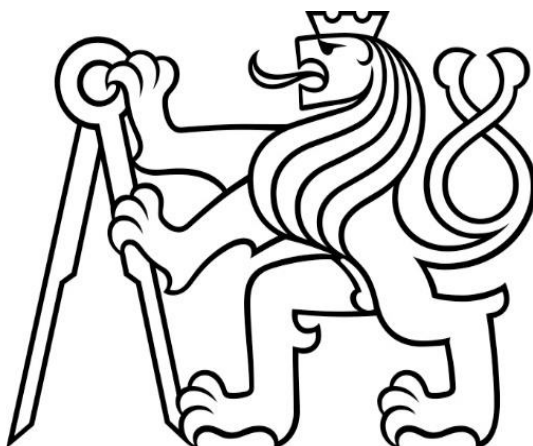


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Bachelor's thesis

**BROUŠENÍ TĚŽKO OBROBITELNÝCH
MATERIÁLŮ**

Grinding of Difficult to cut materials

Autor:

Jakub Strnadel

Vedoucí práce:

Ing. Vítězslav Rázek, CSc.

Rok:

2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Strmadel** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **424667**
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:

Broušení těžko obrobitelných materiálů

Název bakalářské práce anglicky:

Grinding of Difficult-to-cut materials

Pokyny pro vypracování:

- 1 Rozbor zadané problematiky
- 2 Nástroje a fezní podmínky
- 3 Realizace experimentálních měření
- 4 Zhodnocení výsledků a závěr

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

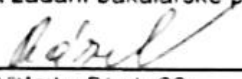
Ing. Vítězslav Rázek, CSc., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

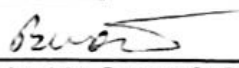
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

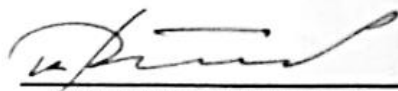
Datum zadání bakalářské práce: **02.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **19.07.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


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


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

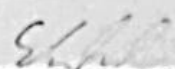

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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.

27.4.2019

Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma
Broušení těžko obrobitelných materiálů vypracoval
samostatně s využitím uvedených pramenů a
literatury.

.....

Podpis autora práce

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zaměřuje na technologii broušení těžkoobrobitelných materiálů. Teoretická část rozebírá zadanou problematiku broušení a shrnuje rozdělení těžkoobrobitelných materiálů. V další části se práce věnuje nástrojům a řezným podmínkám při broušení.

V praktické části jsem se zaměřil na popis vlivu zadaných řezných podmínek na silová zatížení procesu a výsledné drsnosti povrchu. Měření je prováděno na niklové super slitině Inconel 713LC, při použití brusného kotouče TYROLIT STRATO ULTRA.

Klíčová slova

Broušení, těžkoobrobitelné materiály, brusné nástroje, Inconel 713LC

ABSTRACT

The bachelor thesis focuses on the technology of grinding hard-to-cut materials. The theoretical part analyzes grinding process and describe difficult-to-cut materials. In the next part the thesis is describe grinding tools and cutting conditions during grinding.

In the practical part I focused on the description of the influence of the specified cutting conditions on grinding force and surface roughness. The measurement is performed on a nickel super alloy Inconel 713LC, using a TYROLIT STRATO ULTRA grinding wheel.

Key words

Grinding, difficult-to-cut materials, grinding tools, Inconel 713LC

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Vítězslavu Rázkovi, CSc. za vedení, rady a trpělivost při vypracování bakalářské práce. Také bych chtěl poděkovat Ing. Zdeňku Pitrmucovi za výpomoc při realizaci experimentálního měření.

Obsah

ÚVOD	6
1 Rozbor zadané problematiky	7
1.1 Broušení	7
1.1.1 Charakteristické znaky procesu broušení	7
1.1.2 Základní způsoby broušení	8
1.2 Těžko obrobitelné materiály a jejich broušení.....	14
1.2.1 Korozivzdorné oceli.....	14
1.2.2 Titan a jeho slitiny	17
1.2.3 Nikl a jeho slitiny.....	18
1.2.4 Slitiny na bázi kobaltu	20
2 Nástroje a řezné podmínky	21
2.1 Brusné nástroje	21
2.1.1 Druhy kotoučů	21
2.1.2 Brusivo	23
2.1.3 Pojiva.....	25
2.1.4 Velikost zrn.....	26
2.1.5 Tvrdost a poréznost kotoučů	27
2.1.6 Označování kotoučů	27
2.2 Řezné podmínky	28
3 Realizace experimentálních měření.....	29
3.1 Popis experimentu	29
3.1.1 Řezné podmínky.....	29
3.1.2 Postup měření.....	29
3.2 Měřené veličiny.....	31

3.2.1	Řezné síly	31
3.2.2	Drsnost povrchu.....	31
3.3	Měřicí soustava	32
3.3.1	Stroj.....	32
3.3.2	Nástroj.....	32
3.3.3	Materiál.....	33
3.3.4	Měřicí zařízení.....	33
4	Zhodnocení výsledků	34
4.1	Procesní síly F_p a F_c	34
4.1.1	Při posuvu v_0 400 mm/min	34
4.1.2	Při posuvu v_0 800 mm/min	35
4.2	Drsnost povrchu	36
4.2.1	Při posuvu v_0 400 mm/min	36
4.2.2	Při posuvu v_0 800 mm/min	38
4.3	Vyhodnocení měření.....	40
4.3.1	Síly F_p' , F_c'	40
4.3.2	Drsnost.....	40
5	Závěr	41
6	Seznam literatury.....	42
7	Seznam tabulek.....	44
8	Seznam obrázků.....	45

ÚVOD

Většina technologií a jejich vývoj byly vždy závislé na znalostech v oblasti materiálů a jejich zpracování. Přínos nových materiálů nebo zdokonalení jejich zpracování vedlo k možnostem objevit technologie nové nebo ty již známé zdokonalit. V oblasti strojírenství je tento trend velice významný a zvláště v dnešní době, kdy se stále zvětšuje poptávka po velice přesných součástech ze super slitin a vysoce legovaných ocelí.

Využití těchto součástí je důležité pro mnoho odvětví jako je letectví a kosmonautika, lékařství, energetika, automobilový průmysl. Materiály užívané pro tyto aplikace se vyznačují vysokými mechanickými vlastnostmi a také schopností odolávat vysokým teplotám. To má za následek, že obrábění těchto materiálů je velice složité. Proto je důležitý vývoj i v oblasti technologie obrábění a řezných materiálů s ohledem na ekonomickou a ekologickou stránku. O této problematice pojednává první část práce, kde formou rešerše jsou popsány těžkoobrobitelné materiály a jejich vlastnosti. Součástí je také rozdělení moderních nástrojů vhodných pro broušení těchto materiálů.

Jednou z technologií obrábění používaných ve větší míře je právě broušení. Při broušení je dosahováno vysoké přesnosti a jakosti povrchu. Aby bylo zaručeno, že těchto vlastností bude dosaženo je nutné pro broušení zvolit správný brusný nástroj a následně také stanovit ideální řezné podmínky.

Této problematice se věnuji v experimentální části práce, kde vyhodnocuji vliv zadaných řezných podmínek na silového zatížení při broušení a výsledné drsnosti povrchu. Měření je prováděno na materiálu Inconel 713LC a brusném kotouči Tyrolit strato ultra.

1 Rozbor zadané problematiky

1.1 Broušení

Broušení je jedna z nejstarších technologií obrábění, která je vhodná pro dokončovací operace a díky novým řezným materiálům a výkonnějším strojům, také operace hrubovací. Metodu lze popsat jako vysokorychlostní mikrořezání povrchu obráběného materiálu velmi jemnými zrny brusiva brusného nástroje. Jelikož se jedná o složitý proces, kde povrch materiálu v jeden okamžik může obrábět i několik stovek mikro břitů, jedná se o proces s nedefinovanou geometrií. [1]

1.1.1 Charakteristické znaky procesu broušení

Procesem broušení lze dosáhnout velkých geometrických přesností tvaru obrobených ploch (rovinnost, válcovitost) a obecně také přesností obrobených rozměrů obrobku, které se pohybují v rozmezí 3 až 1 μm . Tato přesnost je doprovázena i vysokou kvalitou povrchu a povrchové vrstvy. Charakteristickým ukazatelem kvality povrchu je hodnota drsnosti R_a , jenž u broušení může nabývat hodnot 1,6 až 0,05 μm v závislosti na řezných podmínkách. [1]

Při procesu broušení dochází přerušovaným řezem k odebrání třísek malého a proměnlivého průřezu. Tento jev je doprovázen velkými plastickými deformacemi a třením, které způsobuje vysoké teploty (až 1500°C), při kterých se třísky taví a hoří (jiskření). [2]

Broušení je charakteristické také působením velkých řezných sil dosahujících až několik desítek tisíc MPa, vysokou řeznou rychlostí (30÷100 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) a z toho vyplývající krátká doba záběru zrn brusného nástroje. [2]

Touto metodou lze obrábět i velice tvrdé a těžko obrobitelné materiály (kalené oceli, slinuté karbity, nerezové oceli nebo slitiny neželezných kovů). Velkým problémem při broušení těchto materiálů je, že ve většině případů je porušena povrchová vrstva mechanickými, fyzikálními nebo také chemickými účinky doprovázející tento proces.

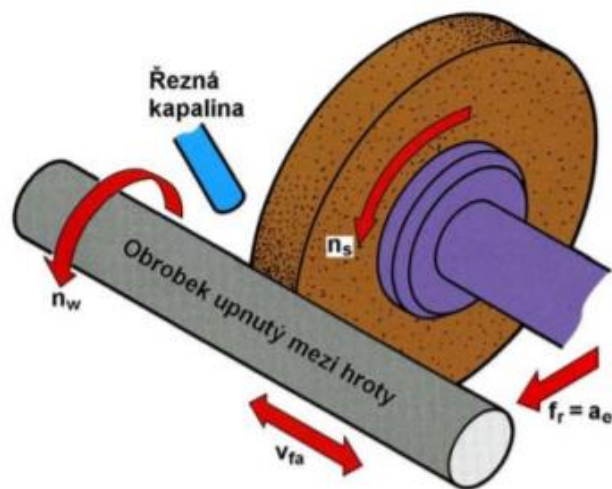
Výsledkem může být vznik trhlin nebo vnitřního pnutí v povrchu materiálu. Aby k tomuto poškození nedocházelo je důležité dodržovat základní podmínky pro tento druh broušení, a to volba vhodných řezných podmínek a řezného nástroje a také použití intenzivního chlazení vhodnými řeznými kapalinami. [4]

1.1.2 Základní způsoby broušení

Broušení rotačních ploch

Podélné (axiální) broušení vnějších ploch

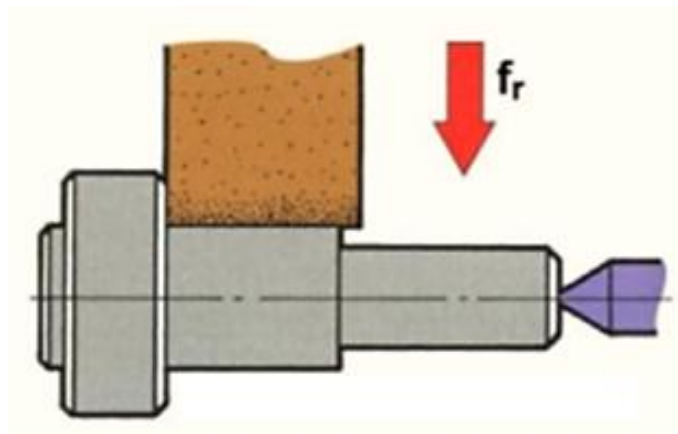
Primárně se používá pro broušení delších válcových nebo kuželových ploch. Obrobek je upnut mezi hroty na stole obráběcího stroje a současně koná posuvový pohyb rovnoběžný s osou obrobku a pohyb rotační n_w . Hlavní pohyb n_s koná brousící kotouč. Úběr materiálu zajišťuje radiální posuv f_r kotouče nebo obrobku. [2],[3]



Obrázek 1 Broušení s podélným posuvem[2]

Zapichovací (radiální) broušení vnějších ploch

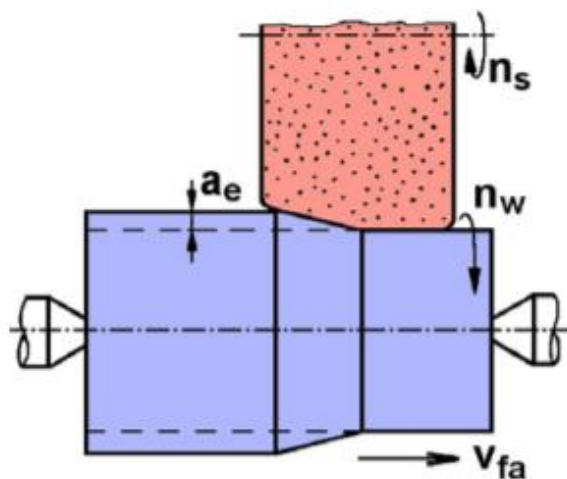
Ideální pro broušení obrobků s vyšší tuhostí. V případě tohoto broušení kotouč vykovává radiální posuv f_r , který je kolmý na osu obrobku. Délka broušené plochy se pohybuje maximálně do 100mm z důvodu zvětšení styčné plochy mezi obrobkem a kotoučem a tím zvýšení řezných sil a příkonu stroje. Tímto broušením lze obrobit i přilehlé čelní plochy bokem kotouče nebo šikmým zápichem. [3]



