

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta strojní



Bakalářská práce

Návrh a výroba vysoce výkonné chladící trysky
pro hloubkové broušení

Alexandr Lazarov

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Lazarov** Jméno: **Alexandr** Osobní číslo: **423377**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh a výroba vysoce výkonné chladičí trysky pro hloubkové broušení

Název bakalářské práce anglicky:

Design and manufacturing of high performance cooling nozzle for creep feed grinding

Pokyny pro vypracování:

- 1) Technologie broušení - popis, způsoby
- 2) Hloubkové broušení niklových superslitin
- 3) Možnosti chlazení obrobků, druhy kapalin
- 4) Rozbor problematiky broušení lopatek z Inconelu 713 LC
- 5) Koncepční návrh optimální trysky, tvorba výkresové dokumentace
- 6) Rámcový technologický postup výroby trysky

Seznam doporučené literatury:

Teorie broušení kovů - Maslov J.N., 1979
Creep Feed Grinding - Colin Andrew, Trevor D. Howes; 1996

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Zdeněk Pitrmuc, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **20.04.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15.07.2017**

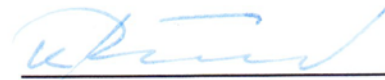
Platnost zadání bakalářské práce: _____



Podpis vedoucí(ho) práce



Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

25.04.2017

Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Anotace:

V následující bakalářské práci je stručně popsána problematika broušení lopatek z Inconelu 713 LC, jejich materiálové a mechanické vlastnosti. Dále je zmapována problematika, odlišnosti a možnosti chlazení jak při klasickém, tak hloubkovém broušení niklových superslitin. Na základě poznatků z teoretické části, byl vytvořen koncepční návrh vysoce výkonné radiálně-tangenciální trysky. Tento koncepční návrh byl rozpracován do kompletní výkresové dokumentace. Prototypová tryska byla testována v reálných podmínkách. V závěru práce jsou prezentovány přínosy nového systému chlazení.

Abstract:

In this bachelor thesis, the issue of blade grinding from Inconel 713 LC is briefly described. Also their material and mechanical properties. Further, the problems, differences and possibilities of cooling are mapped for classic and creep feed grinding of nickel superalloys. Based on the findings from the theoretical part, a conceptual design of a high-performance radial-tangential nozzle was created. This conceptual design was developed into a complete drawing documentation. The prototype nozzle was tested under real conditions. At the end of the thesis the benefits of the new cooling system are presented.

Klíčová slova: oscilační broušení, hloubkové broušení, chlazení při hloubkovém broušení, chladicí tryska, niklové superslitiny, Inconel 713 LC

Keywords: pendulum grinding, creep feed grinding, creep feed grinding cooling, cooling nozzle, nickel superalloys, Inconel 713 LC

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně s tím, že její výsledky mohou být dále použity podle uvážení vedoucího bakalářské práce Ing. Zdeňka Pitrmuce jako jejího spoluautora. Souhlasím také s případnou publikací výsledků diplomové práce nebo její podstatné části, pokud budu uveden jako její spoluautor.

Dne

.....

V Praze

Alexandr Lazarov

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Zdeňku Pitrmucovi za odborné vedení, věcné připomínky, vstřícnost při konzultacích a za pomoc při zpracování této práce.

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Teorie broušení kovů.....	10
2.1	Historie.....	10
2.2	Podstata broušení.....	11
2.3	Druhy brusných materiálů	12
2.3.1	Přírodní brusné materiály.....	13
2.3.2	Syntetické brusné materiály.....	13
2.4	Chlazení.....	14
2.4.1	Chlazení pomocí vzduchu	14
2.4.2	Chlazení pomocí kapaliny	14
3	Hloubkové broušení.....	15
3.1	Základní parametry hloubkového broušení.....	16
3.1.1	Kinematika hloubkového broušení.....	16
3.1.2	Hloubka řezu.....	17
3.1.3	Rychlost posuvu.....	17
3.1.4	Smysl otáčení brusného kotouče	18
3.1.5	Řezná rychlost.....	18
3.2	Kvalita povrchu po hloubkovém broušení.....	18
3.3	Zbytková napětí po hloubkovém broušení.....	19
3.4	Chlazení při hloubkovém broušení	20
3.4.1	Princip a možnosti	20
3.4.2	Použití trysky vysokotlaké chladicí kapaliny.....	22
3.4.3	Hlavní doporučení v oblasti chlazení.....	22
4	Koncepční návrh optimální trysky	23
4.1	Zadání a vstupní parametry	23
4.1.1	Polotovar	26
4.1.2	Materiál	27
4.1.3	Bruska	27
4.1.4	Kotouč.....	28
4.2	Parametrický model a základní princip zlepšení.....	29
4.2.1	Hlavní výstupní štěrbina	29
4.2.2	Vedlejší výstupní štěrbina.....	29

4.2.3	Větrná clona.....	30
4.2.4	Falešná (nájezdová) lopatka	31
4.3	3D model výsledné trysky	31
4.4	Ověření výsledků.....	33
4.4.1	Kapilární zkouška	33
4.4.2	Měření drážek zámků přes válečky	34
4.4.3	Výsledné řezné podmínky	34
4.5	Výkresová dokumentace.....	35
4.6	Rámcový technologický postup	35
5	Závěr.....	36
	Citovaná literatura.....	38
	Seznam obrázků	39
	Seznam tabulek	40

Úvod

V současné době používání nákladných výrobních technologií a systému je stále větší důraz kladen na jejich efektivní využití, na zkrácení výrobních časů, eventuálně na zeštíhlení výroby. Tento fenomén v posledních letech dorazil i do oblastí průmyslu s vysokou přidanou hodnotou jako je letectví a energetika. Pro toto odvětví byl doposud typický maximální důraz na kvalitu, bezpečnost a provozní spolehlivost dílu. To platí i pro lopatky leteckých motorů, které jsou řešeny v rámci této bakalářské práce. V dnešní době je třeba veškeré výše zmíněné vlastnosti zachovat, cíleně je monitorovat, ověřovat a zároveň výrobu těchto výrobků zefektivnit. K tomu je bezpodmínečně nutné provádět vývoj testování a optimalizaci standardně dodávaných výrobních technologií k získání konkurenční výhody.

V této práci se budu zabývat návrhem a následnou výrobou výkonné chladicí trysky pro hloubkové broušení zámků lopatek z materiálu Inconel 713 LC. Nejprve stručně představím obecnou teorii k technologii broušení. V dalším kroku nastíním problematiku technologie hloubkového broušení. Při využití hloubkového broušení je nutné pochopení materiálových a technologických vlastností broušeného materiálu, proto budou tyto skutečnosti předmětem další části mé bakalářské práce. Dále bude popsána samotná tryska, navržená v návaznosti na výše zjištěné poznatky, zároveň budou prezentovány výsledky a metodika testovacího provozu s novou tryskou.

Teorie broušení kovů

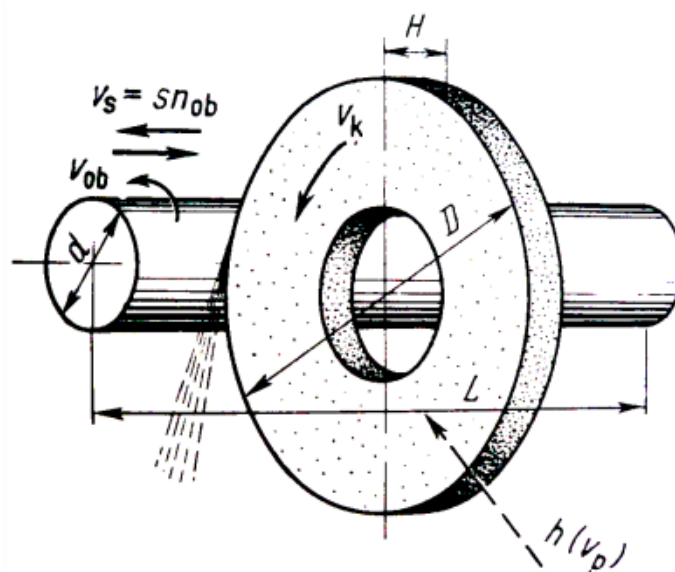
1.1 Historie

Broušení je velmi starý způsob obrábění materiálů. Již v dávné minulosti používal člověk přírodní brusiva k tomu, aby naostřil své pracovní nástroje (sekery, nože, kopí apod.).

Vývoj broušení se značně urychlil vynálezem umělého broušícího kotouče (r. 1859) a sestavením prvních univerzálních broušících strojů (r. 1860). Neustálé zdokonalování broušících strojů a zlepšování vlastností broušících kotoučů umožnilo, že se broušení stalo jedním z velmi produktivních způsobů přesného obrábění různých materiálů. [1]

Objevení nalezišť přírodního diamantu, zdokonalení techniky jeho těžení a výroba umělých diamantů, umožnila rozmach průmyslového obrábění pomocí diamantového brusiva. V prvních fázích implementace technologie broušení, byly brusné nástroje používány na přebroušování břitů ze slinutých karbidů. S rostoucí poptávkou po materiálech a technologiích, které by zaručily vyšší přesnost a účinnost obrábění, se broušení začalo aplikovat v automobilovém, lodním a traktorovém průmyslu (ojnice, válce, ozubená kola).

