

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské
metrologie

Obrábění těžkoobrobitelných materiálů

Machining of Hard Machine Materials

Student:

Bc. Jiří Hajnyš

Vedoucí diplomové práce:

Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D.

Ostrava 2015

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jiří Hajnýš**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: **Obrábění těžkoobrobitelných materiálů**
Machining of Hard Machine Materials

Zásady pro vypracování:

1. Zpracování rešerše problematiky.
2. Návrh experimentální činnosti.
3. Realizace experimentu a měření.
4. Technicko-ekonomické zhodnocení.
5. Závěrečné zhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [2] HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Brno : MM Publishing Praha, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [3] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*. 1. vyd. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, EDIS, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [4] SHAW, Milton C. *Metal Cutting Principles*. 2nd edition. New York : Oxford University Press, 2005. 651. p. ISBN 0-19-514206-3.
- [5] STEPHENSON, D. A.; AGAPIOU, J. S. *Metal cutting theory and practice*. New York : Marcel Dekker, Inc., 1997. ISBN 0-8247-9579-2.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing.et Ing.Mgr. Jana Petřů, Ph.D.**

Datum zadání: 12.12.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015




Ing.et Ing.Mgr. Jana Petřů, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.


V Ostravě
14.5.2015

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :.....
14.5.2015

.....


Podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Jiří Hajnyš

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Ležáky 5, 787 01

Šumperk

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

HAJNYŠ, J. *Obrábění těžkoobrobitelných materiálů*: Diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2015, 85s. Vedoucí práce Petřů, J.

Diplomová práce se zabývá návrhem a porovnáním dvou řezných geometrií vyměnitelných břitových destiček při soustružení těžkoobrobitelného materiálu Inconel 625 dle W. Nr. 2.4856. Teoretická část je zaměřena na charakteristiku a obrobitelnost těžkoobrobitelných materiálů a speciálních slitin. V praktické části práce se porovnává vliv řezné geometrie na průběh obrábění materiálu Inconel 625 čtvercovou a kruhovou břitovou destičkou. Experimentální testování bylo provedeno při podélném vnějším soustružení na CNC obráběcím soustruhu Mori Seiki NLX2500. Pro navržené břitové destičky byly v průběhu obrábění nastaveny konstantní řezné podmínky. V závislosti na změně hloubky řezu odebírané vrstvy materiálu bylo vyhodnoceno silové zatížení, zmapován průběh opotřebení VBD a změřena drsnost obrobeného povrchu. V závěru práce jsou vyhodnoceny naměřené hodnoty a proveden ekonomický rozbor jednotlivých vyměnitelných břitových destiček.

ANOTATION OF MASTER THESIS

HAJNYŠ, J. *Machining of Hard Machine Materials*: Master Thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2015, 85p. Thesis head: Petřů, J.

This thesis present the design and comparison of two cutting geometries of indexable inserts for turning hard machining material Inconel 625 according to W. Nr. 2.4856. The theoretical part focuses on the characteristics and machinability hard materials and special alloys. The practical part compares the influence of cutting geometry square and round inserts in the machining Inconel 625. Experimental testing was conducted at the outer longitudinal turning on CNC machining lathe Mori Seiki NLX2500. For inserts were set constant cutting conditions. Depending on the depth of cut was evaluated force load, the wear inserts was mapped and measured the roughness of the machined surface. In conclusion, the measured values are evaluated and performed an economic analysis of the individual inserts.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ	8
ÚVOD.....	9
1. CHARAKTERISTIKA TĚŽKOOBROBITELNÝCH MATERIÁLŮ.....	10
1.1 KOROZIVZDORNÉ OCELI.....	10
1.1.1 Korozivzdornost.....	11
1.1.2 Rozdělení podle struktury	11
1.1.3 Martenzitické oceli.....	12
1.1.4 Feritické oceli	13
1.1.5 Austenitické oceli	15
1.1.6 Duplexní oceli	15
1.1.7 Precipitačně vytvrditelné oceli	16
1.2 SLITINY NIKLU	17
1.2.1 Slitiny niklu pro běžné podmínky.....	18
1.2.2 Slitiny niklu korozivzdorné.....	18
1.2.3 Slitiny niklu žáruvzdorné a žárupevné.....	19
1.2.4 Mikrostruktura niklových slitin.....	19
1.2.5 Fáze γ	20
1.2.6 Fáze γ'	21
1.2.7 Fáze γ''	21
1.2.8 Karbidy.....	22
1.3 SLITINY TITANU	22
1.3.1 Slitiny α	24
1.3.2 Slitiny $\alpha + \beta$	24
1.3.3 Slitiny β	25
2. OBROBITELNOST TĚŽKOOBROBITELNÝCH MATERIÁLŮ.....	26
2.1 KLASIFIKACE ŘEZNÝCH MATERIÁLŮ PODLE ISO 513.....	27
2.2 OBROBITELNOST KOROZIVZDORNÝCH OCELÍ.....	28
2.3 OBROBITELNOST SLITIN NIKLU	29
2.3.1 Vliv řezných podmínek na životnost nástroje.....	30
2.4 GEOMETRIE NÁSTROJE.....	32
2.5 OPOTŘEBENÍ ŘEZNÉHO NÁSTROJE PŘI PROCESU OBRÁBĚNÍ	35
2.5.1 Měření opotřebení dle ISO 3685	36
2.6 SILOVÉ POMĚRY PŘI PROCESU OBRÁBĚNÍ.....	37
2.6.1 Vliv geometrie nástroje na řezné síly.....	38
2.6.2 Přímé měření sil.....	39
2.6.3 Nepřímé měření sil.....	40
3. NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍ ČINNOSTI.....	41
3.1 OBRÁBĚCÍ STROJ.....	42
3.1.1 Technické údaje	42

3.2	OBRÁBĚNÝ MATERIÁL INCONEL 625	43
3.3	ŘEZNÉ NÁSTROJE A ŘEZNÉ MATERIÁLY	44
3.3.1	Řezný materiál TS2000	44
3.3.2	Nožové držáky	45
3.3.3	Kruhová vyměnitelná břitová destička	47
3.3.4	Čtvercová vyměnitelná břitová destička	48
3.4	POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ PRO VYHODNOCENÍ	49
3.4.1	Drsnoměr SurfTest	49
3.4.2	Dynamometr Kistler	50
4.	REALIZACE EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI	52
4.1	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU	52
4.2	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ OPOTŘEBENÍ	58
4.2.1	Měření opotřebení při hloubce řezu $a_p = 0,5 \text{ mm}$	59
4.2.2	Měření opotřebení při hloubce řezu $a_p = 1,5 \text{ mm}$	65
4.3	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ ŘEZNÝCH SIL	70
5.	TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	77
	ZÁVĚR	79
	POUŽITÁ LITERATURA	81

Seznam použitých značek a symbolů

Symbol	Popis	Jednotka
A_{c1}	překrystalizační teplota	[°C]
a_p	hloubka řezu	[mm]
F_c	řezná síla	[N]
F_f	posuvová síla	[N]
F_p	pasivní síla	[N]
f	posuv na otáčku	[mm]
HSS	rychlořezná ocel	[-]
iC	průměr vepsané kružnice	[mm]
KB	šířka žlábků	[mm]
KF	vzdálenost žlábků od čela	[mm]
KT	hloubka žlábků	[mm]
L	délka obráběné plochy	[mm]
MC	primární karbidy	[-]
$M_{23}C_6$	sekundární karbidy	[-]
M_6C	sekundární karbidy	[-]
M_7C_3	sekundární karbidy	[-]
ϵ_r	poloměr špičky nástroje	[mm]
κ_r	úhel nastavení hlavního břitu	[°]
SK	slnutý karbid	[-]
U_C	rozšířená kombinovaná nejistota	[mm]
VB	opotřebení na hřbetu	[mm]
VB_B	opotřebení přímé části ostří	[mm]
VB_C	opotřebení v oblasti špičky	[mm]
VBD	vyměnitelná břitová destička	[-]
VB_{max}	opotřebení maximální	[mm]
VB_N	opotřebení ve formě vrubu	[mm]
v_c	řezní rychlost	[mm·min ⁻¹]
γ	základní matrice	[-]
γ'	sekundární vytvrzující fáze	[-]
γ''	sekundární vytvrzující fáze	[-]
γ_o	úhel čela	[°]
λ_s	úhel sklonu ostří	[°]

Úvod

Technický pokrok v současné době nejde zastavit a žádá si vývoj a použití nových materiálů s excelentními vlastnostmi. Tyhle materiály musí splňovat požadavky na žárupevnost, žáruvzdornost a korozivzdornost i za zvýšených teplot. Mezi ně se řadí těžkoobrobitelné materiály, speciálně pak slitiny niklu a titanu. Tyto dvě skupiny jsou sice odlišné, ale jejich použití a vlastnosti jsou v mnohých případech velmi podobné. Žárupevné niklové a titanové slitiny jsou hojně využívány v letectví, chemickém průmyslu a kosmonautice. Pro použití v těchto odvětvích se, ale musí zvládnout technologický postup výroby součástek a to převážně pro operací obrábění. Přitom snahou je dosáhnout vyhovující kvality integrity povrchu a rozměrovou či geometrickou přesnost.

Slitiny na bázi niklu, kobaltu nebo železa se označují pojmem „superslitiny“, jsou pro ně charakteristické výborné creepové vlastnosti, vysoká mechanická odolnost vůči únavovému poškození a stálost za vysokých teplot. S těmihle vynikajícími vlastnostmi, ale přicházejí problémy, při běžném třískovém obrábění se u nich projevuje zhoršená obrobitelnost a to znamená věnovat větší pozornost soustavě stroj – nástroj – obrobek. K redukci namáhání této soustavy se musí volit dostatečně tuhý obráběcí stroj, vhodný nástrojový materiál, řezné podmínky a v neposlední řadě vhodná řezná geometrie.

Moje diplomová práce má za cíl ověřit a porovnat řeznou geometrii dvou vyměnitelných břitových destiček a to sice geometrii čtvercovou a geometrii kruhovou. Obě dvě destičky mají na sobě aplikovaný stejný povlak. Vývoj povlaků zaznamenal v posledních letech velký rozmach a je pozitivním přínosem, jak z ekonomického, tak i z technického pohledu, navíc celkem zásadně prodlužuje životnost nástroje.

Destičky se testovaly na těžkoobrobitelném materiálu skupiny ISO S Inconel 625, ten je řazen mezi superslitiny. Zhoršená obrobitelnost těchto slitin se projevuje rychlým opotřebením řezné hrany destičky, u austenitických ocelí a niklových slitin je to nejčastěji ve tvaru vrubu, proto byla navržena kruhová a čtvercová geometrie. Hodnotícím kritériem nebylo pouze opotřebením nástroje, ale bylo vyhodnoceno dynamické zatížení, výsledkem experimentu potom byla drsnost obrobeného povrchu.

1. Charakteristika těžkoobrobitelných materiálů

Těžkoobrobitelné materiály se vyskytují na bázi železa (korozi-vzdorné oceli), na bázi titanu, kobaltu a niklu. Pojem superslitiny označuje slitiny niklu, kobaltu, železa.

1.1 Korozi-vzdorné oceli

Tyto oceli patří mezi konstrukční materiály a vynikají výrazně lepší odolností proti korozi (působení chemických vlivů). Pokud se jedná o korozi-vzdorné oceli musejí být legovány 11,74 – 30 % chromem (Cr), niklem (Ni) až 30 %, manganem (Mn) až 24 %, molybdenem (Mo), mědí (Cu) a potom dalšími prvky do maximálně pár procent křemík (Si), hliník (Al), titan (Ti), niob (Nb), tantal (Ta), wolfram (W), vanad (V) a dusík (N). Pro zlepšení obrobitelnosti se doporučuje ještě legovat sírou (S) a to většinou do 0,03 %. Oceli se navíc vyznačují nižším obsahem uhlíku (C) v rozmezí 0,01 – 0,1 % jen u martenzitických korozi-vzdorných ocelí je obsah C 0,2 – 1,0 %. Díky tomu, že se oceli vyrábějí práškovou metalurgií je u nich zaručeno přesné chemické složení, speciální podmínky výroby a specifické podmínky zkoušení. Proto korozi-vzdorné oceli patří do skupiny legovaných ušlechtilých ocelí. [2]

V dnešní době se neustále zvyšují požadavky na jejich vlastnosti, z toho důvodu je kladen důraz na vývoj korozi-vzdorných ocelí na základě nového nebo změněného chemického složení nebo zavedení progresivních technologií výroby stávajících korozi-vzdorných ocelí a jejich zpracování. Nejčastěji se používají nové technologie výroby přednostně metalurgické procesy, které zvyšují kvalitu a čistotu struktury ocelí. Je běžnou praxí, že korozi-vzdorná ocel je vyvinuta pouze pro jeden technologický proces. Průzkum spotřeby korozi-vzdorných ocelí v jednotlivých průmyslových oborech ukázal, že chemický a energetický průmysl spotřebuje 45 % výroby korozi-vzdorných ocelí, potravinářský průmysl včetně kuchyňských zařízení 25 %, domácí elektrické spotřebiče 10 %, architektura 10 %, automobilový průmysl 5 % a zbytek se využívá v dalších průmyslových oborech. [2, 3]

1.1.1 Korozivzdornost

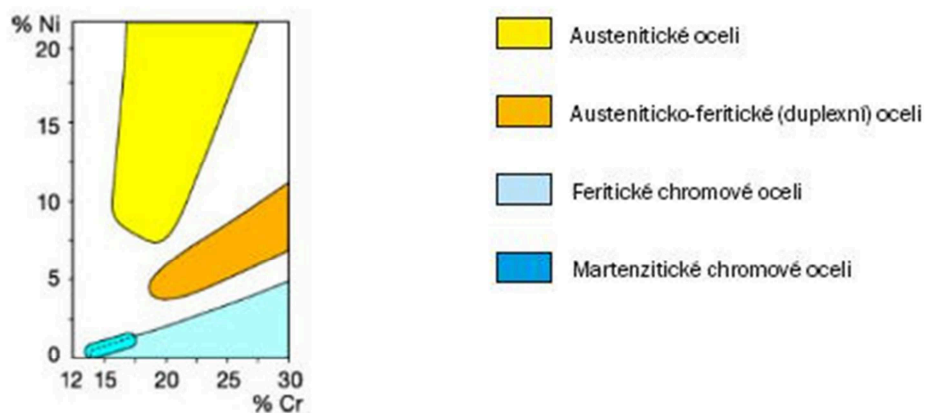
Odolávat korozi je založeno na schopnosti pasivace, chrom vytváří povlak oxidu chromu, tedy pasivní vrstvu. Pasivní vrstva se sama regeneruje. Podmínkou pasivace oceli je minimálně 11,74 % Cr rozpuštěného v tuhém roztoku.

$$Cr = 11,74\% + 14,5\% C \quad (1)$$

U povrchu korozivzdorných ocelí záleží na přítomnosti dostatečného množství oxidačního činidla. V místech, kde je pasivní vrstva nehomogenní nebo poškozená dochází díky mechanickému namáhání k defektu a povrch tím pádem není v kontaktu s dostatečným množstvím oxidačních látek a dochází ke koroznímu napadení. Proto pasivní vrstva dává celkem dobrou odolnost proti všeobecné korozi. Může se stát, že v určitém prostředí a za jistých předpokladů dojde k lokální formě koroze. Rozlišuje se několik druhů koroze: důlková koroze (pitting), štěrbinová koroze, koroze při mechanickém napětí a mezikrystalová koroze. Přitom nejvíce nebezpečná koroze se jeví štěrbinová a důlková koroze. [14]

1.1.2 Rozdělení podle struktury

Rozdělení korozivzdorných ocelí se nejčastěji určuje podle struktury a to na martenzitické, feritické, austenitické, duplexní a precipitačně vytvrzené. Na obrázku 1.1 lze vidět rozsah v procentech.



Obr. 1.1 – Určení materiálové skupiny [4]

1.1.3 Martenzitické oceli

Jak bylo popsáno výše, jedná se o korozi-vzdorné oceli s nejvyšším obsahem C do 1,5 % a Cr do 18 %. Martenzitické struktury se dosáhne až po zakalení. Po kalení je vzniklá struktura křehká, proto se doporučuje popouštět mezi teplotami 650 – 750 °C. Nejvyšších korozi-vzdorných vlastností se získá na kvalitně vyleštěném povrchu. Martenzitické oceli se vedle chromu legují také wolframem, molybdenem a vanadem, tím se zvyšuje odolnost proti pittingu. Kalitelné korozi-vzdorné oceli jsou feromagnetické. Velmi pomalým ochlazováním z austenitizační teploty se vzniká martenzitu potlačí a vzniklá struktura je feritická s vyloučenými karbidy chromu. Feritickou strukturu lze získat i delším ohřevem na teplotu těsně pod Ac1. Takhle se martenzitické korozi-vzdorné oceli vyžívají na tvrdost vhodnou pro obrábění. Martenzitické oceli se dají rozdělit na oceli obsahující nikl a naopak na oceli bez niklu a speciální skupinu tvoří supermartenzitické oceli. Na obr. 1.2 je vyobrazena obvyklá mikrostruktura martenzitické oceli. [5]



Obr. 1.2 - Mikrostruktura martenzitické korozi-vzdorné oceli [8]

Chromové martenzitické oceli s obsahem Ni

Obsahují zhruba 17 % Cr, 2% Ni a 0,2 % C. Tento typ ocelí má vyšší pevnost, zlepšené plastické vlastnosti a podmíněnou svařitelnost, to u druhého typu ocelí bez obsahu Ni neplatí. Uplatnění těchto ocelí je tam, kde dochází ke styku s vodou, párou a hlavně se slanou mořskou vodou. Proto jsou hojně využívány pro lopatky parních turbín nebo lodních šroubů. Dobrou schopnost proti korozi, ale vykazují i v oxidujících anorganických kyselinách. [14]

Chromové martenzitické oceli bez obsahu Ni

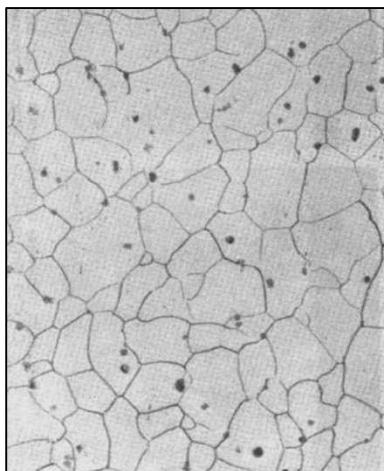
Obsahují 0,15 – 0,45 % C a 13 % Cr. Typy s obsahem C přibližně do 0,25 % slouží jako konstrukční ocel. Oceli s obsahem uhlíku 0,3 – 0,4 % mají vyšší otěruvzdornost a používají se například na chirurgické nástroje. Oceli můžeme zvýšit obsah chromu na 15 % a uhlíku na 0,5 – 0,6 % a dolegováním Mo, W, a V tím dosáhneme ještě větší otěruvzdornosti a tvrdosti. Použití je na výrobu nožů v potravinářském průmyslu a v chirurgii. Dalším zvýšením Cr na 17 % a C na 1 % se dosáhne lepší korozní odolnosti. Velká nevýhoda u toho typu ocelí je že s obsahem C nad 0,2 % ztrácí schopnost svařitelnosti. [14]

Chromové supermartenzitické oceli

Obsahují především nízký obsah C pod 0,015 %, dále potom 11 – 13 % Cr, 5,5 – 6,5 % Ni, 2 – 2,25 % Mo a malý obsah síry. Struktura je tvořena nízkouhlíkovým jemnozrnným martenzitem bez feritu delta. Konfigurace těchto prvků zaručuje dostatečnou korozní odolnost, houževnatost, vysokou pevnost a navíc jsou dobře svařitelné. Tento typ ocelí se používá při těžbě a transportu plynů vysoké agresivity. [14]

1.1.4 Feritické oceli

Hlavním legujícím prvkem je chrom. Chrom není vázán na uhlík ve formě karbidu a tím určuje korozní odolnost. Feritické korozivzdorné oceli obsahují maximálně 0,08 % C a 13 – 30 % Cr. Za běžných teplot má strukturu α – ferit. Feritické korozivzdorné oceli se vyznačují nepřítomností přeměny ferit-austenit při ohřevu, to znamená, že při ochlazování nevzniká martenzit, proto se nedají kalit. Dále jsou magnetické, na rozdíl od ocelí austenitických. Nevýhodou těchto ocelí je křehnutí za vysokých teplot (nad 900 °C) to významně ovlivňuje mechanické vlastnosti, pevnost se pohybuje kolem 150 HB. Větší obsah síry zaručuje relativně dobrou obrobitelnost. [8]



Obr. 1.3 - Mikrostruktura feritické korozivzdorné oceli [8]

Feritické oceli 13 % Cr

Jsou legovány 11,5 – 13,5 % Cr a 0,08 % C. Tyto oceli vynikají dobrou korozní odolností ve vodě, páře, atmosféře a v slabých organických kyselinách. Rozhodně se nedoporučují pro mořskou vodu, průmyslovou vodu a silně znečištěné průmyslové atmosféry. Využití v chemickém a potravinářském průmyslu. Svařitelnost je podmíněná.[14]

Feritické oceli 17 % Cr

Jsou legovány 16 – 18 % Cr, 0,08 % C a menším množstvím Mo a stabilizovány Ti. Jsou vhodné pro říční a mořské prostředí, odolávají i kyselině dusičné a roztokům soli. Odolávají bodové korozi a koroznímu praskání. Stabilizace titanem zlepšuje odolnost proti mezikrystalové korozi. Uplatnění je v potravinářském průmyslu pro zpracování piva, mléka apod. [14]

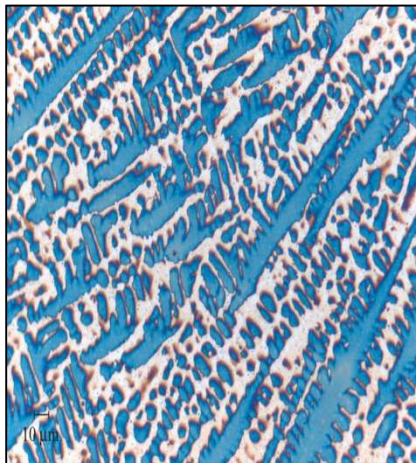
Superferitické oceli

Obsahují jen základní legující prvek 18 – 29 % Cr. Mají tedy čistě feritickou strukturu. Součet obsahu intersticiálních prvků (C + N) je mezi 0,015 – 0,025 %. Opět může být ocel stabilizována a to buď Ti nebo Nb. Tento druh ocelí má dobrou svařitelnost, tvařitelnost, tažnost a vrubovou houževnatost. Velká výhoda je ve

zlepšené odolnosti proti mezikrystalové korozi, dále má vysokou odolnost proti koroznímu praskání a bodové korozi. Použití u výměňkových trubek. [14]

1.1.5 Austenitické oceli

Struktura těchto ocelí se pohybuje v γ - austenit. Struktura austenitu vznikne při dostatečném obsahu prvků Ni, Mn, N. Dají se velmi dobře svařovat a tvářet a to i při nízkých teplotách. Je to nejrozšířenější skupina korozivzdorných ocelí. Běžné chemické složení je 18 % Cr, 8 % Ni a méně jak 0,1 % C. Pro docílení požadované korozní odolnosti a mechanických vlastností, se přisazují další legující prvky. Jestliže má být austenitická struktura zachována musí být působení austenitotvorných a feritotvorných prvků vyvážené. Austenitické korozivzdorné oceli nepodléhají fázovým přeměnám a jsou nemagnetické. Pokud je požadováno zvyšování pevnosti, musí se legovat například N, nebo tvářením za studena (tažením, pěchováním). Pokud se tyto oceli pomalu ochladí, dojde v oblasti kritických teplot (600 – 800 °C) k vyloučení karbidů po hranicích zrn a to způsobí mezikrystalovou korozi. Tomu se dá vyhnout změnou chemického složení. Austenitických korozivzdorných ocelí existuje mnoho druhů a modifikací. [8]

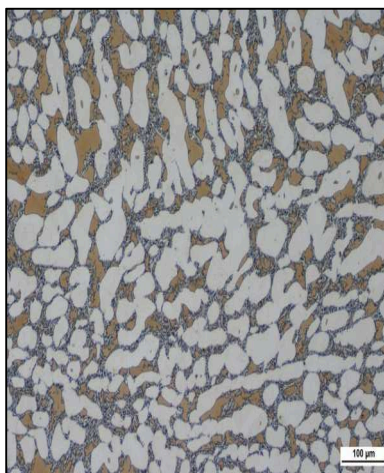


Obr. 1.4 - Mikrostruktura austenitické korozivzdorné oceli [8]

1.1.6 Duplexní oceli

Tento druh ocelí je už dlouho znám, ale teprve nedávno se začal prakticky využívat. Duplexní neboli dvoufázové, viz obr. 1.5, oceli kombinují vlastnosti feritické ušlechtilé oceli a austenitické oceli. Tím je zaručena mechanická pevnost, stálost,

odolnost vůči korozi a obrobitelnost. Fáze, které převládají u duplexních ocelí, jsou ferit a austenit. Důležitý je poměr mezi těmito fázemi. Obsah chromu je 18 – 25 %, nikl 3 – 6 % a malé množství molybdenu. Molybden zaručuje odolnost proti vůči korozi. V nových slitinách se může objevit i dusík. První typy duplexních ocelí byly citlivé s ohledem na vznik teplých trhlin, které vznikaly karbidem chromu na rozhraních ploch austenitu a feritu. To se dá vyřešit snížením obsahu uhlíku nebo přidáním titanu, který váže uhlík na karbid titanu. [7]



Obr. 1.5 - Mikrostruktura duplexní korozivzdorné oceli [9]

1.1.7 Precipitačně vytvrditelné oceli

Oceli, které jsou precipitačně vytvrzeny a žíhány rozpouštěním, mají zlepšené vlastnosti. Hlavní vlastnosti jsou mechanická pevnost při vyšší teplotě a odolnost vůči korozi. Mohou se obrábět v měkkém stavu, což je výhoda. Ocel se vytvrzuje popouštěním za nízkých teplot, aby nedošlo k oxidaci na povrchu. Technologie výroby je rozpouštěcí žíhání při teplotách 926 – 1066 °C ve vakuu nebo v inertní atmosféře, které musí být zakončeno rychlým ochlazením plynem nebo ochlazením do oleje. Precipitační vytvrzování se provádí při teplotách 482 – 621 °C ve vakuu nebo na vzduchu po dobu 1 – 4 hodin, záleží na specifikaci a materiálu. [5, 6]



Obr. 1.6 – Mikrostruktura precipitačně vytvrzené oceli [10]

1.2 Slitiny niklu

Nikl má kubicky plošně centrovanou mřížku a bílou barvu. Je bez alotropické přeměny až po teplotu tavení 1453 °C. Nikl je velice drahý kov a objevuje se v zemské kůře, také se velmi hojně vyskytuje v meteoritech. Velká naleziště jsou v Kanadě a Rusku. Mechanické vlastnosti niklu závisejí na čistotě a tepelném zpracování. Hmotnost niklu se uvádí 8900 kg/m³. Nikl dokáže dobře odolávat korozi v různých prostředích. Čistý nikl je tvárný a dobře svařitelný. Mez kluzu je 150 Mpa, pevnost v tahu 400 – 450 Mpa, tažnost 30 – 40 % a tvrdost 80 HB. Do teploty 400 °C jsou mechanické vlastnosti neměnné, až při vyšších teplotách rychle klesá R_m . Nikl je deficitní kov (nedostatkový). Zhruba 15 % výroby niklu se používá na součástky v extrémních korozních podmínkách. Dále se používá v potravinářském a chemickém průmyslu. Přibližně 60 % se spotřebuje jako přísada do legovaných ocelí a zbytek do niklových slitin.