Obrázek 2 Radiální obvodové broušení vnějších ploch [2]

Hloubkové obvodové broušení

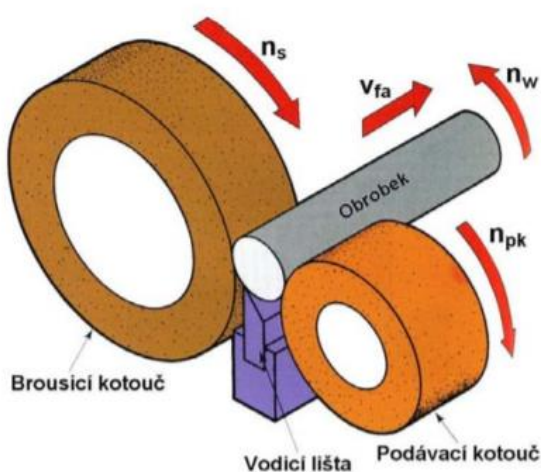
Hloubkovým broušením je odebírána větší vrstva materiálu 0.1÷0.5 mm a to při velmi malém posuvu. Jedná se o velice produktivní metodu broušení, při které ovšem dochází velkým řezným silám a tudíž také k většímu opotřebení brusných kotoučů. Následkem rychlého opotřebování nástroje vzniká změna tvaru obvodové plochy kotouče. Vzniká přechodová kuželová plocha, která v průběhu broušení postupuje na druhou stranu šířky kotouče. Z tohoto důvodu je nutné po každé operaci brusný nástroj orovnat a po přepočtení průměru kotouče znovu opakovat brousící operaci (vyjiskření), aby byly odstraněny nerovnosti vzniklé právě rychlým opotřebením a změnou tvaru nástroje. Oproti klasickým metodám broušení se brusný výkon zvětší o 25 % až 75 %. [2]



Obrázek 3 Hlubkové broušení [2]

Bezhraté broušení

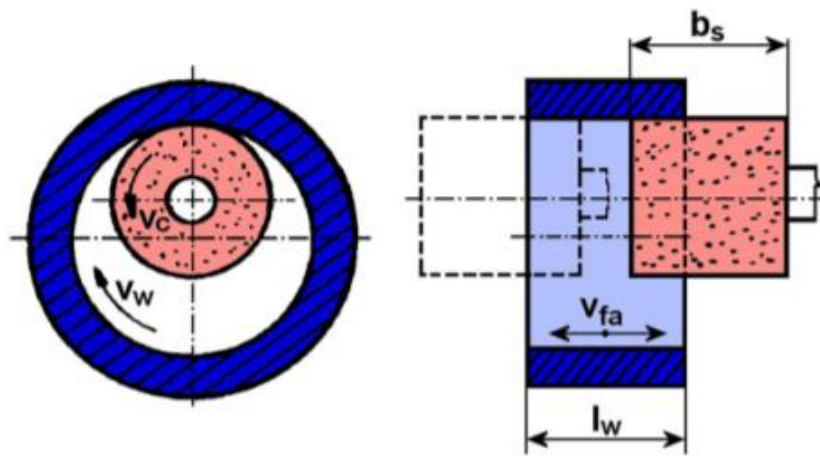
Speciální technologie broušení, kdy obrobek je položen na podpěrné pravítko a koná rotační pohyb díky sevření mezi brousící a podávací kotouč. Osa obou kotoučů bývá $5 \div 15$ mm pod osou obrobku. Aby docházelo k axiálnímu posunu obrobku je podávací kotouč ve své ose vykřiven o hodnotu pohybující se okolo 5° . Pokud se jedná o obrobek, který má předepsané větší přídavky je nutné proces opakovat. [3]



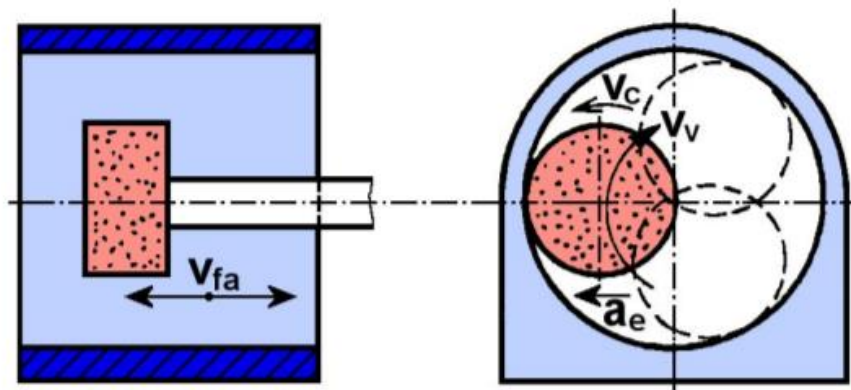
Obrázek 4 Bezhraté průběžné broušení [2]

Broušení vnitřních válcových ploch

Pro tento druh broušení existují dvě metody (axiální podélné, planetová). Metodu volíme podle tvaru obrobku, kdy pro větší osově nesouměrné součásti volíme planetovou metodu a pro menší osově souměrné součásti metodu podélnou. Používané nástroje jsou v průměru menší 0,7 – 0,9 x průměru obráběné díry. Hlavní pohyb koná vřeteno. Pomocný pohyb pak v případě podélné metody koná celý obrobek a u planetové metody koná všechny pohyby vřeteno stroje. [3]



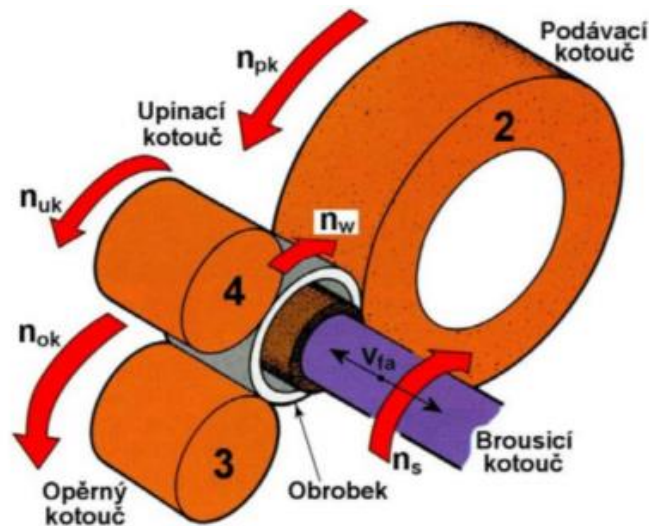
Obrázek 5 Axiální broušení vnitřních válcových ploch [2]



Obrázek 6 Planetové broušení vnitřních válcových ploch [2]

Bezhraté broušení vnitřních ploch

Tato metoda je velice podobná s podélnou metodou vnitřního broušení. Rozdílné je pouze v upínání obrobku, kdy je součást uložena mezi 3 kotouče, které následně zajišťují rotační pohyb a upnutí dané součásti. Touto metodou je dosahováno větších přesností a kvality povrchu oproti jiným metodám vnitřního broušení. [3]



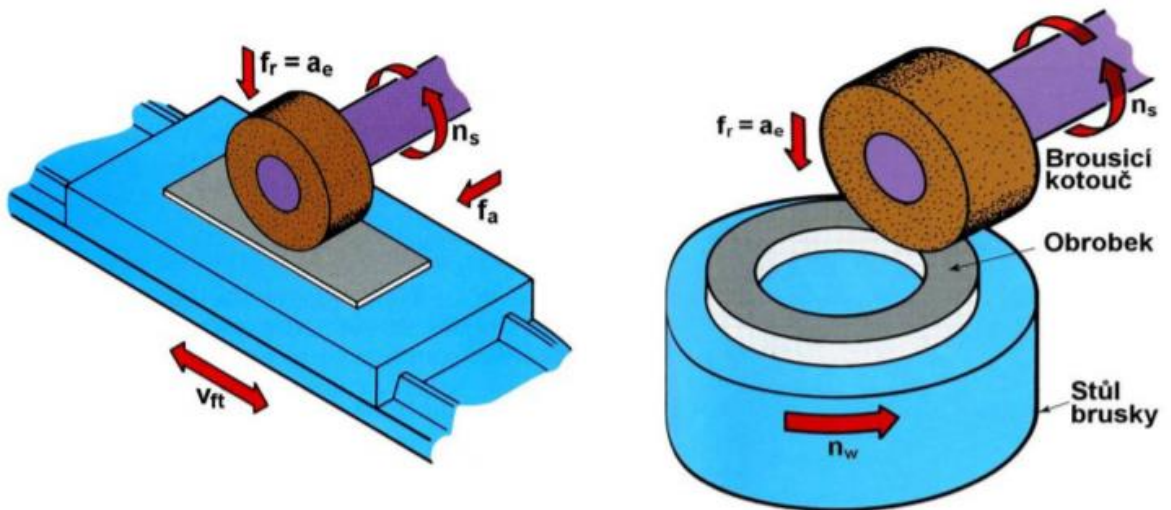
Obrázek 7 Bezhraté obvodové broušení vnitřních ploch „dokulata“ [2]

Broušení rovinných ploch

Broušení rovinných ploch lze rozdělit podle částí kotouče, kterou daný obrobek brousíte. (čelní, obvodové)

Broušení obvodem kotouče

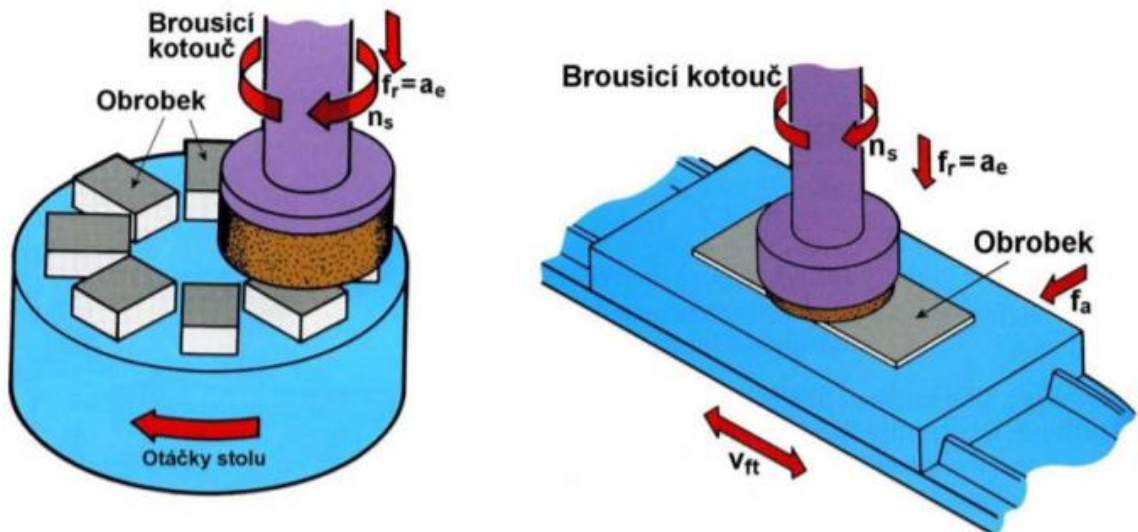
Jedná se o jednu z nejpřesnějších metod obrábění rovinných ploch. Hlavní využití je při broušení přesných rovinných ploch, výrobě nástrojů, měřidel nebo velice přesných přípravků. Brousící proces je realizován brusným kotoučem, který koná hlavní rotační pohyb. Vedlejší pohyb koná pracovní stůl stroje, který je přímočarý vratný nebo kruhový. Zároveň, ale v případě posuvného pohybu obrobku se stůl pohybuje přímočaře ve směru rovnoběžném k ose nástroje o hodnotu přímočarého posuvu, který obecně odpovídá šířce kotouče. [2]



Obrázek 8 Posuvný pohyb Obrobku [2] Rotační pohyb obrobku [2]

Broušení čelem kotouče

V případě požadavků pro broušení širších ploch se volí broušení čelem nástroje, kdy průměr kotouče je větší než šířka obráběné plochy. Je mnohem výkonnější ve srovnání s broušením obvodem kotouče. To je ovšem vykoupeno nižší přesností. Stejně jako u broušení obvodem, tak i u čelního broušení může pracovní stůl stře vykonávat pohyb otáčivý nebo přímočarý. Přímocharý pohyb stolu je využíván především při sériové a hromadné výrobě především menších součástí. Otáčivý pohyb stolu je často využíván na přesných laboratorních bruskách, při přípravě zkušebních vzorků. [2]



Obrázek 9 Otáčivý pohyb obrobku [2] Přímocharý pohyb obrobku [2]

Tvarové broušení

Toto broušení je využíváno při broušení značně tvarově složitých obrobků. Pro tento druh broušení se využívá speciálních tvarových kotoučů, nebo klasickými kotouči za pomoci kopírovacího zařízení. [2]

1.2 Těžko obrobitelné materiály a jejich broušení

1.2.1 Korozivzdorné oceli

Tyto oceli obsahují minimálně 10,5% chromu (Cr) a v porovnání s nelegovanými oceli vykazují výrazně lepší odolnost proti korozi. To znamená, že aby bylo dosaženo těchto antikorozních parametrů je zapotřebí ocel obohatit velkým množstvím legujících prvků. Tímto získají tyto oceli výborných vlastností na úkor obrobitelnosti. Podle struktury je lze rozdělit do čtyř skupin. (martenzitické, feritické, austenitické a duplexní)

Martenzitické oceli

Tyto oceli vznikají z rychlým ochlazením austenitické oceli a tím vzniká martenzitická struktura. Martenzitické oceli mají tetragonální nebo kubicky vnitřně středěnou mřížku a jsou magnetické. V žíhaném stavu mají mez kluzu okolo 275 MPa. Po tepelném zpracování (kalení) mez kluzu dosahuje až 1900MPa v závislosti na obsahu uhlíku ve struktuře. Při zvýšení pevnosti klesá houževnatost a tažnost materiálu. Nejčastěji používaná slitina obsahuje asi kolem 12% Cr a 0,1% C za účelem zpevnění. Chrom ve struktuře zvyšuje odolnost proti korozi. Molybden může být přidán pro zlepšení mechanických vlastností nebo zvýšení odolnosti proti korozi. Martenzitická ocel ve většině případů neobsahuje nikl, ten je přidáván pouze v případě speciálních jakostí ocele, kde je kladen důraz na extrémní pevnost.

