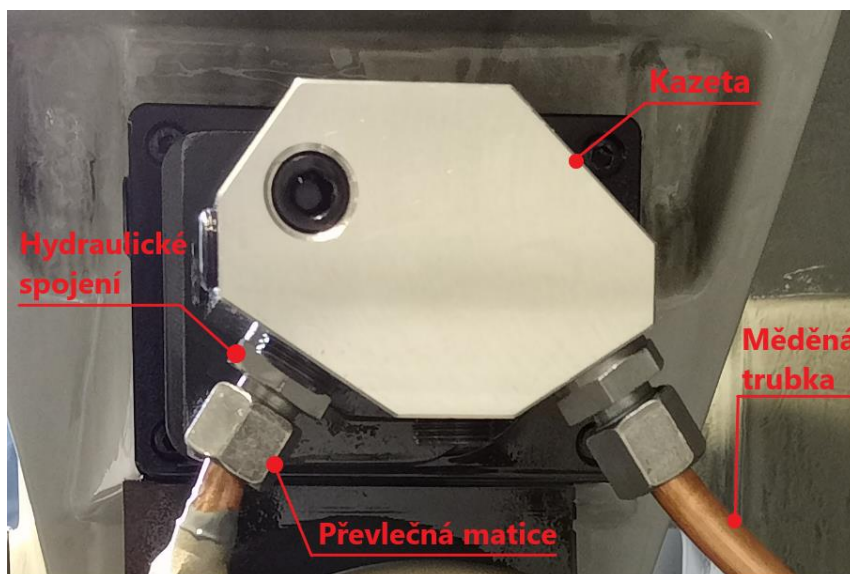
Pro úspěšné vytištění dvoutryskových rezervoárů byla potřeba drobná úprava designu vnitřních stěn konkrétně stropu v Z rovině tisku z důvodu nemožnosti konstrukce podpěr uvnitř samotných rezervoárů. Po následném vytištění je potřeba dané díly odříznout od základové desky tiskárny a poté ručně opracovat místa kde se nachází podpěry pomocí různého brusného náradí. Plně hotové a připravené vytisknuté trysky na experiment lze vidět na obr. 35 níže.



Obrázek 35: Vytisknuté trysky pro experiment: a) základní Webster/Rouse tryska, b) čistící pomocná tryska, c) rezervoár I, d) rezervoár II, e) rezervoár III

3.4.2. Příprava a nastavení trysek do stroje

Jak již bylo řečeno, přívod řezného oleje v nástrojářské brusce ANCA MX7 je koncipován pomocí kazety zapojené nad brusným kotoučem, do které je připevněna pomocí hydraulického spojení s převlečnou maticí skrže závít měděná trubka, jak lze vidět na obr. 36. Spojení kazety s měděnými trubkami je spolehlivé a jednoduché. Proto, je jako řešení optimalizace přívodu chlazení provedeno v této práci, zlepšením koncových tištěných trysek, připevněných na měděné trubky.



Obrázek 36: Způsob přívodu řezného oleje ve stroji do místa broušení

Měděné trubky jsou použity v experimentu stejně jako dříve, jejich velkou výhodou je flexibilita, tedy možnost naohýbání trubek do požadovaného místa. Během samotného ohýbání se ovšem můžou lehce zdeformovat a tím zhoršit průtok kapaliny uvnitř. Proto je při samotné montáži trubek velmi důležitá opatrnost a šikovnost obsluhy při jejich ohýbání.

Spojení měděných trubek s tištěnými kovovými tryskami je řešeno pomocí lepení průmyslovým lepidlem na kovy. Je zvoleno dvousložkové epoxidové lepidlo voděodolné a odolné vůči olejům a chemikáliím s kovovým zbarvením. Podmínkou kvalitního spoje jsou odmaštěné čisté suché spojovací plochy a lehce zdrsňený povrch. Po zalepení je potřeba vyčkat 24 hodin na úplné vytvrzení. Tepelná odolnost lepidla a jeho spoje je od $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ což je pro případ zajištění trysky s měděnou trubkou dostačující. Rozdíl otvoru vyústění lze vidět na obr. 37 níže, kde vlevo je zobrazená přilepená Webster/Rouse tryska na měděnou trubku a vpravo konvenčně přiškrčené vyústění u trubky klasické.



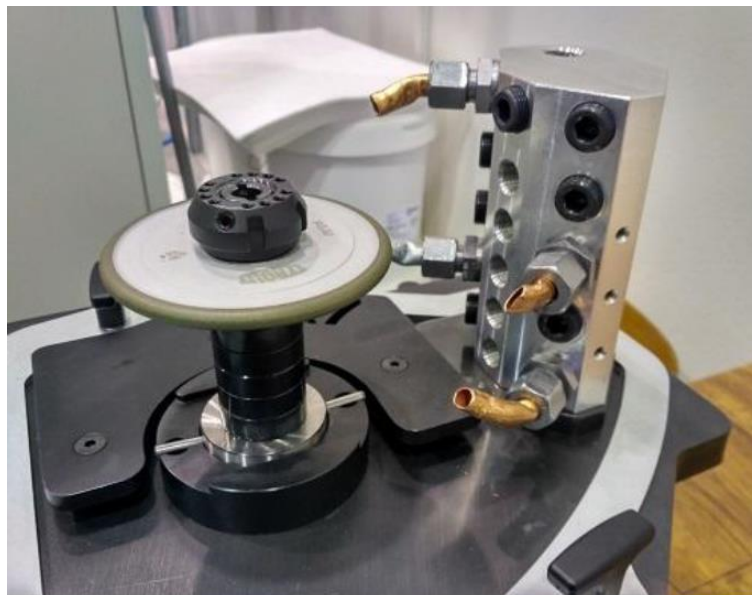
Obrázek 37: Vytištěná Webster/Rouse tryska spolu s klasickou měděnou trubkou

Na následujícím obrázku 38 lze vidět již nalepené trysky na měděných trubkách spolu se spojením do kazety. S takto připravenými tryskami lze provést experiment broušení a tím zjistit, jestli takový přívod chladící kapaliny má žádoucí efekt na samotný proces a dochází ke zlepšení oproti klasickému použití s pouhými trubkami.



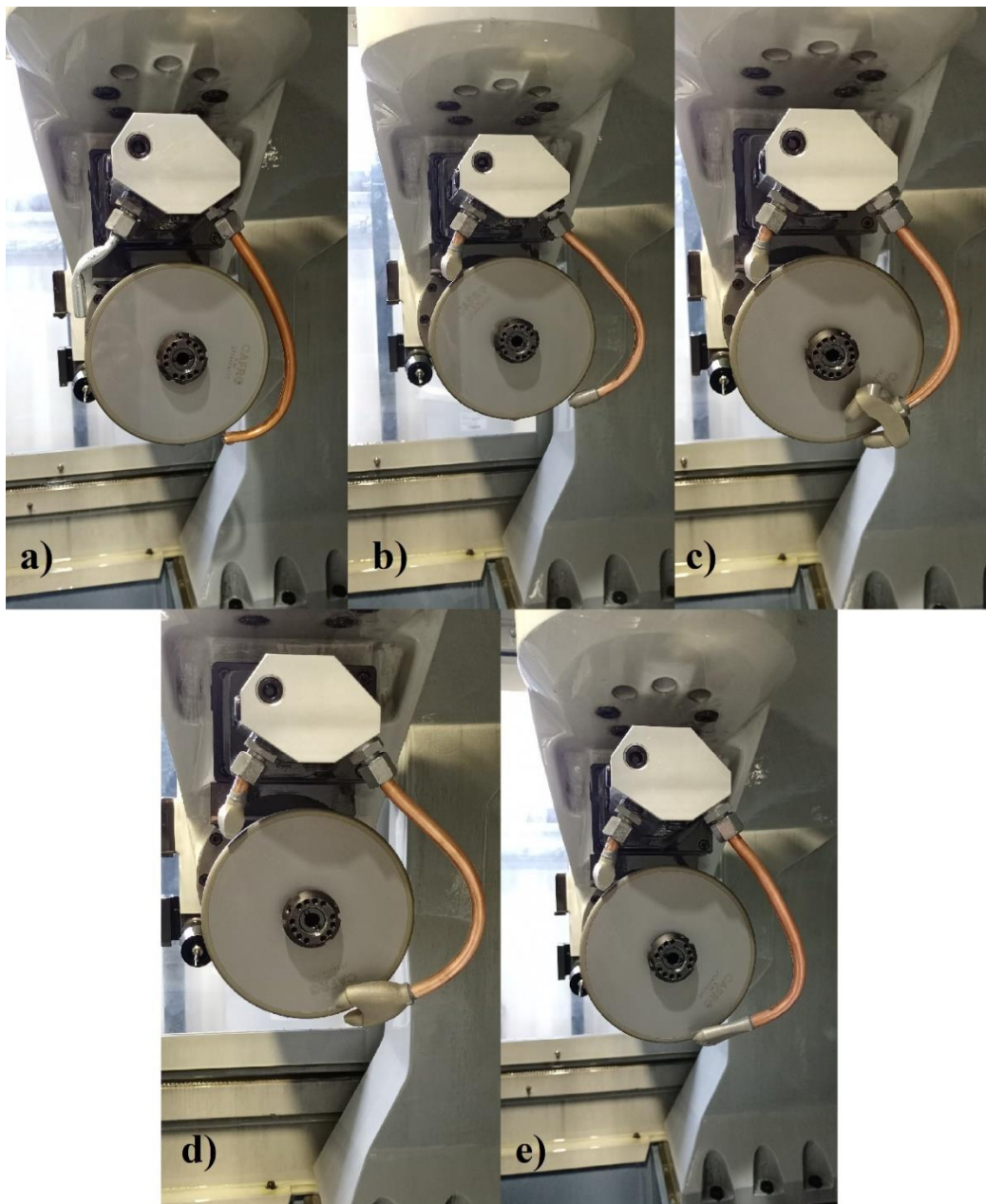
Obrázek 38: Připravené tryska nalepené do měděných trubek

Měděné trubky jsou již naohýbané do správné polohy tak, aby výstupy z trysek mířily co nejideálněji do místa řezu. Proces ohýbání trubek do místa, odkud bude docházet k zaplávání kotouče s obrobkem je prováděn na speciálním přípravku dodávaného přímo od výrobce samotné brusky ANCA MX7. V přípravku lze upnout brusný kotouč s kazetou a mimo stroj si lze bez potíží připravit ustavení trubek přívodu chlazení tak, aby nedocházelo ke kolizím v samotném stroji. Přípravek je zobrazen na obr. 39.



Obrázek 39: Přípravek sestavy nástroje s přívodem chladící kapaliny

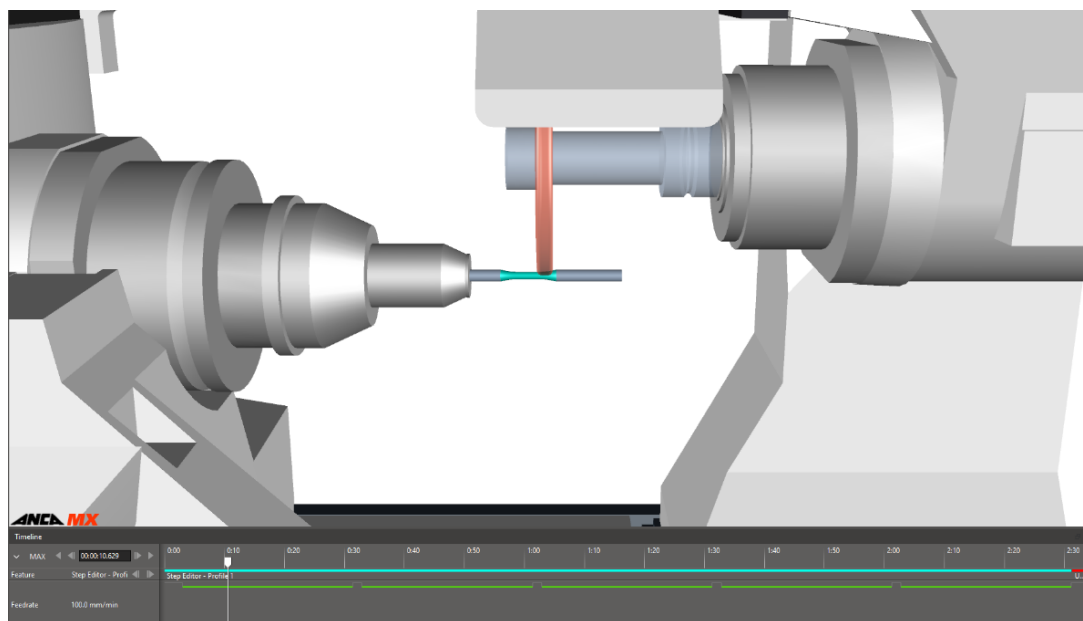
Na následujícím obr. 40 jsou již samotné přívody chladicí kapaliny (řezného oleje) nastaveny v nástrojářské brusce ANCA MX7. Všechny varianty jsou v takové poloze, aby nedocházelo ke kolizi jak s obrobkem a jeho upnutím tak ve výměníku (zásobníku) brusných sestav. S takto připravenými brusnými sestavami lze započít experiment broušení. Každá sestava chlazení obsahuje pomocnou trysku pro čištění kotouče, jak při konvenčním chlazení v podobě kratší stříbrné trubky, tak při všech variantách tištěných trysek s optimalizovanou tištěnou plochou tryskou. Především proto, že nalepování brusného kotouče při broušení Inconelu 718 je velmi častý a závažný jev, viz. předchozí kapitoly. Experiment bude probíhat v 5 měřeních a ve stejném časovém sledu jako na daném obr. 40. To znamená první broušení s pomocí konvenčního chlazení obecně používaného, poté broušení s Webster/Rouse tryskou a následuje broušení s chlazením pomocí dvoutryskových rezervoárů. Popis celého experimentu je detailněji rozepsán v následující kapitole.