Slitiny niklu jsou tvrdší, pevnější a houževnatější než většina slitin a ocelí. Bohužel jejich cena je poměrně vysoká, jsou dražší než korozivzdorné oceli, ale jsou levnější než slitiny titanu. Z hlediska ekonomiky jsou výhodné, protože jejich cena je kompenzována vysokými mechanickými vlastnostmi, hlavně při vysokých teplotách, a chemickými vlastnostmi, které jsou lepší než v čistém niklu. Konstrukční slitiny se rozdělují do tří skupin. [11,13]

1.2.1 Slitiny niklu pro běžné podmínky

Slitiny niklu pro běžné pracovní podmínky se využívají v zemích, kde není deficitní. Tyhle slitiny se můžou vyskytovat jako nevytvrditelné a musejí se zpevnit tvářením za studena. Do této skupiny můžeme zařadit slitiny s přísadou Mn, Si a Mo. Pokud potřebujeme zvýšenou odolnost při vysokých teplotách nebo v oxidačním prostředí volíme slitiny Ni-Mn (2 – 5 % Mn). Slitiny Ni-Si mají obsah křemíku 9 % a další přísady Cu, Fe, Cr, Co a Mn. Stejně jako slitiny Ni-Mo mají vysokou odolnost v kyselém prostředí. Slitiny, které jsou vytvrditelné, se zpevňují precipitačním vytvrzováním. Jedná se o slitiny Ni-Be (2 % Be) a slitiny Ni-Al (4,5 % Al). Tyto slitiny po precipitačním vytvrzení při 590 °C dosahují pevnosti 1350 – 1800 Mpa.

Nejrozšířenější slitiny z téhle skupiny jsou Ni-Cu a známe je pod obchodním názvem monely. Začali se vyrábět v Kanadě přímo z rud obsahujících oba prvky v poměru 2:1. Dnešní monely obsahují 29 až 32 % Cu a mohou obsahovat i prvky Si, Mn, Al, Fe. Jednoduché slitiny se zpevňují tvářením za studena a po rozpouštěcím žíhání (780 – 800 °C) a umělém stárnutí (520 – 540 °C) se dosahuje širokého spektra mechanických vlastností, pevnost od 500 do 1400 Mpa. Použití Monel se uplatní při výrobě ventilů, čerpadel, tepelných výměníků a pro námořní nástroje. [13]

1.2.2 Slitiny niklu korozi vzdorné

Tyto slitiny jsou navrhnuté pro nejtěžší korozní podmínky. Materiály jsou to, ale velmi drahé a náročné na suroviny. Naproti tomu, že mají vysokou pevnost, tak mají omezenou schopnost deformace za studena. Vyrábějí se v různých zemích, pod různými variacemi názvů podle původních výrobců (Haynes Co. a International Nickel Co.) Pro redukční prostředí byly vyvinuty slitiny Ni-Mo. Vycházely ze slitiny NiMo20Fe20 označené jako Hastelloy A, z téhle slitiny vznikl upgrade slitiny snížením Fe pod 10 % a zvýšením obsahu Mo na 30 % pod názvem Hastelloy B. Tahle slitina je určená například pro nádrže na moření. Pro bezpečnou pasivační schopnost se přidává přísada Cr. Tím vzniká slitina NiMo18Cr16, označována jako Hastelloy C, má nižší korozní odolnost v kyselině chlorovodíkové, ale je univerzálnější pro použití v redukčním a oxidačním prostředí. Ani jedna tato slitina ovšem nedokáže odolat kyselině sírové. Pro to byla vyrobena slitina Hastelloy D NiSi10Cu4, její korozní

odolnost je založena na ochranném působení sulfátového filmu na povrchu slitiny. Slitiny Inconel jsou antikorozi slitiny Ni-Cr (min. 72 % Ni, 15 % Cr, 8 % Fe) a uplatnění mají hlavně u součástí namáhaných za tepla. [13]

1.2.3 Slitiny niklu žáruvzdorné a žárupevné

Jsou to vysokopevné slitiny používané tam, kde už žárupevné oceli nestačí. Primárně jsou tedy určeny pro teploty nad 750 °C. Výroba těchto slitin byla značně ovlivněna vývojem spalovacích turbín, protože u turbín byla potřeba pracovat s vysokými vstupními teplotami. Ve Velké Británii proto zvolili slitiny niklu a v USA slitiny kobaltu. Britské slitiny jsou označovány Nimonic. Pro nejvyšší tepelnopevnostní podmínky se používají konstrukční materiály komplexně legované vytvrditelné slitiny niklu, které jsou pro svoje vlastnosti označovány jako superslitiny. Hlavní přísady v superslitinách jsou čtyři. Chrom, který se rozpouští v matici, vyrábí komplexní karbidy a ty mají zásadní vliv na zvýšení žáruvzdornosti. Kobalt, který se rozpouští substitučně v niklu a jeho základní význam je zvýšení žárupevnosti. Hliník a titan, kteří vytvářejí s niklem intermetalické precipitáty Ni_3 a tím umožňují vytvrditelnost. A molybden, wolfram substitučně zpevňují matici a tvoří karbidy, které také zvyšují žárupevnost.

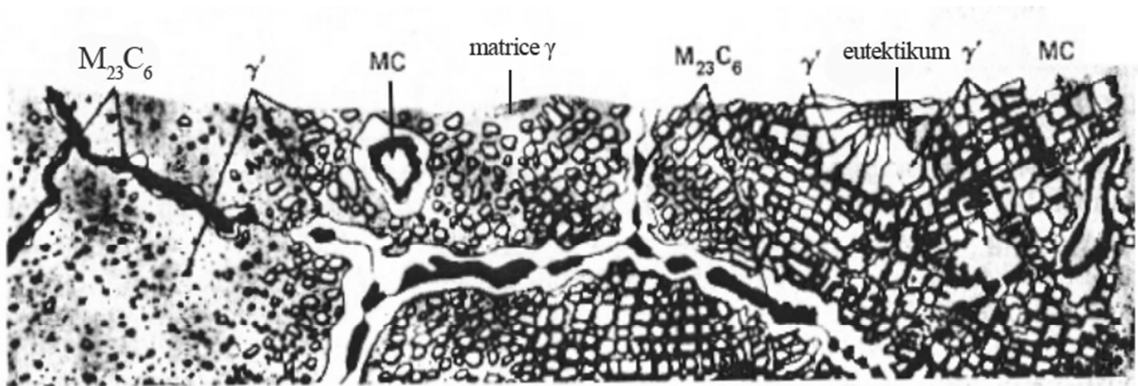
Britská slitina Nimonic 80 (20 % Cr, 2 % Co, 2,2 % Ti, 1,1 % Al, 5 % Fe) je určena pro teploty kolem 750 °C a má pevnost v tahu při 20 °C 800 až 1100 Mpa, při 700 °C potom 740 Mpa. Slitina Nimonic 100 je vhodná pro teploty 900 °C a výš. Mezi nejlepší slitiny se pak řadí Nimonic 118 nebo Udimet 700. Česká slitina AKN 21 odpovídá zhruba slitině Nimonic 80 v Rusku je tahle slitina vedena pod názvem EI 437. [13]

1.2.4 Mikrostruktura niklových slitin

Mikrostruktura niklových superslitin je tvořena γ maticí, γ matrice je tuhý roztok Ni, Co, Cr a dalších prvků. V superslitinách působí jako koherentní překážka pro pohyb dislokací fáze γ' - Ni_3 (Al, Ti), která umožňuje precipitační zpevnění. S touto fází jsou někdy i spojeny částice γ'' - Ni_3Nb . Dále se vylučují primární karbidy, sekundární karbidy nebo boridy a karbonitridy. [16,17]

V průběhu vývoje superslitin se zvyšoval objemový podíl precipitátů γ' , v současnosti dosahuje množství této fáze až 80% u moderních superslitin, které díky tomuto obsahu ukazují zajímavou vlastnost, která je charakteristická pro čistou intermetalickou fázi γ' (Ni_3Al), a to pozitivní závislost meze kluzu a teploty. Pro to abychom získali, co nejlepší vlastnosti materiálu musíme eliminovat fáze, které jsou nežádoucí. Pokud se tyto nežádoucí fáze vyskytují ve větším množství, mohou způsobit zkřehnutí materiálu. [16, 17]

Vysokoteplotních vlastností se mimo jiné dosáhlo zvyšováním velikosti částic γ' do té doby než se zastavila na hodnotě okolo 1 μm . Dále se postupně měnil tvar částic na kubické. Na Obr. 7 je zobrazeno schéma vývoje mikrostruktur v závislosti na obsahu Cr (od kulovitých po kubické γ' fáze). V obrázku lze najít žádoucí fáze (matrice γ , fáze γ' , karbidy MC, M_{23}C_6) i nežádoucí fáze (eutektikum). [17]



Obr. 1.7 – Schéma vývoje mikrostruktur niklových superslitin [16]

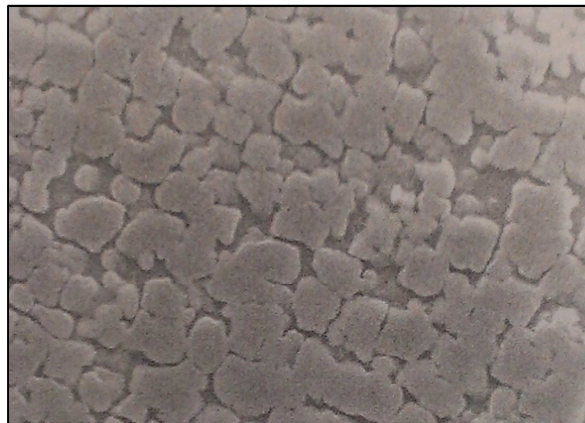
1.2.5 Fáze γ

Je základní strukturní složkou superslitin. Má kubickou plošně středěnou mřížku (FCC), γ je substituční roztok Ni a dalších legujících prvků (Co, Fe, Cr, Mo). Legující prvky se volí podle strukturní stability za vysokých teplot. Na zpevnění matrice se podílí fáze γ' , karbidy a u některých slitin i boridy a podobné. [17]

1.2.6 Fáze γ'

Tato fáze je často popisována jako intermetalická sloučenina $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$, má kubicky plošně středěnou mřížku typu L1_2 . Velká podobnost mřížky s mřížkou tuhého roztoku γ vede k dlouhotrvajícímu koherentnímu vytvrzení. Tato fáze zaručuje mimořádné vlastnosti superslitin niklu za vysokých teplot. Vznik fáze je způsoben ochlazováním neuspořádaného tuhého roztoku γ . S klesající teplotou vstupují atomy do mřížky a tím se mění roztok na uspořádaný. [13]

Morfologie γ' fáze je dána jejím chemickým složením a teplem zpracováním. Výsledné vlastnosti slitiny pak přímo závisí na morfologii, objemovém podílu a stabilitě za vysokých teplot fáze γ' . Úplně první generace měly precipitáty s globulární (kulovitou) morfologií a objemovým podílem 20%. Dnešní generace má kvádrový tvar, který je mnohem výhodnější a objemový podíl kolem 80 %. Objemové zvyšování se realizuje zvyšováním obsahu Al a Ti, tím roste i pevnost. [17]



Obr. 1.8 - γ' fáze vyloučená v základní matici [13]

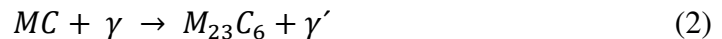
1.2.7 Fáze γ''

Vzorec této fáze je Ni_3Nb a má tetragonálně prostorově centrovanou mřížku (BCT). Fáze je metastabilní a precipituje jako koherentní disková částice. Například ve slitinách typu Inconel 718 je to základní zpevňující fáze. [17]

1.2.8 Karbidy

Karbidy se v niklových slitinách liší a dělí na základní tři skupiny. Jsou to MC, $M_{23}C_6$ a M_6C . Karbid MC se vylučuje v takzvaných blocích, viz obr. 1.7, anebo ve tvarech připomínající čínské písmo. Tento karbid se objevuje uvnitř zrna. Karbid $M_{23}C_6$ se vyskytuje a vylučuje po hranicích zrn. Základním prvkem je Cr ten může nahrazovat W, Mo, Fe, Ni, Co. Karbid M_6C se objevuje ve slitinách s vysokým obsahem Mo a W. Je to komplexní karbid stejně jako $M_{23}C_6$. Atomy Mo a W se můžou z části nahradit atomy Fe nebo Cr, Co, Ni. [13]

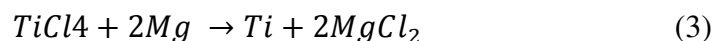
Karbid MC a $M_{23}C_6$ z velké části pomáhá při reakcích za vysokých teplot tvořit nové objemy fáze γ a to podle vzorce:



Tyto karbidické reakce narušují rovnováhu mezi fázemi γ a γ' . Předpokládá se, že částice MC se nacházejí uvnitř zrna, naproti tomu $M_{23}C_6$ na hranicích zrn v řetízkovém uspořádání. Blokovaná neboli nesouvislá struktura těchto karbidů se považuje za důležitou pro houževnatost slitiny. Řetízkovité vyloučené karbidy na hranicích zrn mimořádně zvyšují odolnost proti creepu. [13]

1.3 Slitiny titanu

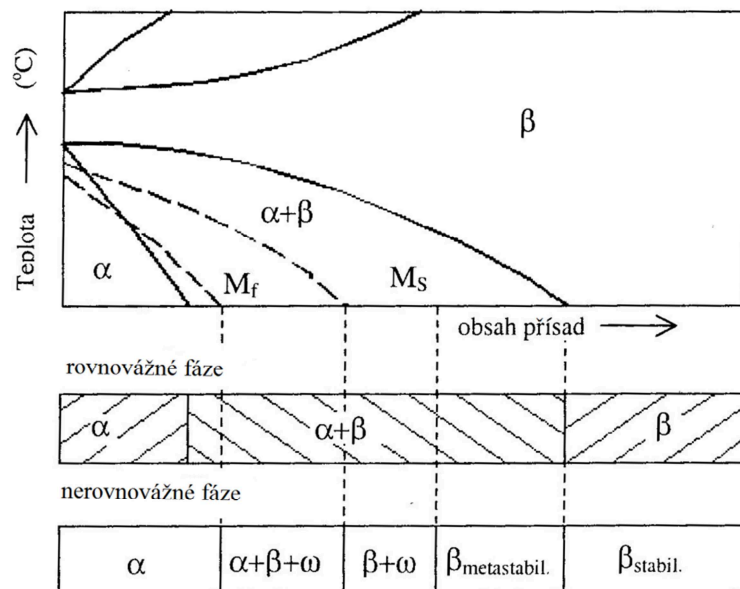
Titan je velmi tvrdý a lehký kov ocelového vzhledu, který je dobře odolný vůči korozi. Není vzácným prvkem, ale nevyskytuje se v čisté formě a následná úprava prodražuje výsledný materiál. Běžné hutní metody, které se používají k výrobě jiných kovů, nejsou efektivní při výrobě titanu. Vyrábí se tedy redukcí par chloridu titaničitého hořčíkem v inertní argonové atmosféře.



Titan je alotropní neboli polymorfní kov, to znamená, že se může vyskytovat v několika krystalických strukturách. Při nižších teplotách vytváří titan hexagonální mřížku, α - titan. Při vyšších teplotách kolem 882,5 °C dochází k překrystalizaci na kubickou prostorově centrovanou mřížku, β - titan. Čistý titan má hustotu pouze 4500 kg·m⁻³, tudíž ho lze řadit mezi lehké kovy. Titan vytváří pasivační povrch o velmi

dobrých korozních vlastností, dokonce lepších než u korozivzdorných ocelí. Proto se používá v průmyslových ovzduších a mořské vodě. Největší využití, ale najdeme v leteckém průmyslu, díky lehkosti titanu umožňuje letadlům snížit váhu až o 20 %. Označování titanových slitin se určuje podle země, ze které pochází. Celosvětově se však používá označení, ze kterého vyplývá obsah nejdůležitějších prvků, například TiA16V4. Toto označení zavedla organizace pro mezinárodní standardizaci ASTM (American Society for Testing and Materials), rozdělila ho do tříd 1 – 38. Ve třídě 1 – 4 se nachází technicky čistý kov titanu, určen podle procenta čistoty, která se určuje podle meze kluzu. Podle chemického složení může být struktura titanových slitin buď homogenní s fází α , nebo homogenní s fází β a nebo heterogenní $\alpha + \beta$.

Na obr. 1.9 je uvedený rovnovážný diagram titanových slitin s přísadou rozšiřující oblast β . V průběhu pomalého ochlazování vznikají v závislosti na chemickém složení rovnovážné fáze struktury α , $\alpha + \beta$ nebo β . Naopak při rychlejším ochlazování dochází k bezdifúzní martenzitické přeměně fáze β na přesycený tuhý roztok α , který se označuje fáze α' . [13]



Obr.1.9 – Binární rovnovážný diagram titanu s přísadami rozšiřující oblast β [13]

1.3.1 Slitiny α

Obsahují přísady Al, Zr a Sn. Vyznačují se vysokou houževnatostí, dobrou odolností proti creepu a dobrými slévárenskými a svářečskými vlastnostmi. Zaručená odolnost proti korozi, ale o něco horší, než v čistém titanu. Nevýhodou je náchylnost na vodíkovou křehkost. Větší obsah hliníku způsobí menší plastičnost. Speciální druh slitin jsou takzvané dvoufázové slitiny neboli pseudo α slitiny. Podíl obsahu stabilizátorů fáze β je velmi malý, tím se zachovávají vlastnosti α slitiny a větší plasticita. Svařitelnost je velice dobrá. V tab. 1.1 jsou uvedeny příklady slitin alfa a pseudoalfa. [13]

Tab. 1.1 – Mechanické vlastnosti titanových slitin s fází α

Slitina	R_e (MPa)	R_m (MPa)	A (%)
TiAl8Zr8NbTa	860	930	15
TiAl6Zr4V1	950	980	12
TiAl8Mo1M	930	1010	10
TiAl5Sn2,5	820	860	>12

1.3.2 Slitiny $\alpha + \beta$

Jedná se o dvoufázové slitiny $\alpha + \beta$ obsahující stabilizátory fáze α (hlavně Al) a stabilizátory fáze β (V, Mo, Cr, Fe, Mn). Je to nejstarší a nejrozšířenější slitina titanu. Stabilizátor β určuje mechanické vlastnosti. Mezi všemi titanovými slitinami mají nejlepší obrobitelnost. Podle režimu tepelného zpracování vznikají různé mikrostruktury s rozdílnými mechanickými vlastnostmi. Podle tvaru vyloučené α – fáze se rozdělují do tří skupin: globulární, lamelární a přechodový typ. Stejně jako u niklových slitin je tepelná vodivost o dost nižší než u ocelí. Mechanické vlastnosti a typy slitin fáze $\alpha + \beta$ jsou uvedeny v tab. 1.2 slitina, která je považována za výchozí je TiAl6V4. [13]

Tab. 1.2 – Mechanické vlastnosti titanových slitin s fází $\alpha + \beta$

Slitina	R _e (MPa)	R _m (MPa)	A (%)
TiAl6V4	1030	1180	6 – 16
TiAl5Cr3Fe1	1140	1340	6 – 8
TiAl4Mo4V4	1030	1170	10 – 12
TiAl7Mo4	1210	1310	6

1.3.3 Slitiny β

Kvůli absorpci kyslíku a vodíku, dochází ke snížení houževnatosti a svařování musí probíhat v atmosféře velmi čistého argonu. Z titanových slitin jsou nejvíce vhodné pro tváření. Mají potenciál mít nejvyšší mechanické vlastnosti při nejnižších výrobních nákladech. U slitiny Ti10V2Fe3Al se lehce dosáhne superplasticity, už při teplotě pod 1250 °C. Pro názornost jsou v tab. 1.3 vypsány příklady slitin β . [13]

Tab. 1.3 – Mechanické vlastnosti titanových slitin s fází β

Slitina	R _e (MPa)	R _m (MPa)	A (%)
TiV8Fe5Al1	800 – 1400	900 – 1450	6 – 8
TiV13Cr11Al3	900 – 1700	950 – 1800	4 – 14
TiCr11Mo8Al3		900 – 1500	

2. Obrobitelnost těžkoobrobitelných materiálů

Obrobitelnost je systémová vlastnost, která vyjadřuje efektivnost obrábění při nízkých nákladech a za určitých technologických podmínkách. Zahrnuje také ekonomický vliv. Většinou, když se mluví o obrobitelnosti, jde o vlastnosti materiálu. Faktory na kterých obrobitelnost závisí, by šlo shrnout následovně:

- chemické složení
- fyzikální a mechanické vlastnosti
- metoda obrábění
- mikrostruktura a tepelné zpracování
- řezné podmínky
- prostředí a typ nástroje

Důležitý je stupeň obrobitelnosti, který se vyhodnocuje zkouškami. Stupeň obrobitelnosti materiálu se mění v závislosti na druhu obrábění (soustružení, frézování, broušení). Zkoušky mohou být dlouhodobé nebo krátkodobé. Dlouhodobá zkouška je přesnější a objektivnější. Trvá, ale dlouhý čas a provádí se většinou soustružením. Kritériem obrobitelnosti je řezná rychlost, která je stejná jako dohodnutá doba trvanlivosti. Oproti tomu krátkodobá zkouška trvanlivosti je kratší, ale méně objektivní. Používá se hlavně pro rychlé rozdělení skupiny materiálů dle stupně obrobitelnosti. [1]

Dle Celostátní normy a normativů je všechen konstrukční materiál rozdělen do 9 základních skupin. Každá skupina má jeden etalonový materiál, ze kterého se počítá relativní obrobitelnost ostatních materiálů celé skupiny. V každé skupině se ještě materiály rozdělují podle indexu kinetické obrobitelnosti, který se vypočítá ze vztahu:

$$i_0 = \frac{v_{c15}}{v_{c15et}} \quad (4)$$

Kde v_{c15} je řezná rychlost při trvanlivosti $T = 15$ min pro použitý materiál, a v_{c15et} je řezná rychlost při trvanlivosti pro etalonový materiál. [1]

2.1 Klasifikace řezných materiálů podle ISO 513

Obráběné materiály si výrobci nástrojů rozdělily do šesti skupin se souladem standardu ISO. Každá z těchto skupin má specifické vlastnosti (namáhání břitu, typ zatížení, opotřebení nástroje). Rozdělují se podle barvy a písmena. Obecně platí, že čím nižší číslo, tím se dá obrábět relativně vyšší reznou rychlostí, s vyšší otěruvzdorností nástroje. Obr. 2.1 graficky znázorňuje rozdělení do skupin dle DIN ISO 513. [14]



Obr. 2.1 – Rozdělení materiálů ISO 513 [4]

- **ISO P** - jsou oceli, tedy největší skupina materiálů. Dále se dělí ještě do skupin od nelegovaných až po vysokolegované. Obrobitelnost je dobrá, ale závisí na tvrdosti materiálu, obsahu C, atd.
- **ISO M** – jsou korozivzdorné oceli s minimálně 12% Cr a další legujících prvků. Tato skupina má pár společných vlastností a to, že při obrábění absorbují hodně tepla, opotřebení ve tvaru vrubu a tvoří se nárůstek.
- **ISO K** – jsou litiny, které tvoří malé nasekané třísky. Patří sem jak šedá litina, tak temperovaná a modulární litina. Všechny litiny působí na břit abrazivně.
- **ISO N** – jsou neželezné kovy (hliník, měď, mosaz, atd.) U břitových destiček, které obrábí tuhle skupinu, se předpokládá použití vysokých rezných rychlostí a velkou životnost nástroje.
- **ISO S** – jsou žárovzdorné superslitiny, většinou na bázi niklu, kobaltu a titanu. Tyto materiály zůstávají na břitu a tvoří nárůstek a během obrábění dochází ke zpevňování jejich struktury. Dále vzniká při obrábění velké množství tepla. Jejich vlastnosti jsou podobné jako u skupiny ISO M, ale je obtížnější je obrábět.

