

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A

METROLOGIE



Bakalářská práce

Tvrdé soustružení

Autor: Štěpánka Prošková

Studijní program: Výroba a ekonomika ve strojírenství

Studijní obor: Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Pitrmuc, Ph.D.

Praha 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Prošková** Jméno: **Štěpánka** Osobní číslo: **491176**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Tvrdé soustružení

Název bakalářské práce anglicky:

Hard Turning

Pokyny pro vypracování:

1. Soustružení - definice, specifika soustružení tvrdých materiálů
2. Obráběcí nástroje pro tvrdé soustružení
3. Rezné prostředí
4. Technologické zkoušky
5. Rámcový výrobní postup zadané součásti

Seznam doporučené literatury:

OVERBY, Alan. CNC machining handbook: building, programming, and implementation. New York: McGraw-Hill, c2011. ISBN 978-0-07-162301-8.
DAVIM, J. P., ed. Modern machining technology: a practical guide. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011. Woodhead Publishing in mechanical engineering. ISBN 978-0-85709-099-7.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **17.03.2022** Termín odevzdání bakalářské práce: **10.08.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Zdeněk Pitrmuc, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma „Tvrdé soustružení“ vypracovala samostatně a použila jsem pouze podklady, které jsou uvedené v seznamu citací.

V Praze dne:

.....

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat panu Ing. Zdeňkovi Pitrmucovi, Ph.D., vedoucímu bakalářské práce, za jeho ochotu, cenné konzultace a odborné vedení při realizaci obrábění kalené oceli.

Děkuji také panu Ing. Michalovi Slanému za pomoc a praktické rady při obrábění výchozího polotovaru.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá volbou obráběcích nástrojů a vhodných řezných podmínek pro tvrdé soustružení. V rešeršní části jsou uvedeny zásady tvrdého soustružení a všechny podmínky, potřebné k dosažení požadovaných přesností rozměrů a kvality povrchu. V předložené práci je uveden přehled nástrojů z materiálů kubického nitridu bóru (CBN), které se používají především při obrábění kalených ocelí. V praktické části se práce věnuje obrábění tvarových rotačních součástí ze zadané oceli. Dále tato část obsahuje vyhodnocení dosažené drsnosti povrchu u obráběných součástí.

Klíčová slova

Tvrdé soustružení, obrábění, kalená ocel, řezné nástroje, vyměnitelné břitové destičky, kubický nitrid bóru

Abstract

This bachelor's thesis is based on the choice of machining tools and suitable cutting conditions for hard turning. In the research part are presented the principles of hard turning and all the conditions needed to achieve the required dimensional accuracy and surface quality are presented. The presented work presents an overview of tools made of cubic boron nitride (CBN) materials, which are mainly used in the machining of hardened steels. In the practical part, the work is devoted to the machining of shaped rotary parts from specified steel. Furthermore, this part contains an evaluation of the achieved surface roughness of the machined parts.

Keywords

Hard turning, machining, hardened steel, cutting tools, inserts, cubic boron nitride

Seznam zkratek a symbolů

Označení	Popis	Jednotka
a_p	hloubka řezu	[mm]
AlTiN	hliník titan nitrid	[-]
CBN	kubický nitrid bóru	[-]
CNC	číslicově řízený stroj	[-]
CVD	Chemical Vapour Deposition	[-]
f	posuv na otáčku	[mm/ot]
HB	tvrdost dle Brinella	[-]
HRC	tvrdost dle Rockwella	[-]
i	počet třísek	[-]
IT	přesnost rozměru	[-]
n	počet otáček obrobku	[ot/min]
PCBN	polykrystalický nitrid bóru	[-]
PKD	polykrystalický diamant	[-]
PVD	Physical Vapour Deposition	[-]
Ra	střední aritmetická úchylka profilu	[μ m]
R Mr	materiálový podíl drsnosti profilu	[%]
Rmax	maximální výška profilu	[μ m]
RO	rychlořezná ocel	[-]
Rp	největší výška výstupku profilu	[μ m]
R Sm	průměrná vzdálenost prvků profilu	[μ m]
Rt	celková výška profilu drsnosti	[μ m]
Rv	největší hloubka prohlubně profilu	[μ m]
Rz	výška nerovnosti profilu z deseti bodů	[μ m]
SK	slinutý karbid	[-]
TiAlN	titan aluminium nitrid	[-]
TiCN	titan karbo-nitrid	[-]
TiN	nitrid titanu	[-]
VBD	vyměnitelná břitová destička	[-]
v_c	řezná rychlost	[m/min]
v_e	rychlost řezného pohybu	[m/min]
v_f	posuvová rychlost	[m/min]

Obsah

1	Úvod.....	11
2	Soustružení.....	12
2.1	Definice	12
2.2	Princip metody.....	12
2.3	Nástroje pro soustružení.....	13
2.4	Využití řezné kapaliny.....	14
2.5	Řezné podmínky	15
2.6	Dosažitelná přesnost a drsnost po obrábění.....	16
3	Tvrdé soustružení	17
3.1	Porovnání tvrdého soustružení a broušení.....	17
3.2	Požadavky na obráběcí stroje	18
3.3	Nástroje.....	19
3.4	Přehled a charakteristika řezných materiálů	19
3.4.1	Slinutý karbid.....	19
3.4.2	Řezná keramika.....	19
3.4.3	Kubický nitrid bóru (CBN).....	20
3.5	Dostupné tvary VBD z kubického nitridu bóru (CBN).....	21
3.5.1	Monolitní břitové destičky.....	21
3.5.2	VBD s hroty CBN.....	22
3.5.3	Povlakování VBD	23
3.6	Materiály obrobitelné tvrdým soustružením.....	24
3.6.1	ISO H.....	25
3.7	Významní světoví výrobci řezných materiálů	25
3.7.1	Ceratizit	26
3.7.2	Iscar	27

3.7.3	Dormer Pramet.....	27
3.7.4	Sandvik Coromant.....	28
3.7.5	Seco Tools	29
3.7.6	Hoffmann Group – Garant.....	29
3.8	Řezné podmínky pro tvrdé soustružení	30
3.8.1	Vliv teploty na řeznou sílu.....	30
3.8.2	Kritéria pro výměnu destičky	31
3.9	Řezné prostředí	31
4	Charakteristika obráběné oceli ČSN 19 573	33
4.1	Vlastnosti	33
4.2	Použití.....	33
4.3	Tepelné zpracování	33
4.3.1	Žihání.....	33
4.3.2	Kalení	34
4.3.3	Popouštění	34
4.4	Polotovar.....	35
5	Použitý stroj	36
5.1	Nastavení před obráběním	36
6	Výběr nástrojů pro obrábění	38
6.1	Nástroje použité pro obrábění za měkka	38
6.2	Nástroje použité pro obrábění zakalené oceli	38
7	Součást č.1	39
7.1	Popis a základní rozměry.....	39
7.2	Použité nástroje.....	40
7.3	Obrábění součásti před kalením.....	40
7.3.1	Operace 05.....	40
7.3.2	Operace 10.....	41

7.4	Kalení	43
7.4.1	Operace 15	43
7.5	Obrábění po kalení	43
7.5.1	Garant CNMA 120404F	46
7.5.2	Poškození destiček Garant	50
7.5.3	Ceratizit 120404TN a 120408TN	53
7.5.4	Poškození destiček Ceratizit	57
8	Součást 2	59
8.1	Popis a základní rozměry	59
8.2	Použité nástroje	60
8.3	Obrábění součásti před kalením	60
8.3.1	Operace 05	60
8.3.2	Operace 10	61
8.4	Kalení	62
8.4.1	Operace 15	62
8.5	Obrábění po kalení	63
8.5.1	Seco Tools - LCGN 1604MO-0400E25-LF CBN010	63
8.5.2	Ceratizit - VCGW 160404 TN	63
8.5.3	Dosažená kvalita povrchu	67
8.5.4	Poškození profilovací destičky	70
9	Závěr	71
10	Použitá literatura	72
11	Seznam příloh	77

1 Úvod

S příchodem nových a těžkoobrobitelných materiálů bylo potřeba najít správnou metodu a vhodný typ obrábění. Postupným vývojem bylo zjištěno, že tyto materiály je možné obrábět pomocí slinutého karbidu, řezné keramiky, ale především pomocí CBN (kubický nitrid bóru) a PKD (polykrystalický diamant). Zároveň je však všeobecně známo, že PKD není vhodný pro obrábění kalených ocelí, a to z důvodu obsahu uhlíku v jeho struktuře, který by reagoval s uhlíkem v obráběné oceli.

Součásti z kalených ocelí jsou a také budou pro průmyslovou výrobu vždy nepostradatelné. Tvrzené oceli jsou honě využívány zejména pro svou vyšší pevnost, tvrdost, vyšší mez cyklické únavy, otěruvzdornost, odolnost proti vzniku otláčenin a dalších povrchových vad na rozdíl od ocelí, které nejsou nijak tepelně upravené.

Tvrdé soustružení je moderní metoda obrábění, která je vhodnou náhradou za broušení. V porovnání s broušením, často tvrdé soustružení není tak finančně nákladné a časově náročné. Vše je možné obrábět na jednom stroji, jehož cena není tak vysoká na rozdíl od broušení, kde jsou potřeba vyšší pořizovací náklady na novou brusku. Cena jedné destičky je zhruba srovnatelná s cenou brusného kotouče. Tyto nástroje se však liší v životnosti, kdy brusný kotouč je schopný vyrobit spíše stovky kusů na rozdíl od destičky, která se poškojí po obrobení pouze několika ploch.

Předložená práce je zaměřena zejména na obrábění kalené oceli. Práce se skládá ze dvou částí, a to rešeršní a experimentální.

Rešeršní část práce obsahuje všechna důležitá kritéria pro samotné bezproblémové obrábění, a to s cílem dosáhnout co nejpřesnějších rozměrů a drsnosti povrchu.

Ve druhé „experimentální“ části je proveden průzkum trhu výrobců řezných nástrojů, konkrétně vyměnitelných břitových destiček z CBN a následně jejich výběr pro obrábění dvou typů součástí ze zakalené oceli. Jsou zde popsány postupy obrábění, nejprve ocelí za měkka a následně po jejich zakalení. Práce dále předkládá vyhodnocení výsledných naměřených hodnot u obrobených vzorků.

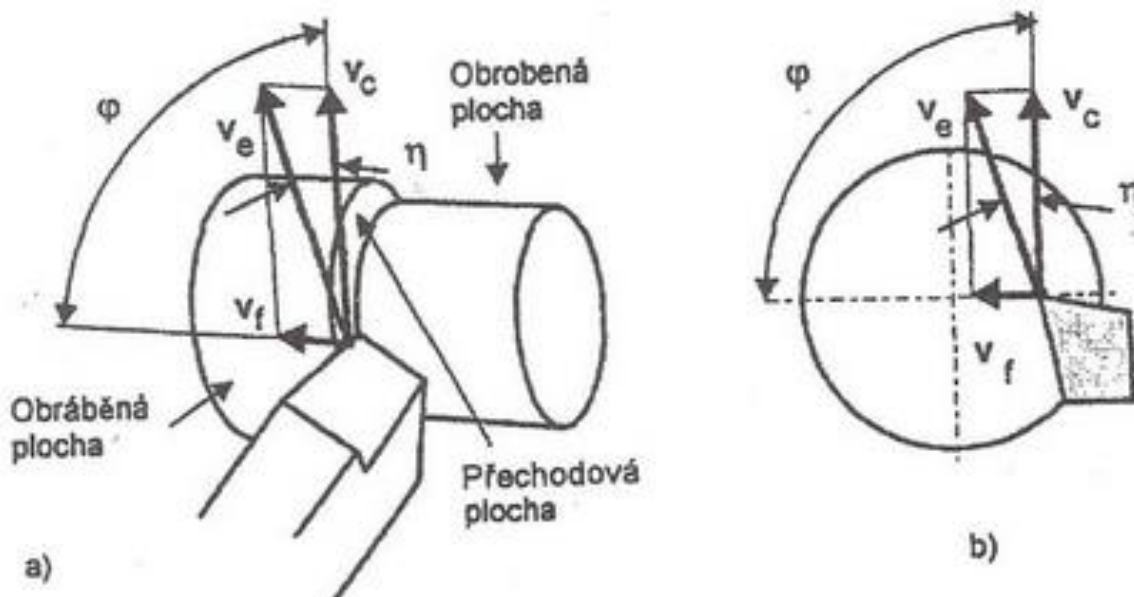
2 Soustružení

2.1 Definice

Soustružení je obráběcí metoda, při které dochází k odebrání přebytečného materiálu ve formě třísek ze součástí rotačního tvaru, a to zpravidla jednobřitým nástrojem. Tato metoda obrábění je prováděna na soustruhu nebo obráběcím soustružnickém centru, ve kterém je rotační součást upnuta. Pro soustružení je typické obrábění zejména vnějších a vnitřních válcových, kuželových i tvarových ploch, rovinných čelních ploch a zápichů. Zároveň je však možné na těchto obráběcích strojích provádět další osové operace, a to například vrtat, řezat závity, leštit, vyvrtávat a vystružovat. [1] [2]

2.2 Princip metody

Při soustružení je hlavní pohyb otáčivý a koná jej vždy obrobek. Pracovní pohyb nástroje je buď ve směru osy obrobku (podélný posuv), stopa nože na obrobku je šroubovice, anebo ve směru kolmém na osu obrobku (příčný posuv), stopa nože na obrobku je Archimedova spirála. Dalším důležitým pohybem nástroje je také přísuv, kterým se nastavuje požadovaná hloubka řezu. [1] [2]



Obrázek 1: Vektory pohybů při soustružení a) podélné soustružení b) čelní soustružení [3]

Při obrábění válcové plochy za předpokladu dodržení konstantních otáček obráběného polotovaru n a konstantní posuvové rychlosti v_f se zpravidla dosáhne konstantní řezné rychlosti v_c a rychlosti řezného pohybu v_e . [3]

V porovnání se soustružením čelní plochy, opět za předpokladu zachování konstantních otáček n konstantní posuvové rychlosti v_f , dochází ke změnám hodnot řezné rychlosti v_c a rychlosti řezného pohybu v_e , neboť tyto hodnoty jsou závislé na postupné změně obráběného průměru. [3]

2.3 Nástroje pro soustružení

Pro soustružení se využívají soustružnické nože, které se liší různými aspekty. Nejčastěji používané nože jsou nože radiální, které se dále rozdělují na nože celistvé, s pájenými břitovými destičkami a s vyměnitelnými břitovými destičkami. Díky mnoha výhodám se v současnosti používají především nože s vyměnitelnými břitovými destičkami (VBD). Významnou výhodou u těchto nožů je, že není potřeba kupovat celý nůž, ale jen novou břitovou destičku. [1] [2] [4]

Pro požadovanou přesnost rozměrů, kvalitu povrchu, ale i také trvanlivost nástroje či vyměnitelné břitové destičky, je velmi důležité stanovit správné řezné podmínky, které lze najít v každém katalogu výrobců nástrojů. [2]

Důležitým aspektem je zde velikost řezné rychlosti, která závisí především na druhu obráběného materiálu. Hodnota posuvu se volí v závislosti na požadované kvalitě povrchu. Je ovlivněn geometrií břitu, tuhostí stroje a také jeho výkonem. Při hrubování se hodnota posuvu na jednu otáčku obrobku pohybuje od 0,4 až 2 mm, při obrábění načisto se jedná o 0,06 až 0,3 mm a při jemném soustružení je to už pouhých 0,005 až 0,05 mm. Při posuvu menším než 0,03 mm je většinou řez velmi nestabilní, protože je tloušťka odřezávané vrstvy minimální. [2] [4]

Dalším důležitým parametrem je hloubka řezu, která se volí podle přídatku na obrábění. Podmínkou je, že hodnota hloubky řezu nesmí překročit dvě třetiny délky ostří nože. Je také ovlivněna výkonem stroje a tuhostí stroje a obrobku. Při hrubování se hodnota hloubky řezu pohybuje od 3 do 30 mm, při obrábění načisto od 0,5 do 2 mm a při jemném soustružení od 0,03 až 0,3 mm. [2] [4]

2.4 Využití řezné kapaliny

Při soustružení měkkých materiálů se využívá řezná kapalina především ve formě emulze, která napomáhá k delší trvanlivosti nástroje. Dále se také využívají minerální oleje s přísadami a mastné oleje. Při soustružení s tvarovým nožem je důležité zajistit požadovaný tvar a dobrou jakost obrobenej plochy. K jejich dosažení je nevhodnější zvolit řezný olej nebo emulzi o vyšší koncentraci, popřípadě emulzi s přísadami. [3] [4]

Tabulka 1: Přehled doporučených řezných kapalin pro různé metody obrábění [3]

Metoda obrábění	Ocel			litina	nikl a jeho slitiny	bronz a mosaz	měď a slitiny	hliník a slitiny	hořčík a slitiny
	nízko-uhlíková	s vyšším obsahem uhlíku	nerez oceli						
Soustružení	D 3	D 5	D 10	-	E	D 3	D 3	D 3	B
Vrtání a vystružování	E, D 10	F	J	D 5	E	B	B	B	B
Frézování	D 5	D 5	D 10	D 5	F	B	D 3	D 3	B
Řezání závitů	H	J	J	D 10	J	C	B	C	B
Řezání závitů na automatech	E	H	H	-	H	B	A	C	B
Válcování závitů	F	F	F	-	-	C	A	B	A
Řezání pilou	D 3	D 3	D 3	D 3	D 3	D 3	D 3	D 3	B
Výroba ozubení	E	F	J	D 5	-	B	-	-	-
Protahování	J	J	J	D 10	J	C	B	C	B
Broušení	D 2	D 2	D 2	D 2,5	D 2	D 2	D 2	D 2	B
Broušení závitů	J	J	J	-	-	C	-	C	C

A – minerální oleje

B – mastné oleje

C – maštěné oleje s přísadami

D – emulze (číslo značí koncentraci v %)

E – minerální oleje s přísadami

F – lehké minerální oleje s přísadami

H – oleje aditivované

J – maštěný olej s přísadami

Hlavním důvodem užití řezné kapaliny je především účinný odvod tepla v místě řezu, díky kterému se zmenšuje jak vnitřní, tak i vnější tření. Kromě odvodu tepla je vhodná také pro mazání a čištění, přičemž nesmí jejím používáním docházet ke vzniku koroze strojů nebo obrobků. Řezná kapalina může ovlivňovat jak rozměrovou a tvarovou přesnost, tak i drsnost povrchu. Na řeznou kapalinu jsou také kladeny požadavky, které především zahrnují zdravotní nezávadnost a bezpečnou likvidaci použité kapaliny. [3] [4]

Tabulka 2: Doporučená množství řezné kapaliny pro různé metody obrábění [3]

Metoda obrábění		Množství řezné kapaliny [$l \cdot \text{min}^{-1}$]
Soustružení	hrubování	10 až 15
	dokončování	8 až 10
	rychlostní soustružení	15 až 20
Vrtání	-	4 až 10
Zahlubování	-	5 až 6
Vystružování	-	6 až 10
Řezání závitů	-	2 až 3
Protahování	dokončování	8 až 15
	vnější	8 až 12
Výroba ozubení	hrubování	8 až 10
	dokončování	2 až 3
Broušení	hrubování	do 30
	dokončování	30 až 60

2.5 Řezné podmínky

Řezné podmínky jsou hlavními činiteli ovlivňující proces obrábění. Hodnoty řezných podmínek jsou voleny tak, aby výsledek obrábění byl co nejproduktivnější a zároveň nejehospodárnější. Záleží na typu obrábění, materiálu obrobku a nástroje, geometrii nástroje a typu stroje. [3] [4]

Základními řeznými podmínky je považována řezná rychlost v_c , hloubka řezu a_p a posuv f . Řezná rychlost je charakterizována jako rychlost řezného pohybu, která je udávána v metrech za minutu. Hloubku řezu a_p lze vypočítat jako poloviční rozdíl průměrů neobrobené a obrobené plochy. Posuv f je dráha v milimetrech, kterou urazí při pohybu do záběru obrobek za 1 otáčku. [3]

Zvolená řezná rychlost pro soustružení závisí na:

- vlastnostech obráběného materiálu
- řezných vlastnostech materiálu nástroje
- jmenovitém průřezu třísky
- trvanlivosti břitu

Tabulka 3: Rozsahy řezných rychlostí při soustružení [3]

Materiál obrobku	Hrubování f > 0,3 mm		Soustružení na čisto f = 0,3 až 0,05 mm		Jemné soustružení f < 0,05 mm	
	materiál nástroje		materiál nástroje		materiál nástroje	
	RO	SK	RO	SK	RO	SK
Nelegovaná ocel Rm < 800 MPa	17 až 45	65 až 155	25 až 70	100 až 200	70 až 120	170 až 300
Nelegovaná ocel Rm > 800 MPa	12 až 40	45 až 110	20 až 55	80 až 160	60 až 90	150 až 250
Legované oceli	10 až 40	40 až 120	20 až 55	50 až 180	35 až 70	70 až 170
Litina	17 až 35	35 až 100	25 až 55	70 až 110	-	70 až 130
Slitiny hliníku	25 až 90	90 až 220	45 až 120	140 až 350	100 až 150	150 až 600

Hloubka řezu a_p je omezená mechanickými vlastnostmi obráběného materiálu, tuhostí obrobku a také zvoleným typem obrábění. Aby bylo obrábění co nejefektivnější, šířka záběru ostří se volí co největší a pokud je to možné, vždy je snaha o obrobení celého přídatku na jeden záběr. [3]

2.6 Dosažitelná přesnost a drsnost po obrábění

Výslednou přesnost obrábění ovlivňuje zejména geometrie břitu nástroje, kinematika řezného procesu, tuhost obráběcího stroje, provozní prostředí, obráběný materiál, upínač, manipulace s obrobkem, příprava výroby a rovněž lidský faktor. [2] [5]

Tabulka 4: Dosažovaná přesnost rozměrů obrobku a jakost obrobené plochy [2]

Způsob obrábění	Přesnost rozměrů IT	Drsnost povrchu Ra [μm]
Hrubování	11 až 14	12,5 až 50
Načisto	9 až 11	1,6 až 12,5
Jemné soustružení nástrojem ze slinutého karbidu	7 až 8	0,4 až 1,6
Z diamantu nebo PCBN	5 až 6	0,2 až 0,6

Hlavním cílem hrubování je odebrat co nejvíce materiálu za jednotku času, a proto jsou hodnoty přesnosti rozměrů a drsnosti tak velké. Při obrábění načisto a dále jemným soustružením se docílí požadované přesnosti a drsnosti povrchu. [2]

3 Tvrdé soustružení

Tvrdé soustružení patří mezi třískové obrábění a je definováno jako obrábění tepelně zpracované součásti s tvrdostí vyšší než 45 HRC (nejčastěji v rozmezí 55-68 HRC) na soustruhu nebo soustružnickém centru. Často nahrazuje broušení anebo předbroušení, protože je v mnoha případech lepší volbou pro dané obrábění nebo dokončování. Při tvrdém soustružení se přesnost kruhovitosti pohybuje mezi 0,5 až 12 μm a drsnost povrchu mezi R_z 0,8 až 7,0 μm . [6] [7]

3.1 Porovnání tvrdého soustružení a broušení

Tvrdé soustružení je v mnoha případech používáno jako náhrada za broušení, avšak nelze ho uplatnit pro všechny součásti. Broušením na rozdíl od tvrdého soustružení je možné dosáhnout povrchu s drsností R_a 0,3 až 0,8 a rovněž také lze získat vyšší přesnost celkové kruhovitosti a válcovitosti. Pokud je však vyžadována vyšší přesnost na soustřednosti a kolmosti, je vhodnější použít tvrdé soustružení, při němž je možné obrobit všechny plochy na jedno upnutí. Tato výhoda vede k vyšší produktivitě a menším finančním nákladům samotného provozu. [6] [8]

Ve srovnání s broušením je tvrdé soustružení cenově výrazně levnější operací. Vyšší cena broušení je už od počátku dána vyšší pořizovací cenou brusek oproti CNC soustružnickým centrům. V případě, že je potřeba na danou operaci několik různých typů brusek, zvyšují se tak celkové náklady na danou operaci. Tvrdé soustružení lze provádět na jediném soustružnickém centru, což umožňuje úsporu nákladů na zařízení a zároveň je zde výrazně zkrácena doba cyklu a nastavení. [6]