1.2 Podstata broušení



Obr. 1 Schéma broušení vnějších válcových ploch s posuvem podél osy obrobku,

kde:

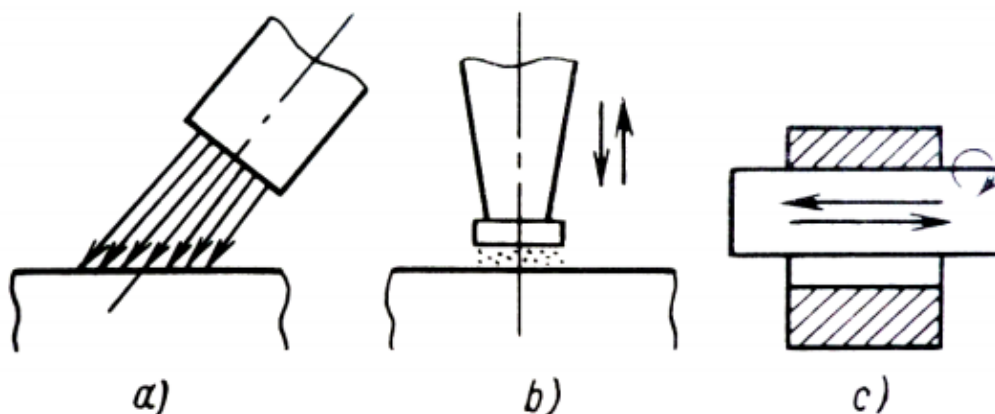
v_k [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	- obvodová rychlost broušícího kotouče,
v_{ob} [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	- obvodová rychlost obrobku,
v_s [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]	- podélný posuv,
$h(v_p)$ [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]	- přisuv,
D, d [mm]	- průměr broušícího kotouče,
H [mm]	- šířka broušícího kotouče,
L [mm]	- délka broušené plochy obrobku [1].

Broušení, je hromadné odírání povrchových vrstev povrchu, velmi jemnými zrny brusiva, které jsou zatmeleny zpravidla na nástrojích ve tvaru kotouče. Řezné rychlosti se pohybují od 10 do 150 m/s. Broušením, lze dosáhnout vysoké přesnosti při obrábění a zároveň zrychlení celého procesu výroby dílu. [1]

Podle typu broušícího nástroje se rozlišují tyto druhy broušení:

1. *vázaným pevným brusivem* – zrna brusiva spojená pojivem do tvaru kotouče, broušícího tělíska, segmentu, broušícího kamene či nástroje jiného tvaru, nebo zrna přilepená k pružnému podkladu, kdy řezný nástroj je ve tvaru broušícího pásu

2. *volným brusivem* – při využití zrn ve formě prášku pro broušení kapalinou, ultrazvukem nebo jiným podobným způsobem obrábění tvrdých materiálů (obr. 2). [1]



Obr. 2 Základní způsoby broušení volným brusivem: a) proudem brusiva, b) ultrazvukové, c) lapování [1].

Nejčastěji se používá obrábění vázaným brusivem, které může být z korundu, karbidu křemíku, diamantu, kubického nitridu boru a dalších velmi tvrdých látek.

Broušení jako metoda obrábění na čisto se vyznačuje:

1. vysokou produktivitou
2. vysokou přesností obrobených rozměrů v mezích od 2 do 3 μm i méně
3. velkou geometrickou přesností tvaru obrobených ploch
4. vysokou kvalitou povrchu – průměrná aritmetická úchylka profilu broušené plochy (v dalším textu jen R_a) řádově desetiny μm
5. vysokou kvalitou povrchové vrstvy obrobku s minimálním stavem napjatosti jeho materiálu
6. možností obrábění velmi tvrdých materiálů (kalené oceli, slinutých karbidů, minerál-keramických materiálů atd.), protože zrna brusiva nástroje jsou velmi tvrdá a tepelně odolná. Tím, že se při broušení odebrává množství velmi jemných třísek z povrchu obrobku při působení malých řezných sil, se dosahuje velmi dobrých vlastností součástí. [1]

1.3 Druhy brusných materiálů

Brusná zrna jsou tvrdé, houževnaté a ostrohranné krystaly, nebo částice brusné hmoty, jejíž šířka nepřesahuje 5 mm, kterými lze brousit jiné měkčí materiály. Ostré hrany každého zrna představují jednotlivé břity s velmi rozmanitou geometrií.

Druh materiálu se volí v závislosti na vlastnostech obráběného materiálu. Pro broušení oceli, oceli na odlitky, temperované litiny a tvrdého bronzu je vhodný umělý korund. Karbid křemíku se používá pro šedé litiny, mosazi, měď, lehké kovy a jejich slitiny, slinuté karbidy, sklo a keramiku.

1.3.1 Přírodní brusné materiály

Nejpoužívanějšími materiály z této kategorie jsou korund, smirek a křemen. Do přírodních materiálů se řadí i přírodní diamant, jehož aplikace je kvůli vysoké ceně velice nákladná.

Korund (E) – minerál, který se skládá z oxidu hlinitého (80 – 90%) a příměsí dalších minerálů. Korund je tvrdý a nepříliš křehký materiál. V přírodě lze najít mnoho různých druhů Korundu.

Smirek (N) – je minerál na bázi oxidu hlinitého, ale v porovnání s výše uvedeným Korundem obsahuje pouze do 60% oxidu hlinitého. Různé vedlejší příměsi snižují jeho brusný výkon.

Křemen (Kr) – jeho hlavní složkou je oxid křemičitý (až 97%) s příměsí dalších minerálů. [1]

1.3.2 Syntetické brusné materiály

S rozvojem technologií pro broušení rostla poptávka a tlak na cenu brusných materiálů.

Umělý korund (E) – vyrábí se přetavováním oxidu hlinitého v obloukové elektrické peci. Nejpoužívanější brusivo na broušení ocelí, ocelí na odlitky, temperované litiny a tvrdého bronzu.

Mono korund (M) – je tvořen jednotlivými krystaly, omezenými přirozenými krystalovými plochami (ne úlomky krystalů). Zrna mají pravidelný tvar a jsou stejnorodá. Povrch není poškozen trhlinami, zrna jsou bez vnitřního pnutí. Vhodné pro broušení rychlořezných ocelí (ostření nástrojů).

Karbid křemíku (karbokorundum) – je tvrdší, houževnatější a odolnější než korund. Surovinou k výrobě je křemičitý písek a petrolejový koks. Látka krystalizuje v destičkách a jehličkových krystalech. Pro broušení litiny, velmi tvrdých a křehkých materiálů (slinuté karbidy), měď, hliník, měkký bron.

Karbid boru (KB) – sloučením boru a uhlíku v elektrické peci vznikají malé lesklé krystalky vysoké tvrdosti (tvrdší než karbid křemíku). Bývá jako náhražka diamantového prášku.

Kubický nitrid boru (CNB) – tvrdší než všechny ostatní druhy brusiv s výjimkou diamantu. Je teplotně stálý do 1 400°C.

Syntetické diamanty (AS) – se moc neliší od diamantů přírodních. [2]

1.4 Chlazení

V procesu mikrořezání se vytváří v povrchové vrstvě obrobku při broušení velký počet míst s vysokými teplotami, jejichž působením se povrchová vrstva intenzivně zahřívá. Tepelný proces v povrchové vrstvě obrobku se vyznačuje vysokou rychlostí místního ohřevu, krátkou prodlevou na této teplotě a rychlým ochlazením (zvláště při použití řezné kapaliny) [3].

Téměř veškerá mechanická práce v procesu mikrořezání přechází při broušení v teplo a pouze její zanedbatelná část (desetiny procenta) se spotřebuje na přeměnu krystalické mřížky obráběného materiálu.

Vzniklé teplo přechází do obrobku, kotouče, třísky a řezné kapaliny. Největší množství tepla (až 80%) přechází při broušení do obrobku, nejmenší část tepla se ztrácí vyzařováním do okolního prostředí. Vysoké teploty broušení mohou způsobit defekty povrchové vrstvy obrobku a obrobek se znehodnotí. Proto se tepelný vliv stává jedním ze základních činitelů broušení [3].

Chlazení při broušení provádíme za účelem:

1. odvedení tepla vznikajícího při broušení
2. očištění povrchu obrobku a brousícího kotouče od třísek
3. udržení řezivosti kotouče
4. zvýšení kvality obráběné plochy

Teplo vznikající při broušení, které není odváděno, může způsobit:

1. deformaci obrobku
2. popuštění zakaleného obrobku
3. způsobit na povrchu barevné skvrny

1.4.1 Chlazení pomocí vzduchu

Při chlazení vzduchem brousíme za sucha. Broušenou plochu ochlazuje pouze vzduch strhávaný rotujícím brusným kotoučem. Při broušení se dosahuje jen malých výkonů. Výhodou při tomto způsobu broušení je čistota obrobků a stroje.

1.4.2 Chlazení pomocí kapaliny

Má vysoký chladicí účinek. Chlazení provádíme řeznou kapalinou, která kromě chladicího účinku má i mazací účinek. Čistá voda má vysoký chladicí účinek, ale způsobuje rezivění strojů, proto se přidává do vody 3 až 6% emulzního oleje. Olejové emulze vytvářejí na obrobku i na stroji olejový film zabraňující rezivění.