- **ISO H** – jsou oceli o tvrdosti 45 – 65 HRC a také tvrzené litiny 400 – 600 HB. Tato tvrdost z nich dělá materiály, které jsou nejvíce náročné na obrábění. Při obrábění vzniká velké množství tepla a na břit působí hodně abrazivně. [14]

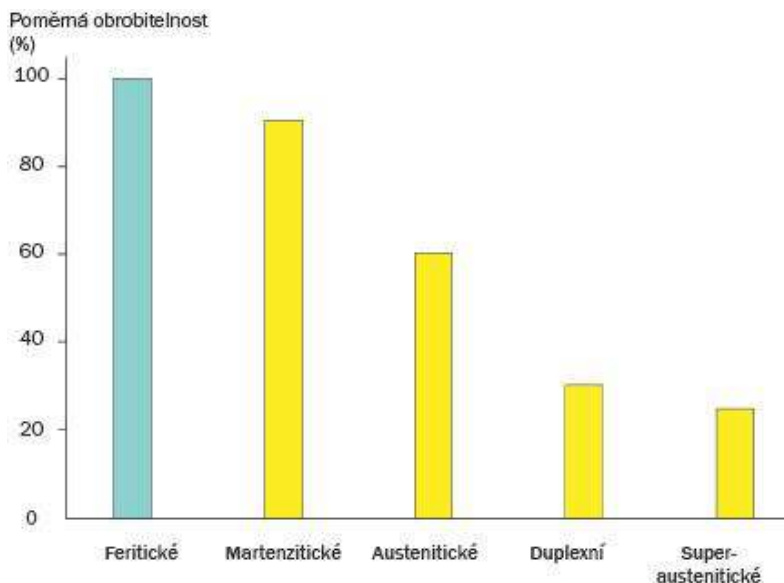
2.2 Obrobitelnost korozivzdorných ocelí

Korozivzdorné oceli mají obvykle vyšší tažnost a přilnavost než běžné oceli. Z toho vyplývá, že řezné materiály musí být houževnatější a povlakovány povlaky s nižším sklonem k adhezi. Řezná rychlost by měla být vyšší, aby nedocházelo ke zmiňované adhezi. Mikrogeometrie řezné hrany musí zvládat vysokou tažnost a dobře tvořit třísku. Z důvodu tvoření nárůstků, je třeba si dát pozor na vrubové opotřebením a odlupování povlaku. Například u vrtáků se jedná o ostřejší geometrii úhlu čela, u fréz potom o pozitivní geometrii břitu a mírnější úhel šroubovice. Při soustružení jde kromě vhodného karbidu i o utvařec třísky, který musí mít širší aplikační pole.

Oceli z nerezů mají nízkou tepelnou vodivost. To znamená, že odváděné teplo přechází do řezné hrany, to vede k vysokým teplotám na řezné hraně. Řezný materiál musí mít vysokou tvrdost za vysokých teplot. Typickým opotřebením nástroje je plastická deformace.

Řezné síly budou podobné jako u obvyklých ocelí, protože mají srovnatelnou tvrdost. Hloubka řezu a posuv zůstane taky stejný. Korozivzdorné oceli jsou, ale více abrazivní. To znamená, že potřebuje kvalitní povlak. Povlak musí být vysoce otěruvzdorný.

Austenické oceli jsou zpravidla velmi obtížné na obrábění a to kvůli obsahu Ni. Feritické oceli neobsahují Ni a proto jsou dobře obrobitelné. U martenzitických ocelí je obrobitelnost celkem solidní, díky vyššímu obsahu C. Pro zlepšení obrobitelnosti se doporučuje přidat síru. Na obr. 2.2 prezentuje firma Sandvik Coromant obrobitelnost jednotlivých ocelí. Obrobitelnost je ovlivněna pěti vlastnostmi materiálu: tepelnou vodivostí, tažností, tendencí k deformačnímu zpevnění, tvrdostí a abrazivností. [11, 12]



Obr. 2.2 – obrobitelnost korozivzdorných ocelí dle Sandvik Coromat [4]

2.3 Obrobitelnost slitin niklu

U slitiny niklu, se po dlouhém zkoumání, dospělo k názoru, že největší opotřebení vzniká na hřbetu vyměnitelné destičky a na čele vzniká opotřebení ve tvaru vrubu. Dále bylo zjištěno, že na opotřebení destičky nemá vliv hloubka řezu, ale řezná rychlost a posuv. Při zvedání řezné rychlosti docházelo k poklesu kvality obráběného povrchu, ale opotřebení špičky nástroje a posuv nemají výrazný vliv na drsnost povrchu. Jelikož je se slitiny niklu řadí mezi těžkoobrobitelné materiály, příčiny proč tomu tak je, jsou shrnuty následovně:

- Udržují vysokou pevnost i při obrábění
- Při obrábění dochází k výraznému zpevnování, což je hlavní faktor, který přispívá k vytváření drážky na řezné hraně v místě, kde končí kontakt nástroje s obrobkem
- Při obrábění ve vysokých teplotách dochází k chemické reakci, což vede k intenzivnímu difuznímu opotřebení
- Dochází k nárůstku na řezné hraně a to vede k vytváření vrubu na čele nástroje
- Dále dochází k vytváření kráteru v místě kontaktu třísky a nástroje, tím že je tříška zpevněná a špatně se formuje
- Špatná tepelná vodivost, generuje vysoké teploty na hrotu nástroje

Doporučené řezné podmínky od firmy Garant jsou uvedeny v tab. 2.1 z tabulky vyplývá, že řezné rychlosti jsou malé a proto je dlouhý čas obrábění. [13]

Tab. 2.1 – Doporučené řezné podmínky pro obrábění niklových slitin dle Garant [15]

Obráběný materiál										
	Monel 400 Monel 401 Monel 404		Hastelloy B Hastelloy X Incoloy 825 Inconel 600		Incoloy 901 Incoloy 903 Inconel 718 Nimonic 80 Waspaloy		Nimonic 90 Nimonic 95 Rene 41 Udimet 500 Astralloy		IN – 100 Inconel 713 C Minor 739	
Stav materiálu										
	žíhaný		žíhaný		žíhaný		žíhaný		tvrzený	
Nástrojový materiál	HSS	SK	HSS	SK	HSS	SK	HSS	SK	HSS	SK
v_c [m.min ⁻¹]	30	105	6-8	30-95	6-8	24-30	3,6-5	21-24	3,5-5	11-18
f [mm]	0,18	0,18	0,13- 0,18	0,13- 0,18	0,13- 0,18	0,13- 0,18	0,13- 0,18	0,13- 0,18	0,13	0,13
a_p [mm]	1	1	0,8- 2,5	0,8- 2,5	0,8- 2,5	0,8- 2,5	0,8- 2,5	0,8- 2,5	0,8- 2,5	0,8-2,5

2.3.1 Vliv řezných podmínek na životnost nástroje

Vzhledem k uvedeným faktorům je jasné, že nemohou být použity stejné řezné podmínky jako při obrábění běžných ocelí. Kritická je především řezná rychlost. Doporučené řezné podmínky uvádí výrobce přímo na krabičce nástroje, nebo v on-line katalozích.

Celkovou životnost nástroje z pohledu řezných podmínek určují tři hlavní parametry. Hloubka řezu, rychlost posuvu a řezná rychlost. Všeobecně platí, že největší vliv na životnost nástroje má řezná rychlost, poté rychlost pracovního posuvu a hloubka řezu ovlivňuje životnost nástroje nejméně. Důležité je, aby řezné podmínky byly ve správném pracovním rozmezí, abychom zajistili, že hlavním typem opotřeбенí bude ořez na hřbetu nebo výmol na čele. [24]

Hloubka řezu a_p

K zajištění správného formování třísek a prodloužení životnosti nástroje musí být hloubka řezu větší než rádius břitové destičky, avšak ne příliš velká (v porovnání s délkou řezné hrany), aby nedocházelo k vylomení břitu. [24]

Problémy, které mohou nastat, pokud je hloubka řezu **příliš malá** [25]:

- Vibrace
- Nekontrolovaná tříska
- Nadměrné teplo
- Nehospodárné

Problémy, které mohou nastat, pokud je hloubka řezu **příliš velká** [25]:

- Vysoká spotřeba energie
- Hrozí rozlomení nástroje
- Potřeba větších řezných sil

Velikost posuvu f

Pro zajištění efektivního řezu musí být posuv dostatečný, neměl by být větší jak polovina rádiusu břitové destičky, jinak hrozí vylomení břitu. Je dokázáno, že 10 % procentní zvýšení posuvu sníží životnost nástroje zhruba o 20 %. U nerezových slitin a superslitin bylo naopak upozorováno, že zvýšení posuvů vede i ke zvýšení životnosti nástroje. Je to způsobeno vlastnostmi těchto materiálů, kdy dochází k deformačnímu zpevnění. [24]

Problémy, které mohou nastat, pokud je rychlost posuvu **příliš nízká** [25]:

- Rapidní opotřebení hřbetu
- Tvoření nárůstku (BUE)
- Nehospodárné

Problémy, které mohou nastat, pokud je rychlost posuvu **příliš vysoká** [25]:

- Nekontrolovaná tříska

- Vysoká drsnost
- Vznik kráteru / plastická deformace
- Vysoká spotřeba energie
- Dochází k pěchování třísky

Řezná rychlost v_c

Řezná rychlost musí být dostatečná, aby se předešlo opotřebení typu nárůstku na hraně, ovšem při příliš vysoké řezné rychlosti může dojít k opotřebení vlivem chemických jevů. Jak bylo zmíněno řezná rychlost je hlavním a rozhodujícím faktorem pro životnost nástroje uvádí se, že zvýšení řezné rychlosti o 10 % má za následek až 50 % zkrácení životnosti nástroje. [24]

Problémy, které mohou nastat, pokud je řezná rychlost **příliš nízká** [25]:

- Tvoření nárůstku (BUE)
- Otupení hrany
- Nehospodárné
- Vysoká drsnost

Problémy, které mohou nastat, pokud je řezná rychlost **příliš vysoká** [25]:

- Rapidní opotřebení hřbetu
- Špatná integrita povrchu
- Plastická deformace

2.4 Geometrie nástroje

Geometrie nástroje zahrnuje jeho tvar a rozměry z hlediska makrogeometrie i mikrogeometrie. U obrábění superslitin je geometrie nástroje rozhodujícím faktorem pro trvanlivost nástroje. Působící řezné síly vytváří na velkou destičku menší zatížení, než stejně velké síly působící na menší břitovou destičku. Optimální geometrie musí splňovat požadavky na klidný průběh řezání bez vibrací, dostatečnou pevnost řezného klínu a co nejdelší trvanlivost při minimálním opotřebení. Jelikož materiály superslitin mají velmi vysokou pevnost, vytvrzují se a špatně vedou teplo. Proto je zvolená

geometrie zásadní. Důležité ale je zohlednit i technologické požadavky na kvalitu obrobeneho povrchu. [33]

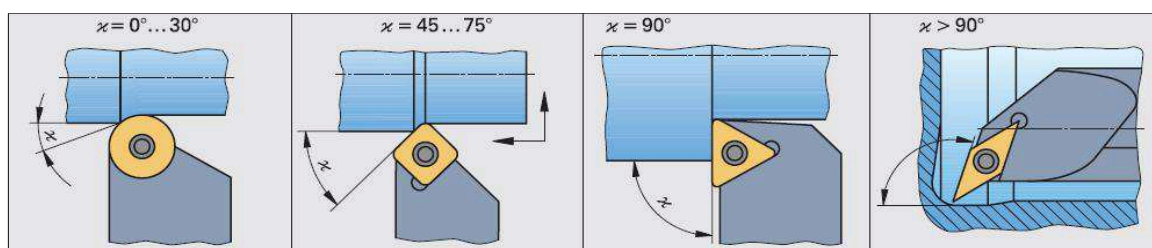
Literatura Sandvik Coromat rozděluje geometrii nástrojů pro soustružení do tří skupin. Optimalizovaných pro dokončování, střední obrábění a hrubování. [25]

Hrubování – PR pro velké hloubky řezu a rychlosti posuvu. Tyto úkony vyžadují maximální bezpečnost řezné hrany.

Střední obrábění – PM znamená střední až lehké hrubování. Mohou být použity různé kombinace hloubky řezu a rychlosti posuvu.

Dokončování – PF jsou operace s malou hloubkou řezu a malými rychlostmi posuvu. Tyto úkony nevyžadují velké řezné síly.

Tvar destičky se musí volit s ohledem na přístupnost danou úhlem nástroje. Při volbě tvaru destičky by se měl volit, co největší úhel špičky nástroje, aby byla zajištěna pevnost a spolehlivost. Nicméně musí být v rovnováze s variacemi řezů, které musí zvládnout. Velký úhel špičky znamená větší pevnost destičky, ale vyžaduje větší výkon stroje a má větší tendence k vibracím. Menší úhel špičky zmenší destičce pevnost a umožní jí menší hloubku záběru, což vede ke zvýšené náchylnosti k účinkům tepla. [25]

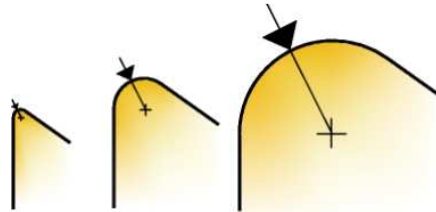


Obr. 2.2 – Tvary destiček [32]

U geometrie břitové destičky se sleduje poloměr špičky destičky r_e , který je spojnicí vedlejšího a hlavního břitu. Poloměr špičky je klíčovým faktorem při soustružnických operacích. Špička nástroje pomáhá odjímat teplo vytvářené řezáním. [25]

Výběr poloměru špičky se řídí dle hloubky řezu a_p a posuvu f . Poloměr špičky poté ovlivňuje povrch obrobene plochy, lámání třísek a velikost řezných sil. Velko-

rádiusové destičky se hodí pro velké posuvy, velké hloubky řezu a pro zvýšené radiální síly. Destičky s menším rádiusem jsou vhodné pro malé řezné hloubky, redukuje vibrace a vnašejí menší řezné síly. [25]



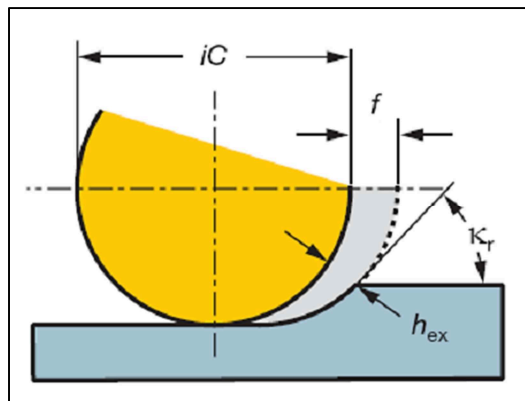
Obr. 2.3 – Variace destiček s různými poloměry [25]

Poloměr špičky ovlivňuje tvorbu třísky. Všeobecně platí, že destičky s menším poloměrem špičky mají lepší tvorbu třísky. Pravidlo pro určení rádiusu je, že hloubka řezu by měla být větší nebo rovna 2/3 poloměru špičky. [25]

Úhel nastavení hlavního břitu κ_r určuje polohu ostří vzhledem k obrobku nebo k obrobené ploše. Je definován jako úhel, který svírá rovina řezu se směrem posuvu. Úhel κ_r udává tvar průřezu třísky, protože vztah mezi tloušťkou a šířkou ubírané vrstvy se mění se změnou úhlu nastavení hlavního břitu. Pokud se bude úhel zmenšovat, tak se tloušťka ubírané vrstvy také zmenší. Přitom se plocha průřezu třísky nemění. [34]

Změna tvaru průřezu třísky při měnící se hodnotě úhlu κ_r určuje jeho působení na trvanlivost břitu, velikost řezného odporu a teplotu řezání. S malým úhlem κ_r se zvětší plocha styku ostří s obráběným materiálem, tím se zlepšuje odvádění tepla od ostří nástroje a trvanlivost se zvětší. Zmenšování úhlu κ_r má negativní vliv na velikost řezného odporu. Zmenší-li se úhel κ_r , zvětší se radiální složka řezné síly, zhoršuje se také jakost obráběného povrchu. [34]

Při zvětšování úhlu čela se zmenšují všechny síly působící na nástroj. Největší vliv je na radiální složku řezné síly, ta se zmenší nejrychleji. Čím větší je tedy úhel čela, tím menší může být úhel κ_r . [34]

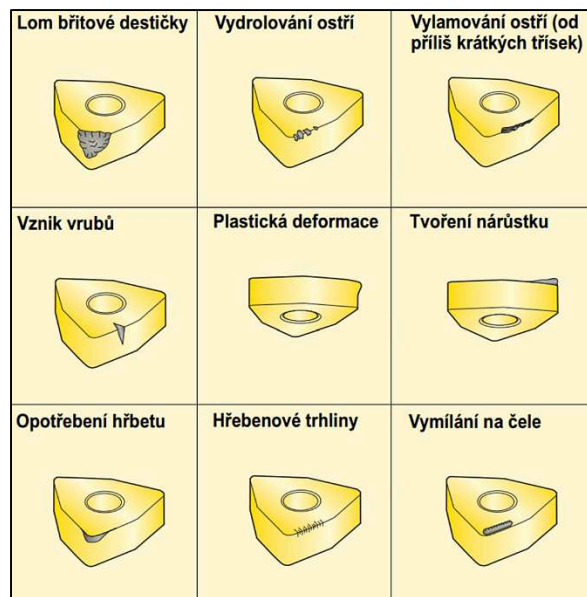


Obr. 2.4 – Vliv úhlu κ_r kruhové destičky na proces obrábění [34]

2.5 Opotřebení řezného nástroje při procesu obrábění

Opotřebení nástroje vede k jeho zničení a případnému vyřazení. Opotřebení lze definovat kombinací zatěžujících faktorů působících na břit, nastavenými řeznými podmínkami, materiálem obrobku a řezným prostředím. Při obrábění se vytváří velké množství tepla, které se vyvíjí na ploše hřbetu a čela nástroje. Většina obráběných materiálů obsahuje ve své struktuře tvrdé částice různého druhu. Tyto částice nedosahují tvrdosti materiálu břitu nástroje a dochází, tak k abrazivnímu efektu. Při dalším kontaktu nástroje s obrobkem a třískou je řezný nástroj namáhán na hlavním a vedlejším hřbetu, čele a špičce nástroje. Rozlišujeme základní mechanismy opotřebení: abraze, adheze, difúze, oxidace, plastická deformace a křehký lom. [29]

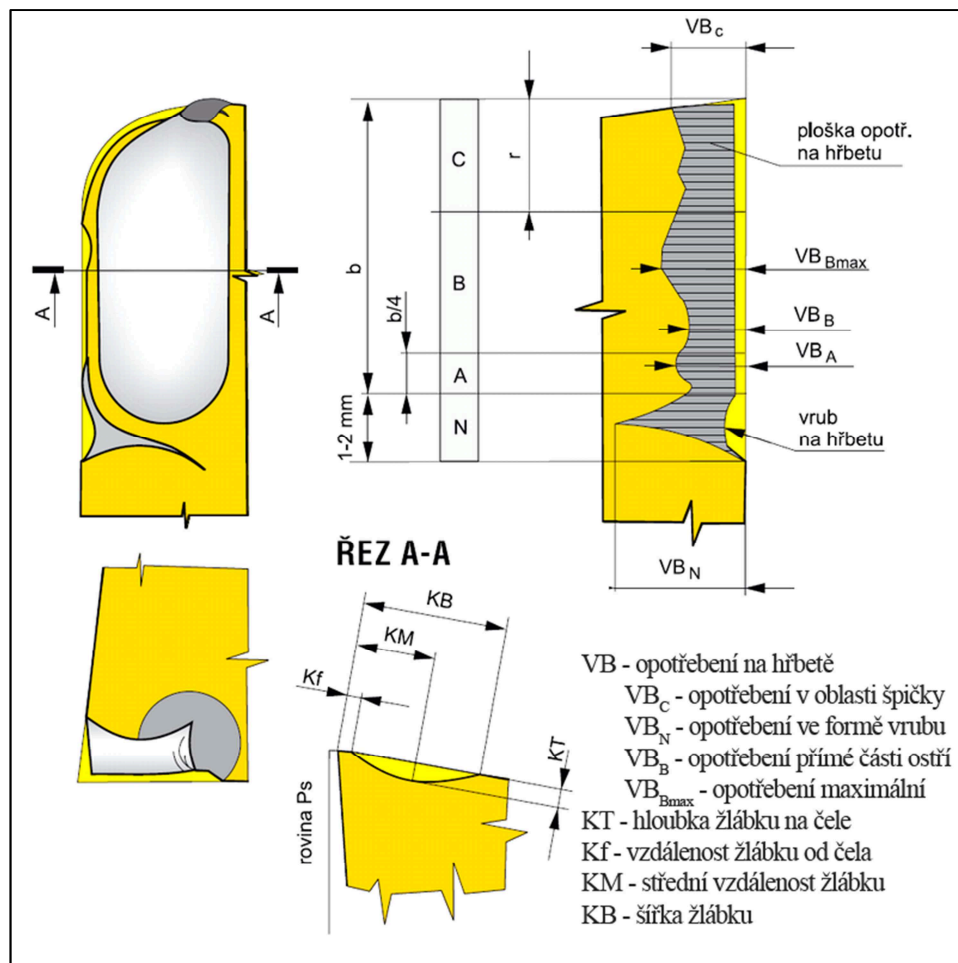
Za účelem posouzení operací obrábění a možností ovlivnění produktivity byl vytvořen souhrn jednotlivých typů opotřebení, tedy klasifikace jednotlivých typů opotřebení. Sledováním břitu vyměnitelné břitové destičky pod mikroskopem lze kontrolovat a posuzovat vhodnost trvanlivosti a její spolehlivost. Na obrázku 2.5 je zobrazena klasifikace typů opotřebení dle literatury Seco Tools s.r.o. [29]



Obr. 2.5 – Klasifikace druhů opotřebení [20]

2.5.1 Měření opotřebení dle ISO 3685

Jak správně určit velikost opotřebení určuje norma ISO 3685. Tato norma obsahuje formy opotřebení s jednotlivými charakteristikami. Měření opotřebení hlavního ostří břitu je rozděleno do 4 základních zón. Zóna C je poloměr ostří břitu, zóna B je zůstávající část mezi A a C zónami. Zóna A je čtvrtina z opotřebené délky řezné hrany. Zóna N je za oblastí vzájemného kontaktu mezi nástrojem a obrobkem přibližně 1 – 2 mm za hlavním ostřím nástroje. Kritéria, která mají největší vliv na obrábění, jsou: opotřebení na hřbetě, hloubka žlábků na čele a radiální opotřebení špičky. Všechny tyto kritéria jsou vyobrazeny na obrázku 13. [30]



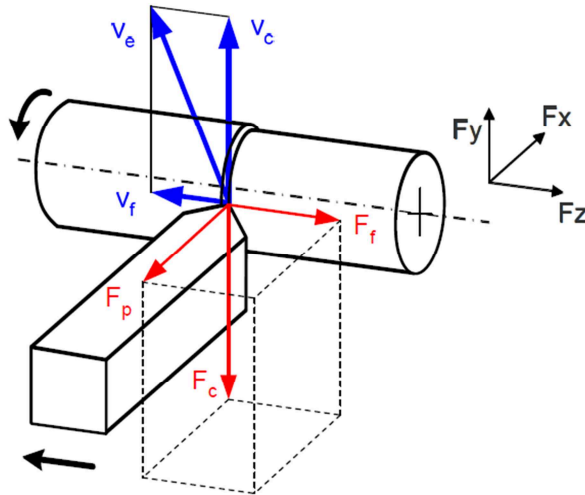
Obr. 2.6 – Formy opotřebení dle ISO 3685 [29]

2.6 Silové poměry při procesu obrábění

Silové poměry se začnou vyvíjet, jakmile vnikne řezný klín do materiálu obrobku, tím vzniká stav napjatosti. Zmapování těchto silových poměrů procesu řezání nám umožňuje zjistit mechanické namáhání celé technologické soustavy obrábění, jak z hlediska tuhosti, tak i pevnosti a dynamické stability procesu. Dále nám tyto poměry pomáhají při určování příkonu obráběcího stroje, spotřeby energie řezného procesu, posuzování tepelných jevů, hodnocení trvanlivosti řezného nástroje, ale také posouzení podmínek přesnosti a to i ekonomické bilance třískového obrábění. [27]

Síla řezání je určena dynamickým průběhem. Při obrábění v závislosti na čase její okamžitá velikost F kolísá v rozmezí 20 %, a to i při konstantních řezných podmínkách. Tohle je zapříčiněno rozptylem mechanických vlastností obráběného materiálu a tvorbou třísky (vychýlení vzniká, když se odlamuje od materiálu). [27]

Vzniknuvší síla F je výslednicí dvou složek. Síly aktivní složky řezání F_1 a složky pasivní F_2 . Aktivní složku F_1 lze rozložit na řeznou složku síly obrábění F_c a složku posuvu F_f . Ze všech složek sil řezání má většinou největší význam řezná (tangenciální složka F_c). Tyto všechny složky jsou důležité pro upřesnění omezujících podmínek při optimalizaci řezných parametrů. Rozklad sil pro operaci soustružení je zobrazen na obrázku 2.7. [27]

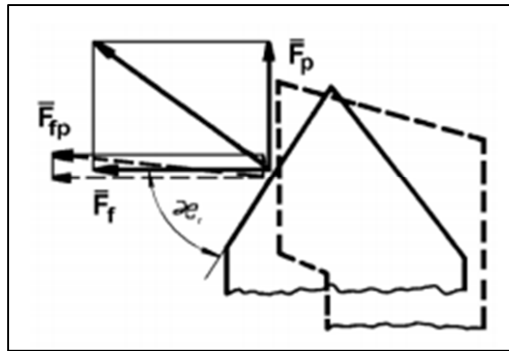


Obr. 2.7 – Řezné síly při procesu soustružení [28]

2.6.1 Vliv geometrie nástroje na řezné síly

Na sílu řezání mají také vliv geometrické parametry. Na jednotlivé síly složky soustružení má největší vliv úhel čela. Jeho vliv na řeznou složku F_c jde ruku v ruce s jeho vlivem na měrný řezný odpor. Není ovšem stejný v celém rozsahu řezných podmínek. Mnohem větší vliv má na složku pasivní F_p a složku posuvovou F_f . To znamená, že se zmenšujícím se úhlem čela se obě složky budou zvětšovat. Další vliv má také úhel nastavení a poloměr zaoblení ostří. [29]

Úhel sklonu ostří λ_s ovlivňuje především směr odcházející třísky. Jelikož úhel nastavení hlavního ostří κ_r ovlivňuje směr vektoru síly soustružení F , má vliv na velikost jednotlivých složek různě velký. Opačný účinek vlivu má oproti κ_r poloměr špičky břitu ϵ_r . Úhel hřbetu ovlivňuje velikost řezné složky. Další faktor ovlivňující zejména složky F_c a F_f má řezné prostředí. [29]



Obr. 2.8 - Vliv úhlu nastavení κ_r na pasivní a posuvovou složku [29]

2.6.2 Přímé měření sil

Přímé měření složek řezných sil a točivých momentů vychází z měření v soustavě stroj – nástroj – obrobek a je realizováno dynamometry. Dynamometr musí zaručit nezávislost měřící veličiny na pracovních vlastnostech přístroje. Další zásadní požadavky na dynamometr jsou: tuhost, citlivost, stálost údajů, reprodukovatelnost údajů, setrvačnost a správná konstrukce, aby se navzájem složky řezných sil neovlivňovaly. [27]

Rozdělení dynamometrů se může rozlišit podle následujících hledisek [27]:

- Podle počtu měřených složek síly řezání (jednosložkové, dvousložkové, třísložkové a pro měření krouticích momentů).
- Podle měřící metody respektive dle způsobu přenosu působení síly (mechanické, hydraulické, pneumatické, optické, elektrické) elektrické dynamometry se ještě dají rozdělit na indukční, odporové, kapacitní a využívající piezoelektrického jevu.
- Podle metody obrábění (soustružení, frézování, vrtání, broušení a univerzální).