Obrázek 40: Instalovaný přívod chladicí kapaliny: a) Konvenční chlazení, b) Webster/Rouse tryska, c) Rezervoár I, d) Rezervoár II, e) Rezervoár III

3.4.3. Experimentální broušení součásti z Inconelu 718

Pro provedení experimentu broušení na nástrojářské 5osé brusce ANCA MX7 je nezbytné vytvořit program. Celý program obsahuje najetí brusného kotouče do počáteční polohy nad broušenou součástí, čímž je zkoušený vzorek v podobě kruhové tyčky, viz. obr. 33. Poté vygenerování drah brusného kotouče pro celkem 10 přejetí v místě zúžení profilu tyčky s řeznými podmínkami představenými v tab. 5. Samotné broušení tedy probíhá jen v části broušené součásti zvýrazněné světle modrou barvou na obr. 41. Kontrola chlazení není součástí programu a je řízena obsluhou. Simulaci programu broušení v softwaru CIMulator3D lze vidět na obr. 36. Lze si povšimnout, že v simulaci není znázorněno podepření obrobku, který je při takto štíhlé a dlouhé součásti potřeba z důvodu vysokého házení.

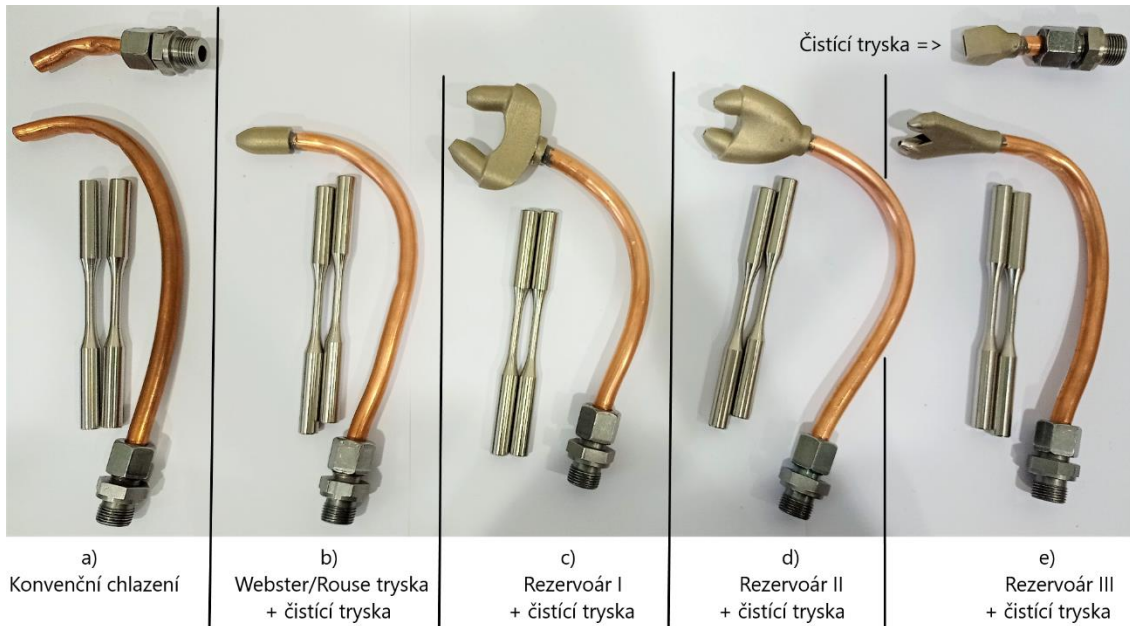


Obrázek 41: Simulace programu v softwaru CIMulator3D

Samotný experiment se skládá z pěti měření neboli pěti odlišných chladicích sestav, jak lze vidět na obr. 40 z předešlé kapitoly. Každé měření obsahuje broušení dvou vzorků. Především proto, že jeden vzorek je pro následné vyhodnocování drsnosti povrchu a druhý vzorek pro metalografické zhodnocení pod mikroskopem. Každé jedno měření se tedy skládá z broušení dvou vzorků s jednou nastavenou sestavou s unikátním přívodem chladicí kapaliny. Každý vzorek je očíslován pro jeho následnou identifikaci při vyhodnocování výsledků, viz. tab.6. Řezné podmínky jsou pro každé měření po celou dobu experimentu konstantní a jejich hodnoty lze najít v tab. 5. Pro úplné pochopení průběhu experimentu lze níže vidět tab. 6 s popsáním rozvržení a parametry experimentu a na následující stránce obr. 42 s komponenty chladicí sestavy a vzorky.

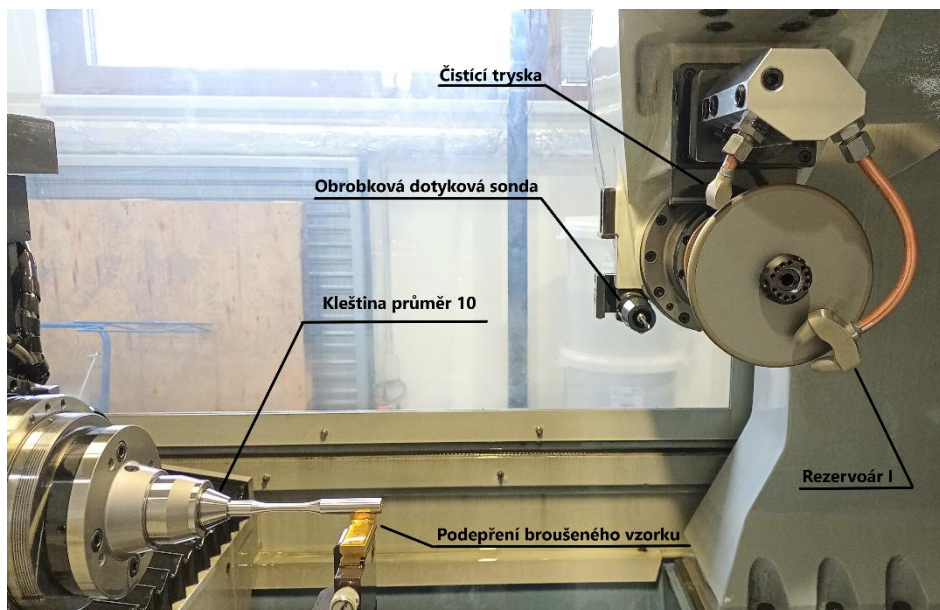
Tabulka 6: Parametry experimentu broušení Inconelu 718

Číslo měření	Primární chladicí tryska	Sekundární tryska	Číslo vzorku
EXP01	Konvenční měděná trubka	Konvenční měděná trubka	258, 259
EXP02	Webster/Rouse tryska	Čistící tryska	260, 261
EXP03	Rezervoár I		262, 263
EXP04	Rezervoár II		265, 266
EXP05	Rezervoár III		267, 268



Obrázek 42: Rozdělení trysek s vzorky připravené na experiment

Součást je upnuta do kleštiny pro průměr 10 mm. Vzhledem k tomu, že se jedná o štíhlou a dlouhou součást je potřeba daný obrobek podepřít přípravkem, jinak by docházelo k velkým nepřesnostem z důvodu házení součásti. K ustavení obrobku v prostoru slouží dotyková obrobková sonda, díky které po dotknutí čela součásti stroj ví, v jaké poloze se daný broušený vzorek nachází. Celý pracovní prostor s upnutým vzorkem a připraveným chlazením pomocí rezervoáru I lze vidět níže na obr. 43.



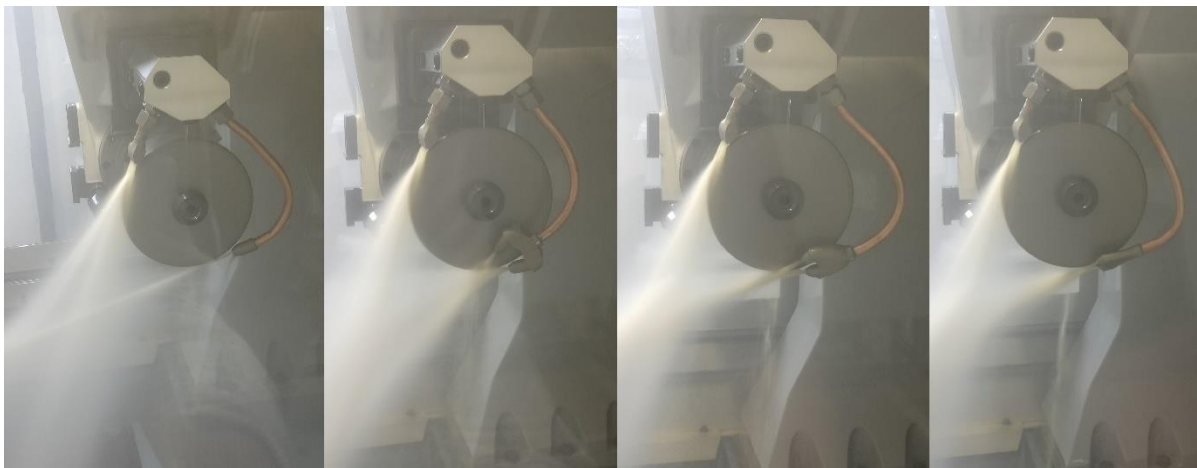
Obrázek 43: Pracovní prostor při experimentu broušení

Jelikož se jedná o prvotní broušení dané součásti, je potřeba před spuštěním programu provést i kontrolu na stroji neboli zkoušku programu nanečisto někdy také „Dry run mode“. Jedná se o kontrolu, zda nedochází ke kolizím mezi jednotlivými částmi v pracovním prostoru stroje pro nový program broušení. Kontrola probíhá v ručním režimu obsluhy bez použití chladicí kapaliny pro lepší viditelnost a při vypnutých otáčkách nástroje. Nedochází ke kontaktu brusného kotouče se součástí, jelikož je nastaveno posunutí drah od součásti o hodnotu 20 mm.

Tato kontrola probíhá za stejného posuvu a se stejnými dráhami nástroje jako v programu a pouze se kontroluje, zda nedochází k nebezpečným či nepředpokládaným pohybům nástroje k součásti, upnutí a dalším částem pracovního prostoru stroje. Tato kontrola je důležitá, protože při samotném experimentu je viditelnost v pracovním prostoru nízká.

Po úspěšném kontrolním broušení je potřeba pomocí brusného kotouče nalézt polohu brusné plochy na součásti tzv. škrtnutí obrobku. Na řídicím panelu stroje se určí pomyslný průměr součásti pomocí korekce, jen o něco větší, než je nominální reálný průměr součásti, tak aby nedošlo k úplnému najetí nástroje do obrobku. Poté se snižuje tato hodnota korekce, dokud brusný kotouč opravdu nezačne brousit součást. To se pozná podle zbroušené barvy, která se před tím nanese na součást např. pomocí červené fixy jako v tomto případě. Tento proces se musí provést pro každý nový broušený vzorek, protože samozřejmě žádné vzorky si nejsou sobě rozměrově úplně rovny.