Nejčastější využití pevnosti a tvrdosti martenzitických ocelí je v energetickém a chemickém průmyslu. Dále je možné tento materiál využít na výrobu nožů, chirurgických nástrojů, čerpadel, parních turbín nebo kuličkových ložisek. [13], [8]

Feritické oceli

Feritické nerez oceli mají kubickou vnitřně středěnou mřížku a jsou magnetické. V žíhaném stavu mají mez kluzu asi 275 až 350 MPa a jejich tažnost je velice dobrá. Obecně je možné tyto slitiny vytvrdit pouze tvářením za studena, ale ne ve stejném rozsahu jako austenitické nerezové oceli. Mají široký rozsah odolnosti proti korozi v závislosti na obsahu slitin. Korozivzdornost je ovšem menší, než u ocelí austenitických. Nejpoužívanější feritická nerez ocel obsahuje 16 až 18% Cr. Ostatní slitiny obsahují menší procento chromu. K určitým slitinám se přidává molybden pro zlepšení odolnosti proti korozi v roztocích obsahujících chloridy, také má pozitivní vliv na tvářením. Feritické oceli jsou náchylné ke křehnutí při delší prodlevě v oblasti kritických teplot (600-800°C), které mohou nastat např. při svařování. Tomu lze částečně zabránit příměsí titanu nebo niobu, které se používají ke stabilizaci uhlíku a dusíku, aby se zlepšily vlastnosti v oblasti sváření. Velikou předností těchto ocelí je vysoká odolnost proti koroznímu prostředí mořské vody. Využívá se hlavně v potravinářském a automobilovém průmyslu. [13], [8]

Austenitické oceli

Austenitická nerezová ocel je nejpoužívanější z těchto uvedených ocelí. Strukturu tvoří plošně středěná kubická mřížka. Tato slitina se skládá minimálně z 18 % chromu, malého množství uhlíku, manganu a niklu kolem 8%. Nikl je důležitý pro udržení austenitické fáze ve struktuře. Pevnost v tahu se uvádí 200 až 275 MPa. Pokud ve struktuře zvýšíme obsah Ni, tak lze pevnost zvýšit až na 500MPa. Tento typ oceli nelze tepelně zpracovat a je obvykle nemagnetický. Austenitické nerezové oceli mají dobrou tažnost a houževnatost a zároveň jsou extrémně odolné proti korozi. Pro průmyslová užití se austenitická ocel velmi dobře tvaruje i svařuje a navíc lze využít vynikajících vlastností ve velkém spektru provozních teplot. Využívána je v těžařském, farmaceutickém, těžařském, chemickém průmyslu a všude tam, kde lze využít jejich antikoročních vlastností. [13], [8]

Dvoufázové oceli

Dvoufázové nerezové oceli už podle názvu jsou složeny ze dvou strukturních fází oceli. Obsahují směs feritu a austenitu a jsou magnetické. Mají pevnost v tahu přibližně

550 MPa, což je dvojnásobek hodnot ocelí austenitických. Obsahuje 18–28 % chromu, molybden, nikl do 8 % k udržení stability mezi feritem a austenitem. Tyto slitiny zaručují dobrou tažnost, ale i houževnatost. Stejně jako u feritických ocelí není vhodné používat za provozní teploty přes 700°C, protože může docházet k jejímu křehnutí. Použití bývá v energetickém, chemickém průmyslu. Vhodná je také v oblastech s mořskou vodou a v petrochemických závodech. [13], [8]

Broušení nerezových ocelí

Mezi hlavní vlastnosti nerezových ocelí ovlivňující proces broušení jsou vyšší adheze materiálu, utváření třísek nepravidelných tvarů, nízká tepelná vodivost a tendence k deformačnímu zpevnění. Kombinace těchto vlastností má za následek, že dochází ke zvýšení brusných sil a tím většímu opotřebení brusného kotouče [12]

Nejčastěji používaným nástrojem pro broušení nerezových ocelí jsou kotouče jejichž abrasivum tvoří umělý korund. Lze použít také nástroje tvořené karbidem křemíku nebo KNB. Tvrdost kotouče se obvykle volí H až L. Speciální kategorií je metoda broušení závitů, kde se volí tvrdost nástroje větší. Velikost brusiva bývá 46, 54 nebo 60 v závislosti na požadované jakosti povrchu. Jako pojivo jsou používána pojiva keramická a pro vyšší řezné rychlosti pojiva z pryskyřičná. Jednou z nutných podmínek volby nástroje je, že kotouče používané pro broušení nerezových ocelí by neměly být používány na jiné druhy materiálů. Důvodem je, že by mohlo dojít k narušení a změně vlastností povrchové vrstvy těchto ocelí cizími prvky, které mohou zůstat na nástroji. Tím je ohrožena hlavní vlastnost těchto ocelí a to jejich odolnost vůči korozi. Vzhledem k nižší tepelné vodivosti nerez ocelí je při broušení nutné použít chladící kapaliny, které bývají nejčastěji emulze z důvodu výborných chladících vlastností. [8]

1.2.2 Titan a jeho slitiny

Titan je jeden z nejčastěji se vyskytujících prvků v zemské kůře. Jeho mechanické vlastnosti jsou srovnatelné s oceli, ale to s rozdílem, že titan má o 40% menší hustotu a to 4500 kgm^{-3} . U titanu se objevují dvě rovnovážné fáze, α s krystalovou strukturou HCP a fáze β se strukturou FCC. Fázová přeměna u titanu nastává při teplotě okolo 882°C . Obrobitelnost titanu je při volbě správného rezného nástroje je relativně dobrá. Kromě ceny je hlavní nevýhodou malá otěruvzdornost a náchylnost k zadírání. Korozivzdorné vlastnosti a zdravotní nezávadnost určují, že titan je využíván ve zdravotnictví na výrobu implantátů. Dále je využíván v chemickém a potravinářském průmyslu z důvodu antikorozním schopnostem vůči chloru a chlorovým sloučeninám jako jeden z mála materiálů. [11], [7]

Slitiny titanu

Slitiny titanu jde rozdělit do tří skupin podle fázových přeměn (α , β , $\alpha+\beta$)

Slitiny α

Slitiny fáze α jsou tvořeny jako tuhý roztok Ti a Al do 7%. Hliník funguje jako stabilizační prvek. Při vyšším obsahu jsou slitiny příliš křehké a špatně tvářitelné i zatepla. Pevnost slitin se pohybuje od 700 do 1000 MPa. Nejpoužívanější slitinou je TiAl5Sn2,5 jejíž mechanické vlastnosti jsou velice dobré i při teplotách okolo 600°C . Používá se na méně namáhané součásti. Pokud je nutné zvýšit mechanické vlastnosti, tak se zvyšuje obsah Sn. [11], [7]

Slitiny β

Slitiny fáze β mohou obsahovat i malý obsah fáze α . Jako legující prvky jsou užívány Fe, Cr, Mo, V, Mn, které kromě zvýšení vlastností materiálu, také stabilizují danou fázi. Mechanické vlastnosti charakterizuje dobrá tvařitelnost zastudena a vysoká pevnost 1000-1500 MPa, která se zhoršuje s teplotou nad 350°C . Jako u fáze α má slitina vysokou odolnost proti korozi. Charakteristická je dobrou svařitelností. [11], [7]

Slitiny $\alpha + \beta$

Slitiny titanu $\alpha + \beta$ jsou nejpoužívanější. Mezi legované prvky patří Al, Mn, Cr, Mo, V, Sn. Vlastnosti těchto slitin se dají zvýšit tepelným zpracováním. Jejich předností je velká pevnost 900-1200MPa, která klesá se zvyšující se teplotou. Některé slitiny mají velice dobrou tvářitelnost zastudena. Nejpoužívanější slitinou TiAl6V4, jejich mechanické vlastnosti jdou zvýšit tepelným zpracováním. Použitelné jsou do teploty 400°C. Vhodné jsou na složité součásti a odlitky. [11]

Broušení titanu a jeho slitin

Velikým problémem při broušení je následný stav povrchové vrstvy broušeného materiálu a to zejména v oblasti zbytkového napětí, které může zapříčinit rychlejší únavu materiálu. Zásadní je proto při volbě řezných podmínek snížení řezné rychlosti, která se potom pohybuje mezi 10–20 ms⁻¹. Dalšími důvody proč vzniká toto omezení jsou abrazivní vlastnosti titanu a vysoké teploty vznikající mezi brusivem a materiálem. Díky těmto teplotám může dojít k tzv. wheel gumming, což se dá vysvětlit jako sloučení titanu s povrchem brusného kouče a tím omezení jeho řezivosti. Nejvhodnější nástroje pro broušení těchto materiálů jsou velmi tvrdé kotouče karbidu křemíku s keramickým pojivem. Pokud je požadována vysoká kvalita povrchu a také velké řezné rychlosti, jsou hlavní volbou kotouče z KNB. Vhodné je i využití řezné kapaliny a to kapaliny na bázi dusitanu a aminu. Lze použít i řezné oleje, ale jen při broušení s menším zatížením, protože může docházet ke vzplanutí. [9]

1.2.3 Nikl a jeho slitiny

Pro účely obrábění jsou slitiny niklu rozděleny do čtyř základních skupin:

Skupina A

Slitina obsahuje více než 95% obsahu niklu ve struktuře. Tyto slitiny mají nízkou mechanickou pevnost 100-140 MPa a vysokou houževnatost. Vytvrdit lze pouze zastudena. Slitina je v žíhaném a za tepla zpracovaném stavu velmi měkká. Profily tažené za studena jsou charakteristické pro svou dobrou obrobitelnost a vysokou jakost povrchu. Tyto slitiny zahrnují nikl 200, 201, 205, 212, 222. [10], [5]

Skupina B

Skládá se ze slitin Ni-Cu. Obsah mědi se pohybuje v rozmezí 28-34%. Slitiny v této skupině mají podobně nízkou pevnost jako slitiny skupiny A. Pevnost lze zvýšit až na hodnotu 790MPa po přidání legujících prvků Al a Ti. Opět jsou vytvrzovány pouze za studena. Materiály tohoto typu tažené za studena mají větší odolnost proti namáhání a poskytují nejlepší obrobitelnost a jakost povrchu. Tyto slitiny zahrnují monel 400, 401, 450, invar 36, 48, kovar a inco slitinu MS 250. [10], [5]

Skupina C

Skládá se ze slitin nikl-chrom-železo případně jsou dolegovány Mo, Nb, Ti a W. Jejich pevnost je okolo 800MPa. Vlastnostmi jsou podobné austenitickým nerezovým ocelím. Tyto slitiny zahrnují nikl 270, monel K-500, inconel 600, 601, 690, nimonic 75, 86, incoloy 800, 800HT, 802, 825, DS, inco 330, 020. [10], [5]

Skupina D

Skupina D je tvořena hlavně žárupevnými a antikorozními superslitinami niklu precipitačně vytvrzenými. Základní přísadou je chrom v koncentraci 10-30%. Tyto slitiny se vyznačují vysokou pevností na mezi kluzu až 1200MPa a při zachování mechanických vlastností zvládají vysoké teploty do 950°C. Tyto superslitiny zahrnují duranickel 301, monel K-500, inconel 617, 625, 706, 718, X-750, 751, MA 754, nimonic 80A, 81, 90, 105, 115, 263, 901, PE11, PE16, PK50, incoloy 903, 907, 909 ni-span-c 902, inco G-3, C-276, HX. [10], [5]

Broušení niklu a jeho slitin

Nejběžnější vlastnosti niklových slitin, které činí jejich brusitelnost obtížnou jsou

- Vysoká pevnost, včetně dynamické smykové pevnosti, která se udržuje i při vysokých teplotách při broušení.
- Špatná tepelná vodivost.
- Materiálová struktura obsahuje tvrdé karbidy zajišťující odolnost proti opotřebení.
- Při tvorbě třísky dochází ke zpevnování povrchové vrstvy.