Tvrdým soustružením je možné dokončovat zaoblené a volně zakřivené povrchy, přičemž pro metodu broušením je pro tyto povrchy vyžadován na zakázku upravený brusný kotouč, jehož výroba je časově i finančně náročná. Také samotná výměna kotoučů je časově náročnější oproti výměně břitových destiček na soustružnických centrech. [6] [9]

V dnešní době se také nesmí opomenout dopad na životní prostředí na úkor výroby a provozu strojů. Pokud jde o spotřebu elektřiny, soustružnická centra jsou v této kategorii úspornější než brusky, to pro firmy využívající soustružnická centra znamená nižší náklady na výrobu než pro firmy využívající brusky. Při tvrdém soustružení není potřeba používat chladicí

kapalinu, takže firmě odpadají náklady na koupi chladicí kapaliny a její následnou likvidaci. Další výhodou tvrdého soustružení je možnost snadné recyklace vytvořených třísek při obrábění, což u metody broušení nelze. Naopak po broušení se odpad musí speciálně a nákladně zlikvidovat anebo musí být zlikvidován jako průmyslový odpad. [6]

3.2 Požadavky na obráběcí stroje

Pro dosažení co nejvyšší přesnosti je potřeba, aby měl stroj co nejmenší geometrické, kinematické a dynamické nepřesnosti. Pro hladký chod vřetene se nejčastěji používá pohon ozubeným řemenem. Pro zaručení dynamické přesnosti posuvů je potřeba plynulý chod pohonů posuvů. Velmi důležitá je také geometrická přesnost stroje, minimální házení vřetene a jeho souosost s koníkem. Rovněž záleží na tuhosti stroje a také na tepelné deformaci stroje. [9] [10]

V dnešní moderní době nalezneme mnoho CNC soustružnických center, která jsou schopná obrábět kalené a tvrdé materiály. Avšak u těchto strojů nedocílíme takové rozměrové a geometrické přesnosti a také drsnosti povrchu. Pokud bychom měli vyšší nároky na výsledné obrobení, je nutné k obrábění použít stroje přímo specializované na tvrdé soustružení. Tyto stroje jsou charakteristické extrémní tuhostí při vysokých otáčkách vřetena a mají téměř nulové chvění při provozu, na kterém se podílí především granitová základna stroje s integrovaným systémem tlumičů vibrací. [9] [11] [12] [13]

Mezi významné výrobce těchto strojů jsou řazeny především společnosti Hembrug a Hardinge. Společnost Hembrug se zabývá výrobou vertikálních a horizontálních soustruhů určených k tvrdému soustružení. Dále tato společnost vyrábí hybridní stroje řady MikroTurnGrind, které umožňují tvrdé soustružení a jemné broušení v jednom stroji. Společnost Hardinge je výrobcem řady T-SERIES SUPER-PRECISION, která je charakteristická dynamickým vyvážením vřetene a hnacího motoru. [9] [11] [14]

Na úspěšném obrobení se velkou částí podílí konstrukce stroje, upínání obrobku a nástroje. Přesnost výsledného obrobení je především ovlivněna těmito faktory: [12]

- tuhost stroje (navržení pomocí analýzy konečných prvků)
- tuhost upínání obrobku (měkké čelisti, kleštiny)
- schopnost stroje tlumit vibrace (granitová základna stroje, přídavné tlumiče vibrací)

- tuhost upnutí nástroje – (minimální vyložení nástroje, dostatečně dimenzované průřezy nožových držáků)
- tuhost součásti (maximální vyložení 4:1 bez podpory koníkem, 8:1 s koníkem)
- tuhost nástroje a volba materiálu břitových destiček

3.3 Nástroje

Na nástroje pro tvrdé soustružení jsou především velké nároky na zvýšenou tuhost, optimální geometrii nástroje a optimální trvanlivost. Opotřebení a také tepelná deformace nástroje může výrazně ovlivnit výslednou přesnost rozměrů obráběné součásti. [10] [15]

3.4 Přehled a charakteristika řezných materiálů

Pro tvrdé soustružení lze použít řezné materiály ve formě slinutého karbidu, řezné keramiky anebo polykrystalického kubického nitridu bóru. Volba vhodného řezného materiálu se zejména odvíjí od vlastností obráběného materiálu a rovněž také od vlastností řezného materiálu. [7]

3.4.1 Slinutý karbid

Slinutý karbid lze použít při řezné rychlosti 150 až 300 m/min a není vhodný pro obrábění materiálu s vyšší tvrdostí než 50 HRC, protože při obrábění materiálu s vyšší tvrdostí dochází k výraznému snížení trvanlivosti řezného materiálu. V dnešní době se výrobci slinutého karbidu snaží o posunutí hranice blížící se k 60 HRC. [7] [16]

3.4.2 Řezná keramika

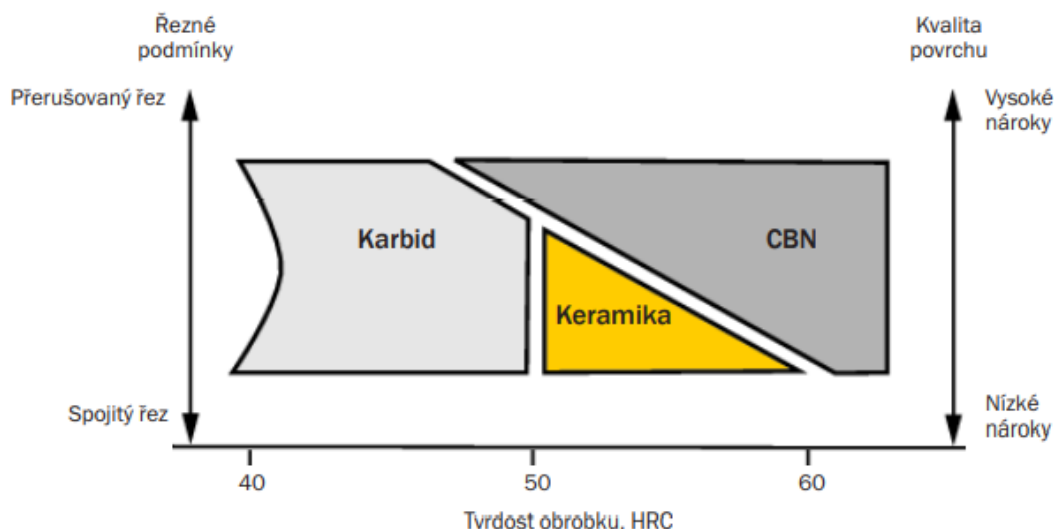
Pro obrábění materiálů o tvrdosti v rozmezí 50-60 HRC lze použít řezný materiál ve formě řezné keramiky. Značnou nevýhodou je však její křehkost a náchylnost na náhlé změny teplot. Není tedy vhodná pro přerušované a nerovnoměrné řezy, vadí například i pouhé obvodové házení obrobku. Zvyšováním řezné rychlosti se životnost řezného materiálu násobně zmenšuje. [7] [16]

3.4.3 Kubický nitrid bóru (CBN)

Pro tvrdé soustružení se osvědčily především vyměnitelné břitové destičky (VBD) z kubického nitridu bóru, který je odolný teplotám přibližně do 1200°C. CBN je po diamantu druhý nejtvrdší řezný materiál. Vhodná řezná rychlost pro CBN je do 400 m/min, protože při vyšších rychlostech dochází k většímu opotřebení řezného materiálu. Naopak se zvyšující se tvrdostí obráběného materiálu dochází ke zvýšení životnosti, a proto se pro tento řezný materiál doporučuje k obrábění materiálu s tvrdostí od 55 do 70 HRC. Někteří výrobci břitových destiček dokonce zakazují obrábět kubickým nitridem bóru materiály měkčí než 48 HRC, protože tyto oceli obsahují vyšší množství feritu, který negativně působí na odolnost CBN proti otěru. Při nevhodných řezných podmínkách dochází k nalepení rozžhavených třísek na obrobenou plochu, což je nepříznivé pro vytvořené plochy. Tento jev je možné odstranit zavedením stlačeného vzduchu do procesu soustružení. [7] [8] [16] [17] [18]

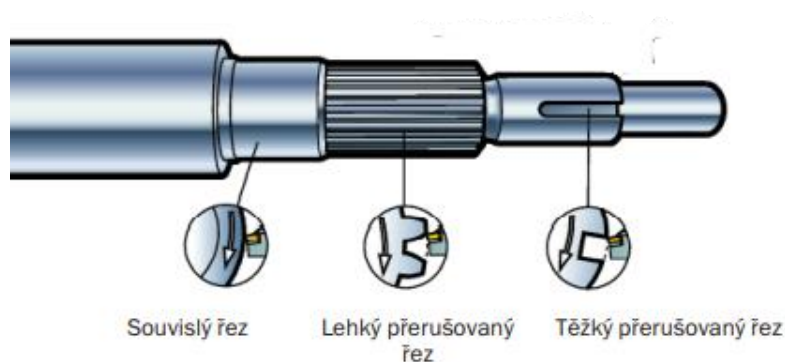
Tabulka 5: Doporučené řezné podmínky destiček z kubického nitridu bóru [3]

Materiál	Způsob obrábění	v_c [m · min ⁻¹]	a_p [mm]	f [mm · ot ⁻¹]
Ocel HRC 55 - 67	jemné	80 – 160	0,2 – 0,6	0,04 – 0,08
	velmi jemné	120 – 180	0,05 – 0,2	0,02 – 0,04
Ocel HRC 45 - 69	střední	80 – 120	1 – 2	0,12 – 0,20
	jemné	80 – 120	0,05 – 1	0,04 – 0,10
	velmi jemné	80 – 120	0,01 – 0,3	0,02 – 0,06
Litina HB 200	střední	150 – 250	3 – 4	0,20 – 0,60
	jemné	300 – 400	2 – 3	0,12 – 0,40
	velmi jemné	400 – 500	0,2 – 1	0,04 – 0,10
Litina HB 600	střední	100 – 200	3 – 4	0,20 – 0,40
	jemné	200 – 300	1 – 2	0,12 – 0,20
	velmi jemné	300 – 500	0,1 – 0,8	0,04 – 0,12



Obrázek 2: Doporučené použití řezných materiálů dle tvrdosti materiálu obrobku [16]

Z příslušného grafu z katalogu nástrojů od výrobce Sandvik Coromant je patrné, že je velmi důležité si pro obrábění zvolit správný řezný materiál. Slinutý karbid není vhodné používat pro obrábění materiálu s tvrdostí vyšší, než je zhruba 50HRC. Při použití řezné keramiky s rostoucí tvrdostí klesá výsledná kvalita obroběného povrchu. CBN je určen spíše pro materiály vyšších tvrdostí. Je jím možné provádět jak přerušovaný, tak spojitý řez a zároveň i docílit vysoké kvality povrchu.



Obrázek 3: Typy řezů [16]

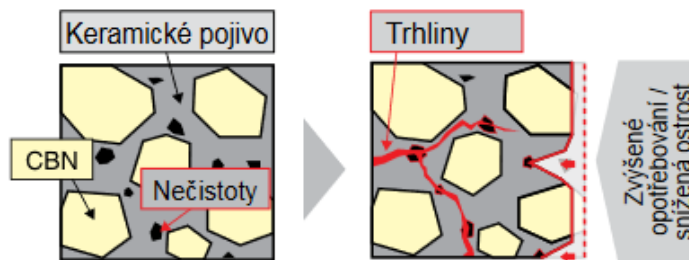
3.5 Dostupné tvary VBD z kubického nitridu bóru (CBN)

Na materiál obráběcího nástroje jsou kladeny požadavky zejména na dobrou odolnost vůči plastické deformaci, chemickou stabilitu za vysokých teplot, mechanickou pevnost a odolnost proti abrazivnímu opotřebení. [19]

3.5.1 Monolitní břitové destičky

U výrobců se můžeme setkat s destičkami plně vyrobenými z CBN, které jsou určeny spíše pro obrábění litin. Jedná se o kompozitní materiály, jejichž keramické pojivo zvyšuje odolnost proti opotřebení a lomu CBN, který je za normálních podmínek křehký a náchylný k opotřebení chemickým otěrem. Tyto řezné materiály jsou obvykle vyráběny s obsahem 40 až 65 % CBN anebo 85 až téměř 100 %, které mohou obsahovat kovové pojivo zvyšující výslednou houževnatost destičky. [18] [20] [21]

Trvanlivost břitové destičky z monolitního CBN může být ovlivněna nečistotami obsaženými v keramickém pojivu konvenčních tříd. Nečistoty mají vliv na pevnost těla destičky a také snižují její žáruvzdornost. Tyto destičky jsou pak náchylné na vznik trhlin. [21]



Obrázek 4: Vliv nečistot na strukturu monolitní břitové destičky [21]

Pro zvýšení houževnatosti a odolnosti proti žáru bylo vyvinuto keramické pojivo s vysokou čistotou. [21]

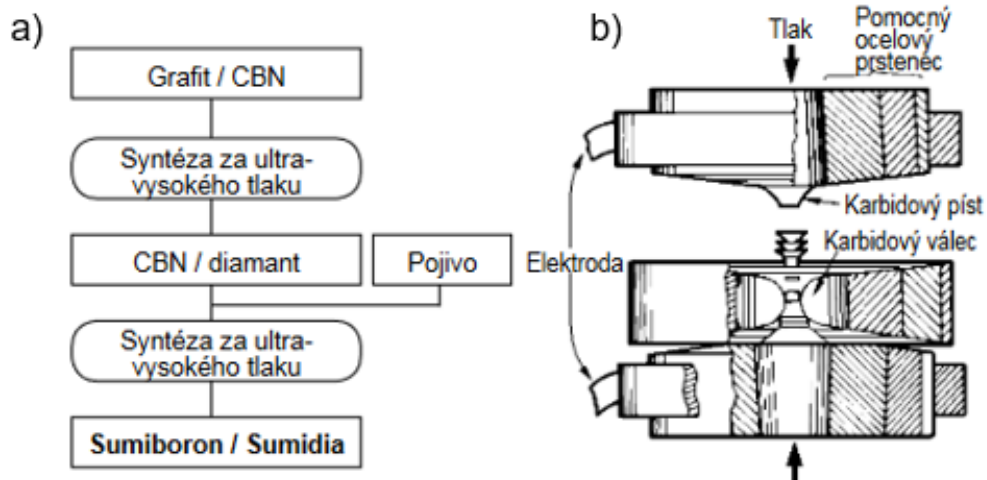


Obrázek 5: Struktura s vysokou čistotou [21]

3.5.2 VBD s hroty CBN

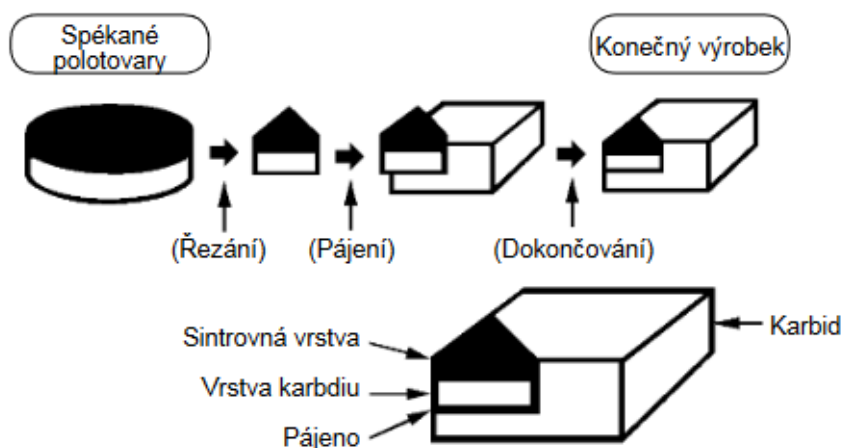
Z ekonomického hlediska je nejvhodnější zvolit vyměnitelné břitové destičky s CBN břity, které jsou k destičce pájeny ve vakuu. [20]

Výroba CBN břitu je nejprve započata syntézou CBN prášku za ultra-vysokého tlaku a následným slinováním těchto krystalických zrn. Vše probíhá ve vysokoteplotní a vysokotlaké aparatuře tvořené karbidovým válcem a pístem, které vytváří ultra-vysoký tlak 5000 N/mm² ve speciálním zařízení. [13] [21]



Obrázek 6: a) schéma výroby spékaného polotovaru břitu, b) znázornění vysokoteplotní a vysokotlaké aparatury [21]

Spékaný polotovar ve formě kruhového kotouče, tvořen vrstvou slinutého karbidu a kubického nitridu bóru, je nejprve v elektroerozivním stroji nařezán na požadovaný tvar a následně připájen k tělu destičky ze slinutého karbidu. Před samotným řezáním je využíváno speciálních programů, které co nejefektivněji a nejúsporněji poskládají tvary řezných plátků, a to především z důvodů maximálního využití řezaného polotovaru. Nakonec je celý břit upraven dokončovacím obráběním anebo broušením (pomocí ostřicího stroje či brusných kotoučů). [13] [21]

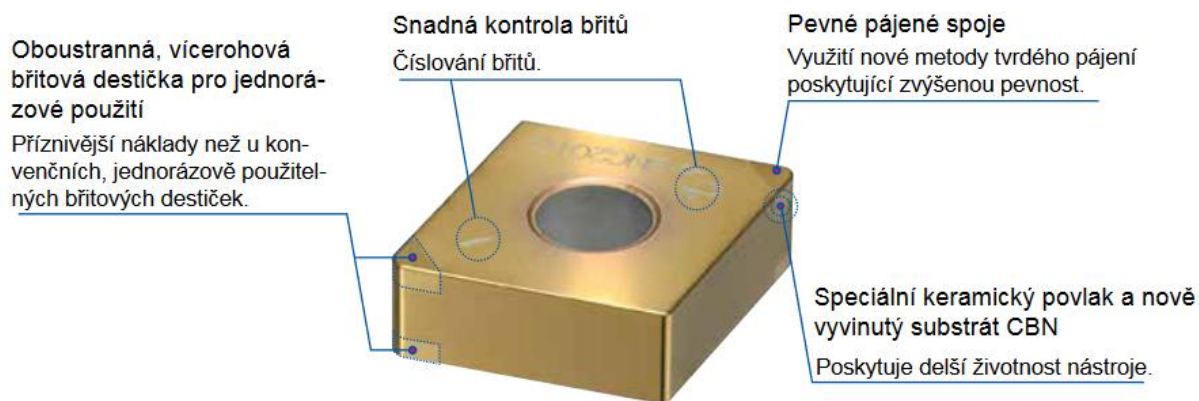


Obrázek 7: Konečné operace pro výrobu CBN destičky [21]

Na jednorázových VBD je každý použitelný břit označen číslem, aby docházelo k přehlednému otáčení destičky při obrábění. VBD lze rozdělit na jednostranné, kde je používána pouze horní hrana, a na oboustranné s využíváním jak horní, tak spodní hrany. Díky tvaru jsou VBD kompatibilní s jakýmkoli standardními držáky nástrojů pro běžné soustružení. [21] [22]

3.5.3 Povlakování VBD

Povlakované VBD jsou zpravidla vícebřité, a to z důvodu docílení vyšší ekonomičnosti výroby. Povlakuje se keramickým povlakem, a to především v podobě TiCN, TiAlN a TiN. Díky povlaku je následné obrábění destičkami přesnější a také ekonomičtější, z důvodu delší životnosti destiček. Povlakováním dochází ke snížení tření a opotřebování otěrem. [21]



Obrázek 8: Důležité části povlakované břitové destičky z CBN [21]

3.6 Materiály obrobitelné tvrdým soustružením

Před samotným obráběním je velmi důležité si správně stanovit vhodné nástroje a řezné podmínky, kterými budeme daný materiál obrábět. V případě špatného rozhodnutí by mohlo docházet k růstu nákladů a vzniku finančních ztrát firmy. [23]

Pro snadné určení a následnou volbu nástroje pro obrábění bylo vytvořeno šest hlavních skupin materiálů podle norem ISO. Jedná se o mezinárodní normu ČSN ISO 513 (220801). Každá skupina je specifická svými vlastnostmi, a to zejména obsahem jednotlivých prvků, tepelným zpracováním, tvrdostí a obrobitelností. [19] [24]

Skupiny obráběných materiálů podle ISO normy: [19]

- ISO P – největší skupina zahrnující materiály nelegované až po vysokolegované, oceli na odlitky a feritické a martenzitické oceli. Obrobitelnost těchto materiálů je ovlivněna především tvrdostí a obsahem uhlíku
- ISO M – v této skupině materiálů se nachází korozivzdorné oceli s přísadou minimálně 12 % chromu. Při obrábění jsou břity vystaveny účinkům velkého množství tepla, opotřebení ve tvaru vrubu a vytváření nárůstků
- ISO K – zde se jedná především o litiny
- ISO N – tato skupina obsahuje měkčí neželezné kovy jako je například hliník, měď nebo mosaz
- ISO S – patří sem žárovzdorné slitiny na bázi železa, niklu, kobaltu a titanu.
- ISO H – zde můžeme najít oceli s tvrdostí v rozmezí 45-65 HRC a rovněž také litiny s tvrdostí přibližně 400-600 HB

Tato práce se soustředí především na obrábění součástí z kalené oceli, proto se budou další části práce věnovat pouze skupině ISO H.

3.6.1 ISO H

Materiály obráběné pomocí tvrdého soustružení řadíme podle normy do skupiny ISO H. Jedná se o menší skupinu materiálů, ve které se nachází kalené a popouštěné oceli s tvrdostí od 45 do 65 HRC a zároveň i tvrzené litiny s tvrdostí přibližně od 400 do 600 HB. Všechny tyto materiály jsou těžko obrobitelné, protože při jejich obrábění vzniká velké množství tepla a na břit je působeno abrazivně. [19]

Měrná řezná síla se zde pohybuje od 2550 do 4870 N/mm². Obrábění této skupiny materiálů je charakteristické velmi dobrou kontrolou utváření třísky. Jsou zde vysoké nároky na řezné síly a požadavky na výkon. [19]

Většina výrobců řezných materiálů tuto skupinu dále rozděluje na podskupiny podle tvrdosti obráběného materiálu.

