

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Stanovení řezivosti keramických materiálů při obrábění niklové slitiny

Determination of Cuttability of Ceramic Materials for Machining of
Nickel Alloy

Student:

Bc. Jiří Kalabis

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.

Ostrava 2016

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jiří Kalabis**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: Stanovení řezivosti keramických materiálů při obrábění niklové slitiny
Determination of Cuttability of Ceramic Materials for Machining of
Nickel Alloy
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Analýza současného stavu obrábění niklových slitin.
3. Obecná charakteristika a využití keramických nástrojů.
4. Návrh postupu experimentální činnosti.
5. Zpracování výsledků a vyhodnocení.
6. Závěr a doporučení.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] HAVRILA, M.; ZAJAC, J.; BRYCHTA, J.; JURKO, J. *Top trendy v obrábění, I. část – Obráběné materiály*. Žilina : Media/ST, s.r.o. Žilina, 2006. 205 s. ISBN 80-968954-2-7.
[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 obrábění*. 1. vyd. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, EDIS, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.


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

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.**


Datum zadání: 11.12.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016





doc. 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 bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 16.5.2016


Kalab
.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou 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 nevydělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské 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 – bakalářskou 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 : 16.5.2016


.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Jiří Kalabis

Adresa trvalého pobytu autora práce: Čechovická 26, Prostějov 796 01

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

KALABIS, J. *Stanovení řezivosti keramických materiálů při obrábění niklové slitiny*. Ostrava: katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2016, 74 s. Diplomová práce, vedoucí: Ing. Tomáš ZLÁMAL, Ph.D.

Tato práce se zabývá porovnáním řezivosti keramických řezných materiálů při obrábění niklové slitiny. V teoretické části práce je provedena analýza současného stavu obrábění niklových slitin. Pro experimentální obrábění a stanovení řezivosti řezných keramických nástrojů byla vybrána niklová slitina Alloy 625 dle ASM 5666F (W.Nr. 2.4856). Jedná se o komplexně legovanou slitinu na bázi Ni – Cr běžně používanou pro výrobu komponent v chemickém, petrochemickém a hlavně leteckém průmyslu. Jako řezný materiál byly použity různé druhy řezné keramiky. Stanovení řezivosti bylo provedeno přes měření opotřebení u 3 různých typů keramických destiček. Hlavním cílem práce bylo provést analýzu současného stavu obrábění niklových superslitin a stanovení velikosti opotřebení keramických nástrojů při operaci hrubování a dokončování a na základě výsledků experimentů stanovit nejvhodnější typ řezné keramiky pro obrábění niklových slitin.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

KALABIS, J. *Determination of Cuttability of Ceramic Materials for Machining of Nickel Alloy*. Ostrava: Department of machining, assembling and engineering metrology, Faculty of Mechanical Engineering VŠB – Technical University of Ostrava, 2016, 74 p. Master thesis, head: Ing. Tomáš ZLÁMAL, Ph.D.

This thesis is focused on the comparison of cuttability of ceramic materials for machining of nickel alloy. The theoretical part describes the current state analysis of machining nickel alloy. For experimental machining and determination of cuttability of ceramic materials was used nickel alloy (Alloy 625 ASM 5666F, W.Nr. 2.4856). It is a complex iron-based alloy Ni - Cr commonly used for manufacturing components in the chemical, petrochemical and especially the aerospace industry. There were used different types of ceramic materials as a machining tool. Cuttability determination was made through wear measurements on 3 different types of ceramic tools. The main aim was current state analysis of machining nickel alloy and wear determination of ceramic tools, based on the results of the experimental measurements was determined the best tool for machining of the nickel alloys.

Obsah diplomové práce

Seznam použitých zkratk a symbolů.....	8
Úvod.....	11
1. Analýza současného stavu obrábění niklových slitin.....	12
1.1 Obrobitelnost niklových slitin.....	12
1.1.1 Vlastnosti niklových slitin.....	13
1.1.2 Chemické složení Ni slitin.....	14
1.1.3 Struktura Ni slitin.....	15
1.1.4 Fyzikální a mechanické vlastnosti Ni slitin.....	16
1.2 Technické a technologické požadavky pro efektivní proces obrábění Ni slitin.....	16
1.2.1 Požadavky na stroje pro obrábění Ni slitin.....	17
1.2.2 Požadavky na řezné nástroje pro obrábění Ni slitin.....	18
1.2.3 Obrábění nástroji ze slinutých karbidů.....	18
1.2.4 Obrábění nástroji z řezné keramiky.....	21
1.3 Kvalita obrobeného povrchu.....	23
2. Řezné materiály pro obrábění Ni slitin.....	24
2.1 Slinuté karbidy.....	25
2.1.1 Povlakování SK.....	26
2.2 Řezná keramika.....	27
2.2.1 Technické použití keramických materiálů.....	27
2.2.2 Použití řezné keramiky při obrábění.....	28
2.2.3 Rozdělení a značení řezné keramiky.....	29
2.2.4 Povlakování řezné keramiky.....	29
2.3 Rozdělení řezných materiálů dle ISO 513.....	29
2.4 Řezná geometrie nástrojů pro obrábění Ni slitin.....	30
3. Experimentální část diplomové práce.....	32
3.1 Niklová slitina Alloy 625.....	32
3.1.1 Chemické složení Alloy 625.....	32

3.1.2	Mechanické a fyzikální vlastnosti Alloy 625	33
3.2	Volba obráběcího stroje	33
3.3	Volba řezných nástrojů a řezných materiálů	34
3.3.1	Nožový držák	36
3.3.2	Nástroje z řezné keramiky	36
3.4	Geometrie řezných nástrojů	38
3.5	Volba řezných podmínek	40
3.6	Blokové schéma experimentu	41
4.	Opotřebení a trvanlivost řezných nástrojů	42
4.1	Mechanismy a kritéria opotřebení nástrojů	42
4.1.1	Vliv strategie obrábění na opotřebení břitu	45
4.1.2	Kvantifikace opotřebení břitu nástroje	46
4.1.3	Vliv opotřebení na trvanlivost nástroje	51
4.2	Vliv opotřebení na kvalitu obrobeného povrchu	57
4.2.1	Drsnost povrchu a její závislost na parametrech obrábění	58
4.2.2	Stanovení drsnosti povrchu při obrábění slitiny Alloy 625	59
4.2.3	Zhodnocení dosažené kvality povrchu – operace dokončování	64
5.	Technicko – ekonomické zhodnocení	65
5.1	Počtu břitů na kruhové destičce při hloubce řezu $a_{p1} = 2$ mm	65
5.2	Ekonomické zhodnocení pro operaci hrubování	66
	Závěr	68
	Seznam použité literatury	71

Seznam použitých zkratk a symbolů

Značka	Název	Jednotka
A	tažnost	[%]
Aα	plocha hřbetu nástroje	[-]
A'α	plocha vedlejšího hřbetu nástroje	[-]
Aγ	plocha čela nástroje	[-]
Al₂O₃	oxid hlinitý	[-]
CC670	označení nástroje dle výrobce	[-]
CC6060	označení nástroje dle výrobce	[-]
CC6065	značení nástroje dle výrobce	[-]
CrC	karbid chromu	[-]
CoO	oxid kobaltu	[-]
CNC	computer numeric control – číslicové řízení	[-]
CVD	chemical vapor deposition – chemické povlakování	[-]
FeC	karbid železa	[-]
F_p	pasivní složka řezné síly	[-]
HB	tvrdost dle Brinella	[-]
HRSA	heat resistant alloys – žáruvzdorné slitiny	[-]
KT	hloubka žlábků	[μ m]
KNB	kubický nitrid bóru	[-]
KB	šířka žlábků	[mm]
MoC	karbid molybdenu	[-]
M₂₃C₆	sekundární karbidy	[-]
M₆C	sekundární karbidy	[-]
M₇C₃	sekundární karbidy	[-]
NbC	karbid niobu	[-]
NO	oxid dusnatý	[-]
P_B	počet břitů	[-]
P_{VBD}	počet VBD	[-]
PVD	physical vapor deposition – fyzikální nanášení povlaku	[-]
PKD	polykrystalický diamant	[-]
Q	množství odebraného materiálu	[cm ³]
Q_c	požadované množství odebraného materiálu	[cm ³]
Ra	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného povrchu	[μ m]

R_m	mez pevnosti	[MPa]
RNGN	označení tvaru destičky dle ISO	[-]
RO	rychlořezná ocel	[-]
R_{p0,2}	mez pevnosti	[MPa]
Rz	největší výška profilu	[μm]
ŘK	řezná keramika	[-]
SK	slinutý karbid	[-]
S-N-O	stroj – nástroj – obrobek	[-]
Si₃N₄	nitrid křemičitý	[-]
T	trvanlivost nástroje	[min]
TaC	karbid tantalu	[-]
TiC	karbid titanu	[-]
TiN	nitrid titanu	[-]
TiCN	titan-carbonitrid	[-]
VB	opotřebení na hřbetě	[μm]
VB_B	opotřebení přímé části ostří	[μm]
VB_{Bmax}	maximální opotřebení	[μm]
VB_C	opotřebení v oblasti špičky nástroje	[μm]
VB_N	opotřebení ve formě vrubu	[μm]
VB_{krit}	kriteriální opotřebení nástroje	[μm]
VBD	vyměnitelná břitová destička	[-]
VR	radiální opotřebení	[μm]
WC	karbid wolframu	[-]
Z	životnost nástroje	[min]
a_p	hloubka řezu	[mm]
a_{p1}	hloubka řezu – operace hrubování	[mm]
a_{p2}	hloubka řezu – operaci dokončování	[mm]
C_P	měrné teplo	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
C_T	konstanta v Taylorově vztahu	[-]
C_v	konstanta v Taylorově vztahu	[-]
f	funkční šířka nožového držáku	[mm]
f	posuv nástroje	[mm]
i_C	průměr VBD s kruhovou geometrií	[mm]
k_u	koeficient rozšíření	[-]
l	řezná délka	[mm]

l	funkční délka nožového držáku	[mm]
L	dráha nástroje ve směru posuvu	[mm]
l_p	délka přejezdu	[mm]
l_r	základní délka profilu	[mm]
l_n	délka nájezdu	[mm]
l_n	vyhodnocovaná délka profilu	[mm]
m	exponent v Taylorově vztahu	[-]
n	počet břitů	[-]
s	tloušťka vyměnitelné břitové destičky	[mm]
s(x)	směrodatná odchylka	[-]
t_{As}	strojní čas	[min]
u_A	standartní nejistota typu A	[-]
u_B	standartní nejistota typu B	[-]
u_C	kombinovaná standartní nejistota	[-]
v_c	řezná rychlost	[m·min ⁻¹]
v_f	posuvová rychlost	[m·min ⁻¹]
\bar{x}	aritmetický průměr	[-]
x_i	jednotlivé naměřené hodnoty veličiny x	[μm]
α	teplotní součinitel roztažnosti	[K ⁻¹]
α_o	úhel hřbetu nástroje v ortogonální rovině	[°]
γ_o	úhel čela v ortogonální rovině	[°]
γ	základní matrice	[-]
γ'	sekundární vytvrzující fáze gama prime	[-]
γ''	intermetalická fáze	[-]
κ_r	úhel nastavení hlavního ostří	[°]
λ	tepelná vodivost	[W·m ⁻¹ K ⁻¹]
λ_s	úhel sklonu ostří	[°]
λ_c	profilový filtr	[mm]
ρ	hustota	[g·cm ⁻³]

Úvod

V současné době můžeme pozorovat obrovský rozmach nových technologií v průmyslovém odvětví. Tento trend se do značné míry týká i oblasti strojírenství. V souvislosti s technickým rozvojem ve strojírenství vystupují do popředí především nároky kladené na zlepšování užitečných vlastností a parametrů vyráběných součástí. Zvyšující se nároky a požadavky na kvalitu, spolehlivost a především životnost vyráběných součástí mají za následek vývoj nových materiálů se špičkovými vlastnostmi. V poslední době se ve strojírenství rozšířil pojem „superslitiny“, jedná se o materiály, které jsou žárovečné, žáruvzdorné a korozivzdorné, a to i za zvýšených teplot.

Superslitiny jsou kategorií slitin, pro které je charakteristická poměrně vysoká pevnost i houževnatost, které si tyto materiály udržují i při zvýšených teplotách, vysoká odolnost vůči oxidačním a korozním poruchám za teplot vyšších než 750° C. Tyto specifické vlastnosti superslitin do značné míry převyšují vlastnosti běžně používaných ocelí. Avšak díky jejich unikátním a žádoucím vlastnostem patří superslitiny mezi materiály, které mají v porovnání s jinými kovovými materiály za daných řezných podmínek zhoršenou obrobiteľnost.

Pojem zhoršená obrobiteľnost je v praxi často spojován právě s obráběním superslitin, protože je v mnoha případech nelze obrábět jako běžné oceli. Zvýšené jsou nejen nároky na samotnou technologii výroby, ale i na nástrojový materiál, řeznou geometrii, řezné podmínky a prostředí. Příčinou toho jsou fyzikální a mechanické vlastnosti, které mají díky chemickému složení a složité mikrostruktuře. Zhoršená obrobiteľnost superslitin negativně ovlivňuje proces obrábění, zvyšuje namáhání soustavy S-N-O, zhoršuje kvalitu obráběných součástí a v některých případech i produktivitu a hospodárnost výroby. Z pohledu chemického složení superslitin se jedná o slitiny na bázi kobaltu, niklu a železa. Díky svým výjimečným vlastnostem, kterými se výrazně liší od ostatních konstrukčních materiálů, našla kategorie superslitin široké uplatnění v mnoha průmyslových směrech jako je energetika, chemický průmysl a v dnešní době nejvíce v leteckém průmyslu.

Pro experimentální obrábění a stanovení řezivosti vybraných řezných materiálů byla zvolena niklová slitina Alloy 625 dle ASM 5666F (W.Nr. 2.4856). Jedná se o komplexně legovanou slitinu na bázi Ni – Cr běžně používanou pro výrobu komponent v chemickém, petrochemickém a hlavně leteckém průmyslu.

Hlavním cílem práce bude provést analýzu současného stavu obrábění niklových superslitin, stanovit velikost opotřebení keramických nástrojů při operaci hrubování a dokončování. Na základě výsledků experimentální činnosti bude stanoven nejvhodnější typ řezné keramiky pro obrábění niklových slitin. [2]

1. Analýza současného stavu obrábění niklových slitin

1.1 Obrobitelnost niklových slitin

Díky technickému pokroku, kterým v poslední době prochází, je technologie třískového obrábění jedním z nejrozšířenějších způsobů výroby v oblasti strojírenství. Obrobitelnost je v oblasti technologie obrábění kovů velice rozšířených pojem. Z hlediska technologie obrábění je obrobitelnost jednou z nejdůležitějších vlastností materiálu. Lze ji definovat jako míru schopnosti daného konkrétního materiálu být zpracován některou z metod obrábění. Je hlavním činitelem, který ovlivňuje volbu řezných podmínek pro funkci nástroje při všech metodách. Obrobitelnost materiálu závisí na mnoha faktorech: [3]

- způsob výroby a tepelné zpracování obráběného materiálu,
- mikrostruktura obráběného materiálu,
- chemické složení obráběného materiálu,
- metoda obrábění,
- řezné podmínky,
- řezné prostředí,
- geometrie nástroje,
- druh a vlastnosti nástrojového materiálu.

Superslitiny můžeme všeobecně klasifikovat jako materiály se špatnou obrobitelností, tedy tzv. těžkoobrobitelné. Obrábění niklových slitin se vyznačuje použitím nízkých řezných rychlostí a hloubek řezu, tím se však prodlužuje doba obrábění, což je obecně ve strojírenství považováno za neefektivní obrábění, protože se zvyšuje potřebný čas na výrobu a s tím spojené náklady. Kromě toho nízká tepelná vodivost těchto slitin v konečném důsledku vede k lokálnímu zvýšení teploty v místě řezu. To má za následek zvýšení opotřebení nástroje, čímž se zkracuje jeho životnost.

Proces obrábění superslitin doprovází celá řada negativních jevů: [1]

- udržují si vysokou pevnost i během obrábění, kdy je v místě řezání vysoká teplota vzhledem k jejich žárupevnosti,
- u niklových slitin během obrábění dochází ke zpevňování, což je hlavní faktor přispívající k vytváření výrazné drážky na řezné hraně, tedy v místě, kde končí kontakt nástroje s obrobkem,
- nástrojový materiál je vystavený vysokému abrazivnímu účinku vzhledem k přítomnosti velmi tvrdých karbidů v obráběném materiálu,

- obrábění superslitin běžnými nástrojovými materiály je doprovázeno výskytem vysokých teplot, které vyvolávají chemické reakce vedoucí k difuznímu opotřebení nástroje,
- pro obrábění niklových a titanových slitin je často charakteristické vytvoření nárůstku na řezné hraně, což vede k vytvoření žlábků na čele nástroje,
- u niklových slitin dochází k vytvoření zpevněné třísky, která se obtížně formuje, to vede k vytváření kráteru v místě kontaktu třísky a nástroje,
- špatná tepelná vodivost niklových a titanových slitin má za následek generování vysokých teplot na špičce nástroje a také vysoký teplotní gradient v nástroji.

1.1.1 Vlastnosti niklových slitin

V současné době představují superslitiny tak rozšířenou oblast, že je obtížné vytvořit jejich obecnou klasifikaci. Díky svému chemickému složení a struktuře mají niklové slitiny řadu specifických vlastností, které určují oblasti jejich použití. Následující popis je zaměřen na jejich charakteristické mechanické vlastnosti.

Korozivzdorné niklové slitiny jsou vhodné především pro nejtěžší korozní podmínky, které panují např. na mořském dně. Chemické složení korozivzdorných slitin ovlivňuje nejen jejich mechanické vlastnosti, odolnost proti korozi, ale také oblast jejich použití. Pro redukční a oxidační působení prostředí byly vyvinuty slitiny na bázi Ni-Mo-Cr s označením Hastelloy. Tyto slitiny jsou odolné proti působení kyselin, využívají se například pro nádrže na moření. Názvem Inconel jsou označovány korozivzdorné slitiny na bázi Ni-Cr. Jejich chemické složení je min. 72 % Ni, 15 % Cr, 8 % Fe. Tyto slitiny jsou vysoce odolné vůči působení účinků mořské vody a uplatňují se především ve výrobě součástí namáhaných za tepla. Korozivzdorné superslitiny se běžně používají ve farmaceutickém, těžebním a energetickém průmyslu.

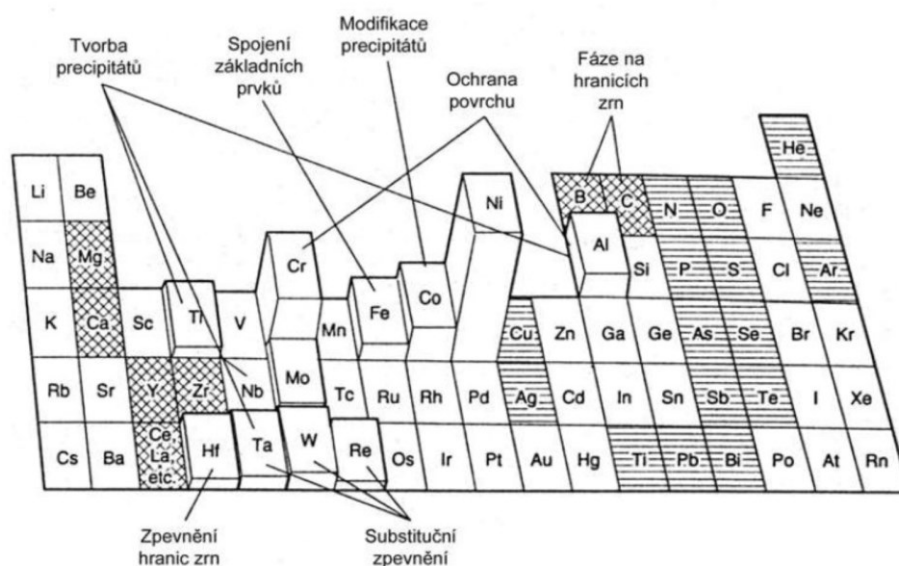
Slitiny na bázi Ni-Cr nebo Ni-Cr-Fe jsou v technické praxi označovány jako **žáruvzdorné** niklové superslitiny. Jejich základním přísadovým prvkem je chrom a vyznačují se hlavně zvýšenou odolností proti chemickým vlivům. Obsah Cr se pohybuje v rozmezí od 15 do 30 %. Struktura žáruvzdorných slitin je zpevněna pouze substitučně, přičemž zaručuje odolnost vůči korozi za vysokých teplot až do 1150° C. Naopak tyto slitiny mají za vyšších teplot příliš velkou rychlost tečení a nejsou schopny dlouhodobě přenášet vnější napětí.

Žárupevné niklové superslitiny jsou opět na bázi tuhého roztoku Ni-Cr. Hlavními přísadovými prvky jsou Al a Ti, které tvoří důležitou vytvrzující fázi γ' Ni₃(Al, Ti). Tato fáze je nejdůležitějším měřítkem žárupevnosti. Žárupevné superslitiny mohou být vystaveny

mechanickému zatěžování při teplotě až 950° C. Při dolegování 2 až 11 % Mo a 2 až 10 % W odolávají teplotám až kolem 1100° C. Čím více je ve struktuře jemných precipitátů fáze γ' , tím více roste žáruvzdornost, ale současně se zhoršuje tvárnost materiálu. Velmi často se s žáruvzdornými a žárupevnými superslitinami setkáme v leteckém průmyslu, kde se pod označením Nimonic a Inconel používají k výrobě lopatek spalovacích turbín. [1, 2, 13]

1.1.2 Chemické složení Ni slitin

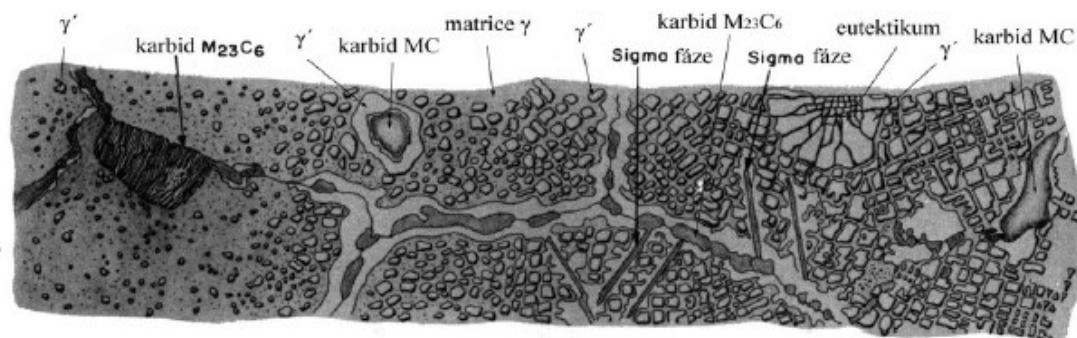
Požadované vlastnosti niklových superslitin, jako je korozivzdornost, žáruvzdornost a žárupevnost, přímo souvisejí s jejich chemickým složením. Chemické složení určuje např. míru pevnosti materiálu nebo jeho korozní odolnost vůči agresivním prostředím. Niklové superslitiny jsou tvořeny hlavně niklem (30 – 70 %) a v kombinaci s dalšími legujícími prvky tvoří základní matici γ . Nejčastěji se jedná o chrom, kobalt, hliník a další přísadové prvky jako wolfram, niob či molybden. Ne všechny superslitiny obsahují všechny tyto prvky a i jejich koncentrace se může ve struktuře lišit. Jak už bylo výše zmíněno, slitiny na bázi niklu jsou z chemického hlediska velice komplexní. Příkladové prvky mají různé účinky, které ovlivňují vlastnosti superslitin. Některé vstupují do matrice a zajišťují zde např. zvýšení pevnosti (Mo, Ta, W, Re, Nb), odolnost vůči oxidaci (Cr a Al), žáruvzdornost (Ti), fázovou stabilitu (Ni). Další funkcí přísadových prvků Ti a Al je tvorba vytvrzující fáze γ' . V současné době lze vylepšovat vlastnosti superslitin hlavně kontrolou čistoty a mikrolegováním, protože možnosti optimalizace v oblasti kombinace legujících prvků jsou již do značné míry vyčerpány. [1, 2]



Obr. 1.1 Vliv přísadových prvků na vlastnosti Ni slitin [15]

1.1.3 Struktura Ni slitin

Základní strukturu každé niklové slitiny ať už kované, či lité tvoří matrice nazývaná fáze γ (tuhý roztok Ni, Cr, Co, Mo a dalších prvků). Z předchozí kapitoly vyplynulo, že se ve slitinách na bázi niklu objevuje velké množství rozmanitých fází. Jejich výskyt závisí nejen na chemickém složení, hlavních legujících a přísadových prvcích, tepelném zpracování, ale také na pracovních podmínkách, kterým jsou vystaveny. Fáze γ tvoří matrici, která vyplňuje prostor mezi precipitáty, vykazuje menší mez kluzu, ale větší tvárnost. Mezi sekundární složky niklových superslitin patří vytvrzující fáze γ' , fáze γ'' , vyloučené primární karbidy (MC) a sekundární ($M_{23}C_6$, M_6C , M_7C_3). Fáze γ' a γ'' mají nejvýznamnější vliv na mechanické vlastnosti niklových superslitin. Fáze γ'' (Ni_3Nb) bývá označována jako intermetalická sloučenina s tetragonální strukturou, která se vyznačuje vysokou mezí kluzu, ale v porovnání s matricí je křehká. Mezi základní matricí a intermetalickou fází γ'' se vyskytuje koherentní rozhraní (podobné krystalické uspořádání), které za zvýšených teplot (600 – 800 °C) způsobuje zpomalení pohybu dislokací a zpevnění materiálu. Dalším zvyšováním teploty dochází ve struktuře niklových superslitin ke zhrubnutí jednotlivých precipitátů fáze γ'' . Čím vyšší teplota je, tím intenzivnější je tento jev. Následkem tohoto jevu dojde k propojování částic vytvrzující fáze γ'' . Nakonec dochází k raftové morfologii nebo raftingu (spojení částic fáze γ'' do řetízků nebo blokových útvarů s úplnou ztrátou koherence) a snížení meze zpevnění materiálu. [14, 15]



Obr. 1.2 Struktura superslitin [15]

1.1.4 Fyzikální a mechanické vlastnosti Ni slitin

Kategorie materiálů označovaných jako superslitiny vznikly z kovů, které byly metalurgicky dále vyvíjeny s cílem dosáhnout lepšího poměru mezi pevností a hmotností, vyšší žáruvzdornost, žárupevnost a odolnost vůči korozi. Za vývojem těchto slitin stála nutnost vytvořit materiál splňující vysoké požadavky na odolnost působení vnějších vlivů. To mělo za následek neustálé zhoršování obrobiteľnosti těchto materiálů.