K udržení přesnosti měření jednotlivých složek sil řezání je nutné dynamometry cejchovat. Cejchování znamená porovnání údajů dynamometru se skutečnou hodnotou sledované veličiny. Výsledkem cejchování je sestavení cejchovní křivky ta ukazuje závislost mezi složkou síly řezání a odpovídající veličinou. Cejchování se může provádět přímo na obráběcích strojích nebo upravených pracovištích. [27]

2.6.3 Nepřímé měření sil

Nepřímé měření řezných sil vychází zejména z výkonu elektromotoru obráběcího stroje. Nepřímým měřením lze z výkonu hnací jednotky stanovit tangenciální složku síly. K měření výkonu elektromotoru obráběcího stroje se využívá wattmetrů (WATTREG 10), které jsou nám schopny ukázat přímý údaj střídavého proudu. [27]

Při stanovování tangenciální složky síly obrábění se využívá užitečného výkonu elektromotoru, potřebného k obrábění. Jako první se změří výkon nezatíženého obráběcího stroje (výkon chodu na prázdno P_o), dále se změří celkový výkon stroje při obrábění P_c . Pro stanovení užitečného výkonu $P_{už}$ pak platí (5):

$$P_{už} = P_c - P_o \quad (5)$$

kde: $P_{už}$ – užitečný výkon [W]

P_c – celkový výkon obráběcího stroje [W]

P_o – výkon při chodu naprázdno [W]

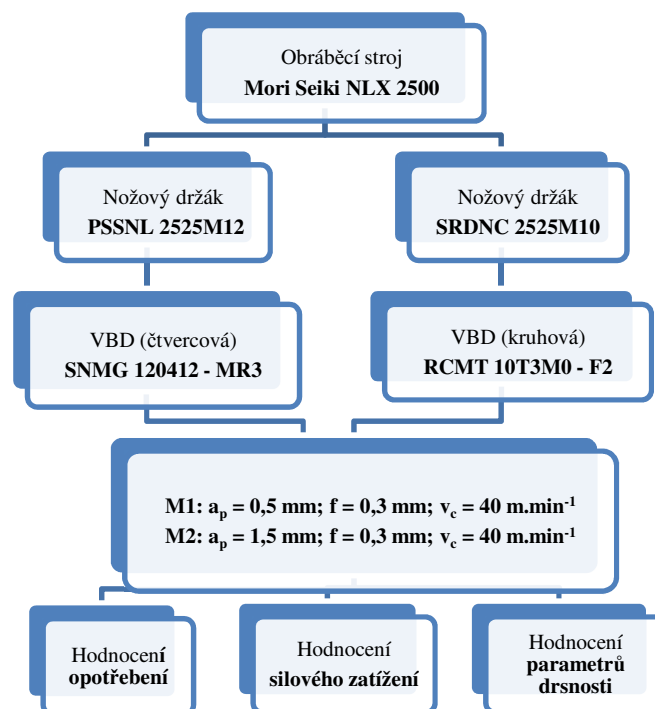
Pro tangenciální složku síly řezání potom platí vztah (6):

$$F_c = \frac{P_{už}}{v_c} \text{ [N]} \quad (6)$$

Výhoda této nepřímé metody spočívá v jednoduchosti a nevyžaduje nákladnou speciální měřicí techniku a její použití je takřka bez limitní. Nevýhodou se jeví omezená přesnost měření způsobená rozdílnou účinností stroje při zatížení a při chodu naprázdno a zanedbání vlivu ostatních složek elektromotoru obráběcího stroje. [27]

3. Návrh experimentální činnosti

Hlavním cílem experimentu bylo porovnat dvě břitové destičky s odlišnou geometrií a zjistit jejich chování pro obráběný materiál Inconel 625. Nebylo žádoucí navrhovat parametry obrábění pro změnu hloubky řezu, nebo rychlost posuvu. Porovnávali se dvě destičky, kruhová a k tomu ekvivalentní, co se týče struktury a chemického složení, čtvercová. Při obrábění slitin na bázi niklu, je častým projevem opotřebení nástroje tvorba vrubu v místě, kde nástroj vychází ze záběru, tedy na hřbetu nástroje. Vrub vzniká vlivem vysoké teploty a mechanického zatížení. Tento vrub se v experimentu snažíme vymežit právě změnou řezné geometrie. Předpokladem je, že úhel nastavení hlavního ostří κ_r by měl být menší nebo rovný 45° . Dispozice velko-
rádiusové kruhové destičky je, že při určité hloubce řezu má jiný úhel nastavení hlavního ostří κ_r , kdežto čtvercová destička má hlavní úhel vždy 45° . Rádus špičky u čtvercové destičky je 1,2 a u kruhové je 5. I tohle by se mělo promítnout do celkového opotřebení a drsnosti povrchu. Samozřejmě výhodou kruhové destičky spočívá v použití větší posuvové rychlosti, aniž by utrpěla drsnost obráběného povrchu. Řezy byly prováděny bez procesní kapaliny. Jako hodnotící kritérium byla zvolena drsnost povrchu, dále se provedlo doplňující měření řezných sil v závislosti na předem navržených řezných podmínkách a měření opotřebení.



Obr. 3.1 – Schéma prováděného experimentu

3.1 Obráběcí stroj

Pro soustružení materiálu Inconel 625, na který se všeobecně doporučuje použít stroj s co největší tuhostí konstrukce, proto byl zvolen horizontální CNC obráběcí stroj Mori Seiki NLX2500, ten zaručuje vysokou míru přesnosti. Obrábění bylo realizováno na akademické půdě Vysoké školy Báňské v Ostravě.

Japonská firma Mori Seiki u generace soustruhů s označením NL (celkem 30 modelů) použila revoluční konstrukční řešení. Přitom umístili vestavný motor poháněných nástrojů přímo do těla nástrojové hlavy. Konstrukce se zjednodušila a došlo k vzestupu možností a schopností poháněných nástrojů. Další výhodou je, že se snížili vibrace a tím pádem i hluk, proto stroj pracuje ve velmi klidném stavu. [19]



Obr. 3.2 – CNC soustružnické centrum Mori Seiki NLX2500 [19]

3.1.1 Technické údaje

posuv osa X	260 mm
posuv osa Z	795 mm
max. průměr soustružení	271 mm
max. otáčky vřetena	4 000 mm ⁻¹
počet poloh (nástrojů)	12
rychloposuv v ose X a Z	30 000 mm·min ⁻¹
Výška stroje	1 900 mm
půdorysná plocha stroje	3 994 x 1 980 mm
hmotnost stroje	5 500 kg

3.2 Obráběný materiál Inconel 625

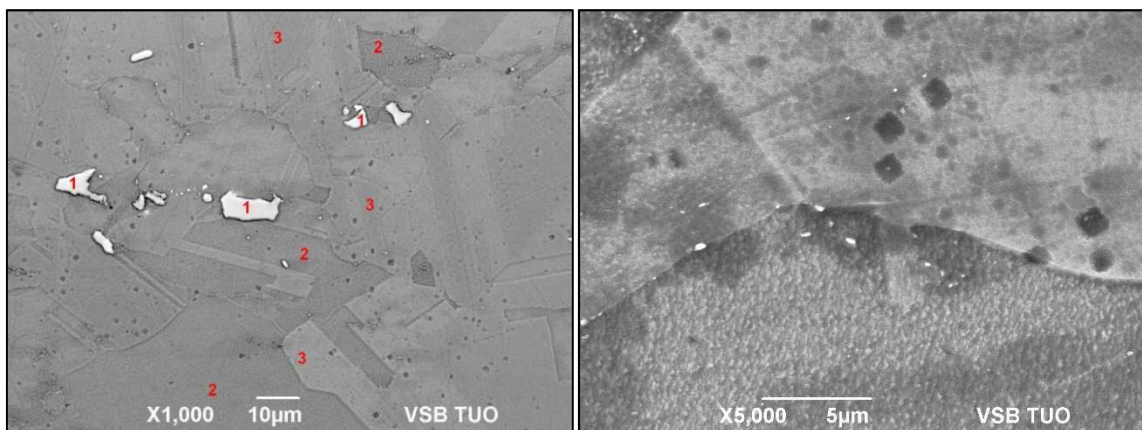
Pro experimentální část byl zvolen materiál Inconel 625 (Ni – 625). Jak už bylo zmíněno, jedná se o korozivzdornou superslitinu na bázi Ni – Cr. Díky niklu a molybdenu je jak za nízkých, tak i za vysokých teplot velmi pevná. Tato slitina se obvykle používá pro součástky dlouhodobě vystaveny nepříznivým vlivům prostředí, kde se žádá chemické, tepelné a mechanické namáhání. Zcela logicky, díky svým vlastnostem (vysoká abrazivost a nízká tepelná vodivost) je obtížné tuhle slitinu obrábět.

Tab. 3.1 – Chemické složení Inconel 625 [18]

[hmotnostní %]						
Ni	Cr	Fe	Mo	Nb	S	Al
58	20-23	max. 5	8-10	3,15-4,15	0,015	max. 0,4
Mn	C	P	Ti	Si	Co	
max.0,5	max. 0,1	max. 0,015	max. 0,4	max. 0,5	max. 1	

Tab. 3.2 – Mechanické a fyzické vlastnosti Inconel 625 [18]

Hustota [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	R_m [Mpa]	R_e [Mpa]	Tažnost [%]	Tvrdoost Brinell
8,44	862	448	50	200



Obr. 3.3 - Matrice slitiny Alloy 625 tvořená austenitickou strukturou - 2 a 3, primární MC karbidy – 1 [35]

3.3 Řezné nástroje a řezné materiály

K provedení experimentu byly zvoleny dvě vyměnitelné řezné destičky s pozitivní geometrií a to z důvodu zamezení vznikání vrubu na hřbetu nástroje. Obě destičky jsou od výrobce Seco Tools s.r.o. Destička kruhová s označením RCMT 10T3M0 – F2 a druhá destička čtvercová s označením SNMG 120412 - MR3. Obě tyto destičky jsou ze stejného řezného materiálu TS2000 a je na nich aplikován stejný povlak. Jsou tedy ekvivalentní. Byl zvolen tento druh povlaku a materiálu, jelikož ho výrobce přímo doporučuje ze svého sortimentu pro obrábění materiálu skupiny ISO S.

3.3.1 Řezný materiál TS2000

TS2000 je nová materiálová třída destiček od Seco Tools s.r.o. vyvinutá speciálně pro obrábění žárupevných slitin niklu a titanu. Díky novému zpracování řezné hrany mají lepší integritu a přilnavost mezi substrátem a povlakem. Tím se zvedla životnost nástroje až dvounásobně. Pro TS2000 byl vyvinut i speciální PVD povlak. Povlak je nanášen v tlustších vrstvách, a proto snižuje riziko vzniku plastické deformace, opotřebení vzniklé výmolem a další opotřebení způsobené precipitáty a jinými sekundárními částicemi. TS2000 je první volba pokud požadujeme vysokou produktivitu pro střední obrábění a finishování skvěle se hodí pro vysokorychlostní obrábění. [21]

Povlak TS2000 má tvrdou jemnozrnnou strukturu určenou pro dokončovací operace u těžkoobrobitelných a titanových slitin. Dobrý výkon podává i při obrábění na čisto u nerezových ocelí. Chemické složení: (Ti, Al) N + TiN. [20]



Obr. 3.4 – Struktura PVD povlaku TS2000 [20]

3.3.2 Nožové držáky

Nožový držák PSSNL 2525M12

Použitý nožový držák pro čtvercovou VBD byl levostranný s použitým systémem upínání typu P. Je to vnější upnutí pomocí upínacího šroubu, který vychyluje páčku s kolíkem, jenž přitahuje destičku do lůžka. Držák byl zakoupen společně s destičkou od firmy Seco Tools s.r.o.

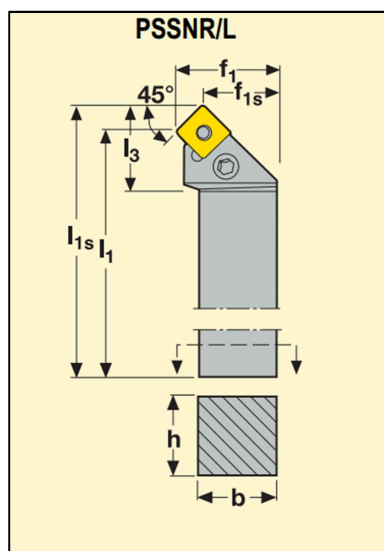


Obr. 3.5 – Držák čtvercové VBD

Tab. 3.3 – Parametry nožového držáku [20]

Označení ISO	Rozměry [mm]							γ_o [°]	λ_s [°]	Hmotnost [kg]
	h	b	l_1	l_{1s}	f_1	f_{1s}	l_3			
PSSNL 2525M12	25	25	150	158,3	32	23,7	28	-8	0	0,7

γ_o° - úhel čela, λ_s° - úhel sklonu ostří



Obr. 3.6 – Geometrie nožového držáku čtvercové VBD (Je zobrazeno pravostranné provedení) [20]

Nožový držák SRDNC 2525M10

Pro kruhovou vyměnitelnou břitovou destičku byl použit držák SRDNC 2525M10, který má neutrální provedení. Systém upínání je vnitřní typu S, kdy destička je v lůžku zajištěna středovým šroubem. Firma Seco tools s.r.o. doporučila ke svým destičkám i tento držák. V tabulce níže jsou uvedeny rozměry držáku.

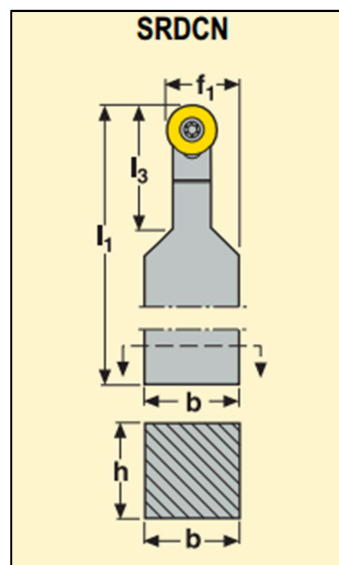


Obr. 3.7 – Držák kruhové VBD

Tab. 3.4 – Parametry nožového držáku [20]

Označení ISO	Rozměry [mm]					γ_0 [°]	λ_s [°]	Hmotnost [kg]
	h	b	l_1	f_1	l_3			
SRDNC 2525M10	25	25	150	17,5	25	0	0	0,6

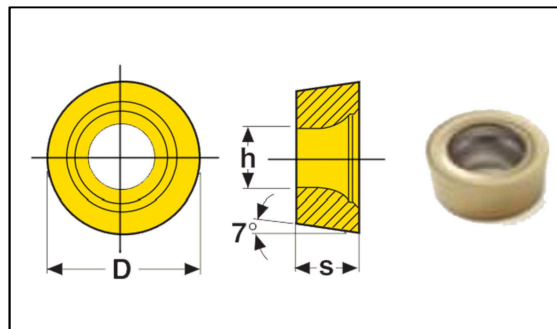
γ_0° - úhel čela, λ_s° - úhel sklonu ostří



Obr. 3.8 – Geometrie nožového držáku kruhové VBD [20]

3.3.3 Kruhává vyměnitelná břitová destička

Byla použita kruhává destička s označením RCMT 10T3M0 – F2 z materiálu TS2000. Její geometrie je znázorněna na obrázku 3.9 s rozměry uvedenými v tabulce 3.5. Výrobce tuto destičku doporučuje pro obrábění skupiny ISO S a to jak pro obrábění střední tak i obrábění na čisto (finishování). Doporučené řezné podmínky od výrobce jsou uvedeny v tabulce 3.6.



Obr. 3.9 – Geometrie kruhávé břitové destičky RCMT 10T3M0 - F2 [20]

Tab. 3.5 – Základní rozměry kruhávé destičky Seco Tools s.r.o. [20]

RCMT 10T3M0 - F2			
D [mm]	s [mm]	h [mm]	hmotnost [g]
10	3,97	4,5	30

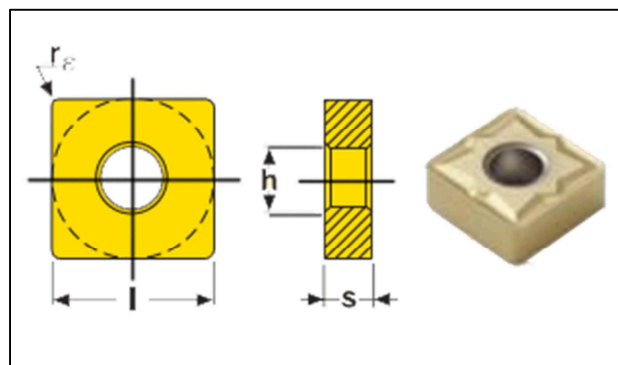
Destička je vybavena utvařečem třísky F2. Geometrie pro utváření třísek se skládá ze tří částí: geometrie řezné hrany, fazetka a drážka utvařeče (pro odvod třísky). Řezná hrana zahájí proces stříhu třísky a drážka pro utváření a odvod třísky určí, jak bude tříska vytvořena. Fazetka řídí přechod mezi těmito fázemi. Všechny části mají vliv na velikost řezné síly. [33]

Tab. 3.6 – Doporučené řezné podmínky od výrobce

a_p [mm]	f [mm]	v_c [m.min ⁻¹]
1,5	0,25	50

3.3.4 Čtvercová vyměnitelná břitová destička

Jako čtvercová destička s pozitivní geometrií byla pro experiment použita vyměnitelná břitová destička s označením SNMG 120412 - MR3 taktéž s povlakem TS2000. Destička je vyobrazena na obrázku 3.10 dále jsou v tabulce uvedeny základní rozměry a doporučené řezné podmínky od Seco Tools. Stejně jako kruhová destička je určena pro obrábění ISO S. Destička má úmyslně stejné chemické složení jako kruhová, aby se eliminovalo co nejvíce proměnných hodnot.



Obr. 3.10 – Geometrie čtvercové břitové destičky SNMG 120412 - MR3 [20]

Tab. 3.7 - Základní rozměry čtvercové destičky Seco Tools s.r.o. [20]

SNMG 120412 - MR3				
l [mm]	s [mm]	h [mm]	r_e	hmotnost [g]
12,7	4,76	5,15	1,2	100

U čtvercové destičky je použit utvařecí třísky s označením MR3. Je to utvařecí s pozitivním úhlem čela, který snižuje řezný odpor, to přispívá ke stabilitě ostří. Je určený pro střední obrábění a hrubování vysoce legovaných slitin. [20]

Tab. 3.8 - Doporučené řezné podmínky od výrobce

a_p [mm]	f [mm]	v_c [m.min ⁻¹]
2,5	0,3	30

3.4 Použité zařízení pro vyhodnocení

3.4.1 Drsnoměr SurfTest

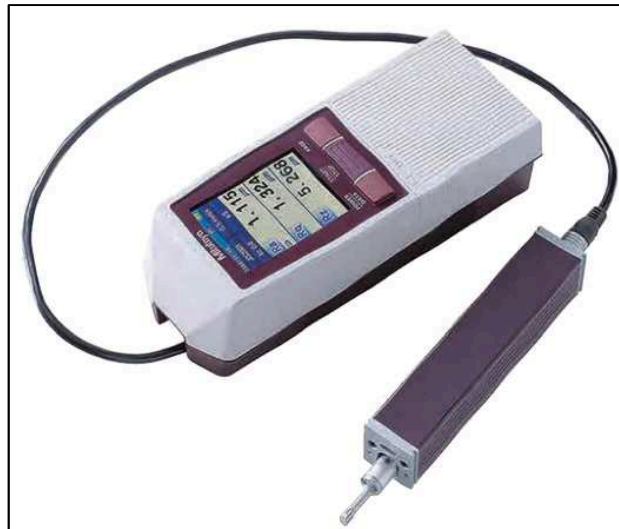
K hodnocení drsnosti povrchu materiálu byl použit přístroj pro měření parametrů drsnosti SurfTest SJ – 210 od firmy MITUTOYO. Přístroj je dotykový neboli hrotový.

Tento přístroj odpovídá normě GPS pro jakost povrchů. Je přenosný s odnímatelným měřicím čidlem. Měřicí síla přístroje je 750 mN dle norem DIN/ISO a rozsah měřicího dotyku 350 μm . Výsledky měření dokáže zobrazit na vestaveném 2,4 palcovém LCD displeji přístroje. Vyhodnocovací jednotku lze sejmout a umístit podle potřeby na stativ, nebo do jiných přípravků. K drsnoměru se dodává kalibrační etalon.

Prostředí softwaru podporuje 16 jazyků a všechny parametry mezinárodních norem. Dále je software schopen zobrazit křivku dosedací plochy, amplitudu distribuční křivky, hodnocený profil a výsledky výpočtů, to vše v barevném rozhraní. Naměřené hodnoty se dají odeslat do počítače přes vysokorychlostní USB, nebo uložit na MicroSD kartu. Přístroj je vybaven Gaussovým filtrem dle ISO 11562. [22, 23]

Tab. 3.9 – Technické parametry SurfTest SJ – 210 [23]

Funkce	Parametry
Rozsah osa X	17,5 mm
Rozsah osa Z	360 μm
Čas potřebný k měření	0,25; 0,5; 0,75 mm.s ¹
Přítlačná síla	< 400 mN
Provozní vlhkost	80 – 85 %
Provozní teplota	5 °C – 35 °C
Výstupní konektory	USB, výstup tiskárny, RS-232C I/F



Obr. 3.11 – Drsnoměr SurfTest SJ – 210 od firmy MITUTOYO [22]

3.4.2 Dynamometr Kistler

Síly vznikající při procesu soustružení byly měřeny stacionárním univerzálním dynamometrem s označením 9129AA od švýcarské společnosti KISTLER. Firma KISTLER nabízí 3 základní metody dynamometrů. Rotační dynamometr se snímačem krouživého momentu, stacionární dynamometr se snímačem krouživého momentu a stacionární vícesložkový dynamometr s výpočtem točivého momentu. Poslední zmiňovaný typ dynamometru byl použit pro měření řezných sil. Pro správné zobrazení a vyhodnocení sil je potřeba software DynoWare.



Obr. 3.12 – Třísložkový stacionární dynamometr Kistler 9129AA [26]

Dynamometr Kistler 9129AA pracuje na principu piezoelektrického jevu. Tento jev objevil a popsal v roce 1880, Jacques Curie. Vlastnosti piezoelektrického jevu mají některé krystaly, většinou křemene nebo materiály na bázi titaničitanu barnatého. Podstata tohoto jevu je deformovat krystal, který je schopný generovat elektrický náboj. Měřič Kistler 9129AA je charakterizován vznikem náboje elektrických částic na povrchu krystalů při mechanickém zatížení. [26]

Dynamometr byl upevněn do držáku s označením 9129A, který je určen pro revolverové hlavy soustruhu, dále byl přiveden měřicí kabel do zesilovacího zařízení Kistler typ 5070A a výstupem milivoltalického napětí byly transformovány data do převodníku Kistler typ 5697. Měření zaznamenávalo tři složky sil ve směru F_x , F_y a F_z . Samotné výsledky byly zpracovány pomocí softwaru DynoWare typ 2825D – 02, který je přímo doporučen firmou Kistler. [26]

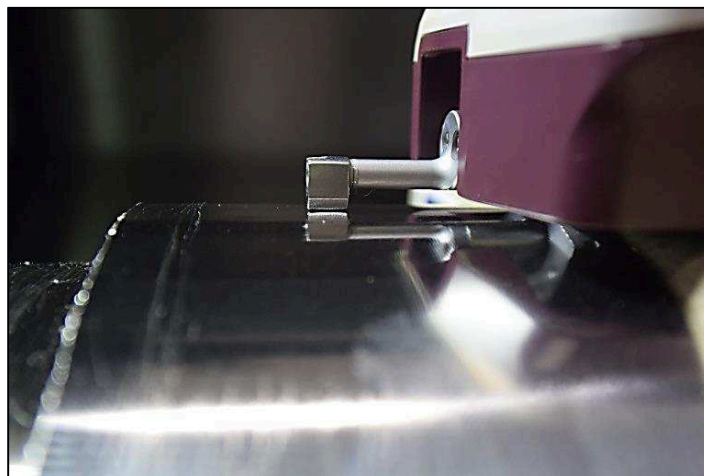
Tab. 3.10 – Technická specifikace tříosložkového dynamometru Kistler 9129AA [26]

Funkce	Parametry
Měřicí rozsah F_x , F_y , F_z	-10 – 10 kN
Citlivost F_x , F_z	$\approx - 8 \text{ pC.N}^{-1}$
Citlivost F_y	$\approx - 4,1 \text{ pC.N}^{-1}$
Vlastní frekvence f_{nx}	$\approx 3,5 \text{ kHz}$
Vlastní frekvence f_{ny}	$\approx 4,5 \text{ kHz}$
Vlastní frekvence f_{nz}	$\approx 3,5 \text{ kHz}$
Teplotní pracovní rozsah	0 – 70 °C
Hmotnost	3,2 kg
Rozměry (délka; šířka; výška)	90; 105; 32 mm

4. Realizace experimentální části

4.1 Vyhodnocení měření drsnosti povrchu

Měření drsnosti povrchu obráběného materiálu bylo provedeno na přístroji SURFTEST SJ – 210. Drsnost byla měřena dotykovým hrotem, který zaznamenává drobné nepravidelnosti povrchu. Měření bylo uskutečněno vždy v podélném směru (rovnoběžně se směrem posuvu). Parametr drsnosti R_a určuje průměrnou aritmetickou úchylku profilu a je nejčastěji využíván pro hodnocení kritérii drsnosti povrchu. Parametr R_z je nejvyšší výška nerovnosti profilu. Je to charakteristika drsnosti povrchu, která určuje vzdálenost mezi nejnižší a nejvyšší prohlubní profilu v rozsahu základní délky. Po každém řezu bylo naměřeno 10 hodnot parametru R_a a R_z , a to vždy na obráběném válci pootočeném o 120° . Ze získaných hodnot byl vypočítán výběrový průměr a rozšířená kombinovaná nejistota. Kombinovaná nejistota se počítala z důvodu pokrytí skutečnou hodnotu s předpokládanou pravděpodobností.