Tabulka 6: Dělení skupiny ISO H [25]

ISO skupina	Podskupina		Obráběný materiál	Tvrdost materiálu
H	H1	H1.1	temperovaná litina	< 440 HB
	H2	H2.1	tvrzená litina	< 55 HRC
		H2.2		> 55 HRC
	H3	H3.1	kalená ocel	< 51 HRC
		H3.2		51 – 55 HRC
	H4	H4.1	kalená ocel	55 – 59 HRC
		H4.2		> 59 HRC

3.7 Významní světoví výrobci řezných materiálů

Před samotným obráběním je nejdůležitější provést průzkum trhu o dostupnosti břitových destiček. V rámci praktické části byl obráběn materiál o tvrdosti nad 58 HRC, nejvhodnějším řešením je použít řezný materiál ve formě CBN. V porovnání s nejběžnějším typem VBD, a to slinutým karbidem, je nabídka vyměnitelných břitových destiček z CBN poměrně omezená. Každý výrobce si VBD eviduje pod jiným originálním označením, nicméně často se můžeme setkat s podobným anebo stejným složením a vlastnostmi u různých výrobců, samozřejmě pod jiným označením. Mezi nejvýznamnější firmy, které mají zastoupení v České republice, patří:

- Ceratizit
- Iscar
- Dormer Pramet
- Sandvik Coromant
- Seco Tools
- Hoffmann Group – Garant

3.7.1 Ceratizit

Společnost Ceratizit vznikla v roce 2002, a to sloučením dvou větších firem CERAMETAL a Plansee Tizit, které obě na trhu působily více než jedno století. Sloučením vznikl globální hráč, dodávající řezné nástroje po celém světě. Společnost Ceratizit zahrnuje 30 výrobních závodů s 8000 zaměstnanci v Evropě, Asii a Severní Americe. Společnost je držitelem více než 1000 patentů a užitých vzorů. V oblasti vývoje a výzkumu zaměstnává více než 200 zaměstnanců. [26]

Tabulka 7: Dostupné řezné materiály pro obrábění ISO H [27]

Označení	Obsah PCBN	Hlavní pojivo	Oblast použití	Druh řezu
CTB H15C	40%	TiN	Kalené oceli od 32 HRC	Hladký řez
CTB H15U	40%	TiN		
CTB H20C	65%	TiCN	48-62 HRC	Hladký až lehce přerušovaný řez
CTB H21C	65%	TiCN	52-65 HRC	
CTB H21U	65%	TiCN	52-65 HRC	
CTB H40C	55%	TiN	48-65 HRC	Přerušovaný řez
CTB H40U	65%	TiN	54-65 HRC	
CTB H41C	65%	TiN	48-65 HRC	Silně přerušovaný řez
CTB H41U	65%	TiN	54-65 HRC	

Tabulka 8: Dostupné tvary VBD [27]

Tvar VBD	Počet břitů
C	1/2/4
D	1/2/4
T	1/3/6
V	1/2/4
W	3/6

3.7.2 Iscar

Společnost ISCAR byla založena v roce 1952 v podobě malé rodinné firmy, kterou vytvořil Stef Wertheimer se svou manželkou. Postupným růstem se tato firma stala jednou z největších společností zabývajících se výrobou řezných nástrojů. Sídlo společnosti je nyní v západní Galileji v Izraeli. Je celosvětovým dodavatelem s více než 130 dceřinými společnostmi, sídlícími ve více než 60 zemích. [28]

Tabulka 9: Dostupné řezné materiály pro obrábění ISO H [29] [30]

Označení	Vlastnosti	Povlak	Oblast použití	Druh řezu
IB25HC	Středně hrubozrný substrát PCBN	TiN		Lehké a středně přerušované řezy
IB25HA	Velmi houževnatý PCBN	AlTiN		
IB20H	Kombinace hrubozrného a jemnozrného karbidu PCBN	Bez povlaku		Přerušovaný řez
IB20HC		TiN		Lehce přerušovaný řez
IB10H	Velmi jemný substrát PCBN, destičky s velmi ostrým břitem, vhodný pro dokončovací operace	Bez povlaku		
IB10HC	Jemný substrát PCBN, velmi dobré drsnosti obrobených ploch	TiN	55-60 HRC	Nepřerušovaný řez
IB50	Pájený břit s 50% CBN, vhodný pro dokončovací operace	Bez povlaku	45-65 HRC	Nepřerušovaný řez
IB55	Pájený břit s 55% CBN, vhodný pro dokončovací operace		45-65 HRC	Nepřerušovaný řez

Tabulka 10: Dostupné tvary VBD [29]

Tvar VBD	Počet břitů
C	1/2/4
D	1/2/4
R	-
S	1
T	1/3/6
V	2/4
W	3/6
Profilovací destičky	2

3.7.3 Dormer Pramet

Společnost Dormer Pramet je významným světovým dodavatelem řezných nástrojů s více než 1200 zaměstnanci. Byla vytvořena sloučením anglické společnosti Dormer Tools a české společnosti Pramet Tools, která se zabývala především výrobou slinutého karbidu.

Spojením firem došlo k rozšíření dostupného sortimentu a nyní je Dormer Pramet dodavatelem rezných nástrojů pro více než 100 zemí. [31]

Tabulka 11: Dostupné rezné materiály pro obrábění ISO H [25]

Označení	Vlastnosti	Podmínky	Povlak	Oblast použití
T5305	Vhodné pro dokončovací operace	průměrné	CVD povlak	H01-H15
T9315	Vysoká odolnost proti opotřebení, lze využít i pro přerušované řezy	průměrné	CVD povlak	H10-H20
T6310	Vhodné pro dokončovací operace	Obtížné	PVD povlak	H01-H15
T8315	Vhodné pro obrábění středními až vysokými reznými rychlostmi	Obtížné	PVD povlak	H05-H15



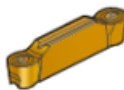


Tabulka 12: Dostupné tvary VBD [25]

Tvar VBD	Počet břitů
C	2/4
D	2/4
R	-
S	4/8
T	3/6
V	2/4
W	3/6

3.7.4 Sandvik Coromant

Společnost Sandvik Coromant byla založena v roce 1942 ve švédském Sandvikenu. Z malé továrny se postupem času stala prosperující velká společnost s globálním působením v průmyslové výrobě. Již od roku 1997 zprostředkovává výkup použitých břitových destiček a jejich následnou recyklaci. Společnost je dnes zastoupena ve více než 130 zemích s přibližně 8000 zaměstnanci. [32] [33]

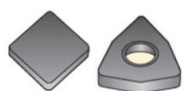


Tabulka 13: Dostupné rezné materiály pro obrábění ISO H [16] [33] [34]

Označení	Oblast použití	Povlak	Tvary VBD		
CB7015	58 – 65 HRC	PVD povlak	Negativní 	Pozitivní 	tvarová destička 
CB7025	58 – 65 HRC	bez povlaku	Negativní 	Pozitivní 	-

3.7.5 Seco Tools

Společnost Seco Tools, sídlící ve Švédsku, se řadí mezi přední světové výrobce a experty v oblasti průmyslového obrábění. S více než osmdesátiletou působností na trhu je společnost Seco Tools zastoupena ve více než 75 zemích s téměř 4100 zaměstnanci. [35]

Tabulka 14: Dostupné řezné materiály pro obrábění ISO H [36]

Označení	Obsah CBN	Povlak	Možné provedení břitových destiček		
CBN010	50%	bez povlaku	monolitní 	se spékanou vrstvou 	s pájeným břitem (různý počet břitů) 
CBN060K	60%	(Ti, Al, Si)N			
CBN150	45%	bez povlaku			
CH3515	90%	(Ti, Al)N	-	-	-
CH2540	65%	(Ti, Si)N	-	-	-
CH0550	40%	(Ti, Al, Cr)N	-	-	-

Tabulka 15: Dostupné tvary VBD [36]

Tvar VBD	Počet břitů
C	2/4
D	2/4
R	-
S	4/8
T	3/6
V	1/2/4
W	3/6
Profilovací destičky	2

3.7.6 Hoffmann Group – Garant

Společnost Hoffmann byla založena v roce 1919 strojním inženýrem Josefem Hoffmannem. Tato německá společnost se zabývala prodejem technických výrobků a náhradních dílů. Po roce 1930 došlo k rozšíření nabízeného sortimentu o nástroje a malé stroje. V současnosti má tato firma zastoupení ve více než 50 zemích. Už se nejedná pouze o prodejce, ale také o výrobce řezných nástrojů působícího pod značkou HOLEX a GARANT, která byla založena v roce 1973. [37]

Tabulka 16: Dostupné řezné materiály pro obrábění ISO H [37]

Označení	Vlastnosti	Oblast použití
CBN720	univerzální použití pro obrábění kalené oceli, bez povlaku	do 67 HRC
CBN825	řezný materiál odolný vůči opotřebení s nejvyšší houževnatostí	do 67 HRC

Tabulka 17: Dostupné tvary VBD [37]

Tvar VBD	Počet břitů
C	1/2
D	2
T	3
V	2
W	3

3.8 Řezné podmínky pro tvrdé soustružení

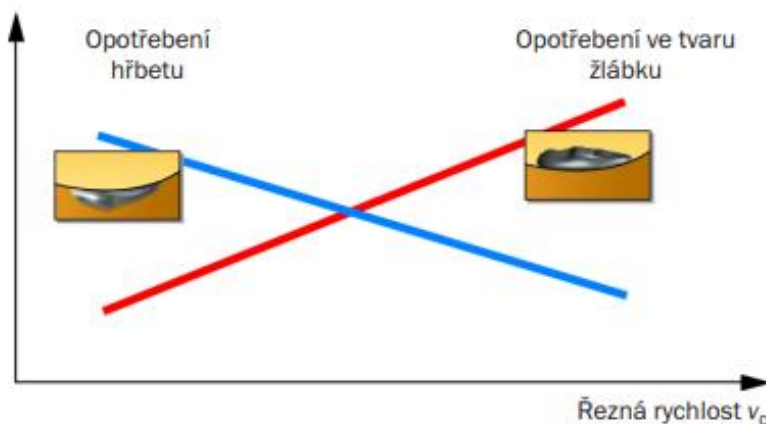
Pro proces obrábění je velmi důležitá správná teplota v řezné oblasti. Při ideální kombinaci řezné rychlosti a geometrie nástroje dochází k roztavení vnějšího pláště obrobku, který je posléze podle požadavků obroben. Teplota na povrchu obrobku je ovlivněna mnoha parametry, které se zároveň i ovlivňují navzájem: [17]

- mikrogeometrie řezné hrany vyměnitelné břitové destičky CBN
- tvrdost materiálu
- posuv (f)
- řezná rychlost (v_c)
- hloubka řezu (a_p)

3.8.1 Vliv teploty na řeznou sílu

Na velikost řezné síly má vliv teplota v místě řezu. Zvolením příliš nízkých řezných rychlostí se může negativně projevit na trvanlivosti břitu, kdy může dojít i k lomu destičky. [16]

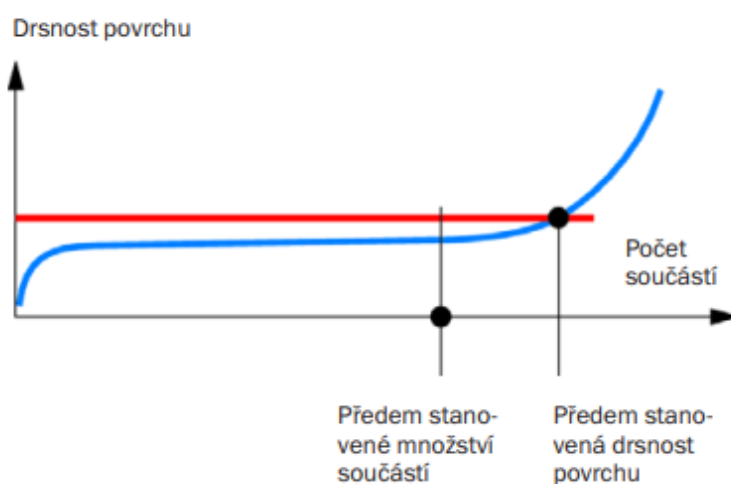
Při opotřebení často dochází k vytvoření žlábků na čele destičky, a tím dochází ke snížení pevnosti břitu, avšak nedochází ke snížení kvality obrobené plochy. [16]



Obrázek 9: Podíl jednotlivých druhů opotřebení určujících trvanlivost [16]

3.8.2 Kritéria pro výměnu destičky

Míra opotřebení destičky výrazně ovlivňuje výslednou kvalitu obrobeného povrchu. Opotřebenou destičku je třeba včas vyměnit. Důležitou roli zde hraje požadovaná hodnota drsnosti povrchu vyráběné součásti. Je třeba stanovit limit počtu obrobených součástí jednou destičkou. K výměně destičky musí dojít dříve, než se překročí požadovaná hodnota drsnosti povrchu. Tento limit se stanoví při výrobě prvních součástí, kde je průběžně u vyrobených součástí měřena drsnost povrchu na externím zařízení. Jelikož se jedná o průměrnou hodnotu trvanlivosti, zpravidla se volí hodnota množství obrobených součástí o 10 až 20 % menší, než je průměrná hodnota. [16]



Obrázek 10: Určení trvanlivosti břitu [16]

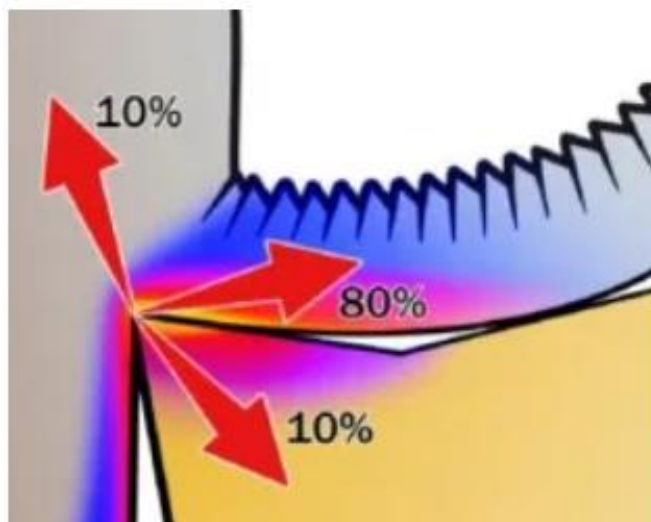
3.9 Řezné prostředí

Břítové destičky s CBN jsou odolné vůči vysokým teplotám, a proto se během tvrdého soustružení zpravidla řezná kapalina nevyužívá. Použití chladicí kapaliny při tvrdém soustružení není vhodné, protože dochází k teplotním šokům a vzniku hřebenových trhlin. Následkem tohoto působení by došlo k náhlému a úplnému rozpadu destičky. Díky absenci řezné kapaliny dochází ke snížení nákladů a také k eliminaci problémů spojeným s manipulací s řeznou kapalinou. [8] [16] [38]

V několika málo případech se řezná kapalina během obrábění používá, a to pod podmínkou nepřetržitého přívodu kapaliny po celou dobu obrábění. Řezná kapalina může hrát důležitou roli například při udržování stabilní teploty součásti, a tím napomáhá k dosažení lepší

kvality na úrovni mikronů. Zároveň také řezná kapalina může přispět k lepšímu odvodu třísek a také delší životnosti nástroje. [8] [16]

Pro proces obrábění je vždy důležité zajistit odvod třísek z místa řezu, a to především z důvodu přenosu 80 % tepla vytvořeného během obrábění, právě do třísky. [38]



Obrázek 11: Odvod tepla během obrábění [38]

4 Charakteristika obráběné oceli ČSN 19 573

Tato práce se zabývala obráběním oceli ČSN 19 573, a to před kalením i po kalení.

4.1 Vlastnosti

Jedná se o ledeburitickou chromovou ocel, která je mimo ČR označována jako DIN X153CrVMo12-1, W.Nr.1.2379, anebo D2. Tato ocel disponuje vysokou odolností proti otěru, dobrou houževnatostí, rozměrovou stálostí, vyšší korozní odolností a dobrou prokalitelností. Díky svému složení je velmi vhodná pro kalení ve vakuu a také nitridaci v lázni, plazmou a v plynu. [39] [40] [41]

Chemické složení	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
Obsah prvků v %	1,55	0,25	0,35	11,80	0,80	0,95

4.2 Použití

Ocel 19 573 má široké využití, a to především v podobě vysokovýkonných střížných nástrojů určených ke stříhání silnějších a tvrdších materiálů, dále se tento materiál využívá k výrobě nůžek na stříhání tenkých vrstev, náradí pro lisovací techniku, válcování závitů, lisovací nástroje pro keramický a farmaceutický průmysl, anebo také malé formy na plasty, od kterých se vyžaduje vysoká odolnost proti otěru. [41]

4.3 Tepelné zpracování

4.3.1 Žihání

Před samotným kalením se nejčastěji provádí žihání na měkko a žihání k odstranění vnitřního pnutí. [41]

Žihání na měkko probíhá při 800-850°C a to zejména za účelem snížení tvrdosti a zvýšení obrobitelnosti oceli. Dochází zde ke změně lamelárního perlitu na perlit globulární. Maximální tvrdost po tomto druhu žihání je rovna 250 HB. [40] [41]

Rovněž se také provádí žihání k odstranění vnitřního pnutí, ke kterému dochází při 650°C. U tohoto žihání je velmi důležité pomalé ochlazování, aby se předešlo vzniku nových vnitřních pnutí v materiálu. [41]

4.3.2 Kalení

Při kalení dochází k ohřevu materiálu na austenitizační teplotu 1020 až 1040°C. Následně je důležitá výdrž na austenitizační teplotě po dobu 15 až 30 minut, aby došlo k prohřátí celého průřezu polotovaru. [41]

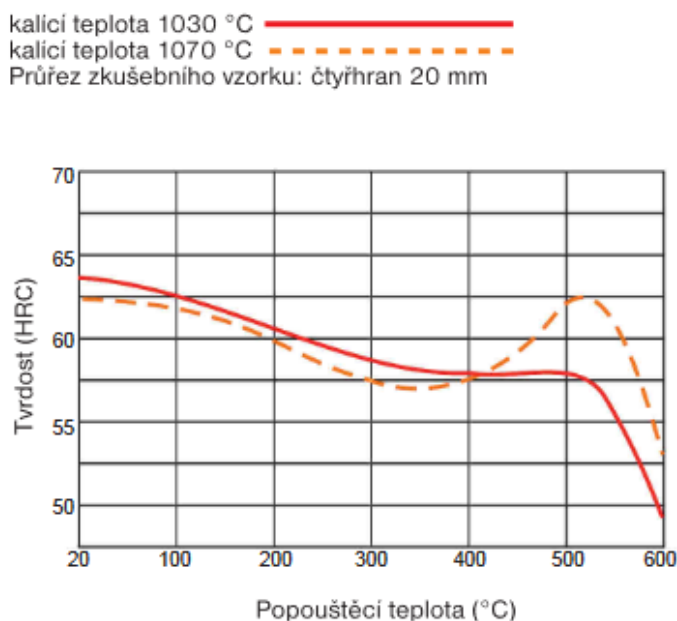
Pokud by bylo zamýšleno ještě materiál nitridotat anebo pouze zvýšit houževnatost, je doporučované tepelné zpracování na sekundární tvrdost. V tomto případě by se austenitizační teplota pohybovala v rozmezí 1060 až 1080°C s následným popouštěním na sekundární tvrdost. [41]

Ochlazování materiálu probíhá na vzduchu, v oleji anebo v solné lázni o teplotě 500 až 550°C. Kalením je možné dosáhnout maximální tvrdosti 62 HRC. [41] [42]

4.3.3 Popouštění

Následuje bezprostředně po kalení a spočívá v pomalém ohřevu na popouštěcí teplotu. Na každých 20 mm tloušťky je potřeba výdrž na teplotě 1 hodinu a po uplynutí času je nutné ochlazovat popouštěný materiál na vzduchu. Vhodnou popouštěcí teplotu je ideální volit dle požadované tvrdosti z popouštěcího diagramu. [41]

Pro dosažení sekundární tvrdosti je nutné uskutečnit vícenásobně popouštění, a to minimálně 2x. Teplota prvního popouštění by měla být 520°C a teplota posledního popouštění 30 až 50°C. [41]



Obrázek 12: Popouštěcí diagram oceli ČSN 19 573 [41]

4.4 Polotovar

K obrábění byl k dispozici polotovar o průměru 81,5 mm a délce 203 mm. Tento polotovar bylo potřeba rozdělit na 2 části na strojní pile. Po rozříznutí měl 1. polotovar délku 105 mm a 2. polotovar 98 mm.



Obrázek 13: Polotovar

5 Použitý stroj

Všechny obráběcí operace probíhaly na soustružnickém centru od výrobce Okuma, a to konkrétně na modelu Genos L200E–M. Tento model je vybaven třemi řízenými osami X, Y a Z a dalšími dvěma, které umožňují radiální a axiální vrtání anebo frézování. Stroj je schopný obrobit součásti s maximálním průměrem 200 mm a délce 380 mm, s otáčkami až 4500 ot./min. Do revolverové hlavy je možné upnout 12 nástrojů. [43]



Obrázek 14: Stroj Okuma Genos L200E-M [44]

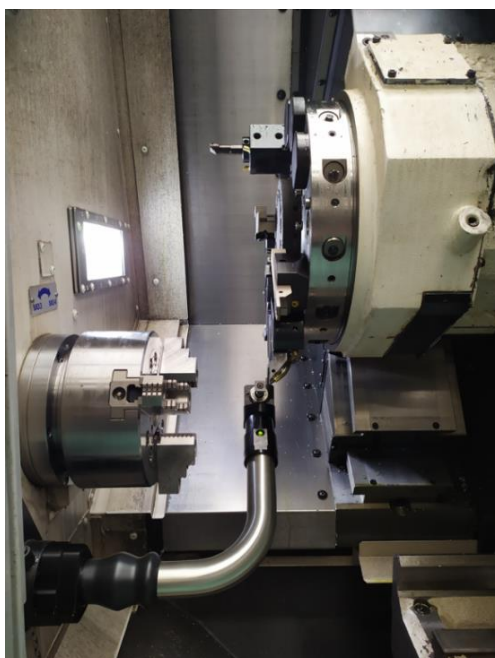
5.1 Nastavení před obráběním

Abychom dosáhli požadovaných a správných rozměrů, je vždy potřeba před samotným obráběním určit stroji, kde se nachází nulový bod osy Z. Nejčastěji se tato hodnota volí na čele polotovaru, které se nachází blíže k revolverové hlavě s nástroji. Nastavení nulového bodu spočívá v ručním přiblížení libovolného obráběcího nástroje k upnutému polotovaru, určeného k obrábění, a to tak aby jejich vzdálenost byla co nejmenší. Do malého prostoru mezi špičku nástroje a čelo polotovaru, se následně postupně vkládají planžety o různých tloušťkách, aby zvolení nulového bodu bylo co nejpřesnější. Po určení ideální tloušťky planžety, je tato hodnota zadána do řídicího systému, kde se odečte od pozice umístěného nástroje.



Obrázek 15: Nastavení nulového bodu osy Z

Každou výměnou nástroje či břitové destičky dochází k vytvoření nepřesnosti polohování daného nástroje. Při výměně nástroje za jiný je nepřesnost polohování způsobena rozdílnou geometrií nástroje. V případě pouhé výměny břitové destičky se jedná o nepřesnosti způsobené především rozdílným upnutím nástroje a také opotřebením břitu destičky. Pro měření korekce nástrojů se používá nástrojová sonda ve formě ramena, která se upevní do určeného místa ve stroji. Na konci tohoto ramena se nachází čidlo čtvercového tvaru, kterého se postupně ze všech stran dotýká upnutý nástroj.



Obrázek 16: Kalibrace nástroje

6 Výběr nástrojů pro obrábění

6.1 Nástroje použité pro obrábění za měkka

Polotovary byly obráběny ještě před kalením, a to z důvodu jak praktického, tak i časového. Pokud by nebyl tento velký úběr materiálu proveden před kalením, byla by výroba neefektivní. Proto v této operaci byly součásti obrobena s ponecháním přídávku na případnou tvarovou deformaci, vzniklou při kalení. Tento přídavek byl obroben až po zakalení.

Pro upnutí polotovaru bylo zvoleno sklíčidlo s tvrdými čelistmi, protože se jednalo o velký úběr materiálu a obrábění s přídávky. Břitové destičky byly zvoleny ze slinutého karbidu, protože jsou pro soustružení oceli nejvhodnější a také nejčastěji využívané. Obě součásti byly obráběny s dodáním řezné kapaliny.

Tabulka 18: List použitých nástrojů

Nástrojový list				
Číslo nástroje	Název nástroje	Držák nástroje	Označení VBD	Výrobce VBD
T1	Vnější nůž hrubovací	MWLN20 20 K 08-N	WNMG080408-MF4	Seco Tools
T2	Vnější nůž dokončovací	SVJCR 2020 K16-M-A 7431 02	VCMT 160404 NN PVD	Darmet
T3	Vnější zapichovací nůž	GFMR 2020 K 0316	LCMF 031604-CM	Pramet
T4	Vnější tvarový nůž	HELIR 2020-5T25	GRIP 5025Y IC830	Iscar

6.2 Nástroje použité pro obrábění zakalené oceli

Pro obrobení zakalených součástí byly zvoleny VBD s připájenými břity CBN. Pro obrábění byly využity břitové destičky typu C, V a profilovací destička.