Chladicí kapalina se přivádí v dostatečném množství tak, aby tryskala na stykovou plochu kotouče a na obrobek po celé šířce kotouče. Zvláštním způsobem přivádění chladicí kapaliny je přivádění kapaliny vnitřkem brousícího kotouče, kdy je řezná kapalina přiváděna k upínací díře kotouče, odkud ji odstředivá síla

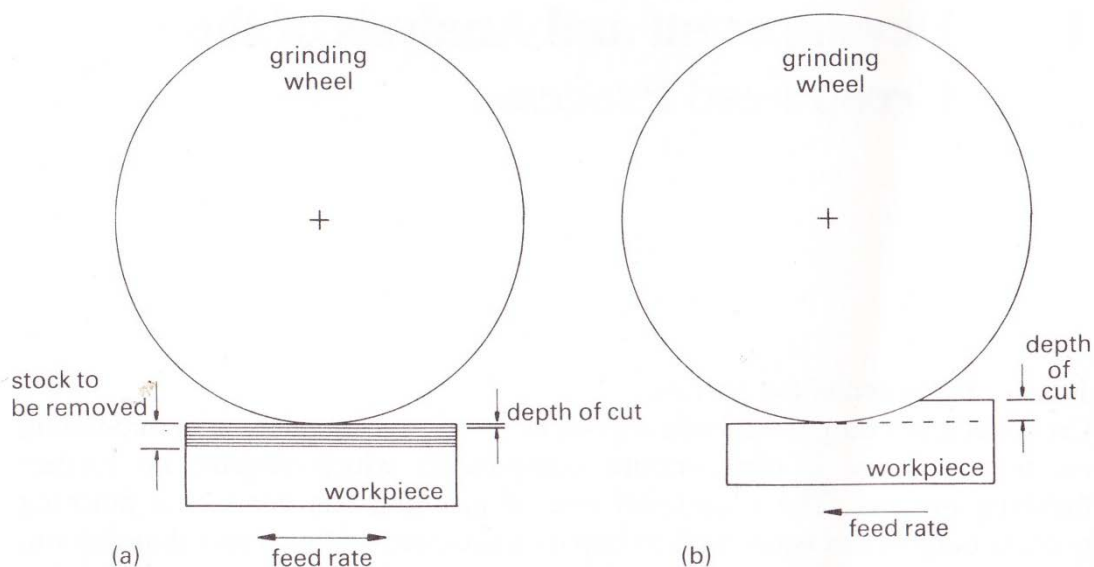
protlačuje až na obvod kotouče. Chladicí kapalina musí být zbavena třísek a nekovových nečistot. Třísky se oddělují magneticky nebo odstředivými filtry, nemagnetické nečistoty zachytávají síťové filtry.

Pro různé broušené materiály používáme různé chladicí kapaliny (např. voda s olejem, olej, petrolej s olejem). [4]

Hloubkové broušení

Hloubkové broušení nese oproti klasickému broušení uvedeného v kapitole 2 řadu odlišností. Je to proces odebrání velkých objemů materiálu a v závislosti na požadavcích ho můžeme užít oproti klasickému broušení jak pro hrubování, finišování, tak pro obě operace současně. Výsledkem je zkrácení strojního času, počtu použitých strojů a nákladů.

Hloubkové broušení můžeme srovnávat například s oscilačním broušením, kde je hlavní rozdíl v hloubce třísky, počtu úběrů a strojním čase. Rozdíl těchto technologií je zobrazen na obrázku 3.



Obr. 3 - Rozdíl mezi hloubkovým a oscilačním způsobem broušení [5]

Při pohledu na obrázek 3 je patrné, že při oscilačním broušení je délka styčného oblouku mnohem menší než u hloubkového broušení. Délka styčného oblouku je zpravidla 1-3 mm zatímco u hloubkového broušení může být i desetinásobně větší. Tento fakt je hlavním důvodem vzniku podpalů, materiálových změn v obráběném materiálu a vede k nutnosti použití speciálních chladících trysek a vysokého tlaku chladicí kapaliny. [5]

Název hloubkové broušení, neboli v angličtině „Creep feed grinding“ znamená nízkou rychlost posuvu a naopak velkou hloubku řezu. Posuvy se zpravidla pohybují okolo 10-1000 mm/min a hloubka řezu je 1-10 mm. Hloubka řezu může být i vyšší

$$S = l_g * s = \frac{V_w}{V_s} * A_e * d_s \quad (1)$$

Délka styčného oblouku může být vyjádřena rovnicí [6]:

$$l_g = \sqrt{A_e * d_s} \quad (2)$$

Výsledný úhel vektoru síly F můžeme vyjádřit jako [6]:

$$P_p = \frac{l_g}{2} * \frac{4}{\pi * d_s} * 90^\circ = 57,32^\circ * \sqrt{\frac{a_e}{d_s}} \quad (3)$$

1.5.2 Hloubka řezu

Při užití hloubkového broušení je hloubka řezu, nebo také tloušťka třísky rovna potřebné výšce ubíraného materiálu. Existují však dvě základní výjimky:

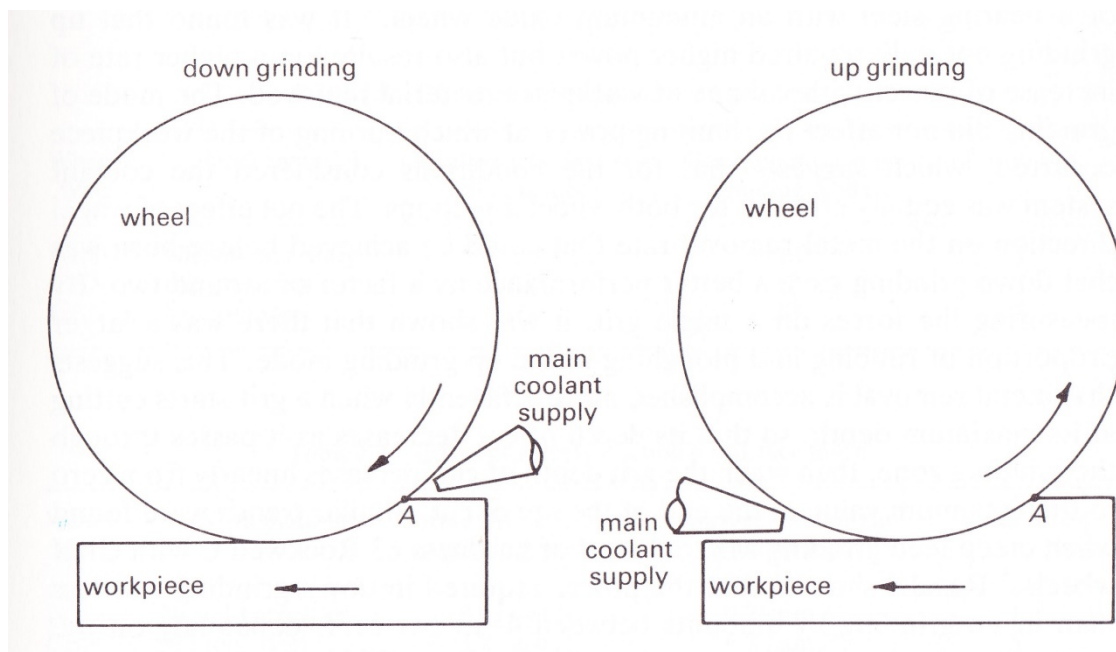
- a) Pokud by pouze při jednom průjezdu brusného kotouče výsledný povrch nesplňoval požadovanou hodnotu drsnosti, případně jevil známky popalů nebo mechanického poškození, je nutné změnit strategii. Je potřeba využít prvního úběru tzv. hrubování kde ubereme zpravidla 90-95% materiálu. Tento krok má dvě opodstatnění. První spočívá v zamezení vzniku popalů a materiálových změn na finálním povrchu obrobku, kdy je pomocí experimentu potvrzeno, že tyto změny nastávají pouze v tenké vrchní vrstvě. Pokud by došlo k rozsáhlejšímu poškození, které by nebylo odstranitelné finišováním, je potřeba upravit i rezné podmínky, případně brusný materiál a chladicí systém. Druhým faktorem je fakt, že pokud není využito kontinuálního orovnávacího kotouče (ekonomicky velice nákladné), nastává při takto velkých úběrech deformace profilu kotouče a hodnota úběru přestává být konstantní. Typické pro profilové broušení, rohy, drážky a také zámky lopatek.
- b) Pokud je tloušťka odebíraného materiálu příliš velká na jeden průjezd, je nutno rozdělit broušení do několika menších úběrů. Tento krok má své opodstatnění v kvalitě broušeného povrchu a výsledném tolerančním poli. [5]

1.5.3 Rychlost posuvu

Pokud je vybrána tloušťka třísky můžeme zvolit rychlost posuvu. Na rychlost posuvu u hloubkového broušení má vliv dva faktory: výkon na vřetenu brusky a maximální síla, kterou můžeme působit na obrobek v broušeném místě, dříve než nastanou popaly nebo materiálové změny.

1.5.4 Smysl otáčení brusného kotouče

Zde vycházíme z již známých poznatků o sousledném a nesousledném broušení. Na obrázku č. 5 můžeme vidět jejich aplikaci v případě hloubkového broušení.