Obr. 4.1 – Měření profilu drsnosti

Rovnice pro získání výběrového průměru (7) byla použita z literatury [31] dále byla z této literatury ještě spočítána rozšířená kombinovaná nejistota U_c (11).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7)$$

Kde: x_i – jednotlivé naměřené hodnoty veličiny x

n – počet měření

\bar{x} – výběrový průměr

Pro získání kombinované standardní nejistoty U_c se nejdříve musí spočítat standardní nejistota typu A (u_A). Tato nejistota navazuje na výběrový průměr a zjistí se výpočtem směrodatné odchylky $s(\bar{x})$.

$$u_A = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (8)$$

Kde: x_i – jednotlivé naměřené hodnoty veličiny x

n – počet měření

\bar{x} – výběrový průměr

$s(\bar{x})$ – směrodatná odchylka

Po vypočítání standardní nejistoty typu A, se musí vypočítat standardní nejistota typu B (u_B). Tato hodnota je nezávislá na počtu měření a ovlivňuje ji především prostředí (vlhkost, teplota, vibrace, tuhost). Standardní nejistota typu B je dána vztahem (9).

$$u_B = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2} \quad (9)$$

Kde: u_{B1} – nejistota vlivu opěrné paty snímacího hrotu

u_{B2} – nejistota měřicího přístroje

Vliv opěrné patky snímacího hrotu u_{B1} je stanovena pro rovnoměrné pravoúhlé rozdělení hustoty pravděpodobností. Hodnota u_{B2} je nejistota měřicího přístroje. Tyto hodnoty se vypočítají z následujících vztahů.

$$u_{B1} = \frac{z_{1 \max}}{k} \quad u_{B2} = z_{1 \max} \cdot k \quad (10)$$

Kde: $z_{1 \max}$ – maximální odchylka j -tého zdroje nejistoty vlivu opěrné patky $\pm 3\%$

k – součinitel nejistot pro rovnoměrné rozdělení $k = \sqrt{3}$

Z obou typů vypočtených nejistot se potom určí hodnota kombinované standardní nejistoty u_c . Dále se potom z kombinované standardní nejistoty vypočítá rozšířená kombinovaná nejistota U_c pro libovolnou pravděpodobnost.

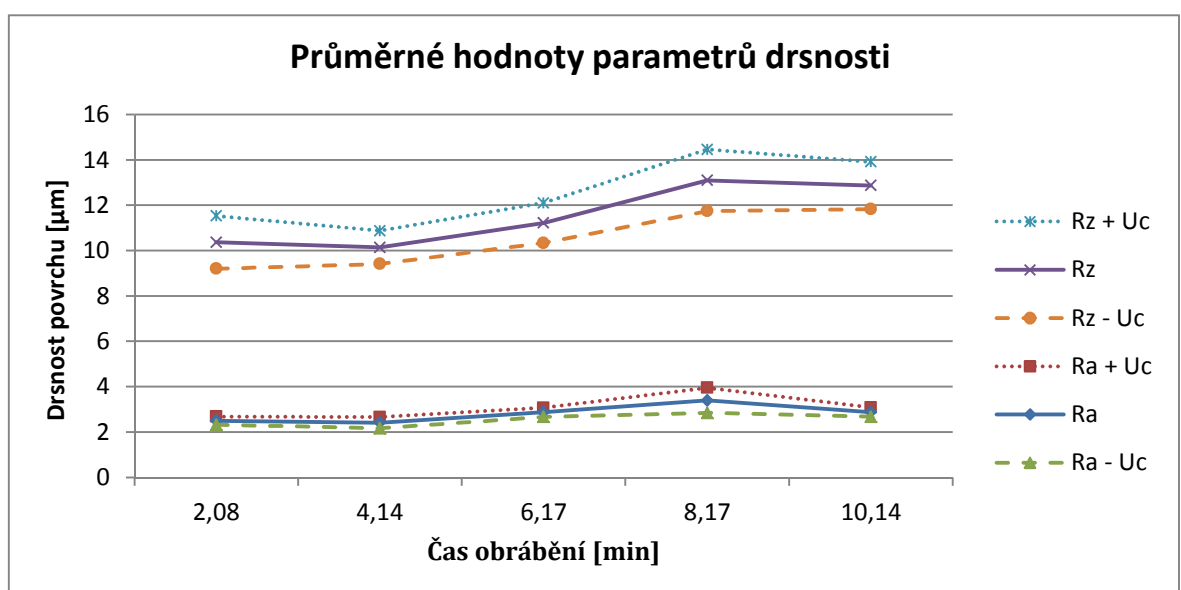
$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad U_c = k_U \cdot u_c \quad (11)$$

Kde: k_U – koeficient rozšíření (pokrytí)

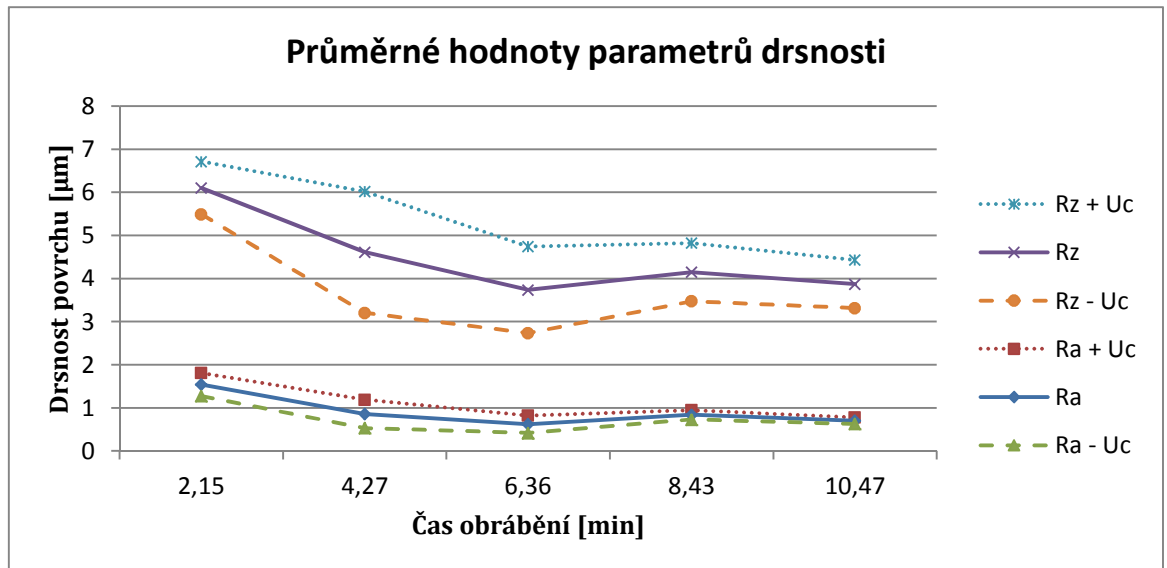
U hloubky řezu $a_p = 0,5$ mm bylo realizováno 5 řezů tedy 5 měření parametrů drsnosti. U hloubky řezu $a_p = 1,5$ mm byly z důvodu velkého objemu třísky realizovány 3 řезы a to u obou zkoumaných destiček. V následujících tabulkách a grafech jsou uvedené vypočítané průměrné hodnoty parametru drsnosti R_a a R_z a k nim dopočítaná rozšířená kombinovaná nejistota (odlehle hodnoty).

Tab. 4.1 – Vypočítané průměrné hodnoty parametru drsnosti při $a_p = 0,5$ mm a rozšířená kombinovaná nejistota

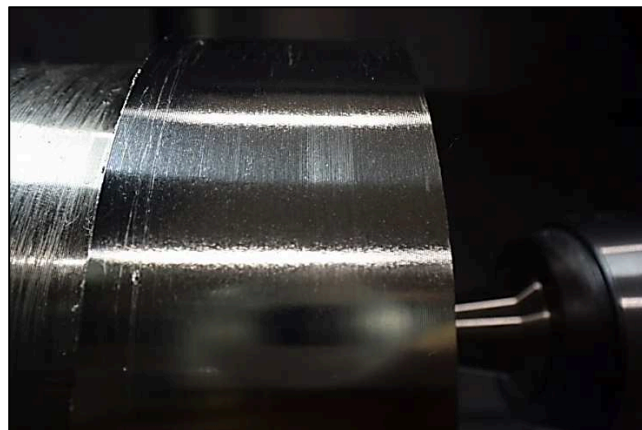
Řez č.	SNMG 120412 - MR3		RCMT 10T3M0 - F2	
	R_a [μm]	R_z [μm]	R_a [μm]	R_z [μm]
1	$2,49 \pm 0,18$	$10,36 \pm 1,16$	$1,54 \pm 0,27$	$6,10 \pm 0,61$
2	$2,41 \pm 0,25$	$10,14 \pm 0,73$	$0,86 \pm 0,33$	$4,61 \pm 1,41$
3	$2,87 \pm 0,20$	$11,22 \pm 0,88$	$0,62 \pm 0,20$	$3,74 \pm 1,00$
4	$3,39 \pm 0,56$	$13,01 \pm 1,36$	$0,66 \pm 0,11$	$4,15 \pm 0,67$
5	$2,88 \pm 0,20$	$12,87 \pm 1,04$	$0,70 \pm 0,07$	$3,87 \pm 0,56$



Graf 4.1 – Průměrné hodnoty parametru drsnosti povrchu pro čtvercovou destičku SNMG 120412 - MR3 při $a_p = 0,5$ mm s rozšířenou kombinovanou nejistotou





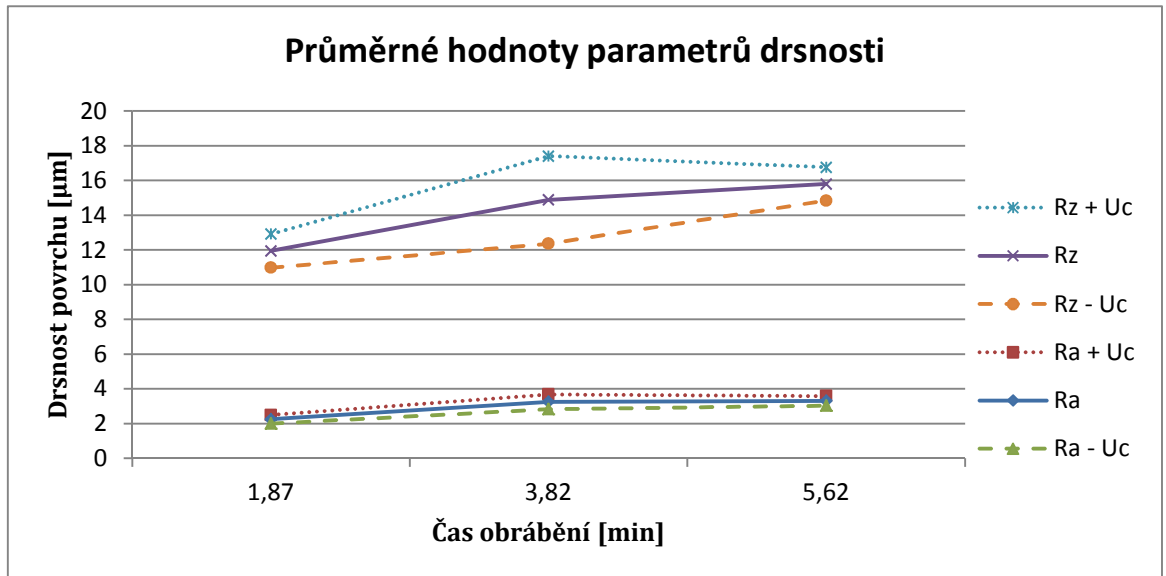
Graf 4.2 - Průměrné hodnoty parametru drsnosti povrchu pro kruhovou destičku RCMT 10T3M0 - F2 $a_p = 0,5$ mm s rozšířenou kombinovanou nejistotou



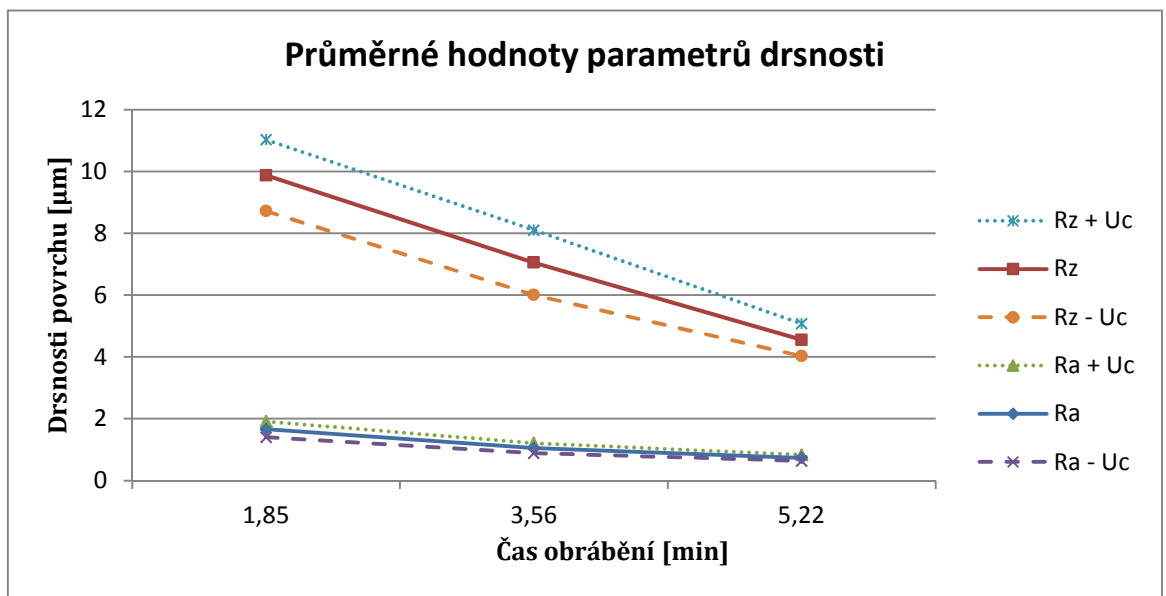
Obr. 4.2 – Drsnost obráběného materiálu při hloubce řezu 0,5 mm

Tab. 4.2 – Vypočítané průměrné hodnoty parametru drsnosti při $a_p = 1,5$ mm a rozšířená kombinovaná nejistota

$a_p = 1,5$ mm $f = 0,3$ mm $v_c = 40$ m.min ⁻¹	 SNMG 120412 - MR3		 RCMT 10T3M0 - F2		
	Řez č.	R_a [μm]	R_z [μm]	R_a [μm]	R_z [μm]
	1	1,05 ± 0,24	5,73 ± 0,96	1,10 ± 0,26	6,60 ± 1,16
	2	2,61 ± 0,42	12,18 ± 2,25	0,74 ± 0,16	4,98 ± 1,05
	3	2,34 ± 0,28	11,23 ± 0,96	0,50 ± 0,10	3,19 ± 0,52



Graf 4.3 – Průměrné hodnoty parametru drsnosti povrchu pro čtvercovou destičku SNMG 120412 - MR3 při $a_p = 1,5$ mm s rozšířenou kombinovanou nejistotou



Graf 4.4 - Průměrné hodnoty parametru drsnosti povrchu pro kruhovou destičku RCMT 10T3M0 - F2 při $a_p = 1,5$ mm s rozšířenou kombinovanou nejistotou



Obr. 4.3 – Drsnost obráběného materiálu při hloubce řezu 1,5 mm

Z grafu 4.1 vidíme, že při obrábění čtvercovou destičkou s hloubkou řezu $a_p = 0,5$ mm, posuvem $f = 0,3$ mm a řeznou rychlostí $v_c = 40$ m·min⁻¹ drsnost povrchu po prvním řezu lehce klesá a poté pozvolna narůstá. Při zhruba 8 minutách obrábění se ustálí na stále hodnotě.

Z grafu 4.2 můžeme sledovat průběh drsnosti u kruhové destičky se stejnými parametry obrábění jako u čtvercové destičky. Drsnost povrchu nejdříve prudce klesá (dochází k pěchování třísky), zhruba na 6 minutách obráběcího času se ustálí. Nicméně hodnoty parametru R_a i R_z vykazují u kruhové destičky za daných řezných podmínek lepších výsledků než u čtvercové destičky.

V tabulkách s počítanou rozšířenou kombinovanou nejistotou můžeme vyčíst, že nejlepší tedy nejnižší drsnost vykazuje při hloubce řezu $a_p = 0,5$ mm kruhová destička RCMT 10T3M0 - F2 a to po třetím řezu (6,28 min). Při hloubce řezu $a_p = 1,5$ mm je to také po třetím řezu (5,22 min). Z toho plyne, že kruhová destička dokáže odolávat větší posuvové rychlosti, aniž by utrpěla drsnost obráběného povrchu, jak se uvádí v mnoha literaturách. Dále je zajímavé zjištění, že lepších hodnot drsnosti se dosahuje při větší hloubce řezu.

4.2 Vyhodnocení měření opotřebení

Realizace měření opotřebení na čele a na hřbetu byla uskutečněna mikrometrickou metodou. Jedná se tedy o přímé měření lineárních rozměrů pomocí mikroskopu. Pro pořízení jednotlivých snímků opotřebení byl použit binokulární stereomikroskop, který je vybaven digitální kamerou. Díky zabudované digitální kameře, bylo možné přenést snímky do počítače, kde bylo následně v programu Motic Images Plus 2.0 změřeno velice přesně opotřebení. Vyhodnocení VBD bylo měřeno na základě normy ISO 3685.



Obr. 4.4 – Měření opotřebení VBD

Pro ověření teorie, že vznik vrubu na hřbetě řezného nástroje nevzniká, při úhlu nastavení κ_r menší jak 45° , bylo provedeno dvojí měření při stejných parametrech obrábění jen se změnou hloubky řezu. Tyto dvě měření byly dále realizovány pro čtvercovou vyměnitelnou břitovou destičku a kruhovou vyměnitelnou břitovou destičku.

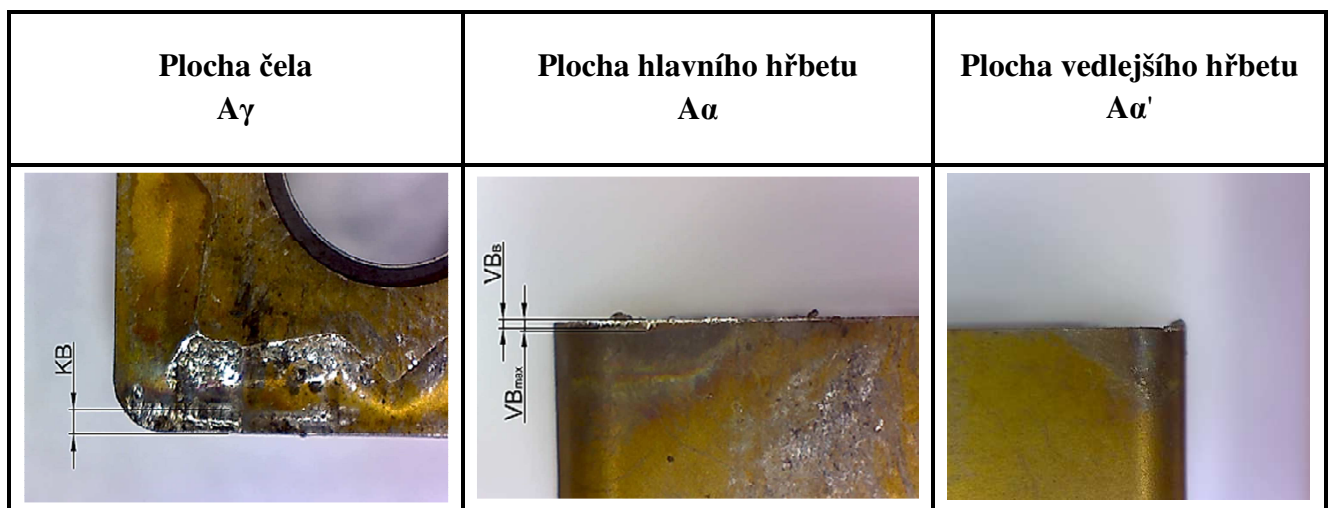
4.2.1 Měření opotřebení při hloubce řezu $a_p = 0,5$ mm

První měření bylo realizováno pro řezné podmínky, které jsou uvedeny v tabulce 4.3. Odebíraný materiál za 1 přejezd byl 12 cm^3 a celkem se provedlo 5 přejezdů. Tyto přejezdy byly kritériem pro ukončení experimentu a zhodnocení tvorby vrubu na hřbetu nástroje. Úhel nastavení κ_r byl při obrábění kruhovou destičkou 26° a při obrábění čtvercovou destičkou 45° .