Z těchto důvodů je nutné volit pro tyto materiály správné nástroje a k nim i vhodné řezné podmínky. Jako nástroje se volí brusné kotouče z karbidu křemíku poskytující nejlepší výsledky na slitinách skupin A a B. Pro skupiny slitin C a D je vhodnou volbou brusivo na bázi umělého korundu. V obou případech je vhodné při běžných řezných rychlostech do 30 ms^{-1} zvolit hrubé zrno (46 až 60) při tvrdosti kotouče v rozmezí L-P, které poskytují nejlepší řezivost. Při velkých řezných rychlostech přesahujících 40 ms^{-1} se doporučují brusné kotouče s pryskyřičnou vazbou a jemnějším zrnem. V případě kdy je požadována vysoká přesnost a jakost povrchu je možné použití brusiva z KBN. Ve všech případech je nutností při broušení použít řezné kapaliny. V praxi se nejčastěji používají rozpustné oleje nebo emulze z důvodu vyšším chladicím účinkům. [14] [10] [6]

1.2.4 Slitiny na bázi kobaltu

Charakteristické vlastnosti kobaltových slitin jsou vysoká korozní odolnost, otěruvzdornost, pevnost a tvrdost, kterou si zachovává i při vyšších teplotách. Korozivzdornost je několika násobně vyšší, než u niklových slitin nebo austenitických ocelí, kdy hmotnostní úbytek může být ve stejném prostředí až 14x menší. Tyto vlastnosti jsou, ale na úkor ceny, která je velmi vysoká a slitiny kobaltu jsou tedy využívány jen tehdy, pokud neexistuje vhodná slitina niklu. Jedním z nejpoužívanějších druhů kobaltových slitin je Stellit. Složení těchto slitin bývá Cr 25-30%, W 2-15%, C 0,25-3,3%, Mo max.1,5%, Fe max.3%, Ni max.3%, Si max.2% a Co tvořící zbytek. Nejčastěji se slitiny kobaltu využívají na ventily a jejich sedla, vysoce namáhané částí armatur a manometrů nebo také v biomedicíně jako materiál pro výrobu různých implantátů. [5]

Broušení kobaltových slitin

Vynikající vlastnosti kobaltových slitin mají za následek, že broušitelnost těchto materiálů je velice nízká. Proto je důležité, aby při navrhování řezného procesu bylo počítáno s velice malými přídávky na broušení. Řezná rychlost se doporučuje mezi $20\text{-}35 \text{ ms}^{-1}$. Pokud se jedná o malý úběr materiálu 0.01-0.002 je možné brousit i bez chladicí kapaliny.

Při úběrech nad 0,01mm je nutné využití chladící kapaliny(nejčastěji emulzí vody a oleje). Nejvhodnější pro broušení kobaltových slitin jsou kotouče z KNB nebo umělého korundu. [6]

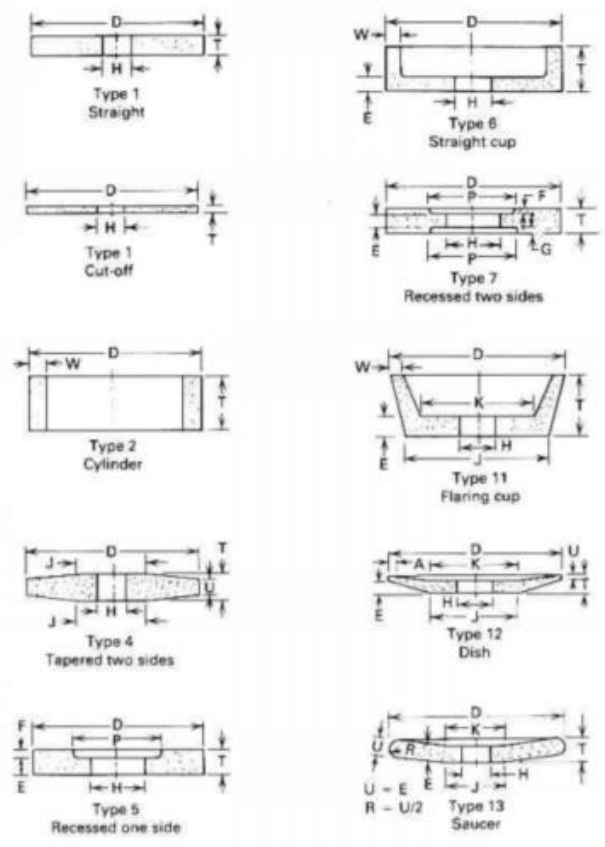
2 Nástroje a řezné podmínky

2.1 Brusné nástroje

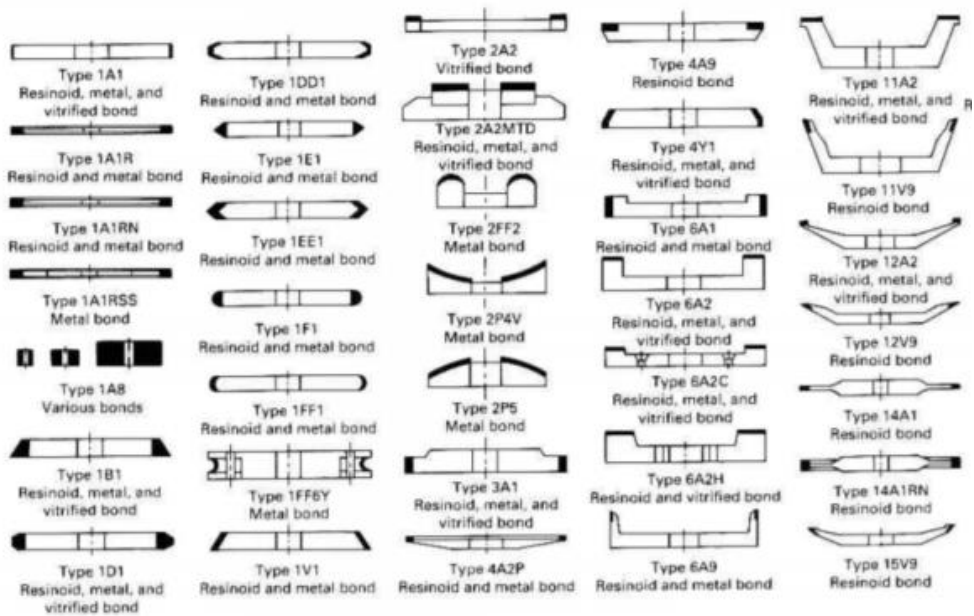
Nástroje určené pro běžné broušení se dělí na brousící kotouče, pásy nebo brusné tělíška a segmenty různých tvarů a velikostí. Základem každého z těchto nástrojů je brusivo a pojivo, které drží brusná zrna pohromadě.

2.1.1 Druhy kotoučů

Základní dělení brusných kotoučů je podle jejich tvaru a struktury, kdy kotouče mohou být tvořeny kompletně brusivem a pojivem, nebo jejich konstrukce tvořena kovovým základem, na který je nanášena potřebná vrstva brusiva. Druhá varianta konstrukce kotoučů se používá výhradně u superabrazivních materiálů jako je KNB nebo diamant. Tyto materiály jsou velice drahé, a proto jsou nanášeny v menším množství na kovové nosiče.



Obrázek 10 Základní typy brusných kotoučů [8]



Obrázek 11 Základní typy brusných kotoučů s kovovým nosičem [8]

2.1.2 Brusivo

Jedná se o složku brousícího nástroje zajišťující úběr materiálu. Dělí se na přírodní, syntetické a na tzv.superabraziva.

Přírodní

Mezi přírodní brusiva zařazujeme přírodní korund, smirek a křemen. V dnešní době už jsou ve většině případů tyto brusiva nahrazena brusivy syntetickými.

Syntetická

Oxid hlinitý – Al_2O_3 – umělý korund

Oxid hlinitý nebo také korund se používá pro širokou škálu železných materiálů včetně ocelí. Podle příměsí se tyto materiály dělí na hnědý, bílý, růžový, rubínový a korund s příměsí zirkonu. Bílý korund je základním materiálem vhodným pro broušení právě široké škály ocelí a železných materiálů. Růžový nebo rubínový korund obsahuje oxid chromitý, který při koncentraci 0,5-5% zvyšuje drobivost. Tyto nástroje se používají pro broušení HSS ocelí a vysokolegovaných ocelí. Hnědý korund je univerzální brusivo obsahující kolem 2% oxidu titaničitého (TiO). Tím je zvýšena jeho houževnatost. Používá se pro vitrifikovaná kola určená pro hloubkové broušení. V dnešní době existují další materiály mající základ na oxidu hlinitém a to brusiva SG, TG a Cubitron. Tyto materiály mají mnohem lepší řezné schopnosti a také širší záběr použití . [15]

Karbid křemíku – SiC – karborundum – černý nebo zelený

Hodí se pro broušení litiny, velmi tvrdých a křehkých materiálů. Karbid křemíku je nejtvrdějším z konvenčních brusiv, ale má nižší odolnost proti rázům než oxid hlinitý a vykazuje vyšší opotřebení. Podle obsahu karbidu se dělí na dvě skupiny. Zelený karbid křemíku má vyšší čistotu s obsahem 97% a více. Je tvrdší než černý karbid. Má výbornou ostrost zrn drobivost, což z něj činí dobrý brusný materiál. Používá se hlavně k ostření nástrojů z SK. Černý karbid křemíku je o něco méně tvrdý a používá se pro abrazivní

materiály obrobků jako je keramika a pro tvárné neželezné materiály. Používá se také na litiny. [15]

Karbid boru – B₄C – náhrada za diamantové brusivo

Používá se jako náhražka diamantového prášku. Tyto brusiva obsahují do 94% B₄C a malé množství příměsí .

Superabrasiva

Diamant

Diamant je nejtvrdší známý materiál a nejčastěji se používá k broušení tvrdých keramických materiálů nebo orovnávaní a tvarování brusných kotoučů. Jednou z výhod diamantu jako abraziva je zachování tvrdosti při vysokých teplotách obrábění. Diamant je tepelně stabilní do 800 ° C ve vzduchu a nad 1400 ° C ve vakuu. Má velmi příznivé tepelné vlastnosti, které pomáhají snižovat teploty při broušení. Tepelná vodivost patří mezi jedny z největších. Není vhodný pro obrábění ocelí a slitin na bázi niklu. Nástroje bývají velice náchylné k poškození vlivem nárazů nebo prudkých teplotních změn. [15]

KNB

Kubický nitrid boru je druhým nejtvrdším nástrojovým materiálem a je široce používán pro broušení ocelí. I když je tento materiál velice drahý dokáže tento nedostatek nahradit výbornými řeznými vlastnostmi a velkou odolností. Tím lze využívat vyšších řezných podmínek a tím i úspory času a provozních nákladů. Díky své velké odolnosti proti opotřebení KNB stále častěji nahrazuje konvenční brusiva pro přesné broušení kalených ocelí a jiných těžkoobrobitelných materiálů a slitin. KNB je tepelně stabilní v inertních atmosférách do 1500 ° C a vzduchu tvoří stabilní vrstvu oxidu boritého, která zabraňuje další oxidaci až do 1300 ° C. [15]

2.1.3 Pojiva

Anorganická pojiva

Keramické pojivo

Tyto pojiva jsou požívány u většiny brousících nástrojů. Nejčastěji obsahují keramické suroviny jako jsou živec, kaolin, mastek. Mezi největší výhody lze uvést veliký rozsah možností odstupňování tvrdosti, velká pórovitost, netečnost vůči vodě, oleji a chemickým látkám. Nevýhodou je křehkost. [17]

Silikátové pojivo

Jedná se o směs vodního skla, živce, kaolinu a plavené křídly. Při obrábění se brusná zrna z kotouče dobře uvolňují a mají studený řez. To přináší výhody u velkých brousících nástrojů a při velké stykové ploše. Hlavní použití je při broušení, kde je potřeba jemný a chladný výbrus. [17]

Magnezitové pojivo

Pojiva tohoto typu se skládají z uhličitanu hořečnatého, chloridu hořečnatého a vody. Charakteristické vlastnosti pro nástroje jsou stejnoměrná tvrdost kotouče, chladný řez při broušení a možnost je vyrábět do průměru 2 m. Vhodné jen pro broušení za sucha. Toto pojivo se používá jen zřídka. [17]

Organická pojiva

Pryž

Jako hlavní suroviny jsou používány přírodní nebo umělý kaučuk, síra a urychlovače k vytvrzování. Použití pro kotouče vystavené větším mechanickým namáháním a pro velké obvodové rychlosti. Vhodné k výrobě velmi tenkých kotoučů na rozřezávání, broušení a leštění. [17]

Šelak

Je označení pro přirozenou pryskyřici. Je vhodná pro výrobu pro velmi tenkých kotoučů. Nesnáší vysoké teploty, při kterých měkne a stává se lepivým. [17]

Umělá pryskyřice (bakelit)

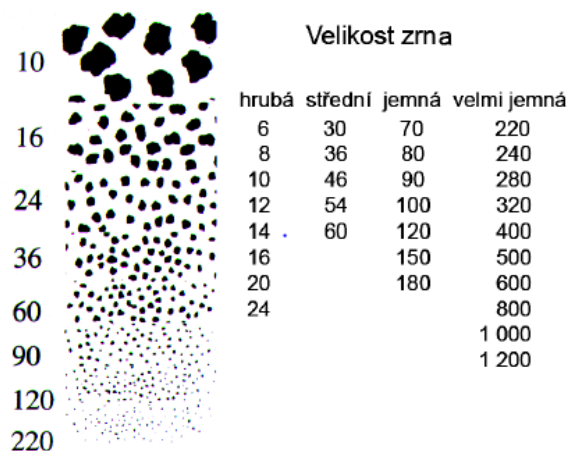
Používané látky pro výrobu jsou fenol a formaldehyd. Jako matrice můžou být u těchto kroupoučů použity textilní vlákna (bavlna, plátno, plsty). Ty slouží ke zpevnění. Využívají se pro řezací kotouče, hrubé obrušování a čištění a pro lapovací kotouče. Kotouče s textilní matricí se vyznačují velkou výkonností, bezpečností a univerzálností. Použití při odřezávání vtoků a nálitků, při broušení svárů a ploch po řezání plamenem. [17]

Kovová pojiva

Ty se používají jako nosiče pro superabrazivní materiály jako je diamant nebo KBN

2.1.4 Velikost zrn

Velikost zrn také označovaná jako zrnitost popisuje velikost zrn. Čím větší požadavky na malou drsnost, tím volíme jemnější zrno. Pro hrubovací operace, měkké a houževnaté materiály volíme zrno hrubší.