Následuje samotné spuštění programu broušení spolu se zapnutým chlazením. Každé broušení vzorku je nastavené na 10 přejezdů po hloubce řezu 0,01 mm. Hloubka řezu $a_e = 0,01$ mm je zvolena dle minulých experimentů jakož i ostatní řezné podmínky, viz. tab. 5. Délka programu neboli zbroušení jednoho vzorku trvá necelých 8 min. Pro každé nastavení přívodu chladicí kapaliny, tedy celé brusné sestavy se provádí experiment na dvou vzorkách, jak již bylo řečeno dříve. Po každém experimentu broušení pro jednu sestavu chlazení se provádí tzv. oživování brusného kotouče. Jedná se o oživení funkční vrstvy na CBN nebo diamantových kotoučích pomocí oživovacích kamenů vyráběných často z umělého bílého korundu. Korund při řezání rychle vybrušuje pojivo segmentu a obnažuje CBN zrna, tím se obnoví řezné vlastnosti a očistí zalepení kotouče. Chlazení řezným olejem během experimentu pomocí nových tištěných trysek a rezervoárů lze vidět na obr. 44 níže. Lze si povšimnout kvalitního plochého paprsku čistící trysky a paprsky primárních chladících trysek směřujících do místa mezi kotoučem a pomyslným obrobkem.



Obrázek 44: Přívod chladicí kapaliny ze zkoumaných trysek a rezervoárů

4 Zhodnocení výsledků

V předchozí kapitole byly popsány návrhy opatření v podobě 3D tištěných trysek spolu se samotnou realizací experimentu. Tato kapitola obsahuje výsledky měření broušené součásti s popisem daných měření.

4.1. Vyhodnocení drsnosti povrchu

Technologie broušení se využívá zpravidla pro dokončovací operace, kdy je důležitá požadovaná vysoká kvalita povrchu. Jedním ze základních a nejpoužívanějších měřítek kvality povrchu a vyhodnocení řezných podmínek je drsnost povrchu. Z teoretické části práce je známo, že na drsnost povrchu jak při broušení, tak obecně při obrábění mají vysoký vliv řezné podmínky. Co se týče vlivu přívodu chladicí kapaliny je vliv nižší než u řezných podmínek typu řezná rychlost, posuv atd. Avšak cílem této diplomové práce je zvýšení kvality povrchu, a parametry drsnosti mají významný vliv na kvalitu povrchu, a navíc tyto parametry drsnosti lze úspěšně porovnávat mezi sebou.

4.1.1. Měřicí přístroj

Pro měření drsnosti experimentálních broušených vzorků je použit měřicí přístroj Alicona IFM G4 nacházející se v prostorách RTI. Jedná se o optické zařízení pro měření 3D povrchů. Je ideální variantou pro měření povrchů nástrojových úhlů, zaoblených řezných hran či drsnosti povrchu řezné hrany. Přístroj si lze prohlédnout na obr. 45.

Přístroj provádí měření na základě bezdotykové metody v čemž tkví jisté výhody oproti kontaktním metodám měření drsnosti jako např. nepoškozený měřený povrch, větší množství naměřených dat vyšší rychlost měření atd. Měření je prováděno v oblasti mikro a nano rozsahu. Rozsah měřitelných ploch je téměř neomezený, což umožňuje použití koaxiálního osvětlení a optimalizovaného LED kroužku.

3D měření se provádí přímo v optickém obrazu. Princip měření je založen na změně ohniskové vzdálenosti. Kombinuje malou hloubku ostroty optického systému při vertikální změně pohybu a změnu topografické a barevné informace při změně ostření. Při měření je možné dosáhnout vysokého rozlišení, několikanásobnou opakovatelnost měření a vysokou přesnost. Všechny vlastnosti povrchu jsou měřeny pouze za pomoci jednoho multifunkčního čidla. Optimální nastavení měřených parametrů je poskytováno automaticky. To umožňuje např. provádět měření ve větším počtu proškolených osob. Výhodou měřicího přístroje je možnost použití jak v laboratoři, tak v blízkosti výrobního prostředí. Navíc přístroj obsahuje funkci detekce kolizí proti poškození přístroje. [44]



Obrázek 45: Měřicí přístroj Alicona IFM G4

4.1.2. Vyhodnocení profilové drsnosti povrchu experimentálních vzorků

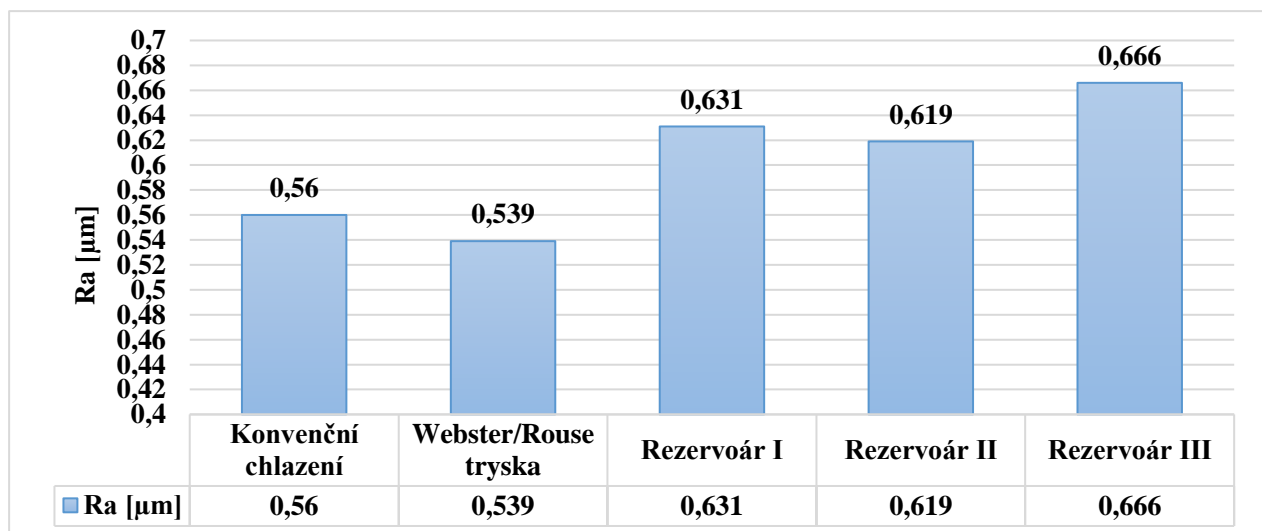
Pro zpracování naměřených dat z měřicího přístroje Alicona IFM G4 se pro tuto práci využívají parametry profilové drsnosti definované normou ČSN EN ISO 4287 a ČSN EN ISO 4288 a parametry plošné drsnosti, které jsou čím dál více používány v průmyslu a lze je tímto měřicím přístrojem vyhodnotit.

Profilová drsnost, která je měřena v jednom směru řezné roviny k povrchu se potřebuje pomocí filtrů specifikovaných v normě ČSN EN ISO 11562 odfiltrovat od nežádoucích složek. Na základě těchto filtrů s rozdílnými hodnotami mezních vlnových délek lze oddělit profil drsnosti který chceme od profilu vlnitosti. Mezní vlnová délka charakterizující tento způsob filtrace k oddělení vlnitosti od drsnosti se často vybírá/navrhuje dle předpokládané hodnoty Ra. Při měření drsností v této práci byla použita mezní vlnová délka $\lambda_c = 800 \mu\text{m}$, viz. příloha 1.

Ra – průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu

Jedná se o nejčastěji užívaný parametr pro posuzování drsnosti povrchu. Je natolik rozšířený, že ho lze změřit i na nejjednodušších měřicích přístrojích. Statisticky se jedná o velmi stabilní a opakovatelný parametr, který je vhodný zejména pro neperiodické povrchy, např. povrchy po broušení apod. Bohužel tento parametr nerozlišuje výstupky od prohlubní, takže plochy vytvořené velmi rozdílnými metodami není vhodné porovnávat. Prakticky to znamená, že profily rozdílného tvaru velikostí a funkčního charakteru, mohou mít stejnou hodnotu Ra. Vzhledem k tomu, že experimentální vzorky byly obrobeny pouze technologií broušení, lze konstatovat, že tento parametr je v tomto daném případě maximálně věrohodný. [45]

Na grafu č. 1 jsou znázorněny výsledky experimentu broušení dle parametru drsnosti Ra. Žádná z variant nedosahuje nižších hodnot než $Ra = 0,5 \mu\text{m}$. První dvě nejlepší varianty se k této hodnotě přibližují, z nichž varianta chlazení pomocí Webster/Rouse trysky vykazuje nejnižší hodnoty drsnosti. Všechny tři varianty pomocí dvoutryskových rezervoárů vykazují vyšší drsnosti než klasické konvenční chlazení.

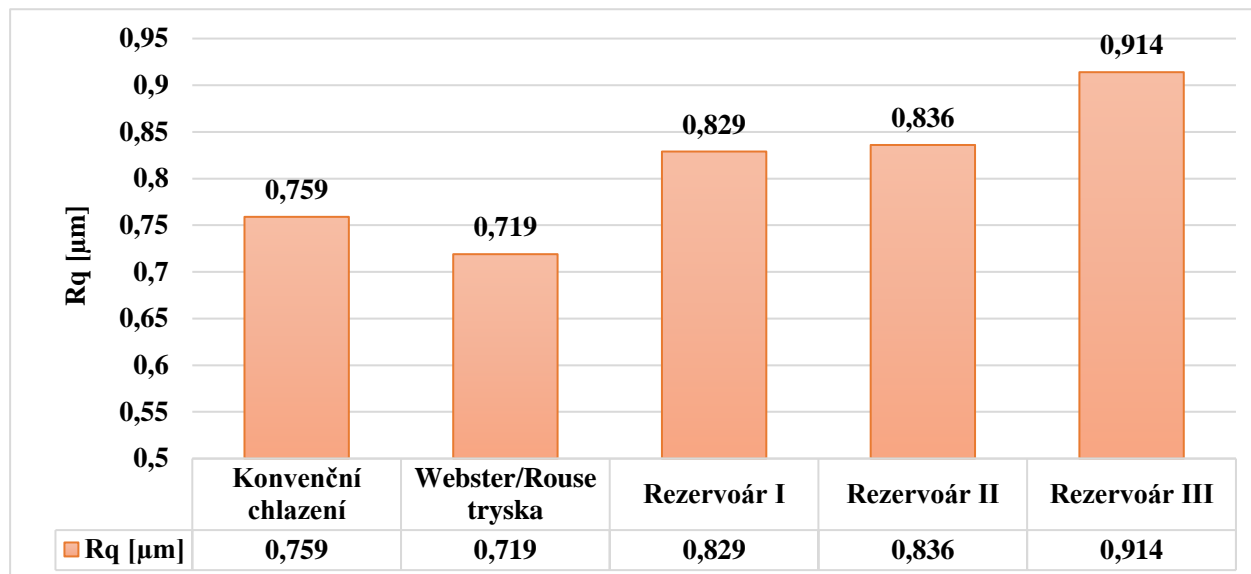


Graf 1: Naměřené hodnoty drsnosti povrchu Ra

Rq – průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu

Je definována podle normy jako kvadratický průměr souřadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky. Tento parametr je velmi podobný parametru Ra, ale je citlivější na výskyt výstupků a prohlubní, protože jsou výškové hodnoty amplitud umocněny na druhou mocninu. Z toho důvodu nehrozí změření stejné hodnoty drsnosti u dvou rozdílných profilů jako u parametru Ra. Tento parametr se nejvíce hodí pro hodnocení velmi jemně obroběných ploch, např. právě pro broušení.

Naměřené výsledky parametru drsnosti R_q lze vidět na následujícím grafu č. 2. Výsledky jsou podobné jako u parametru R_a . Varianta přívodu chladicí kapaliny s rezervoárem III dosahuje znatelně vyšších hodnot než konvenční chlazení pomocí měděné trubky.