Obr. 5 – Rozdíl chlazení při sousledném a nesousledném broušení [5]

V obou případech je nutné dodržet pravidlo, že směr tryskání vody musí být stejný jako smysl otáčení kotouče. Díky tomu je porézni kotouč schopen nabrat efektivně vodu až do místa řezu, kde zajistí optimální chlazení. [5]

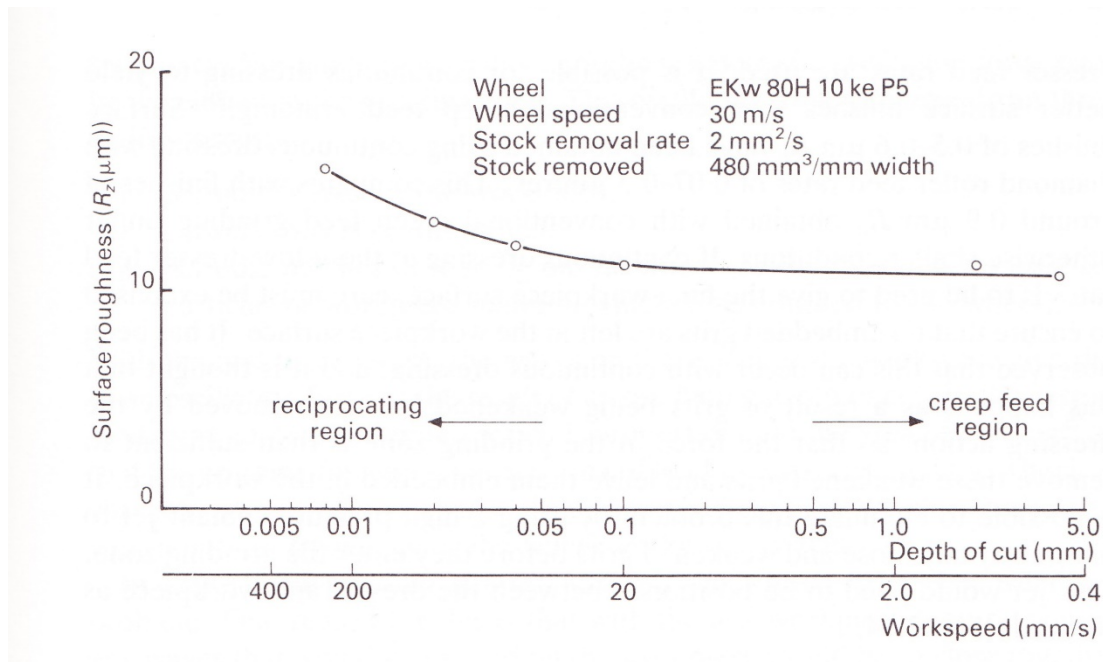
1.5.5 Řezná rychlost

Pro hloubkové broušení se standardně využívají řezné rychlosti do 30 m/s. Sérií pokusu bylo zjištěno, že rychlostmi převyšujícími 30 m/s obrábět lze, ale dochází při nich k zvýšenému opotřebení brusného kotouče. Vyšší rychlost vyvolává také vyšší třecí sílu a ta se ve formě tepelné energie již nedokázala efektivně přesunout do chladícího media a kotouče. To vedlo k teplotnímu poškození obrobku. Při užití vyšších rychlostí a posuvu dále platí, že se zvětšuje velikost částic odebraného materiálu. Ty poté poškozují výsledný povrch a zanášejí brusný kotouč. [5]

1.6 Kvalita povrchu po hloubkovém broušení

Kvalita povrchu po hloubkovém broušení je velmi závislá na vhodné volbě brusného kotouče. Pokud budeme hodnotit parametr drsnosti povrchu, můžeme říct, že při volbě vhodného kotouče a správném nastavení orovnávacího cyklu již na

výslednou drsnost nemá změna posuvu a ni hloubka řezu velký vliv. Toto tvrzení je graficky znázorněno na obrázku č. 6.



Obr. 6 – závislost výsledné drsnosti Rz na hloubce řezu a posuvu [5]

V případě příliš vysoké drsnosti povrchu můžeme přistoupit ke kontinuálnímu orovnávacímu cyklu. Takový cyklus neustále upravuje povrch brusného kotouče diamantovým orovnávačem tak, aby bylo dosaženo maximální shody s požadovaným tvarem a drsností profilu. Nese sebou však zvýšené opotřebení kotouče a tím snižuje jeho životnost. Při kontinuálním orovnávacím cyklu se ubírá od 1 do 2,5 mikronu na jednu otáčku vřetene. Další možnost je využití čistící trysky, která povrch kotouče očistí před, nebo za místem řezu.

1.7 Zbytková napětí po hloubkovém broušení

Při broušení niklových superslitin působí na obrobek vložena napětí a momenty, dochází k nehomogenní plastické deformaci, tj. neprobíhá v celém objemu materiálu stejně a stejnoměrně, v obrobku existuje časově proměnné a dynamicky se vyvíjející teplotní pole a v průběhu broušení je nutné brát v potaz také uskutečnění fázových přechodů. Jakmile broušení skončí, jsou všechny tyto vnější vlivy odstraněny a na finální výrobek již žádné silově ani tepelně či chemický významná působení nejsou kladena. Přesto v materiálu zůstávají napětí, zvaná zbytková, která podstatným způsobem ovlivňují provozní vlastnosti výrobku, zejména při jeho vystavení dynamickému namáhání. Výsledný stav zbytkové napjatosti vyvolaný broušením niklových slitin je však determinován zejména plastickou deformací v povrchových vrstvách obrobku, která může vést k tlakovým i tahovým povrchovým zbytkovým napětím, a nehomogenními teplotními poli vedoucím díky tepelné roztažnosti spíše k tahovým povrchovým napětím. Tahová

zbytková napětí mohou významně zvýšit existující napětí ve strojních součástech při jejich provozu, což může vést a často také vede ke snížení únavové životnosti a k předčasnému selhání.

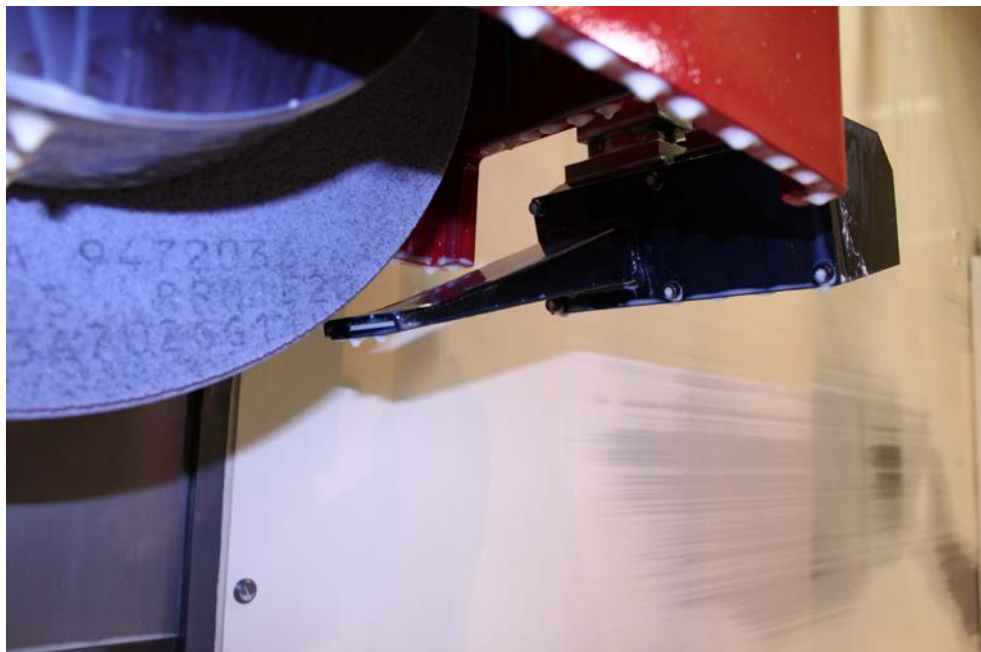
Vytvoření povrchové vrstvy s tlakovými zbytkovými napětími zvyšuje mimo jiné odolnost součástek vůči šíření trhlin a korozi. Debaty o prospěšnosti tahových nebo tlakových napětí však musí vždy být prováděny s důrazem na lokálnost, nejčastěji vzhledem k povrchu či tenké povrchové vrstvě tloušťky 10 až 20 μm . [7]

1.8 Chlazení při hloubkovém broušení

Nutnost správně navrženého chladicího systému byla zmíněna již výše. Největším problémem hloubkového broušení je zvýšená produkce tepla ve stykovém oblouku mezi kotoučem a obrobkem.

1.8.1 Princip a možnosti

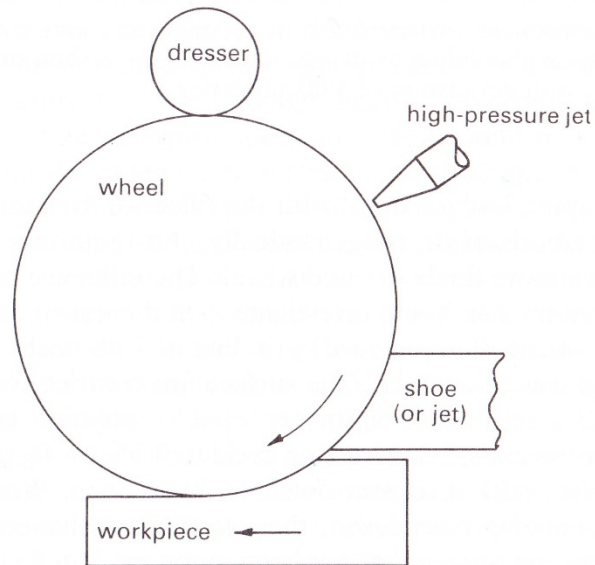
Chlazení při hloubkovém broušení je nejčastěji uskutečněno pomocí trysky jako např. na obrázku č. 7.