Niklové slitiny mají celou řadu pozitivních užitečných vlastností, avšak vyskytují se i vlastnosti, které komplikují efektivní obrábění těchto materiálů. Mezi nejdůležitější vlastnosti těchto slitin patří:

- nízká tepelná vodivost, která má za následek vysoké teploty na břitu nástroje,
- sklon k navařování ve spojení s určitými materiály obrobků,
- sklon k vytváření nárůstku,
- vysoká pevnost ve stříhu, která vyžaduje velké řezné síly,
- sklon ke zpevňování za studena, což se projevuje ve zvýšeném namáhání nástroje, větším opotřebením břitu a většími řeznými silami.

Žáropevné slitiny neztrácejí nic na pevnosti ani při vysokých teplotách, to znamená, že i při vysokých teplotách řezání vyvíjejí velký tlak na břit. Mimoto hrozí nebezpečí, že se nejvyšší teplota vyvine v bezprostřední blízkosti břitu. Pro geometrii břitu je proto nutné zajistit vhodné rozdělení tlaku, aby se tak největší teplo rozvedlo přiměřeným způsobem po ploše čela a při obrábění těchto často abrazivních kovů byla udržena ostrost břitu.

1.2 Technické a technologické požadavky pro efektivní proces obrábění Ni slitin

Obrábění materiálů patřících do kategorie tzv. superslitin, tedy i niklových slitin, je velmi problematické a pro každou jednotlivou operaci obrábění specifické jak z hlediska použitých řezných podmínek, tak i z hlediska řezného nástroje a požadavků na obráběcí stroj. Pro efektivní proces obrábění je třeba při obrábění niklových slitin dodržet určité zásady: [1]

- tuhost soustavy stroj, nástroj, obrobek, přípravek musí být co největší, aby byly odstraněny vnitřní a samobuzené kmity,
- nevolit příliš malé hodnoty posuvu a hloubky řezu, aby nedocházelo ke zpevňování materiálu,
- volit menší mezní hodnotu opotřebením nástroje než při obrábění běžných materiálů,
- pokud to charakter operace obrábění dovolí, zajistit stálý, nepřerušovaný řez,
- nástroj je třeba dobře naostřit a nastavit vůči obrobku,
- při obrábění používat procesní kapalinu.

1.2.1 Požadavky na stroje pro obrábění Ni slitin

Mezi hlavní požadavky kladené na obráběcí stroj při obrábění těžkoobrobitelných materiálů řadíme stejně jako u jiných typů obrábění především vysokou produktivitu a dokonalou kvalitu výsledného povrchu obrobku. Ostatní požadavky, jako jsou provozní spolehlivost, trvanlivost, snadná ovladatelnost a účinnost úzce souvisejí se dvěma hlavními (výše zmíněnými) požadavky a jsou takřka samozřejmostí.

Při obrábění těžkoobrobitelných materiálů vznikají velké síly řezání, které kladou zvýšené nároky jak na nástroj, tak i na samotný stroj. Stroje využívané pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů musejí mít pevnější konstrukci, aby nedocházelo ke chvění, které negativně ovlivňuje kvalitu obrobeného povrchu. Se zvyšujícími se požadavky na kvalitu povrchu roste úměrně i potřeba použití kvalitnějšího, výkonnějšího a tužšího stroje, což má za následek zvýšení nákladů. Aby se zamezilo chvění materiálu, usiluje se o zpevnování konstrukce stroje a změny uspořádání jednotlivých částí stroje. Stejně tak se usiluje o zmenšení převisů jednotlivých komponentů stroje, ideální je uspořádání všech prvků co nejblíže revolverové hlavě [19].

Základním problémem vznikajícím při soustružení těžkoobrobitelných materiálů je působení větších řezných sil z důvodu například vyšších tvrdostí obráběných materiálů, popřípadě zvýšenou houževnatostí některých materiálů. Těmito řeznými silami působí nástroj během soustružení na obrobek. V zásadě jsou tyto síly rovny řeznému odporu, tj. odporu, který klade materiál nástroji v procesu oddělování třísky. [20]

Je třeba, aby stroj použitý pro soustružení těžkoobrobitelných materiálů disponoval dostatečným množstvím řezného výkonu, který pokryje jednak řezné síly působící na stroj, ale i další síly vznikající během obrábění. Mezi tyto síly působící na stroj při soustružení těžkoobrobitelných materiálů patří [20]:

- řezné síly,
- tíhové síly,
- pasivní odpory,
- moment hnacího členu,
- setrvačné síly,
- rozběhové a doběhové momenty pohonu.

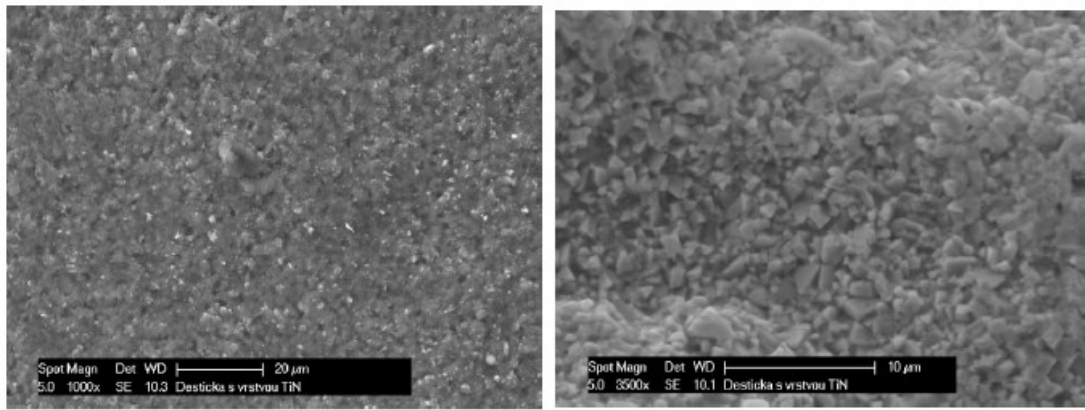
1.2.2 Požadavky na řezné nástroje pro obrábění Ni slitin

Vzhledem ke specifickým vlastnostem niklových slitin nelze použít nástroje a nástrojové materiály jako při obrábění běžných ocelí. V dnešní době je na trhu široké spektrum různých druhů řezných materiálů, avšak ne každý z nich je vhodný pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů, jako jsou niklové slitiny. Při volbě řezného nástroje má rozhodující vliv faktor jeho namáhání během obrábění. U nástroje je především požadována dobrá odolnost vůči opotřebení, vysoká pevnost a houževnatost, vysoká tvrdost za tepla, dobrá odolnost vůči teplotním šokům, chemická stabilita za vysokých teplot. Specifické jsou i požadavky na řeznou geometrii nástroje, která musí za daných řezných podmínek splňovat dostatečnou pevnost, klidný průběh obrábění bez chvění a vibrací, maximální trvanlivost. Při volbě řezné geometrie nástroje je důležité zohlednit i požadavky kladené na přesnost a kvalitu obrobeneho povrchu součásti.

Pro obrábění niklových slitin se používají nejčastěji nástroje z rychlořezné oceli a ze slinutých karbidů. Rychlořezná ocel se obvykle používá pro přerušované řezné aplikace (frézování, řezání, protahovací operace apod.), zatímco slinuté karbidy se používají hlavně pro nepřerušované řezné operace (soustružení, vrtání apod.). Prokazatelné zlepšení řezných podmínek a odolnost proti opotřebení poskytuje povlakování nástrojů ze slinutých karbidů multivrstvou (TiN+TiCN+TiN) metodou PVD. V dnešní době se stále více pro obrábění niklových slitin začíná používat nových keramických materiálů, jako je směsná keramika Al_2O_3-TiC , nitridická Si_3N_4 keramika a SiC whiskery vyztužené Al_2O_3 keramikou. [18]

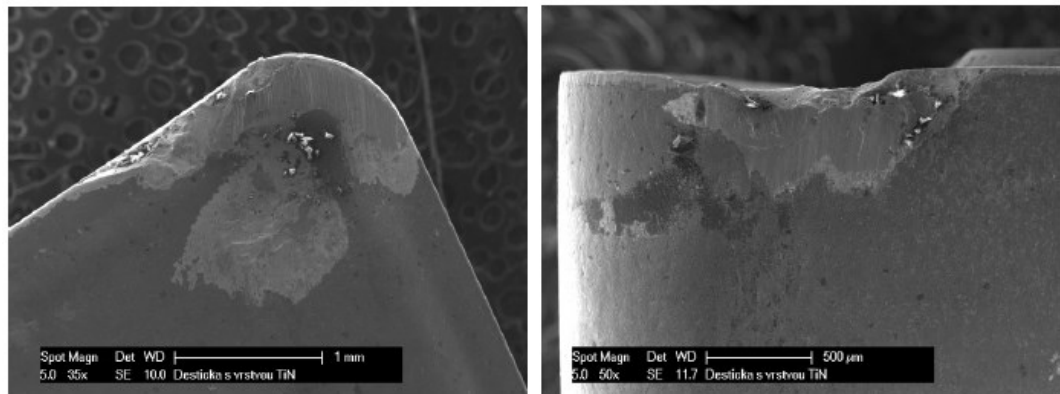
1.2.3 Obrábění nástroji ze slinutých karbidů

Nástroje ze slinutého karbidu jsou v současné době nejrozšířenější skupinou nástrojů v průmyslové praxi a tyto nástroje se používají pro třískové obrábění žáruvzdorných slitin a titanu. Při obrábění niklových slitin jsou tyto nástroje namáhány mechanickým a tepelným zatížením, výsledkem je výrazné opotřebení a snížení jejich trvanlivosti. Obvykle je pro obrábění slitin na bázi niklu doporučeno používat slinuté karbidy s vyšším obsahem kobaltu nebo jemnozrnější strukturou viz obr. 1.3. Vhodné jsou např. karbidy s obsahem primárního WC a pojivem Co, které kombinují vysokou houževnatost s odolností vůči opotřebení.



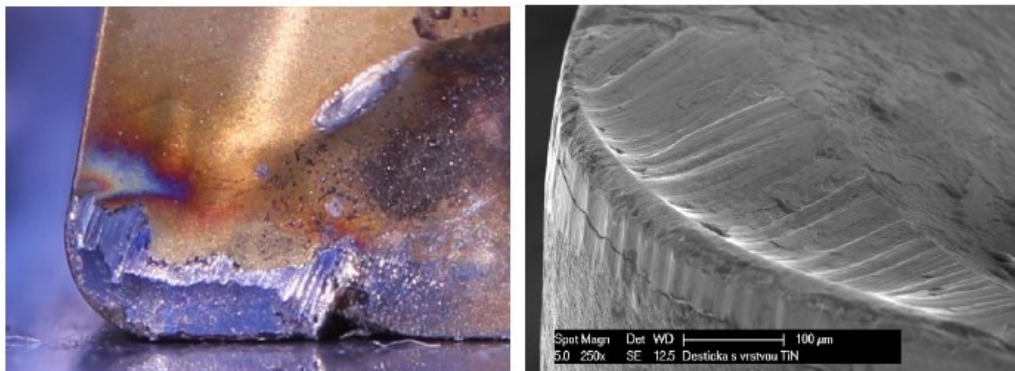
Obr. 1.3 Struktura substrátu VBD ze slinutého karbidu (zvětšeno 1000x vlevo a 3500x vpravo) [18]

Běžně se pro obrábění niklových slitin nástroji ze slinutého karbidu volí rozsah řezných rychlostí 10 až 30 m.min⁻¹. V dnešní době se často využívá povlakování VBD metodou PVD, díky čemuž lze použít řezných rychlostí až 50 m.min⁻¹. Avšak při vyšších rychlostech obrábění je namáhání břitu nástroje natolik intenzivní, že vysoká teplota a mechanické namáhání v místě řezu jsou příčinou nadměrného opotřebení a poklesu trvanlivosti nástroje. Opotřebení se projevuje na ploše čela a hřbetu nástroje tvorbou vrubů, vyštipováním a deformací řezné hrany. V některých případech může dojít i k lomu celého ostří. [18]



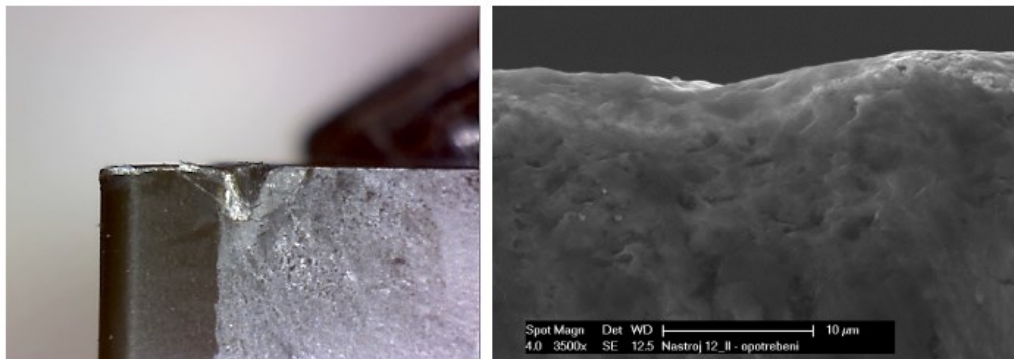
Obr. 1.4 Opotřebení čela a hřbetu nástroje z povlakovaného slinutého karbidu (zvětšeno 50x) [18]

Niklové slitiny mají v porovnání s běžnou ocelí velkou chemickou afinitu k mnohým nástrojovým materiálům a navíc vytvářejí na svém povrchu adhezní vrstvy, které způsobují difuzní a abrazivní opotřebení nástroje. Toto opotřebení se projevuje vytvořením kráteru na ploše čela nástroje, viz obr. 1.5. Kráter vzniká působením vysoké teploty v místě řezu a také účinkem velmi tvrdých částic CrC, TiC, MoC, WC, FeC obsažených ve struktuře materiálu a NbC na hranicích zrn. [18]



Obr. 1.5 Opatřebení čela nástroje ve tvaru kráteru (zvětšeno 250x) [18]

Dominantním projevem opotřebení nástrojů ze slinutých karbidů při obrábění niklových slitin je tvorba vrubu na hřbetě nástroje. Mechanické zpevnění, ale i nízká tepelná vodivost a adheze jsou příčinami tvorby vrubu na hřbetě v místě výstupu nástroje ze záběru. Jedná se o vzdálenost odpovídající maximální hloubce řezu, kde ostří přichází do záběru s vrstvou zpevněného materiálu, jehož mechanické vlastnosti, a to zejména tvrdost, jsou již výrazně odlišné od základního materiálu. Předpokládá se, že opotřebení ve tvaru vrubu probíhá procesem nalepování obráběného materiálu na řeznou hranu s následným vytrháváním materiálu nástroje, viz obr. 1.6. [18]



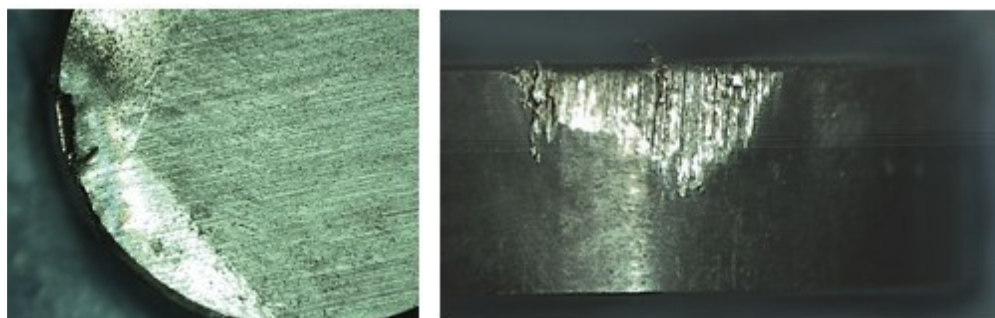
Obr. 1.6 Vrubové opotřebení na hřbetě nástroje [18]

Vyjma chemického složení substrátu a naneseného povlaku lze trvanlivost destiček ze slinutého karbidu v průběhu obrábění niklových slitin do jisté míry ovlivnit i změnou řezné geometrie. V praxi se setkáváme s vyměnitelnými břitovými destičkami, které mají pro obrábění niklových slitin navrženou ostrou řeznou geometrii s poloměrem špičky 0,4 mm pro dokončovací operace a 0,8 – 1,2 mm pro hrubovací operace. Avšak řezné vlastnosti těchto destiček jsou do určité míry limitovány rychlostí posuvu obrábění, dosaženou drsností obroběného povrchu, ale hlavně nízkou odolností proti opotřebení. Proto je vhodné pro obrábění niklových slitin použít pozitivní řeznou geometrii destiček s úhlem nastavení

hlavního ostří $\kappa_r \leq 45^\circ$ nebo zvolit kruhové destičky, u kterých se úhel nastavení hlavního ostří mění v závislosti na hloubce odebírané vrstvy materiálu. Použitím kruhové destičky lze dosáhnout nejen lepšího finálního povrchu s minimem povrchových vad, ale i zamezit tvorbě vrubů na hřbetě nástroje. [9]

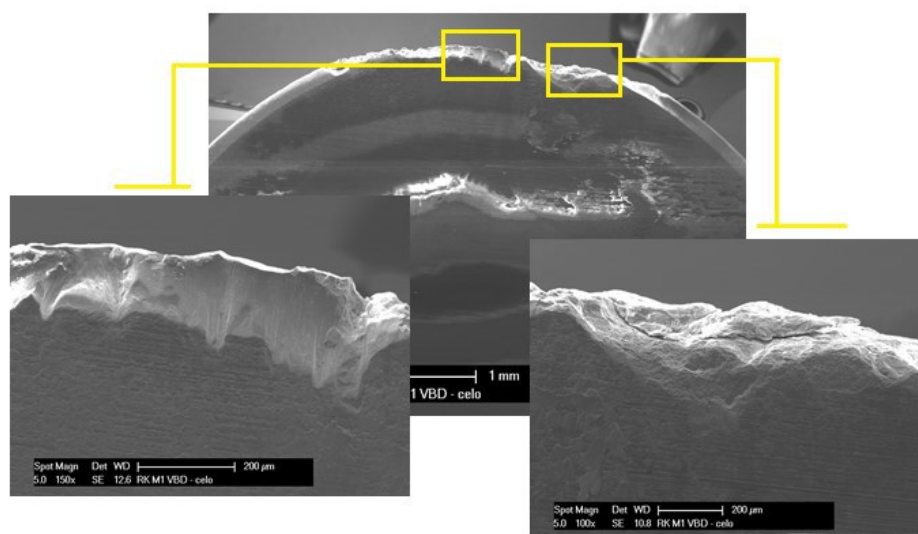
1.2.4 Obrábění nástroji z řezné keramiky

Niklová slitina má velmi nízkou tepelnou vodivost, která v procesu obrábění způsobuje generování vysoké teploty. Nástroj z řezné keramiky má taktéž nízkou tepelnou vodivost, proto se veškeré vzniklé teplo soustředí do zóny řezání a způsobí difúzní opotřebení v povrchových vrstvách obou materiálů.



Obr. 1.7 Detail opotřebení břitu nástroje z ŘK [18]

Malý průřez třísky při obrábění materiálu je příčinou vzniku nejen vysokého tepelného, ale i mechanického zatížení řezné hrany nástroje. Při zvýšeném mechanickém zatížení dochází k abrazivnímu účinku a opotřebení, které způsobuje tření dvou kontaktních ploch. Při abrazivním opotřebení mají největší vliv „tvrdé“ abrazivní částice obsažené v odebírané vrstvě materiálu a především v tříse. Účinkem abrazivního opotřebení dochází k postupnému odbrušování a vylamování částic z hřbetu a čela nástroje viz obr. 1.7 a 1.8.

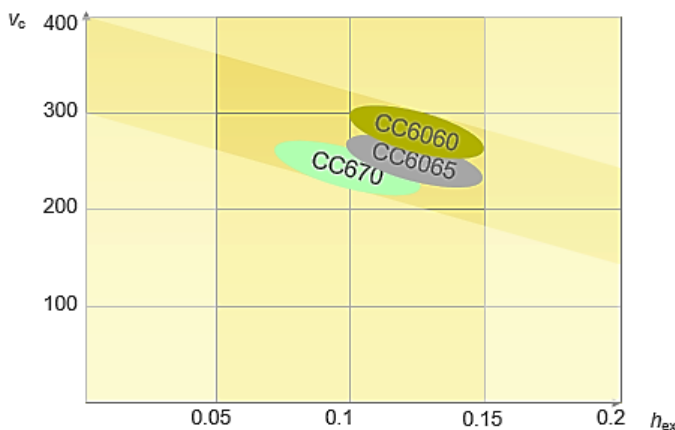


Obr. 1.8 Detail vyštípnuté hrany destičky z ŘK – čelo (zvětšeno 150x a 100x) [18]

Typickou formou opotřebení pro obrábění niklových slitin je tvorba vrubu na hřbetě nástroje. Tvorba vrubu je obvykle spojována s mechanismem oxidačního opotřebení a také s kontaktem zpevněné vrstvy materiálu v místě, kde nástroj vychází ze záběru. Mechanické a fyzikální vlastnosti obráběného materiálu s řeznými parametry do určité míry ovlivňují vznik nárůstků na řezné hraně nástroje. Jelikož se slitiny niklu řadí mezi velmi houževnaté materiály, dochází při jejich obrábění v kontaktní zóně k nalepování vrstev obráběného materiálu na materiál břitu nástroje. Při tvorbě nárůstků dochází obvykle ke změně geometrie a vylamování břitu nástroje společně s navařeným nárůstkem, v nejhorším případě může dojít k lomu VBD.