Obrázek 12 Zrnitost brusných kotoučů

2.1.5 Tvrdost a poréznot kotoučů

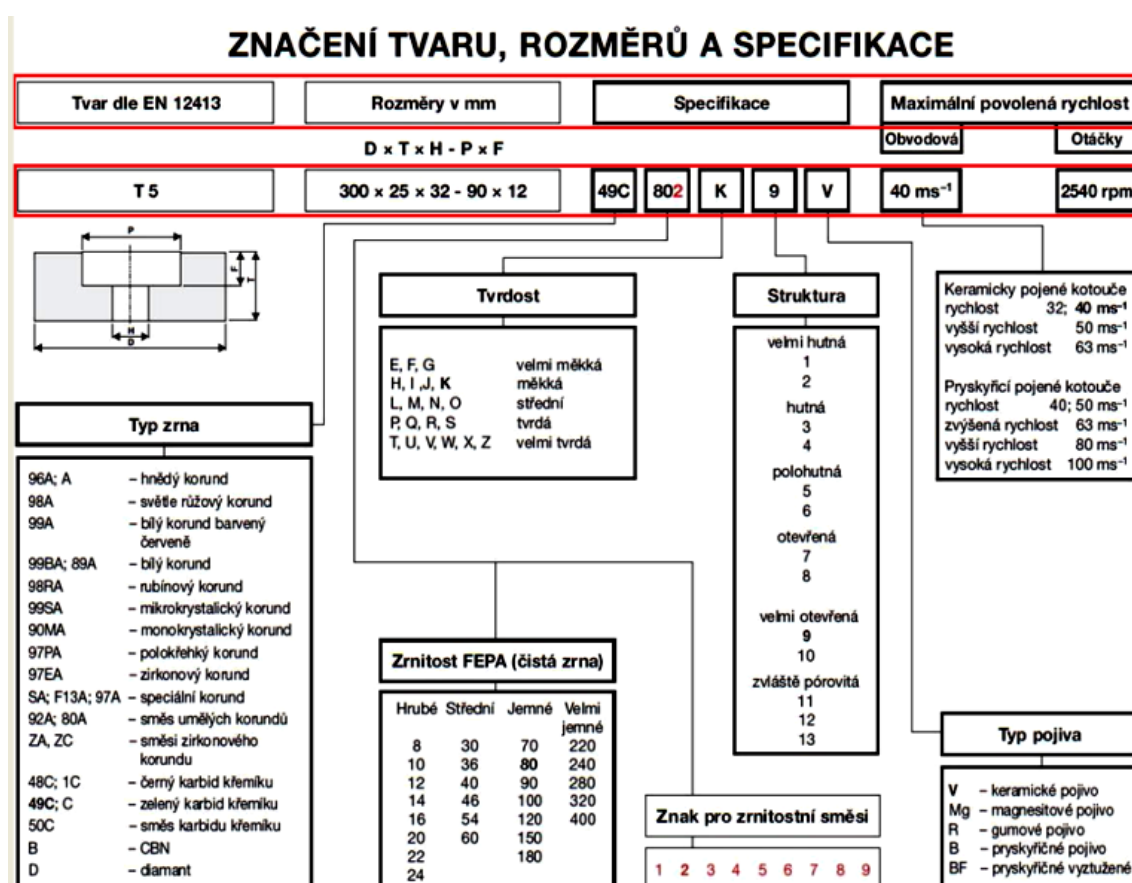
Tvrdost

Tvrdost kotouče lze popsat jako schopnost pojiva kotouče udržet brusivo ve vazbě. Označuje se velkými písmeny abecedy od E do Z.

Poréznot kotouče

Poréznot korouče charakterizuje poměr obsahu brusiva a pojiva ve struktuře kotouče, velikost a počet pórů. Označuje se čísly od 1 do 13.

2.1.6 Označování kotoučů



Obrázek 13 Značení tvaru, rozměrů a specifikace brousících nástrojů [16]

2.2 Řezné podmínky

Správný popis řezných podmínky je v celé řadě obráběcích metod velice důležité. Ovlivňují totiž výsledné vlastnosti obráběných materiálů a také mají velký vliv na ekonomickou a ekologickou stránku obrábění. U technologie broušení se řezné podmínky volí se jako i jiných technologií obrábění se zřetelem na požadované přesnosti rozměrů, geometrických tvarů, drsnosti povrchu a snahou maximální efektivity procesu.

U broušení volbu řezných podmínek ovlivňují vlastnosti materiálu obrobku a nástroje, způsob chlazení a způsob broušení. Mezi hlavní řezné podmínky patří řezná rychlost, podélný posuv a hloubka řezu.

Řezná rychlost

Řezná rychlost lze charakterizovat jako obvodovou rychlost na průměru brusného kotouče. Značka je v_k a jednotka je $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. Správně volená řezná rychlost je taková, při které se vylamují otupená zrna (samoostření). Pokud je to možné volíme vždy co nejvyšší rychlost s ohledem na materiál a parametrů uvedených na popisu brusného nástroje. U rovinného broušení je součástí řezných podmínek také rychlost posuvu stolu v_0 udávaný v mm/min .

$$v_k = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000 \cdot 60} \quad (\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (2.1)$$

Podélný posuv s

Jedná se o pohyb brusného kotouče vůči obrobku do strany. Volí se v závislosti na šířce brusného kotouče. Udává se v šířce brousícího kotouče např. 2/3. Nikdy nesmí být větší než šířka kotouče.

Hloubka řezu a_p

Je to přímý pohyb kotouče v radiálním směru, který určuje hloubku odbrušovaného materiálu. Tento pohyb vykonává brousící kotouč po projetí celé dráhy obrobku, a to buď v jedné úvrati stolu, nebo v obou.

3 Realizace experimentálních měření

3.1 Popis experimentu

Experimentální měření se věnuje rovinnému broušení niklové superslitiny Inconel 713LC obvodem kotouče. Pro tuto operaci byl zvolen kotouč Tyrolit Strato Ultra. Jako měřené veličiny jsou zaznamenávány řezné síly a drsnosti povrchu. Cílem měření je zaznamenat a vyhodnotit změny těchto veličin v závislosti na změně řezných podmínek.

3.1.1 Řezné podmínky

Hloubka třísky a_p - 0.01, 0.02, 0.03, 0.05, 0.1, 0.2, 0.1 mm

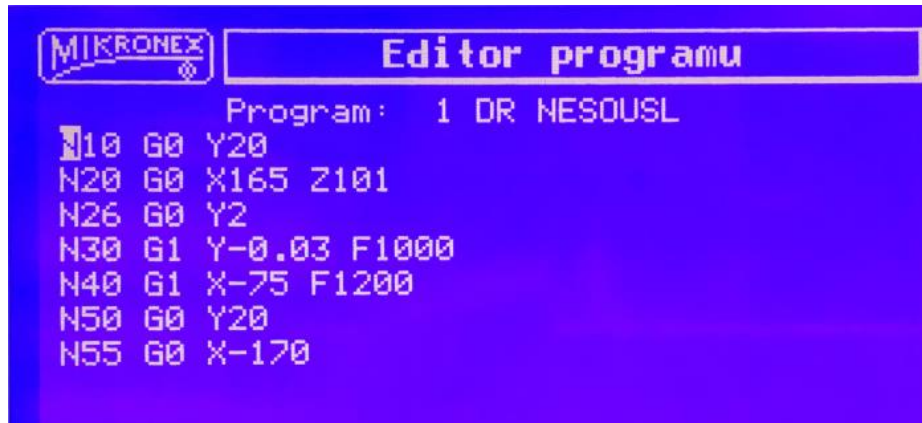
Rychlost posuvu stolu v_0 - 400, 800 mm/min

Řezná rychlost v_k - 30m/s

3.1.2 Postup měření

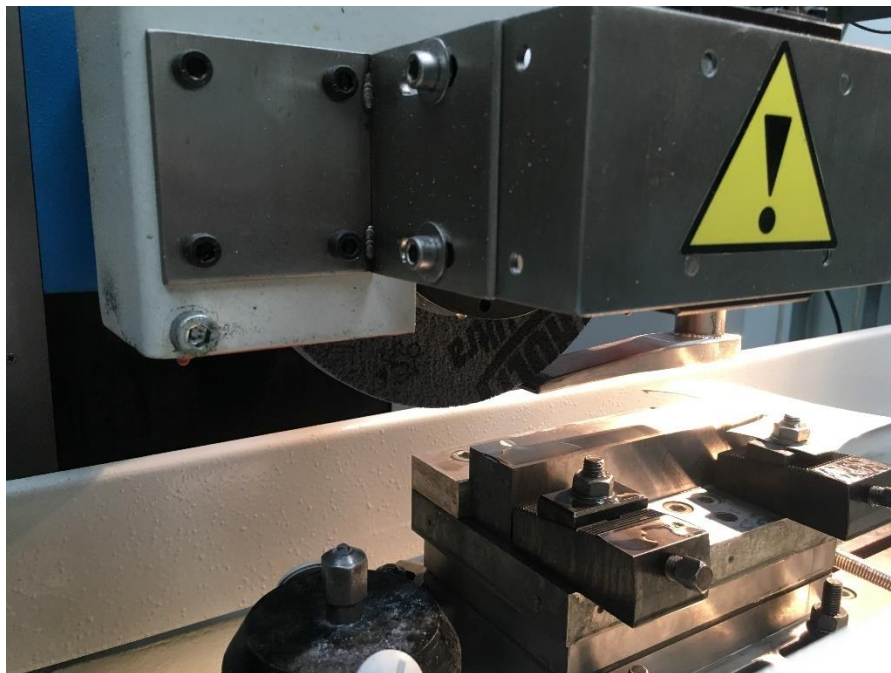
Před začátkem každého měření bylo nutné srovnat plochu obráběného materiálu. Po té následovalo orovnění kotouče a vyjiskření plochy obrobku. Tím bylo dosaženo podmínek pro nastavení přesné hodnoty souřadnicové nuly v ose Y na povrchu obrobku. Déle byl kotouč znovu orovněn na diamantovém orovnači. Důvod proč je do procesu zavedeno orovnávaní kotouče je z důvodu zajištění nejvyšší jakosti řezné části a také pro zjištění přesných hodnot průměru, který systém automaticky přepočítává. V dalším kroku bylo nutné nastavit požadované řezné podmínky do předem připraveného NC kódu. Po tomto nastavení bylo měření připraveno. Následně po spuštění měřicího programu a samotného obráběcího cyklu byl proveden výbrus drážky o rozměrech odpovídající šířce kotouče a nastavené hloubce řezu. Touto operací došlo k částečnému opotřebení kotouče a bylo nutné znova orovnat. Orovněním byl dosažen opět přesný průměr nástroje a mohlo se přejít k vyjiskření dané drážky. Vyjiskření drážky probíhalo při stejných řezných podmínkách a pro přesný výsledek bylo 3x opakováno. Po výbrusu drážky, ale i po vyjiskření byly vždy změřeny hodnoty drsnosti povrchu na třech místech drážky. Tento postup se opakoval vždy pro každé měření zadaných řezných podmínek.