Obr. 7 - Standardní provedení chladicí trysky

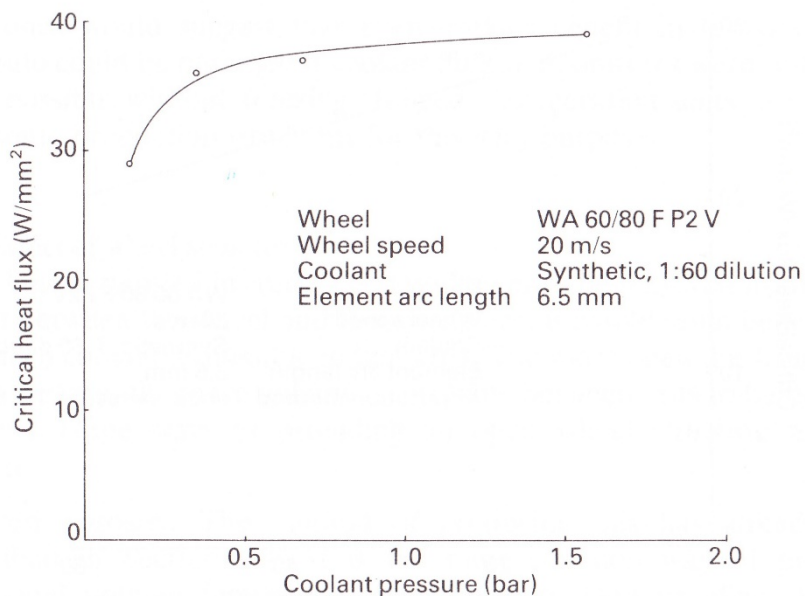
Dalším možným způsobem je použití dvou trysek vyznačených na obrázku 8, kdy je hlavní tryska (1) směřována do místa řezu a vedlejší tryska (2) je užitá jako penetračně – čistící. Její užitek spočívá v dodatečném penetrování brusného

kotouče (pokud to jeho porozita umožňuje) pro dosažení většího odvodu tepelné energie z místa řezu.



Obr. 8 - Znázornění použití přídavné trysky a orovnávače [5]

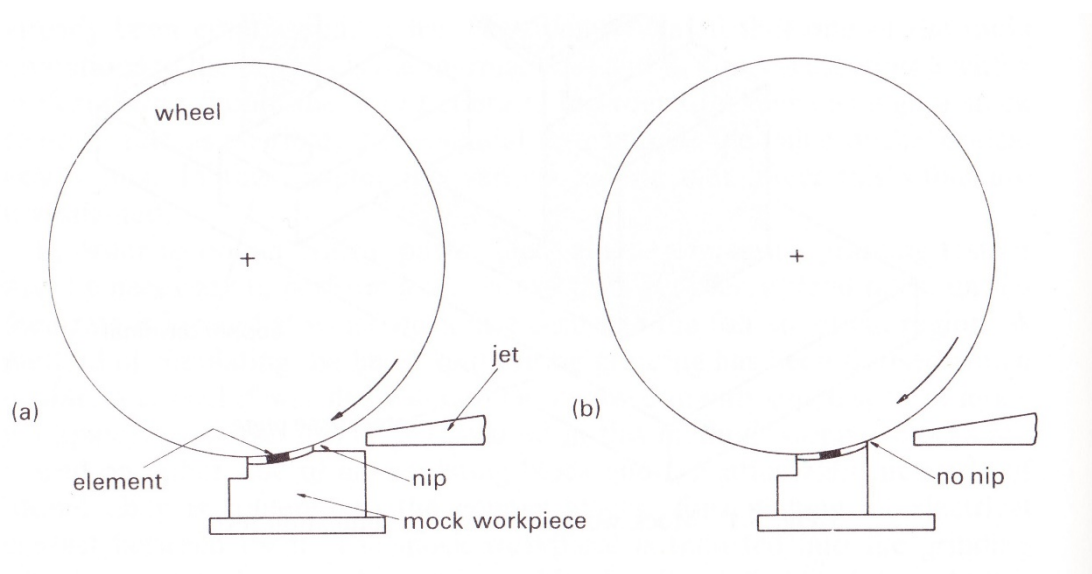
Při nedostatečném chlazení je možno využít i předchlazení řezné kapaliny. Tento krok je vhodné aplikovat, pokud jsme již vyčerpali veškeré technické a např. prostorové schopnosti stroje. V případě, kdy je objem nádoby s chladivem nedostačující a dojde ke zvýšení teploty z 20 °C na 45 °C je z grafu na obrázku 9 patrný propad chladícího výkonu až o 25 %. [5]



Obr. 9 - Závislost množství odebraného tepla na tlaku chladící kapaliny [5]

1.8.2 Použití trysky vysokotlaké chladicí kapaliny

Užití trysky je nejefektivnějším způsobem chlazení při hloubkovém broušení. Při užívání byly zjištěny dva faktory, které nejvíce ovlivňují výsledný efekt chlazení a to výstupní rychlost kapaliny a tvar vstupu kapaliny do místa řezu viz obrázek 10. Na něm můžeme vidět, že při vstupu kotouče do obráběného materiálu (vpravo) je kapalina usměrněna pod rotující kotouč. Naopak (vlevo) dochází k propadu kapaliny, která se odráží od boční plochy obrobku. Na obrázku je zobrazeno sousledné broušení, stejná situace však nastane i v případě broušení nesousledného.



Obr. 10 - Tvar vstupu řezné kapaliny do místa řezu [5]

Při propadu řezné kapaliny, bylo zaznamenáno snížení až o 15 % v odvodu tepla z místa řezu, při výstupní rychlosti kapaliny nad 20 m/s. Při rychlostech pod 20 m/s je snížení ještě více razantní a to až 50 %.

1.8.3 Hlavní doporučení v oblasti chlazení

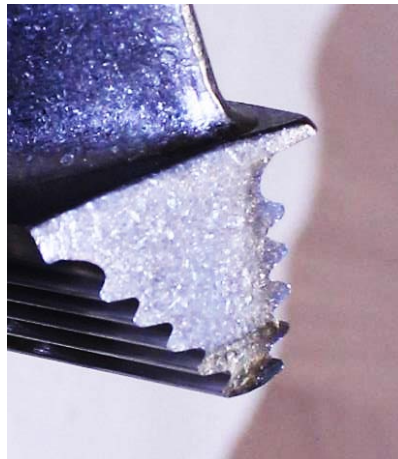
Hlavní doporučení v oblasti chlazení vyplývající z rešeršní práce jsou:

- Při užití trysky k chlazení je nutné, aby výstupní rychlost kapaliny byla alespoň 20 m/s
- Před místo řezu by měla být umístěna falešná nájezdová plocha, aby nedošlo k propadu řezné kapaliny a tím snížení účinku chlazení místa řezu.
- Zvýšení úběru materiálu a zkrácení strojního času je možné dosáhnout chlazením řezné kapaliny, případně zamezením jejího ohřevu v průběhu práce stroje.
- Zvýšení řezného výkonu je možné při použití kotouče s vysokou porozitou.

Koncepční návrh optimální trysky

1.9 Zadání a vstupní parametry

Zadání práce spočívá v návržení vhodné trysky pro hloubkové broušení lopatek turbínového kola z materiálu Inconel 713 LC. Průmyslový partner se potýkal s problémy při obrábění lopatek z této superslitiny. Hlavním problémem bylo poškození zámků lopatek při broušení. Docházelo jak k materiálovému tak k mechanickému poškození, které je zobrazeno na obrázku 11 a 12.

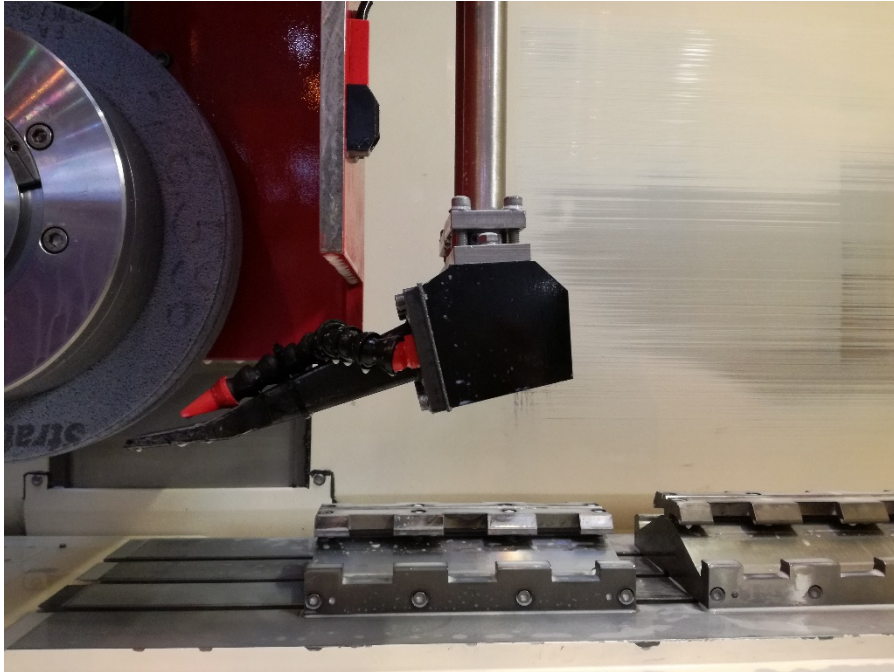


Obr. 11 – Popálení boků zámků lopatky



Obr. 12 – Mechanické poškození zámků

Dalším faktorem bylo snížení strojního času, který se pohyboval, nehledě na poškození, okolo 12 minut na jednu sadu 5ti lopatek upnutých do přípravku. V listopadu 2016 byla provedena úprava trysky (na obrázku 13) se zlepšením, které mělo tyto nedostatky odstranit.