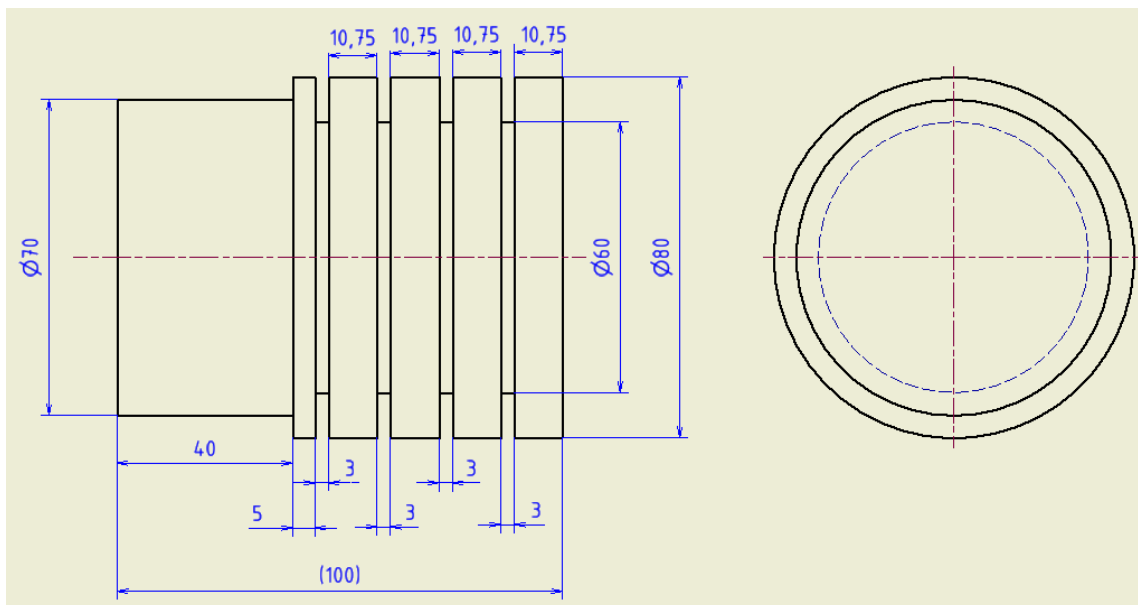
Tabulka 19: List použitých nástrojů

Nástrojový list				
Číslo nástroje	Název nástroje	Držák nástroje	Označení VBD	Výrobce VBD
T5	Soustružnický nůž	PCLNR 2020 K12 0024126334	CNMA 120404F	Garant
T6	Soustružnický nůž	PCLNR 2020 K12 0024126334	CNGA 120404TN	Ceratizit
T7	Soustružnický nůž	PCLNR 2020 K12 0024126334	CNGA 120408TN	Ceratizit
T8	Vnější tvarový nůž	CFIL2020K04	LCGN 1604MO-0400E25-LF CBN010	Seco Tools
T9	Vnější nůž dokončovací	SVJCR 2020 K16-M-A 7431 02	VCGW 160404 TN	Ceratizit

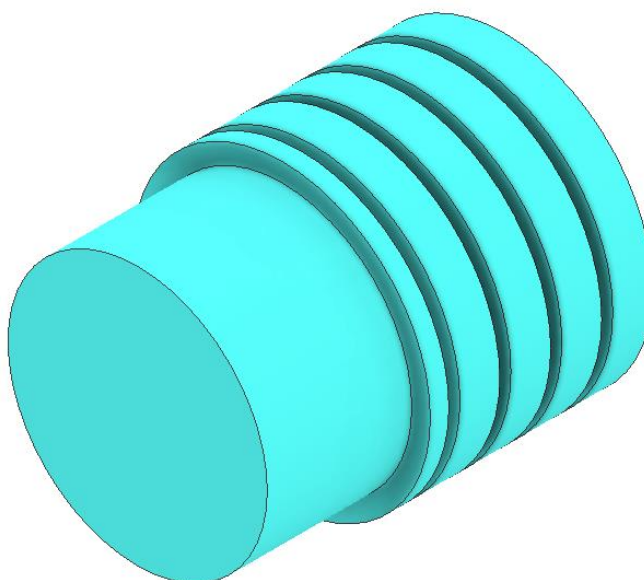
7 Součást č.1

7.1 Popis a základní rozměry

První součást byla navržena za účelem určení vhodných řezných podmínek pro daný materiál při obrábění tvrdým soustružením, tak aby se docílilo co nejlepší kvality povrchu.



Obrázek 17: Výkres součásti č.1



Obrázek 18: Model součásti č.1

7.2 Použité nástroje

Tabulka 20: List použitých nástrojů

Číslo listu: 1	Nástrojový list			
Číslo nástroje	Název nástroje	Držák nástroje	Označení VBD	Výrobce VBD
T1	Vnější nůž hrubovací	MWLNr 2020 K 08-N	WNMG080408-MF4	Seco Tools
T2	Vnější nůž dokončovací	SVJCR 2020 K16-M-A 7431 02	VCMT 160404 NN PVD	Darmet
T3	Vnější zapichovací nůž	GFMR 2020 K 0316	LCMF 031604-CM	Pramet
T5	Soustružnický nůž	PCLNR 2020 K12 0024126334	CNMA 120404F	Garant
T6	Soustružnický nůž	PCLNR 2020 K12 0024126334	CNGA 120404TN	Ceratizit
T7	Soustružnický nůž	PCLNR 2020 K12 0024126334	CNGA 120408TN	Ceratizit

7.3 Obrábění součásti před kalením

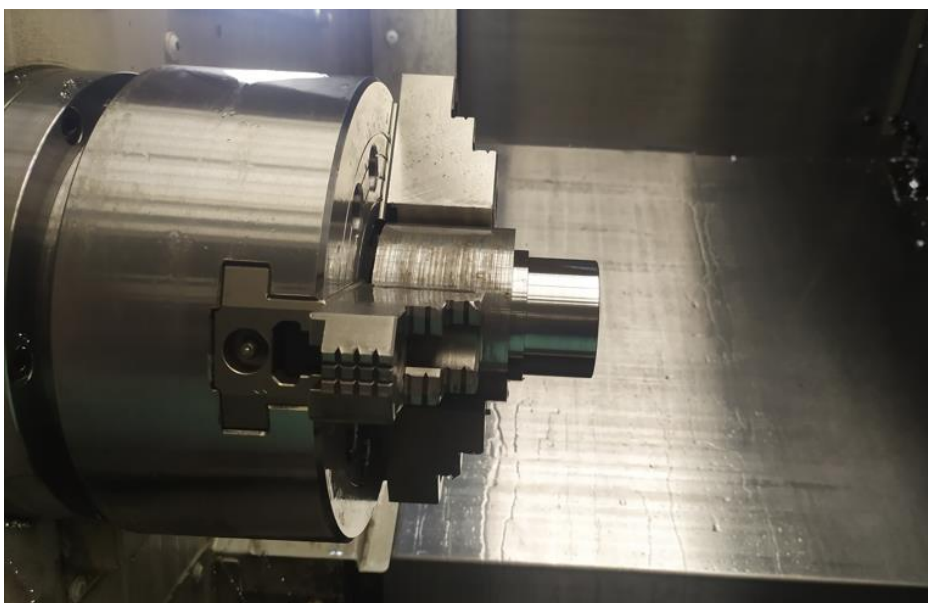
Před kalením byla součást obráběna na 2 upnutí ve sklíčidle s tvrdými čelistmi. Nejprve bylo potřeba obrobit upínací část (operace 05), aby bylo umožněno obrobit zbytek součásti.

7.3.1 Operace 05

Před samotným obráběním vyhodnocovací části, bylo potřeba vytvořit upínací část. Obrobení upínací části nejprve začalo upnutím polotovaru do sklíčidla za průměr 81,5 mm. Po určení nulové hodnoty bodu Z, se spustil proces obrábění na řídicím panelu. Nejprve byl pomocí nástroje T1 čelo zarovnáno nahrubo a poté byl pomocí podélného hrubování obroben průměr 81,5 mm. Zároveň byl obroben úsek za upínací částí do délky 45 mm. Po velkém úběru materiálu bylo potřeba, pomocí nástroje T2, obráběnou část obrobit na čisto, konkrétně zarovnat čelo a podélným soustružením vytvořit průměr 70 mm v délce 39 mm a průměr 80 mm do délky 45 mm. Operace 05 byla zakončena najetím nástroje do počátečních souřadnic a vyjmutím obrobené součásti.

Tabulka 21: Operace 05

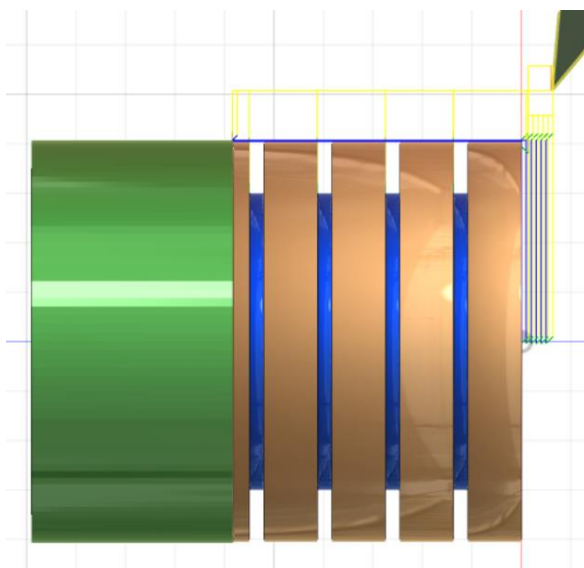
Výrobní postup č.1						
Stroj: Okuma Genos L200E-M		Č. výkresu: BP - 01		Polotovar: Tyč kruhová		
Součást č.1		Materiál: ČSN 19 573		Rozměr polotovaru: Ø 81,5 - 105		
č.op. 05	Popis činnosti	Nástroj	v_c [m/min]	f [mm/ot]	a_p [mm]	i [-]
	Upnout za Ø 81,5 mm v délce 50 mm	-	-	-	-	-
	Hrubováním zarovnat čelo odebráním 0,5 mm	T1	140	0,250	0,500	1
	Hrubovat Ø 81,5 mm v délce 45 mm	T1	140	0,300	3,000	4
	Zarovnat čelo na čisto	T2	180	0,080	0,200	1
	Soustružit na čisto Ø 81,5 mm v délce 45 mm	T2	180	0,080	0,200	1
	Vyjmutí obrobku	-	-	-	-	-



Obrázek 19: Obrobená upínací část

7.3.2 Operace 10

V této operaci byl polotovar upnut za Ø 70 mm do sklíčidla na doraz. Opřením čelistí o čelo se docílilo vyšší přesnosti při obrábění. Po určení nulové hodnoty osy Z, bylo zprvu zarovnáno čelo. Z bezpečnostních důvodů bylo zde zvoleno 6 postupných úběrů, protože předchozím řezáním polotovaru mohlo dojít v místě řezu k nepřesnostem a nedodržení kolmosti čela. Následně byla součást pomocí nástroje T1 hrubována s ponecháním přídavku 0,7 mm. Poté byly vytvořeny 4 zápichy o šířce 3 mm do průměru 60 mm. Nakonec byl obráběný průměr soustružen na čisto nástrojem T2 s ponecháním přídavku 0,5 mm. Tvorba zápichů byla záměrně zvolena před soustružením na čisto, aby nedošlo k případným nežádoucím poškozením povrchu v oblasti rohů zápichů.



Obrázek 20: Simulace obrábění v CAM softwaru

Tabulka 22: Operace 10

č.op. 10	Popis činnosti	Nástroj	v_c [m/min]	f [mm/ot]	a_p [mm]	i [-]
	Upnutí na doraz za $\varnothing 70$ mm	-	-	-	-	-
	Zarovnění čela na čisto	T1	160	0,2	1	6
	Hrubovat $\varnothing 81,5$ mm s přídkem 0,7 mm	T1	160	0,3	2	1
	Výroba 4 zápichů o šířce 3 mm na $\varnothing 60$ mm	T3	80	0,08	1	1
	Soustružit na čisto $\varnothing 81,5$ mm v délce 38 mm s přídkem 0,5 mm	T2	160	0,08	1	1
	Vyjmutí obrobené součásti	-	-	-	-	-



Obrázek 21: Obrobená součást č.1 před kalením

7.4 Kalení

Obě součásti byly po obrobení odvezeny do pobočky společnosti Bodycote v Praze, kde došlo k zakalení. Společnost Bodycote byla založena na začátku 20.století a nyní zaměstnává více než 5000 zaměstnanců na více než 180 pobočkách. Tato společnost se zabývá především tepelným zpracováním, spojováním kovů, izostatickým lisováním za tepla a také technologií povrchových úprav. [45]

7.4.1 Operace 15

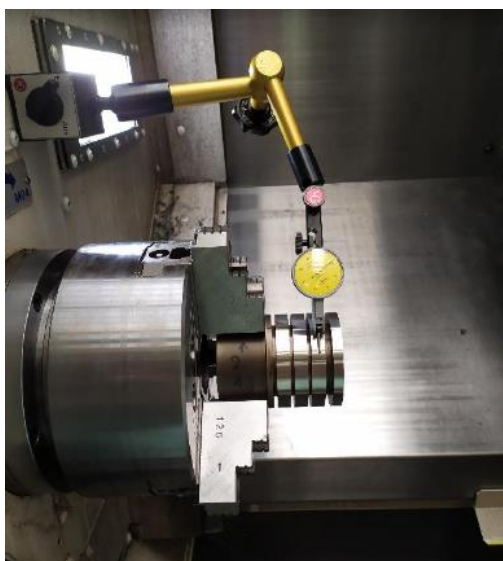
Tabulka 23: Operace 15

č.op. 15	Popis činnosti	Nástroj	v_c [m/min]	f [mm/ot]	a_p [mm]	i [-]
	Zakalení součásti	-	-	-	-	-

7.5 Obrábění po kalení

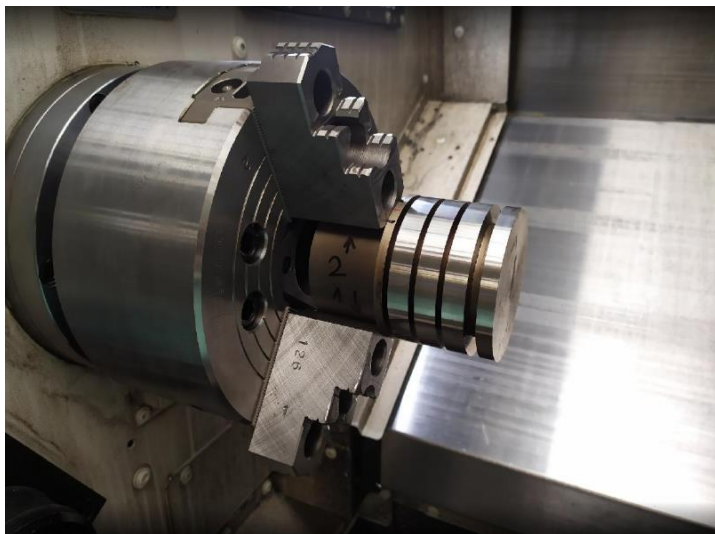
Z předešlého obrábění byly na součásti vytvořené 4 úseky oddělené zápichy, které byly určeny pro obrábění zakoupenými destičkami z CBN.

Před samotným obráběním vždy došlo k upnutí součásti do hydraulického sklíčidla s tvrdými čelistmi tlakem 2 MPa. Házení součásti se před každým obráběním kontrolovalo setinovým úchylkoměrem. Pomocí úchylkoměru bylo zjištěno, že opakovaným upnutím součásti bylo dosaženo minimálních rozdílů v obvodovém házení, a proto se pro upnutí použilo sklíčidlo s tvrdými čelistmi. V tomto případě nebylo potřeba použití měkkých čelistí, které se používají pro lepší eliminaci házení.



Obrázek 22: Kontrola obvodového házení při upnutí pomocí úchylkoměru

Jelikož se jednalo o opakované upínání a vyjmutí obrobku, bylo potřeba při prvním upnutí označit vzájemnou polohu čelistí a obrobku a tuto vzájemnou polohu dodržovat při dalším upínání.



Obrázek 23: Upnutá součást s vyznačenou polohou

Obrábění bylo založeno na obrobení čtyř úseků s konstantní hloubkou řezu a_p a konstantní řeznou rychlostí v_c . Tyto hodnoty se měnily vždy před každým novým testovacím cyklem. Odebraným materiálem se vždy změnil průměr součásti, a proto bylo také potřeba v napsaném programu změnit i hodnotu X určující konečný průměr obráběné součásti pro danou operaci. Po změně průměru obráběné součásti vždy bylo potřeba přepočítat potřebné otáčky pro další obrábění dle vzorce:

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot d} \quad (1)$$

n ... otáčky [ot/min]

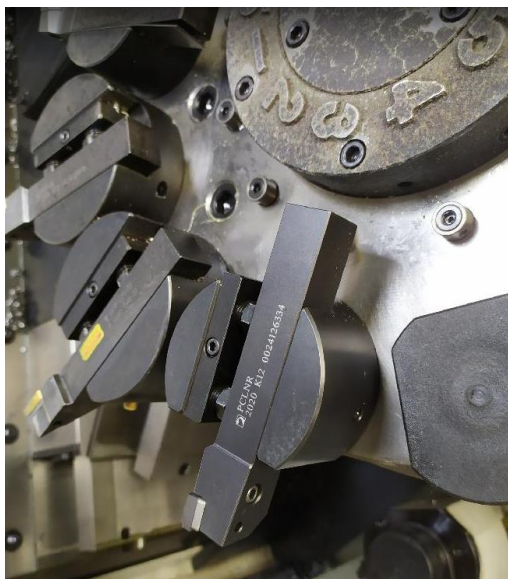
v_c ... řezná rychlost [m/min]

d ... průměr součásti [mm]

Řezná rychlost v_c , hloubka řezu a_p a posuv f pro zakoupené břitové destičky byly voleny dle doporučených hodnot od jejich výrobců.

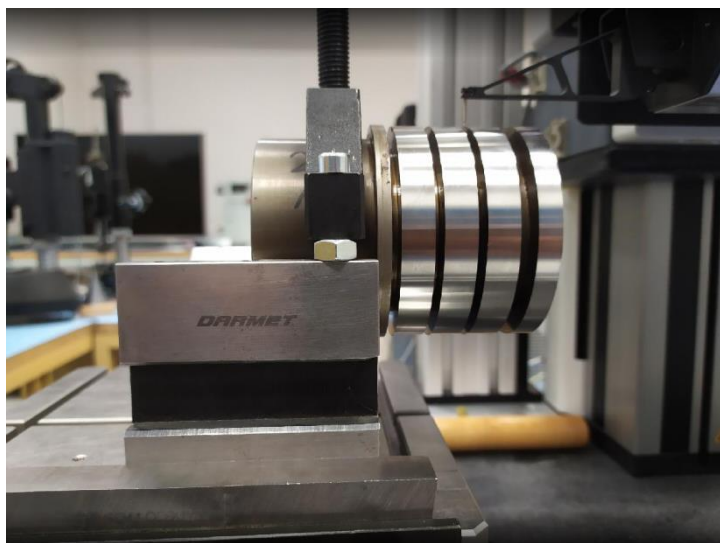
Program pro obrábění byl přímo vytvořen ručně na řídicím panelu CNC stroje, z důvodu jeho jednoduchosti. Díky struktuře vytvořeného programu bylo umožněno rychlé a snadné přepsání pouze hodnot, které s postupným obráběním bylo potřeba změnit.

Při každé výměně nástroje anebo břitové destičky bylo opět potřeba provést korekci nástrojů. Pro dosažení co nejvyšší tuhosti nástroje byl soustružnický nůž vyložen 35 mm.



Obrázek 24: Revolverová hlava s upnutým nástrojem

Po obrobení čtyř úseků bylo vždy nutné vyjmout obrobek a následně na obrobených průměrech naměřit hodnoty týkající se dosažených drsností. Měření drsností probíhalo pomocí přístroje MarSurf LD 120 od výrobce Mahr. Aby došlo k co nejpřesnějšímu a správnému naměření hodnot, obrobená součást byla vložena do prizma a připevněna pomocí upínacího třmenu. Prizma s obrobkem bylo vždy opřeno o hranu pevné desky přístroje, tak aby měřicí hrot přístroje snímal dráhu v ose obrobku. Pro měření byla zvolena základní délka λ_c v souladu s normou 0,08 mm. Vyhodnocení bylo provedeno na standardním pětinasobku základní délky. Na rozběh a doběh byla zvolena dráha $2 \times 0,5^\circ \lambda_c$. Z příslušných měření jsou v přílohách k dispozici protokoly se všemi naměřenými hodnotami včetně průběhů měření drsností.



Obrázek 25: Snímání dosažené drsnosti

7.5.1 Garant CNMA 120404F

VBD byly zvoleny především dle schopnosti obrábět vybraný materiál. Velkou roli také hrála vizuální stránka katalogů a e-katalogů výrobců. Výběr této destičky byl ovlivněn její třetinovou cenou oproti ostatním výrobcům.

Jedná se o nepovlakovanou jednobřitou destičku s řezným materiálem CBN720. Tělo destičky je z tvrdokovu na němž je připájena špička z kubického nitridu bóru s nejjemnějším zrnem a s rádiusem špičky 0,4 mm. Písmeno F v označení VBD charakterizuje její ostrou řeznou hranu. Tato destička je určena pro dokončovací operace kalených ocelí s tvrdostí vyšší než 45 HRC. [46]



Obrázek 26: VBD CNMA 120404F [46]

Pro obrábění byly využity doporučené řezné podmínky přímo od výrobce.

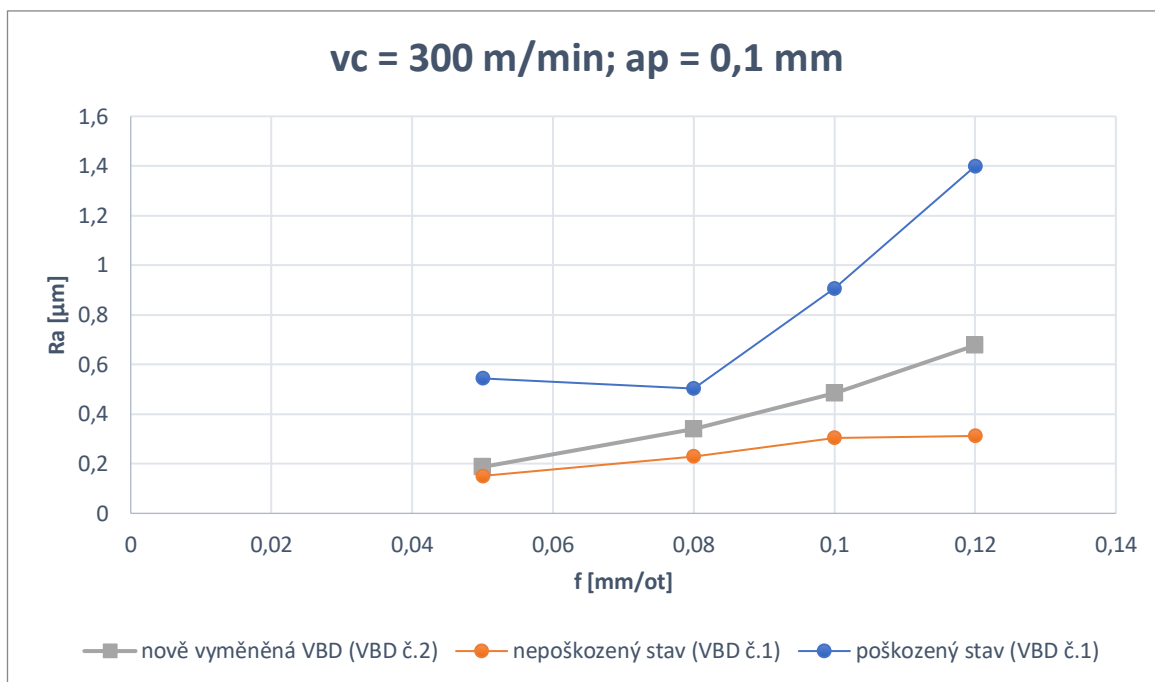
Tabulka 24: Doporučené řezné podmínky [46]

v_c [m/min]	120 – 400
a_p [mm]	0,05 – 0,2
f [mm/ot]	0,08 – 0,15

Touto destičkou byly provedeny 3 obráběcí cykly. Při čtvrtém testovacím cyklu došlo k poškození destičky pravděpodobně z důvodu namotání vzniklé třísky přímo do místa řezu. Kontrolou povrchu po obrábění byla viditelná vada způsobující vryp v materiálu a tím vyšší hodnoty drsnosti. Po dalším pokračování v obrábění touto destičkou bylo pozorováno tavení vznikající souvislé třísky, která byla neobvykle ultra tenká.