Celý proces obrábění vždy probíhal při použití chladicí kapalina na bázi emulze a odsávání par a mlhy vznikající při broušení.



```
MIKRONEX Editor programu
Program: 1 DR NESOUSL
N10 G0 Y20
N20 G0 X165 Z101
N26 G0 Y2
N30 G1 Y-0.03 F1000
N40 G1 X-75 F1200
N50 G0 Y20
N55 G0 X-170
```

Obrázek 14 Používaný zápis NC kódu

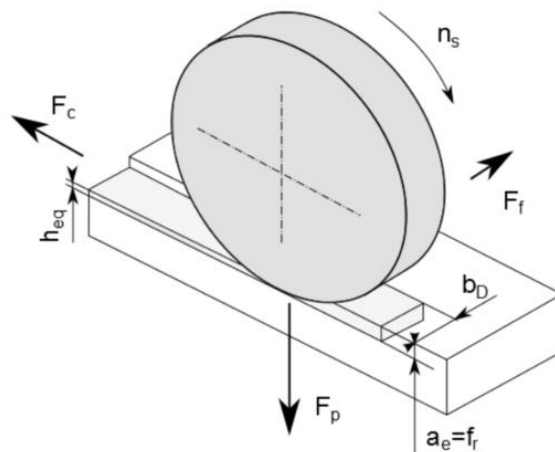


Obrázek 15 Obráběcí prostor

3.2 Měřené veličiny

3.2.1 Řezné síly

Měřené síly jsou F_p pasivní, která je kolmá k broušené ploše a řezná F_c ležící ve směru řezné rychlosti. Obecným pravidlem bývá, že F_p je až 1,5x větší, než síla F_c .



Obrázek 16 Síly při broušení [19]

3.2.2 Drsnost povrchu

Drsnost je jednou z vlastností povrchu, která popisuje jeho jakost. Pro vyjádření drsnosti jsou zavedené tyto veličiny R_a , R_z , R_{max} . Každá z nich popisuje drsnost jiným způsobem.

R_a Jedná se o aritmetický průměr absolutních hodnot skutečného profilu. Je nejpoužívanější. Nevýhodou je, že v některých případech může docházet ke zkreslení hodnot.

R_z U hodnoty R_z se bavíme průměrné hodnotě z deseti absolutních hodnot.

R_{max} Je vyhodnocován jako rozdíl mezi maximem a minimem profilu drsnost tzv. maximální výška povrchu.

3.3 Měřicí soustava

3.3.1 Stroj

Rovinná bruska BRH 20 CNC v provedení s řídicím systémem Mikronex SN 600.4



Obrázek 17 Rovinná bruska BRH 20 CNC [18]

3.3.2 Nástroj

TYROLIT STRATO ULTRA je vysoce porézní brusný kotouč pro hlubinné výbrusy. Speciálně v oblasti výroby turbín nahrazuje velice drahý mikrokrystalický korund. Tento kotouč zaručuje snížení doby broušení, zvýšenou stálost profilu, řezné rychlosti až do 63 ms^{-1} a prodlouženou dobu trvanlivosti. Přesné označení kotouče je 240x15x51 SU33A 702GG11V B1/40 Strato ultra.

3.3.3 Materiál

INCONEL 713LC

INCONEL 713LC patří mezi odlévané superslitiny. Jedná se o polykrystalickou superslitinu zpevněnou precipitáty Ni₃Al, Ni₃AlTi. Slitina INCONEL 713LC je nízkouhlíková modifikace lité slitiny INCONEL 713C. Nízký obsah uhlíku je dodržen z důvodu omezení tvorby karbidů. INCONEL 713LC má dobré mechanické vlastnosti, odolnost vůči korozi a navíc výbornou odolnost vůči creepu. Obrobitelnost slitiny je špatná, a proto se používá metoda přesného lití na vytavitelný model. Slitina se používá v leteckém a energetickém průmyslu. V případě tohoto měření byla slitina dodána ve formě čvercového profilu o délce strany 37mm a celkové délce 194,5 mm, což odpovídá délce broušené drážky.

3.3.4 Měřící zařízení

Dynamometr Kistler Typ 9265B jedná se o piezoelektrický dynamometr měřící ve 3 osách. Kompaktní je s programem Dynoware, který zaznamenává hodnoty změřené tímto dynamometrem.

Drsnoměr Mahr MarSurf PS 10 Přenosný drsnoměr kmobilnímu využití

4 Zhodnocení výsledků

Naměřené hodnoty drnosti, ale i působení sil při broušení je porovnáváno a hodnoceno v závislosti na ekvivalentní tloušťce třísky h_{eq} . Tu volíme, jelikož při broušení je velice složité spočítat tloušťku třísky odebíranou jednotlivými zrny. Díky ní lze jednodušeji určovat řezivost nebo obrobitelnost daných materiálů.

Pro rovinné obvodové broušení se vypočítá podle vzorce. (4.1)

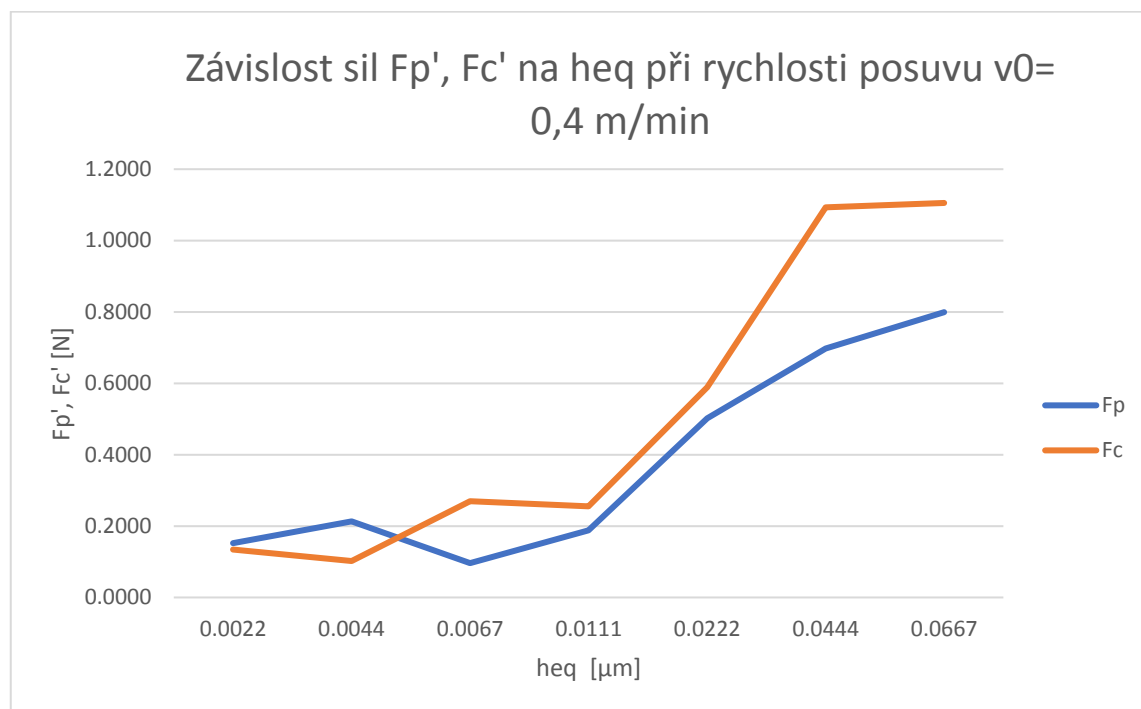
$$h_{eq} = \frac{v_0 \cdot a_e}{60 \cdot v_k} \quad [\text{mm}] \quad (4.1)$$

a_e – Hloubka úběru [mm] v_k – řezná rychlost [m.s-1] v_0 – rychlost posuvu stolu brusky [m.min-1]

4.1 Procesní síly F_p a F_c

Procesní síly užívané pro vyhodnocení se označují za tzv. měrné síly F_p' , F_c' . To jsou síly, které odpovídají naměřenému zatížení pro 1mm šířky brusného kotouče.

4.1.1 Při posuvu v_0 400 mm/min

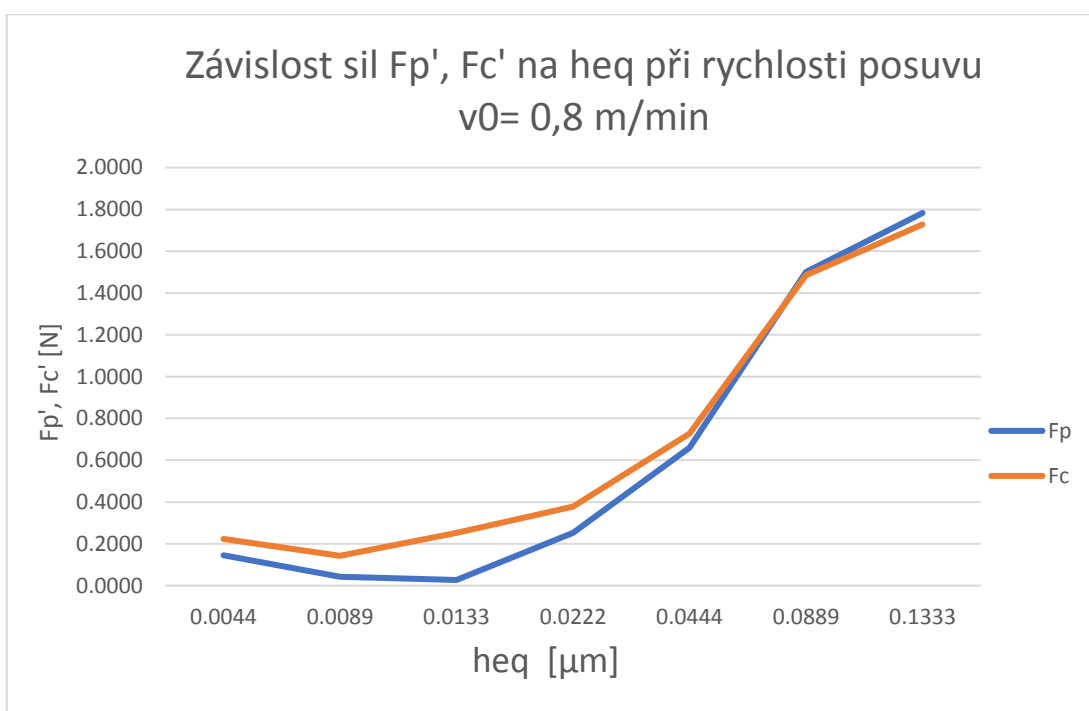


Obrázek 18 Závislost sil F_p' , F_c' na h_{eq} při rychlosti posuvu $v_0=0,4$ m/min

Vk [ms ⁻¹]	Ae [mm]	V0 [m/min]	Fp [N]	Fc [N]	hekv [μm]	Fp'	Fc'
30	0.01	0.4	2.284	2.009	0.0022	0.1523	0.1339
30	0.02	0.4	3.191	1.531	0.0044	0.2127	0.1021
30	0.03	0.4	1.443	4.04	0.0067	0.0962	0.2693
30	0.05	0.4	2.82	3.831	0.0111	0.1880	0.2554
30	0.1	0.4	7.527	8.84	0.0222	0.5018	0.5893
30	0.2	0.4	10.46	16.4	0.0444	0.6973	1.0933
30	0.3	0.4	11.99	16.58	0.0667	0.7993	1.1053

Tabulka 1 Závislost sil Fp', Fc' na heq při rychlosti posuvu v0= 0,4 m/min

4.1.2 Při posuvu v0 800 mm/min



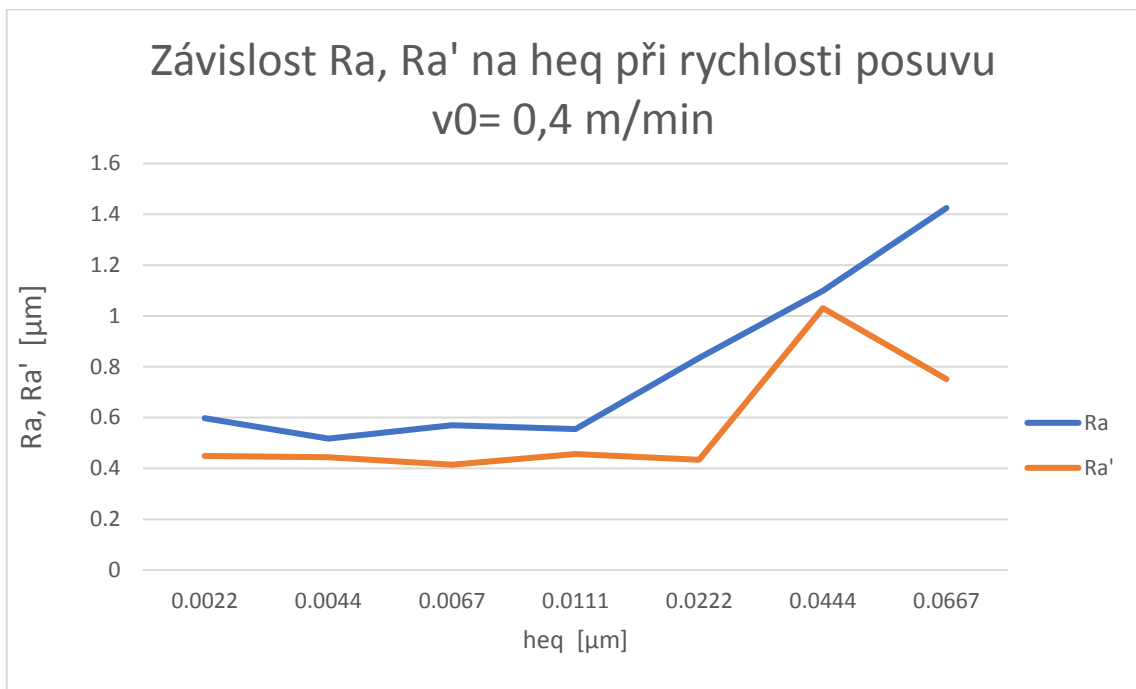
Obrázek 19 Závislost sil Fp', Fc' na heq při rychlosti posuvu v0= 0,8 m/min