Řezné podmínky pro obrábění slitin na bázi niklu by měly splňovat požadavky na zajištění snadného a efektivního obrábění daného materiálu. Obvykle se klade důraz především na hodnoty řezné rychlosti a posuvu, které ovlivňují množství odebraného materiálu za čas. Avšak bez ohledu na řezný proces je pro obrábění slitin na bázi niklu doporučeno použít nízkých řezných podmínek a malého úběru materiálu. Děje se tak především z důvodu kumulace extrémně vysoké teploty a napětíovým stavům v místě řezu, kterým běžné nástroje nejsou schopny dlouhodobě odolávat a rychle ztrácí svoje řezné vlastnosti. [18]

Řeznou rychlost je třeba náležitě přizpůsobit, aby v oblasti řezu vznikalo dostatečné množství tepla potřebné ke zvýšení plasticity třísek, ale ne příliš mnoho, aby nedocházelo ke ztrátě stability keramiky. Posuv musí být zvolen tak, aby vznikala tříska dostatečné tloušťky, která má být taková, aby nedocházelo k mechanickému zpevnění materiálu, ale ne příliš velká, aby nedocházelo k vylamování částí ostří. Větší posuvy a hloubky řezu vyžadují snížení řezných rychlostí. Tyto hranice se mění v závislosti na tvrdosti materiálu obrobku a velikosti zrna. Pro dosažení co nejlepších výsledků jsou velice důležité stabilní podmínky obrábění a vhodně zvolené pracovní postupy, včetně použití řezné kapaliny. [24]



Obr. 1.9 Řezné podmínky pro obrábění řeznou keramikou. [24]

1.3 Kvalita obrobeného povrchu

Proces obrábění je velice rozmanitý, ale také složitý. Můžeme do něj zahrnout spoustu závislostí, podmínek a omezení. Technologie obrábění jako vědní obor studuje, zkoumá a analyzuje vzájemné souvislosti mezi těmito faktory. V oblasti obrábění používáme technologie s definovatelnou geometrií ostří (soustružení, frézování, vrtání, apod.) nebo technologie s obtížně nebo nedefinovatelnou geometrií ostří (broušení, honování, lapování, superfinišování, apod.). Tyto různé technologie mají jedno společné, a to vznik nového povrchu. Takto vzniklý povrch nazýváme plocha obrobená. Tato vzniklá plocha má určité vlastnosti a charakter, které jsou ovlivňovány zvolenou technologií obrábění, druhem řezného materiálu, typem materiálu obrobku, stanovenými a použitými podmínkami pro obrábění a také řezným prostředím.

Průvodním jevem procesu obrábění niklových slitin je kromě nízké trvanlivosti nástroje také odlišná kvalita obrobených povrchů. Změny v povrchu vyvolané obráběním mohou vést k deformaci součástí a dokonce ovlivnit mechanické vlastnosti a napětovo-korozní nebo únavové vlastnosti komponentů. Vzhledem k tomu, že na součásti vyráběné z materiálů, jako jsou niklové slitiny, jsou kladeny ty nejvyšší nároky z hlediska přesnosti, drsnosti a celkové kvality obrobeného povrchu. Tyto aspekty ovlivňují funkčnost těchto součástí, proto je nutné klást velký důraz na kvalitu povrchu po obrábění.

Niklové slitiny jsou velmi citlivé na strukturní změny vzhledem k jejich žárupevnosti, žáruvzdornosti, houževnatosti a sklonu ke zpevňování. Celková kvalita obrobených povrchů v sobě zahrnuje: [1]

- zbytková napětí,
- změny tvrdosti v povrchových vrstvách a vznik mikrotrhlin,
- defekty na povrchu vlivem intenzivního opotřebení nástroje,
- rozměrovou přesnost,
- odchylky geometrického tvaru a polohy,
- drsnost povrchu,
- strukturní změny pod povrchem,
- chemické změny pod povrchem vyvolané vysokou teplotou.

Z hlediska kvality obrobeného povrchu je důležité nepoužívat dál nástroje, u kterých opotřebení dosáhlo doporučeného kritéria opotřebení. Používání takto opotřebovaného nástroje způsobuje intenzivní zpevňování obrobených ploch a celkově jejich poškození. Při práci s takovým nástrojem výrazně rostou složky řezné síly, teplota v zóně řezání, zvětšuje se oblast kontaktu nástroje a obrobku a především prudce klesá geometrická přesnost obrobku. [1]

2. Řezné materiály pro obrábění Ni slitin

Řezné materiály jsou nedílnou součástí při procesu obrábění a rozhodujícím způsobem ovlivňují produktivitu, výrobní náklady a kvalitu výroby. Jejich význam je charakterizován náročnými požadavky, ve kterých břit nástroje pracuje. Při obrábění bývají často vystaveny intenzivnímu mechanickému a tepelnému namáhání. To vede k otupování břitu, jeho vylovení nebo i k celkové destrukci. Jednou z hlavních podmínek, kterou by měl řezný nástroj splňovat, je převaha tvrdosti řezného materiálu nad tvrdostí obráběného materiálu, a to po celou dobu řezu. [10]

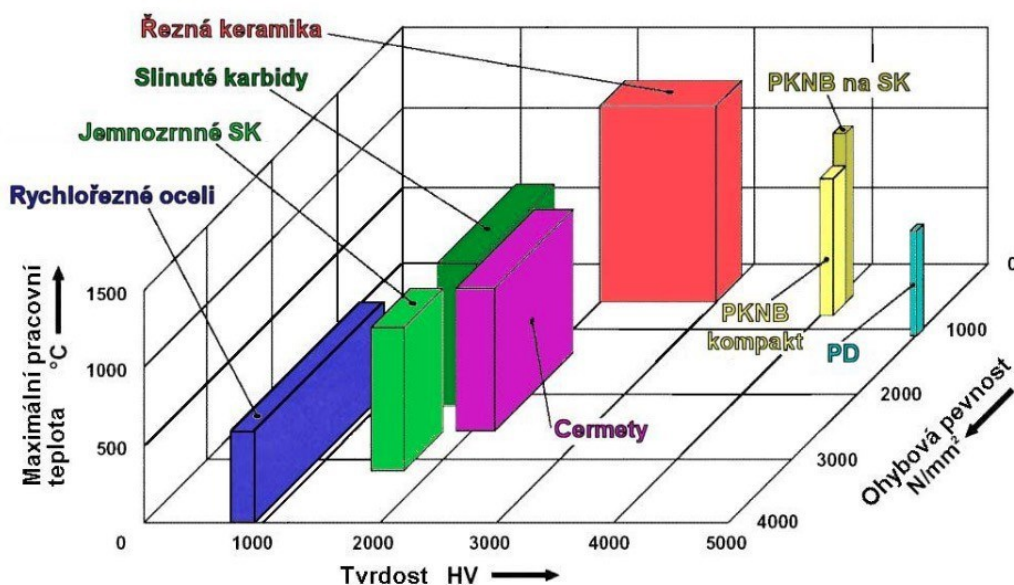
Zvyšující se nároky a požadavky na vlastnosti součástí zhotovených třískovým obráběním mají za následek vývoj a výzkum zcela nových materiálů a také nástrojových materiálů, které budou schopny efektivního obrábění. V současné době se na trhu vyskytuje široké spektrum materiálů pro řezné nástroje, od nástrojových ocelí až po syntetický diamant. [10]

Požadavky kladené na řezné materiály:

- pevnost a tvrdost v tlaku,
- houževnatost a pevnost v ohybu,
- pevnost za tepla a odolnost proti teplotním rázům,
- odolnost proti otěru (adheze, difuze, nárůstky...),
- chemická stálost a chemicky neutrální chování vůči obráběným materiálům,
- odolnost proti vzniku trhlin a pevnost vazby vnitřních fází,
- vysoká řezivost.

Pro nástroje s definovanou geometrií břitu se zpravidla používá následující rozdělení materiálů obráběcích nástrojů:

- nástrojové oceli (NO),
- slinuté karbidy (SK),
- cermety,
- řezná keramika (ŘK),
- syntetické velmi tvrdé materiály (KNB, PKD).



Obr. 2.1 Hodnoty vybraných vlastností řezných materiálů [12]

Pro obrábění je k dispozici celá řada nástrojových materiálů, ale pro obrábění niklových superslitin lze použít jen některé z nich. V praxi se nejčastěji využívá slinutých karbidů a řezné keramiky.

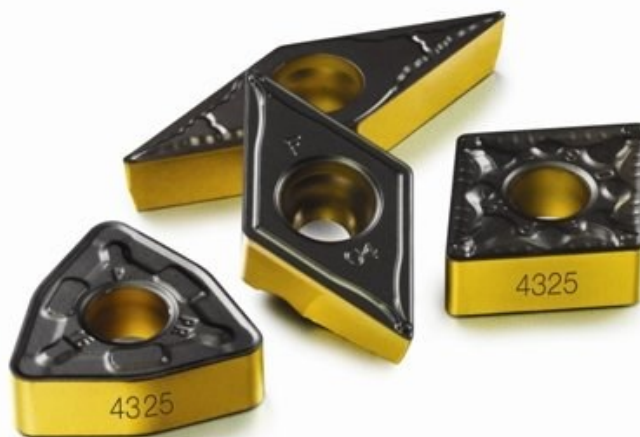
2.1 Slinuté karbidy

Tyto nástrojové materiály jsou vyráběny práškovou metalurgií, kde je struktura tvořena karbidy vysokotavitelných kovů wolframu (WC), titanu (TiC) a pojícím kovem, kterým je nejčastěji kobalt (Co). Jako další přísady se používají karbidy tantalu (TaC) a niobu (NbC). [10]

V současné době většina výrobců řezných nástrojů slinuté karbidy povlakuje. Povlakované slinuté karbidy jsou složeny z pevného karbidového podkladu a termochemicky stabilního povlaku (karbidy, nitridy, oxidy a jejich kombinace). Výsledkem jsou lepší materiály pro vysoké řezné a posuvové rychlosti, vysoký úběr třísky a přerušovaný řez. Hlavním cílem povlaků je snížit součinitel tření, neulpívání třísek na čele, získání tvrdého povrchu při zachování houževnatého jádra, zamezení vzniku nárůstků a zejména prodloužení životnosti nástroje. Získáme tak vysoce kvalitní nástroje, zajišťující vysoký úběr materiálu, vysoké řezné a posuvové rychlosti i možnost využití pro přerušované řezy. Jako první se na trhu objevily povlaky z TiC a brzy na to byly vyvinuty povlaky typu TiN a TiCN, povlaky Al₂O₃ přišly na trh nejpozději. Mají vyšší teplotní odolnost oproti předchozí skupině materiálů a to přibližně 800°C. [10]

Obvykle se uvádějí tyto vývojové stupně povlakovaných slinutých karbidů:

- 1. generace:** jednovrstvý povlak (téměř výhradně TiC) s tloušťkou asi 7 mm a špatnou soudržností podkladu a povlaku.
- 2. generace:** jednovrstvý povlak (TiC, TiCN, TiN) bez beta-karbidu na přechodu podklad - povlak. Zdokonalení technologie výroby umožnilo vytvořit vrstvy povlaků o větší tloušťce (až 13 mm), bez nebezpečí jejich odlupování při funkci nástroje.
- 3. generace:** vícevrstvý povlak (dvě až tři, případně i více vrstev) s ostře ohraničenými přechody mezi jednotlivými vrstvami. Řazení vrstev odpovídá jejich vlastnostem tak, že jako první jsou na podklad obvykle nanášeny vrstvy s lepší přilnavostí k podkladu, které mají relativně nižší odolnost proti opotřebení a jako poslední jsou nanášeny vrstvy, které nemusí mít dobrou přilnavost k podkladu, ale požaduje se od nich zejména vysoká tvrdost a odolnost proti opotřebení. Nejčastěji bývají jednotlivé vrstvy řazeny v tomto pořadí (od podkladu k povrchu): TiC-Al₂O₃, TiC-TiN, TiC-TiCN-TiN, TiC-Al₂O₃-TiN.
- 4. generace:** speciální vícevrstvý povlak (velmi často i více než 10 vrstev a mezivrstev), s méně či více výraznými přechody mezi jednotlivými vrstvami (užívají se stejné materiály povlaků jako u 3. generace). [10]



Obr. 2.2. VBD ze slinutého karbidu Sandvik GC4325 [24]

2.1.1 Povlakování SK

Povlakované slinuté karbidy jsou vyráběny tak, že na podklad z běžného slinutého karbidu typu (v současné době jsou již povlaky většinou nanášeny na podkladové SK, vyrobené speciálně k tomuto účelu) se nanáší tenká vrstva materiálu s vysokou tvrdostí a vynikající odolností proti opotřebení (povlak ve formě tenké vrstvy má vyšší tvrdost i pevnost, než stejný homogenní materiál v jakékoli jiné formě). Tyto výhodné vlastnosti vyplývají zejména z toho, že povlakový materiál neobsahuje žádné pojivo, má o jeden

i více řádů jemnější zrnitost a méně strukturních defektů a tvoří bariéru proti difúznímu mechanismu opotřebení nástroje. [10]

2.2 Řezná keramika

Řeznou keramiku lze definovat jako převážně krystalický materiál, jehož hlavními složkami jsou anorganické sloučeniny nekovového charakteru. Pro současnou keramiku je charakteristické, že je vyráběna z poměrně čistých surovin a často z čistých výchozích chemikálií jako keramika syntetická. Jsou to látky označované jako keramika krystalická, na rozdíl od tradiční keramiky, která obsahuje i velký podíl skelné (amorfní) fáze. Keramické látky jsou vázány meziatomovými vazbami iontovými a kovalentními. Jejich vazba však není čistě iontová nebo čistě kovalentní. Zpravidla se vyskytují obě vazby zároveň. V krystalové struktuře převažují složité mřížky kubické a hexagonální.

V široce rozvětveném používání obecné keramiky zaujímá oblast technické nebo řezné keramiky zatím relativně malý podíl. Pro její vynikající vlastnosti se jí však otvírají stále nové oblasti použití. Je důležité zdůraznit, že o keramice tak jak ji známe z denního použití (porcelán, kamenina) máme určitou představu. Známé vlastnosti jako křehkost, náchylnost k rozbití, apod. se pak přenáší i na technickou keramiku. Mluvíme-li však o řezné keramice, jedná se o technologicky vyspělé výrobky, které jsou určeny pro extrémní podmínky, kde se požaduje např. vysoká odolnost proti opotřebení, vysoká tepelná stálost, vysoká tvrdost, atd. [10]

2.2.1 Technické použití keramických materiálů

Intenzivní výzkumnou činností byly výrazně zlepšeny některé vlastnosti keramických materiálů. To umožnilo podstatné rozšíření jejich aplikací ve strojírenské výrobě. Charakteristické vlastnosti umožňují používat keramické materiály v těchto oblastech technické praxe: [10]

- **tepelné aplikace** – odolnost vůči vysokým teplotám, stabilita tvaru při tahu a tlaku i za vysokých teplot, odolnost proti náhlým změnám teploty, nízká tepelná roztažnost, schopnost akumulace tepla, dobrá tepelná vodivost,
- **mechanické aplikace** – vysoká tvrdost, vysoká odolnost proti opotřebení dobré a stabilní kluzné vlastnosti, nepřítomnost statického náboje, nízká měrná hmotnost, vysoká přesnost tvaru, úzké rozměrové tolerance,
- **fyzikální a chemické aplikace** – chemická odolnost vůči kyselinám a louhům, chemická inertnost, odolnost vůči korozi a erozi, akumulací a pohlcovací schopnost, velký geometrický a měrný povrch, filtrační schopnosti.

Jednotlivé vlastnosti řezných keramik lze různě kombinovat a měnit podle konkrétního použití na jednotlivé aplikace. Proto se vybrané keramické materiály úspěšně používají pro výrobu řezných nástrojů pro třískové obrábění. Jsou zde s výhodou využívány tyto vlastnosti řezné keramiky: [10]

- vysoká tvrdost,
- odolnost proti mechanickému namáhání,
- odolnost proti působení vysokých teplot,
- odolnost proti opotřebení,
- vysoká trvanlivost a řezivost,
- odolnost proti korozi a chemickým vlivům,
- nízká měrná hmotnost,
- dostupnost základních surovin,
- ekologická nezávadnost,
- příznivá cena.

2.2.2 Použití řezné keramiky při obrábění

Řezná keramika patří mezi výkonné řezné materiály. Její nasazení ve strojírenské výrobě vyžaduje, mimo správné volby řezných podmínek, dodržení určitých zásad, aby mohlo být využito jejich výhodných vlastností v plné míře a nevýhodné co nejvíce potlačit. Mezi hlavní podmínky efektivního využití řezné keramiky patří: [10]

- vysoká tuhost systému stroj – nástroj – obrobek (zamezení kmitání jakéhokoliv druhu, které zvyšuje intenzitu opotřebení nástroje),
- použití výkonných obráběcích strojů se širokým rozsahem posuvů a otáček s možností nastavení vysokých řezných rychlostí, plynulá regulace otáček,
- výborný stav obráběcího stroje,
- zabezpečení pevného a spolehlivého upnutí obrobku, zejména při vysokých otáčkách, kdy působí velké odstředivé síly,
- zakrytování pracovní části obráběcího stroje,
- výběr vhodného tvaru a velikosti břitové destičky,
- správná volba tvaru ostří břitové destičky (velikost a sklon negativní fazetky na čele),
- překonání nedůvěry k novému nástrojovému materiálu u technologa i pracovníka, který stroj obsluhuje.

2.2.3 Rozdělení a značení řezné keramiky

Neexistuje žádná norma, která by předepisovala rozdělení keramických řezných materiálů a jejich značení jako je tomu např. u slinutých karbidů či nástrojových ocelí. Všeobecně se však přijímá následující dělení těchto řezných materiálů: [10]

Na bázi oxidu hlinitého (Al_2O_3)

- čistá (oxidická) – 99,5% Al_2O_3
- směsná – $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2 + \text{CoO}$
- vyztužená - $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2 + \text{TiC}$...

Na bázi nitridu křemíku (Si_3N_4) - $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Y}_2\text{O}_3$, $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{TiC}$, sialony

2.2.4 Povlakování řezné keramiky

Povlakování řezné keramiky není tak obvyklé jako u slinutých karbidů. Používá se téměř výhradně metoda CVD. V poslední době se začíná díky firmě CemeCon používat i metoda PVD.

Hlavním posláním povlaku je zvýšení houževnatosti pomocí snížení šíření mikrotrhlinek základního materiálu nebo zvýšení oteruvzdornosti řezných hran. Nanáší se jedna vrstva karbidů nebo nitridů kovů (např. TiN , TiCN , apod.) popř. povlak Al_2O_3 na základní materiál Si_3N_4 . [10]

2.3 Rozdělení řezných materiálů dle ISO 513

Podle normy ISO 513 se obráběcí materiály dělí do 6 hlavních aplikačních skupin (P, M, K, N, S, H) a každá se dále dělí na aplikační skupiny. Hlavní aplikační skupiny se dělí podle materiálů, který se jimi obrábí. Identifikačními znaky jsou písmena a barva. Každá aplikační skupina je určena písmenem hlavní skupiny a klasifikačním číslem. Výrobci řezných materiálů bylo uspořádáno pořadí v aplikačních skupinách podle relativního opotřebení a pevnosti. Čím je číslo nižší, tím je možné obrábět vyšší rychlostí a má vyšší oteruvzdornost. A naopak čím je číslo vyšší, tím rostou rychlosti posuvu a pevnost řezných materiálů. [10]

P  Ocel	M  Korozivzdorná ocel	K  Litina
N  Hliník	S  Žárovzdorné slitiny	H  Tvrzená ocel

Obr. 2.3 Dělení materiálu dle systému ISO513 [23]

Niklové slitiny se řadí podle systému ISO do skupiny S.

ISO S – Do této skupiny řezných materiálů patří nástrojové materiály, které se používají na obrábění tepelně odolných slitin na bázi železa, niklu a kobaltu, titanu a titanových těžce obrobitelných slitin. Žáruvzdorné superslitiny zahrnující celou řadu vysokolegovaných ocelí a materiály na bázi niklu, kobaltu, a titanu. Tyto materiály snadno ulpívají na břitu a tvoří nárůstek. Během obrábění dochází k jejich zpevňování (mechanické zpevňování) a vzniká velké množství tepla. Jejich vlastnosti jsou velmi podobné jako u oblasti ISO M, ale jejich obrábění je ještě mnohem obtížnější a životnost břitu je kratší. [10, 23]

2.4 Řezná geometrie nástrojů pro obrábění Ni slitin

Volba správné geometrie břitu nástroje je dána pracovní oblastí operace (hrubování, obrábění načisto, atd.), během nichž se opracovávají materiály a obrobky na požadovaný rozměr a kvalitu obrobeného povrchu. Dalším důležitým faktorem ovlivňující volbu geometrie břitu nástroje je materiál obrobku. Geometrie řezného nástroje by měla pro obrábění materiálů se zhoršenou obrobitelností splňovat požadavky především na dostatečnou pevnost řezného klínu, zajištění klidného průběhu obrábění bez vibrací a chvění, odolnost vůči opotřebení a maximální trvanlivost řezného klínu nástroje. Při volbě řezné geometrie nástroje je potřeba zohlednit i technologické požadavky na přesnost a kvalitu obrobeného povrchu.

Při volbě geometrie řezného nástroje se nejčastěji setkáváme s úhly γ_o , α_o , λ_s , κ_r , které společně s poloměrem špičky r_e , určují tvar řezného klínu nástroje. Velikost jednotlivých úhlů výrazně ovlivňuje řezný proces a je vhodné je měnit v závislosti na mechanických vlastnostech obráběného materiálu, tuhosti použitého stroje a požadované kvalitě obrobeného povrchu. Právě z uvedených úhlů má největší význam na proces obrábění úhel γ_o , jehož velikost ovlivňuje intenzitu plastické deformace, řeznou sílu, velikost tření třísky na čele nástroje a intenzitu opotřebení nástroje. Úhel α_o určuje polohu hřbetu nástroje a jeho velikost ovlivňuje intenzitu tření mezi nástrojem a přechodovou plochou při obrábění. Zvyšující se hodnoty těchto dvou úhlů mají za následek snížení pevnosti řezného klínu. Menší úhly v kombinaci s malými hodnotami posuvu a vyšší řeznou rychlostí jsou vhodné především pro obrábění materiálů s vyšší pevností. Úhel sklonu ostří λ_s ovlivňuje směr odchodu třísky při obrábění a jeho velikost má také vliv na pevnost řezného klínu. Záporné úhly sklonu je vhodné používat pro obrábění materiálů s vyšší pevností a kladné úhly pro obrábění měkkých materiálů a menších průřezech třísky. Vykloněním nástroje s velkým poloměrem o úhel λ_s lze v soustavě S-N-O předejít vzniku nežádoucích vibrací. Velikost úhlu κ_r , který svírá nástrojová rovina boční s rovinou hlavního ostří, ovlivňuje délku řezné

hrany v záběru, tvar třísky a také mění směr působení řezných sil. S rostoucím úhlem nastavení hlavního ostří nástroje κ_r klesá řezný odpor, ale zvyšuje se intenzita opotřebení řezné hrany nástroje. S klesajícím úhlem κ_r roste síla F_p , dochází k průhybu obrobku a vyšším požadavkům na tuhost soustavy S-N-O. [8, 16, 17]

3. Experimentální část diplomové práce

3.1 Niklová slitina Alloy 625

Pro experimentální činnost obrábění byla zvolena žáruvzdorná niklová slitina Alloy 625 podle ASM 5666F (W.Nr. 2.4856). Alloy 625 je slitina niklu a chrómu s příměsí molybdenu a niobu. Díky tomu se slitina vyznačuje výbornými mechanickými i fyzikálními vlastnostmi, a to jak při nízkých, tak i za velmi vysokých teplot. Zpevňující účinek molybdenu a niklu způsobuje, že má slitina vyšší pevnost a odolnost vůči oxidaci. Chemické složení na bázi Ni-Cr a jednotlivé fáze ovlivňují nejen mechanické vlastnosti slitiny, žáruvzdornost a odolnost proti korozi, ale také oblasti použití. Běžně se tato slitina používá pro součásti, které jsou dlouhodobě vystaveny nepříznivým vlivům prostředí, ať už na mořském dně, nebo ve spalovacích turbínách a leteckých motorech. [15, 25]

3.1.1 Chemické složení Alloy 625

Slitina Alloy 625 má velice komplexní chemické složení. Převládajícím prvkem ve struktuře materiálu je nikl, který tvoří matici tuhý roztok γ a jeho koncentrace má velký vliv na rozmezí rozpustnosti legujících prvků. Dalším prvkem, který má bohaté zastoupení ve struktuře materiálu je chróm. Chróm zajišťuje především dobrou odolnost vůči oxidaci za vysoké teploty a zpevňuje matici. Jeho přítomnost ve struktuře slitiny způsobuje tvorbu karbidů $M_{23}C_6$ o velké stabilitě a ovlivňuje tak odolnost proti tečení a plastické deformaci. Kromě niklu a chrómu je slitina Alloy 625 tvořena dalšími prvky, nejčastěji to je kobalt, hliník a další přísadové prvky, jako je wolfram, niob či molybden. Obsahy jednotlivých legujících prvků zobrazuje tabulka 3.1. [25, 26]

Tab. 3.1 Chemické složení Alloy 625 [25]

Prvek	hm. %	Prvek	hm. %
Ni	58 min.	Ti	0,4 max.
Cr	20-23	Si	0,5 max.
Fe	5 max.	Al	0,4 max.
Mo	8-10	Mn	0,5 max.
Nb	3-4	C	0,1 max.
Si	0,5 max.	Co	1 max.
P	1,50		

3.1.2 Mechanické a fyzikální vlastnosti Alloy 625

Mechanické a fyzikální vlastnosti jsou do určité míry ovlivněny chemickým složením a mikrostrukturou materiálu. Základní tuhý roztok γ kovové matrice slitiny je výrazně modifikován přísadovými prvky. Modifikuje nejen pevnost, ale i úroveň vrstevné chyby (chyba vrstvení atomových rovin). Snížením energie vrstevné chyby vede k omezení příčných skluzů v základním tuhém roztoku γ a dochází ke zvýšení jeho mechanických vlastností, zvláště pak za vyšších teplot. Mechanické vlastnosti kovových materiálů jsou nejvíce ovlivněny pohyby dislokací, ke kterým dochází při plastické deformaci materiálu. Příčinou zpevnění materiálu slitiny Alloy 625 v průběhu obrábění je obtížnost pohybu dislokací skrz její mikrostrukturu. Způsobené je to především precipitací fáze γ'' a také četným výskytem karbidů na hranicích zrn. Omezený pohyb dislokací je zodpovědný za vysoké pevnostní charakteristiky, které jsou uvedeny v tabulce 3.2. [25, 26]

Tab. 3.2 Mechanické a fyzikální vlastnosti Alloy 625 [25]

Mechanické vlastnosti			Fyzikální vlastnosti		
Mez Kluzu $R_{p0,2}$	415	Mpa	Hustota ρ	8,4	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
Tvrdość HB	200	-	Měrné teplo c_p	410	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Mez pevnosti R_m	862	Mpa	Tep. Součinitel roztažnosti α	$11,1\cdot 10^{-6}$	K^{-1}
Tažnosť A	50	%	Tepelná vodivost λ	10	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

3.2 Volba obráběcího stroje

Pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů jako jsou niklové slitiny, je doporučeno volit obráběcí stroj s co možná největší tuhostí konstrukce a požadovaným výkonem. Pro podélné soustružení válcového polotovaru byl v tomto experimentu použit horizontální CNC soustruh od společnosti DMG MORI s označením NLX2500MC/700_M730BM. Konstrukce zvoleného CNC soustruhu splňuje veškeré požadavky a nároky spojené s obráběním kovových materiálů se zhoršenou obrobitelností, přičemž zajišťuje maximální stabilitu rychlosti při obrábění a potřebnou tuhost. Tuhost stroje má přímý vliv nejen na dosahovanou přesnost obrobených ploch, ale hlavně na výkon obrábění.