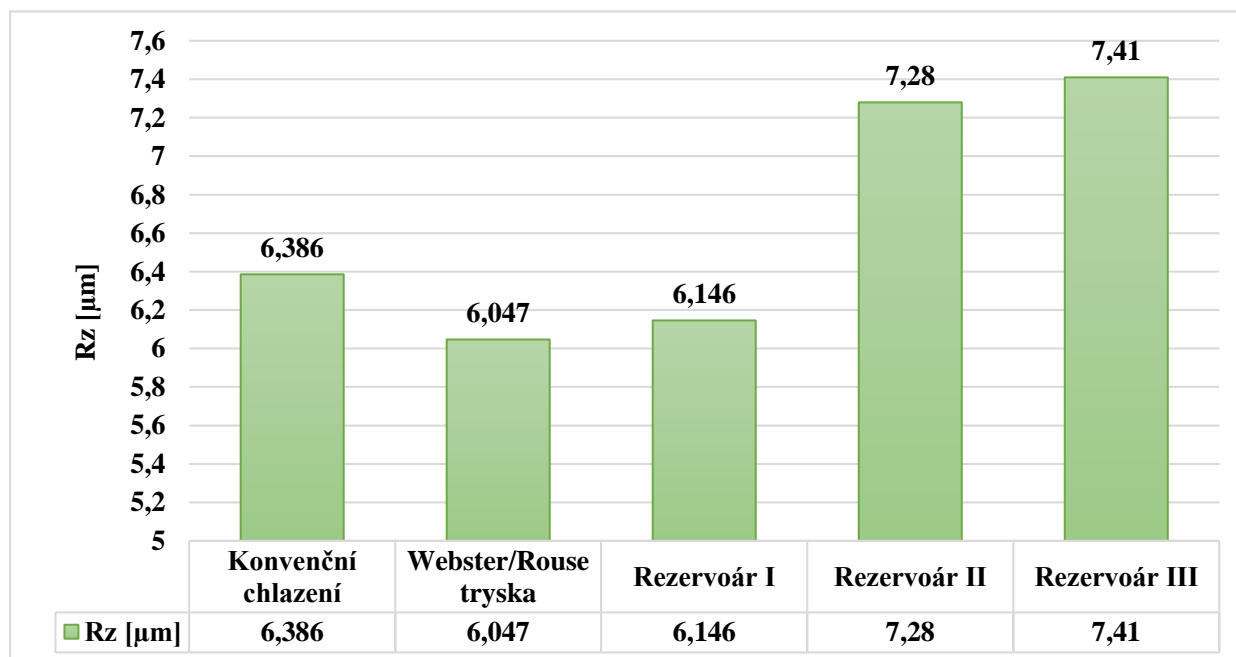


Graf 2: Naměřené hodnoty drsnosti povrchu R_q

Rz – největší výška profilu

Velmi rozšířený parametr drsnosti vyhodnocovaný na základní délce. Jeho význam je jiný oproti předešlým parametrům R_a a R_q . Tento parametr je daleko citlivější na změny textury povrchu, protože se jedná čistě o výškový parametr. Ideální parametr pro dosedací či těsnící plochy s důležitostí lícování součástí.

Graf č. 3 znázorňuje výsledky drsností parametru R_z . Webster/Rouse tryska vykazuje nadále nejlepších výsledků s hodnotou $R_z = 6,047 \mu\text{m}$. Nyní lehce překonává konvenční chlazení i varianta s dvoutryskovým rezervoárem I s drsností $R_z = 6,146 \mu\text{m}$. Rezervoáry II a III bohužel mají nadále nejhorší vliv na drsnost broušeného povrchu.



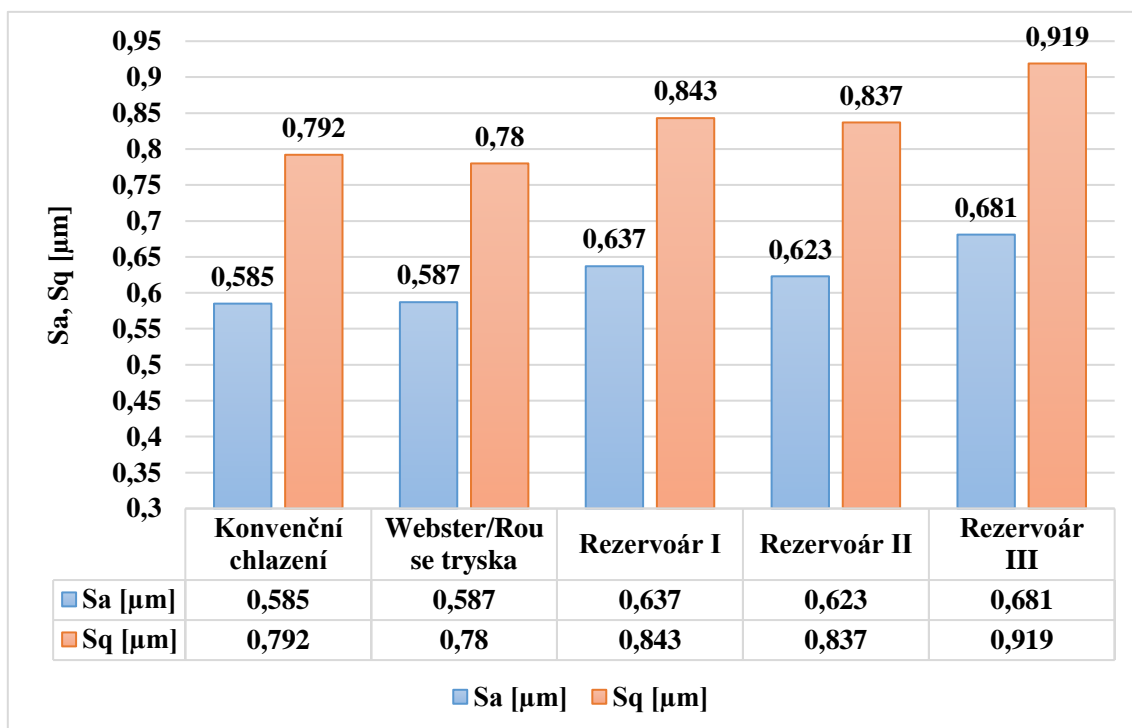
Graf 3: Naměřené hodnoty drsnosti povrchu R_z

4.1.3. Vyhodnocení plošné drsnosti povrchu experimentálních vzorků

Plošné parametry drsnosti umožňují kvantitativní hodnocení plochy všemi technickými významnými směry, tzn. nejen ve vybraném směru pomyslného řezu povrchem, jak tomu je u profilového hodnocení. V plošném hodnocení je tedy možno stanovit obecnou texturu a celkový tvar plochy. Lze tudíž lépe předurčit její funkční vlastnosti za provozu. Základním rozdílem a jakousi výhodou plošného vyhodnocení drsnosti je redukce základních parametrů. To znamená že v plošném hodnocení je pro střední aritmetickou odchylku používaný parametr jen jeden a to Sa, zatímco v profilovém hodnocení jsou tři (Ra, Pa, Wa).

Na naměřený povrch jsou aplikovány filtry pro odfiltrování rýh, trhlin apod. jako je tomu u profilové drsnosti. Dále se na takový povrch aplikují matematické operace. Vznikne tak povrch, z kterého se dále určují parametry plošného vyhodnocení drsnosti. Nejpoužívanějšími parametry jsou pak Sa, což je aritmetický průměr výšky povrchu omezené stupnicí nebo Sq jako základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu. Parametry Sa a Sq stejně jako v případě hodnocení profilu nerozlišují vrchy od údolí, ale udávají průměrné hodnoty. Typické použití parametru Sa je na obrobené povrchy, zatímco parametru Sq na optické plochy vyžadující větší přesnost.[45]

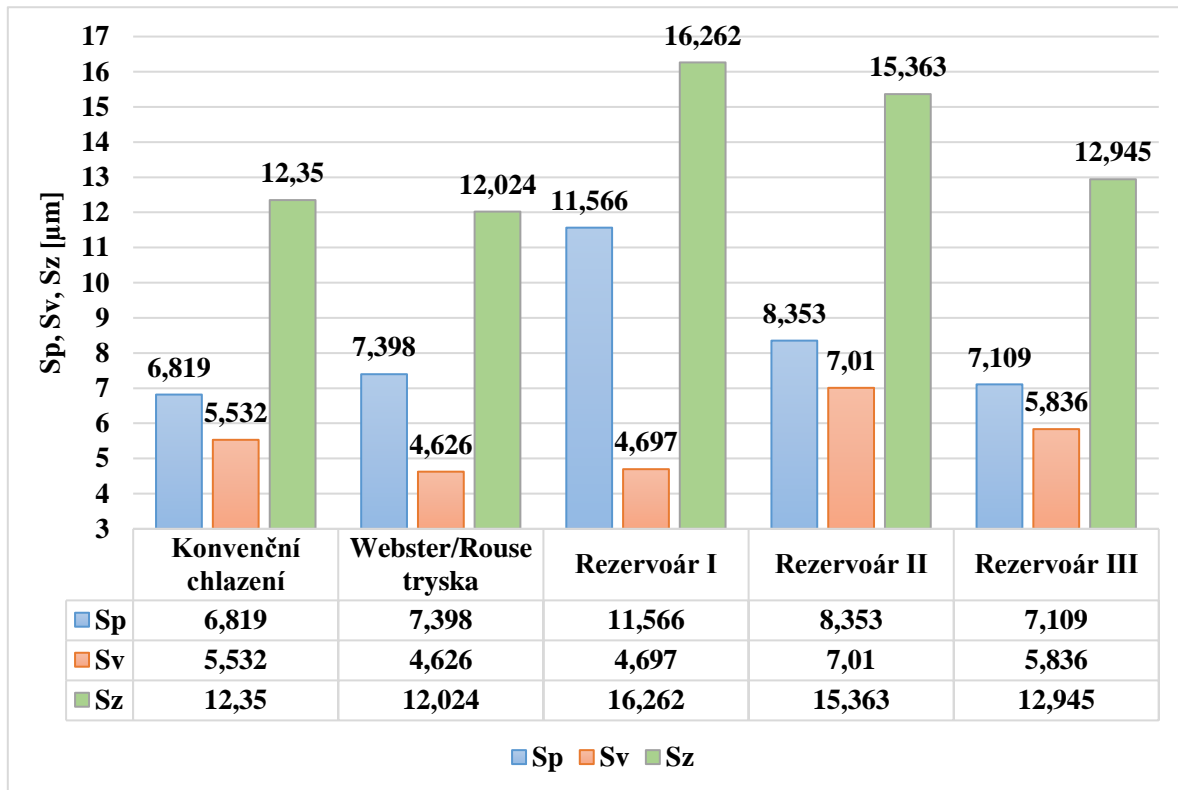
Experimentální vzorky broušeného Inconelu 718 byly podrobeny měřením plošné drsnosti a na následujícím grafu č. 4 jsou zobrazeny výsledky parametrů Sa a Sq. Konvenční chlazení spolu s Webster/Rouse tryskou vykazují skoro identickou a také nejnižší drsnost oproti dvoutryskovým rezervoárům. Výsledky plošné drsnosti se podobají s výsledky profilové drsnosti u všech variant.



Graf 4: Naměřené hodnoty plošné drsnosti parametrů Sa a Sq

Parametry Sp, Sv a Sz udávají největší výšku vrcholu, hloubku prolákliny nebo celkovou výšku povrchu a jejich ekvivalenty je možné nalézt i v profilovém hodnocení (Rp, Rv a Rz). U těchto hodnot je ale pozorována horší opakovatelnost, protože vychází z jednotlivých (bodových) maximálních hodnot, a ne z povrchu jako celku. Avšak v určitých aplikacích, jako v případě dosedacích ploch nebo ploch určených k povlakování, je vhodné tyto parametry analyzovat. [45]

Dle plošných parametrů Sp, Sv a Sz lze vidět na grafu 5 částečně odlišné výsledky. Nejvyšších parametrů tentokrát dosahuje rezervoár II. Webster/Rouse tryska nadále dosahuje nejlepších výsledků kromě parametru Sp.