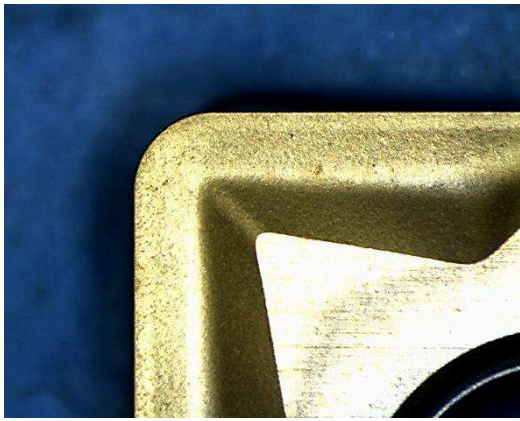
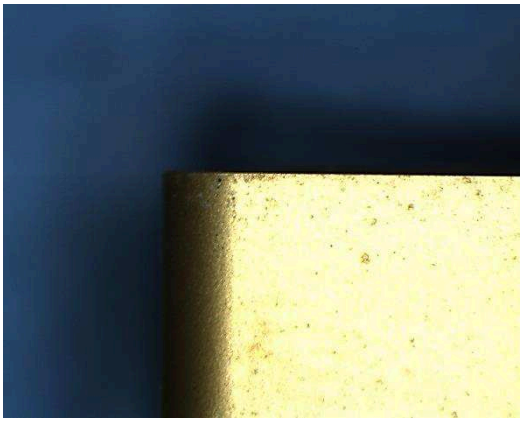

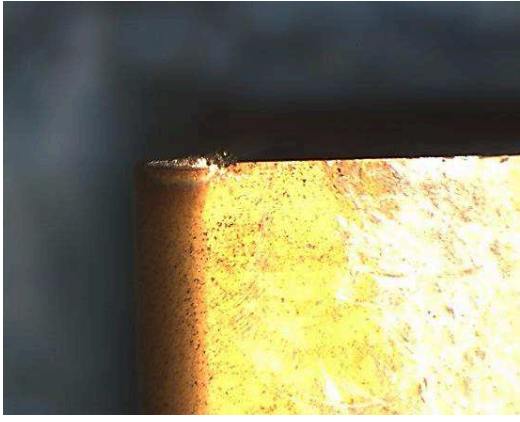

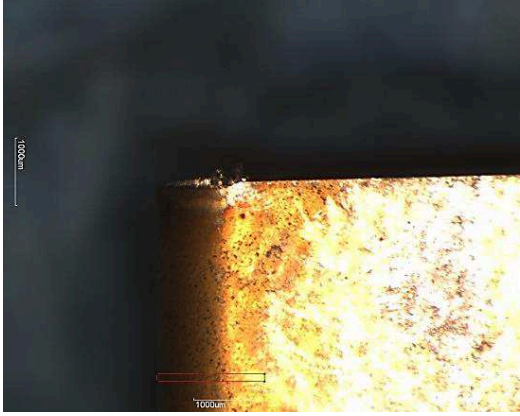
Tab. 4.3 – Řezné podmínky

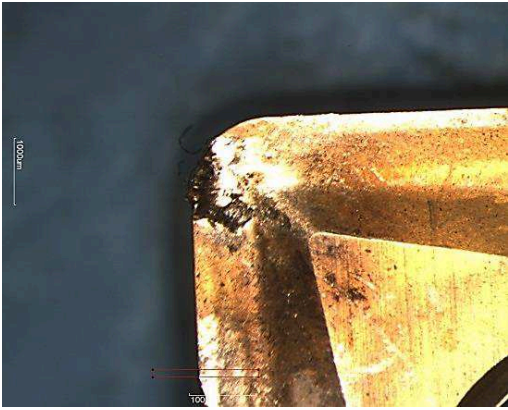
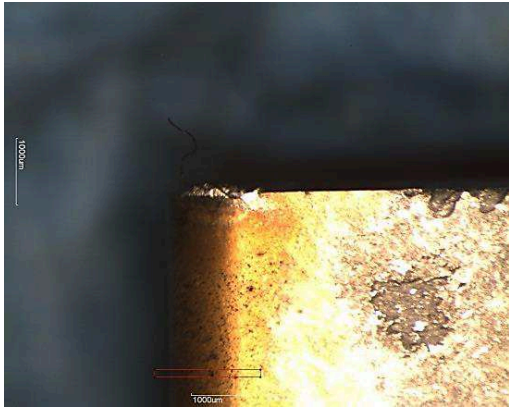
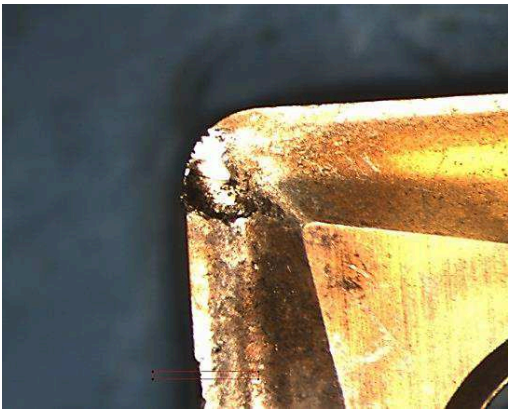
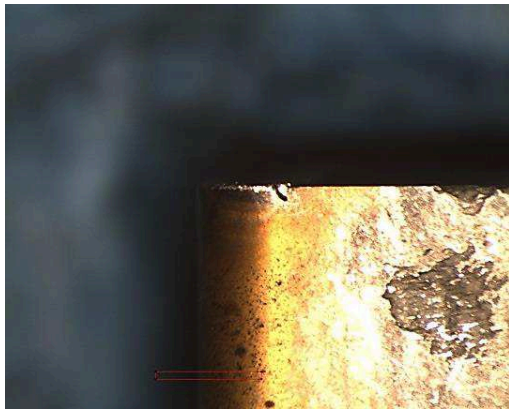

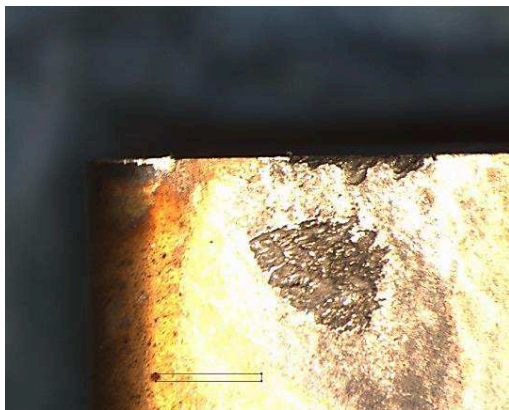
Řezná rychlost	v_c	40	$[\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$
Posuv na otáčku	f	0,3	$[\text{mm}]$
Hloubka řezu	a_p	0,5	$[\text{mm}]$

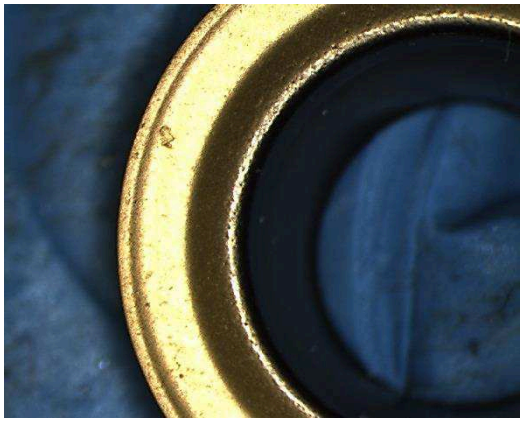
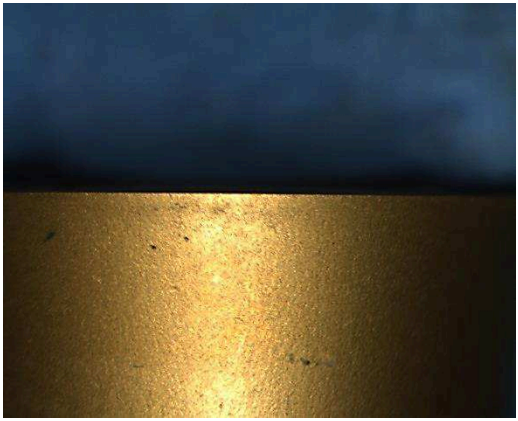
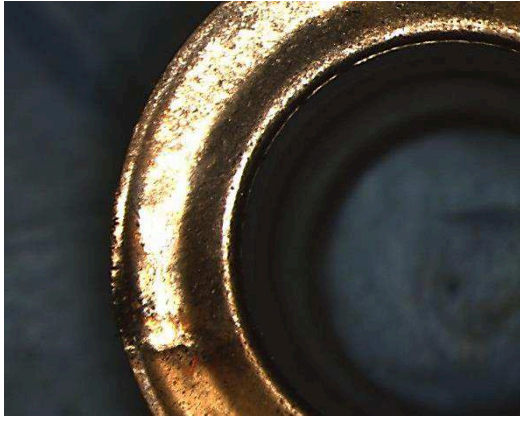

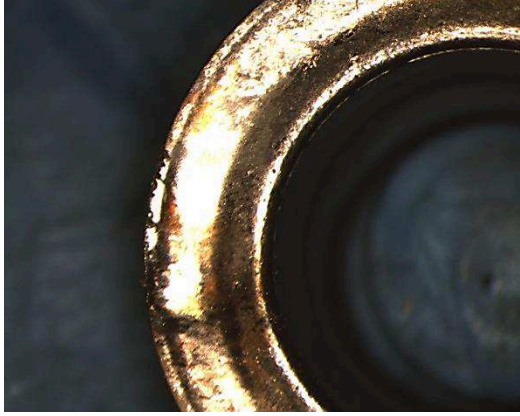

Z naměřených výsledků je jasné, že ani po pěti přejezdech nedochází k tvoření vrubu na hřbetě. Průběh opotřebení je předvídatelný a lineární. Z přiložených grafů lze sledovat závislost opotřebení na čase obrábění. Do zhruba osmi minut obrábění roste opotřebení lineárně, po osmi minutách dochází k výraznějšímu opotřebení. Při hloubce řezu $a_p = 0,5$ mm destička obrábí špičkou nástroje, tím nevzniká opotřebení na čele.

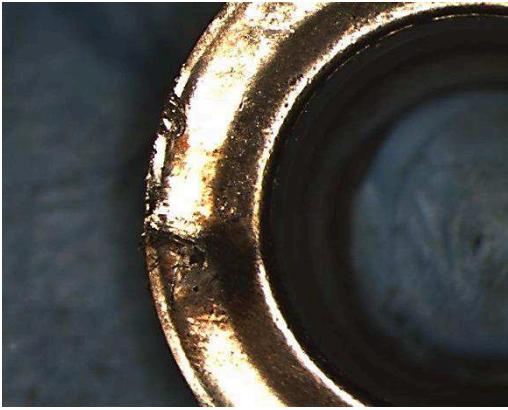

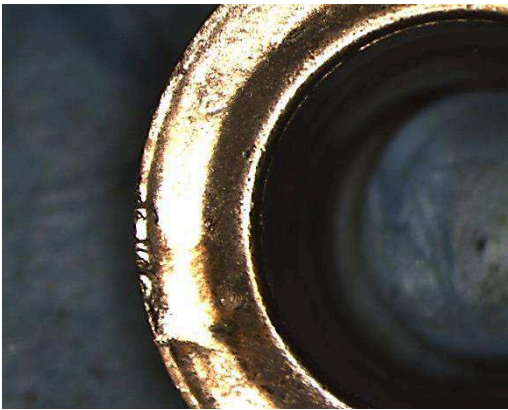





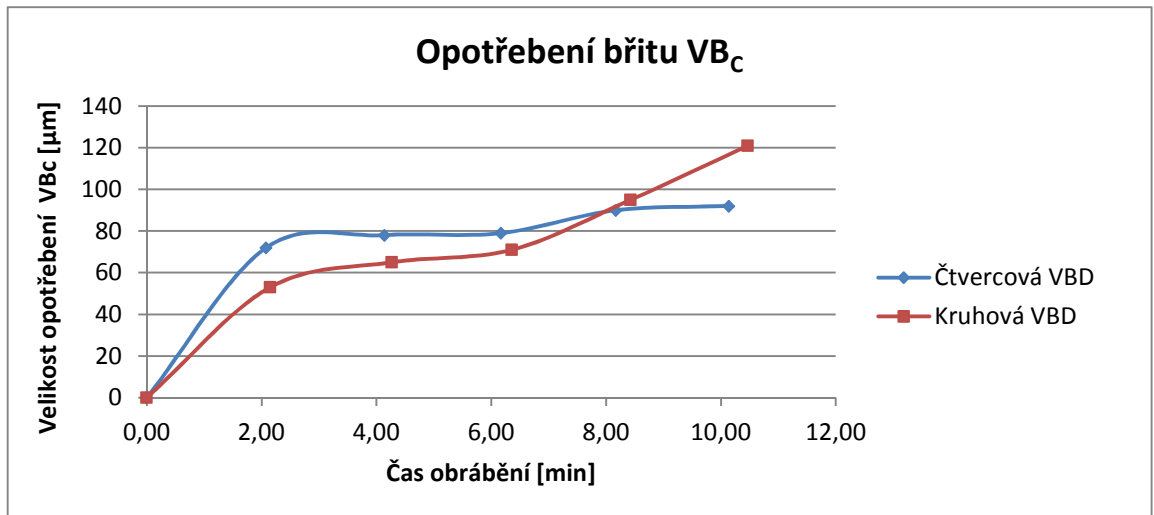
Obr. 4.5 – Znamky opotřebení na čtvercové vyměnitelné břitové destičce

SNMG 120412 - MR3 (čtvercová destička)							
Plocha čela A_γ				Plocha hlavního hřbetu A_α			
T_1 [min]	Q [cm ³]	KF [μm]	KB [μm]	VB_c [μm]	VB_b [μm]	VB_{max} [μm]	VB_n [μm]
0,00	0	0	0	0	0	0	0
							
2,08	12,45	0	0	72	60	143	0
							
4,14	12,37	0	0	78	71	152	0
							

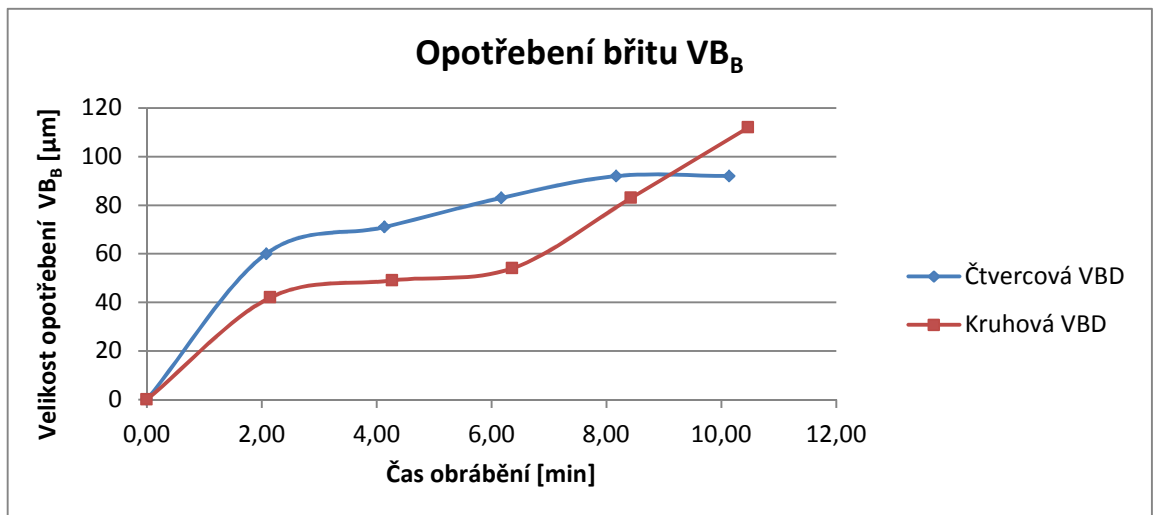
SNMG 120412 - MR3 (čtvercová destička)							
Plocha čela $A\gamma$				Plocha hlavního hřbetu $A\alpha$			
T_1 [min]	Q [cm ³]	KF [μ m]	KB [μ m]	VB_c [μ m]	VB_b [μ m]	VB_{max} [μ m]	VB_n [μ m]
6,17	12,29	0	0	79	83	170	0
							
T_1 [min]	Q [μ m]	KF [μ m]	KB [μ m]	VB_c [μ m]	VB_b [μ m]	VB_{max} [μ m]	VB_n [μ m]
8,17	12,21	0	0	90	92	186	0
							
T_1 [min]	Q [μ m]	KF [μ m]	KB [μ m]	VB_c [μ m]	VB_b [μ m]	VB_{max} [μ m]	VB_n [μ m]
10,14	12,13	0	0	92	92	194	0
							

RCMT 10T3M0 - F2 (kruhová destička)							
Plocha čela $A\gamma$				Plocha hlavního hřbetu $A\alpha$			
T_1 [min]	Q [cm ³]	KF [μm]	KB [μm]	VB_c [μm]	VB_b [μm]	VB_{max} [μm]	VB_n [μm]
0,00	0	0	0	0	0	0	0
							
2,15	12,84	0	0	53	42	89	0
							
4,27	12,76	0	0	65	49	125	0
							

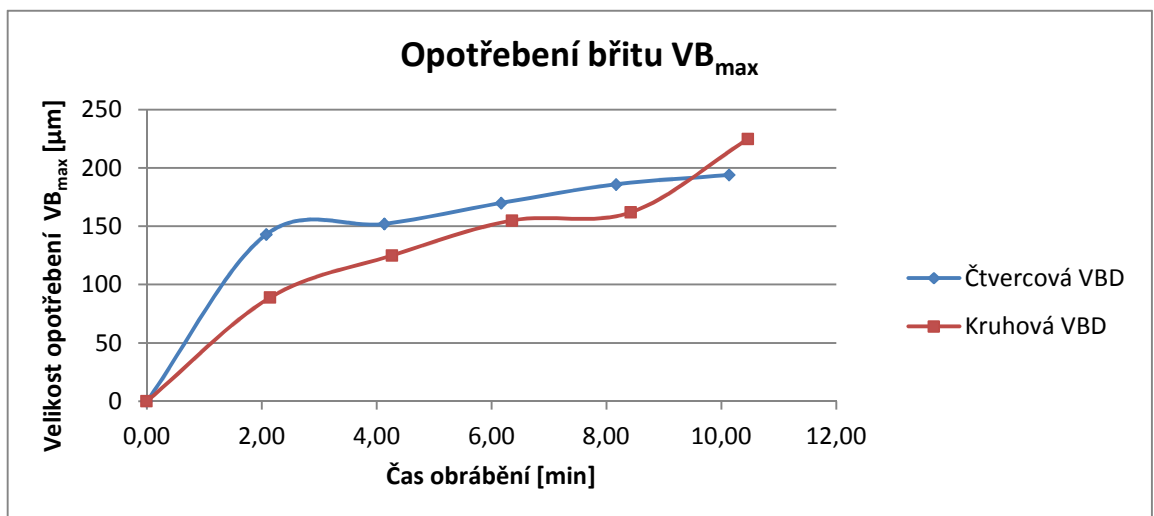
RCMT 10T3M0 - F2 (kruhová destička)							
Plocha čela Aγ				Plocha hlavního hřbetu Aα			
T ₁ [min]	Q [cm ³]	KF [μ m]	KB [μ m]	VB _c [μ m]	VB _b [μ m]	VB _{max} [μ m]	VB _n [μ m]
6,36	12,68	0	0	71	54	155	0
							
8,43	12,61	0	0	95	83	162	0
							
10,47	12,53	0	0	121	112	225	0
							



Graf 4.5 – Závislost průběhu opotřebení VB_c na čase obrábění



Graf 4.6 – Závislost průběhu opotřebení VB_b na čase obrábění



Graf 4.7 – Závislost průběhu opotřebení VB_{max} na čase obrábění

4.2.2 Měření opotřebení při hloubce řezu $a_p = 1,5$ mm

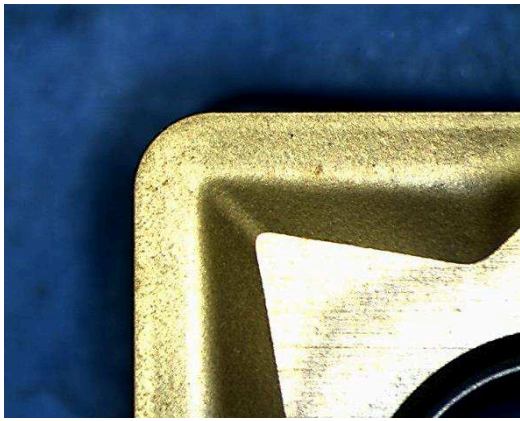
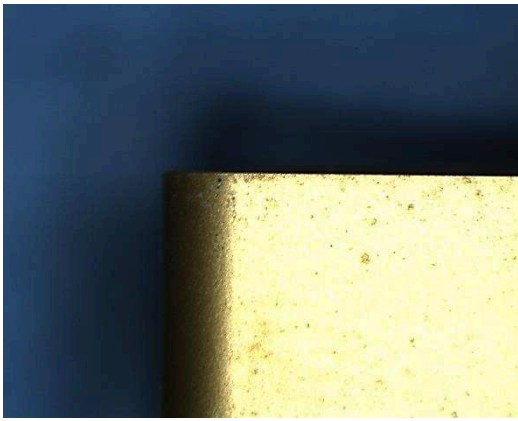

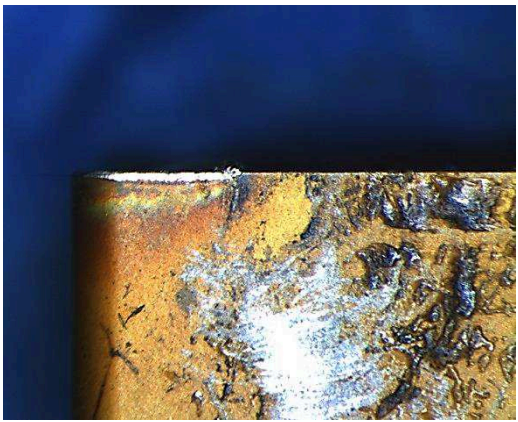

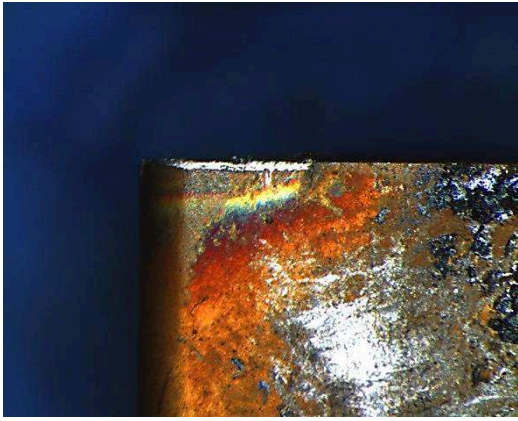
U hloubky řezu $a_p = 1,5$ mm byly provedeny jen 3 přejezdy a to z důvodu většího odebíraného množství a vzhledem k ceně materiálu inconel 625. Tyto 3 přejezdy, ale stačily k tomu, že se vrub u nástrojů s úhlem nastavení κ_r , menším nebo rovno jak 45° , neprojevil. Odebíraný materiál za jeden přejezd byl u čtvercové destičky 34 cm^3 a u kruhové 31 cm^3 . Úhel nastavení κ_r byl při obrábění kruhovou destičkou 36° a čtvercovou 45° . Přesto se tvoření vrubu neprojeвило.

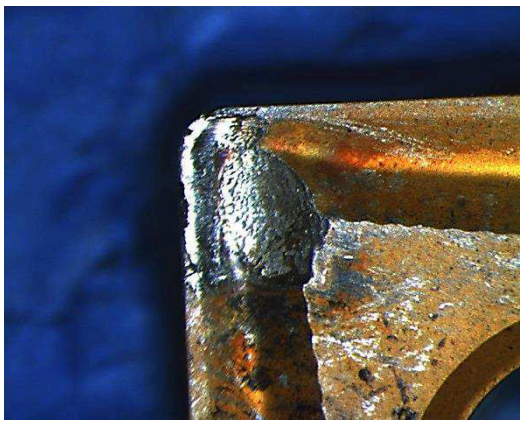
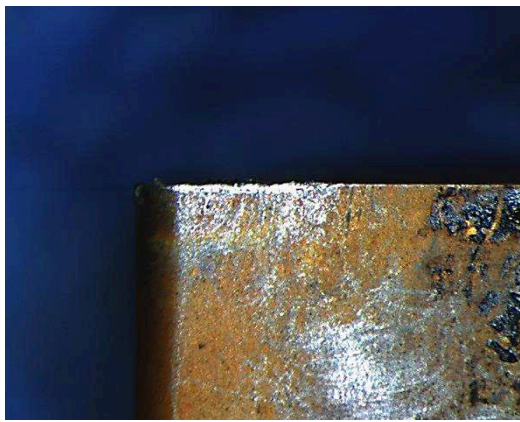
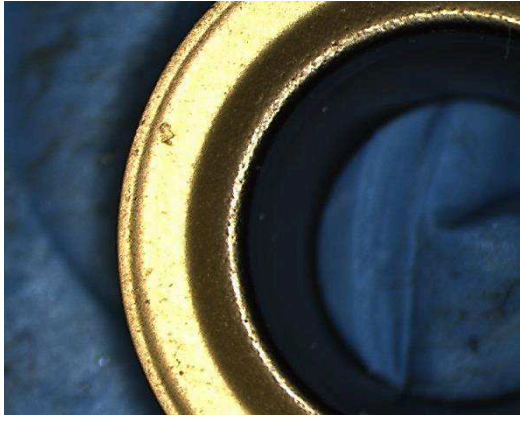
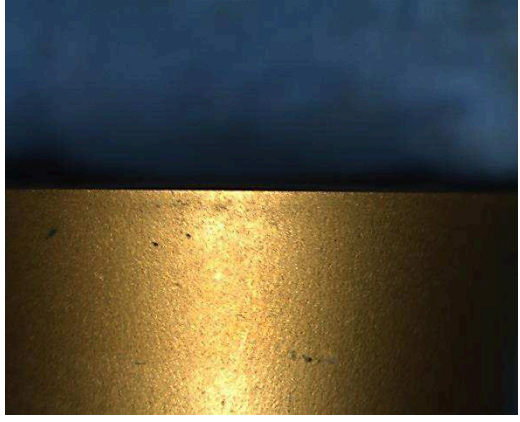
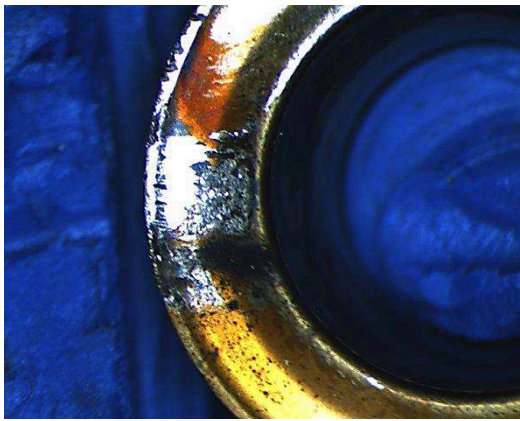
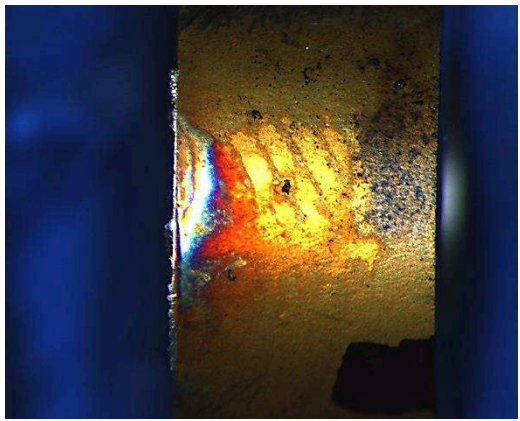
Tab. 4.4 – Řezné podmínky

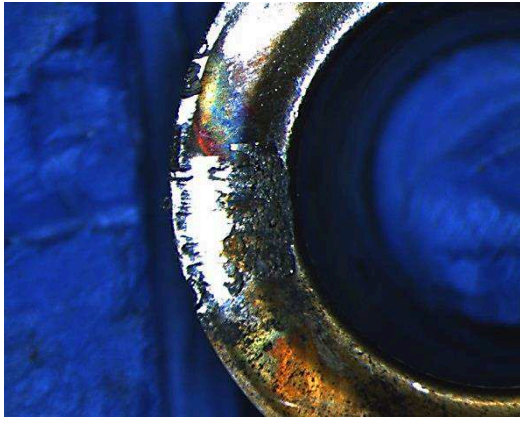

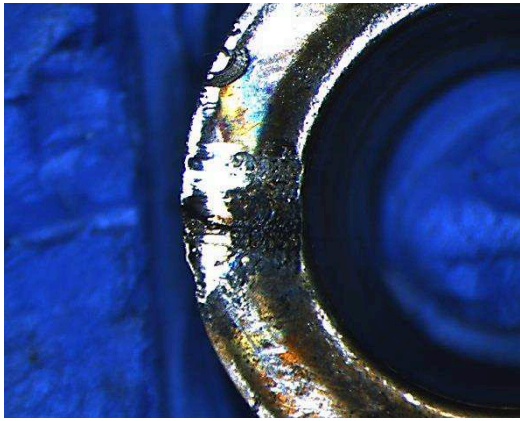
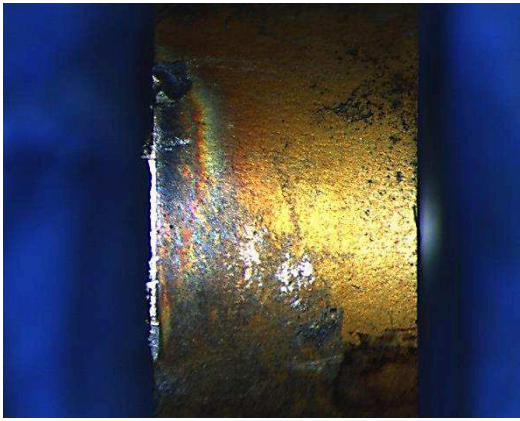
Řezná rychlost	v_c	40	[m.min ⁻¹]
Posuv na otáčku	f	0,3	[mm]
Hloubka řezu	a_p	1,5	[mm]

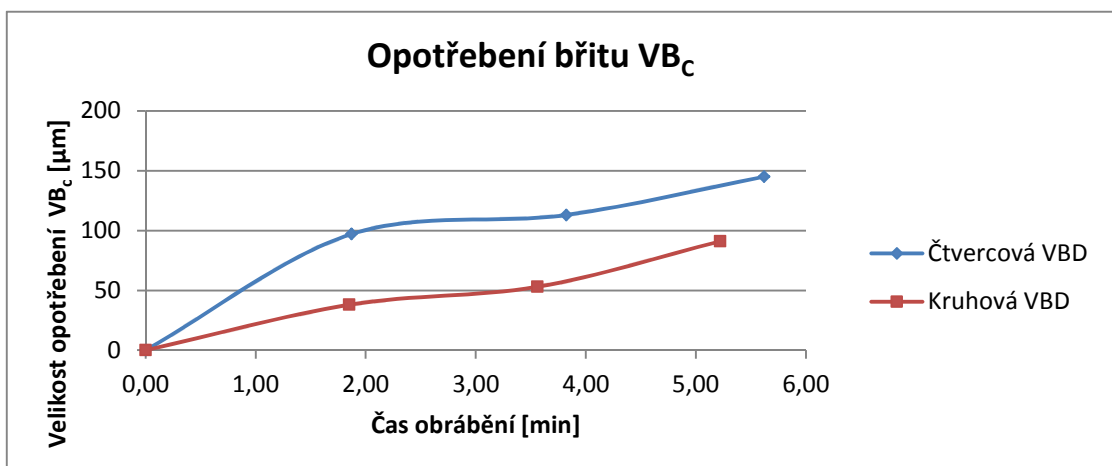
Jelikož měření opotřebení nebylo hodnotícím kritériem, bylo zvoleno jen jako doplňující měření, nebylo nutné stanovit hranici pro ukončení. Přesto byl experiment ukončen, když opotřebení na čele KB dosáhlo hodnoty $600 \mu\text{m}$. V tomto ohledu dosáhla lepších hodnot čtvercová destička, která této hranice dosáhla zhruba po 4 minutách obrábění, kdežto u kruhové už po 2 minutách obrábění. Srovnáme-li, ale opotřebení na hřbetu VBD, zjistíme, že lepších hodnot dosahuje kruhová destička, která se opotřebovává mnohem méně.