Obr. 13 – Vylepšená tryska z listopadu 2016 s instalovaným bočním vývodem

Tryska měla upravené ústí, které směřovalo do místa řezu a vyvedený boční vývod na dodatečné chlazení rámečku a koryta lopatek na obrázku 14.



Obr. 14 – Popaly v korytu lopatky

Závěr z měření byl, že bez lépe optimalizované trysky není možné nalézt vhodné produktivní řezné podmínky. Tangenciální tryska byla při testování poškozena a bylo nutné ji nahradit původní tryskou s modifikovaným bočním vývodem. I ze sad broušených starou tryskou s bočním chlazením lze konstatovat, že chlazení boku kotouče úplně eliminovalo zapálení rámečku a náběhové barvy v korytě lopatky, které byly běžně pozorované při technologických zkouškách

v 2/2016 (tryska bez bočního obtoku). Náběhové barvy v těchto místech se neprojeví ani při dramatickém zvýšení řezné rychlosti a posuvu.

Náběhové barvy na boku lopatky se při nesousledném broušení vyskytovaly na stejné straně = na stejném boku lopatky jako při broušení sousledném. Při sousledném broušení se jedná o stranu náběhu do řezu a při broušení nesousledném se jedná o stranu výběhu z řezu. Tato problematická strana má svůj bok odvrácený od proudu kapaliny z trysky i od proudu kapaliny unášené a akcelerované kotoučem.

Odstranění tohoto jevu je možné pouze 2 způsoby:

1. Sekundární chlazení do místa řezu z druhé strany kotouče (obtok, nebo další tryska)
2. Zavedení chladicí trubice do středu přípravku a rozvedení proudu kapaliny k jednotlivým bokům.

Po úpravě orovnávacích cyklů nebyly pozorovány mapy ani propady po hrubovacích průchodech při stávajících řezných podmínkách. Tento jev se neobjevil ani u dalších výrazně produktivnějších řezných podmínek, nicméně zde již byly voleny výrazně větší přísuvy orovnávací rolny.

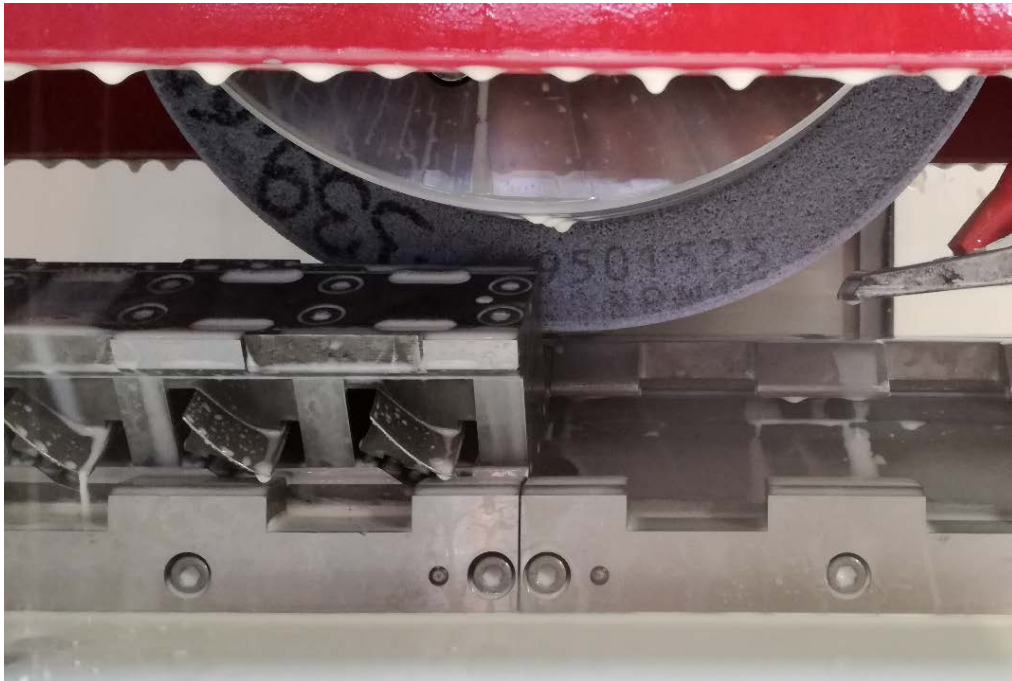
Z těchto závěrů je tedy jisté, že při návrhu budu muset uvažovat i speciální boční vývod na nové trysce. Nová tryska by měla odstranit nedostatky standardně dodávané trysky od Magerle.

Mezi hlavní nedostatky patří:

- a) nedostatečná délka trysky – vlivem vzdálenosti dochází ke strhávání proudu vody
- b) přívod vody pod příliš velkým úhlem natočení – následný odraz vody od kotouče, který vede k zpomalení
- c) nedostatečné boční chlazení – popálené rámečky (zejména na straně koryta)

1.9.1 Polotovary

Obráběný polotovar je turbínová lopatka z materiálu Inconel 713 LC. Polotovary lopatky je zhotoven procesem přesného lití. Po upnutí do přípravku se obrábí pouze plocha samotného zámku lopatky. Upnutí a celkové uspořádání v brusce můžeme vidět na obrázku 15 a 16.



Obr. 15 – Upnutí lopatek v brusce 1



Obr. 16 – upnutí lopatek v brusce 2

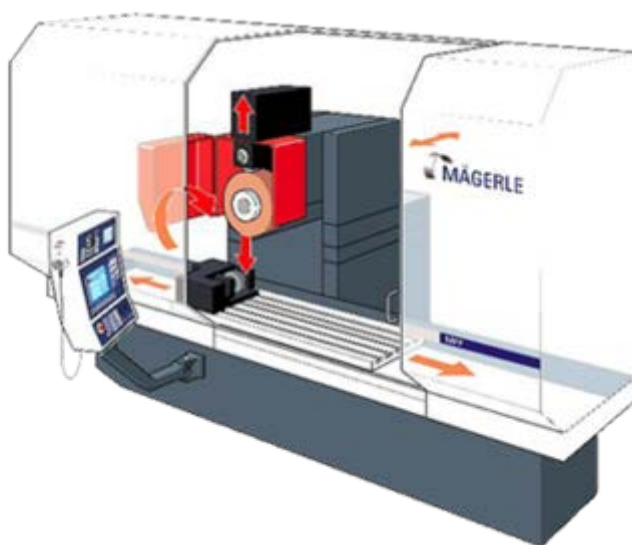
1.9.2 Materiál

Slitina Inconel 713 ve své polykrystalické formě se používá již od 50. let pro nízkotlaké lopatky a turbínová kola. Chemické složení je 11,90 Cr, 5,75 Cr, 4,57 Mo, 1,96 Nb, 0,7 Ti, 0,19 Fe, 0,10 Zr, 0,08 Zr, 0,05 C, 0,013 B a zbytek niklu.

- Hustota: 8,5 g/cm³
- Teplota tavení: 1270°C
- Youngův modul pružnosti E: 195 GPa
- Součinitel teplotní roztažnosti: 7.9 x10⁻⁶ K⁻¹
- Mez pevnosti Rm: 890 MPa
- Mez kluzu Rp0,2: 750 MPa
- Tažnost A: 7 – 8 %
- Tepelná vodivost: cca 9 až 10 W/mK

1.9.3 Bruska

U průmyslového partnera je instalována bruska pro hloubkové rovinné broušení Magerle MPF 125.



Obr. 17 – Bruska pro hloubkové rovinné broušení Magerle MPF 125 [8]

Základní parametry brusky:

Vc: 35 m/s

P: 25 kW

Chladicí kapalina: 3 % emulze – QUAKERCOOL 7101 RF

Technický list přiložen v příloze bakalářské práce.

1.9.4 Kotouč

Kotouč na obrázku 18 užívaný pro broušení zámků je od firmy Tyrolit. Jedná se o kotouč z umělého korundu s keramickým pojivem. Tento typ kotouče je speciálně určen pro hloubkové broušení.



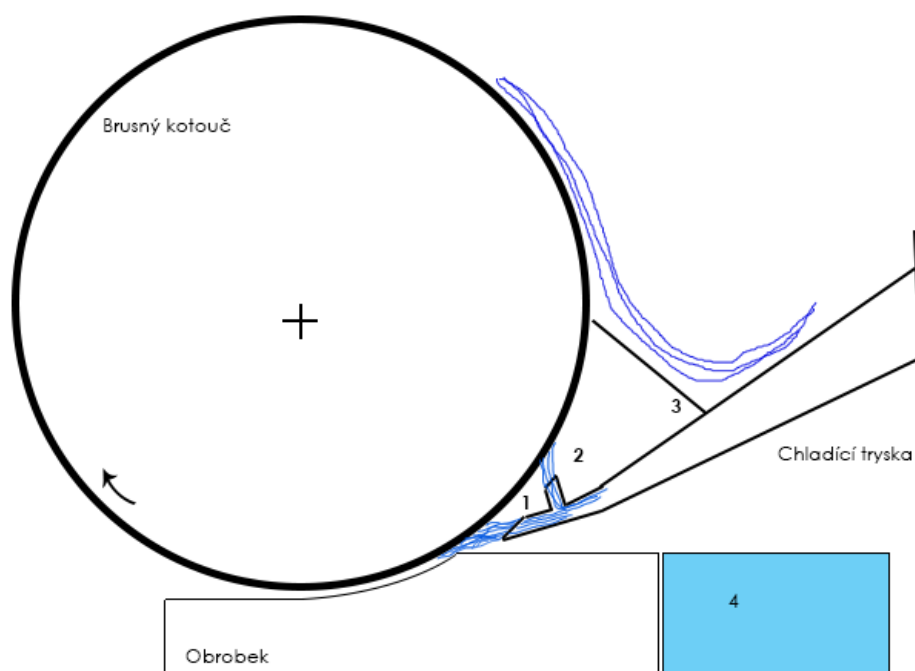
Obr. 18 - Tyrolit Strato Ultra

Tab. 1 – Vlastnosti brusného kotouče

Průměr	500 mm
Velikost zrna	33
Šíře	50 mm
Tvrdost	A
Průměr uchycení	60
Typ zrna	Umělý korund
Pojivo	Keramické
Tvar	Plochý kotouč
Použití	Hloubkové broušení naplocho

1.10 Parametrický model a základní princip zlepšení

Na základě vstupních parametrů jsem navrhl optimální řešení nové trysky, které respektuje jak prostorové uspořádání brusky, tak informace získané z rešeršní práce. Na obrázku 19 je schematicky znázorněná podoba nové trysky.