Graf 5: Naměřené hodnoty plošné drsnosti parametrů Sp, Sv a Sz

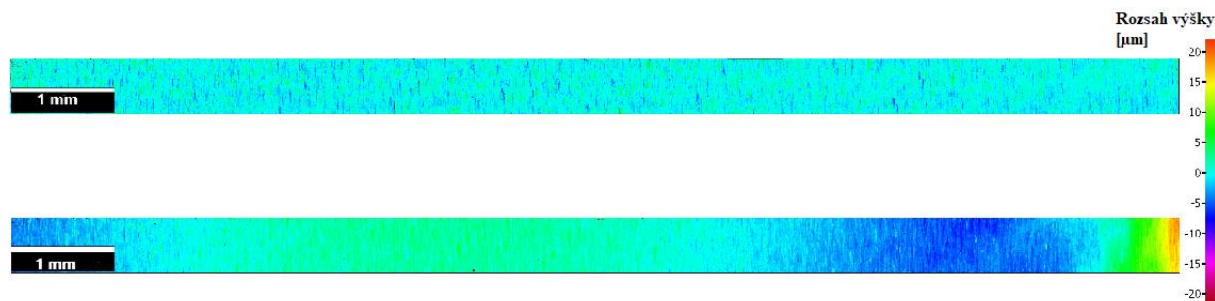
Hodnoty důležitých statistických parametrů měřené plošné drsnosti z grafu 4 a 5 jako střední hodnota dat a střední hodnota směrodatné odchylky jsou vypsány v tab. 7 níže. Všechny ostatní parametry drsnosti pro konvenční chlazení lze najít v protokolu měření v příloze 1. A pro ostatní varianty chlazení na CD, kde jsou všechny měřící protokoly nahrané.

Tabulka 7: Hodnoty vybraných statistických údajů měřené plošné drsnosti

	Konvenční chlazení	Webster/Rouse tryska	Rezervoár I	Rezervoár II	Rezervoár III
Střední hodnota [µm]	0,005	-0,003	-0,001	0,004	0,000
Směrodatná odchylka [µm]	0,792	0,780	0,843	0,837	0,919

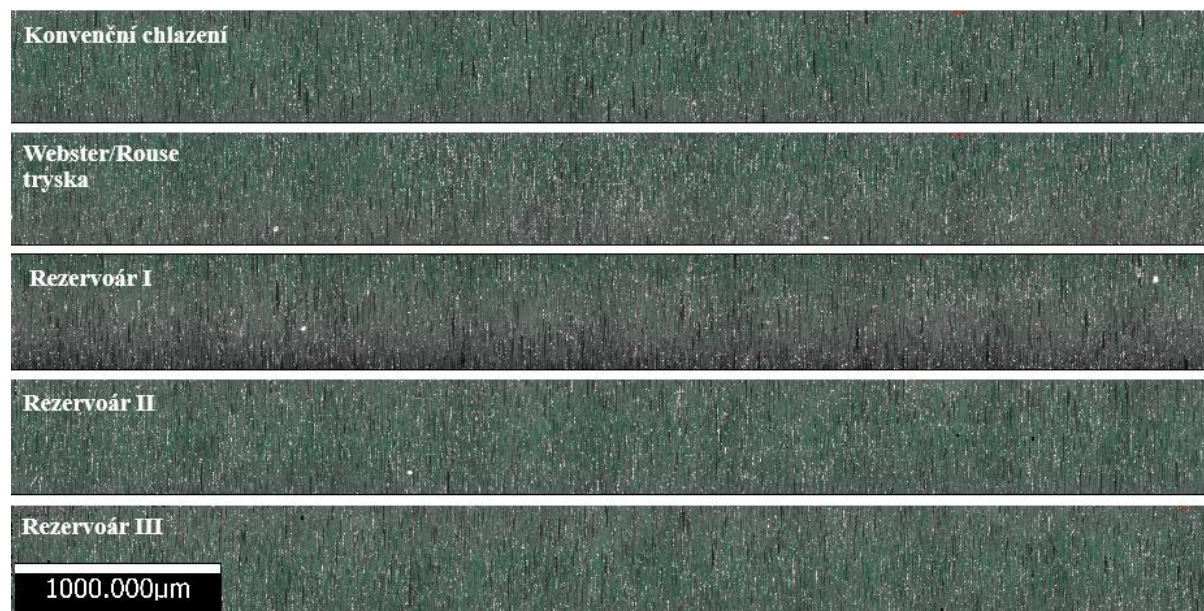
Pro vyhodnocování plošné drsnosti ploch jsou zhotoveny snímky povrchové textury pro každý vzorek. Na těchto snímcích lze spatřit vlnitost povrchu jakož i rýhy a výstupky na celé ploše. Snímky ukazují povrch v barevném spektru, jehož hodnoty jsou vztaženy k ideální nominální rovině. K této rovině jsou vztažné všechny naskenované snímky vzorků pro správné porovnání. Vyhodnocený vzorek použitý s rezervoárem III vykazuje velmi odlišnou topografii povrchu než vzorky všech ostatních variant, které jsou si identické. Pro porovnání lze vidět na obr. 46 vzorek konvenčního chlazení (horní) a právě vzorek rezervoáru III (dolní). Na tomto obrázku je zřetelně vidět vysoká vlnitost povrchu. Povrch konvenčního chlazení je rovnoměrný pouze s modrými rýhami od brusného kotouče. Zatímco povrch rezervoáru III vykazuje v barevném spektru příčnou vlnitost. Příčinou by mohl být vliv poměru otáček brusného kotouče a obrobku.

Lze tedy konstatovat, že způsob chlazení má vliv na projev poměru otáček nástroje a obrobu. Modré zbarvení znázorňuje snížený povrch $-5 \div 10 \mu\text{m}$ a zelený povrch znázorňuje opačný zvýšený povrch $+5 \div 10 \mu\text{m}$. Takto veliké výkyvy vlnitého povrchu jsou naměřeny pouze u rezervoáru III. Všechny ostatní snímky povrchů naměřené na měřícím přístroji Alicona IFM G4 jsou přiloženy na CD.



Obrázek 46: Nasnímaná textura povrchu u konvenčního chlazení (horní) a rezervoáru III (dolní)

Na následujícím obr. 47 lze vidět optické srovnání všech povrchů. U každého případu lze nepatrně vidět stopy příčné vlnitosti.

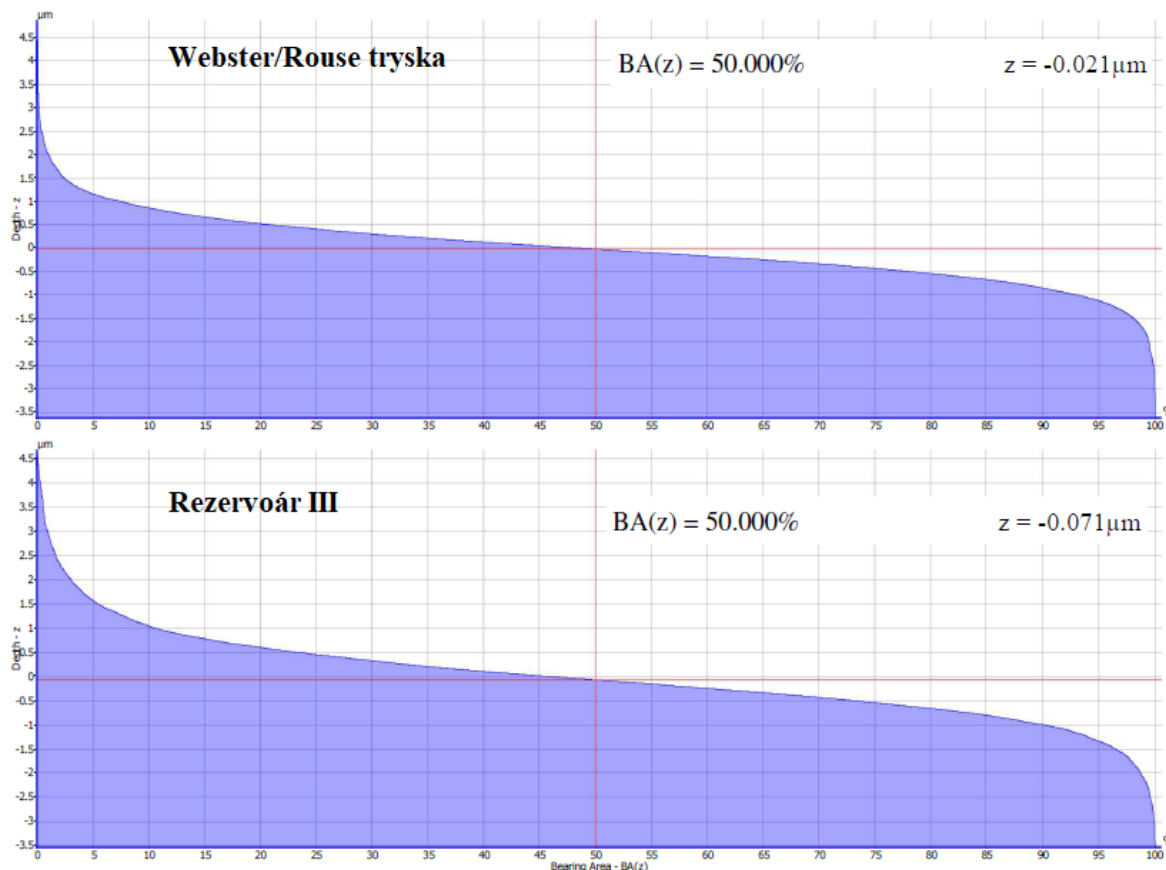


Obrázek 47: Optické srovnání povrchů

Vysokou vypovídací hodnotou drsnosti a celkově kvality povrchu vykresluje nosná (Abbotova) křivka profilu. Křivka skládající se z levého náběhu znázorňující množství hrotů, pravého propadu znázorňující rýhy a spojující křivky materiálového podílu jež je téměř lineární. Nejlepší povrch má křivka s nejmenším a nejkratším náběhem a propadem a se spojující křivkou s co nejmenší strmostí. Takovýto povrch vykazuje nejlepších předpokladů z hlediska funkčnosti a nejvyšších užitných vlastností.

Na obr. 48 je zobrazena nosná křivka profilu vzorku Webster/Rouse trysky a vzorku Rezervoáru III pro profilovou drsnost. Nosné křivky všech vzorků vyšly velmi podobně. Jen u Webster/Rouse trysky je možné spatřit menších a kratších ploch náběhu hrotů a ploch propadu rýh oproti vzorku konvenčního chlazení. Výsledky jsou ale tak nepatrné, že v konečném důsledku plocha Webster/Rouse trysky nedosahuje uspokojujících výsledků oproti konvenčnímu chlazení. Nejhorších výsledků dle nosné křivky profilu vyšel vzorek

Rezervoáru III, viz. obr. 48. Nosné křivky profilu pro plošnou drsnost vyšly téměř identické, ovšem nepatrných lepších výsledků dosáhla znovu Webster/Rouse tryska. Celý měřicí protokol pro vzorek konvenčního chlazení lze vidět v příloze 1 a pro ostatní vzorky na přiloženém CD.