Stroj je vybaven řídicím systémem Mitsubishi M730BM, 12polohovou nástrojovou hlavou se 4mi rotačními nástroji. Soustruh umožňuje obrábět maximální průměr součásti 366 mm a plynulou změny otáček, která při obrábění materiálu udržuje konstantní řeznou rychlost. CNC soustruh použitý pro experimentální obrábění slitiny Alloy 625 je umístěn v laboratoři Katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie, proto veškeré experimentální obrábění tohoto materiálu proběhlo na Fakultě strojní VŠB – TU Ostrava. [21]



Obr. 3.1 CNC soustružnické centrum NLX2500MC/700_M730BM [21]

3.3 Volba řezných nástrojů a řezných materiálů

Zvyšující se nároky a požadavky na vlastnosti součástí zhotovených třískovým obráběním má za následek vývoj a výzkum zcela nových materiálů a také nástrojových materiálů, které budou schopny efektivního obrábění. V současné době se na trhu vyskytuje široké spektrum materiálů pro řezné nástroje, od nástrojových ocelí až po syntetický diamant. Významné postavení v této oblasti zastávají řezné materiály, jejichž fyzikální a mechanické vlastnosti ovlivňující výkonové charakteristiky jsou předpokladem k uskutečnění vysokovýkonných obráběcích operací. V oblastech, kde již nelze efektivně využít nástroje ze slinutého karbidu a ostatní řezné materiály např. při obrábění šedé litiny, kalených ocelí, žáruvzdorných a žárupevných slitin našly své uplatnění nástroje z řezné keramiky. [10, 22]

Keramické třídy je možné použít pro široký okruh aplikací a materiálů, přičemž nejčastěji jsou využívány pro vysokorychlostní soustružnické operace, ale také pro zapichování a frézování. Při jejich správném použití umožňují specifické vlastnosti jednotlivých keramických tříd dosažení vysoké produktivity. Pro dosažení úspěšných výsledků jsou velice důležité znalosti o tom, kdy a jak keramické třídy používat.

Veškeré obráběcí nástroje využívající řeznou keramiku se vyznačují mimořádnou odolností proti otěru a působení tepla při použití vysokých řezných rychlostí. Níže jsou uvedeny nejrozšířenější typy řezné keramiky používané pro obrábění tvrdých nebo těžko obrobitelných materiálů. [24]

Použití řezné keramiky pro těžkoobrobitelné materiály [24]

- **Sialon** (SiAlON) takto se označují třídy, které se vyznačují kombinací pevnosti samovyztužitelné sítě z nitridu křemíku a vysoké chemické stability. Sialonové třídy jsou ideální pro obrábění žárovzdorných slitin (HRSA). **CC6060, CC6065**
- **Keramika vyztužená whiskery**, jmenovitě whiskery karbidu křemíku (SiC_w), se vyznačuje strmým nárůstem houževnatosti a umožňuje použití řezné kapaliny. Řezná keramika vyztužená whiskery je ideální pro obrábění slitin niklu. **CC670**

Použití řezné keramiky pro ostatní materiály [24]

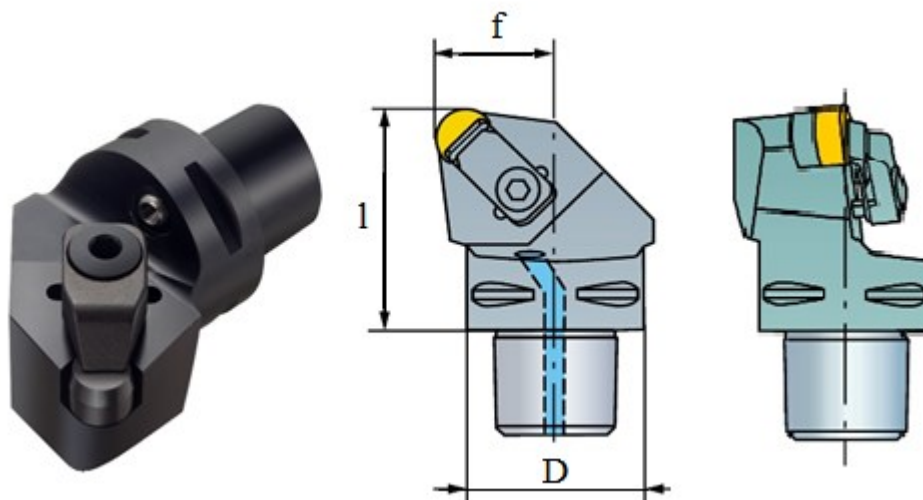
- **Směsná keramika** je vyztužená částicemi, konkrétně přísadou kubických karbidů nebo karbonitridů (TiC , $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})$), tím je dosaženo zvýšení houževnatosti a zlepšení tepelné vodivosti. **CC6050**
- **Keramika na bázi nitridu křemíku** (Si_3N_4) představuje další skupinu keramických materiálů. Krystaly podlouhlého tvaru tvoří materiál se schopností samovyztužení, který se vyznačuje vysokou houževnatostí. Třídy vytvořené na bázi nitridu křemíku jsou vhodné především pro obrábění šedé litiny, ale nedostatečná chemická stabilita limituje možnosti jejich použití pro ostatní typy obráběných materiálů. **CC6190, CC6090**
- **Oxidová keramika** se skládá z oxidu hlinitého (Al_2O_3), s přísadou oxidu zirkoničitého (ZrO_2), která brání vzniku a šíření trhlin. Takto vytvořený materiál je chemicky velice stabilní, ale postrádá odolnost proti tepelným rázům. **CC620**



Obr. 3.2 VBD z řezné keramiky od společnosti Sandvik Coromat [24]

3.3.1 Nožový držák

Pro upnutí keramických břitových destiček bylo použito nožového držáku C4-CRSNL-27050-12ID. Kruhové destičky se upínají do lůžka pomocí pákového mechanismu. Tento držák má negativní geometrii břitu, úhel čela $\gamma_o = -6^\circ$, úhel sklonu ostří $\lambda_s = -6^\circ$. Nožový držák je zobrazen na obrázku 3.3 [39]



Obr. 3.3 Nožový držák C4-CRSNL-27050-12ID [39]

Tab. 3.3 Parametry nožového držáku C4-CRSNL-27050-12ID [39]

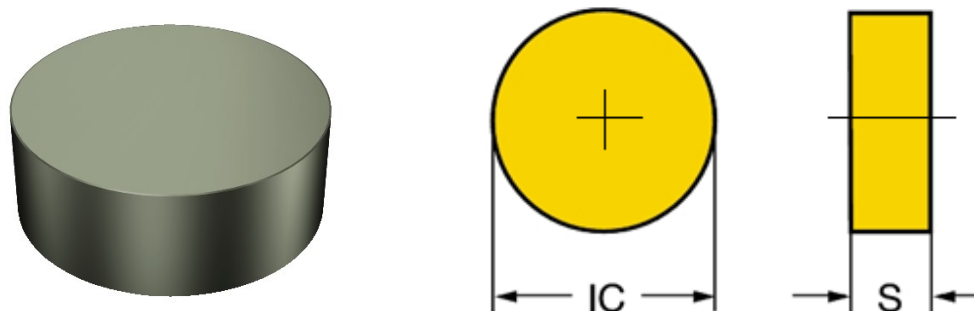
Nožový držák	l [mm]	f [mm]	D [mm]
C4-CRSNL-27050-12ID	50	27	40

3.3.2 Nástroje z řezné keramiky

Pro experimentální obrábění byly použity různé vyměnitelné břitové destičky z řezné keramiky od společnosti, která je předním světovým dodavatelem nástrojů, nástrojových řešení a know-how pro oblast obrábění kovů. Jedním z hlavních cílů v experimentální části práce bylo porovnat řezivost těchto břitových keramických destiček, jedná se o tyto destičky:

RNGN 120700 T0120 670

Keramika vyztužená whiskery, jmenovitě whiskery karbidu křemíku (SiC_w). Vyznačuje se strmým nárůstem houževnatosti a umožňuje použití řezné kapaliny. Řezná keramika vyztužená whiskery je ideální pro obrábění slitin na bázi niklu. Její použití je také možné pro soustružení tvrzených součástí za nepříznivých podmínek. [24]



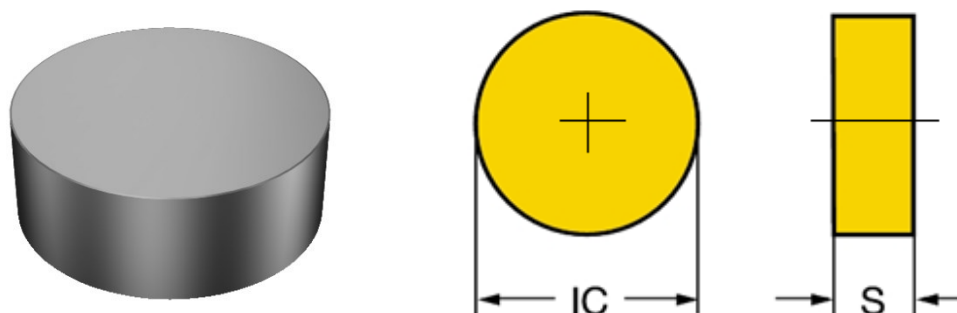
Obr. 3.4 Tvar a geometrie RNGN 120700 T0120 670 [40]

Tab. 3.4 Parametry RNGN 120700 T0120 670 [40]

RNGN 120700T01020 670	
Šířka čela destičky	0,1 mm
Úhel čela hřbetu (fazetka)	20°
Tloušťka S	7,9375 mm
Průměr IC	12,7 mm
Poloměr rohu	6,35 mm
Počet břitů	8
Hmotnost	0,006 kg

RNGN 120700 T0120 6060

Sialonová třída, takto se označují třídy, které se vyznačují kombinací pevnosti samovyztužitelné sítě z nitridu křemíku a vysoké chemické stability. Umožňují optimalizaci výkonu při soustružení předobrobených žárovzdorných slitin za stabilních podmínek. Předvídatelné opotřebení díky velmi dobré odolnosti proti opotřebení ve tvaru vrubu. [24]



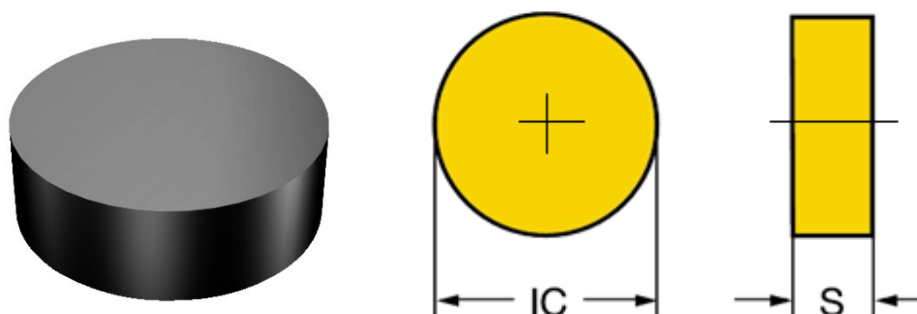
Obr. 3.5 Tvar a geometrie RNGN 120700 T0120 6060 [41]

Tab. 3.5 Parametry RNGN 120700 T0120 670 [41]

RNGN 120700T01020 6060	
Šířka čela destičky	0,1 mm
Úhel čela hřbetu (fazetka)	20°
Tloušťka S	7,9375 mm
Průměr IC	12,7 mm
Poloměr rohu	6,35 mm
Počet břitů	8
Hmotnost	0,0038 kg

RNGN 120700E 6065

Částicemi vyztužená sialonová keramika pro soustružnické operace v žárovzdorných slitinách (HRSA) náročné na houževnatost břitové destičky. [24]



Obr. 3.6 Tvar a geometrie RNGN 120700 T0120 6065 [42]

Tab. 3.6 Parametry RNGN 120700 T0120 6065 [42]

RNGN 120700T01020 6065	
Šířka čela destičky	-
Úhel čela hřbetu (fazetka)	-
Tloušťka S	7,9375 mm
Průměr IC	12,7 mm
Poloměr rohu	6,35 mm
Počet břitů	8
Hmotnost	0,004 kg

3.4 Geometrie řezných nástrojů

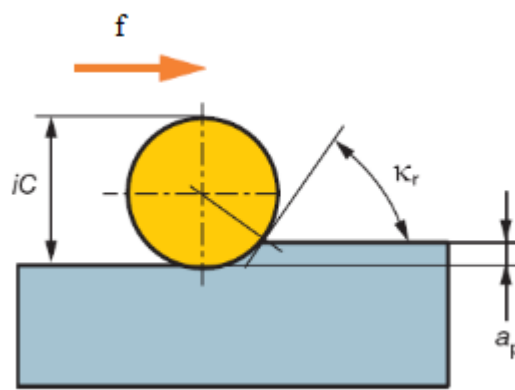
Volba geometrie řezného nástroje je velice důležitá a závisí na mnoha faktorech. Mezi tyto faktory patří především druh operace (hrubování, dokončování, atd.), druh použitého řezného materiálu a také materiál obrobku. Niklové slitiny řadíme do kategorie materiálů se zhoršenou obrobiteľností, geometrie řezného nástroje by měla splňovat požadavky na dostatečnou pevnost řezného klínu, zajištění klidného průběhu obrábění bez vibrací a chvění, odolnost vůči opotřebení a maximální trvanlivost řezného klínu nástroje. [8]

Řezná keramika nabízí optimální výkon pro obrábění HRSA materiálů, avšak jejich použití by mělo být pečlivě uváženo a naplánováno. Keramické kruhové břitové destičky jsou schopny zvládnout větší hloubku řezu než kruhové destičky ze slinutých karbidů. Díky tomu, že keramické destičky nemají otvor pro upínání, nabízí vyšší pevnost a tuhost. Řezné podmínky, obzvláště velikost řezné rychlosti v_c by měla být zvolena tak, aby došlo k tvorbě dostatečného množství tepla v oblasti řezu, ale ne příliš velká, aby destabilizovalo keramiku. Vzhledem ke křehkosti keramických nástrojů by další opatření měla být použita při programování. [24]

Hodnota úhlu nastavení κ_r u vyměnitelných břitových destiček s kruhovou geometrií je závislá na hloubce řezu a_p . Se zvyšující se hloubkou řezu roste úhel od 0 do 90°. S úhlem nastavení se také mění směr výsledné řezné síly. Při obrábění niklových slitin je kritický úhel nastavení κ_r kvůli velkému řeznému odporu, nejlepšího výkonu při obrábění se dosahuje s použitím úhlu menší než 45° (60°). Výhodou kruhových břitových destiček je jejich vysoká pevnost. Pro výpočet úhlu nastavení κ_r lze použít vztah 3.1. [43]

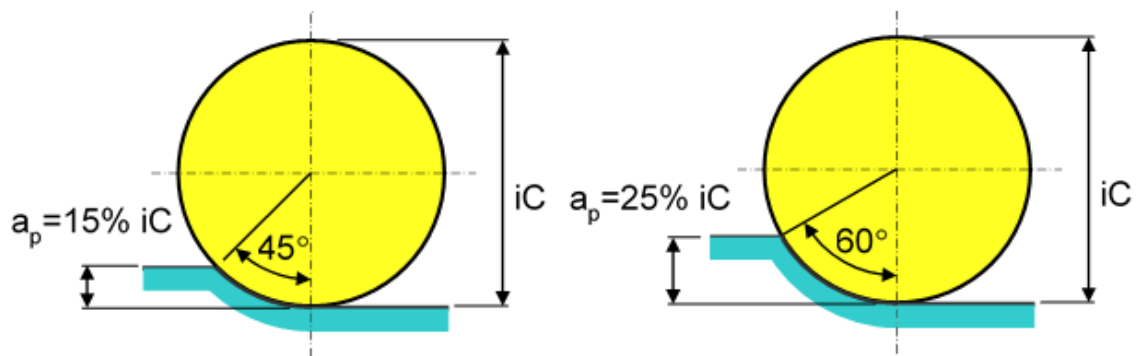
Úhel nastavení: [43]

$$\cos \kappa_r = \frac{(0,5 \cdot iC - a_p)}{0,5 \cdot iC} \quad (3.1)$$



Obr. 3.7 Řezná geometrie – schéma [43]

Při obrábění je také důležitý úhel záběru kruhové destičky, který je roven úhlu nastavení. Hloubka řezu při soustružení niklových slitin s použitím kruhových destiček se většinou volí 15% z průměru destičky, aby nedocházelo k opotřebení nástroje ve tvaru vrubu. Potom úhel nastavení a úhel záběru destičky je 45°. Při použití většího úhlu než je 60° vznikají nadměrné řezné síly, dochází ke chvění při obrábění a produkuje se dlouhá tříška. [43]



Obr. 3.8 Úhel záběru [43]

3.5 Volba řezných podmínek

Při volbě řezných podmínek musíme brát do úvahy mechanické vlastnosti obráběného materiálu. Díky specifickým vlastnostem niklových superslitin, nelze tyto materiály obrábět za stejných řezných podmínek jako běžné oceli. Avšak při aplikaci odlišných řezných materiálů pro obrábění niklových slitin se mohou hodnoty řezných podmínek významně lišit. Omezení se při obrábění slitin na bázi niklu klade především na řeznou rychlost, která ovlivňuje intenzitu opotřebení nástroje. Proto je pro zajištění efektivního a produktivního způsobu obrábění slitiny Alloy 625 důležitá správná volba nástrojového materiálu a příslušných řezných podmínek.

Volba řezných podmínek (řezná rychlost, posuv na otáčku a hloubka řezu) proběhla podle doporučení výrobce viz. tab. 3.7 a byla též konzultována s odborníkem z této společnosti. Hodnoty řezné rychlosti a posuvu se během celého experimentu neměnily $v_c = 250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,25 \text{ mm}$. Při experimentálním obrábění se zkoumal vliv hloubky řezu na opotřebení řezného nástroje při operaci hrubování a dokončování. Pro operaci hrubování byla zvolena hloubka řezu $a_{p1} = 2 \text{ mm}$, pro dokončování byla hodnota hloubky řezu nižší tj. $a_{p2} = 0,6 \text{ mm}$. Hodnoty použitých řezných parametrů jsou uvedeny v tab.3.8.

Tab. 3.7 Doporučené řezné podmínky pro obrábění niklových slitin [24]

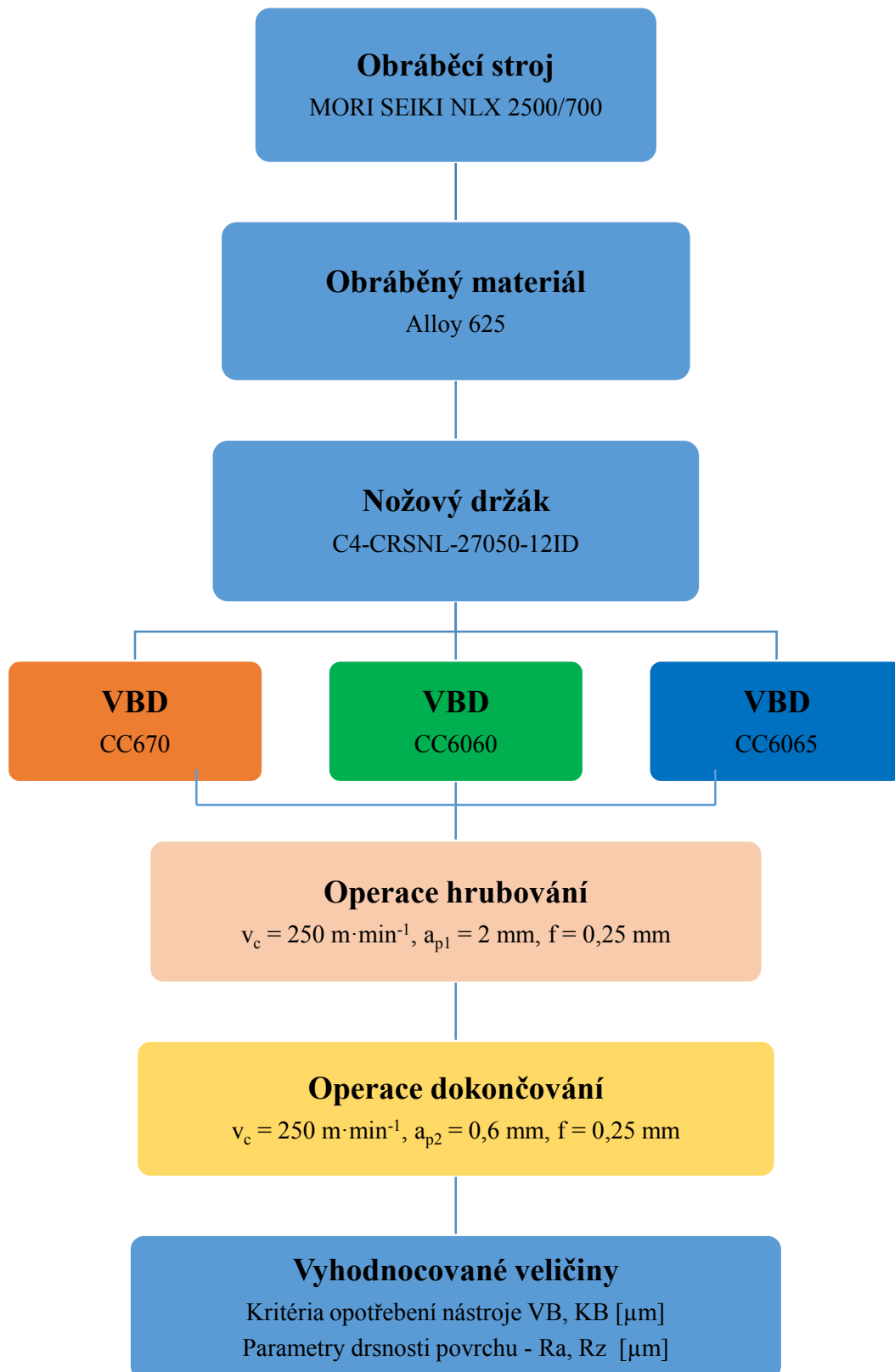
VBD	$v_c [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$	$a_p [\text{mm}]$	$f [\text{mm}]$
CC670	200 - 300	2	0,1 - 0,15
CC6060	200 - 250	2	0,15 - 0,2
CC6065	250 - 300	2 - 3	0,15 - 0,2

Tab. 3.8 Řezné podmínky použité při experimentu

VBD	$v_c [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$	$a_p [\text{mm}]$		$f [\text{mm}]$
		a_{p1} - hrubování	a_{p2} - dokončování	
CC670 CC6060 CC6065	250	2	0,6	0,25

3.6 Blokové schéma experimentu

Pro grafické znázornění jednotlivých kroků experimentální činnosti bylo vytvořeno blokové schéma, viz obr. 3.7.