Obr. 19 - Schématické znázornění návrhu trysky, (1) hlavní výstupní štěrba, (2) vedlejší výstupní štěrba, (3) větrná clona, (4) falešná lopatka

1.10.1 Hlavní výstupní štěrba

Návrh probíhal parametricky s ohledem na zajištění minimální vzdálenosti od místa řezu při nasazení zcela nového kotouče o průměru 500 mm. Toto bylo důležité z hlediska vysokého teplotního zatížení obrobku, díky velkému styčnému oblouku nového kotouče. Výstupní otvor má velikost 4 x 46 mm. Při tlaku 10 bar a průtoku 1000 l/min je výstupní rychlost ch. kapaliny nad 30 m/s. Proud vody je usměrněn pod úhlem 50 ° vůči základně trysky, pro optimální proudění mezi kotouč a obráběný materiál.

1.10.2 Vedlejší výstupní štěrba

Důležitá pro penetrační a čistící účely. Z konstrukčního hlediska se osvědčila štěrba přímo na trysce a to díky menším nárokům na prostor. Štěrbina má rozměr 2 x 46 mm. Díky zvolenému negativnímu úhlu vůči základně trysky jsem navíc dosáhl součtu vektoru výstupní rychlosti kapaliny nad 30 m/s a obvodové rychlosti rotujícího kotouče cca 20 m/s (závislé na řezných podmínkách). Tím se posílil

penetrační efekt, který zajistí, že těsně před místem řezu bude kotouč dodatečně nepenetrován. Zároveň tato tryska zajišťuje vyplavení všech třísek, které by mohli negativně ovlivnit kvalitu výsledného povrchu. Výsledné zpracování můžeme vidět na obrázku 20.



Obr. 20 - Výsledné zpracování trysky ve výchozí pozici vůči kotouči

1.10.3 Větrná clona

Minimalizace proudu strženého vzduchu. Rotací kotouče, kdy se jeho obvodová rychlost pohybuje okolo 20 m/s, dochází ke stržení okolního vzduchu a vzniku turbulentního proudění do místa řezu. Je to způsobeno vysokou porozitou povrchu kotouče. Tento jev negativně ovlivňuje proudění kapaliny do místa řezu. Navrhl jsem jednoduchou clonu, která je vertikálně pohyblivá, aby byla schopna kompenzovat opotřebení kotouče. Na obrázku 21 je clona v základní poloze a tryska odsunutá od kotouče. Výrobci chladících komponent tomuto jevu čelí instalací výkonnějších, ale zároveň dražších čerpadel.



Obr. 21 - Větrná clona v základní poloze

1.10.4 Falešná (nájezdová) lopatka

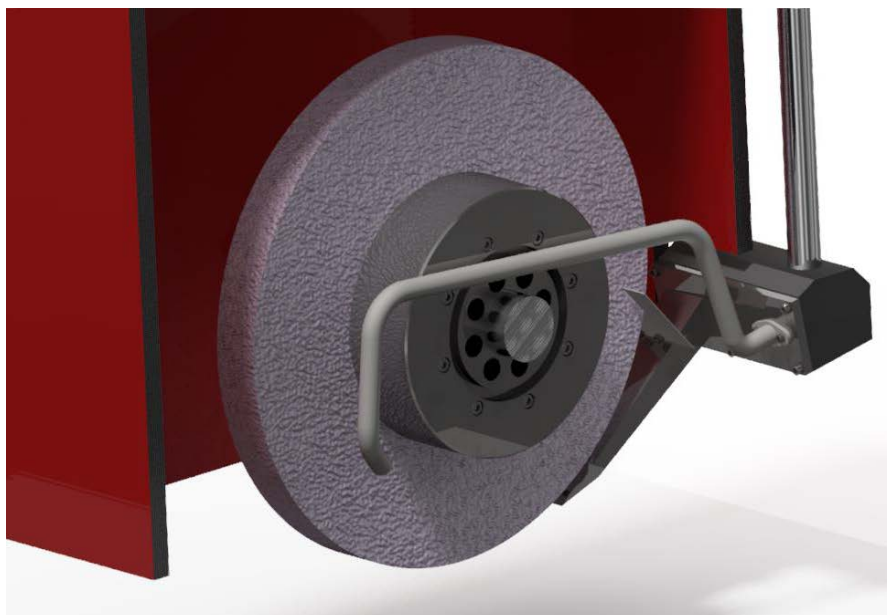
Při nájezdu nebo výjezdu z materiálu je důležité, aby nedošlo k propadu proudu chladicí kapaliny a tím prudké změně tlaku kapaliny proudící do místa řezu.



Obr. 22 – Falešná nájezdová lopatka, proti propadu vody

1.11 3D model výsledné trysky

Modelování a výsledné výkresy jsem vyhotovil v programu Autodesk Inventor 2017. 3D vizualizace je na obrázku 23. Jak si můžete povšimnout, na vizualizaci je záměrně instalována chladicí trubka, která vede kapalinu přímo do místa řezu, tak aby se proud kapaliny dostal na koryto lopatky, ve kterém vznikaly popaly.



Obr. 23 – 3D vizualizace modelu trysky

Pro snazší realizaci a flexibilitu byla tato trubka nahrazena speciálním nastavovacím krkem, zobrazeným na obrázku 24.



Obr. 24 - Záměna statické trubky za ohebný krk

Manipulovatelný krk poskytoval výhodu v možnosti precizního nastavení místa dopadu proudu vody. Při nastavování jsem však zjistil, že objednaný krk nesplňuje minimální stavební délku a tedy nelze použít ve stejné pozici jako je návrh původní trubky. Tento fakt, společně s nízkým poloměrem zkroucení krku, kdy je i z obrázku 24 patrné, že proud vody nedopadá na místo řezu, ale odráží se od kotouče, vyloučil užití krku z návrhu a otvor byl následně zaslepen záslepkou. Zároveň bylo analytickými metodami zjištěno, že povrchy nejsou popáleny ve smyslu degradace povrchové vrstvy, ale že se jedná o velmi tenké, submikronové vrstvy chromu, které nejsou nebezpečné pro provoz lopatky a za provozu na dílu přirozeně vznikají. Tyto vrstvy neobsahují trhliny, nemají vliv na mikrotvrdost ani na mikrostrukturu lopatky.

1.12 Ověření výsledků

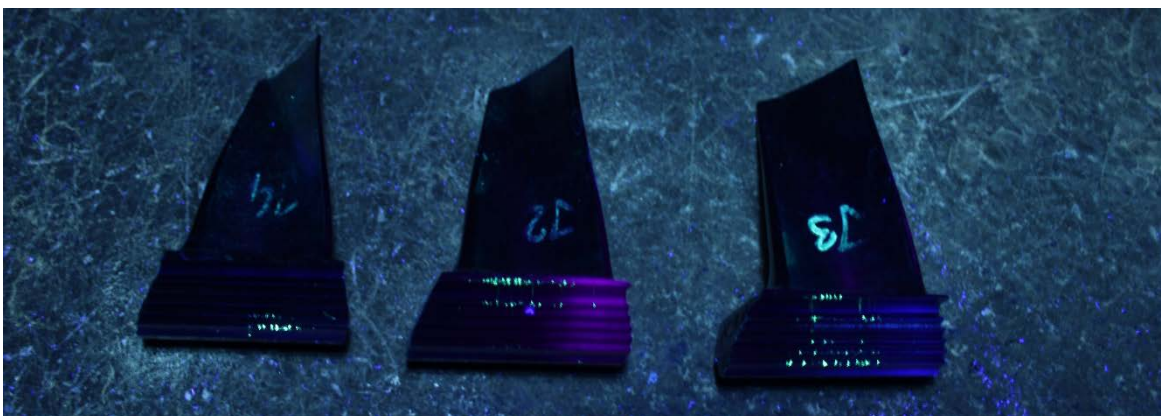
1.12.1 Kapilární zkouška

Ověřování výsledků formou kapilární zkoušky provedené přímo po broušení testovacích lopatek u průmyslového partnera. Na následujícím obrázku 25 je vidět výsledek kapilární zkoušky z června 2017, kdy proběhly technologické zkoušky s novou tryskou. Je patrné, že povrch lopatek je zcela prostý indikací.



Obr. 25 - Výsledky kapilární zkoušky z 2017

Pro porovnání uvádím obrázek 26, který je z listopadu 2016 za použití staré trysky a původních řezných podmínek. Světlá místa na povrchu zámků lopatek označují lineární indikace, způsobené nedostatečným chlazením, případně špatným orovnávacím cyklem.