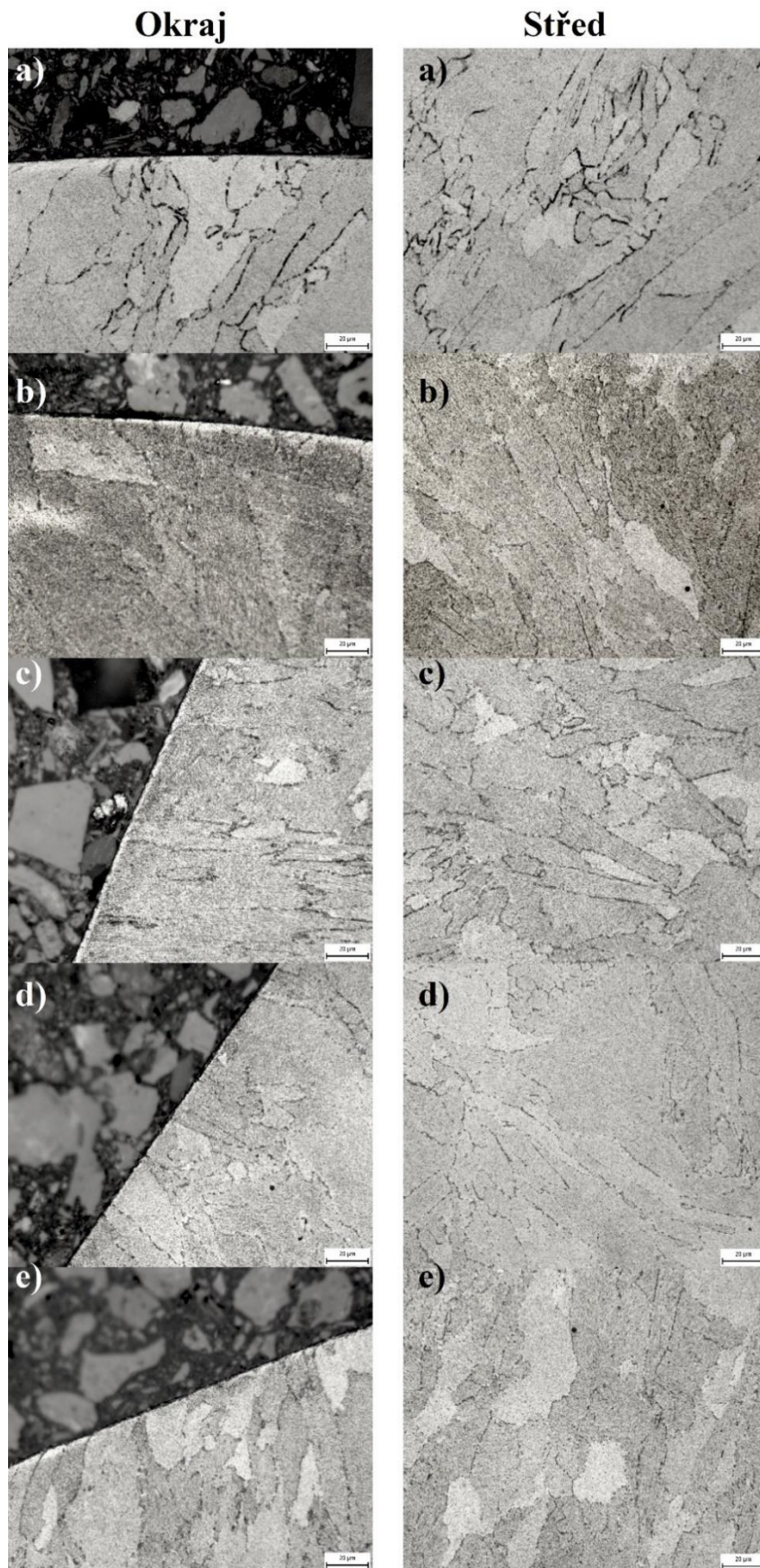
Obrázek 48: Nosné (Abbotovo) křivky profilu pro Webster/Rouse trysku a rezervoár III

4.2. Vyhodnocení metalografické zkoušky

4.2.1. Analýza mikrostruktury materiálu optickým mikroskopem

Díky metalografické zkoušce lze sledovat vlivy různých parametrů broušení na stav povrchu a strukturu materiálu pod povrchem. Zviditelnění struktury materiálu a následné studium je pozorováno pomocí světelného či elektronového mikroskopu. Pro správné zviditelnění struktury materiálu je potřeba pečlivá příprava metalografického vzorku, jehož jedna plocha se nazývá výbrus. Vzorky Inconelu 718 jsou odebrány pro metalografickou analýzu pomocí příčného řezu ze středové nejužší oblasti tyčinky. Důležité je, aby nedošlo k deformaci při odběru vzorku, proto je požadavkem kvalita hrany a vodivost pro měření elektronovým mikroskopem. Následuje preparace vzorku a po ní broušení či leštění pro dosažení výbrusu s co nejnižší drsností. Důležitým posledním krokem přípravy vzorků je leptání, při kterém dojde ke zviditelnění jednotlivých struktur materiálu. Poté již lze pozorovat mikrostrukturu materiálu optickým mikroskopem.

Pro vzorky Inconelu 718 byly pořízeny snímky pomocí světelného a elektronového mikroskopu. Na obr. 49 jsou znázorněny snímky vzorků všech variant chlazení jak z okraje výbrusu pro analýzu podpovrchových vrstev, tak ze středu výbrusu. Snímky jsou pořízeny 1000x násobným zvětšením. Obrázek 49 za a) znázorňuje vzorek pro konvenční chlazení, za b) Webster/Rouse trysku, za c) Rezervoár I za d) Rezervoár II a za e) Rezervoár III. Všechny snímky ve vyšším rozlišení jsou nahrány na CD.



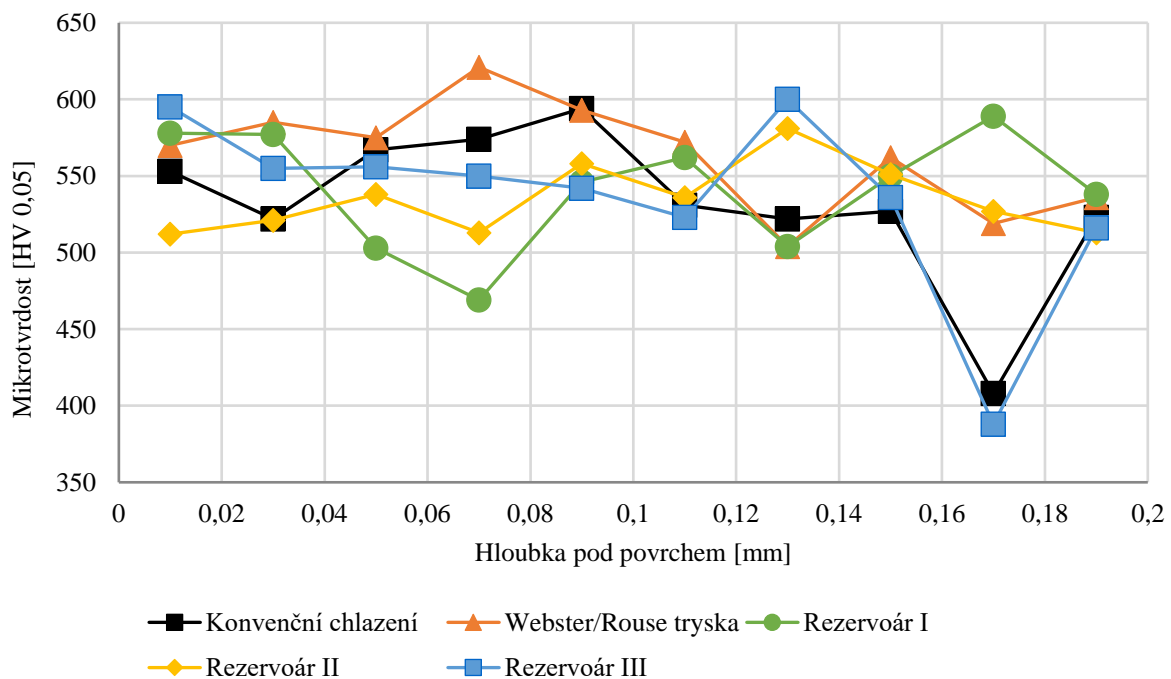
Obrázek 49: Snímky mikrostruktury vzorků z metalografické analýzy: a) Konvenční chlazení, b) Webster/Rouse tryska, c) Rezervoár I, d) Rezervoár II, e) Rezervoár III

Jedná se o vzorek materiálu z tištěného Inconelu 718 pomocí 3D tiskové technologie DMLS z práškové niklové slitiny s označením EOS NickelAlloy IN718 od společnosti EOS GmbH. Mikrostruktura takto tištěného materiálu je obtížnější pro vyhodnocení a spatření jakýchkoliv deformačních změn než u materiálu netištěného. Na úplných okrajích výbrusu lze spatřit malou bílou vrstvu. Jedná se ovšem pouze o deformaci vlivem řezání vzorku pro přípravu výbrusu. Žádné deformační změny či povrchové bílé a černé vrstvy nejsou viditelné.

4.2.2. Mikrotvrdość materiálu pod povrchem

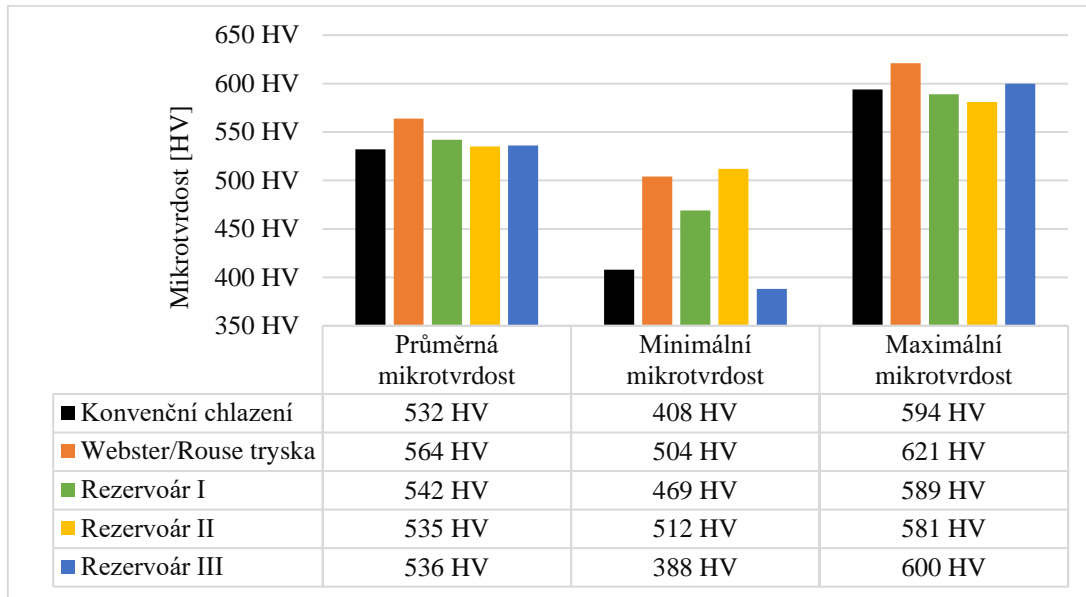
Dále je na vzorkách změřena mikrotvrdość do hloubky až 0,19 mm pod povrchem k vyhodnocení závislosti tvrdosti materiálu po broušení. Mikrotvrdość je změřena vždy po 0,02 mm. Je důležité si uvědomit jakým směrem, resp. v jakých místech materiálu je tvrdost měřena pod povrchem. V materiálu Inconel 718 totiž vznikají fáze γ' a γ'' na hranicích zrn které mohou dosahovat zvýšené tvrdosti než okolní zbytkový materiál.

Níže je zobrazen graf č. 6 závislosti mikrotvrdości na hloubku povrchu pro jednotlivé varianty chlazení při broušení. Měření mikrotvrdości proběhlo metodou Vickersovy zkoušky tedy pomocí vnikacího tělesa ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu se zatížením 5gf. Na grafu si lze povšimnout velkého propadu tvrdosti v hloubce povrchu 0,17 mm u konvenčního chlazení a rezervoáru III. Rozsáhlé výsledky měření mikrotvrdości pro každou variantu chlazení lze najít na přiloženém CD.



Graf 6: Průběh mikrotvrdości pod povrchem Inconelu 718 u jednotlivých typů chlazení

Graf č. 7 na následující stránce zobrazuje mikrotvrdość z hlediska průměrných, minimálních a maximálních hodnot u jednotlivých variant broušených vzorků. Nejvyšší průměrné a maximální mikrotvrdości dosahuje vzorek Webster/Rouse trysky. Velké výkyvy v minimální mikrotvrdości obsahuje konvenční chlazení a rezervoár III jak lze postřihnout již v předchozím grafu č. 6.



Graf 7: Hodnoty mikrotvrdośćí průměrných, minimálních a maximálních pro jednotlivé typy chlazení

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo zvýšit jakost broušeného povrchu z niklové těžce obrobitelné slitiny Inconel 718. Konkrétní způsob, jak docílit zlepšení kvality povrchu bylo pomocí využití 3D tištěných chladících trysek pro přívod řezného oleje do místa broušení na nástrojařské 5osé brusce ANCA MX7, jež je součástí strojového parku Regionálního technologického institutu (RTI). Jak již z cíle vypovídá, bylo důležité si uvědomit a porozumět problematice obrobitelnosti, respektive broušitelnosti Inconelu 718, která je díky několika mechanickým vlastnostem této superslitiny velmi obtížná. A dále také porozumět způsobům přívodu procesního média do místa broušení pro správné navržení trysek do experimentu.

V první části diplomové práce, kterou lze nazvat jako teoretickou byl zprvu přiblížen především rozbor materiálu Inconelu 718 jako takového. Ze získaných poznatků vyplývá, že na integritu povrchu Inconelu 718 po broušení má vysoký vliv především jeho zpevňovací schopnost a nízká tepelná vodivost. Během broušení, kdy dochází k vysokým teplotám, vznikají pod povrchem strukturální změny viditelné v podobě bílých či černých vrstev. Proto je použití kvalitního přívodu chladící kapaliny nezbytné.