Obr. 3.7. Blokové schéma experimentální části práce

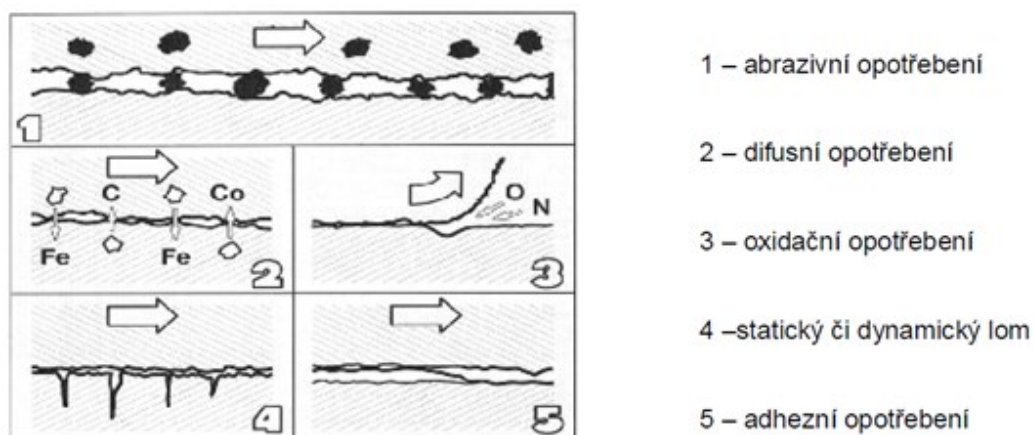
4. Opotřebení a trvanlivost řezných nástrojů

Při procesu obrábění vznikají často velké řezné síly, které jsou doprovázeny tvorbou velkého množství tepla. Tyto síly se vyvíjí na ploše hřbetu a čela nástroje, po které odchází materiál ve formě třísky. Při styku nástroje s obráběným materiálem dochází k opotřebení nástrojového materiálu. Proces opotřebení je velice složitý děj, který závisí především na mechanických a fyzikálních vlastnostech obráběného a nástrojového materiálu, geometrii nástroje, kinematice řezného procesu a vlivu řezného prostředí. Proces utváření třísky, provázeným vysokým tlakem a teplotou se průběžně vytváří čistý kovový povrch, při kterém má obráběný materiál sklon k chemickým reakcím nebo k difúzním procesům. Většina obráběných materiálů obsahuje tvrdé částice různého druhu. Tyto částice nezřídka dosahují tvrdosti materiálu břitu nástroje. Dochází tak k abrazivnímu efektu.

Ačkoliv je opotřebení nástroje nedílnou součástí řezného procesu, podařilo se ho v poslední době vhodnou úpravou řezných podmínek částečně eliminovat. Avšak samotné obrábění superslitin je díky fyzikálním a mechanickým vlastnostem velmi problematické. Jejich zhoršená obrobiteľnosť má pak za následek vyšší namáhání řezného klínu nástroje a jeho rychlejší opotřebení. Proto i nadále zůstává snahou najít způsob, jak tyto slitiny snadno a efektivně obrábět a přitom se vyhnout intenzitnímu opotřebení břitu nástroje. [27]

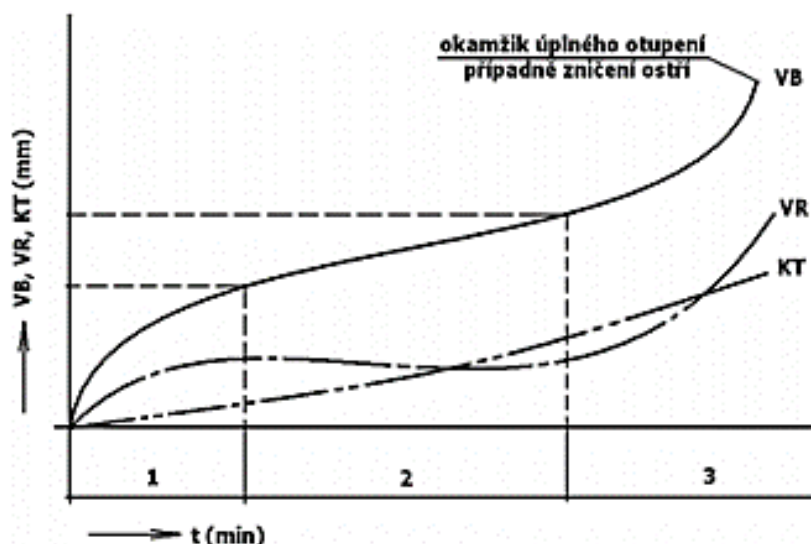
4.1 Mechanismy a kritéria opotřebení nástrojů

K opotřebení břitu nejčastěji dochází kombinací zatěžujících faktorů např. mechanického nebo tepelného namáhání kumulujícím se na hřbetě a čele nástroje. Tepelná zatížení značně namáhají materiál břitu nástroje a v některých případech (např. frézování) vytváří dynamický faktor v okamžiku, kdy jeden břit z materiálu vystupuje a opět do něj vniká. Procesem utváření třísky se při vysokém tlaku a teplotě průběžně vytváří obrobený povrch, který má sklon k chemickým reakcím nebo k difúzním procesům. [27]



Obr. 4.1 Hlavní mechanismy opotřebení břitů nástrojů. [27]

Zvyšováním řezné rychlosti roste střední teplota řezání k teplotě tavení obráběného materiálu. Teplota tavení obráběného materiálu představuje maximální teplotu řezání pro daný materiál. Jelikož je intenzita opotřebení břitu obvykle jednoznačně závislá na teplotě řezání, tvoří opotřebení omezující faktor pro zvyšování řezné rychlosti. Při obrábění vysokými řeznými rychlostmi ovlivňují trvanlivost břitu dva druhy otěru. Jsou jimi chemické rozpouštění a difúze. Chemické rozpouštění je nejdůležitější příčinou opotřebení, v podstatě se řezný materiál rozpouští v odcházející tříse. Druhým mechanismem je ořez limitovanou difúzí. Při zvyšující se řezné rychlosti dosáhne teplota řezání takové úrovně, při které se materiál třísky navařuje na čelo břitu nástroje. Tímto procesem vzniká vrstva materiálu, která se postupně nasycuje difundujícími prvky z řezného materiálu. Nasycení vede ke snížení koncentračního spádu mezi břitem a navařenou vrstvou materiálu, čímž dochází k poklesu intenzity opotřebení. Protože se však difuzivita exponenciálně zvyšuje s narůstající teplotou, zvýšení řezné rychlosti nad bod minimálního opotřebení způsobuje rychlé opotřebení břitu nástroje. [28]

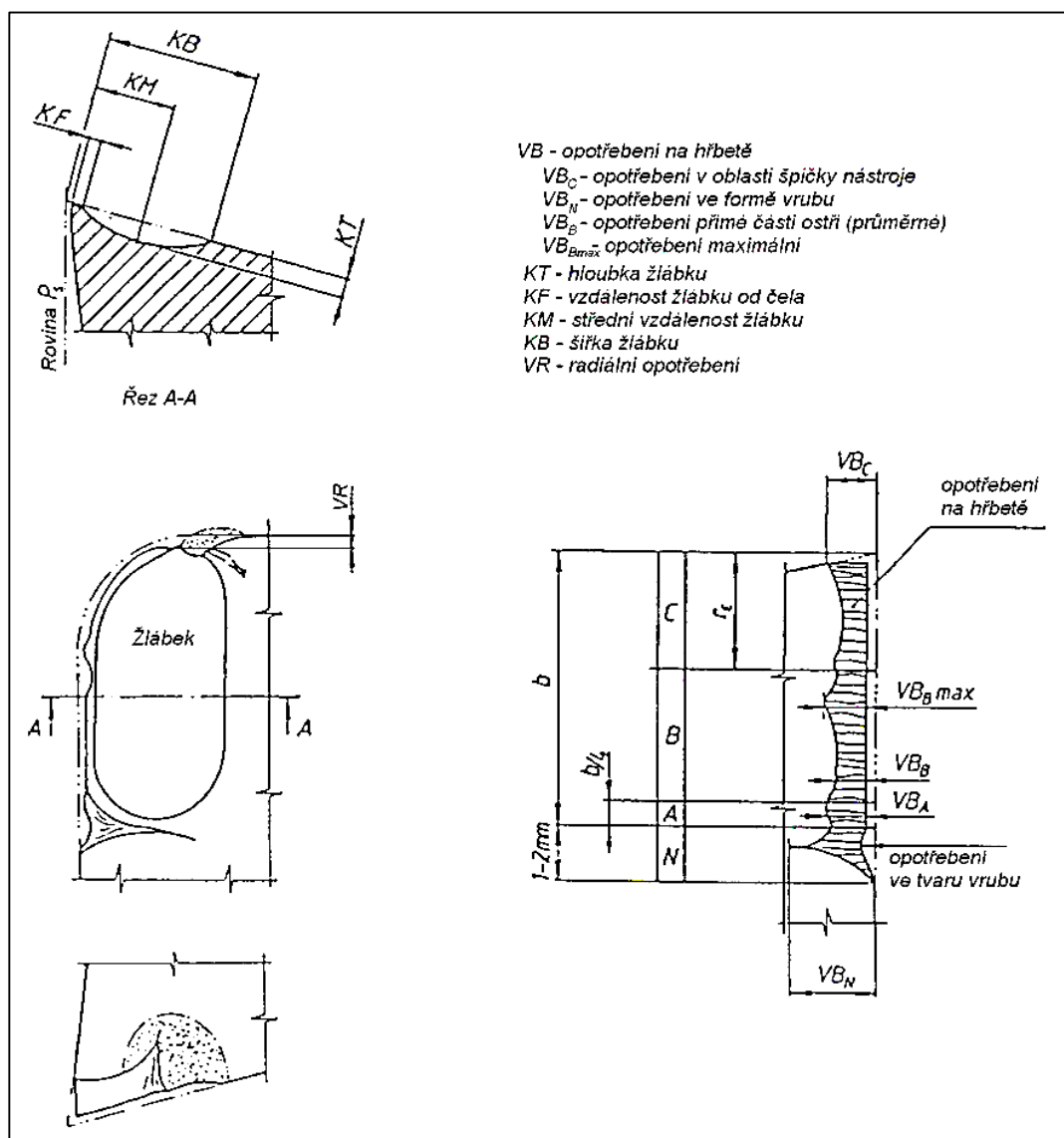


Obr. 4.2 Typické průběhy opotřebení VB, VR a KT v závislosti na době řezání [40]

- 1 - Oblast zrychleného záběhového opotřebení. Obecně souvisí se záběrem nástroje a je způsobeno vysokým měrným tlakem na vrcholcích nerovností nástroje.
- 2 - Oblast lineárního opotřebení. V této oblasti dochází k lineárnímu nárůstu opotřebení a intenzita je konstantní.
- 3 - Oblast zrychleného nadměrného opotřebení. Je obvykle spojeno s limitní teplotou řezání a poklesem tvrdosti nástroje. Nastává velmi rychlé, většinou lavinovité opotřebení.

Experimentální studium opotřebení a otupování břitu je základem pro určení empirických údajů pro optimalizaci řezných parametrů, resp. trvanlivosti břitu. Pro zjišťování velikosti opotřebení se používají metody přímé a nepřímé. [44]

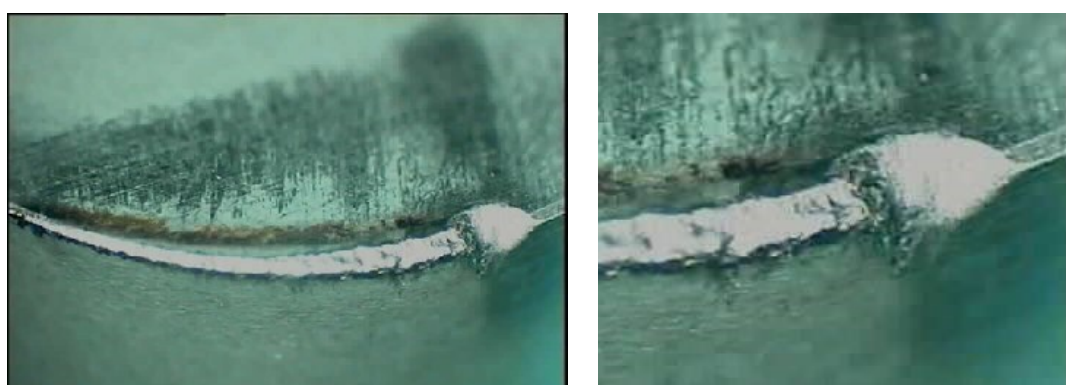
V současnosti se pro hodnocení a měření opotřebení řezných nástrojů vychází z mezinárodní normy „Zkoušení trvanlivosti soustružnických nástrojů s jednou řeznou hranou“ ISO 3685:1993. Tato norma je určena pro zkoušky trvanlivosti při soustružení obrobků z ocelí a litin s nástroji z RO, SK a řezné keramiky. Mimo to norma všeobecně popisuje vnější projevy opotřebení. Z toho důvodu je reálnější definovat opotřebení na hřbetě VB, výmol na čele KT, radiální opotřebení špičky nástroje VR a další v závislosti na materiálu řezné části nástroje. [22, 31]



Obr. 4.3 Kritéria opotřebení dle normy ISO 3685 [33]

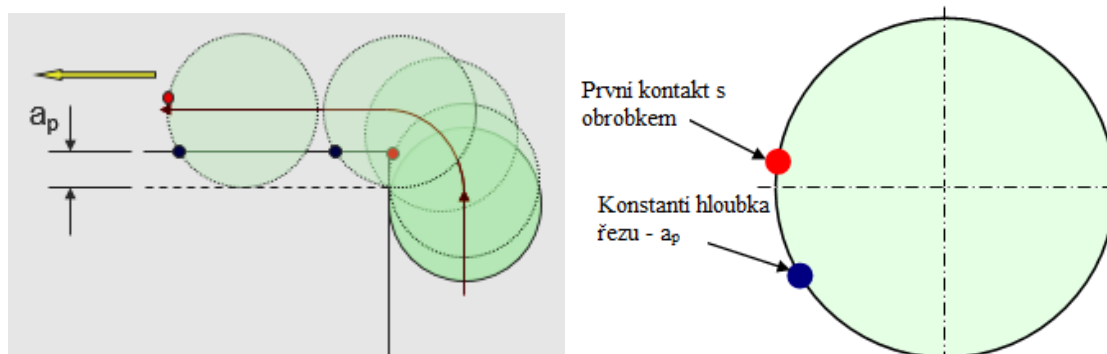
4.1.1 Vliv strategie obrábění na opotřebení břitu

Velikost opotřebení nástrojů během procesu obrábění ovlivňuje celá řada faktorů. Mezi tyto faktory řadíme druh operace, řezné podmínky, použitý nástrojový materiál a druh obráběného materiálu. Při obrábění keramickými břitovými destičkami je nutné brát do úvahy jejich křehkost, v důsledku čehož dochází k opotřebení břitu ve tvaru vrubu. Toto opotřebení vzniká v důsledku vzniku příliš velkého řezného odporu. Pro tento případ je doporučeno upravit řezné parametry (posuv, hloubka řezu, úhel záběru) a snížit tak plochu odebírané třísky. Při obrábění se mohou vyskytovat vibrace, což je pro efektivní proces obrábění nežádoucí. Pro snížení vibrací je doporučeno snížit velikost úhlu záběru s programovacími technikami. [43]



Obr. 4.4 Opotřebení ve tvaru vrubu [43]

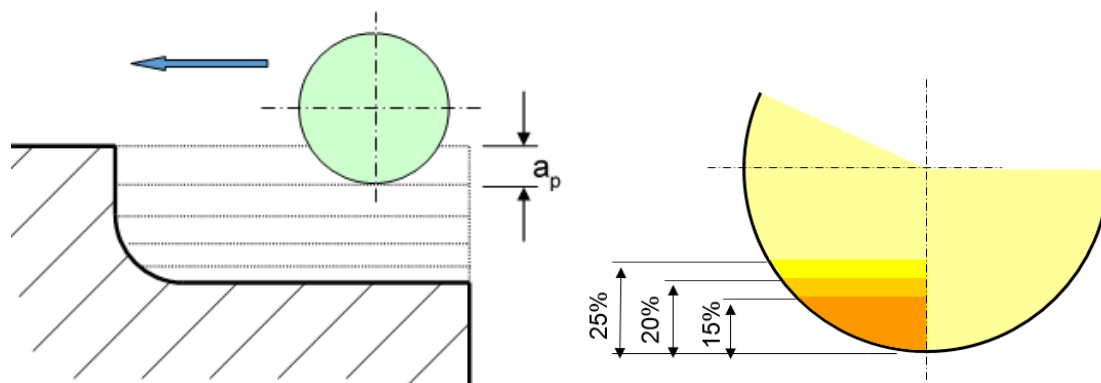
Použitím programovacích technik lze snížit velikost opotřebení nástrojů a tím zvýšit jejich trvanlivost. Při nájezdu do záběru je vhodné najet obloukem, tím pádem nástroj není po celou dobu řezu opotřebováván v jednom bodě (viz. obr. 4.5). [43]



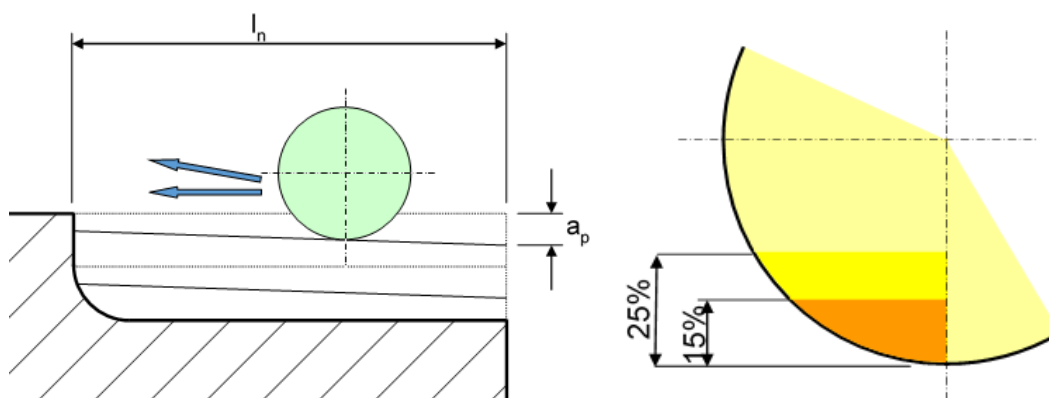
Obr. 4.5 Nájezd do záběru [43]

Další strategie vhodná pro snížení opotřebení nástrojů je použití různých hloubek řezu při jednotlivých přejezdech. Díky měnící se hloubce řezu se mění místo kde se formuje opotřebení ve tvaru vrubu. Hodnota hloubky řezu se pohybuje mezi 15-25% z průměru kruhové destičky. Je výhodnější volit více záběrů s malou hloubkou řezu než jeden záběr s velkou hloubkou řezu. Pro více kratších přejezdů je vhodná strategie obrábění „proti

rameni“ (obr. 4.6). Naopak pro delší přejezdy je vhodné tzv. rampování (obr. 4.7). Volba těchto strategií umožňuje delší řeznou schopnost nástroje, snížení tvorby otřepů a především bezpečnější proces obrábění. [43]



Obr. 4.6 Obrábění proti ramenu [43]



Obr. 4.7 Rampování [43]

4.1.2 Kvantifikace opotřebení břitu nástroje

Pro experimentální část práce obrábění slitiny Alloy 625 byla použita přímá mikrometrická metoda, kterou se velikost opotřebení břitu nástroje určila přímým měřením lineárních rozměrů. Tyto metody mají nevýhodu v tom, že jsou pro měření opotřebení v reálném čase těžko aplikovatelné z důvodu, že funkční břit nástroje je v přímém kontaktu s odebíranou vrstvou obráběného materiálu a otupující se plochy jsou pro měřicí přístroje nedostupné. Proto bylo nutné po každém úběru materiálu proces obrábění přerušit, vyjmout destičku z nožového držáku a umístit pod dílenský mikroskop. Vlivem tohoto mohlo dojít k negativnímu ovlivnění průběhu opotřebení v dalších fázích experimentu. Jelikož měření opotřebení probíhalo u obou nástrojů stejným způsobem, nedošlo při porovnání jejich trvanlivostí k výraznému ovlivnění. [29, 30]

Byl použit mikroskop, vybavený digitální kamerou, který umožňuje několikanásobně zvětšit obraz. Díky digitalizaci bylo možné mikroskop připojit k počítači, ve kterém bylo možné pomocí programu Motic Images Plus 2.0 ML on-line změřit opotřebení vyměnitelné

břítové destičky. Pro správné naměření hodnoty opotřebení vyměnitelné břítové destičky bylo třeba provést pro jednotlivá zvětšení kalibraci software Motic Images Plus 2.0 ML. Kalibrace se provede pomocí kalibrační měrky, která se vyfotografuje při stejném zvětšení jako měřená vyměnitelná břítová destička.



Obr. 4.8 Laboratorní sestava pro měření opotřebení nástrojů

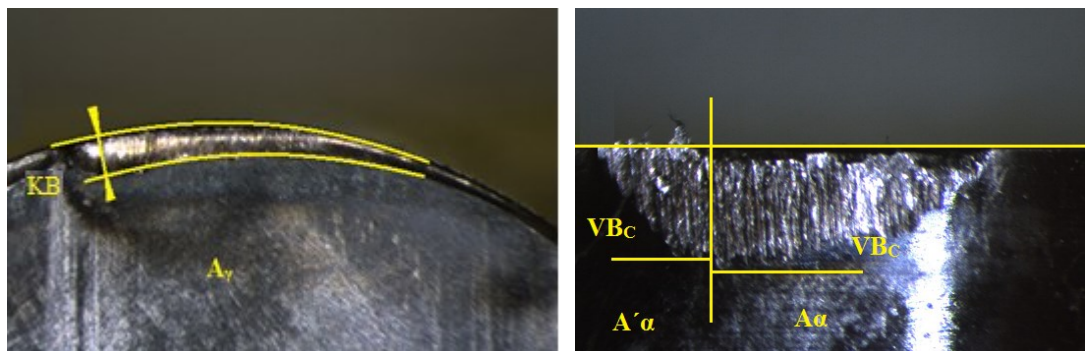
Z důvodu velkého množství dat byly do tabulky 4.1 a 4.2 vloženy pouze fotografie opotřebení po prvním úběru a po úběru kdy opotřebení dosáhlo kritériálního opotřebení. Samotné měření a stanovení velikosti opotřebení břítu probíhalo u všech VBD stejným způsobem. Společně s rostoucí velikostí opotřebení byla stanovena doba, po kterou byl břit nástroje v záběru a také množství odebraného materiálu, než bylo dosaženo předem stanovené hodnoty opotřebení.