Po ukončení obrábění bylo na špičce destičky viditelné poškození. Pro ověření poškození řezné hrany byla destička podstoupena stejným řezným podmínkám jako za předešlého nepoškozeného stavu. První známkou změny na povrchu destičky byly opět tvořící se třísky v roztaveném stavu. Následným vyjmutím obrobku a změřením dosažených drsností bylo zjištěno, že v porovnání s předchozím obráběním došlo k výraznému zhoršení kvality

povrchu. Pro dosažení co nejlepších hodnot drsností bylo potřeba nahradit poškozenou destičku za novou.

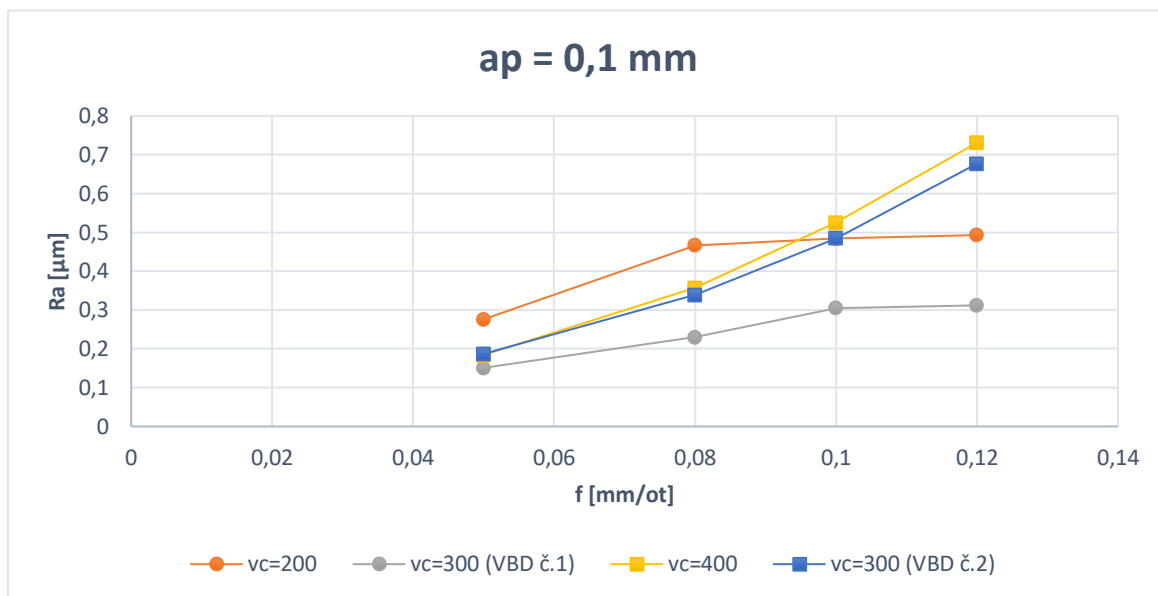


Graf 1: Závislost drsnosti Ra na posuv při poškození VBD

Z naměřených hodnot a následného vytvoření grafu bylo potvrzené poškození destičky. Po výměně destičky byla provedena zkouška, opět při stejných řezných podmínkách, zda disponuje stejnými vlastnostmi. Při obrábění nedocházelo ke vzniku třísky v roztaveném stavu. Obráběním pomocí VBD č.2 bylo s rostoucím posuvem dosaženo horší kvality povrchu. Horší vlastnosti obrobeneho povrchu mohly být způsobeny drobnými rozdíly přímo v procesu výroby těchto destiček anebo případně rozdílnými vlastnostmi při upnutí obrobku.

Závislost drsnosti Ra na posuvu při různých hodnotách řezné rychlosti

Dále bylo provedeno porovnání dosažené drsnosti Ra při změnách doporučené řezné rychlosti při konstantní hodnotě hloubky řezu a_p .

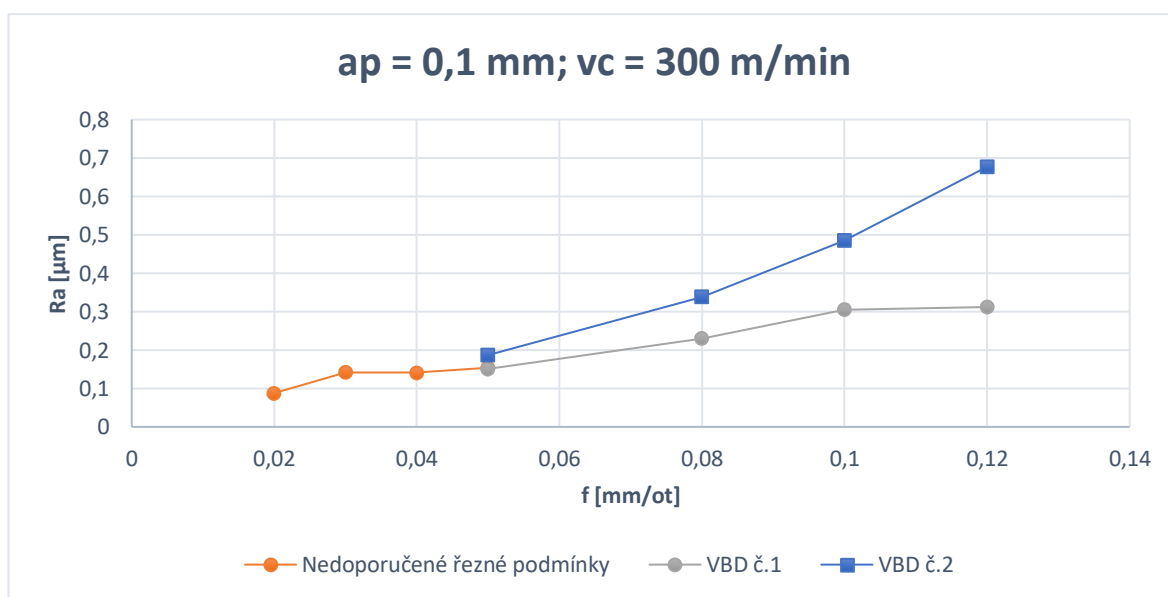


Graf 2: Závislost drsnosti Ra na posuvu při různých hodnotách řezné rychlosti

Z porovnání dosažených hodnot je patrné, že naměřené vyšší hodnoty drsnosti při vyšších rychlostech mohou souviset s opotřebením destičky při obrábění předchozích segmentů.

Závislost drsnosti Ra na posuvu při konstantní hloubce řezu a řezné rychlosti

Volené řezné podmínky byly především voleny dle doporučených řezných podmínek přímo od výrobce VBD. Pro větší rozpětí hodnot posuvu zde bylo obráběno i řeznými podmínkami, které nejsou výrobcem doporučeny.



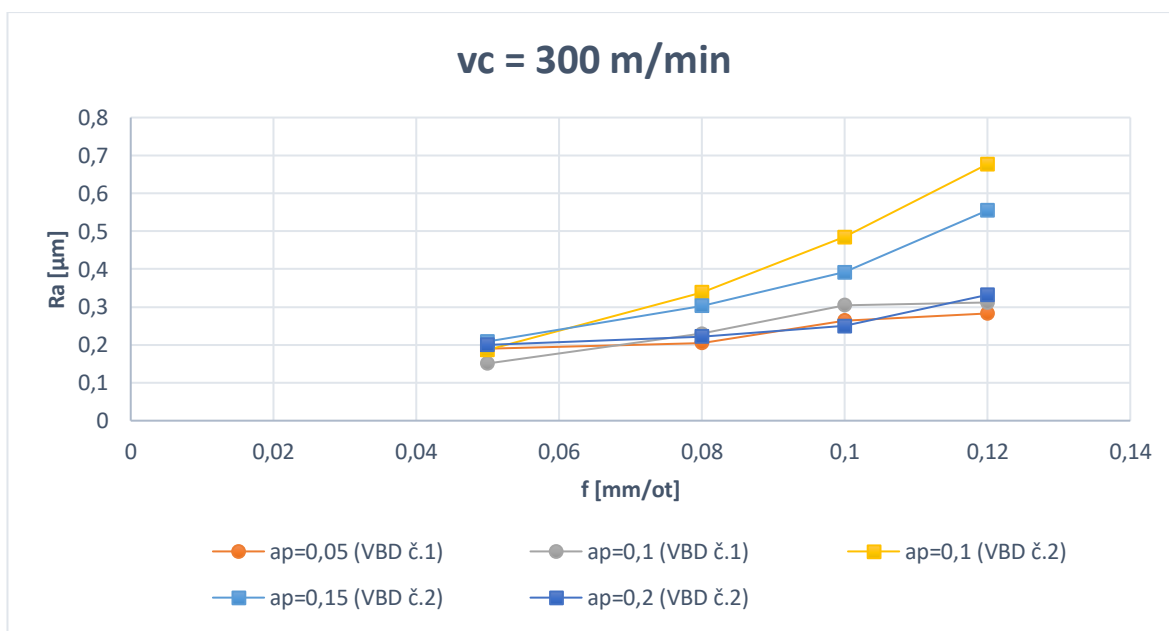
Graf 3: Závislost drsnosti Ra na posuvu

Z příslušného grafu lze vyhodnotit, že díky zvoleným menším posuvům, které výrobce nedoporučuje (0,02 až 0,04 mm/ot), bylo možné docílit velmi nízkých hodnot Ra rovnajících se dokonce i Ra 0,088 μm.

Ale během obrábění nízkými posuvy bylo patrné, že destička na takové řezné podmínky není přizpůsobena. Při nízkých posuvech docházelo k tvorbě třísky v taveném stavu, která se během obrábění ve tvaru dlouhé vinuté třísky zamotávala před obráběcí nástroj do řezné oblasti i do zápichů v obrobku. Tento nežádoucí jev by bylo možné odstranit usměrněným ofukem během obrábění. Až při zvýšeném posuvu na 0,05 byla vznikající tříska souvislá s dobrým odvodem mimo obrobek a nástroj.

Závislost drsnosti Ra na posuvu při různých hloubkách řezu

Při konstantní řezné rychlosti byl porovnáván vztah mezi hloubkou řezu a_p a posuvem f . Zde bylo zjištěno, že s rostoucím posuvem f roste hodnota Ra, tj. klesá kvalita obráběného povrchu.

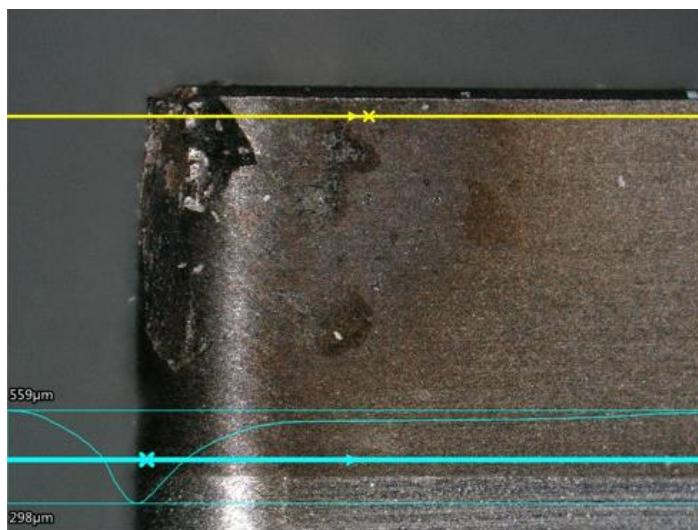


Graf 4: Závislost drsnosti Ra na posuvu při různých hodnotách hloubky řezu

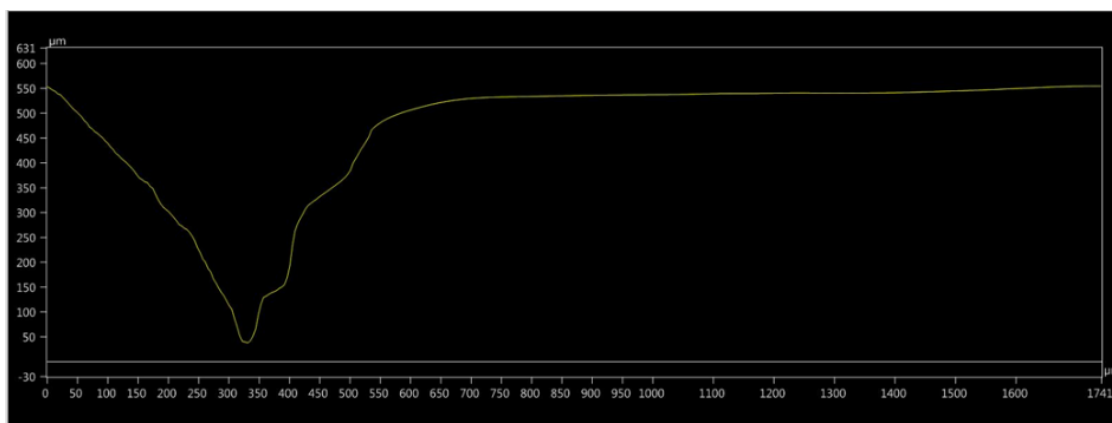
Získané hodnoty drsností po obrábění destičkou č.1 (při $a_p = 0,05$ a $a_p = 0,1$) a destičkou č.2 (při $a_p = 0,2$) byly velmi příznivé a poměrně stabilní při všech posuvech. Naopak destička č.2 se chovala výrazně rozdílně při $a_p = 0,1$ a $a_p = 0,15$. Rozdílné chování destiček při obrábění bylo potvrzeno ze získaných hodnot Ra při stejných řezných podmínkách ($a_p = 0,1$), kdy VBD č.1 dosahovala mnohem lepších výsledků než VBD č.2.

7.5.2 Poškození destiček Garant

Při vložení poškozené destičky č.1 pod mikroskop bylo ještě jednou potvrzené její velké poškození. Zvětšením špičky destičky pod mikroskopem se prokázalo poškození destičky, které bylo viditelné i pouhým okem a způsobovalo zhoršenou kvalitu povrchu. Vytvořené poškození na hlavním hřbetu úměrně roste ke špičce. Maximální hloubka vyštípnutí (VBmax) byla 500 μm v blízkosti špičky. Je zde také viditelné tepelné působení na špičku destičky během obrábění.

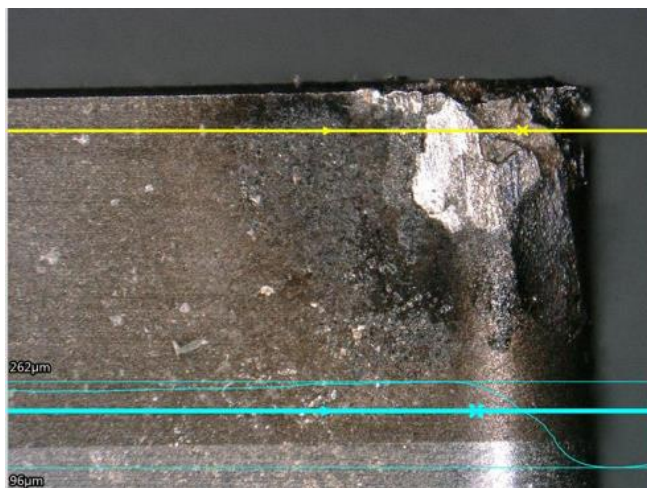


Obrázek 27: Poškození hlavního hřbetu na VBD č.1

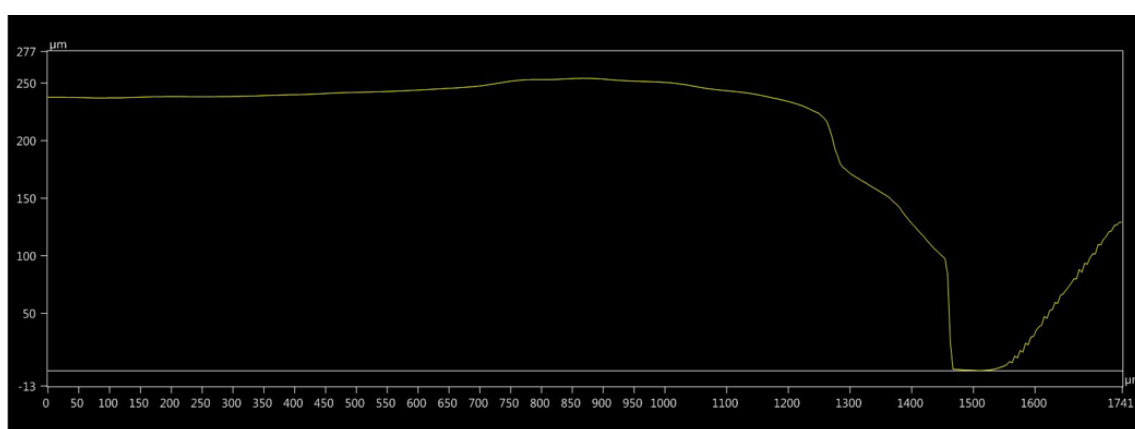


Obrázek 28: Hloubka vyštípnutí materiálu na hlavním hřbetu

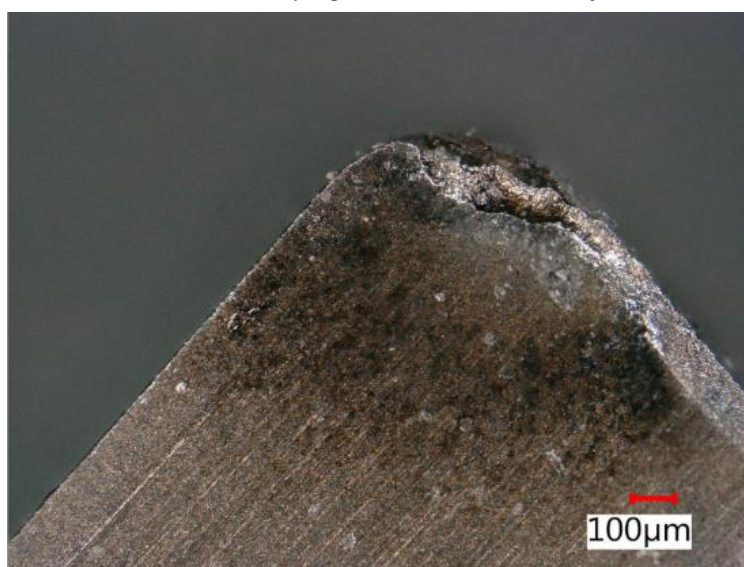
Při pohledu na snímek vedlejšího hřbetu VBD č.1, lze potvrdit větší poškození než na straně hlavního hřbetu. Větší poškození může být způsobené natočením VBD v držáku, kdy je vedlejší hřbet blíže k teplu v podobě odváděných třísek. Opět vytvořené poškození na vedlejším hřbetu úměrně roste ke špičce, kde je vyštípnutí rovno 240 μm .



Obrázek 29: Poškození vedlejšího hřbetu na VBD č.1



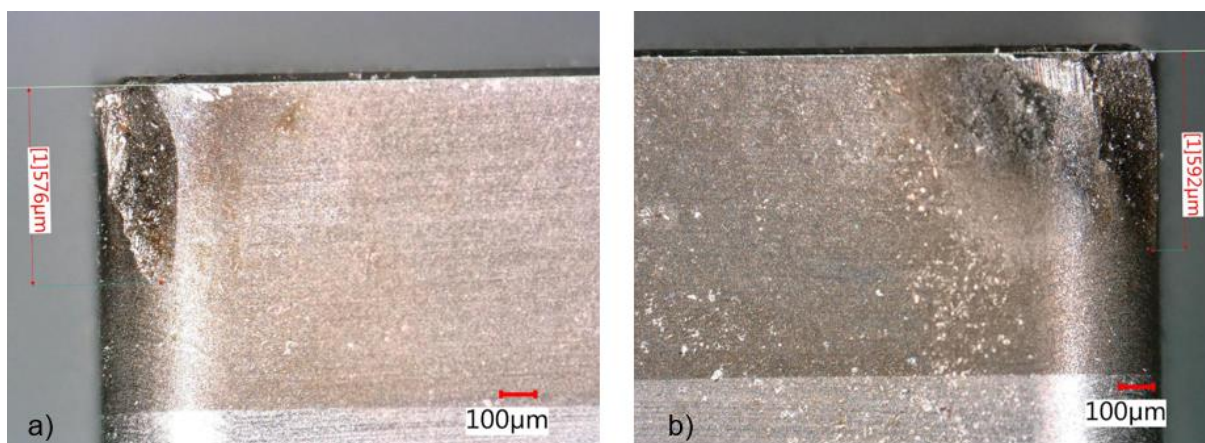
Obrázek 30: Hloubka vyštípnutí materiálu na vedlejším hřbetu



Obrázek 31: Radiální poškození VBD č.1

Na tomto snímku je opět výrazné opotřebení špičky destičky a poškození jejího rádiusu. Je zde možné vidět zaoblené ostří, které vzniká během výroby VBD.

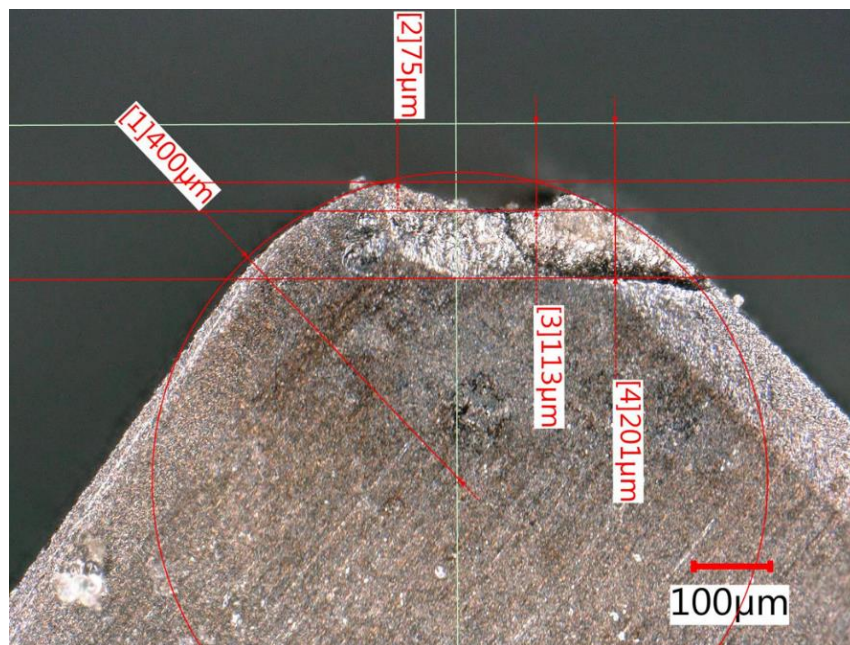
Po vložení pod mikroskop použité VBD č.2 bylo zjištěno, že povrch hlavního hřbetu je viditelně poškozen, avšak ne do takové míry jako v případě VBD č.1. Poškození hlavního hřbetu bylo do vzdálenosti 576 μm .



Obrázek 32: VBD č.2 a) Poškození hlavního hřbetu, b) Poškození vedlejšího hřbetu

Na vedlejším hřbetu je viditelné větší působení tepla při obrábění, které zde způsobilo opět větší poškození oproti hlavnímu hřbetu. Ze snímku vedlejšího hřbetu je patrné, že poškození směrem ke špičce úměrně roste.

Na pořízeném snímku rádiusu lze vidět velké opotřebení. Maximální hodnota radiálního opotřebení (VR) zasahuje do čela o vzdálenosti přibližně 201 μm .

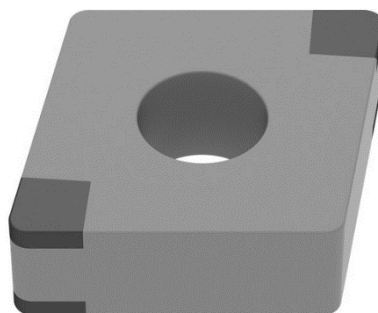


Obrázek 33: Radiální poškození na VBD č.2

7.5.3 Ceratizit 120404TN a 120408TN

Pro další obrábění byly zvoleny 2 typy destiček od společnosti Ceratizit, které se zejména lišily v poloměru špičky.