Dále bylo zjištěno u broušení Inconelu 718, že použitím CBN kotouče spolu s řezným minerálním olejem dochází k nejlepším výsledkům spolu s kvalitním přívodem řezného oleje pomocí optimalizovaných trysek za vysokého tlaku. Důležitým tématem teoretické části je tryska navržená dle designu Webstera a kol. z roku 1995 vykazující nejpříznivějších výsledků co se týče kvality paprsku proudu přiváděného chladiva do místa řezu broušení. Touto tryskou je inspirovaný design i jedné z trysek použitých v samotném experimentu, v práci nazývaná Webster/Rouse tryska.

V druhé aplikační části diplomové práce je popsán samotný návrh použitých trysek spolu s konceptem jejich polohy, jež je nesmírně důležitá pro správný přívod chladící kapaliny. Součástí tohoto úseku diplomové práce je samozřejmě popis potřebného vybavení experimentu a popis samotného experimentu.

Pro experiment bylo navrženo celkem pět trysek, z nichž jedna sloužila pro čištění brusného kotouče z důvodu výskytu vysokého zalepování kotouče při broušení Inconelu 718 z minulých experimentů. Ostatní trysky měly za cíl přivádět řezný olej do místa broušení. Jednalo se o jednu Webster/Rouse trysku a tři dvoutryskové rezervoáry. Všechny trysky byly vytištěny na 3D tiskárně EOS M290 pomocí DMLS technologie a řádně očištěny v postprocessingu. Ustavení vytištěných trysek do stroje bylo provedeno nalepením epoxidovým dvousložkovým lepidlem na měděné trubky, které se ve stroji běžně používají jako přívod řezného oleje. Samotný experiment byl rozčleněn do pěti částí a v každé byl broušen vzorek z Inconelu 718 za pomoci jiné primární vytištěné chladící trysky. Jedno měření bylo provedeno konvenčním běžným chlazením pomocí pouhých měděných trubek pro porovnání. Všechna broušení vzorků byla prováděna za konstantních řezných podmínek.

Broušené vzorky byly podrobeny měřením profilové i plošné drsnosti pomocí opticko-skenovacího mikroskopu Alicona IFM G4. Nejlepších výsledků v podobě například parametru drsnosti $R_a = 0,539 \mu\text{m}$ a parametru $R_z = 6,047 \mu\text{m}$ bylo dosaženo na vzorku broušeného za pomoci chlazení přiváděného Webster/Rouse tryskou. Bohužel jako jediná tryska dosahuje lepších výsledků než konvenční chlazení, a to pouze o nepatrné hodnoty. Ostatní trysky v podobě dvoutryskových rezervoárů zvýšily drsnost plochy oproti konvenčnímu chlazení. Lze tedy konstatovat, že použitím složitějších designů trysek jako rezervoáry I, II a III nedochází k žádoucímu dostatečnému zaplavení místa řezu nejspíše z důvodu ztráty tlaku během proudění kapaliny skrze složitější vnitřní design.

Znatelnějším důvodem bude ovšem horší napolohování rezervoárů z důvodu jejich větší velikosti. Během instalování objemnějších a těžších rezervoárů do kazety stroje pro přívod chladicí kapaliny bylo náročnější tyto rezervoáry naorientovat do správných poloh. Zatímco Webster/Rouse tryska a konvenční chlazení byly jednodušší k ustavení do ideální polohy a jejich paprsky proudu řezného oleje mířily do správných míst. Tento poznatek potvrzuje i fakt, že při instalování rezervoáru III docházelo k problémům a jeho paprsek proudu mířil o něco níže pod brusný kotouč, než bylo zamýšleno. A právě tento rezervoár III dosáhl nejhorších výsledků v podobě nejvyšších drsností jak profilových, tak několika plošných. Navíc oskenovaný vzorek rezervoáru III v barevném spektru znázornil vysokou vlnitost povrchu v řádech několika mikrometrů, viz. obr. 46. Mohlo se tak stát vlivem periodického kmitání obrobku kvůli jeho nepřesnosti v upnutí. Spíše bych se ale přiklonil k hypotéze, že způsob chlazení má vliv na projev poměru otáček nástroje a obrobku, a tento způsob chlazení byl právě u rezervoáru III nevyhovující. Vysokým vlivem na správné uchlazení obrobku je právě poloha trysky což teoretická část potvrzuje.

Analýzou metalografické zkoušky struktury materiálu nebyly zjištěny žádné deformace či nežádoucí podpovrchové vrstvy vlivem broušení. Pouze u změřené mikrotvrdoosti v hloubce povrchu 0,17 mm byly nalezeny velmi nízké tvrdosti pro konvenční chlazení a rezervoár III.

Dalším důvodem pro neuspokojivé výsledky tištěných trysek je přesnost vnitřních povrchů trysek samotných. Povrch vnitřní geometrie trysky by měl být co nejnižší drsnosti, kvalitně opracován pro lepší obtékání kapaliny, viz. teoretická část. Tištěné trysky z kovu mají bohužel horší kvalitu povrchu již z podstaty samotné technologie 3D tisku. A následný postprocessing v podobě obrobení či leštění vnitřku trysek není možný z důvodu uzavřeného prostoru, kde nelze s žádným nástrojem operovat.

Cíl diplomové práce byl splněn u varianty chlazení pomocí Webster/Rouse trysky jež dosáhla těsně nižších drsností než konvenční chlazení. Avšak u Webster/Rouse trysky by bylo možné použít dokončovací technologii po 3D tisku vzhledem k její jednodušší otevřené konstrukci. S použitím vyšší jakosti povrchu by taková tryska mohla dosahovat lepších výsledků. Dalším návrhem pro zlepšení přívodu chlazení na nástrojářské brusce ANCA MX7 je použití přídatného nářadí v podobě ohýbačky měděných trubek, díky které lze ohnout trubku bez jakékoliv deformace profilu, čímž by došlo ke kvalitnějšímu proudění tekutiny.

Ve shrnutém doporučení pro příští experimenty lze konstatovat použití jednodušších designů trysek ideálně s opracovanou vnitřní geometrií pomocí některé dokončovací technologie a věnovat vysokou pozornost poloze trysek tak aby paprsek proudu mířil pouze do místa styku brusného kotouče a obrobku. Tryska by měla být ustavena také co nejblíže k místě řezu, pokud nedochází ke kolizím s ostatními částmi stroje.

Seznam použitých zdrojů

- [1] „APPLICATION GUIDE: Heat resistant super alloys". Viděno: led. 02, 2021. [Online]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/technical%20guides/en-gb/c-2920-034.pdf>
- [2] M. Varhaník, „Obrábění těžkoobrobitelných materiálů", Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojího inženýrství, 2018. Viděno: led. 02, 2021. [Online]. Dostupné z: <http://dspace.lib.vutbr.cz/xmlui/handle/11012/83056>
- [3] „inconel-alloy-718.pdf". Viděno: led. 02, 2021. [Online]. Dostupné z: <https://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/inconel/inconel-alloy-718.pdf>
- [4] Kennametal, „SuperAlloys_material_machining_guide_Aerospace.pdf". Kennametal [online]. [cit. 2021-01-03]. PDF soubor. Dostupné z: https://www.kennametal.com/content/dam/kennametal/kennametal/common/Resources/Catalogs-Literature/Metalworking/SuperAlloys_material_machining_guide_Aerospace.pdf
- [5] „Inconel 718 Tech Data". <http://www.hightempmetals.com/techdata/hitempInconel718data.php> (viděno led. 02, 2021).
- [6] Š. Michna a L. Michnová, *Neželezné kovy*, Vyd. 1. Děčín: Štefan Michna, Lenka Michnová, 2014.
- [7] „Nickel and Nickel Alloys- Machining". <https://www.espietals.com/index.php/technical-data/167-nickel-and-nickel-alloys-machining> (viděno led. 02, 2021).
- [8] „Obráběné materiály", *Sandvik Coromant*. <https://www.sandvik.coromant.com:443/cs-cz/knowledge/materials/pages/workpiece-materials.aspx> (viděno led. 02, 2021).
- [9] M. A. Xavior, M. Patil, A. Maiti, M. Raj, a N. Lohia, „Machinability studies on INCONEL 718", *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, roč. 149, s. 012019, zář. 2016, doi: 10.1088/1757-899X/149/1/012019.
- [10] J. Farský, „Grinding Inconel 718 using a galvanic grinding wheel", in *Soutěžní přehlídka studentských a doktorských prací FST 2019: sborník příspěvků*, Plzeň: Západočeská univerzita, 2019, s. 127–131.
- [11] T. Baksa, O. Hronek, J. Farsky, a M. Zetek, „Influence of Cutting Conditions on the Surface Quality and Grinding Wheel Wear During Cylindrical Grinding of Inconel 718", in *DAAAM Proceedings*, 1. vyd., roč. 1, B. Katalinic, Ed. DAAAM International Vienna, 2017, s. 0500–0505. doi: 10.2507/28th.daaam.proceedings.070.
- [12] „Integrita_prednaskaTZ.pdf". Viděno: lis. 24, 2020. [Online]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/Integrita_prednaskaTZ.pdf
- [13] *Jakost obráběných povrchů*. UJEP - ÚTRŮV, 2003.
- [14] W. Pei-zhuo, H. Zhan-shu, Z. Yuan-xi, a Z. Shu-sen, „Control of Grinding Surface Residual Stress of Inconel 718", *Procedia Eng.*, roč. 174, s. 504–511, led. 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.01.174.

- [15] K. Kocman, J. Prokop, a učení technické v B. Vysoké, *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001.
- [16] K. Zhuang, C. Hu, J. Zhou, a R. Lin Peng, „Investigation on work hardening phenomenon in turning Inconel 718 with chamfered inserts considering thermal-mechanical loads”, *Procedia CIRP*, roč. 87, s. 47–52, led. 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.02.071.
- [17] X. Ren a L. Zhanqiang, „Influence of cutting parameters on work hardening behavior of surface layer during turning superalloy Inconel 718”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, roč. 86, zář. 2016, doi: 10.1007/s00170-016-8350-9.
- [18] W. B. (William B. Rowe, *Principles of modern grinding technology*, 2nd ed. William Andrew, 2014.
- [19] M. K. Sinha, D. Setti, S. Ghosh, a P. Venkateswara Rao, „An investigation on surface burn during grinding of Inconel 718”, *J. Manuf. Process.*, roč. 21, s. 124–133, led. 2016, doi: 10.1016/j.jmapro.2015.12.004.
- [20] C.-W. Dai, W.-F. Ding, Y.-J. Zhu, J.-H. Xu, a H.-W. Yu, „Grinding temperature and power consumption in high speed grinding of Inconel 718 nickel-based superalloy with a vitrified CBN wheel”, *Precis. Eng.*, roč. 52, s. 192–200, dub. 2018, doi: 10.1016/j.precisioneng.2017.12.005.
- [21] Z. Z. Chen, J. H. Xu, W. F. Ding, C. Y. Ma, a Y. C. Fu, „Grinding temperature during high-efficiency grinding Inconel 718 using porous CBN wheel with multilayer defined grain distribution”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, roč. 77, č. 1, s. 165–172, bř. 2015, doi: 10.1007/s00170-014-6403-5.
- [22] S. Kohli, C. Guo, a S. Malkin, „Energy Partition to the Workpiece for Grinding with Aluminum Oxide and CBN Abrasive Wheels”, *J. Eng. Ind.*, roč. 117, č. 2, s. 160–168, kvě. 1995, doi: 10.1115/1.2803290.
- [23] I. D. Marinescu, Ed., *Handbook of machining with grinding wheels*. Boca Raton: CRC Press, 2007.
- [24] T. Tawakoli, A. Rasifard, a A. Vesali, „Effect of the Coolant Lubricant Type and Dress Parameters on CBN Grinding Wheels Performance”, *Adv. Mater. Res.*, roč. 76–78, s. 163–168, čer. 2009, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.76-78.163.
- [25] T. Tawakoli, A. Rasifard, a A. Vesali, *Effect of the Grinding Oil Type on CBN Grinding Wheels Performance*. 2009. doi: 10.1115/IMECE2009-12234.
- [26] R. L. Viridi, S. S. Chatha, a H. Singh, „Experimental investigations on the tribological and lubrication behaviour of minimum quantity lubrication technique in grinding of Inconel 718 alloy”, *Tribol. Int.*, roč. 153, s. 106581, led. 2021, doi: 10.1016/j.triboint.2020.106581.
- [27] R. Peng, X. He, J. Tong, X. Tang, a Y. Wu, „Application of a tailored eco-friendly nanofluid in pressurized internal-cooling grinding of Inconel 718”, *J. Clean. Prod.*, roč. 278, s. 123498, led. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123498.
- [28] A. Naskar, B. B. Singh, A. Choudhary, a S. Paul, „Effect of different grinding fluids applied in minimum quantity cooling-lubrication mode on surface integrity in cBN grinding of Inconel 718”, *J. Manuf. Process.*, roč. 36, s. 44–50, pro. 2018, doi: 10.1016/j.jmapro.2018.09.023.