Vk [ms ⁻¹]	Ae [mm]	V0 [m/min]	Fp [N]	Fc [N]	hekv [μm]	Fp'	Fc'
30	0.01	0.8	2.18	3.35	0.0044	0.1453	0.2233
30	0.02	0.8	0.637	2.143	0.0089	0.0425	0.1429
30	0.03	0.8	0.407	3.79	0.0133	0.0271	0.2527
30	0.05	0.8	3.786	5.671	0.0222	0.2524	0.3781
30	0.1	0.8	9.905	10.9	0.0444	0.6603	0.7267
30	0.2	0.8	22.51	22.29	0.0889	1.5007	1.4860
30	0.3	0.8	26.74	25.92	0.1333	1.7827	1.7280

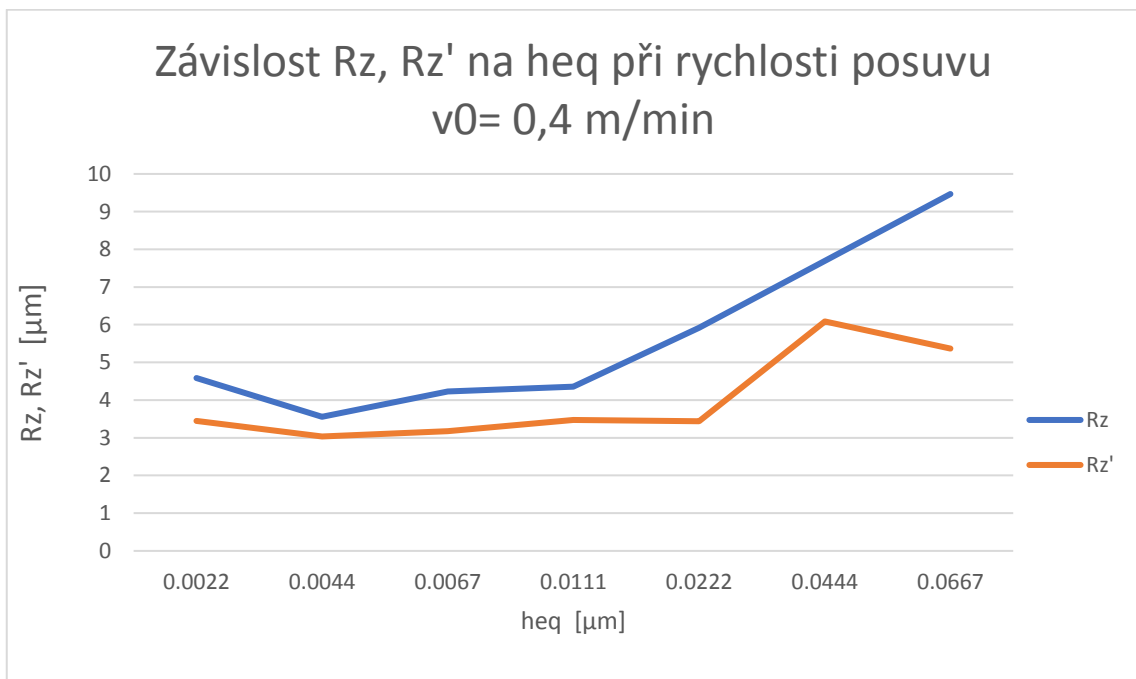
Tabulka 2 Závislost sil Fp', Fc' na heq při rychlosti posuvu v0= 0,8 m/min

4.2 Drsnost povrchu

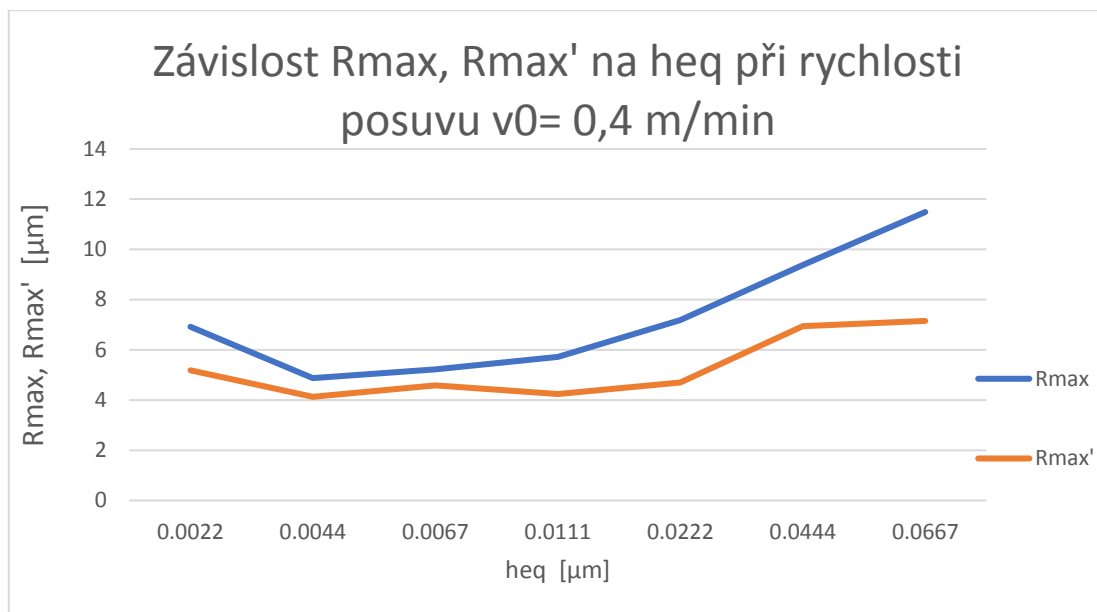
4.2.1 Při posuvu v_0 400 mm/min



Obrázek 20 Závislost Ra na heq při rychlosti posuvu $v_0 = 0,4$ m/min



Obrázek 21 Závislost Rz na heq při rychlosti posuvu $v_0 = 0,4$ m/min



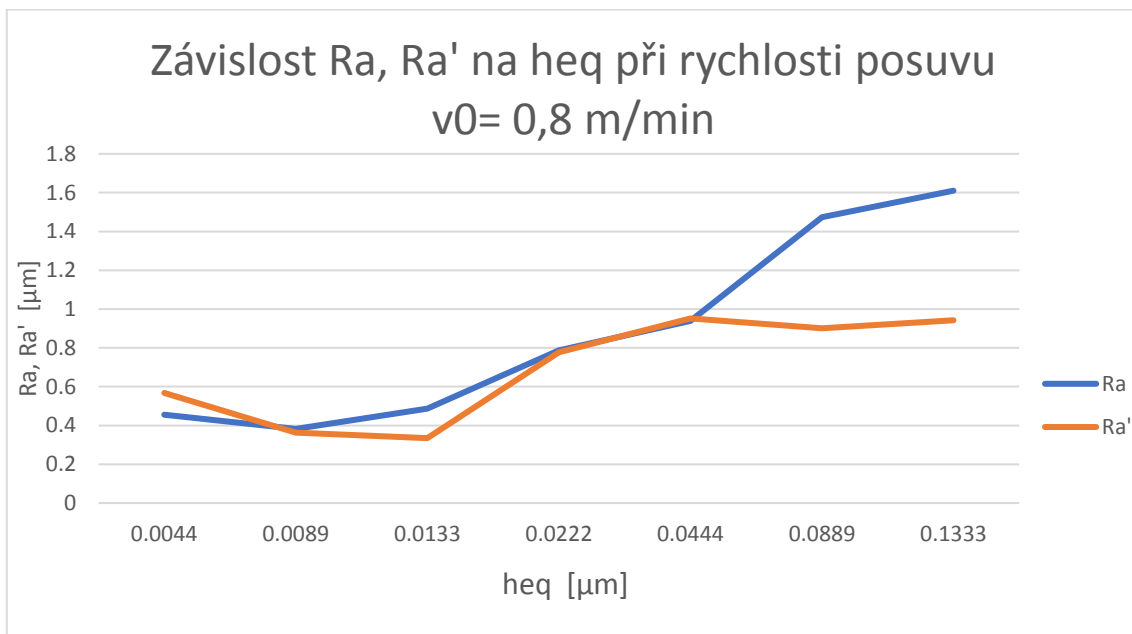
Obrázek 222 Závislost Rmax na heq při rychlosti posuvu v0= 0,4 m/min

		Před vyjiskřením			Po vyjiskření		
		Ra	Rz	Rm	Ra	Rz	Rm
400	0.01	0.479	4.597	6.907	0.599	5.006	8.03
		0.571	3.861	5.305	0.375	2.611	3.917
		0.744	5.294	8.525	0.375	2.724	3.592
		0.598	4.584	6.912333	0.449667	3.447	5.179667
400	0.02	0.555	4.05	6.587	0.372	2.714	3.396
		0.463	3.181	4.078	0.467	2.949	3.72
		0.534	3.441	3.954	0.494	3.444	5.271
		0.517333	3.557333	4.873	0.444333	3.035667	4.129
400	0.03	0.681	4.766	6.422	0.411	3.558	6.421
		0.52	4.258	5.217	0.442	3.447	4.132
		0.51	3.661	4.038	0.391	2.512	3.208
		0.570333	4.228333	5.225667	0.414667	3.172333	4.587
400	0.05	0.612	4.747	6.217	0.477	3.971	5.242
		0.532	3.874	4.987	0.42	3.14	3.23
		0.521	4.451	5.932	0.474	3.298	4.23
		0.555	4.357333	5.712	0.457	3.469667	4.234
400	0.1	0.665	4.623	5.605	0.405	3.389	4.159
		0.797	5.988	6.555	0.427	3.41	5.96
		1.042	7.14	9.398	0.47	3.521	3.984
		0.834667	5.917	7.186	0.434	3.44	4.701
400	0.2	0.831	6.806	9.255	1.05	6.531	6.712
		1.15	7.524	7.931	0.972	5.836	7.225
		1.317	8.764	10.936	1.07	5.893	6.878
		1.099333	7.698	9.374	1.030667	6.086667	6.938333

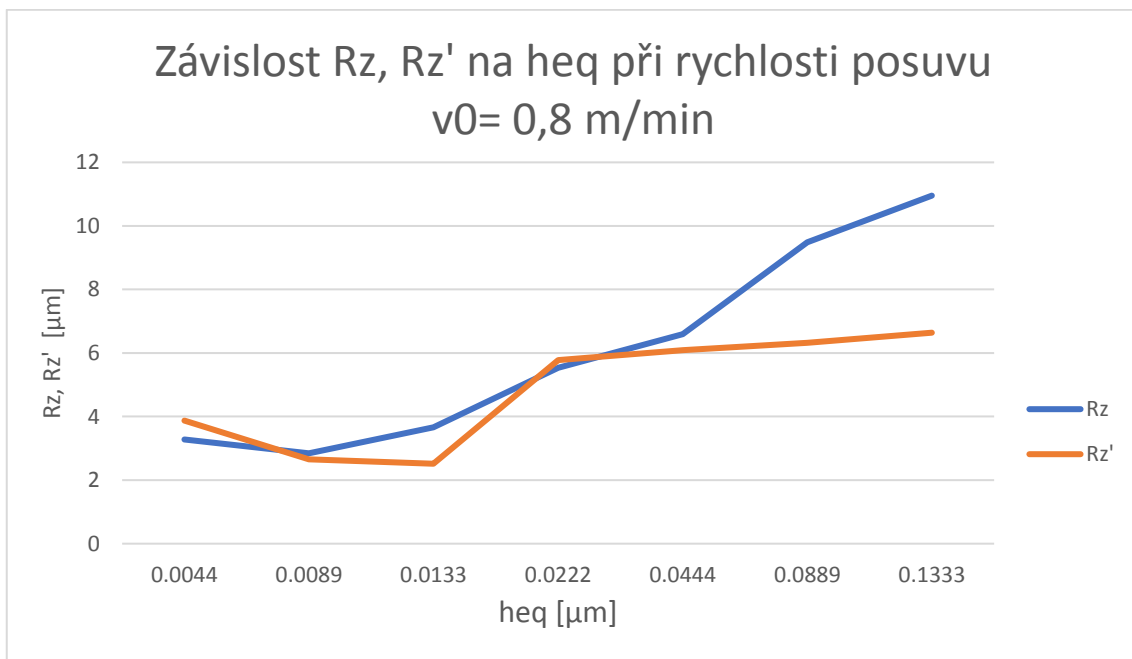
400	0.3	1.302	8.317	9.746		0.721	5.515	7.615
		1.501	10.544	11.607		0.74	5.074	6.064
		1.472	9.542	13.108		0.793	5.508	7.772
		1.425	9.467667	11.487		0.751333	5.365667	7.150333