Ve výsledku srovnání čtvercové a kruhové destičky, je na tom lépe kruhová vyměnitelná břitová destička, která dosahuje menších hodnot opotřebení na hřbetu. Projevuje se u ní akorát zvýšené opotřebení na čele. Vrub na hřbetu, ale nevzniká a to bylo i předpokládáno.

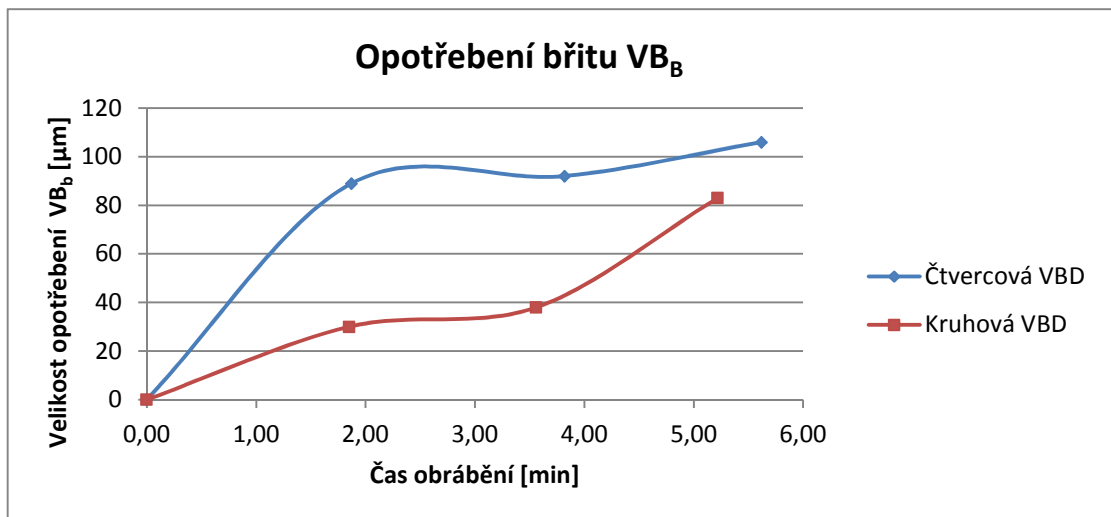
SNMG 120412 - MR3 (čtvercová destička)							
Plocha čela $A\gamma$				Plocha hlavního hřbetu $A\alpha$			
T_1 [min]	Q [cm ³]	KF [μ m]	KB [μ m]	VB_c [μ m]	VB_b [μ m]	VB_{max} [μ m]	VB_n [μ m]
0,00	0	0	0	0	0	0	0
							
T_1 [min]	Q [cm ³]	KF [μ m]	KB [μ m]	VB_c [μ m]	VB_b [μ m]	VB_{max} [μ m]	VB_n [μ m]
1,87	34,05	45	516	97	89	169	0
							
T_1 [min]	Q [cm ³]	KF [μ m]	KB [μ m]	VB_c [μ m]	VB_b [μ m]	VB_{max} [μ m]	VB_n [μ m]
3,82	34,05	74	590	113	92	198	0
							

T_1 [min]	Q [cm ³]	KF [μm]	KB [μm]	VB_c [μm]	VB_b [μm]	VB_{max} [μm]	VB_n [μm]
5,62	33,34	166	593	145	106	218	0
							
RCMT 10T3M0 - F2 (kruhová destička)							
Plocha čela A_γ				Plocha hlavního hřbetu A_α			
T_1 [min]	Q [cm ³]	KF [μm]	KB [μm]	VB_c [μm]	VB_b [μm]	VB_{max} [μm]	VB_n [μm]
0,00	0	0	0	0	0	0	0
							
T_1 [min]	Q [cm ³]	KF [μm]	KB [μm]	VB_c [μm]	VB_b [μm]	VB_{max} [μm]	VB_n [μm]
2,06	32,87	60	713	38	30	69	0
							

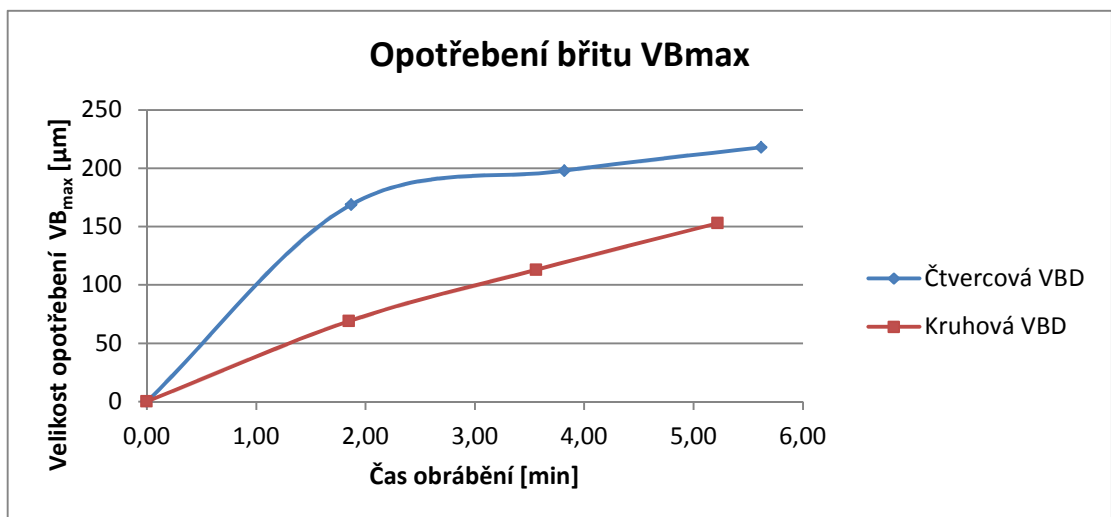
RCMT 10T3M0 - F2 (kruhová destička)							
Plocha čela A_γ				Plocha hlavního hřbetu A_α			
T_1 [min]	Q [cm ³]	KF [μ m]	KB [μ m]	VB_c [μ m]	VB_b [μ m]	VB_{max} [μ m]	VB_n [μ m]
4,03	32,16	89	932	53	38	113	0
							
T_1 [min]	Q [cm ³]	KF [μ m]	KB [μ m]	VB_c [μ m]	VB_b [μ m]	VB_{max} [μ m]	VB_n [μ m]
5,93	31,46	127	970	91	83	153	0
							



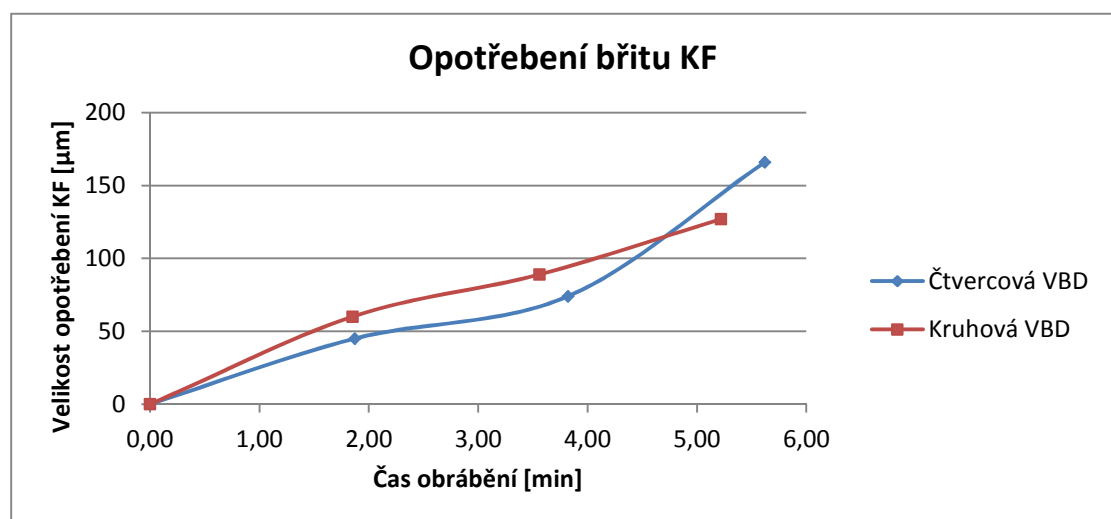
Graf 4.8 – Závislost průběhu opotřebení VB_c na čase obrábění



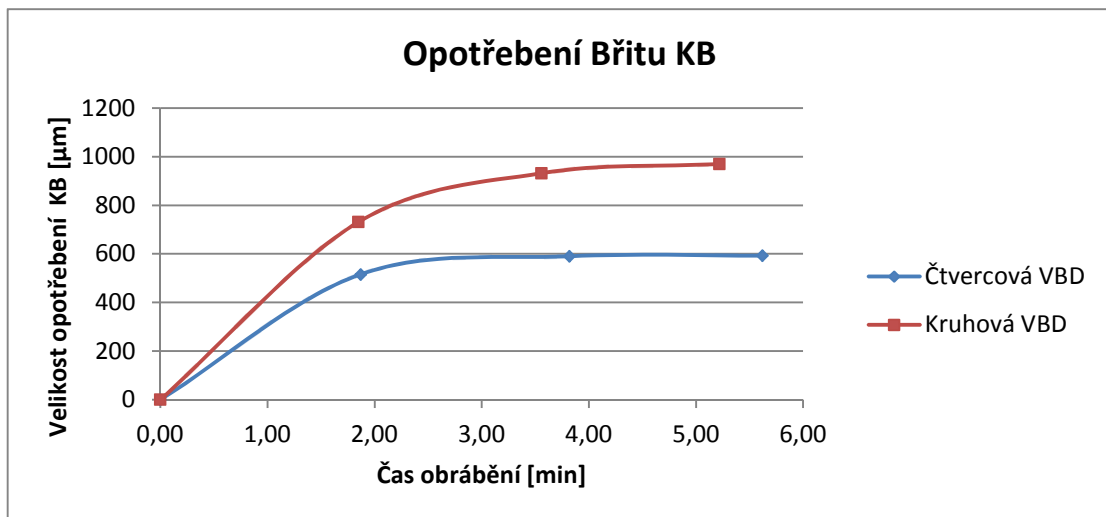
Graf 4.9 – Závislost průběhu opotřebení VB_b na čase obrábění



Graf 4.10 – Závislost průběhu opotřebení VB_{max} na čase obrábění



Graf 4.11 – Závislost průběhu opotřebení KF na čase obrábění



Graf 4.12 – Závislost průběhu opotřebení KB na čase obrábění

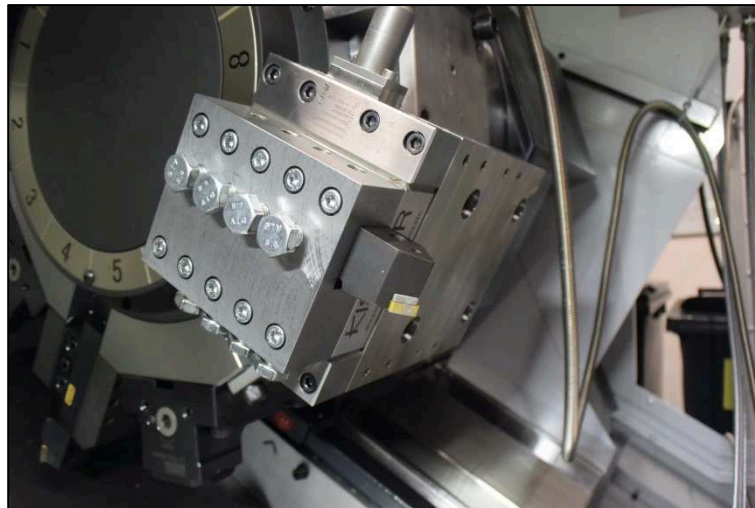
Při obrábění s větší hloubkou řezu, se začalo projevovat opotřebení na čele ve formě žlábků, hned po prvním přejezdu. Toto opotřebení znázorňuje graf 4.11 a graf 4.12. Tohle opotřebení je způsobeno abrazí a tvrdými částicemi obsaženými v materiálu. Vrub se opět netvoří. Při srovnání obou dvou destiček, vychází lépe destička kruhová, která má menší opotřebení na hřbetě při stejných parametrech obrábění, než destička čtvercová. Menší opotřebení na čele, má destička čtvercová.

Zajímavé je zjištění, že pokud by se provádělo obrábění po menších hloubkách řezu, nastane menší opotřebení, než kterého by se dosáhlo s obráběním jedním přejezdem, ale větší hloubkou řezu. Nastává otázka výhodnosti hospodárného využití času, financí atd.

4.3 Vyhodnocení měření řezných sil

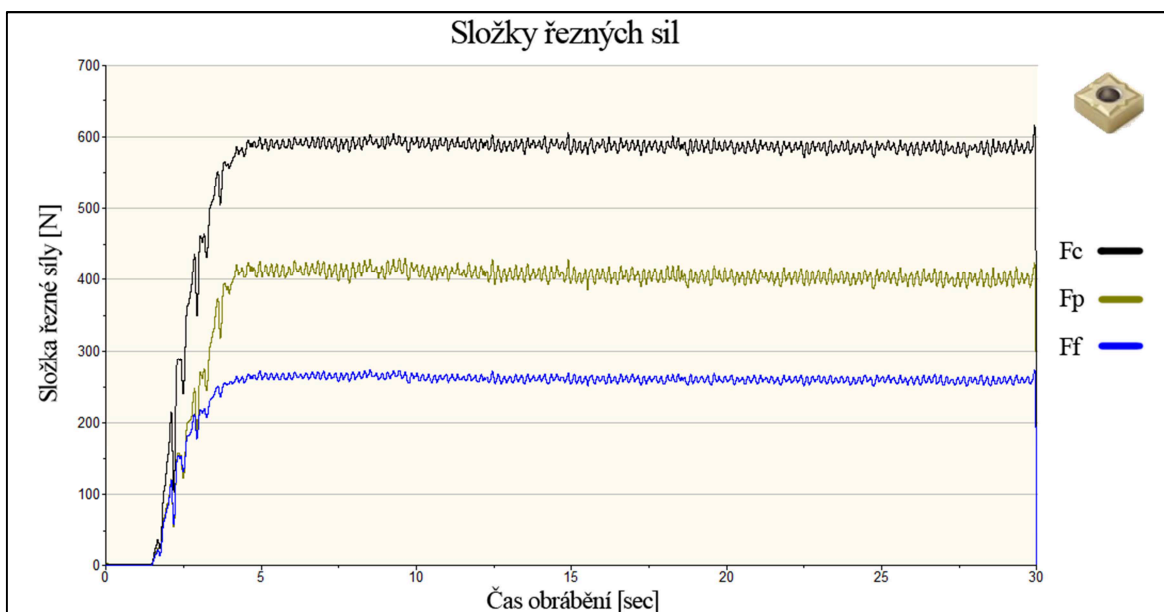
Vyhodnocení působících řezných sil bylo provedeno měřícím stacionárním dynamometrem KISTLER 9129AA. Měřily se tři složky síly F_x , F_y a F_z jedná se o síly řezné, posuvové a pasivní. Zpracování dat bylo uskutečněno v programu DynoWare.

Z programu Dynoware byly odečteny střední průměrné hodnoty a zpracovány do přehledných grafů v aplikaci Excel. Grafy vyjadřují závislosti složek řezné síly na čase obrábění. Pro obrábění materiálu inconel 625 byly nastaveny řezné podmínky: řezná rychlost $v_c = 40 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, posuv na otáčku $f = 0,3 \text{ mm}$ a opět se měnila hloubka řezu na $a_p = 0,5 \text{ mm}$ a na $a_p = 1,5 \text{ mm}$.

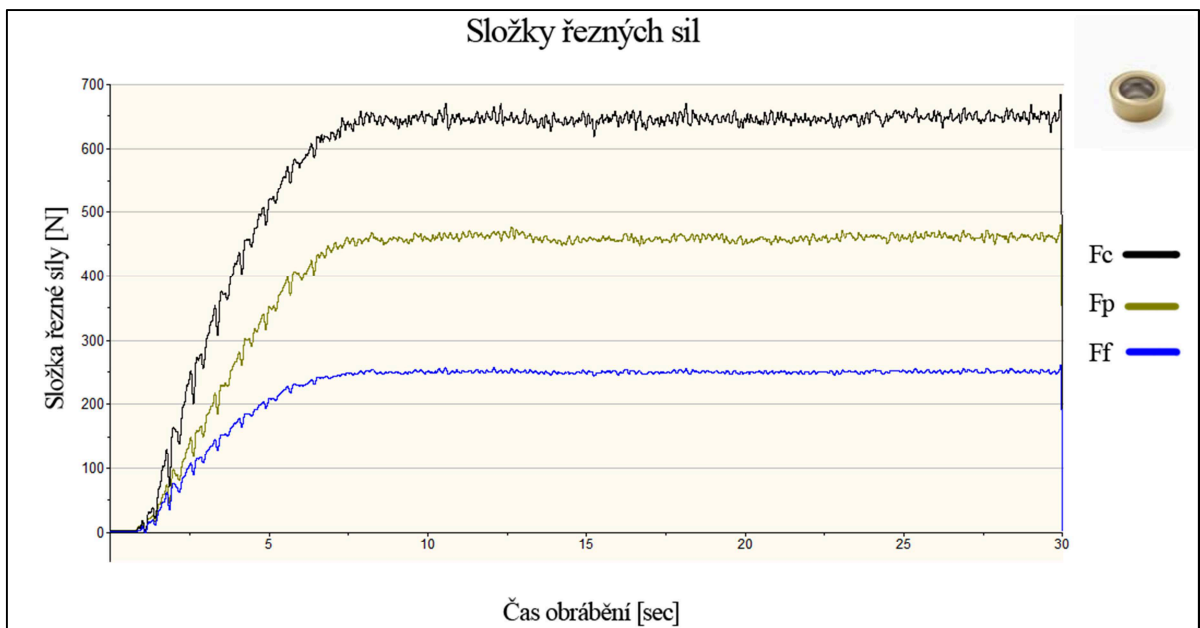


Obr. 4.6 – Dynamometr Kistler v revolverové hlavě soustruhu

Na následujícím grafu je zobrazena závislost řezných sil na čase obrábění, tak jak přijdou data do programu DynoWare. Graf je sestrojen pro $a_p = 0,5$ mm a čtvercovou destičku. Na grafu můžeme vidět pozvolné najetí nástroje do řezu, kdy se začne projevovat dynamické zatížení procesu obrábění a nárůst jednotlivých složek řezných sil. Grafy z programu DynoWare byly pro lepší přehlednost filtrovány na frekvenci 10 Hz.



Graf 4.12 – Řezné složky síly čtvercové destičky při $a_p = 0,5$ mm

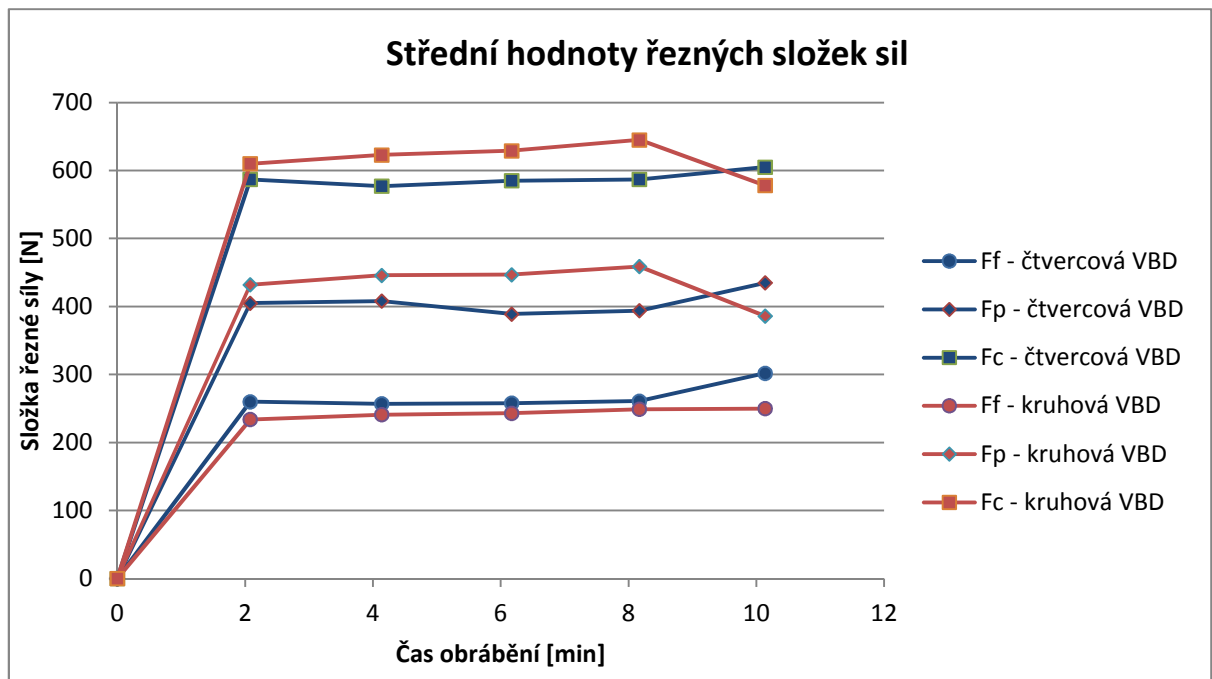


Graf 4.13 – Řezné složky síly kruhové destičky při $a_p = 0,5 \text{ mm}$

V tabulce 4.5 jsou uvedeny hodnoty, které se odečetly z programu DynoWare a dále zpracovaly. Uvedeny jsou střední hodnoty a jejich průměrná velikost. Tabulka je rozdělena do tří částí, v první části jsou posuvové síly v druhé pasivní a nakonec řezné síly.