Destička 120404TN je charakteristická čtyřmi břity, jejichž poloměry činí 0,4 mm. Použitý řezný materiál je zde označen CTBH20C. [47]

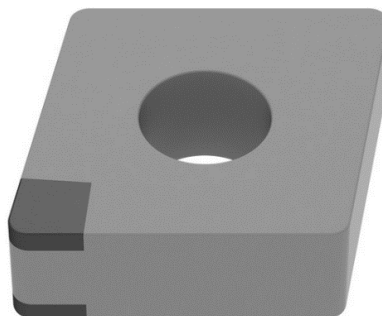


Obrázek 34: VBD 120404TN [47]

Tabulka 25: Doporučené řezné podmínky od výrobce [47]

v_c [m/min]	280 - 350
a_p [mm]	0,05 – 0,5
f [mm/ot]	0,04 – 0,15

Dále byla použita destička 120408TN disponující pouze dvěma břity. Její poloměr špičky je 0,8 mm a řezný materiál je zde CTBH20C, stejný jako u předešlé destičky. [48]



Obrázek 35: VBD 120408TN [48]

Tabulka 26: Doporučené řezné podmínky od výrobce [48]

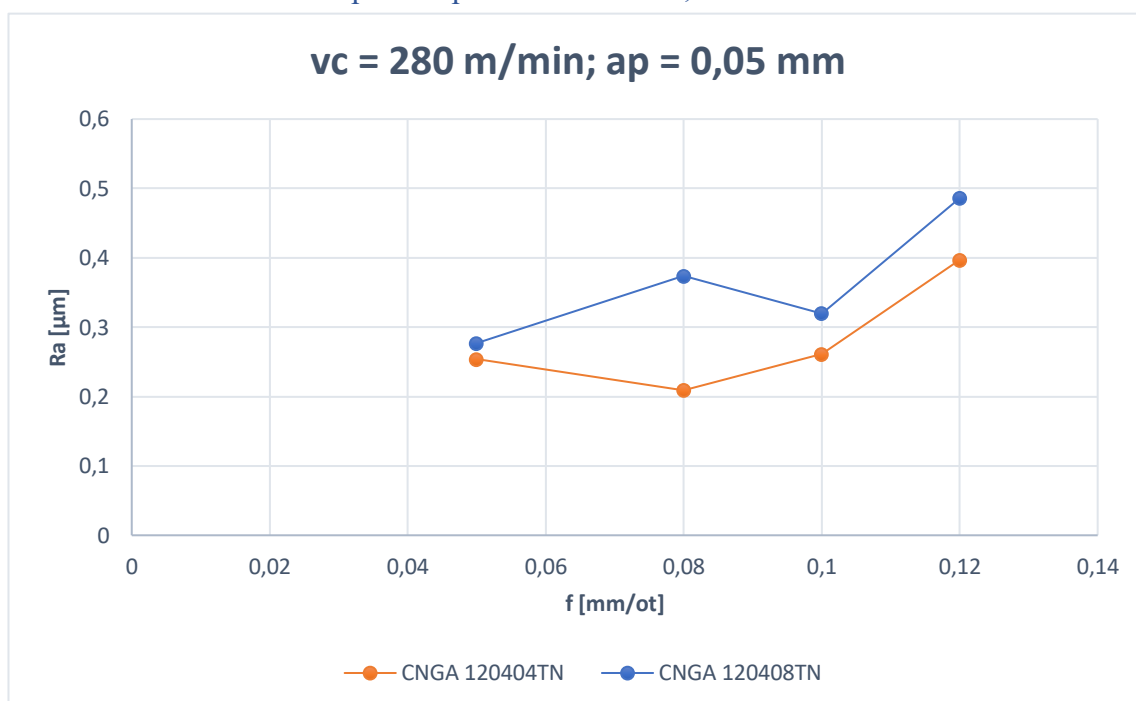
v_c [m/min]	210 - 290
a_p [mm]	0,08 – 0,5
f [mm/ot]	0,05 – 0,15

Porovnání destiček 120404TN a 120408TN

Pro zkušební obrábění destičkami od výrobce Ceratizit byly řezné podmínky zvoleny ve formě průniku doporučených hodnot obou typů VBD přímo od výrobce. Řezná rychlost byla ve všech případech stanovena na 280 m/min.

Řezné vlastnosti obou typů destiček byly nejprve pozorovány za konstantní řezné rychlosti a hloubky řezu.

Závislost drsnosti na posuvu při hloubce řezu 0,05 mm

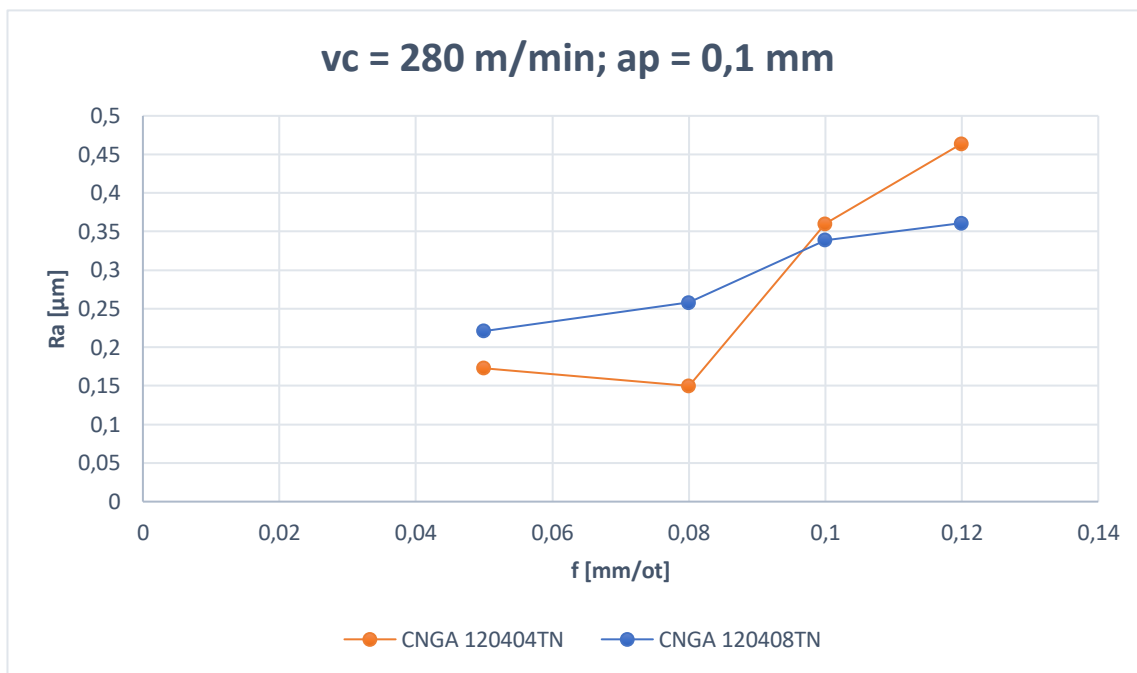


Graf 5: Závislost drsnosti Ra na posuvu při $a_p=0,05$ mm

Z grafu lze zjistit, že s rostoucím posuvem f dochází ke zhoršení kvality povrchu. Během obrábění součásti, při posuvu rovném hodnotě 0,05 mm/ot, bylo u obou destiček možné pozorovat tvorbu vinutých dlouhých třísek, které se shromažďovaly v místě řezu a také v oblasti zápichů mezi obráběnými úseky. Při zvýšeném posuvu, tj. 0,08 mm/ot, byla tříška destičkou 120404TN tvořena už ve formě souvislé třísky. Při použití destičky 120408TN, zde docházelo ke vzniku roztavené souvislé třísky, která se namotávala na soustružnický nůž během obrábění. Při zvýšených hodnotách posuvů už tvorba třísky byla souvislá se standartním odvodem třísky. Z grafu je viditelné, že při obrábění destičkou s poloměrem špičky 0,4 mm dochází k tvorbě lepší kvality povrchu.

Závislost drsnosti na posuvu při hloubce řezu 0,1 mm

Za těchto zvolených řezných podmínek docházelo k dobrému utváření třísek. Obrábění destičkou s poloměrem špičky 0,8 mm bylo charakteristické tvorbou třísky v roztaveném stavu a také vznikem otřepů na hranách obráběných úseků. U obrábění touto destičkou bylo také zjištěno vyšší zahřátí obrobku.

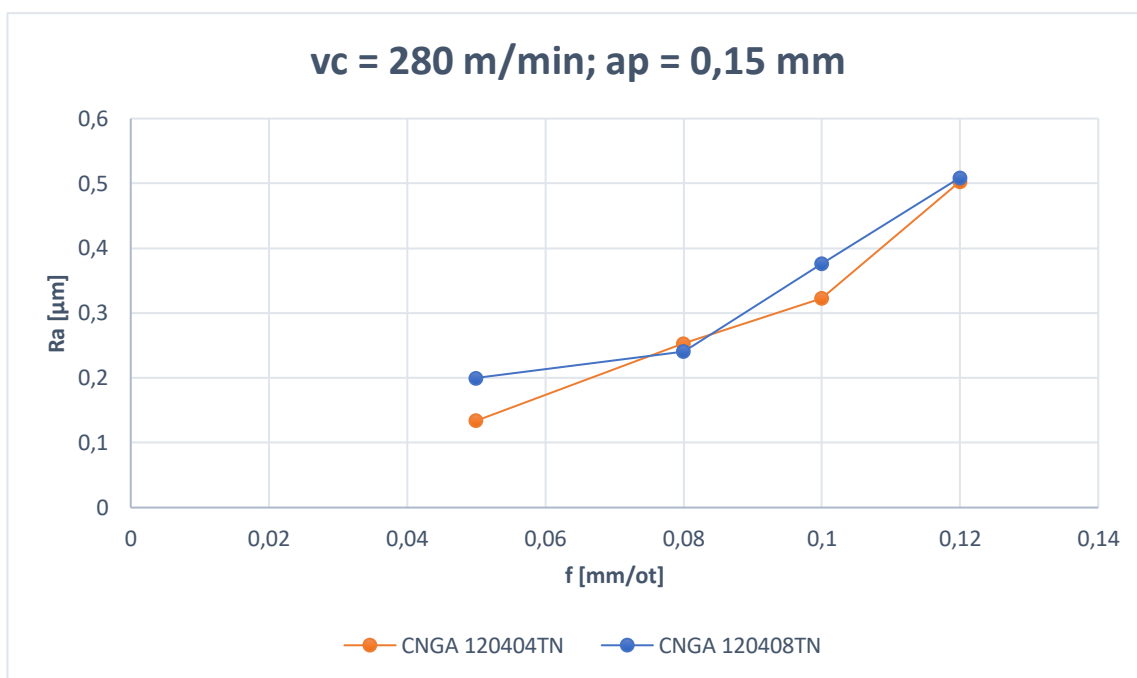


Graf 6: Závislost drsnosti Ra na posuvu při $a_p = 0,1$ mm

Závislost drsnosti na posuvu při hloubce řezu 0,15 mm

Během obrábění destičkou 120404TN za těchto daných řezných podmínek došlo k uštípnutí používané destičky. Po zastavení stroje bylo na špičce destičky pozorováno výrazné tmavé zbarvení způsobené působením tepla. Následně bylo potřeba poškozenou destičku vyměnit za novou, avšak po obrobení za stejných řezných podmínek byla špička zahřátá a opět s tmavým zbarvením. Při obrábění destičkami s poloměrem špičky 0,4 mm nedocházelo ze vzniku roztavené třísky.

Použitím destičky 120408TN byly vytvářeny třísky v roztaveném stavu. Při vyjmutí obrobku ze stroje bylo zjištěno velké ohřátí obráběné součásti a také byly viditelné výrazné otřepy na hranách obrobku.



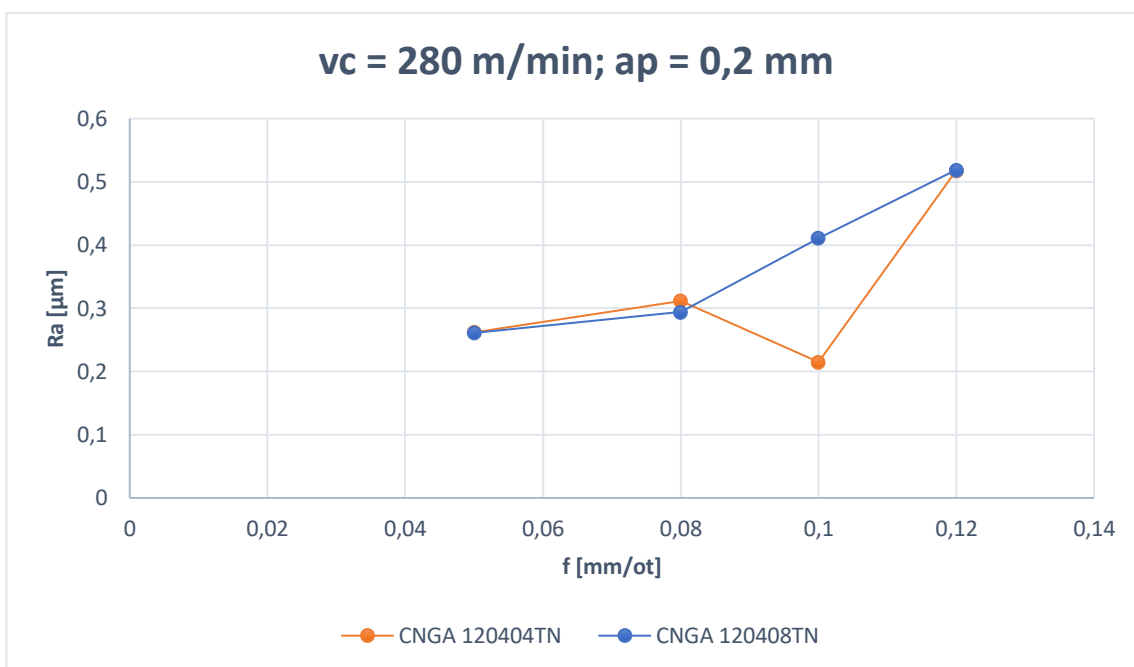
Graf 7: Závislost drsnosti Ra na posuvu při $ap=0,15$ mm

Při těchto řezných podmínkách nedošlo k tak výrazným rozdílným vlastnostem destiček, avšak je zde z vytvořeného grafu opět patrné, že s rostoucím posuvem klesá kvalita obrobku.

Závislost drsnosti na posuvu při hloubce řezu 0,2 mm

Při úběru třísky 0,2 mm pomocí destičky 120404TN docházelo, oproti předchozím případům, k tvorbě roztavených třísek, u kterých rostla teplota s rostoucím posuvem. Po vyjmutí obrobku bylo možné vidět silně namotané narovnané třísky v oblasti zápichů na velmi ohřátém obrobku.

Během obrábění destičkou s poloměrem špičky 0,8 mm byla pozorována rovněž tvorba roztavených třísek. Na hranách obráběných úseků byly výrazně viditelné i citelné otřepy, které by mohly znamenat nežádoucí popuštění a tím následnou deformaci povrchové vrstvy. Při nejvyšší hodnotě posuvu zde byla také poprvé viditelná známka vibrací, způsobenými velkými radiálními silami, které vytvářely chvění a následně špatné držení stopy nástroje. Tyto vibrace působí na nástroj nepříznivě, což velmi výrazně ovlivňuje jeho životnost.

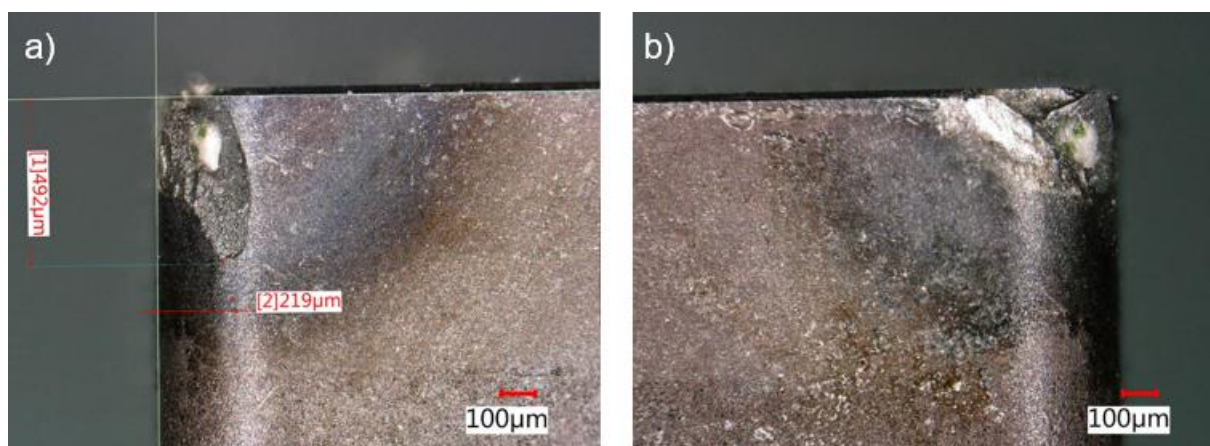


Graf 8: Závislost drsnosti Ra na posuvu při $a_p=0,2$ mm

Z vyznačených hodnot v grafu vyplývá, že dosažená kvalita povrchu, během obrábění oběma destičkami při nižších posuvech, je téměř shodná. Při zvýšených hodnotách posuvů jsou docílené drsnosti nerovnoměrné.

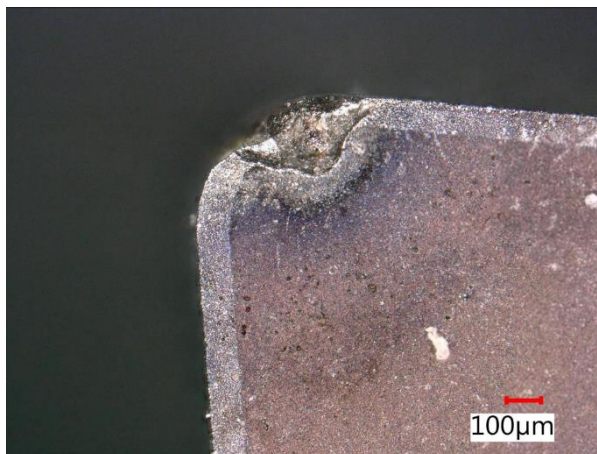
7.5.4 Poškození destiček Ceratizit

Na obou snímcích hřbetů destičky CNGA 120404TN lze pozorovat výrazné tmavé zbarvení způsobeného působením tepla během obrábění. Tepelné působení je na hlavním i vedlejším hřbetu srovnatelné. Na obou snímcích je vidět, že poškození povrchu úměrně roste směrem ke špičce destičky. V porovnání s hlavním hřbetem je povrch vedlejšího hřbetu výrazně opotřebenější.



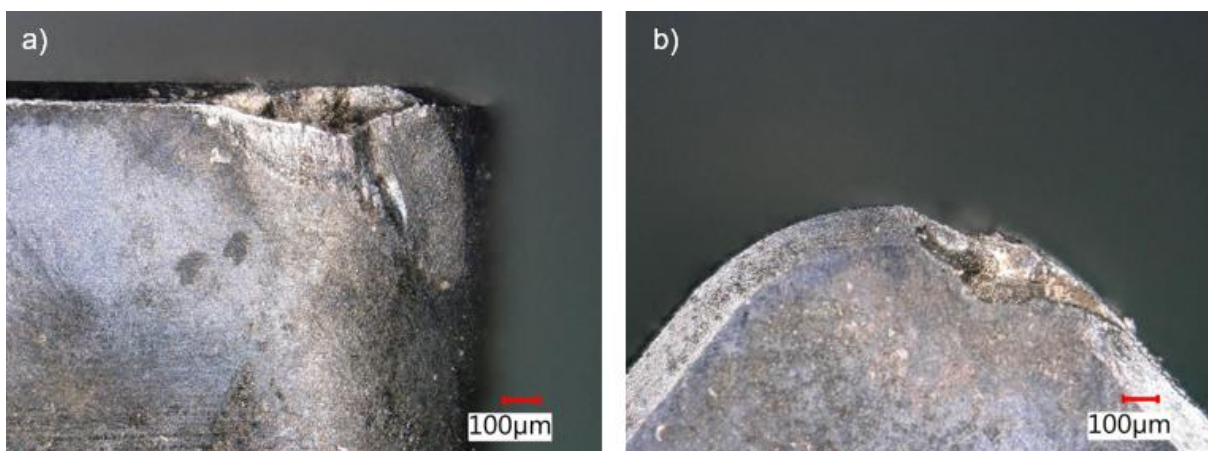
Obrázek 36: Snímek hlavního (a) a vedlejšího (b) hřbetu destičky CNGA 120404TN

Na pořízeném snímku čela destičky CNGA 120404TN lze vidět výrazné radiální poškození. Je zde možné vidět zalešťovanou fazetku pomocí malého kotoučku během výroby.



Obrázek 37: Radiální poškození destičky CNGA 120404TN

Na pořízeném snímku vedlejšího hřbetu destičky CNGA 120408TN je možné vidět opět výrazné poškození jako u předešlých destiček. Na povrchy špičky VBD je viditelné tmavé zbarvení, které je způsobeno působením tepla na hřbet destičky během obrábění. Ve srovnání s předchozími destičkami, u této VBD není radiální poškození tak velké.

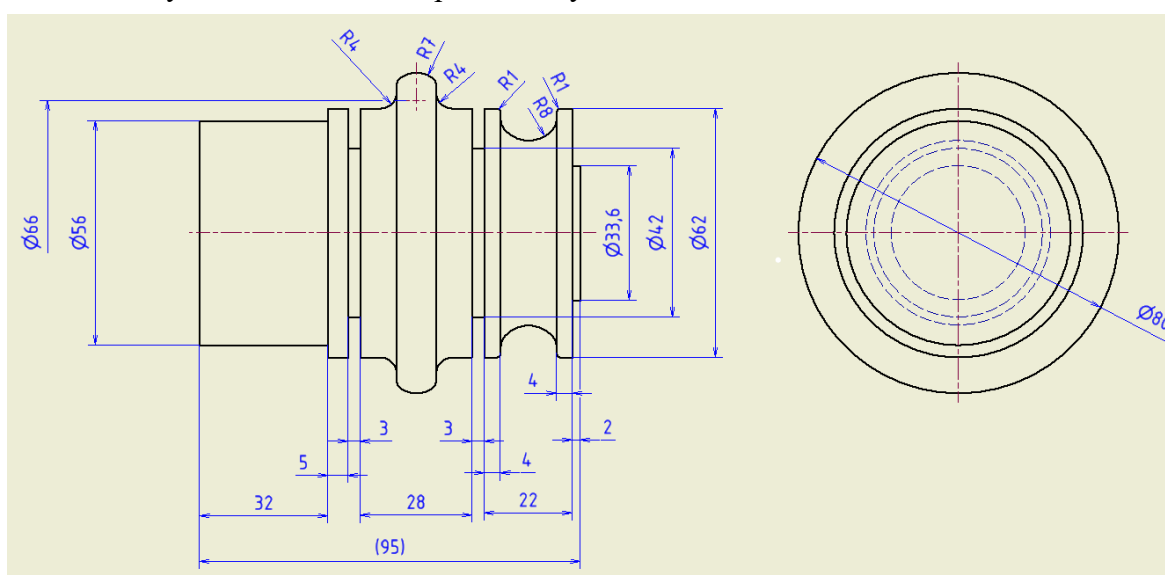


Obrázek 38: Snímek vedlejšího hřbetu (a) a radiálního poškození (b) destičky CNGA 120408TN

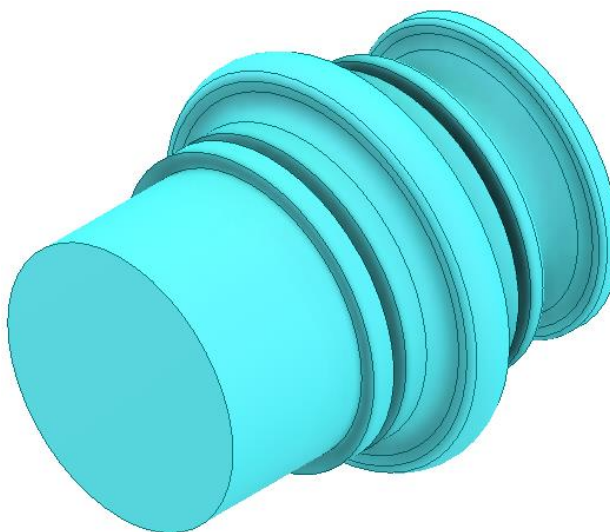
8 Součást 2

8.1 Popis a základní rozměry

Součást č.2 byla navržena tak, aby mohla být vyhodnocena kvalita povrchu dosažená při obrábění. Presentovaná součást na sobě má tvar dvojice válcovacích rolen pro zakružování tenkých plechů. Součást má na sobě jak konvexní, tak konkávní plochy, na kterých se bude i výrazným způsobem měnit opásání malé profilovací destičky. Obrobené plochy musí splňovat požadavky kolmosti a sousosti. Při obrábění se předpokládají změny v drsnosti jednotlivých ploch a také vyšší chvění v oblasti přechodových rádiusů.