Obr. 26 – Výsledky kapilární zkoušky z listopadu 2016

1.12.2 Měření drážek zámků přes válečky

Měření probíhalo vždy na 1. a 5. (poslední) lopatce z každé úplné sady. Maximální rozdíl rozměru přes válečky na první a poslední lopatce byl při výsledných zkouškách opakovaně s úspěchem zjištěn 0,015 mm, což představovalo využití pouze poloviny tolerančního pole.



Obr. 26 – Měření rozměrových tolerancí přes válečky

1.12.3 Výsledné řezné podmínky

Strojní čas:	3,77 min
Počet operací:	3
Hrubování:	Nesousledně
Na čisto:	Sousledně
Řezná rychlost:	až 35 m/s
Posuv:	až 900 mm/min
Hloubky řezu:	až 1,75 mm

Původní řezné podmínky uvedené v tabulce 2:

Tab. 2 – původní řezné podmínky

	vc [m/s]	f [mm/min]	ap [mm]	orovnění
Hrubování 1	16 (743 ot/min.)	190	Proměnlivá po profilu 0 až 1,5 mm	ANO, před
Hrubování 2	15 (697 ot/min.)	260	0.715	bez orovnění
Na čisto 1	22 (1022 ot/min.)	600	0.055	ANO, před
Na čisto 2	22 (1022 ot/min.)	600	0.03	ANO, před

Celý obráběcí cyklus se skládal ze 4 průchodů. Celkový strojní čas byl 12 minut. Všechny operace byly provedeny sousledně.

1.13 Výkresová dokumentace

Výkresová dokumentace je přiložena v příloze pod číselným označením:

1. Sestava	2017-04-13-00
2. Sestava tryska a příruba	2017-04-13-01
3. Sestava trubka s přírubou	2017-04-13-03
4. Tryska bočnice	2017-04-13-21
5. Plech 1, 2, 3	2017-04-13-22
6. Příruba na trubku	2017-04-13-23
7. Chladicí trubka	2017-04-13-24
8. Příruba	2017-04-13-26
9. Větrná clona vrchní díl	2017-04-13-30
10. Větrná clona základna	2017-04-13-31
11. Větrná clona sestava	2017-04-13-33

1.14 Rámcový technologický postup

Rámcový technologický postup je přiložen v příloze.

Závěr

Úvodem práce jsem se stručně věnoval popisu základních charakteristik a vlastností klasického broušení. Pozornost byla věnována typům brusných materiálů a typům chlazení a řezných kapalin. Dále jsem rozebral teorii hloubkového broušení, kdy bylo důležité nastínit podstatu hlavních rozdílů a úskalí oproti klasickému rovinnému oscilačnímu broušení. Zvláštní pozornost byla věnována zbytkovým napětím, kvalitě obrobeného povrchu a vlivu chlazení na proces broušení. V další části jsem popsal materiálové vlastnosti Inconelu 713 LC a v kapitolách, které byly úzce spjaty s typem obráběného materiálu, jsem toto zohlednil.

V praktické části mé bakalářské práce jsem v první části popsal zadání a popsal již dosažené výsledky v oblasti návrhu předešlé trysky. V návaznosti na tyto informace jsem navrhnul přibližné, ale nutné kroky k vylepšení chladící trysky. Tato zlepšení vycházela ve velké míře z poznatků získaných důkladnou rešerší.

Na základě rešeršní práce a praktických testů u průmyslového partnera, jsem navrhnul parametrický model trysky, která by měla zvýšit výkonnost chlazení, zabezpečit kvalitu povrchu a rozměrové tolerance dle výkresové dokumentace. Další cíl byl snížení strojního času z dosavadních 12 min na 1 sérii lopatek.

Vytvořil jsem 3D model vnitřního prostoru brusky, který mi pomohl při tvorbě výsledného modelu trysky. Díky tomuto modelu jsem byl schopen navrhnout optimální úhel výstupního otvoru, tak aby nedocházelo k odrazu vody o kotouč a následnému stržení mimo broušené místo. Výstup z tohoto modelu je výkresová dokumentace, která posloužila pro výrobu potřebných součástí.

Po zkompletování trysky, byly provedeny zkoušky u průmyslového partnera. Reálné zkoušky ukázaly na drobné nedostatky a vyžádaly si další úpravu trysky. Bylo nutné odstranit pružný krk, protože nesplňoval svůj účel. Dále došlo na kolizi trysky s přípravkem a podruhé se střetla větrná clona s krytem vřetena, jak je vidět na obrázku 27.



Obr. 27 – Kolize větrné clony s krytem vřetena

Všechny poškození byly odstraněny a nedošlo k vážnějším prodlevám ani komplikacím, které by ovlivnily výsledky zkoušek.

Odstraněním těchto chyb v návrhu se však chladicí systém stál robustní, bezpečný a stabilní za všech podmínek výrobního cyklu. Bylo dosaženo výrazného zproduktivnění technologie a cíle bakalářské práce byly splněny. Celkový čas výroby se snížil z původních 12 minut na 3,77 minuty. Volbou vhodných řezných podmínek nedošlo ani při takto výrazném zvýšení výkonu broušení (myšleno odebrání materiálu za jednotku času) ke zvýšeným úbytkům kotouče. V součtu se orovnávací cykly pohybují na stejných hodnotách jako před optimalizací. Byly provedeny ověřovací zkoušky rozměrů, které potvrdili rozměrovou stabilitu výrobků. Vhodnost prototypové trysky byla ověřena zejména opakovanými úspěšnými kapilárními zkouškami. Indikace nebyly zjištěny na žádném vzorku, ani po hrubovacích operacích.

Citovaná literatura

- [1] J. Maslov, *Teorie broušení kovů*. PRAHA: SNTL Nakladatelství technické literatury, 1979.
- [2] D. Němec, *Strojírenská technologie 2: učeb. pro 2. roč. stř. prům. šk. strojnic., stud. obor: strojírenská technologie 1. vyd.* Praha: SNTL, 1985.
- [3] O. Bílek, *Výkonné broušení kovů a plastů: Efficient grinding of metals and plastics : zkrácená verze Ph.D. Thesis*. [V Brně: Vysoké učení technické], 2008.
- [4] A. FRISCHHEZ, *Technologie zpracování kovů: Učeb. text pro stř. odb. šk. a stř. odb. učil. především stroj. zaměření*. Praha: Wahlberg, 1994.
- [5] C. Andrew. Trevor D. Howes and . Tom R.A. Pearce, *Creep feed grinding*. London: Holt, Rinehart and Winston, 1985.
- [6] S. Grigoriev, V. Starkov, N. Gorin, P. Krajnik and J. Kopač, "Creep-Feed Grinding: An Overview of Kinematics, Parameters and Effects on Process Efficiency", *Strojníški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, vol. 60, no. 4, pp. 213-220, 2014.
- [7] O. Fergani, Y. Shao, I. Lazoglu and S. Liang, "Temperature Effects on Grinding Residual Stress", *Procedia CIRP*, vol. 14, pp. 2-6, 2014.
- [8] W. Rowe, "Thermal analysis of high efficiency deep grinding", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 41, no. 1, pp. 1-19, 2001.

Seznam obrázků

Obr. 1 - Schéma broušení vnějších válcových ploch s posuvem podél osy obrobku	11
Obr. 2 - Základní způsoby broušení volným brusivem	12
Obr. 3 - Rozdíl mezi hloubkovým a oscilačním způsobem broušení [5]	15
Obr. 4 - Kinematika při hloubkovém broušení [6]	16
Obr. 5 – Rozdíl chlazení při sousledném a nesousledném broušení [5].....	18
Obr. 6 – závislost výsledné drsnosti Rz na hloubce řezu a posuvu [5].....	19
Obr. 7 - Standartní provedení chladicí trysky	20
Obr. 8 - Znázornění použití přídavné trysky a orovnávače	21
Obr. 9 - Závislost množství odebraného tepla na tlaku chladicí kapaliny [5]	21
Obr. 10 - Tvar vstupu řezné kapaliny do místa řezu	22
Obr. 11 – Popálení boků zámků lopatky.....	23
Obr. 12 – Mechanické poškození zámků	23
Obr. 13 – Vylepšená tryska z listopadu 2016 s instalovaným bočním vývodem ..	24
Obr. 14 – Popaly v korytu lopatky.....	24
Obr. 15 – Upnutí lopatek v brusce 1	26
Obr. 16 – upnutí lopatek v brusce 2	26
Obr. 17 – Bruska pro hloubkové rovinné broušení Magerle MPF 125 [8].....	27
Obr. 18 - Tyrolit Strato Ultra	28
Obr. 19 - Schématické znázornění návrhu trysky, (1) hlavní výstupní štěrbina, (2) vedlejší výstupní štěrbina, (3) větrná clona, (4) falešná lopatka	29
Obr. 20 - Výsledné zpracování trysky ve výchozí pozici vůči kotouči	30
Obr. 21 - Větrná clona v základní poloze	30
Obr. 22 – Falešná nájezdová lopatka, proti propadu vody	31
Obr. 23 – 3D vizualizace modelu trysky	31
Obr. 24 - Záměna statické trubky za ohebný krk.....	32
Obr. 25 - Výsledky kapilární zkoušky z 2017.....	33
Obr. 26 – Výsledky kapilární zkoušky z listopadu 2016.....	33

Seznam tabulek

Tab. 1 - Vlastnosti brusného kotouče	28
Tab. 2 - Původní řezné podmínky	35