Tab. 4.5 – Naměřené zatěžující síly pro $a_p = 0,5 \text{ mm}$

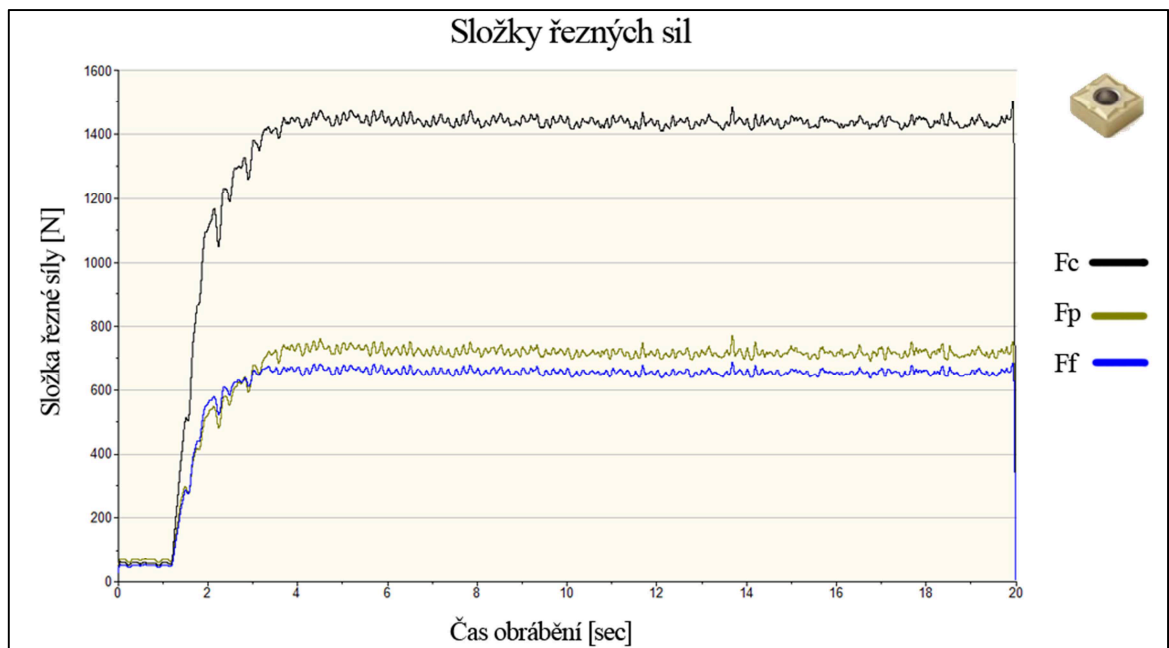
SNMG 120412 - MR3 (čtvercová destička)														
Naměřené posuvové síly F_f [N]					Naměřené pasivní síly F_p [N]					Naměřené řezné síly F_c [N]				
Ø 268					Ø 406					Ø 588				
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
260	257	258	261	302	405	408	389	394	435	587	577	585	587	605
RCMT 10T3M0 - F2 (kruhová destička)														
Naměřené posuvové síly F_f [N]					Naměřené pasivní síly F_p [N]					Naměřené řezné síly F_c [N]				
Ø 243					Ø 434					Ø 617				
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
234	241	243	249	250	432	446	447	459	386	610	623	629	645	578



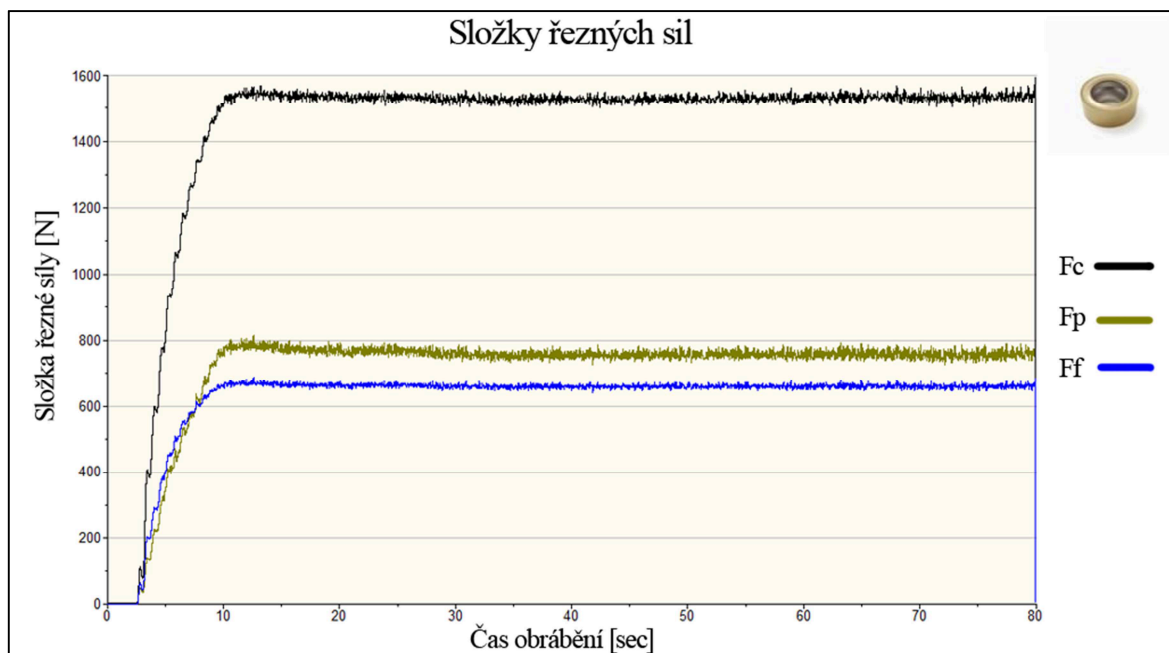
Graf 4.14 – Srovnání řezných složek (střední hodnoty) pro $a_p = 0,5 \text{ mm}$

Z naměřených výsledků lze vyvodit, že při obrábění materiálu Inconel 625 s nastavenými řeznými podmínkami řezná rychlost $v_c = 40 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, posuv na otáčku $f = 0,3 \text{ mm}$, $a_p = 0,5 \text{ mm}$ má nejmenší vliv síla posuvová. Největší vliv má řezná složka síly. Z grafu 4.14 lze jasně vidět, že při srovnání čtvercové a kruhové destičky dosahuje menších hodnot řezných složek sil čtvercová vyměnitelná destička a to do 8 minut obrábění. Potom z důvodu opotřebení a dalších vlivů síly začínají růst. Kruhová destička naopak vykazuje, že při obráběním delším, jak 8 minut se její složky řezných sil výrazně zmenšují, to je nejspíše způsobeno geometrií vyměnitelné destičky. Z grafu lze ještě vidět, že hodnoty sil posuvových jsou ve prospěch kruhové destičky, to je zapříčiněno menší plochou záběru nástroje.

Na následujících grafech jsou zobrazeny průběhy složek řezných sil pro hloubku řezu $a_p = 1,5 \text{ mm}$ z programu DynoWare. Řezná síla poskočila zhruba o 1000 N. Proces obrábění má dynamický průběh a vzniká oddělováním třísky z povrchu obráběného materiálu.



Graf 4.15 – Řezné složky síly čtvercové destičky při $a_p = 1,5 \text{ mm}$

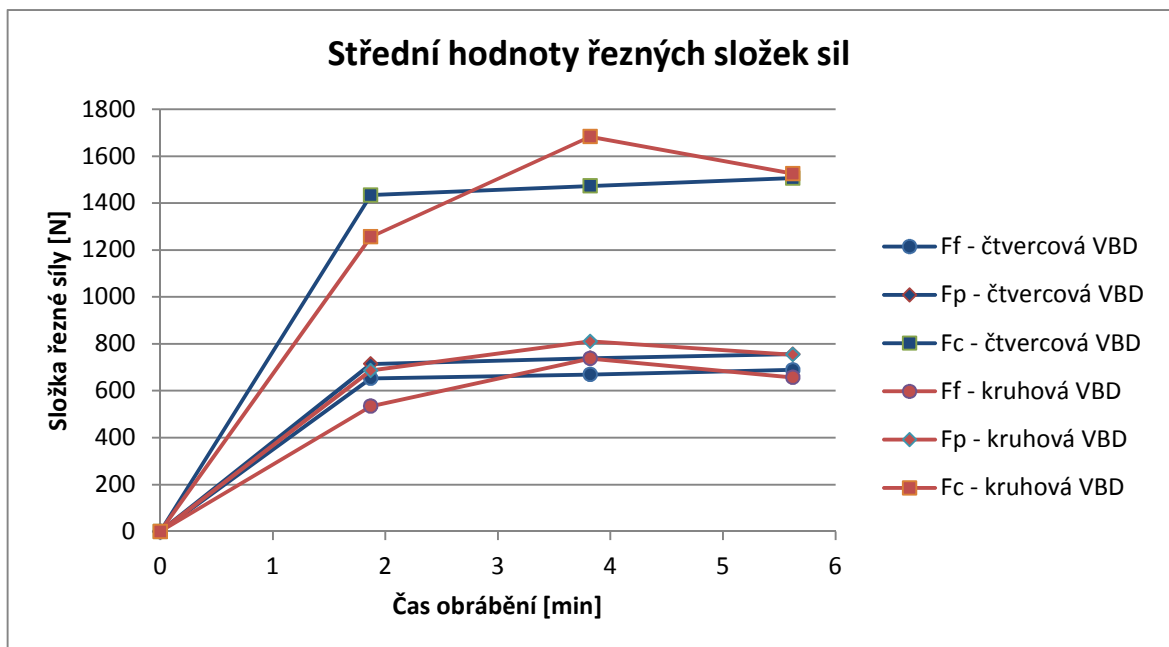


Graf 4.16 – Řezné složky síly kruhové destičky při $a_p = 1,5 \text{ mm}$

Tab. 4.6 – Naměřené zatěžující síly pro $a_p = 1,5 \text{ mm}$

SNMG 120412 - MR3 (čtvercová destička)														
Naměřené posuvové síly F_f [N]					Naměřené pasivní síly F_p [N]					Naměřené řezné síly F_c [N]				
Ø 670					Ø 736					Ø 1471				
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
653	669	689			714	739	756			1434	1473	1506		

RCMT 10T3M0 - F2 (kruhová destička)														
Naměřené posuvové síly F_f [N]					Naměřené pasivní síly F_p [N]					Naměřené řezné síly F_c [N]				
Ø 643					Ø 750					Ø 1488				
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
534	737	657			686	810	754			1256	1683	1525		





Graf 4.17 – Srovnání řezných složek (střední hodnoty) pro $a_p = 1,5 \text{ mm}$

V druhém prováděném měření, byly nastaveny tyto řezné podmínky: řezná rychlost $v_c = 40 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, posuv na otáčku $f = 0,3 \text{ mm}$, hloubka řezu $a_p = 1,5 \text{ mm}$. Řezná složka síly je větší, to je způsobeno větší hloubkou řezu. Zatímco u kruhové destičky průběh sil stoupá a zhruba po 4 minutách obrábění mírně klesá, tak u destičky čtvercové je průběh sil relativně lineární. Hlavní změna nastala u řezné složky síly posuvové a pasivní. Pasivní síla poklesla a posuvová se zvětšila oproti prvnímu měření. To je dáno zvětšujícím se úhlem κ , viz kapitola 2.6.1, Obr. 2.8.

5. Technicko – ekonomické zhodnocení

Technicko – ekonomické zhodnocení bylo provedeno pro ceny destiček a na základě odebraného materiálu. Limitní hodnota množství odebraného materiálu byla stanovena na $V_c = 100\,000\text{ mm}^3$ a životnost destičky byla stanovena k tomu, že se na čele vytvořil žlábek, kritériem byla šířka žlábků $KB = 600\ \mu\text{m}$.

Tab. 5.1 – Ceny vyměnitelných břitových destiček

Výrobce	Označení destičky		Cena [Kč/ks]
Seco Tools s.r.o.	SNMG 120412 - MR3		294
Seco Tools s.r.o.	RCMT 10T3M0 - F2		211

Výpočty, které byly použity pro zjištění odebraného materiálu a času obrábění:

Strojní čas obrábění

$$T_c = \frac{L}{f \cdot n} \quad (12)$$

Kde: L - délka obráběné části

Velikost odebraného materiálu

$$Q = v_c \cdot a_p \cdot f \quad (13)$$

Tab. 5.2 – Čas a objem odebraného materiálu pro $KB = 600\ \mu\text{m}$

VBD	T [min]	V [mm ³]
SNMG 120412 - MR3	3,82	68760
RCMT 10T3M0 - F2	1,85	33300

Počet destiček pro SNMG 120412 - MR3:

$$ks = V_c / V$$

$$ks = 100000 / 68760$$

$$ks = 1,45 \rightarrow 2$$

Kde: V_c – limitní hodnota objemu

V – hodnota odebraného materiálu

Počet destiček pro RCMT 10T3M0 - F2:

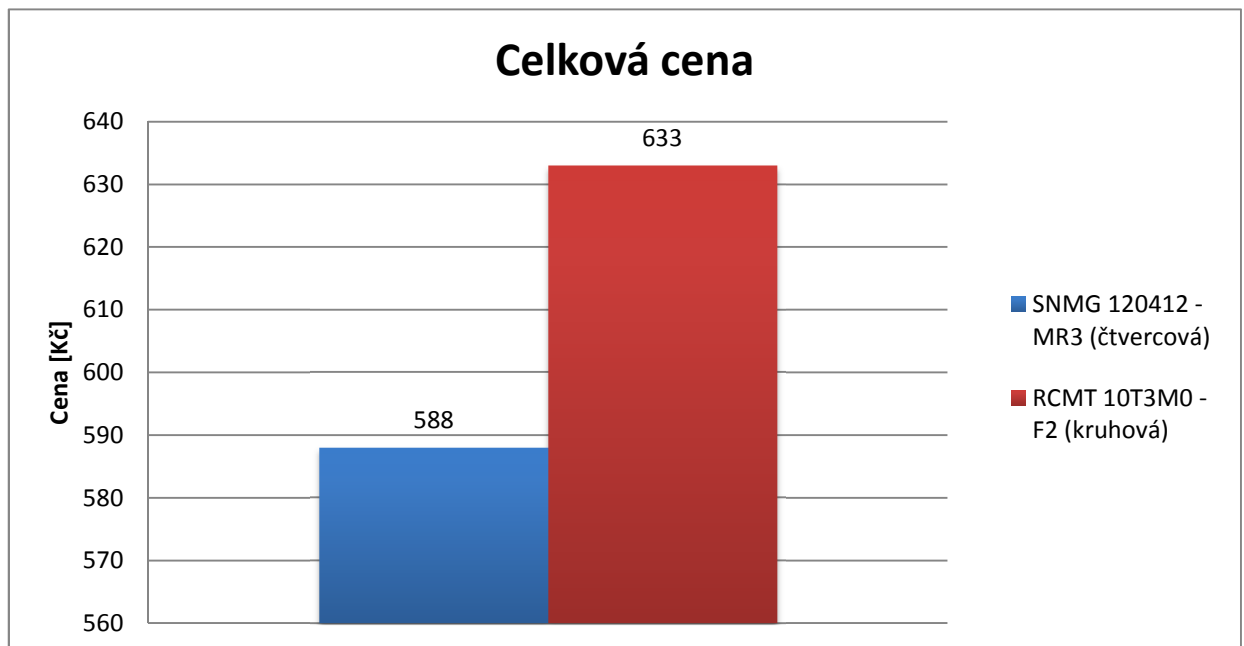
$$k_s = V_c/V$$

$$k_s = 100000/33300$$

$$k_s = 3,00 \rightarrow 3$$

Kde: V_c – limitní hodnota objemu

V – hodnota odebraného materiálu



Graf 5.1 – Srovnání celkové ceny destiček

Z grafu 5.1 lze vyčíst, že celkovou nejnižší cenu pro odebrání materiálu $V_c = 100\,000\text{ mm}^3$, dosáhla destička SNMG 120412 - MR3 a to ceny 588 Kč. Druhá destička kruhová RCMT 10T3M0 - F2 dosáhla celkové ceny 633 Kč. Z tohoto pohledu je výhodnější destička čtvercová, jelikož disponuje 8 řeznými hranami, kdežto kruhová pouze 6 hranami. Výhodnější je tedy čtvercová břitová destička. Musí se ale brát i zřetel na hmotnost destičky a tedy množství použitého slinutého karbidu pro výrobu jedné destičky. Čtvercová destička váží 100 g a kruhová destička pouze 30 g.

Závěr

Diplomová práce se zabývala porovnáním dvou vyměnitelných břitových destiček ze slinutého karbidu pro operaci soustružení těžkoobrobitelného materiálu. Byly vybrány destičky od jednoho výrobce se stejným povlakem a ze stejného materiálu. První destička čtvercová s označením SNMG 120412 - MR3 a druhá kruhová s označením RCMT 10T3M0 - F2 od firmy Seco Tools s.r.o. Specificky pro obrábění byl zvolen materiál Iconel 625. Tento materiál spadá do skupiny ISO S a je niklovou superslitinou, pro kterou je typická dlouhodobá pevnost a odolnost proti korozi při zvýšených teplotách. Rádus špičky u čtvercové destičky byl 1,2 mm a u kruhové byl 5 mm.

Pro posouzení a vyhodnocení experimentu byly jako hodnotící kritérium zvoleny hodnoty parametrů drsnosti R_a a R_z . Dále byl sledován průběh opotřebení a silové zatížení v závislosti na měnícím se úhlu nastavení hlavního ostří κ_r .

Soustružení bylo realizováno na dostatečně tuhém CNC soustruhu Mori Seiki NLX2500 a bez použití procesní kapaliny. Řezná rychlost a posuv na otáčku byly konstantní, měnila se pouze hloubka řezu. Drsnost povrchu byla změřena pomocí přístroje na měření drsnosti SurfTest SJ – 210. Jednotlivé snímky opotřebení nafotil binokulární stereomikroskop s připojenou digitální kamerou. Průběhy složek řezných sil se naměřily pomocí stacionárního tříosložkového dynamometru KISTLER 9129AA s příslušnou měřicí soustavou.

Naměřené výsledky byly zpracovány do přehledných grafů a tabulek. Nejlepších výsledků parametru drsnosti dosáhla kruhová destička. Jak při hloubce řezu $a_p = 0,5$ mm, tak i $a_p = 1,5$ mm, její parametr drsnosti R_a se pohyboval okolo hodnoty 100 μm a parametr R_z kolem hodnoty 600 μm . Z hlediska drsnosti povrchu je za daných řezných podmínek rozhodně výhodnější kruhová destička před čtvercovou. Při sledování opotřebení byl brán zřetel na fakt, že při obrábění slitin na bázi niklu dochází k opotřebení ve tvaru vrubu v místě, kde nástroj vychází ze záběru, tedy na hřbetu nástroje. Tento vrub se v experimentu neprojevil, díky správně zvolené řezné geometrii. Úhel nastavení hlavního ostří byl menší nebo rovný 45° . Dispozice velkorádusové kruhové destičky je, že při určité hloubce řezu má jiný úhel nastavení hlavního ostří κ_r , kdežto čtvercová destička má hlavní úhel vždy 45° .

Velikost opotřebení na hřbetu destičky VB_c dosáhla menších hodnot kruhová destička. Nicméně se projevilo významně opotřebení na čele destičky ve tvaru žlábků, při hloubce řezu 1,5 mm. Pro toto opotřebení bylo určeno jako hodnotící kritérium $KB = 600 \mu\text{m}$. Navzdory tomu, že kruhová destička vykazuje lepší hodnoty opotřebení na hřbetu destičky, tak u opotřebení na čele se čtvercová destička jeví jako výhodnější volba. To je podloženo tím, že hodnoty $KB = 600 \mu\text{m}$ dosáhla čtvercová destička při čase obrábění $T = 3 \text{ min}$ a kruhová destička stejného opotřebení dosáhla už při $T = 1,5 \text{ min}$.

Jako druhé doplňující měření bylo zvoleno měření jednotlivých složek řezných sil. Z programu DynoWare byly odečteny hodnoty složek řezných sil F_f síla posuvová, F_p síla pasivní a F_c síla řezná. Z vypočtených středních hodnot byly sestrojeny grafy, které ukazují závislost řezných sil na čase obrábění. Při měření silového zatížení bylo zjištěno, že rozdílné geometrie mají vliv na jednotlivé složky řezné síly. U prvního měření se tyto rozdíly projeví minimálně, naopak u druhého měření s $a_p = 1,5 \text{ mm}$ bylo možné pozorovat, jak pasivní síla poklesla a posuvová se zvětšila oproti prvnímu měření. To je dáno zvětšujícím se úhlem κ_r . Při zvětšené hloubce řezu se kruhová destička dostala do relativně menších hodnot řezných sil.

Na závěr diplomové práce bylo provedeno technicko – ekonomické zhodnocení jednotlivých vyměnitelných břitových destiček. Výhodnější je destička čtvercová SNMG 120412 - MR3, která obrobí stejně velké množství materiálu za nižší cenu 588Kč.

Použitá literatura

- [1] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2006. ISBN 80-214-2374-9
- [2] Korozivzdorné oceli jako konstrukční materiály. 2010. *MM průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/korozivzdorne-oceli-jako-konstrukcni-materialy.html>
- [3] Oceli a slitiny. *Vysokopevné a vysokolegované oceli a slitiny*. [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/files/01_pm_vyskopevne_a_vysokolegovane_oceli_a_slitiny_ni_a_co.pdf
- [4] ISO M Korozivzdorné oceli. 2012. *Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece_materials/iso_m_stainless_steel/pages/default.aspx
- [5] HEYMAN [online]. 2003. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: http://www.heyman.cz/media/useruploads/files/cz/technische_angaben/korozivzdorne_oceli.pdf?f=1
- [6] Precipitační vytvrzování nerezových ocelí – Bodycote plc. 2014. *Bodycote* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: <http://www.bodycote.cz/cs-CZ/services/heat-treatment/solution-and-age/stainless-steels.aspx>
- [7] Korozivzdorné oceli jako konstrukční materiály. 2003. *MM průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/korozivzdorne-oceli-jako-konstrukcni-materialy-2-2-2.html>
- [8] Korozivzdorné materiály – základní typy ocelí a doporučení pro jejich svařitelnost. 2014. *Konstrukce* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/korozivzdorne-materialy-zakladni-typy-oceli-a-doporuceni-pro-jejich-svaritelnost/>

- [9] Speciální oceli - Duplexní oceli. 2015. *Věda hrou* [online]. [cit. 2015-05-13].
Dostupné z: <http://ebook.veda-hrou.cz/cms/17-kapitola-7-specialni-oceli-duplexni-oceli.html>
- [10] Materials Research - Age-hardening of Ti-35Nb-7Zr-5Ta alloy for orthopaedic implants. 2007. *SciELO - Scientific Electronic Library Online* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392007000300013
- [11] Moderní obrábění nerezových ocelí. 2014. *MM průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-obrabeni-nerezovych-oceli.htm>
- [12] *Obrobitelnost nerezových ocelí* [online]. 2008. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/obrobitelnost-nerezovych-ocel>
- [13] NESLUŠAN, Miroslav a Andrej CZÁN. 2001. *Obrábanie titánových a niklových zliatin*. Žilina: EDIS. ISBN 80-7100-933-4.
- [14] *Charakteristika korozivzdorných ocelí* [online]. 2004. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/charakteristika_korozivzdornych_oceli2.pdf
- [15] ZHB. [2005]. *Hoffman Group* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: https://www.hoffmann-group.com/CZ/cs/hot/fileadmin/user_upload/1_International/catalog/en/ZHB/ZHB.pdf
- [16] LOSERTOVÁ, Monika. 2013. *Úvod do nauky o materiálu* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné také z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/637/soubory/KOVYII_Ni_VT_IMC.pdf
- [17] BRADLEY, Elihu F. *Superalloys: A Technical Guide*. ASM International, 1989. 280 s. ISBN-10 0871703270.
- [18] *Materiálový list Inconel 625 W*. Nr. 2.4856.[2012]. [cit. 2015-05-13].

- [19] NL soustruhy v praxi. 2005 *MM průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nl-soustruhy-v-praxi.html>
- [20] SECO TOOLS CZ, s.r.o. *Soustružení* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: http://www.secotools.com/CorpWeb/Downloads/seconews2_2011/MN/turning/Turning%202012_CZ_LR.pdf
- [21] SECO TOOLS, s.r.o. *Turn Up the Heat* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: https://www.secotools.com/CorpWeb/Products/Turning/General_turning/st20086176_ts2000_ts2500_gb_lr.pdf
- [22] Mitutoyo Česko, s.r.o. *Drsnoměry měření jakosti povrchu* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: <http://www.microtes.cz/Mitutoyo/drsnomery-SJ210aSJ301-M.pdf>
- [23] Drsnoměr SJ 210 - M&B Calibr, spol. s.r.o. *M&B Calibr, spol. s.r.o.* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: <http://www.mbcalibr.cz/prodej-produkt-3058-drsnomer-sj-210.html>
- [24] *Průručka pro technology: Proces obrábění kovů - životnost nástroj* [online]. 2012. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: <http://www.cnckonstrukce.cz/clanek-118/prirucka-pro-technology-proces-obrabeni-kovu-zivotnost-nastroju.html>
- [25] Tool life. 2012. *Sandvik Coromat* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general_turning/how-to-achieve-good-component-quality/tool-life/pages/default.aspx
- [26] KISTLER GROUP. 2009. *Cutting Force Measurement* [online]. [cit. 2015-05-13]. ISBN 300-400e-07.09. Dostupné z: <http://www.technovolt.ro/cataloage/kistler/DINAMOMETRE%20%20FIXE%20SI%20ROTATIVE.pdf>
- [27] BRYCHTA, Josef. 2007. *Nové směry v progresivním obrábění* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 1 CD-R. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [28] KISTLER GROUP. *Typical Signal Curves for Turning and Facemilling*. [cit. 2015-05-13].

- [29] Měření opotřebení nástrojů. *Měření opotřebení nástrojů*. [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_05.pdf.
- [30] ISO 3685. *Skúšanie trvanlivosti sústružnických nástrojov s jednou reznou hranou*. 1999. Slovenský ústav technickej normalizace.
- [31] TICHÁ, Š. *Strojírenská metrologie část 1*. Ostrava: VŠB-TUO Ostrava, 2006. s. 112. ISBN 80-248-0672-1
- [32] Teorie obrábění | Učíme v prostoru - Encyklopedie Drtič kamene. *Učíme v prostoru - Encyklopedie Drtič kamene | Vzdělávací 3D encyklopedie* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: http://uvp3d.cz/drtic/?page_id=2835
- [33] Mechanická zatížení a řezné geometrie při soustružnických operacích. 2015. *Řízení a údržba průmyslového podniku* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: <http://udrzbapodniku.cz/hlavni-menu/artykuly/artikul/article/mechanicka-zatizeni-a-rezne-geometrie-pri-soustruznickych-operacich/>
- [34] Popis obecné geometrie břitu řezných nástrojů. 2010. *TumliKOVO:Technologie strojího obrábění kovů* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/geometrie-britu-obecne/>
- [35] ZLÁMAL, T. *Příspěvek k obrábění Ni superslitiny a hodnocení řezivosti vybraných řezných materiálů při obrábění Alloy 625*: Disertační práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2015

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucí práce paní Ing.et Ing.Mgr. Janě Petřů, Ph.D. za cenné rady a ochotu, dále bych velice rád poděkoval panu Ing. Tomášovi Zlámalovi za umožnění a uskutečnění experimentální části a jeho velmi cenné rady při zkompletování diplomové práce.