Obrázek 39: Výkres součásti č.2



Obrázek 40: Model součásti č.2

8.2 Použité nástroje

Tabulka 27: List použitých nástrojů

Číslo listu:2	Nástrojový list			
Číslo nástroje	Název nástroje	Držák nástroje	Označení VBD	Výrobce VBD
T1	Vnější nůž hrubovací	MWLN200 K 08-N	WNMG080408-MF4	Seco Tools
T2	Vnější nůž dokončovací	SVJCR 2020 K16-M-A 7431 02	VCMT 160404 NN PVD	Darmet
T3	Vnější zapichovací nůž	GFMR 2020 K 0316	LCMF 031604-CM	Pramet
T4	Vnější tvarový nůž	HELIR 2020-5T25	GRIP 5025Y IC830	Iscar
T8	Vnější tvarový nůž	CFIL2020K04	LCGN 1604MO-0400E25-LF CBN010	Seco Tools
T9	Vnější nůž dokončovací	SVJCR 2020 K16-M-A 7431 02	VCGW 160404 TN	Ceratizit

8.3 Obrábění součásti před kalením

8.3.1 Operace 05

Jelikož se jednalo opět o obrábění upínací části, byl zde stejný výrobní postup jako u součásti č.1. Operace se pouze lišila v obrábění s konečnými rozměry.

Tabulka 28: Operace 05

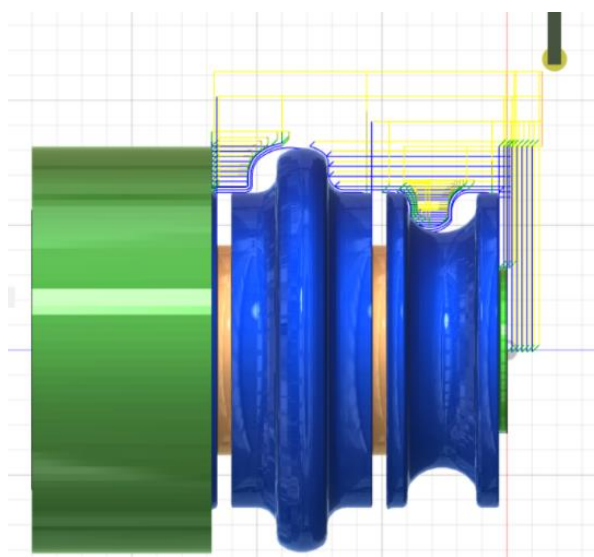
Výrobní postup č.2						
Stroj: Okuma Genos L200E-M		Č. výkresu: BP - 02		Polotovary: Tyč kruhová		
Součást č.2		Materiál: ČSN 19 573		Rozměr polotovaru: Ø 81,5 - 98		
č.op. 05	Popis činnosti	Nástroj	v_c [m/min]	f [mm/ot]	a_p [mm]	i [-]
	Upnout za Ø 81,5 mm v délce 50 mm	-	-	-	-	-
	Hrubováním zarovnat čelo odebráním 0,5 mm	T1	140	0,250	0,500	1
	Hrubovat Ø 81,5 mm v délce 40 mm	T1	140	0,300	3,000	5
	Zarovnat čelo na čisto	T2	180	0,080	0,200	1
	Soustružit na čisto Ø 81,5 mm v délce 40 mm	T2	180	0,080	0,200	1
	Vyjmutí obrobku	-	-	-	-	-



Obrázek 41: Obrobená upínací část

8.3.2 Operace 10

Operace 10 byla zahájena upnutím součásti č.2 za obrobenou upínací část za průměr 56 mm. Upnutí bylo opět na opěrnou čelní plochu sklíčidla, aby došlo k větší stabilitě obrobku při soustružení. Proces obrábění započal použitím nástroje T1 a zarovnáním čela. Stejným nástrojem následovalo hrubování průměru 81,5 mm v délce 39 mm a čelní plochy, kdy byl v obou případech ponechán přídavek. Poté probíhalo hrubování potřebných rádiusů pomocí tvarového nože (T4). Po hrubování následovala výroba 2 zápichů, o šířce 3 mm na průměr 42 mm, s nástrojem T3. Nakonec došlo k obrobení na čisto celé součásti rovněž nástrojem T4 při ponechání přídaveků.



Obrázek 42: Simulace obrábění v CAM softwaru

Tabulka 29: Operace 10

č.op. 10	Popis činnosti	Nástroj	v_c [m/min]	f [mm/ot]	a_p [mm]	i [-]
	Upnutí na doraz za \varnothing 56 mm	-	-	-	-	-
	Zarovnání čela	T1	160	0,2	1	6
	Hrubování \varnothing 81,5 mm v délce 39 mm s přídávkem	T1	160	0,2	2	5
	Čelní obrábění s přídávkem 0,4 mm	T1	160	0,2	1	3
	Obrobení vnitřního vnějšího rádiusu s přídávkem (radiální 1 mm, axiální 0,2 mm)	T4	90	0,15	0,5	16
	Hrubování \varnothing 81,5 mm v délce od 39 – 60 mm	T4	90	0,15	0,5	11
	Výroba 2 zápichů o šířce 3 mm na \varnothing 42 mm	T3	80	0,08	1	1
	Obrobení tvarové vnější a vnitřní plochy na čisto s přídávkem (radiální 0,5, axiální 0,1 mm)	T4	90	0,15	1	1
	Vyjmutí obrobené součásti	-	-	-	-	-



Obrázek 43: Obrobená součást č.2 před kalením

8.4 Kalení

8.4.1 Operace 15

Tabulka 30: Operace 15

č.op. 15	Popis činnosti	Nástroj	v_c [m/min]	f [mm/ot]	a_p [mm]	i [-]
	Zakalení součásti	-	-	-	-	-

8.5 Obrábění po kalení

8.5.1 Seco Tools - LCGN 1604MO-0400E25-LF CBN010

Pro obrobení součásti č.2 byl zvolen tvarový nůž s profilovou destičkou s označením řezného materiálu CBN 010. Použitá VBD, s poloměrem špičky 0,4 mm, je charakteristická 50% obsahem CBN s keramickým pojivem TiC. Jedná se o nepovlakovanou destičku, která je ideální pro použití při nepřerušovaném až středně přerušovaném řezu. [49]



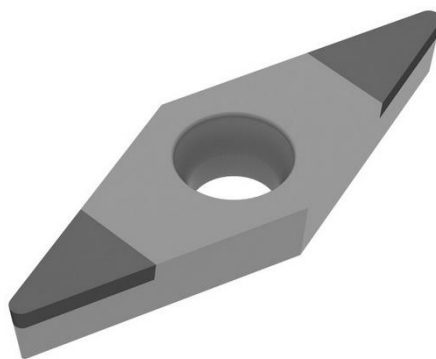
Obrázek 44: Profilová destička - Seco Tools [49]

Tabulka 31: Doporučené řezné podmínky [50]

a_p [mm]	< 0,5
v_c [m/min]	80 – 180
f [mm/ot]	0,050 – 0,36

8.5.2 Ceratizit - VCGW 160404 TN

Pro tvrdé soustružení byla také použita dvoubřitá destička VCGW 160404 TN od výrobce Ceratizit. Zvolená destička disponuje poloměrem špičky 0,4 mm. Řezný materiál destičky je výrobcem označen CTBH20C. Tento řezný materiál je vhodný pro obrábění kalené oceli od 48 do 62 HRC a zároveň pro hladký až lehce přerušovaný řez. [27] [51]



Obrázek 45: Destička VCGW 160404 TN – Ceratizit [51]

Tabulka 32: Doporučené řezné podmínky

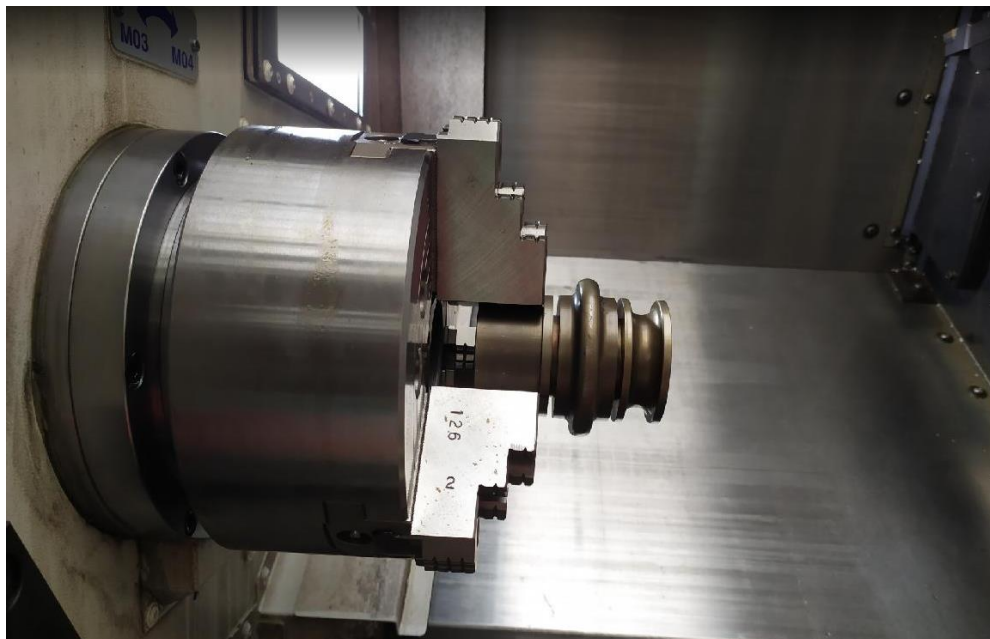
a_p [mm]	0,1 – 0,5
v_c [m/min]	210 – 260
f [mm/ot]	0,05 – 0,15

Tabulka 33: Zkoušky tvrdého soustružení tvarových ploch

	Popis činnosti	Nástroj	v_c [m/min]	f [mm/ot]	a_p [mm]	i [-]
	Upnutí na doraz za Ø 56 mm	-	-	-	-	-
Test č.1	Soustružení čela a Ø 62 mm (před i za vnitřním rádiusem) (přídavek 0,1 mm)	T9	210	0,05	0,05	10
	Soustružení vnitřního a vnějšího rádiusu (přídavek radiální 0,1 mm a axiální 0,1mm)	T8	120	0,05	0,05	8
Test č.2	Soustružení čela a Ø 62 mm (před i za vnitřním rádiusem) (přídavek 0,05 mm)	T9	210	0,05	0,025	3
	Soustružení vnitřního rádiusu (přídavek radiální 0,1 mm a axiální 0,1 mm)	T8	120	0,03	0,025	3
	Soustružení vnějšího rádiusu (přídavek radiální 0,1 mm a axiální 0,1 mm)	T8	120	0,05	0,025	3
Test č.3	Soustružení čela a Ø 62 mm načisto (před i za vnitřním rádiusem)	T9	210	0,05	0,025	3
	Soustružení vnitřního a vnějšího rádiusu načisto	T8	120	0,03	0,025	3
	Vyjmutí obrobenej součásti	-	-	-	-	-

Nástroje použité pro tvrdé soustružení součásti č.2 byly na doraz upnuty v revolverové hlavě, s cílem zaručení co největší tuhosti nástrojů při obrábění. Pro zachování minimálního házení se součást obráběla na jedno upnutí a až po dokončení obrábění načisto došlo k vyjmutí obrobku a následnému naměření hodnot dosažených drsností povrchu. Program určený pro veškeré obrábění této součásti byl vytvořen a posléze vygenerován v softwaru Autodesk Fusion 360. Během procesu tvrdého soustružení nebyla použita žádná řezná kapalina.

Součást č.2 byla upnuta do sklíčidla s tvrdými čelistmi pod tlakem 2 MPa. Po následném naměření házení úchylkoměrem bylo zjištěno, že obvodové a čelní házení se pohybuje okolo třech setin mm. Pro obrábění součásti byly zvoleny doporučené řezné podmínky přímo od výrobců VBD.



Obrázek 46: Upnutá zakalená součást před obráběním

Test č.1

Pro minimalizaci házení bylo provedeno obrobení celé součásti s ponecháním 0,1 mm přídavku. Byl zde volen vyšší počet drah pro obrábění, a to především pro zajištění menšího namáhání destiček a vyvarování se případné existenci většího množství materiálu v místě řezu. Při soustružení čela pomocí nástroje T9 bylo možné pozorovat tvorbu třísky v roztaveném stavu, která se posléze hromadila před nástrojem v místě řezu a také v oblasti zápichů. Během soustružení dvou rovinných ploch v blízkosti vnitřního rádiusu zde byly zvoleny vhodné řezné podmínky pro tvorbu drobné třísky. Při soustružení vnitřního rádiusu pomocí nástroje T8, docházelo nejprve k úběru materiálu v oblasti jeho dna, protože zde byl před kalením ponechán větší radiální přídavek než přídavek axiální. Nástrojem byla vytvářena dlouhá vinutá tříska, která se před ním hromadila až do okamžiku kdy se nástroj vzdálil od obrobku za účelem opakování obráběcího cyklu. Soustružením vnějšího rádiusu byly tvořeny drobné vinuté třísky, které se v průběhu obrábění hromadily v oblasti obou zápichů i před obráběcím nástrojem.

Po obrobení a následném zastavením CNC stroje bylo zjištěno výrazné ohřátí obrobku. Na čele byla pozorována výrazně lepší kvalita povrchu než na obrobených rádiusech, kde byly viděny i známky chvění. Lepší kvalitu povrchu by zde pozitivně ovlivnilo upnutí součásti do sklíčidla s měkkými čelistmi.

Pro zajištění co nejmenšího čelního i obvodového házení byl vytvořený program zapnutý opakovaně. Při čelním obrábění docházelo ještě k poměrně výraznému úběru materiálu. Na obráběných průměrech podélným soustružením už úběr materiálu byl minimální.

Test č.2

Při dalším obrábění celé kontury součásti byl ponechán radiální i axiální přídavek 0,05 mm. Byly zde voleny 3 dráhy pro obrábění nástroje, přičemž 1. dráha se nacházela těsně nad obrobkem a jejím cílem bylo zaručit správnou hloubku třísky při obrábění dráhou č.2. Byla zde použita funkce, tzv. spring pass, ve formě 3. dráhy, která byla shodná s dráhou č.2 a docházelo zde k dodatečnému úběru materiálu, ke kterému nedošlo při předchozím obrábění.

Tvorba třísek a jejich případný odvod při jednotlivých operacích byly téměř shodné s předchozím obráběním, které bylo za účelem minimalizace házení. Pro obrábění vnitřního rádiusu zde byla zvolena menší hodnota posuvu $f = 0,03 \text{ mm/ot}$, která měla pozitivní vliv na vytvořenou kvalitu povrchu.

Test č.3

Nakonec bylo provedeno tvrdé soustružení načisto, kde došlo opět k obrobení celé kontury součásti pomocí třech drah. Při obrábění nástrojem T9 docházelo k tvorbě souvislé roztavené třísky, která se shromažďovala v oblasti vnitřního rádiusu. Pro lepší odvod třísek byl zvýšen zdvih nástroje T8, který oba rádiusy obráběl s hodnotou posuvu $f = 0,03 \text{ mm/ot}$.

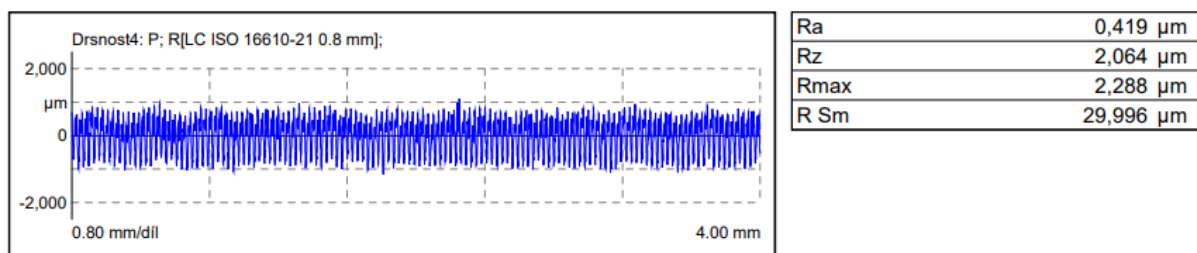


Obrázek 47: Obrobená součást č.2

8.5.3 Dosažená kvalita povrchu

Měření dosažené kvality povrchy probíhalo, jako u součásti č.1, pomocí přístroje Mahr. Pro získání dosažených hodnot z co nejvíce ploch zde bylo potřeba součást umístit do přístroje jak ve stavu horizontálním, tak rovněž i vertikálním. Pro zaručení přesného a správného měření se vždy provádělo několik měření příslušné plochy pomocí pouhého pootočení obrobku.

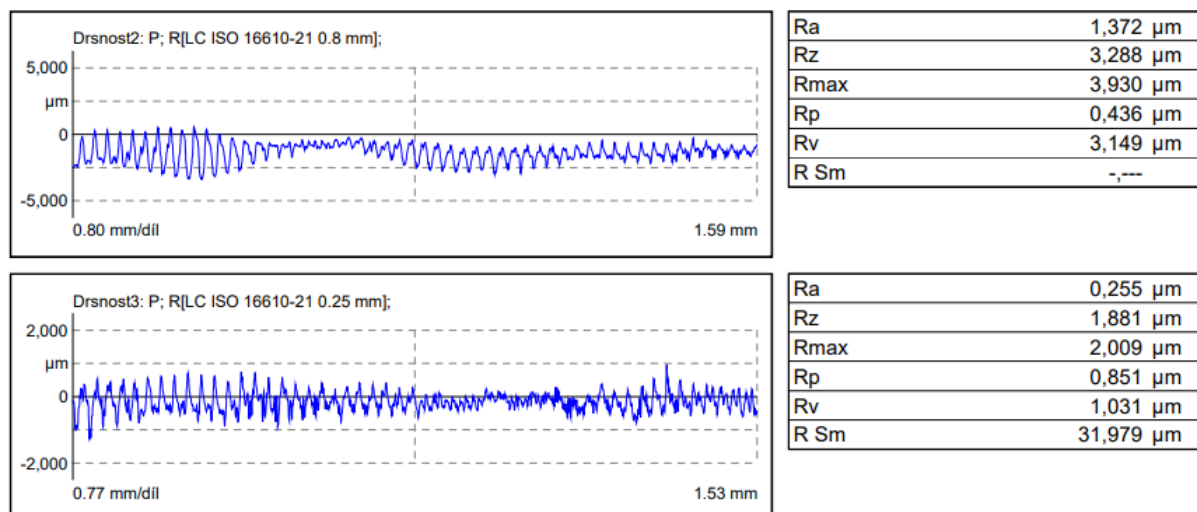
Válec za zápichem



Obrázek 48: Naměřené hodnoty na válci za zápichem

Z vybraných naměřených hodnot drsnosti válce za zápichem, obráběného profilovou destičku, lze pomocí hodnoty R Sm potvrdit obrábění posuvem $f = 0,03$ mm, protože se tyto hodnoty téměř rovnají.

Dno vnitřního rádiusu

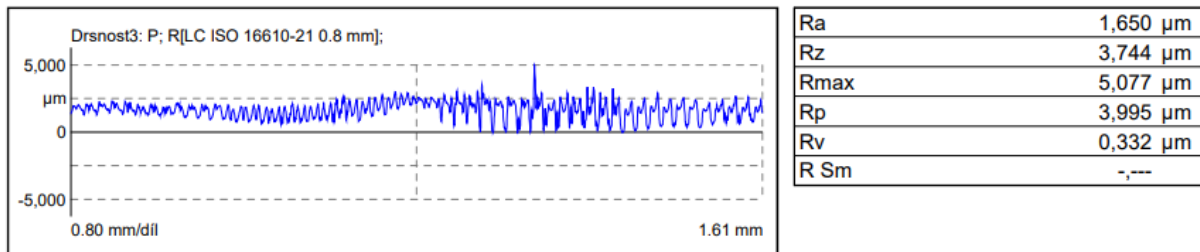


Obrázek 49: Naměřené hodnoty na dně vnitřního rádiusu

Přímo v ose obrobeného vnitřního rádiusu došlo k nežádoucímu jevu v podobě drážky. Tuto drážku lze potvrdit při porovnání naměřených hodnot Rv (největší hloubka prohlubně profilu). V případě zaměření úseku s nežádoucí drážkou bylo možné pozorovat výrazně větší

hodnotu R_v ve srovnání s měřením, kde byla tato část vynechána. Vytvořená drážka negativně ovlivňuje výslednou hodnotu R_a .

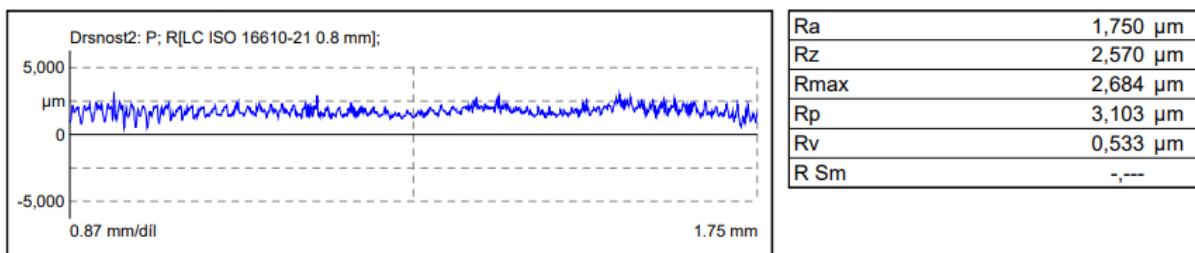
Vrchol vnějšího rádiusu



Obrázek 50: Naměřené hodnoty na vrcholu vnějšího rádiusu

Na snímaném úseku procházejícím osou symetrie byly naměřeny vysoké hodnoty drsnosti R_a .

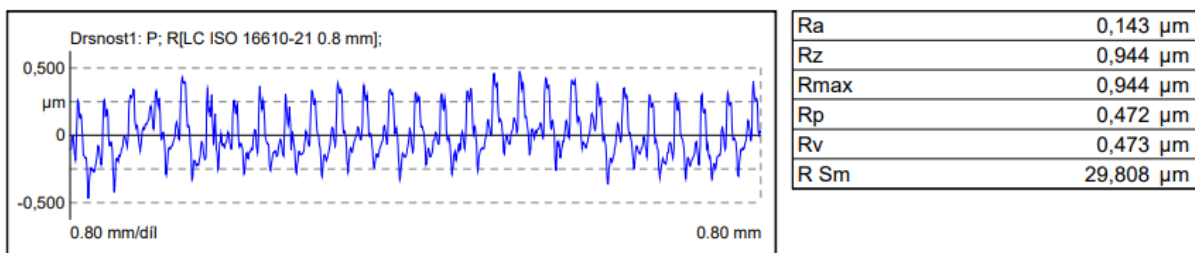
Měření vnějšího rádiusu za osou



Obrázek 51: Naměřené hodnoty úseku za osou symetrie vnějšího rádiusu

Změřením úseku mimo osu symetrie bylo zjištěno, že zde došlo k nepatrně vyšší hodnotě drsnosti R_a než při měření úseku přímo na vrcholu rádiusu.