Tabulka 3 Závislost sil drsnosti na heq při rychlosti posuvu $v_0 = 0,4$ m/min

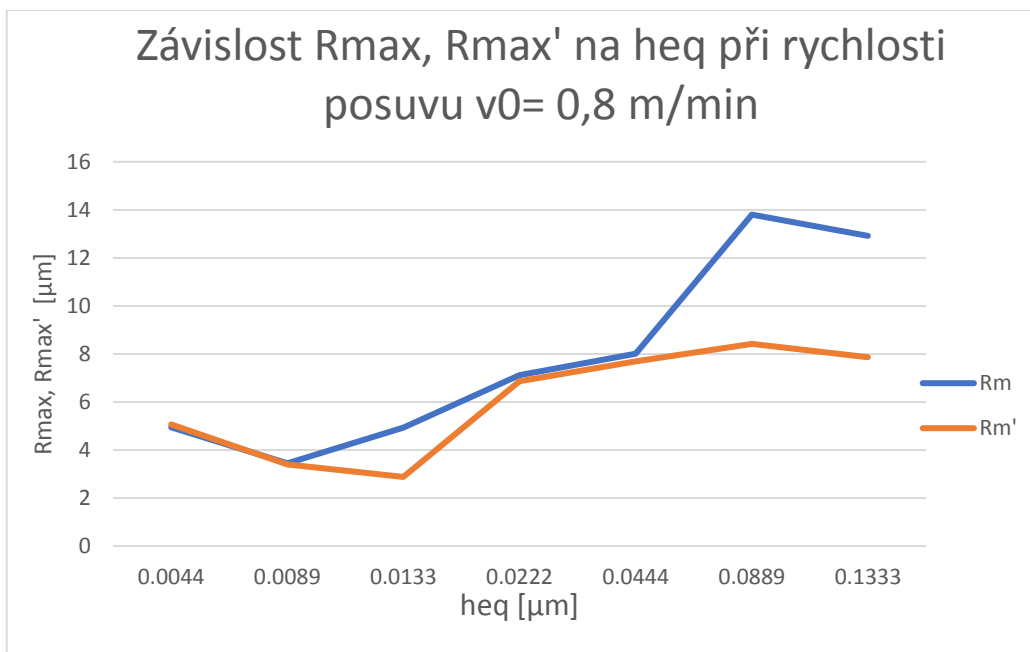
4.2.2 Při posuvu v_0 800 mm/min



Obrázek 23 Závislost Ra na heq při rychlosti posuvu $v_0 = 0,8$ m/min



Obrázek 24 Závislost Rz na heq při rychlosti posuvu $v_0 = 0,8$ m/min



Obrázek 25 Závislost sil Rmax na heq při rychlosti posuvu v0= 0,8 m/min

		Před vyjiskření			Po vyjiskření		
		Ra	Rz	Rm	Ra	Rz	Rm
800	0.01	0.576	4.211	6.877	0.519	4.104	4.957
		0.392	2.846	4.003	0.614	3.361	5.092
		0.397	2.765	3.955	0.569	4.155	5.127
		0.455	3.274	4.945	0.5673333	3.8733333	5.058667
800	0.02	0.439	3.004	3.654	0.379	2.79	4.037
		0.365	2.865	3.071	0.375	2.756	3.153
		0.343	2.66	3.607	0.333	2.41	2.994
		0.3823333	2.843	3.444	0.3623333	2.652	3.394667
800	0.03	0.5	3.432	4.143	0.34	2.376	2.559
		0.474	3.505	4.948	0.34	2.565	3.049
		0.487	4.055	5.706	0.324	2.605	3.024
		0.487	3.664	4.932333	0.3346667	2.515333	2.877333
800	0.05	0.674	5.024	7.537	0.843	6.311	7.663
		0.774	5.753	7.375	0.79	5.9	7.191
		0.915	5.821	6.432	0.7	5.134	5.727
		0.787667	5.532667	7.114667	0.7776667	5.781667	6.860333
800	0.1	0.879	6.011	6.358	0.909	6.28	7.527
		0.835	5.291	6.14	0.955	6.103	7.768
		1.101	8.469	11.546	0.991	5.885	7.759
		0.938333	6.590333	8.014667	0.9516667	6.089333	7.684667
800	0.2	0.896	6.461	7.802	0.926	6.462	8.536
		1.98	12.102	20.985	0.864	6.518	9.217
		1.545	9.894	12.615	0.914	5.982	7.498

		1.473667	9.485667	13.80067		0.9013333	6.320667	8.417
800	0.3	1.06	7.692	9.086		0.916	6.381	7.244
		1.915	12.104	14.779		0.904	6.47	7.542
		1.856	13.063	14.887		1.006	7.066	8.8
		1.610333	10.953	12.91733		0.942	6.639	7.862

Tabulka 4 Závislost sil drsnosti na heq při rychlosti posuvu $v_0 = 0,8$ m/min

4.3 Vyhodnocení měření

4.3.1 Síly F_p' , F_c'

Obecný předpoklad, že při broušení obvodem kotouče je pasivní síla průměrně 1,5x větší, než síla řezná se nepotvrdil. U obou vyhodnocování, vychází velikost řezné síly větší nebo rovna síle pasivní. Tím se potvrzuje velká odolnost této slitiny vůči broušení. Při větším posuvu vykazoval řezný proces větší stabilitu. Na grafu jde vidět, že hodnoty obou sil jsou si velice podobné. Z toho můžeme usoudit, že pro používání daného kotouče je ideální zvolit větší řezné parametry a tím stabilizovat řezný proces.

4.3.2 Drsnost

Naměřené drsnosti splňují obecně platnou podmínku podmínku, kdy po vyjiskření dosahuje povrch lepších parametrů. Nezávisle na změnách posuvu dosahuje kotouč nejlepších hodnot odpovídající R_a kolem $0,5 \mu\text{m}$. To potvrzuje, že se jedná o hrubovací kotouč určený pro velké zátěže.

5 Závěr

Úkolem této práce bylo popsat problematiku broušení těžkoobrobitelných materiálů. Na začátku práce jsem se věnoval obecnému popisu technologie broušení a základním způsobům broušení.

V další části popisují základní vlastnosti a možnosti použití těžkoobrobitelných materiálů. Pro tento rozbor jsem vybral nerezové oceli, titan a jeho slitiny, nikl a jeho slitiny a slitiny kobaltu. Tyto materiály jsem analyzoval a následně vyhodnotil nejlepší podmínky pro užití technologie broušení při jejich obrábění.

Poslední z teoretické části jsem rozebíral nástroje pro broušení a řezné podmínky. Popis nástrojů zahrnoval rozdělení podle tvaru, použitého brusiva, pojiva a základních vlastností charakterizující tyto nástroje. Na konci tohoto úseku se věnuji řezným podmínkám při broušení. To zahrnuje základní popis podmínek ovlivňujících proces broušení.

Závěrečná část práce je věnována experimentu, který spočíval ve zmapování řezného procesu mezi slitinou INCONEL 713LC a kotoučem TYROLIT STRATO ULTRA. Nejprve jsem se věnoval popisu samotného experimentu. (řezné podmínky, způsob broušení, použité stroje a přístroje a měřené veličiny). V části zhodnocení popisují vlastností řezného kotouče v závislosti na zadaných řezných podmínkách.

6 Seznam literatury

- [1] MASLOV, Je. N. *Teorie broušení kovů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1979
- [2] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Technologie obrábění*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013, ISBN 978-80-248-3012-4
Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_001/
- [3] MÁDL, Jan a Jaroslav BARCAL. *Základy technologie II*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002, 55 s. ISBN 80-010-2610-8.
- [4] MIKOVEC, Miroslav. *Obrábění materiálů s velkou pevností a tvrdostí*. Praha: SNTL, 1982.
- [5] MACEK, Karel a České vysoké učení technické v Praze. Strojní fakulta. *Kovové materiály*. Vyd. 1. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006
- [6] MARINESCU, Ioan D., M. P. HITCHINER, Eckart UHLMANN, W. B. ROWE a Ichiro INASAKI. *Handbook of machining with grinding wheels* [online]. Second edition. Boca Raton: Taylor & Francis, [2016] [cit. 2019-07-19]. ISBN 9781482206708.
- [7] MACEK, Karel a Petr ZUNA. *Nauka o materiálu*. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-01-01507-6.
- [8] ASM, *ASM handbook*, Volume 16: *Machining*, ASM International, 1989, ISBN: 978-0-87170-022-3
- [9] BIBUS, *Machining titanium* [online], Bibus s.r.o.
Dostupné z: http://new.bibus.cz/pdf/Special_Metals/Titan/titanium_machining.pdf
- [10] Nickel and Nickel Alloys- Machining. *301 Moved Permanently* [online]. Dostupné z: <https://www.espimetals.com/index.php/technical-data/167-nickel-and-nickel-alloys-machining>
- [11] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *[Nauka o materiálu-Speciální kovové materiály]*. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04212-0.

- [12] Příručka pro technology: Proces obrábění v nerezových ocelích - závěrečné tipy. *Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum*[online]. Copyright © 2019 www.mmspektrum.com [cit. 19.07.2019]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-proces-obrabeni-v-nerezovych-ocelich-zaverecne-tipy.html>
- [13] FASTENERS, *Druhy nerezových ocelí a příklady jejich užití*, [online]. Dostupné z: <https://www.fasteners-cz.cz/druhy-nerezove-oceli-priklady-jejeho-uziti>
- [14] MIKOVEC, Miroslav. *Obrábění těžkoobrobitelných materiálů: určeno pro technology a konstruktéry*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963. Řada strojírenské literatury.
- [15] ROWE, W. B. *Principles of modern grinding technology*. Norwich, NY: William Andrew, c2009. ISBN 978-0-8155-2018-4.
- [16] Výzkum broušení dílů forem kotoučem z diamantu a kubického nitridu bóru. Bc. Jiří Čop - PDF. *Představujeme Vám pohodlné a bezplatné nástroje pro publikování a sdílení informací*. [online]. Copyright © DocPlayer.cz [cit. 19.07.2019]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/6568792-Vyzkum-brouseni-dilu-forem-kotoucem-z-diamantu-a-kubickeho-nitridu-boru-bc-jiri-cop.html>
- [17] ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3, metody, stroje a nástroje pro obrábění 1. díl*. Praha: Scientia, 2005 ISBN 80-7183-337-1
- [18] MIKRONEX, [online] Dostupné z: <http://www.mikronex.cz/BRH20CNC.pdf>
- [19] KOČMAN, Karel. *Technologie obrábění*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3068-0

7 Seznam tabulek

<i>Tabulka 1 Závislost sil F_p', F_c' na heq při rychlosti posuvu $v_0= 0,4$ m/min.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabulka 2 Závislost sil F_p', F_c' na heq při rychlosti posuvu $v_0= 0,8$ m/min.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabulka 3 Závislost sil drsnosti na heq při rychlosti posuvu $v_0= 0,4$ m/min.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabulka 4 Závislost sil drsnosti na heq při rychlosti posuvu $v_0= 0,8$ m/min.....</i>	<i>40</i>

8 Seznam obrázků

<i>Obrázek 1 Broušení s podélným posuvem [2].....</i>	<i>8</i>
<i>Obrázek 2 Radiální obvodové broušení vnějších ploch [2].....</i>	<i>9</i>
<i>Obrázek 3 Hloubkové broušení [2].....</i>	<i>10</i>
<i>Obrázek 4 Bezhraté průběžné broušení [2].....</i>	<i>10</i>
<i>Obrázek 5 Axiální broušení vnitřních válcových ploch [2].....</i>	<i>11</i>
<i>Obrázek 6 Planetové broušení vnitřních válcových ploch [2]</i>	<i>11</i>
<i>Obrázek 7 Bezhraté obvodové broušení vnitřních ploch „dokulata“ [2].....</i>	<i>12</i>
<i>Obrázek 8 Posuvný pohyb Obrobku [2] Rotační pohyb obrobku [2].....</i>	<i>13</i>
<i>Obrázek 9 Otáčivý pohyb obrobku [2] Přímočarý pohyb obrobku [2]</i>	<i>13</i>
<i>Obrázek 10 Základní typy brusných kotoučů [8].....</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 11 Základní typy brusných kotoučů s kovovým nosičem [8].....</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 12 Zrnitost brusných kotoučů</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 13 Znační tvaru rozměrů a specifikace brousících nástrojů [16]</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 14 Používaný zápis NC kódu</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 15 Obráběcí prostor.....</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 16 Síly při broušení [19]</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 17 Rovinná bruska BRH 20 CNC [18]</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 18 Závislost sil F_p', F_c' na heq při rychlosti posuvu $v_0= 0,4$ m/min</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 19 Závislost sil F_p', F_c' na heq při rychlosti posuvu $v_0= 0,8$ m/min</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 20 Závislost R_a na heq při rychlosti posuvu $v_0= 0,4$ m/min</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 21 Závislost R_z na heq při rychlosti posuvu $v_0= 0,4$ m/min.....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 22 Závislost R_{max} na heq při rychlosti posuvu $v_0= 0,4$ m/min</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 23 Závislost R_a na heq při rychlosti posuvu $v_0= 0,8$ m/min</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 24 Závislost R_z na heq při rychlosti posuvu $v_0= 0,8$ m/min.....</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 25 Závislost sil R_{max} na heq při rychlosti posuvu $v_0= 0,8$ m/min</i>	<i>39</i>