Strojní čas: [32]

$$t_{As} = \frac{L}{v_f} = \frac{l_n + l + l_p}{n \cdot f} \quad [min] \quad (4.1)$$


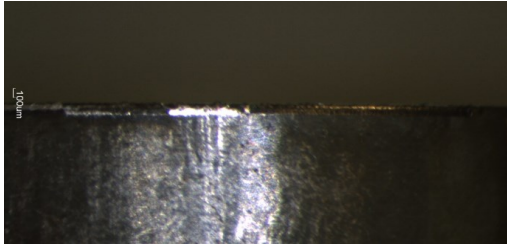
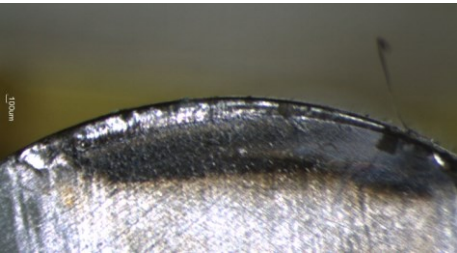
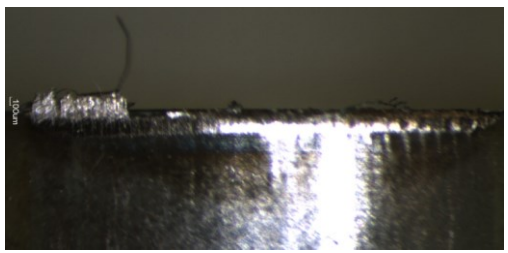
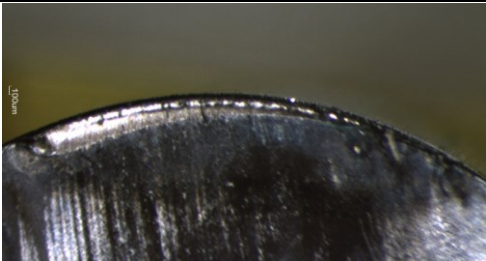

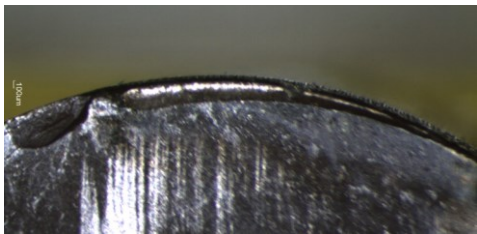
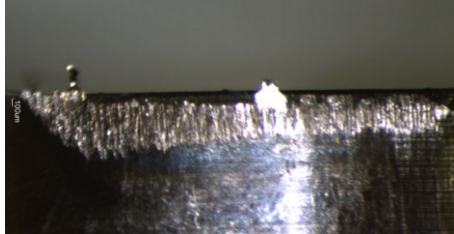
Množství odebraného materiálu: [32]

$$Q = v_c \cdot a_p \cdot f \cdot t_{As} \quad [cm^3] \quad (4.2)$$

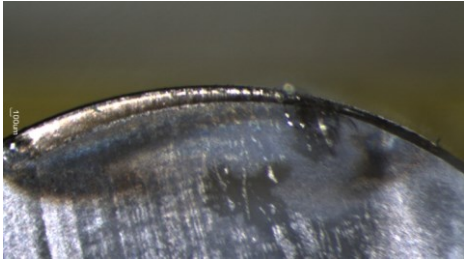
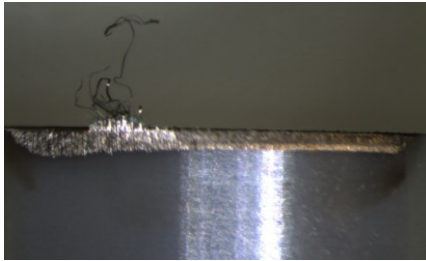

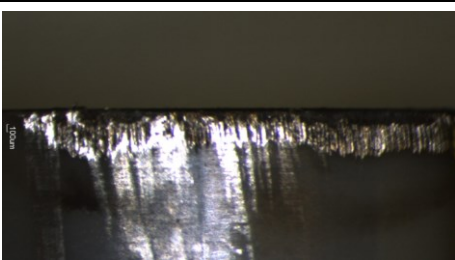


Obr. 4.9 Měření opotřebení na hlavním a vedlejším ostří nástroje

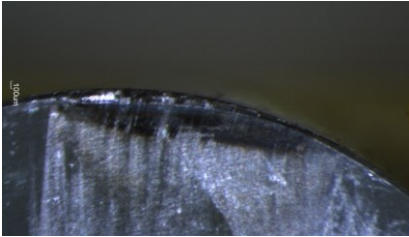
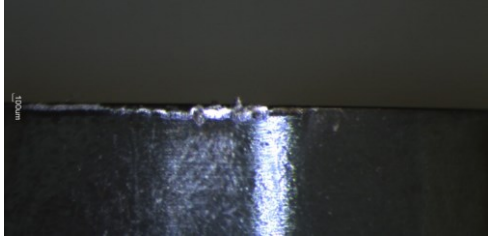
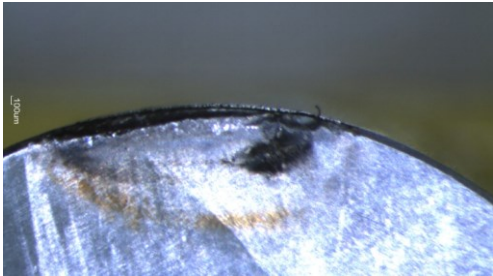
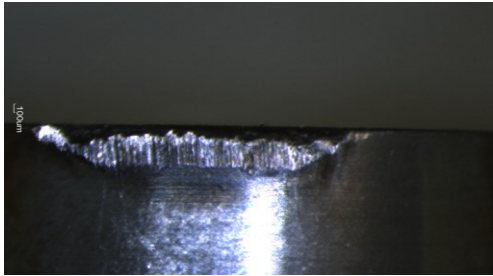
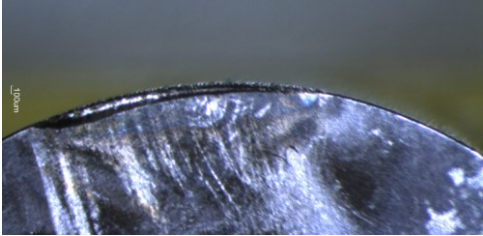
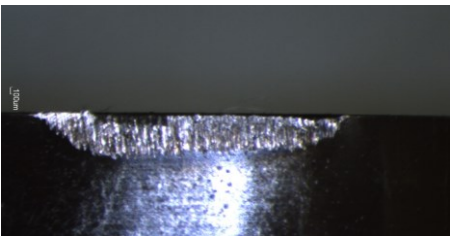
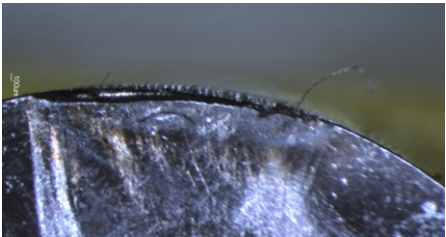
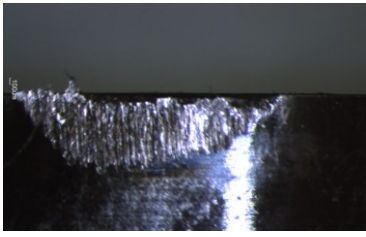
Tab. 4.1 Opotřebení nástrojů – operace hrubování ($a_{p1} = 2 \text{ mm}$)

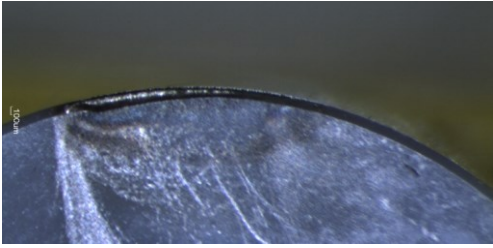
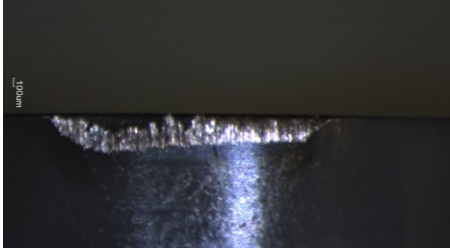

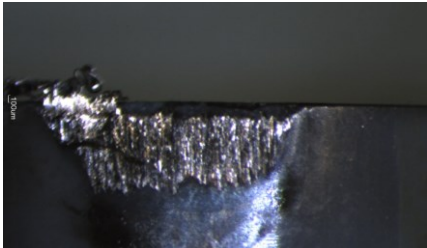
Řezná keramika - CC670					
Plocha čela				Plocha hřbetu	
i	t_{As} [min]	Q [cm ³]	KB [μm]	Hlavní hřbet - $A\alpha$ VB _C [μm]	Vedlejší hřbet - $A'\alpha$ VB _C [μm]
1	0,67	83,94	382	131	107
					
2	1,30	162,86	380	209	136
3	1,89	236,75	397	248	214
4	2,44	305,61	337	317	219
5	2,96	369,45	370	346	278
					
Řezná keramika - CC6065					
Plocha čela				Plocha hřbetu	
i	t_{As} [min]	Q [cm ³]	KB [μm]	Hlavní hřbet - $A\alpha$ VB _C [μm]	Vedlejší hřbet - $A'\alpha$ VB _C [μm]
1	0,65	80,93	397	502	385
					
2	1,25	156,83	405	917	610
					

Řezná keramika - CC6060

Plocha čela				Plocha hřbetu	
i	t_{As} [min]	Q [cm ³]	KB [μm]	Hlavní hřbet - $A\alpha$ VB _C [μm]	Vedlejší hřbet - $A'\alpha$ VB _C [μm]
1	0,68	85,45	381	440	297
					
2	1,33	165,88	421	546	421
3	1,93	241,27	453	692	453
					

Tab. 4.2 Opotřebení nástrojů – operace dokončování ($a_{p2} = 0,6$ mm)

Řezná keramika - CC670					
Plocha čela				Plocha hřbetu	
i	t_{As} [min]	Q [cm³]	KB [μm]	Hlavní hřbet - $A\alpha$ VBC [μm]	Vedlejší hřbet - $A'\alpha$ VBC [μm]
1	0,73	27,22	195	195	136
					
2	1,44	53,99	222	278	151
3	2,14	80,30	226	341	185
4	2,83	106,16	240	390	302
5	3,51	131,57	242	453	361
6	4,17	156,53	285	502	453
7	4,83	181,03	287	570	497
					
Řezná keramika - CC6065					
Plocha čela				Plocha hřbetu	
i	t_{As} [min]	Q [cm³]	KB [μm]	Hlavní hřbet - $A\alpha$ VBC [μm]	Vedlejší hřbet - $A'\alpha$ VBC [μm]
1	0,69	25,86	234	668	473
					
2	1,37	51,27	264	1229	902
					

Řezná keramika - CC6060					
Plocha čela				Plocha hřbetu	
i	t _{As} [min]	Q [cm ³]	KB [μm]	Hlavní hřbet - Aα VB _C [μm]	Vedlejší hřbet - A'α VB _C [μm]
1	0,74	27,90	198	468	307
					
2	1,48	55,34	234	712	570
3	2,20	82,33	293	863	810
4	2,90	108,88	304	1253	1156
					

4.1.3 Vliv opotřebení na trvanlivost nástroje

Trvanlivost řezného nástroje lze definovat jako součet všech čistých (strojních) časů řezání od začátku obrábění až po opotřebení břitu nástroje na předem stanovenou hodnotu vybraného kritéria (kritérium opotřebení a jeho hodnota musí být stanoveny tak, aby obráběná součást měla požadovaný tvar, rozměry a kvalitu obrobeného povrchu po celou dobu trvanlivosti nástroje). Součet trvanlivostí neboli celkové doby funkce nástroje od jeho prvního uvedení do činnosti až po jeho vyřazení (použití všech břitů u VBD) udává životnost nástroje. U mechanicky upínaných VBD lze životnost stanovit dle vztahu: [17]

$$Z = \sum T_i = q \cdot T [min] \quad (4.5)$$

Trvanlivost nástroje, podobně jako jeho opotřebení, závisí zejména na metodě obrábění (soustružení, frézování, vrtání, atd.), vlastnostech obráběného a nástrojového materiálu, řezných podmínkách. Počátkem 20. století zjistil F. W. Taylor, že z řezných podmínek má na trvanlivost nástroje největší vliv právě řezná rychlost a odvodil základní vztah pro vzájemnou závislost těchto dvou veličin, na němž jsou založeny dnešní normy ISO 3685,

i ČSN ISO 8688-1 a ČSN ISO 8688-2, který je u nás znám pod názvem "T – v_c závislost" (někdy též "Taylorův vztah") a užívá se ve tvaru: [17]

$$T = \frac{C_T}{v_c^m} [\text{min}] \quad (4.3)$$

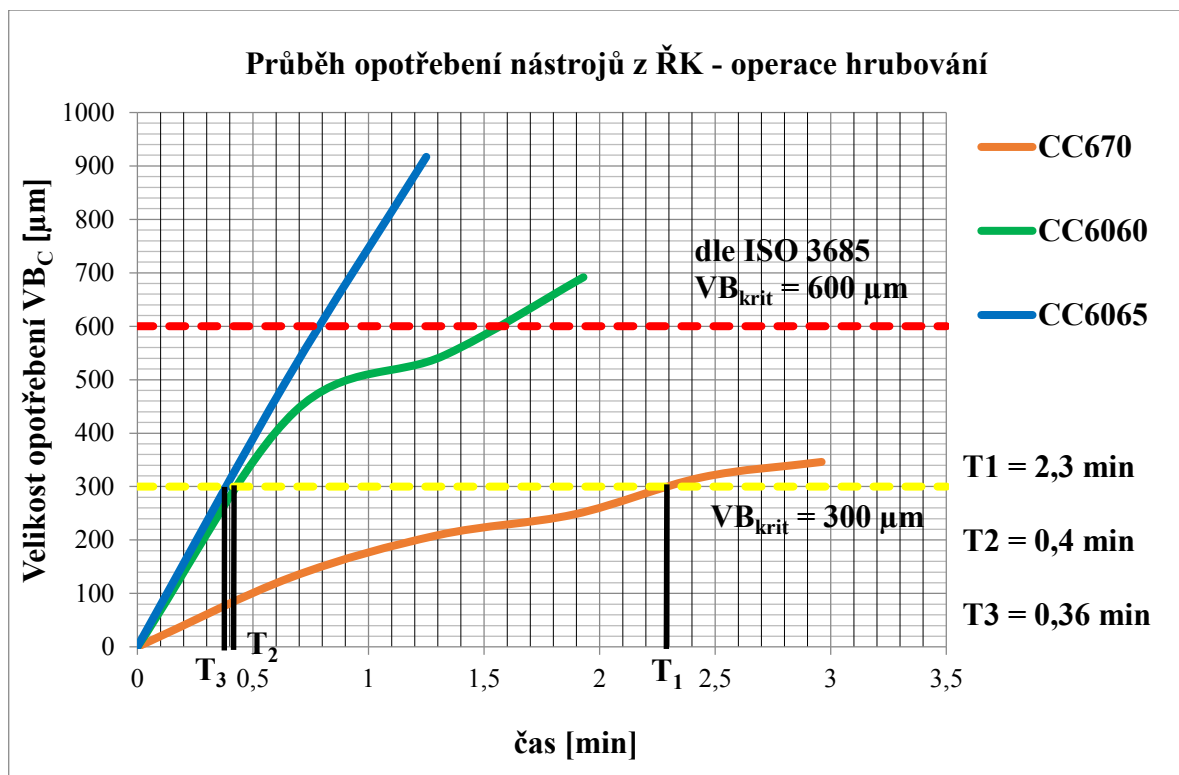
Často se vzhledem k velmi vysoké a nepraktické hodnotě konstanty C_T (řádově 10⁹÷10¹³) uvádí vztah: [17]

$$v_c = \frac{C_V}{T^{1/m}} [m \cdot \text{min}^{-1}] \quad (4.4)$$

protože $c_v = C_T^{1/m}$, je řádově velikost konstanty C_V pouze (10²÷10³)

Cílem experimentálního obrábění materiálu Alloy 625 bylo porovnat dosažené výsledky tří vyměnitelných břitových destiček při operaci hrubování a dokončování. Byla použita konstantní řezná rychlost a posuv pro všechny operace, měnila se pouze hodnota hloubky řezu. Během obrábění se sledoval časový nárůst opotřebení nástrojů. Kritériem opotřebení kruhových vyměnitelných břitových destiček z ŘK se stalo opotřebení v oblasti špičky nástroje na vedlejším hřbetě nástroje. Po vynesení závislosti VB = f (t), viz graf 1 a 2, se odečetly hodnoty trvanlivostí pro předem stanovenou hodnotu opotřebení VB_{krit} = 600 μm, kterou uvádí norma ISO 3685. Jelikož během experimentálního obrábění jeden z nástrojů nedosahoval požadovaného opotřebení VB_{krit} = 600 μm, byla zvolena nižší hodnota kritéria opotřebení, kterou dosáhly všechny tři nástroje. Pro operaci hrubování bylo zvoleno VB_{krit} = 300 μm a pro operaci dokončování VB_{krit} = 500 μm. Dále se sledovala dosažená kvalita povrchu po prvním přejezdu a po přejezdu kdy bylo dosaženo opotřebení VB.

Z tabulky 4.1 byla následně vytvořena závislost opotřebení břitu na čase (graf 4.1). Jedná se o operaci hrubování, kde byla zvolena hloubka řezu a_{p1} = 2 mm. Z grafu je patrný průběh opotřebení nástrojů.



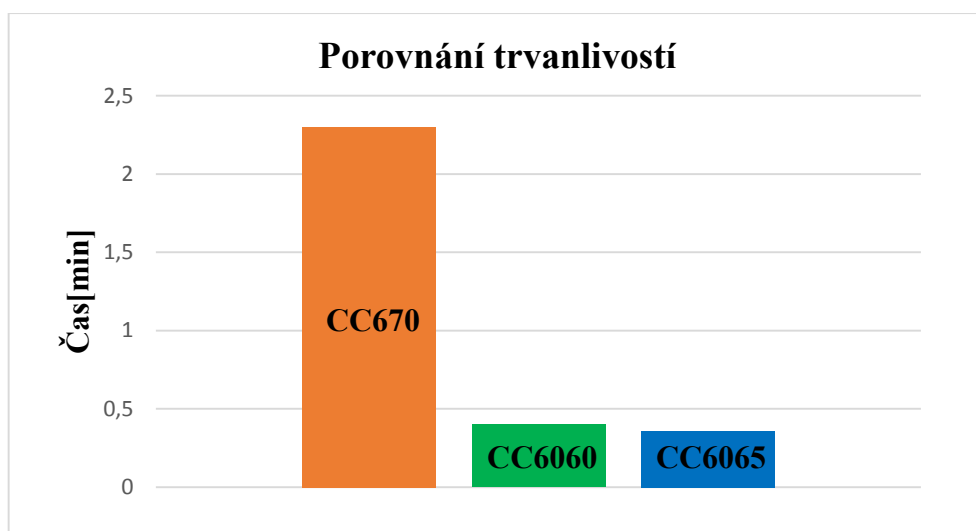
Graf 4.1 Průběh opotřebení nástrojů z ŘK – hrubování

Pomocí grafu 4.1 byla určena přesná doba obrábění do dosažení zvolené hodnoty opotřebení na hřbetě $VB_{krit} = 0,3$ mm pro každou vyměnitelnou břitovou destičku. Dle vzorce 4.2 byl určen objem odebraného materiálu. V tabulce 4.3 jsou uvedeny hodnoty trvanlivostí jednotlivých břitových destiček a k nim příslušné hodnoty odebraného materiálu.

Tab. 4.3 Trvanlivosti nástrojů – operace hrubování

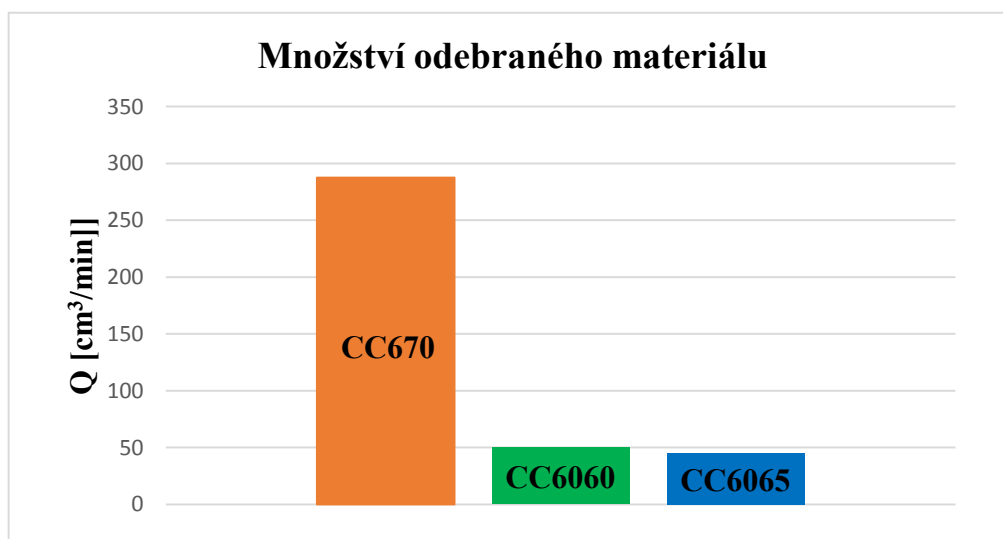
VBD	T [min]	Q [cm ³]
CC670	2,3	287,5
CC6060	0,4	50
CC6065	0,36	45

Prostřednictvím vytvořené tabulky pro jednotlivé vyměnitelné břitové destičky byly vytvořeny grafy, kde byly porovnány časy a objem odebraného materiálu do dosažení zvoleného kritéria opotřebení $VB_{krit} = 0,3$ mm.



Graf 4.2 Porovnání časů trvanlivostí nástrojů – operace hrubování

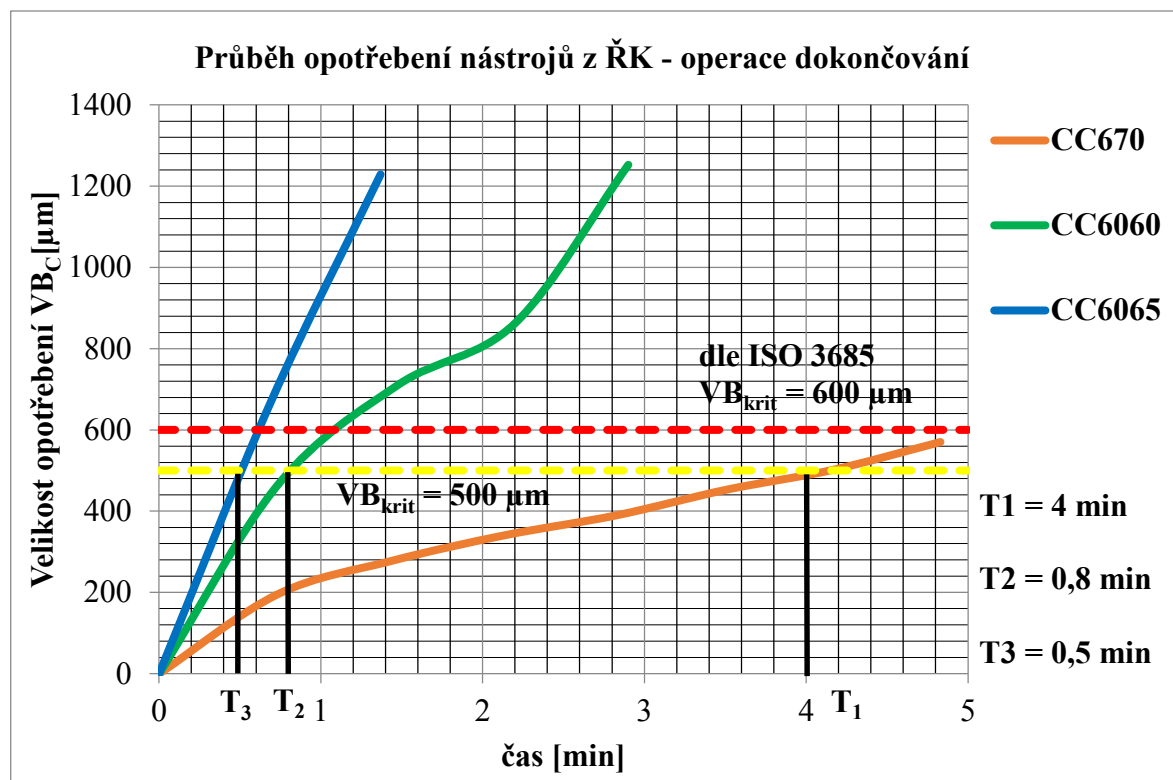
Pro všechny vyměnitelné břitové destičky byla zvolená řezná rychlost $v_c = 250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, posuv $f = 0,25 \text{ mm}$ a pro operaci hrubování byla zvolena hloubka řezu $a_{p1} = 2 \text{ mm}$. Z těchto řezných podmínek dokázala destička CC670 soustružit do opotřebení $VB_{\text{krit}} = 0,3 \text{ mm}$ materiál vzorku **2,3 min**. Destička CC6060 vydržela v řezu **0,4 min** a destička CC6065 vydržela v řezu podstatně kratší dobu, a to **0,36 min**. Z grafu a z výsledků testování je patrné, že břitová destička CC670 jednoznačně převyšuje svou řezivostí zbylé dvě destičky. Srovnání dosažených dob obrábění do opotřebení břitu na hodnotu $VB_{\text{krit}} = 0,3 \text{ mm}$ je zobrazeno na grafu 4.2.



Graf 4.3 Porovnání množství odebraného materiálu – operace hrubování

Jak lze vidět na grafu 4.3, nejvíce materiálu do opotřebení $VB_{\text{krit}} = 0,3 \text{ mm}$ odebrala vyměnitelná břitová destička CC670 objem **287,5 cm³** materiálu. Destička CC6060 byla schopna odebrat pouze **50 cm³** a vyměnitelná břitová destička CC6065 odebrala **45 cm³**.