- [29] D. De Oliveira, R. L. De Paiva, R. B. da Silva, a P. H. de Carvalho Castro, „Assessment of the grindability of Inconel 718 under different coolant delivery techniques", *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, roč. 42, č. 1, s. 20, pro. 2019, doi: 10.1007/s40430-019-2093-0.
- [30] S. Mahata, J. Mistri, B. Mandal, a S. Das, „A Comparative Study of Grinding Performance Using Different Fluid Delivery Techniques", *J. Assoc. Eng. India*, roč. 83, č. 3–4, Art. č. 3–4, pro. 2013, doi: 10.22485/jaei/2013/v83/i3-4/119929.
- [31] S. Ebbrell, N. H. Woolley, Y. D. Tridimas, D. R. Allanson, a W. B. Rowe, „The effects of cutting fluid application methods on the grinding process", *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, roč. 40, č. 2, s. 209–223, led. 2000, doi: 10.1016/S0890-6955(99)00060-7.
- [32] M. Morgan, A. R. Jackson, H. Wu, V. Baines-Jones, A. Batako, a W. Rowe, „Optimisation of Fluid Application in Grinding", *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, roč. 57, s. 363–366, led. 2008, doi: 10.1016/j.cirp.2008.03.090.
- [33] František Holešovský, „Abrazivní metody dokončování povrchu". <https://docplayer.cz/4624997-Frantisek-holesovsky.html> (viděno led. 13, 2021).
- [34] R. Peng, J. Tong, X. Tang, X. Huang, a K. Liu, „Application of a pressurized internal cooling method in grinding inconel 718: Modeling-simulation and testing-validation", *Int. J. Mech. Sci.*, roč. 189, s. 105985, led. 2021, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105985.
- [35] „Factors affecting proper coolant application when grinding". <https://www.ctemag.com/news/articles/factors-affecting-proper-coolant-application-when-grinding> (viděno led. 18, 2021).
- [36] „Coolant calculus: Directing coolant into the roght place, at the right speed, in the right quantity". Viděno: led. 18, 2021. [Online]. Dostupné z: https://www.ctemag.com/sites/www.ctemag.com/files/archive_pdf/0802-GrindingCoolant.pdf
- [37] W. B. Rowe, „8 - Application of Fluids", in *Principles of Modern Grinding Technology (Second Edition)*, W. B. Rowe, Ed. Oxford: William Andrew Publishing, 2014, s. 123–158. doi: 10.1016/B978-0-323-24271-4.00008-7.
- [38] N. Madanchi, M. Winter, S. Thiede, a C. Herrmann, „Energy Efficient Cutting Fluid Supply: The Impact of Nozzle Design", *Procedia CIRP*, roč. 61, s. 564–569, led. 2017, doi: 10.1016/j.procir.2016.11.192.
- [39] „Cool-Grind Technologies - High Pressure Coolant Nozzles", *Cool-Grind*. <https://cool-grind.com/> (viděno bře. 18, 2021).
- [40] M. Morgan a V. Baines-Jones, „On the Coherent Length of Fluid Nozzles in Grinding", *Key Eng. Mater. - KEY ENG MAT*, roč. 404, s. 61–67, led. 2009, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.404.61.
- [41] J. Steffen, R. Bauer, A. Warkentin, a E. Becze, „Performance of a coherent jet coolant system in non-continuous dress creep-feed grinding of inconel 718", *J. Adv. Manuf. Syst.*, roč. 04, č. 02, s. 117–130, pro. 2005, doi: 10.1142/S021968670500062X.
- [42] A. Bhattacharya, A. Batish, a M. Singh, „Experimental studies to validate simulated results for nozzle effectiveness using multi-response optimisation during cylindrical grinding process", *Int. J. Mater. Eng. Innov.*, roč. 3, č. 3–4, s. 165–189, led. 2012, doi: 10.1504/IJMATEI.2012.049261.
- [43] V. A. Baines-Jones, „Nozzle Design for Improved Useful Fluid Flow in Grinding", doctoral, Liverpool John Moores University, 2010. doi: 10.24377/LJMU.t.00005929.

- [44] T. Pícha, „Inovace přípravku pro měřicí přístroj Alicona IFM G4", *Innovation Tool Grip for Alicona IFM G4 Measuring Instrument*, 2018, Viděno: kvě. 18, 2021. [Online]. Dostupné z: <http://dspace5.zcu.cz/handle/11025/32412>
- [45] J. Metelková, „Pokročilé metody vyhodnocování topografie povrchu", *Advanced methods of surface topography evaluation*, čer. 2014, Viděno: kvě. 18, 2021. [Online]. Dostupné z: <http://dspace.lib.vutbr.cz/xmlui/handle/11012/33003>

Příloha č. 1

Měřicí protokol drsnosti povrchu vzorku 258 – konvenční chlazení

Pozn.: Všechny protokoly z měření drsnosti jsou umístěny na CD.

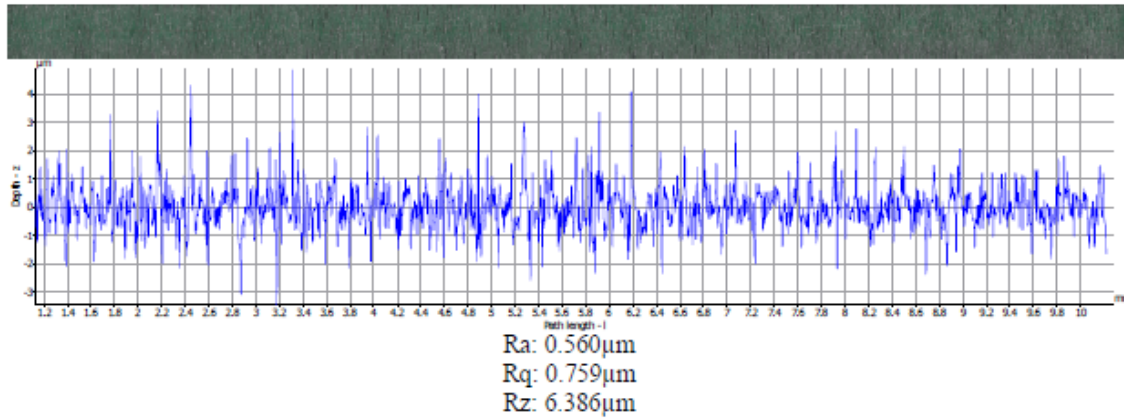
Alicona Imaging GmbH
Dr.-Auner Strasse 21a
A-8074 Raaba/Graz

alicon

Measurement Report

Profile Measurement

258_FR



Filter: high pass - roughness profile
Lc:= 800.000 μ m

Alicona Imaging GmbH
Dr.-Auner Strasse 21a
A-8074 Raaba/Graz

alicona

Measurement Report

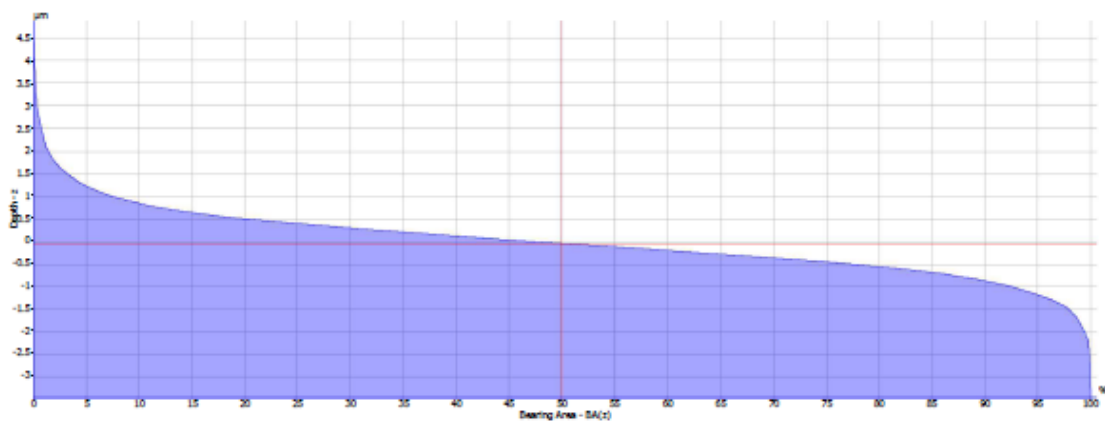
Profile Measurement

Bearing Ratio/Firestone-Abbott Curve

of Roughness Profile

$L_c = 800.000\mu\text{m}$

258_FR



Measurement line

$BA(z) = 50.000\%$

$z = -0.035\mu\text{m}$

Name	Value	Unit	Description
Rk	1.660	μm	Core roughness depth, Height of the core material
Rpk	1.193	μm	Reduced peak height, mean height of the peaks above the core material
Rvk	0.833	μm	Reduced valley height, mean depth of the valleys below the core material
Rmr1	10.990	%	Peak material component, the fraction of the surface which consists of peaks above the core material
Rmr2	89.790	%	Peak material component, the fraction of the surface which will carry the load
l	11.357	mm	Profile Length
Lc	800.000	μm	LambdaC: cut off wavelength

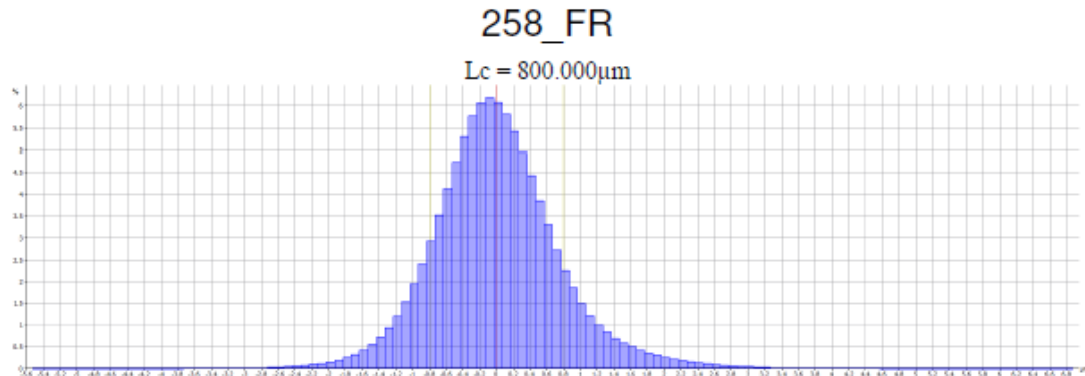
Alicona Imaging GmbH
Dr.-Auner Strasse 21a
A-8074 Raaba/Graz

alicona

Measurement Report

Surface Texture Measurement

Surface Texture of Roughness Dataset (Selection)



Histogram Histogram Settings

Number of Classes: 124
Minimum Value: -5.532µm
Maximum Value: 6.868µm
Class Width: 0.100µm

Statistics

Name	Value	Unit	Description
Elements	7419405		Number of data values
Classes	124		Number of histogram classes
Mean Value	0.005	µm	Mean value of data values
Standard Deviation	0.792	µm	Mean Value of standard deviation

Parameters

Name	Value	Unit	Description
Sa	0.585	µm	Average height of selected area
Sq	0.792	µm	Root-Mean-Square height of selected area
Sp	6.819	µm	Maximum peak height of selected area
Sv	5.532	µm	Maximum valley depth of selected area
Sz	12.350	µm	Maximum height of selected area
S10z	11.827	µm	Ten point height of selected area
Ssk	0.502		Skewness of selected area