Pro operaci dokončování byly použity stejné řezné podmínky, kromě hloubky řezu, která byla zvolena $a_{p2} = 0,6$ mm. Kritérium opotřebení břitových destiček bylo stanoveno na $VB = 0,5$ mm. Z tabulky 4.2 byla opět vytvořena závislost opotřebení břitu na čase (graf 4.4).



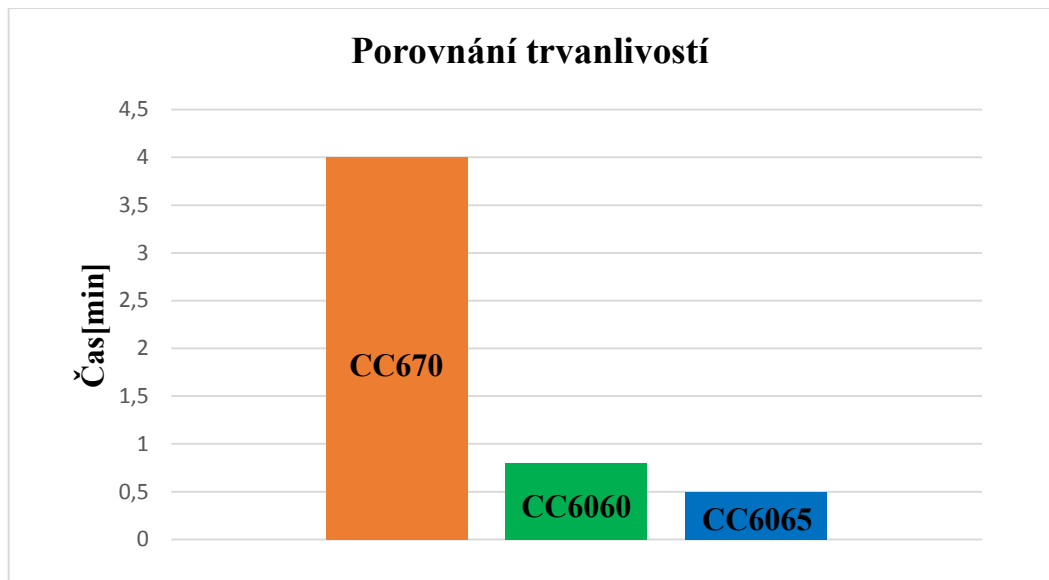
Graf 4.4 Průběh opotřebení nástrojů z ŘK – dokončování

Pomocí grafu 4.4 byla určena přesná doba obrábění do dosažení zvolené hodnoty opotřebení na hřbetě $VB_{krit} = 0,3$ mm pro každou vyměnitelnou břitovou destičku. Dle vzorce 4.2 byl určen objem odebraného materiálu. V tabulce 4.4 jsou uvedeny hodnoty trvanlivostí jednotlivých břitových destiček a k nim příslušné hodnoty odebraného materiálu.

Tab. 4.4 Trvanlivosti nástrojů – operace dokončování

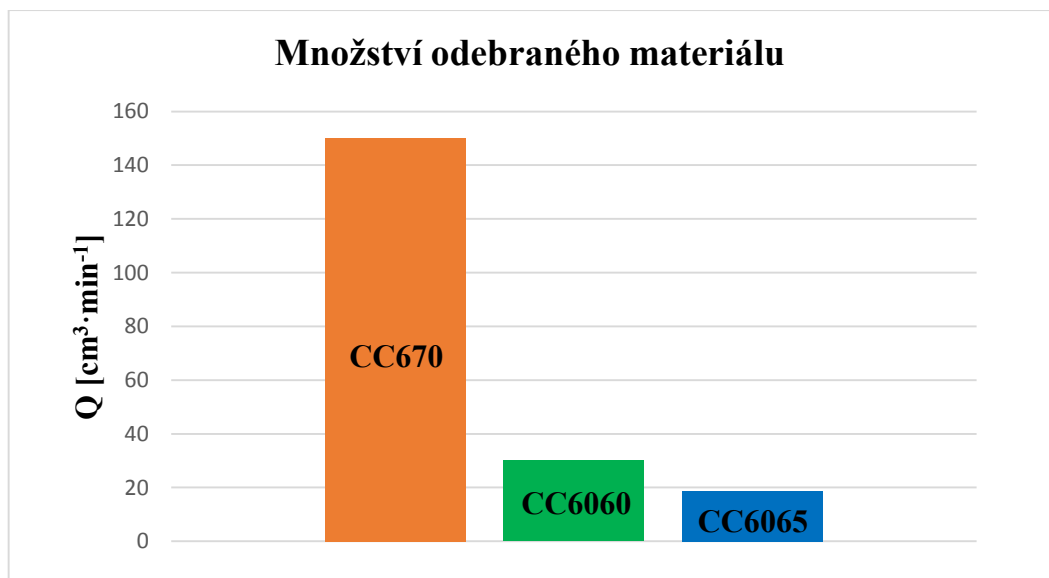
VBD	T [min]	Q [cm ³]
CC670	4	150
CC6060	0,8	30
CC6065	0,5	18,75

Prostřednictvím vytvořené tabulky pro jednotlivé vyměnitelné břitové destičky byly vytvořeny grafy, kde byly porovnány časy a objem odebraného materiálu do dosažení zvoleného kritéria opotřebení $VB_{krit} = 0,5$ mm.



Graf 4.5 Porovnání časů trvanlivostí nástrojů – operace dokončování

Pro všechny vyměnitelné břitové destičky byla zvolená řezná rychlost $v_c = 250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, posuv $f = 0,25 \text{ mm}$ a pro operaci hrubování byla zvolena hloubka řezu $a_{p1} = 0,6 \text{ mm}$. Za těchto řezných podmínek dokázala destička CC670 soustružit do opotřebení $VB_{\text{krit}} = 0,5 \text{ mm}$ materiál vzorku **4 min**. Destička CC6060 vydržela v řezu **0,8 min**, a destička CC6065 vydržela v řezu podstatně kratší dobu a to **0,5 min**. Z grafu a z výsledků testování je patrné, že břitová destička CC670 jednoznačně převyšuje svou řezivostí zbylé dvě destičky, jako tomu bylo i při operaci hrubování. Srovnání dosažených dob obrábění do otupení břitu na hodnotu $VB_{\text{krit}} = 0,5 \text{ mm}$ je zobrazeno na grafu 4.5.



Graf 4.6 Porovnání množství odebraného materiálu – operace dokončování

V grafu 4.6 jsou uvedeny hodnoty odebraného materiálu při operaci dokončování, dokud břitové destičky nedosáhly opotřebení $VB_{krit} = 0,5$ mm. Nejvíce materiálu do stanoveného opotřebení odebrala vyměnitelná břitová destička CC670 objem **150 cm³** materiálu. Destička CC6060 odebrala pouze **30 cm³** po dobu její trvanlivost a vyměnitelná břitová destička CC6065 byla schopna odebrat pouze **18 cm³**.

V tabulce 4.5 lze porovnat hodnoty trvanlivostí jednotlivých nástrojů a množství odebraného materiálu, které jsou schopny odebrat, než dojde k jejich otupení.

Tab. 4.5 Porovnání trvanlivostí jednotlivých nástrojů pro obě operace

VBD	Hrubování - $a_p = 2$ mm		Dokončování - $a_p = 0,6$ mm	
	T [min]	Q [cm ³]	T [min]	Q [cm ³]
CC670	2,3	287,5	4	150
CC6060	0,4	50	0,8	30
CC6065	0,36	45	0,5	18,75

4.2 Vliv opotřebení na kvalitu obrobeného povrchu

V oblasti obrábění se často můžeme setkat se strojními součástmi, na které jsou kladeny vysoké nároky, nejen z hlediska kvality obrobeného povrchu, ale také rozměrové přesnosti či vzhledu. Proces obrábění je velice rozmanitý, ale také složitý. Lze do něj zahrnout spoustu závislostí, podmínek a omezení. Technologie obrábění jako vědní obor studuje, zkoumá a analyzuje vzájemné souvislosti mezi těmito faktory. V oblasti obrábění používáme technologie s definovatelnou geometrií ostří (soustružení, frézování, vrtání, apod.) nebo technologie s obtížně nebo nedefinovatelnou geometrií ostří (broušení, honování, lapování, superfinišování, apod.). Tyto různé technologie mají jedno společné, a to vznik nového povrchu. Takto vzniklý povrch nazýváme plocha obrobená a má určité vlastnosti a charakter, které jsou ovlivňovány zvolenou technologií obrábění, stanovenými a použitými podmínkami pro obrábění a také řezným prostředím. Pro komplexní posuzování kvality obrobeného povrchu se používá pojem integrita povrchu. [34]

Integritou povrchu se označuje soubor charakteristik, které popisují funkční vlastnosti povrchu součástí. Z hlediska výroby má zásadní význam znalost mechanismů vytváření nového povrchu, což umožňuje pochopit povahu a vlastnosti takto vytvořeného povrchu. Integrita povrchu je tedy odrazem podmínek, za kterých funkční plocha obrobku vzniká. Bere v potaz důsledky působení technologických metod na jakost obrobené plochy a dává je do vztahu k funkčním požadavkům kladeným na celý výrobek. [35, 36]

Integritu povrchu tvoří:

- a) geometrická přesnost,
- b) drsnost povrchu,
- c) zbytková napětí v povrchové vrstvě,
- d) změny tvrdosti v povrchové vrstvě,
- e) změny struktury v povrchové vrstvě,
- f) tepelné změny – opaly,
- g) trhliny.

Nelze říci, že jednotlivé složky tvoří oddělené části integrity povrchu. Složky se vzájemně ovlivňují a doplňují. Například vlnitost povrchu jako geometrická veličina může vyvolat změny drsnosti povrchu, změny tvrdosti v povrchové vrstvě mohou souviset se změnami struktury a tepelnými změnami atd. [33, 34]

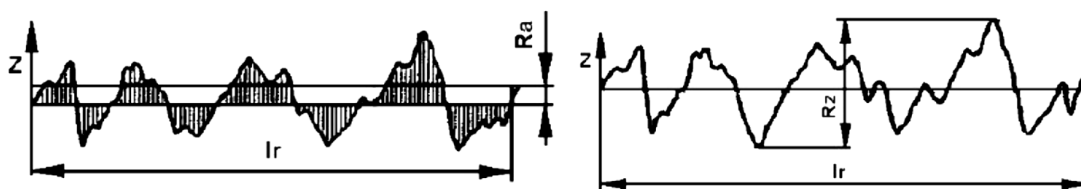
Geometrická přesnost je určena odchylkami tvaru, zejména souosostí, kruhovitostí, válcovitostí, kolmostí. Z hlediska přesnosti je geometrická přesnost určena odchylkami tvaru, jedná se zejména o souosost, kruhovitost, válcovitost, kolmost. Z hlediska ovlivnění přesnosti vlastním obráběním se jedná zvláště o kruhovitost a válcovitost. Ovlivnění geometrické přesnosti má účinek v tuhosti soustavy S–N–O, opotřebení nástroje, řezných podmínkách a prostředí a dalších vlivech [37].

4.2.1 Drsnost povrchu a její závislost na parametrech obrábění

Měření a vyhodnocení drsnosti povrchu probíhalo v souladu s normou ČSN EN ISO 4287. Tato norma stanovuje termíny, definice a parametry pro určování struktury povrchu (drsnosti, vlnitosti a základního profilu) profilovou metodou. Pro vyhodnocení experimentální činnosti byly vybrány dva nejčastěji používané parametry, a to průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu R_a a největší výška profilu R_z , neboli součet výšky nejvyššího výstupku profilu a hloubky nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky l_r . [38]

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad [\mu m] \quad (4.6)$$

$$R_z = Z_{p_{max}} + Z_{v_{max}} \quad [\mu m] \quad (4.7)$$



Obr. 4.10. Vyhodnocované parametry R_a a R_z [38]

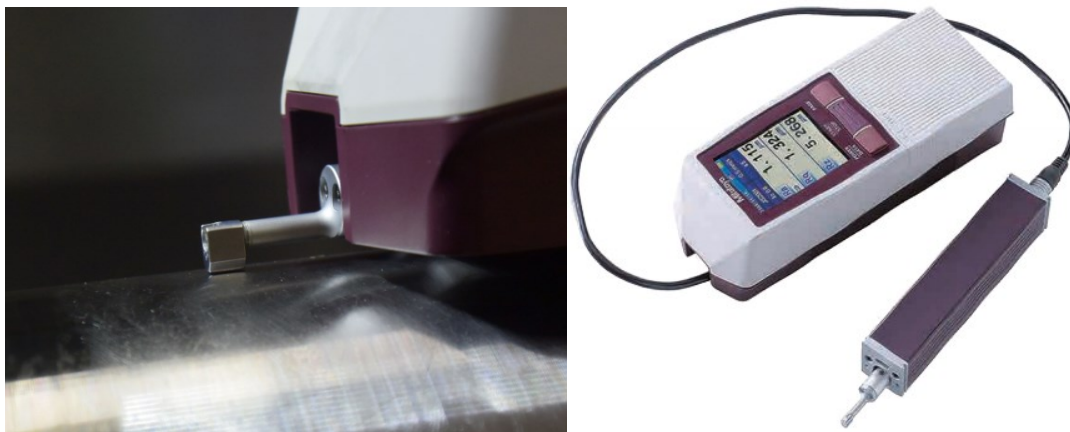
4.2.2 Stanovení drsnosti povrchu při obrábění slitiny Alloy 625

Měření struktury povrchu bylo provedeno redukcí do roviny kolmé k obrobenému povrchu. Tím se vytvořil profil, z kterého bylo možné získat požadované parametry drsnosti. Samotné měření bylo provedeno dotykovým měřicím přístrojem SURFTEST SJ – 210 viz obr. 4.12. Tento přístroj zkoumá dané povrchy snímacím hrotem a získává tím úchylky ve formě profilu povrchu. Nejdříve však bylo nutné určit mezní vlnovou délku λ_c . Tato délka je rovna základní délce a obvykle bývá specifikována na výkrese nebo výrobní dokumentaci. V případě periodického povrchu, který vznikl podélným soustružením válce slitiny Alloy 625, musela být vlnová délka λ_c stanovena pomocí grafického parametru R_{Sm} . Odhadnutím R_{Sm} bylo možné dle příslušné tabulky 4.6 přiřadit parametr vlnové délky.

Tab. 4.6 Základní délky drsnosti pro měření R-parametrů [38]

R_{Sm} [μm]	Základní délka drsnosti l_r [mm]	Vyhodnocovaná délka drsnosti l_n [mm]
$0,013 < R_{Sm} \leq 0,04$	0,08	0,4
$0,04 < R_{Sm} \leq 0,13$	0,25	1,25
$0,13 < R_{Sm} \leq 0,4$	0,8	4
$0,4 < R_{Sm} \leq 1,3$	2,5	12,5
$1,3 < R_{Sm} \leq 4$	8	40

Samotné měření parametrů drsnosti se provádělo přímo na obráběcím stroji, vždy v podélném směru osy obrobku (příčná drsnost obrobeného povrchu). Po každém úběru materiálu bylo naměřeno 10 hodnot parametru R_a a R_z , a to vždy ve třech místech na ploše válce pootočených o 120° . K vyhodnocení dat byl použit software SJ-Tools, umožňující řízení měřicího přístroje, definici podmínek měření, grafické zobrazení profilu měření, archivaci měřicího protokolu a dokumentaci naměřených výsledků. Přístroj byl nastaven na normu ISO 1997 s Gaussovým filtrem pro hodnocení profilu drsnosti.



Obr. 4.12 Dotykový měřicí přístroj SURFTEST SJ – 210

Každé měření je zatíženo chybou. I v případě, že opakujeme měření za stejných podmínek zjistíme, že výsledky měření se od sebe více či méně liší. Nejruznější negativní vlivy, které se v reálném měřicím procesu vyskytují, se projeví odchylkou mezi naměřenou a skutečnou hodnotou měřené veličiny. Cílem měření je určit skutečné hodnoty, což je možné jen určením chyby měření. Při měření parametrů drsnosti povrchu Ra a Rz mohlo dojít nesprávnému provedení měření, špatnému odečtení hodnoty z přístroje, vadou přístroje, nesprávnou manipulací s měřidlem atd. Proto byly naměřené hodnoty parametrů drsnosti Ra a Rz testovány na zatížení hrubou chybou. Pro jejich zjištění byl aplikován Grubbsův test extrémních odchylek. Tento test se používá pro objektivní vylučování extrémních hodnot na základě vypočteného testovacího kritéria u souborů dat, které odpovídají Gaussovu normálnímu rozdělení. Testování odlehlých hodnot předcházelo stanovení výběrového průměru \bar{x} a směrodatné odchylky základního souboru $s(x)$. Ze vztahu, viz níže, bylo stanoveno testovací kritérium pro první hodnotu naměřeného souboru. [37]

$$H_1 = \frac{\bar{x} - x_1}{s(x)} \quad (4.8)$$

Vypočtené testovací kritérium bylo porovnáno s tabulkovou kritickou hodnotou pro příslušný počet naměřených hodnot výběrového souboru a zvolenou hladinu významnosti α .

- počet měření $n = 10$,
- hladina významnosti $\alpha = 0,05 \rightarrow 95,5 \%$,
- kritická hodnota = 2,29

Za předpokladu, že hodnota překročí kritickou hodnotu, pak je ovlivněna hrubou chybou a ze souboru naměřených hodnot veličiny se vyloučí. Omezit riziko jejich výskytu lze důsledným dodržováním příslušných měřicích postupů, podmínek měření a pozorností obsluhy.

V průběhu experimentu bylo získáno velké množství dat. Měření vybraných parametrů drsnosti povrchu Ra a Rz bylo realizováno po prvním přejezdu a poté po přejezdu, kdy nástroj dosáhl patřičného opotřebení. Vzorový výpočet hodnot proběhl dle následujících vztahů a získané hodnoty byly uvedeny do tabulek 4.7 – 4.9.

Výběrový průměr: [36]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad [\mu m] \quad (4.9)$$

Výběrová směrodatná odchylka: [36]

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad [\mu m] \quad (4.10)$$

Výpočet standartní nejistoty typu B (u_B): [36]

Hodnota nejistoty opěrné patky snímacího hrotu (u_{B1}):

$$u_{B1} = \frac{\bar{x} \cdot 0,03}{k} = \frac{\bar{x} \cdot 0,03}{\sqrt{3}} \quad [\mu m] \quad (4.11)$$

Hodnota nejistoty měřicího přístroje (u_{B2}):

$$u_{B2} = \bar{x} \cdot 0,03 \quad [\mu m] \quad (4.12)$$

$$u_B = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2} \quad [\mu m] \quad (4.13)$$

Výpočet kombinované standartní nejistoty (u_C): [36]

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad [\mu m] \quad (4.14)$$

Výpočet rošířené kombinované nejistoty (U_C): [36]

$$U_C = k_U \cdot u_C \quad [\mu m] \quad (4.15)$$

Tab. 4.7 Statistické zpracování naměřených hodnot parametrů drsnosti

Řezná keramika - CC670													
Ra [μm]							Rz [μm]						
č.	x_i	\bar{x}	S(x)	Hn	u_A	U_C	č.	x_i	\bar{x}	S(x)	Hn	u_A	U_C
1	1,00	0,95	0,26	-0,19	0,08	0,18	1	5,93	6,38	2,33	0,19	0,74	1,54
2	1,05			-0,38	u_{B1}	U	2	5,91			0,20	u_{B1}	U
3	0,46			1,87	1,40	1,40	3	3,12			1,40	u_{B1}	U
4	1,23			-1,07	0,02	0,01	4	9,71			-1,43	0,11	0,46
5	0,98			-0,13	u_{B2}	u_C	5	8,01			-0,70	u_{B2}	u_C
6	0,52			1,64	1,80	1,80	6	2,19			1,80	u_{B2}	u_C
7	0,89			0,21	0,03	0,09	7	5,59			0,34	0,19	0,77
8	1,12			-0,68	u_B	k_U	8	7,68			-0,56	u_B	k_U
9	1,04			-0,36	0,03	2,00	9	7,92			-0,66	u_B	k_U
10	1,18			-0,91	0,03	2,00	10	7,75			-0,59	0,22	2,00
Σ	9,465						Σ	63,807					

Tab. 4.8 Statistické zpracování naměřených hodnot parametrů drsnosti

Řezná keramika - CC6060													
Ra [μm]							Rz [μm]						
č.	x_i	\bar{x}	S(x)	Hn	u_A	U_C	č.	x_i	\bar{x}	S(x)	Hn	u_A	U_C
1	0,41	0,46	0,06	0,91	0,02	0,05	1	2,76	3,09	0,31	1,07	0,10	0,29
2	0,43			0,47	u_{B1}	U	2	3,18			-0,31	u_{B1}	U
3	0,59			-2,25	0,01	0,00	3	3,60			-1,66	u_{B1}	U
4	0,47			-0,18	0,01	0,00	4	2,93			0,53	0,05	0,03
5	0,43			0,48	u_{B2}	u_C	5	3,33			-0,79	u_{B2}	u_C
6	0,45			0,16	0,01	0,02	6	3,24			-0,50	u_{B2}	u_C
7	0,48			-0,27	0,01	0,02	7	2,79			0,97	0,09	0,14
8	0,50			-0,66	u_B	k_U	8	3,27			-0,58	u_B	k_U
9	0,47			-0,12	0,01	2,00	9	3,18			-0,30	u_B	k_U
10	0,38			1,45	0,02	2,00	10	2,61			1,57	0,11	2,00
Σ	4,60						Σ	30,90					

Tab. 4.9 Statistické zpracování naměřených hodnot parametrů drsnosti

Řezná keramika - CC6065													
Ra [μm]							Rz [μm]						
č.	x_i	x	S(x)	Hn	u_A	U_C	č.	x_i	x	S(x)	Hn	u_A	U_C
1	0,66	1,32	0,33	1,99	0,11	0,23	1	4,45	8,26	1,96	1,95	0,62	1,36
2	0,96			1,10	u_{B1}	U	2	6,13			1,09	u_{B1}	U
3	1,58			-0,78			3	10,66			-1,23		
4	1,45			-0,38	0,02	0,01	4	10,09			-0,93	0,14	0,50
5	1,55			-0,69	u_{B2}	u_C	5	8,80			-0,28	u_{B2}	u_C
6	0,99			0,99			6	6,67			0,81		
7	1,39			-0,21	0,04	0,11	7	8,08			0,09	0,25	0,68
8	1,66			-1,03	u_B	k_U	8	9,78			-0,78	u_B	k_U
9	1,44			-0,36			9	8,78			-0,26		
10	1,53			-0,63	0,05	2,00	10	9,18			-0,47	0,29	2,00
Σ	13,23						Σ	82,606					

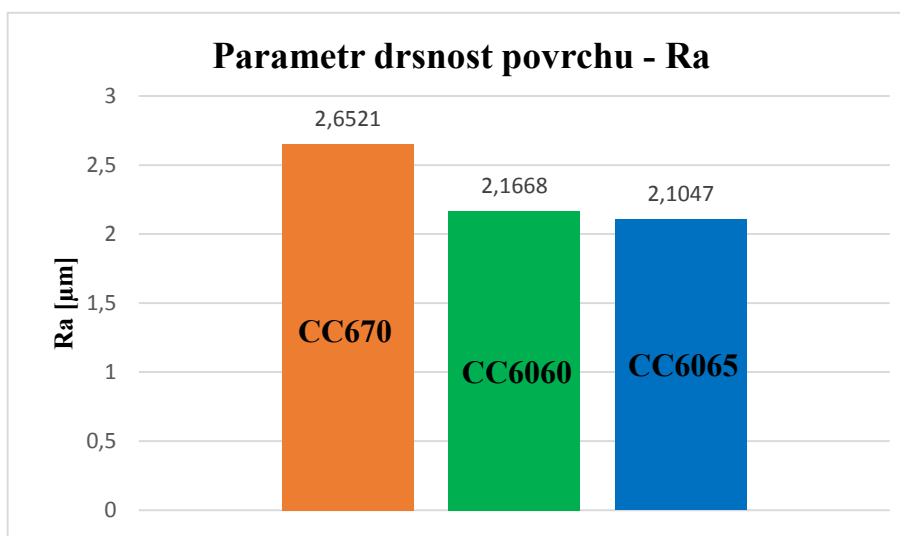
Tab. 4.10 Úplný zápis výsledků měření parametrů drsnosti- operace hrubování

Operace hrubování				
VBD	po 1. přejezdu		po dosažení VB_{krit}	
	$Ra = (Ra \pm U_C)$ [μm]	$Rz = (Rz \pm U_C)$ [μm]	$Ra = (Ra \pm U_C)$ [μm]	$Rz = (Rz \pm U_C)$ [μm]
CC670	$0,95 \pm 0,18$	$6,38 \pm 1,54$	$2,15 \pm 0,92$	$11,51 \pm 3,78$
CC6060	$0,46 \pm 0,05$	$3,09 \pm 0,29$	$0,83 \pm 0,17$	$5,42 \pm 1,21$
CC6065	$1,32 \pm 0,23$	$8,26 \pm 1,36$	$2,13 \pm 0,53$	$11,64 \pm 2,08$

Tab. 4.11 Úplný zápis výsledků měření parametrů drsnosti – operace dokončování

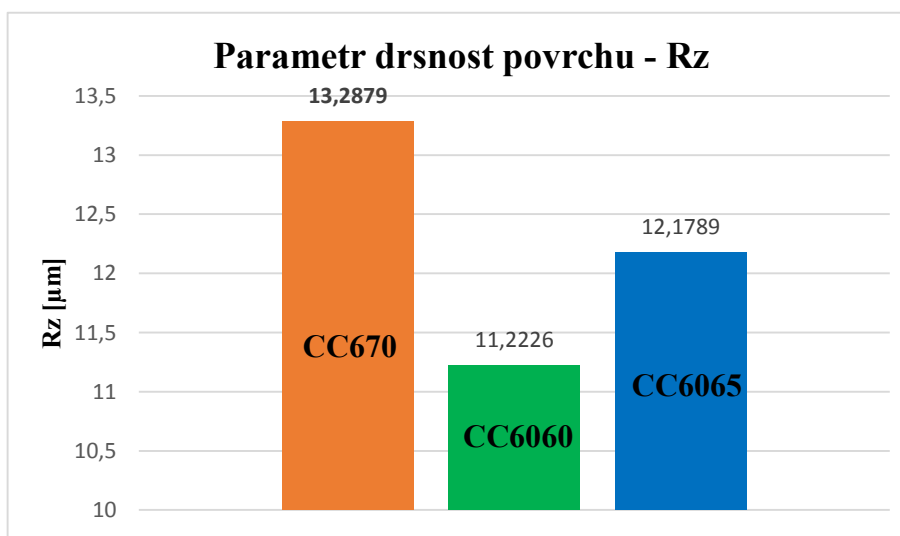
Operace dokončování				
VBD	po 1. přejezdu		po dosažení VB_{krit}	
	$Ra = (Ra \pm U_C)$ [μm]	$Rz = (Rz \pm U_C)$ [μm]	$Ra = (Ra \pm U_C)$ [μm]	$Rz = (Rz \pm U_C)$ [μm]
CC670	$0,43 \pm 0,06$	$2,54 \pm 0,21$	$2,65 \pm 0,21$	$13,29 \pm 1,06$
CC6060	$1,21 \pm 0,18$	$8,31 \pm 1,05$	$2,17 \pm 0,16$	$11,22 \pm 0,99$
CC6065	$1,8 \pm 0,44$	$9,86 \pm 2,25$	$2,1 \pm 0,53$	$12,18 \pm 2,33$

4.2.3 Zhodnocení dosažené kvality povrchu – operace dokončování



Graf. 4.7 Srovnání parametrů drsnosti povrchu – Ra

V porovnání parametru průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu Ra po posledním přejezdu, kdy nástroj dosáhl patřičného opotřebení $VB_{\text{krit}} = 0,5$ mm dosáhly nejlepších výsledků břitové destička CC6065 a CC6060. Destička CC670 je až na třetím místě, ale rozdíly mezi naměřenými hodnotami nejsou tak markantní. Grafické porovnání dosažených hodnot parametrů drsností povrchu Ra je na grafu 4.7.



Graf. 4.8 Srovnání parametrů drsnosti povrchu - Rz

Druhým parametrem drsnosti povrchu, který se testoval, byla největší výška profilu Rz . Nejlepších hodnot bylo dosaženo po obrábění s destičkou CC6060. Druhou nejlepší hodnotu dosáhla destička CC6065. Nejvyšší hodnoty parametru Rz bylo naměřeno po obrábění s vyměnitelnou destičkou CC670. Nutno podotknout, že mezi naměřenými hodnotami není markantní rozdíl. Pro porovnání hodnot parametru Rz slouží graf 4.8.

5. Technicko – ekonomické zhodnocení

Technicko – ekonomické zhodnocení bylo provedeno pro operaci hrubování . Jelikož u operace hrubování většinou záleží na co možná největším množství odebraného materiálu za dobu, než dojde k otupení nástroje na předem stanovenou hodnotu. Na základě cen jednotlivých břitových destiček, kde se porovnávalo množství odebraného materiálu, dokud břit nástroje nebyl opotřeben na hodnotu opotřebení $VB_{krit} = 0,3 \text{ mm}$. Pro porovnání bylo stanoveno potřebné množství odebraného materiálu na $Q_C = 1000 \text{ cm}^3$.

Tab. 5.1 Ceny vyměnitelných břitových destiček (bez DPH)

VBD	Cena [Kč/ks]
CC670	905
CC6060	499
CC6065	499

5.1 Počtu břitů na kruhové destičce při hloubce řezu $a_{p1} = 2 \text{ mm}$

Při obrábění s vyměnitelnými břitovými destičkami s kruhovou geometrií není zřejmý počet břitů na této destičce. Na počet břitů mají vliv použité řezné podmínky, především hloubka řezu a_p . Čím větší hloubka řezu, tím menší počet břitů. Pro ekonomické zhodnocení je třeba stanovit počet břitů na jedné vyměnitelné břitové destičce s kruhovou geometrií. Při operaci hrubování byla zvolena hloubka řezu $a_{p1} = 2 \text{ mm}$. Pomocí softwaru Autodesk Inventor byla zjištěna hodnota úhlu záběru $\alpha = 46,76^\circ$.

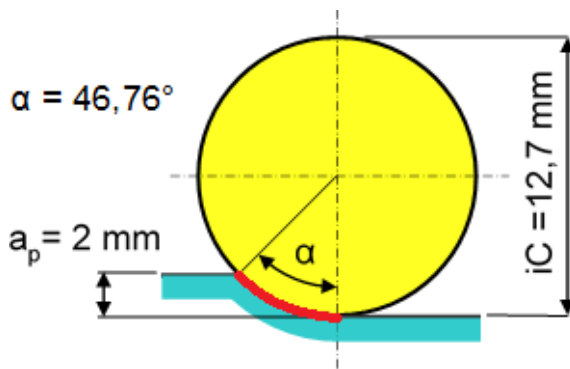
Stanovení počtu břitů VBD

$$n = 360^\circ / \alpha$$

$$n = 360^\circ / 46,76^\circ$$

$$n = 7,7 \rightarrow 7 \text{ břitů}$$

Výsledný počet břitů při soustružení s hloubkou řezu $a_{p1} = 2 \text{ mm}$ je $n = 7$. Jelikož jsou všechny tyto destičky oboustranné, nabízí tyto destičky 14 břitů.



Obr. 5.1 Stanovení úhlu záběru

5.2 Ekonomické zhodnocení pro operaci hrubování

Tab. 5.2 Trvanlivost a množství odebraného materiálu – operace hrubování

VBD	T [min]	Q [cm ³]
CC670	2,3	287,5
CC6060	0,4	50
CC6065	0,36	45

Počet vyměnitelných břitových destiček pro odebrání Q_C – operace hrubování

VBD CC670

Počet břitů:

$$P_B = Q_C / Q$$

$$P_B = 1000 / 287,5$$

$$P_B = 3,48 \rightarrow 4 \text{ břity}$$

Počet vyměnitelných břitových destiček:

$$P_{VBD} = P_B / n$$

$$P_{VBD} = 4 / 7$$

$$P_{VBD} = 0,57 \rightarrow 1 \text{ VBD}$$

VBD CC6060

Počet břitů:

$$P_B = Q_C / Q$$

$$P_B = 1000 / 50$$

$$P_B = 20 \text{ břitů}$$

Počet vyměnitelných břitových destiček:

$$P_{VBD} = P_B / n$$

$$P_{VBD} = 20 / 7$$

$$P_{VBD} = 2,86 \rightarrow 3 \text{ VBD}$$

VBD CC6065

Počet břitů:

$$P_B = Q_C / Q$$

$$P_B = 1000 / 45$$

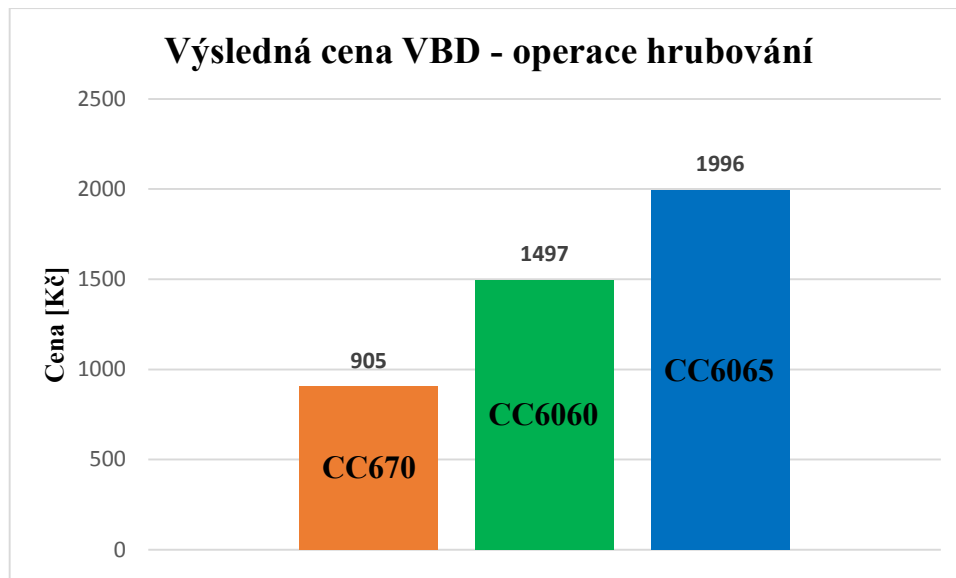
$$P_B = 22,22 \rightarrow 23 \text{ břity}$$

Počet vyměnitelných břitových destiček:

$$P_{VBD} = P_B / n$$

$$P_{VBD} = 23 / 8$$

$$P_{VBD} = 3,29 \rightarrow 4 \text{ VBD}$$



Graf. 5.1 Srovnání výsledné ceny destiček – operace hrubování

Z tabulky 5.1 je možné vidět, že cena destiček není stejná. U vyměnitelné břitové destičky CC670 je cena téměř dvojnásobná oproti zbylým dvěma destičkám. I přes tyto cenové rozdíly mezi jednotlivými destičkami nejnižší ceny dosáhla právě zmiňovaná destička CC670. Pro odebrání množství materiálu $Q_C = 1000 \text{ cm}^3$ stačil 1 ks VBD CC670, tudíž cena byla stanovena na 905 Kč. Zbylé dvě destičky dosáhly podobných výsledků, kde k odebrání stejného množství materiálu bylo potřeba 3 ks destiček typu CC6060 a 4 ks destiček CC6065. Výsledná cena destiček CC6060 byla 1497Kč a celková výsledná cena destiček CC6065 činila 1996Kč. Grafické porovnání cen vyobrazeno na grafu 5.1.

Závěr

Diplomová práce se zabývala testováním břitových destiček při obrábění materiálu Alloy 625. Tento materiál patří mezi niklové superslitiny, které mají charakteristické vlastnosti jako žárupevnost, žáruvzdornost a korozivzdornost za velmi vysokých teplot. Niklové superslitiny spadají do kategorie těžkoobrobitelných materiálů z důvodu jejich vyšší tažnosti, vyšším sklonům k deformačnímu zpevnění a nižší tepelné vodivosti než u ocelí.

Hlavním cílem práce bylo testování tří vyměnitelných břitových destiček z řezné keramiky od stejného výrobce. Jednalo se o břitovou destičku z řezné keramiky vyztuženou whiskery karbidu křemíku - RNGN 120700 T0120 670, dále se jednalo o keramickou destičku sialonové třídy vyztuženou sítí z nitridu křemíku - RNGN 120700 T0120 6060, poslední byla destička z částicemi vyztužené sialonové keramiky - RNGN 120700E 6065. Všechny tyto břitové destičky jsou dle výrobce vhodné pro obrábění HRSA materiálů.

Během experimentálního obrábění se měřila hodnota opotřebení břitu nástroje za konstantních řezných podmínek $v_c = 250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,25 \text{ mm}$ a měnila se pouze hodnota hloubky řezu a_p . Pro operaci hrubování byla použita hodnota $a_{p1} = 2 \text{ mm}$ a při dokončování $a_{p2} = 0,6 \text{ mm}$. Dle normy ISO 3685 bylo stanovena hodnota $VB_{krit} = 600 \text{ } \mu\text{m}$, avšak ne všechny nástroje této hodnoty dosáhly. Experiment musel být předčasně ukončen z důvodu velkého úběru materiálu. Pro porovnání byla tedy stanovena nová hodnota $VB_{krit} = 300 \text{ } \mu\text{m}$ pro operaci hrubování a $VB_{krit} = 500 \text{ } \mu\text{m}$ pro operaci dokončování. Dalším testovaným parametrem byla drsnost obrobeného povrchu.

Jako obráběcí stroj byl zvolen CNC soustruh DMG Mori Seiki NLX2500MC/700. Snímky opotřebení břitových destiček byly zaznamenány digitálním mikroskopem a měření opotřebení bylo realizováno pomocí programu Motic Images Plus 2.0 ML. Drsnost povrchu byla měřena pomocí dotykového přístroje na měření drsnosti SURFEST SJ - 210 od firmy Mitutoyo.

Výsledky měření byly tabelárně a graficky zpracovány, v případě grafů závislosti opotřebení na čase je umožněn přímý odečet opotřebení (pro stanovení aktuálního opotřebení v daném čase).

Na základě zjištěných výsledků měření je doporučeno pro operaci hrubování s hloubkou řezu $a_{p1} = 2 \text{ mm}$ použít destičku RNGN 120700 T0120 670, která dosáhla nejnižších hodnot opotřebení. Její cena je nejvyšší, ale díky množství odebraného materiálu, který je schopna odebrat za dobu její trvanlivosti, je tato destička nejlevnější. Jako druhá nejlepší se jeví destička RNGN 120700 T0120 6060, doba trvanlivosti této destičky byla výrazně kratší oproti první destičce, je však nabízena za téměř poloviční cenu. Jako nejhorší skončila

destička RNGN 120700E 6065, kde byla doba trvanlivosti bříty ještě nižší než u předchozí destičky.

Dalšími kritérii pro posuzování testovaných destiček byly dosažené hodnoty parametrů drsnosti povrchu Ra a Rz . Pro operaci dokončování ($a_{p1} = 0,6$ mm) se posuzovala kvalita obrobeného povrchu po dosažení opotřebení bříty $VB_{krit} = 500$ μm . V hodnocení parametrů Ra a Rz bylo naměřeno nejlepších výsledků po obrábění s vyměnitelnou destička RNGN 120700E 6065 s hodnotami $Ra = 2,1$ μm a $Rz = 12,18$ μm . Hodnoty parametrů drsnosti povrchu $Ra = 2,17$ μm a $Rz = 12,18$ μm byly naměřeny po obrábění s destičkou RNGN 120700 T0120 6060. Nejhorších hodnot parametrů drsnosti povrchu dosáhla destička RNGN 120700 T0120 670 a to $Ra = 2,65$ μm a $Rz = 13,29$ μm .

Na základě naměřených hodnot parametrů drsností povrchu Ra a Rz po dosažení opotřebení keramických břitových destiček $VB_{krit} = 500$ μm je doporučeno zvolit destičku RNGN 120700E 6065, která při experimentálním obrábění dosahovala nejlepších hodnot.

Poděkování

Touto cestou bych chtěl vřele poděkovat svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Tomáši Zlámalovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

Dále mé poděkování patří mým rodičům a celé mé rodině, která mě podporovala po celou dobu mého studia.

Práce byla podpořena ze Studentské grantové soutěže Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava v rámci projektu SP2016/172 Vliv technologických parametrů na obrobený povrch a SP2016/174 Studium procesu obrábění progresivních materiálů s cílem zvýšit a podpořit vědecko-výzkumné aktivity studentů doktorských a magisterských studijních programů ve spolupráci s akademickými pracovníky.

Seznam použité literatury

- [1] NESLUŠAN, M.; CZÁN, A. Obrábání titánových a niklových zliatin. Žilina : Žilinská univerzita v Žilině / EDIS. 2001. 189 s. ISBN 80-7100-933-4.
- [2] DARECKÝ, J. *Superzliatiny niklu a ich obrábání*. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině / EDIS. 2001. 189 s. ISBN 80-7100-785-4.
- [3] HUMÁR, A. *Technologie I – technologie obrábění – sylabus*. Brno : VUT Brno, 2003 [cit. 2015-06-02]. Dostupné z WWW: <<http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/page=opory>>.
- [4] KOČMAN, K.; PROKOP, J.: *Technologie obrábění*. Brno : Akademické nakladatelství CERM Brno, 2001. ISBN 80-214-1996-2
- [5] PÍŠKA, M.; FOREJT, M.; HUMÁR, A.; JANÍČEK, D.: *Experimentální metody – sylabus*. Brno : VUT Brno, 2003. 83 s.
- [6] VASILKO, K.; HRUBÝ, J.; LIPTÁK, J.: *Technológia obrábania a montáže*. Bratislava : Alfa Bratislava, 1991 496 s. ISBN 80-05-00807-4.
- [7] ČEP, R.: *Zkoušky nástrojů z řezné keramiky při přerušovaném řezu : doktorská disertační práce*. Ostrava : Fakulta strojní VŠB-TU Ostrava, 2005
- [8] HUMÁR, A.: *Technologie I – technologie obrábění – sylabus*. Brno : VUT Brno, 2003, <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory>
- [9] SANDVIK Coromant: *Příručka obrábění*. Praha : Scientia s.r.o. Praha, 1997, 910 s. ISBN 91-97 22 99-4-6
- [10] Technologie II. EP, Robert. [online]. [cit. 2015-03-16]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_1dil.pdf
- [11] EXPERIMENTÁLNÍ METODY: Opatřebení. FOREJT, Milan, Anton HUMÁR, Libor PÍŠKA a JANÍČEK. [online]. Brno, říjen 2003 [cit. 2015-03-16]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/experimentalni_metody_cviceni_forejt_piska_humar_janicek.pdf
- [12] Technologie I: Technologie obrábění. HUMÁR, Anton. [online]. Brno, 2003 [cit. 2015-03-16]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [13] MAZANEC, K. *Fyzikální metalurgie neželezných kovů a složených materiálů*, skripta VŠB-Technická univerzita Ostrava. 1987. 148 s.
- [14] DURAND-CHARRE, M. *The Microstructure of Superalloys*. Gordon & Breach science publisher, Amsterdam, 1997.
- [15] DONACHIE, M. J.; DONACHIE, S. J. *Superalloys – A Technical Guide*, second edition. ASM International, 2002, ISBN 0-087170-749-7.

- [16] VASILKO, K. *Technológia dokončovania povrchov*. Prešov, Slovenská republika : Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove. 2004. s. 115. ISBN 80 8073 124-1.
- [17] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II – 1. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB – TU Ostrava. ISBN 978–80–248–1641–8.
- [18] ZLÁMAL, Tomáš. *Příspěvek k obrábění Ni superslitiny a hodnocení řezivosti vybraných rezných materiálů*. Ostrava, 2015. 108 s. Disertační práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava.
- [19] DAVIM, P. *Machining of Hard Materials*. London: Springer, 2011. ISBN 978-1-84996-449-4.
- [20] LAŠOVÁ, V. *Základy stavby obráběcích strojů* [online]. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2012 [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: http://www.zcu.cz/pracoviste/vyd/online/Zaklady_stavby.pdf
- [21] DMG MORI. *CNC univerzální soustruh NLX 2500MC/700*. [Online]. [cit. 2015-04-24]. Dostupné z WWW: <http://cz.dmgmori.com/products/lathes/universal-lathes/nlx/nlx2500+700>
- [22] ZAJAC, J.; JURKO, J.; ČEP, R. *Top trendy v obrábění, II část' - Nástrojové materiály*. Žilina : Media/St, s.r.o Žilina, 2006. 193 s. ISBN 80-968954-2-7.
- [23] Sandvik Coromant s.r.o. *Skupiny obráběných materiálů*. [online], [cit. 2013-03-07]. Dostupné na WWW: http://www.sandvik.coromant.com/cs_cz/knowledge/materials/workpiece_materials/workpiece_material_groups/pages/default.aspx
- [24] Sandvik Coromant s.r.o. *Řezná keramika*. [online], [cit. 2013-03-07]. Dostupné na WWW: <http://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/brochures/cs-cz/c-2929-61.pdf>
- [25] Specialmetals.com [online]. c2009 [cit. 2013-04-20]. *Machinig Special Metals Corporation Products*. Dostupné z WWW: <http://www.specialmetals.com/documents/machining.pdf>
- [26] SHANKAR, V., and all. *Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy*. *Journal of Nuclear Materials* 288 (2001) 222-232, Material Development Group, Indira Gandhi Center for Atomic Research, Kalpakkam 603102, India
- [27] BRYCHTA, J.; ČEP R.; NOVÁKOVÁ J.; PETŘKOVSKÁ L. *Technologie II*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1822-1.
- [28] SKOPEČEK, T.; VODIČKA, J. *Základy vysokorychlostního obrábění – HSC*. Plzeň : Vydavatelství Západočeské univerzity v Plzni, 2005. 134 s. ISBN 80–7043–344–2.

- [29] JURKO, J. *Opatrebenie rezných nástrojov*. Prešov : FVT so sídlom v Prešove, 2005. ISBN 80-8073255-8.
- [30] ČEP, R. *Návrh a ověření metodiky testování rezných nástrojů při přerušovaném řezu*. Habilitační práce. Katedra obrábění a montáže, Fakulta strojní, Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Ostrava, 2010. 119 s.
- [31] ISO 3685 : 1990. Tool Life Testing with Single Point Turning Tools. 1990.
- [32] BRYCHTA, J.; CZÁN, A.; ČEP, R.; KRATOCHVÍL, J.; PETRŮ, J.; SADÍLEK, M.; STANČEKOVÁ, D.; ZLÁMAL, T. *Progresivní technologie v obrábění a NC programování obráběcích strojů*. Ostrava : Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2014. s. 178. ISBN 978-80-248-3522-8.
- [33] HOLEŠOVSKÝ, F. *Jakost obráběných povrchů*. 1st ed. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně, 2003. 179 p. ISBN 80-7044-539-4.
- [34] KONIG, W. Turning versus Grinding – A Comparison of Surface Integrity Aspects and Attainable. *Cirp Annals-Manufacturing Technology*, 1993, vol. 42, no. 1, p. 39–43. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62387-7.
- [35] BUMBÁLEK, B.; BUMBÁLEK, L. *Zbytková napětí a jejich význam při řešení integrity povrchu*. *Strojírenská technologie*, 2006, roč. XI, č. 3, s. 9-16. ISSN 1211-4162.
- [36] TICHÁ, Š.: *Strojírenská metrologie*. Ostrava, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2006. s. 112. ISBN 80-248-0671-1.
- [37] WERNER, D., SMEJKAL, E., LUTZE, H. *Spanende Formung. Theorie, Berechnung, Richtwerte*. 16th ed. Carl Hanser Verlag GmbH & CO, 2009. 416 p. ISBN 978-3446417137.
- [38] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. 1999.
- [39] Sandvik Coromant s.r.o. Výrobek C4-CRSNL-27050-12ID. [online], [cit. 2013-03-16]. Dostupné na WWW: < <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/pages/productdetails.aspx?c=C4-CRSNL-27050-12ID&m=5727278> >
- [40] Sandvik Coromant s.r.o. Výrobek RNGN120700T01020 670. [online], [cit. 2013-03-16]. Dostupné na WWW: < <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/pages/productdetails.aspx?c=RNGN120700T01020%20670> >
- [41] Sandvik Coromant s.r.o. Výrobek RNGN120700T01020 6060. [online], [cit. 2013-03-16]. Dostupné na WWW: < <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/pages/productdetails.aspx?c=RNGN120700T01020%206060> >

- [42] Sandvik Coromant s.r.o. Výrobek RNGN120700E 6065. [online], [cit. 2013-03-16].
Dostupné na WWW: < <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/pages/productdetails.aspx?c=RNGN120700E%206065> >
- [43] Sandvik Coromant s.r.o. Heat Resistant Super Alloys. [online], [cit. 2016-03-15].
Dostupné na WWW: < <http://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/technical%20guides/en-us/c-2920-034.pdf> >
- [44] BILÍK, O.: Obrábění II. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1994. ISBN 80-7078-228-5