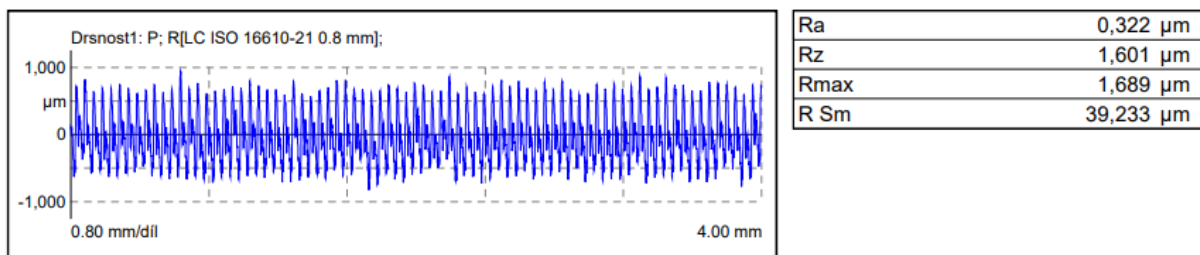
Čelo na vnějším rádiusu



Obrázek 52: Naměřené hodnoty na čele vnějšího rádiusu

Na čele vnějšího rádiusu došlo k výborné kvalitě povrchu. Byla zde dosažena dosud nejnižší hodnota drsnosti $R_a = 0,143 \mu\text{m}$.

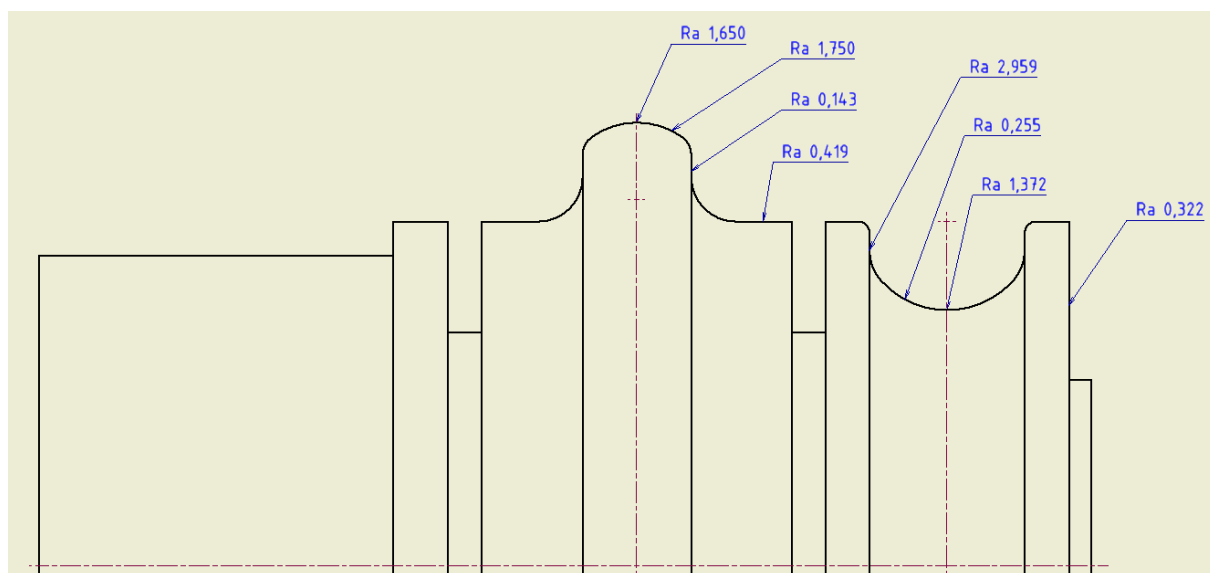
Čelo součásti



Obrázek 53: Naměřené hodnoty na čele součásti

Na čele součásti byly naměřeny rovněž příznivé hodnoty drsnosti Ra pohybující se kolem 0,322 μm.

Dosažené hodnoty Ra na součásti č.2

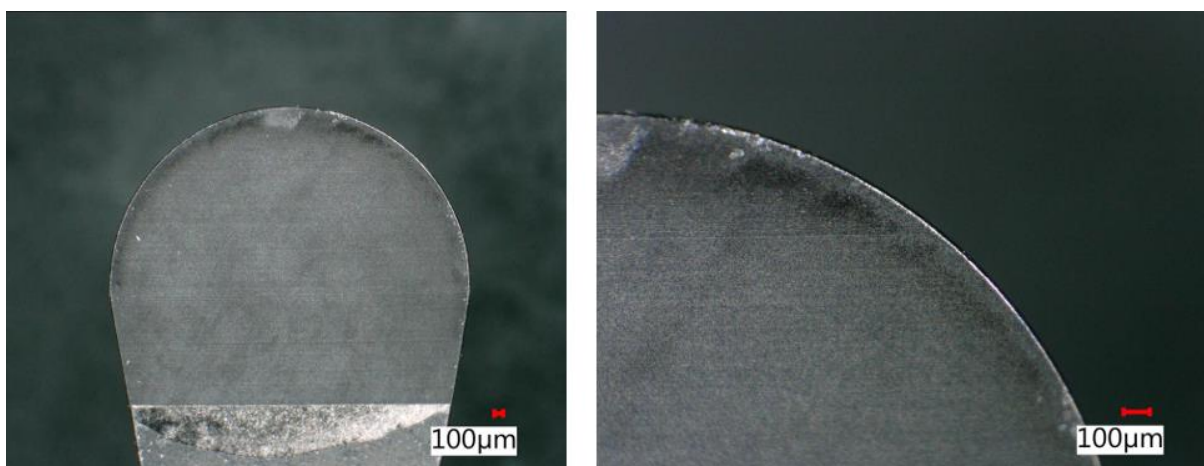


Obrázek 54: Dosažené hodnoty Ra na součásti č.2

Nejlepší kvality povrchu bylo dosaženo na čele vnějšího rádiusu a na čele součásti. Povrch vnitřního rádiusu dosáhl také vysoké kvality, avšak za předpokladu že nedošlo k naměření hodnot přímo v ose rádiusu, kde se nachází nežádoucí drážka. Nízká kvalita povrchu byla dosažena pouze po obrábění profilovou destičkou. Vysoké hodnoty Ra mohly být způsobeny nedostatečnou tuhostí nástroje, která je na jeho bocích menší než v jeho ose.

8.5.4 Poškození profilovací destičky

Po vložení použité profilové destičky pod mikroskop bylo zjištěno, že nedošlo k výraznému poškození destičky při obrábění. Nejsou zde žádná viditelná poškození ve formě vyštípnutí ostří anebo jiného narušení geometrie VBD. Na přiblíženém snímku destičky je možné pozorovat světlejší hranu, která je nepatrně otupená. Také je zde možné vidět mírné známky po tepelné působení během obrábění. I přes drobné vady, je destička v pořádku a bylo by ji možné znovu použít pro další operace při tvrdém soustružení.



Obrázek 55: Snímky profilovací destičky

9 Závěr

Bakalářská práce se zabývá metodou tvrdého soustružení, kterým lze často nahradit broušení. Cíl práce je volba vhodných vyměnitelných břitových destiček od výrobců řezných materiálů a následné naměření dosažených hodnot drsnosti. Práce je rozdělena na dvě části.

První část práce uvádí základní definice a pojmy v oblasti soustružení a tvrdého soustružení. Dále popisuje vhodné řezné materiály, řezné podmínky anebo také řezné prostředí. Poté se v této části nachází přehled nejvýznamnějších výrobců VBD z kubického nitridu bóru (CBN). U každého výrobce jsou zde k dispozici všechny dostupné řezné materiály a jejich charakteristiky či doporučené podmínky. Nachází se zde také dostupné tvary VBD a jejich možný počet břitů na jedné destičce. Záměrem práce byla, na základě průzkumu trhu, správná volba VBD obrábění oceli ČSN 19 573, která po zakalení dosahuje tvrdosti 60 – 62 HRC.

Druhá část práce je zaměřena na obrábění dvou součástí, a to nejprve ve stavu za měkka a následně po zakalení. Součást č.1 se skládala ze čtyř úseků, které byly určeny k pokusnému obrábění při různých řezných podmínkách. Pro tvrdé soustružení součásti č.1 byly zvoleny destičky od výrobců Hoffmann Group (Garant) a Ceratizit. Naměřené hodnoty dosažených drsností povrchu (viz. Příloha) byly zpracovány v podobě grafů v MS Excel. Pomocí vytvořených grafů zde byly vyhodnoceny dosažené hodnoty R_a v závislosti na zvolených řezných podmínkách. Na snímcích z mikroskopu byly viditelné známky opotřebení destiček. Při obrábění poškozenými destičkami došlo k náhlému poklesu kvality povrchu, avšak jejich poškození nebylo tak závažné, aby je nebylo možné používat dále pro hrubovací operace. Nejlepší kvality povrchu bylo docíleno při zvolení nízkých hodnot posuvu a zároveň hloubky třísky, kdy se docílilo nejnižší hodnoty drsnosti $R_a = 0,15 \mu m$.

Součást č.2 byla navržena tak, aby její povrch obsahoval konvexní a konkávní plochy. Po zakalení byla tato součást obráběna profilovou destičkou od výrobce Seco Tools a rovněž destičkou VCGW 160404 TN od výrobce Ceratizit. Nejlepší kvality povrchu bylo u této součásti dosaženo na čele vnějšího radiusu a na čele součásti. Pomocí profilové destičky bylo docíleno nižší kvality povrchu, která mohla být způsobena nedostatečnou tuhostí nástroje. Na povrchu použitých destiček nebyly žádné výrazné známky opotřebení či vyštípnutí.

Byla prokázána obrobitelnost kalené nástrojové oceli ČSN 19 573 pomocí řezného materiálu CBN. Obrábění kalené oceli o tvrdosti 62 HRC probíhalo bez jakýchkoli komplikací. Na základě provedených zkoušek byly cíle bakalářské práce splněny.

10 Použitá literatura

1. HUMÁR, Anton. Technologie I.: Technologie obrábění - 1.část [online]. 2003 [cit. 2022-06-20]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-1cast.pdf
2. ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL. Strojírenská technologie 3: Metody, stroje a nástroje pro obrábění 1.díl. Praha: Scientia, 2000. ISBN 80-7183-207-3.
3. KOČMAN, Karel. Technologické procesy obrábění. Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
4. SCRIBD. Materials and Engineering: 2014 Catalog [online]. 2014 [cit. 2022-07-07]. Dostupné z: <https://www.scribd.com/doc/232005061/Materials-and-Engineering-Catalog>
5. BUMBÁLEK, Bohumil a Jaroslav PROKOP. Vysoce přesné metody obrábění [online]. Brno, 2010 [cit. 2022-06-20]. Dostupné z: http://cpoint.fme.vutbr.cz/akce/kurzy/Bumbalek_Prokop_15_stran.pdf
6. PRODUCTION MACHINING. Hard Turning as an Alternative to Grinding [online]. 2010 [cit. 2022-06-20]. Dostupné z: <https://www.productionmachining.com/articles/hard-turning-as-an-alternative-to-grinding>
7. MMSPEKTRUM. Trvanlivost rezných materiálů při suchom tvrdom sústružení ocele 100Cr6. MM průmyslové spektrum [online]. FS, Žilinská univerzita v Žiline, 2006 [cit. 2022-06-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/trvanlivost-reznych-materialov-pri-suchom-tvrdom-sustruzeni-ocle-100cr6>
8. HEMBRUG MACHINE TOOLS. About finish hard turning [online]. 2020 [cit. 2022-06-20]. Dostupné z: <https://www.hembrug.com/hard-turning/hard-turning-process/>
9. HEMBRUG MACHINE TOOLS. Hard turning vs Grinding [online]. [cit. 2022-06-20]. Dostupné z: <http://www.hembrug.com/hard-turning/hard-turning-compared-to-grinding/>
10. NESLUŠAN, Miroslav. VYBRANÉ ASPEKTY PRESNOSTI OBROBKOV PRI TVRDOM SÚSTRUŽENÍ [online]. Plzeň, 2009 [cit. 2022-06-20]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/16441/1/Neslusan.pdf>

11. OVERBY, alan. CNC Machining Handbook [online]. 2011 [cit. 2022-07-07].
Dostupné z: <https://fdocuments.in/document/cnc-machining-handbook-a-overby-mcgraw-hill-2011-wwpdf.html>
12. Gosiger - serious solutions: Fundamentals of hard turning [online]. [cit. 2022-06-20].
Dostupné z: https://cdn2.hubspot.net/hub/139128/file-17761415-pdf/docs/gos_wp_hardturning_f.pdf
13. PLÁNIČKA, František. PKD a CBN nástroje [online]. 2014 [cit. 2022-07-11].
Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/pkd-a-cbn-nastroje-11164>
14. HARDINGE. T-Series SUPER-PRECISION [online]. [cit. 2022-07-07]. Dostupné z:
<https://www.hardinge.com/product/turning/t-series/>
15. BARÁNEK, ivan. Moderní výroba [online]. Plzeň, 2015 [cit. 2022-06-20]. Dostupné z:
<https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/16106/1/Baranek.pdf>
16. SANDVIK COROMANT. Sandvik: Příručka obrábění [online]. 2016 [cit. 2022-07-11]. Dostupné z: <https://forum.strojirenstvi.cz/viewtopic.php?t=21701>
17. WALTER TOOLS. Vyšší produktivita s tvrdým soustružením: VYMĚNITELNÉ BŘITOVÉ DESTIČKY CBN OD FIRMY WALTER S INOVATIVNÍ TECHNOLOGIÍ [online]. 2019 [cit. 2022-06-20]. Dostupné z:
https://www.technickytydenik.cz/rubriky/obrabeci-stroje-a-jejich-prislusenstvi/vyssi-produktivita-s-tvrzym-soustruzenim_48111.html
18. SANDVIK COROMANT. Nástrojové materiály [online]. [cit. 2022-07-11]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/cutting-tool-materials.aspx>
19. SANDVIK COROMANT. Obráběné materiály: Skupiny obráběných materiálů [online]. [cit. 2022-06-20]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/workpiece-materials.aspx>
20. WALTER TOOLS. CBN - kompletní sortiment: Walter AG představuje nové sorty pro materiály ISO K a ISO H. Walter [online]. 2020, 21.7.2020 [cit. 2022-06-20].
Dostupné z: <https://www.walter-tools.com/cs-cz/press/news/pages/2020-wbk20-wbk30.aspx>
21. TGS. CBN nástroje: Řada Sumiboron [online]. [cit. 2022-07-11]. Dostupné z:
https://www.tgs.cz/content/fck/files/katalogy/L_1-26_cbn_pcd_grades_cz.pdf

22. CARMEX. CBN inserts: Family Overview. <https://carmex.com> [online]. 2022 [cit. 2022-06-20]. Dostupné z: <https://carmex.com/products/turning-tools/family/cbn-inserts/>
23. SECO TOOLS. Chcete se dozvědět více o materiálových skupinách ISO?: PROCŤ JE TŘEBA ZNÁT MATERIÁLOVOU SKUPINU ISO vašeho obrobku? [online]. [cit. 2022-06-20]. Dostupné z: <https://www.secotools.com/article/118837?language=cs>
24. HRAZDIL, Jiří. ČSN ISO 513 (220801): Klasifikace a použití tvrdých řezných materiálů k obrábění kovů s určenou řeznou hranou - Označování skupin a podskupin použití [online]. 2015 [cit. 2022-07-11]. Dostupné z: <https://shop.normy.biz/detail/97630>
25. DORMER PRAMET. Catalog: turning 2021-2022 [online]. [cit. 2022-07-06]. Dostupné z: https://5wyuco84ao39w9tsgkkmnmx.blob.core.windows.net/cms/DORMER_PRAMET_Turning_Catalogue_2021_EN.pdf
26. CERATIZIT. Over 100 years of history: From pioneer to global player [online]. [cit. 2022-07-07]. Dostupné z: <https://www.ceratizit.com/int/en/company/ceratizit-group/about-us.html>
27. CERATIZIT. Katalog: Soustružnické nože s vyměnitelnými destičkami [online]. [cit. 2022-07-06]. Dostupné z: https://cdn.plansee-group.com/is/content/planseemedia/gd_kp_kt-hk-01-21-00021-kp-wp-dre_scs_asc_pim
28. ISCAR. O nás: zakladatelé [online]. [cit. 2022-07-07]. Dostupné z: <https://www.iscar.cz/newarticles.aspx/countryid/6/newarticleid/1818>
29. ISCAR. Turning catalog: ISOTURN INSERTS [online]. [cit. 2022-07-06]. Dostupné z: https://www.iscar.com/Catalogs/flipview/flipview2022/english-1/TURNING-CATALOG-42_2022-p121-254/index.html
30. ISCAR. ISO soustružení: ISO soustružnické destičky. Iscar [online]. [cit. 2022-07-06]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/eCatalog/Products.aspx?mapp=IS&app=282>
31. DORMER PRAMET. O nás: náš příběh [online]. [cit. 2022-07-07]. Dostupné z: <https://www.dormerpramet.com/cz/cs/about-us>
32. SANDVIK COROMANT. O společnosti sandvik coromant: historický vývoj [online]. [cit. 2022-07-07]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/aboutus/our-history/pages/timeline.aspx>

33. SANDVIK COROMANT. Efektivní soustružení tvrzených součástí: Nástrojová třída CB7015, z nabídky společnosti Sandvik Coromant, umožňuje dosažení výrazných úspor při výrobě převodových ústrojí [online]. 2015 [cit. 2022-07-07]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/news/press_releases/pages/efficient-hard-part-turning-cb7015-.aspx
34. SANDVIK COROMANT. Catalog: general turning [online]. [cit. 2022-07-11]. Dostupné z: https://theengineer.markallengroup.com/production/content/uploads/2011/10/MTG_A.pdf
35. SECO TOOLS. Profil společnosti [online]. [cit. 2022-07-07]. Dostupné z: <https://www.secotools.com/article/702>
36. SECO TOOLS. Interaktivní katalogy seco tools: Katalog a technický průvodce - soustružení [online]. 2021 [cit. 2022-07-06]. Dostupné z: <https://www.secotools.com/article/115999>
37. HOFFMANN GROUP. E-catalog: obrábění a upínací technika [online]. [cit. 2022-07-07]. Dostupné z: https://ecatalog.hoffmann-group.com/index.html?country=ces_CZ_CZE/catalogs/&catalog=90000001#page_1122
38. SANDVIK COROMANT. Jak při soustružení dosáhnout dobré kvality obrobených součástí [online]. [cit. 2022-07-11]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general-turning/pages/how-to-achieve-good-component-quality-in-turning.aspx>
39. TOOLSTEEL. 1.2379 / 19 573 / X153CrMoV12 / X155CrVMo12-1 / D2 [online]. Kladno, 2019 [cit. 2022-06-20]. Dostupné z: <http://toolsteel.cz/1-2379-19-573-x153crmov12-x155crvmo12-1/>
40. LENTUS. Třída oceli 19 573.3 [online]. [cit. 2022-06-20]. Dostupné z: <https://www.lentus-ocel.cz/19-5733>
41. BÖHLER. Nástrojové a rychlořezné materiály: dodavatelský program [online]. Vyškov [cit. 2022-06-20]. Dostupné z: https://www.bohler.cz/app/uploads/sites/109/2019/08/katalog_bohler_vyroba.pdf
42. JKZ. W. NR. 1.2379 [online]. Bučovice [cit. 2022-06-20]. Dostupné z: <https://www.jkz.cz/cs/produkty/nastrojove-oceli/pro-prace-za-studena/w-nr-12379/>

43. SIGMAT. CNC Okuma - Genos L200E-M [online]. [cit. 2022-07-11]. Dostupné z: <https://www.sigmat.hr/en/technological-possibilities/745-cnc-okuma-genos-l200e-m>
44. KIKINGDOM. PRODUCTS: L200E-M [online]. [cit. 2022-07-11]. Dostupné z: <https://en.kicnc.cn/product/33.html>
45. BODYCOTE. O nás: Naše společnost [online]. [cit. 2022-07-07]. Dostupné z: <https://www.bodycote.com/cs/o-nas/nase-spolecnost/>
46. HOFFMANN GROUP. Garant: CNMA 120404 F [online]. [cit. 2022-07-07]. Dostupné z: <https://www.hoffmann-group.com/CZ/cs/hot/Modul%C3%A1rn%C3%AD-obr%C3%A1bn%C4%9Bn%C3%AD/Soustru%C5%BEen%C3%AD-s-vym%C4%9Bniteln%C3%BDmi-desti%C4%8Dkami-GARANT/CNMA-120404-CBN720/p/255504-F?tId=367>
47. CERATIZIT GROUP. Soustružení: CNGA [online]. [cit. 2022-07-07]. Dostupné z: https://cuttingtools.ceratizit.com/cz/cs/products/71401_CTBH20C.html#filters/_f-WNT_ISO_BEZ_PR%3A%3A%3A/120404TN%3A%3A%3A%3A%3A
48. CERATIZIT GROUP. Soustružení: CNGA [online]. [cit. 2022-07-07]. Dostupné z: <https://cuttingtools.ceratizit.com/gb/en/products/71400224.html>
49. SECO TOOLS. Soustružení: LCGN 1604MO-0400E25-LF CBN010 [online]. [cit. 2022-07-10]. Dostupné z: https://www.secotools.com/article/p_02916287?pf=true&language=cs
50. SECO TOOLS. Katalog a technický průvodce 2020.1: Soustružení [online]. [cit. 2022-07-10]. Dostupné z: <https://usercontent.azureedge.net/Content/UserContent/Documents/027808.pdf>
51. CERATIZIT. Soustružení: VCGW [online]. [cit. 2022-07-10]. Dostupné z: https://cuttingtools.ceratizit.com/cz/cs/products/71165265.html#filters/_f-WNT_ISO_BEZ_PR%3A%3A%3A/160404TN%3A%3A%3A%3A%3A

11 Seznam příloh

Příloha 1 – Naměřené hodnoty po obrábění VBD č.1 Garant CNGA 120404F

Garant CNMMA 120404F														
Řezné podmínky							Naměřené hodnoty							
Re [mm]	d [mm]	vc [m/min]	otáčky [ot/min]	ap [mm]	f [mm/ot]	Ra [μm]	Rz [μm]	Rmax [μm]	Rt [μm]	Rv [μm]	R Sm [μm]	R.Mr (-1.00, 5.00) [%]	R.Mr (-2.00, 5.00) [%]	R.Mr (-3.00, 5.00) [%]
VBD č.1	0,4	79,2	200	0,1	0,05	0,276	1,488	1,812	1,957	0,824	34,16	92,88	100	100
	0,4	79,2	200	0,1	0,08	0,467	2,206	2,461	2,465	1,013	80	50,71	100	100
	0,4	79,2	200	0,1	0,1	0,484	2,206	2,379	2,379	1,235	100	61,6	99,84	100
	0,4	79,2	200	0,1	0,12	0,493	2,29	2,316	2,351	1,404	83,71	66,64	99,17	100
	0,4	79,1	300	0,05	0,05	0,19	1,011	1,078	1,078	0,449	34,13	100	100	100
	0,4	79,1	300	0,05	0,08	0,205	1,249	1,421	1,485	0,575	29,57	99,94	100	100
	0,4	79,1	300	0,05	0,1	0,264	1,465	1,53	1,542	0,69	29,31	92,39	100	100
	0,4	79,1	300	0,05	0,12	0,283	1,641	1,824	1,886	0,834	34,05	87,04	100	100
	0,4	78,9	300	0,1	0,05	0,151	0,91	1,089	1,089	0,487	24,71	100	100	100
	0,4	78,9	300	0,1	0,08	0,23	1,34	1,387	1,428	0,677	49,04	97,74	100	100
	0,4	78,9	300	0,1	0,1	0,305	1,542	1,594	1,604	0,708	49,5	81,39	100	100
	0,4	78,9	300	0,1	0,12	0,312	1,786	1,904	1,904	0,796	34,49	73,69	100	100
	0,4	78,6	300	0,15	0,05	0,265	1,458	1,6	1,603	0,789	44,82	94,13	100	100
	0,4	78,6	300	0,15	0,08	0,314	2,3	2,993	2,993	0,869	44,05	75,79	100	100
	0,4	78,6	300	0,15	0,1	0,345	1,69	1,799	1,814	0,766	51,34	71,87	100	100
	0,4	78,6	300	0,15	0,12	0,543	3,816	7,178	7,178	2,478	89,85	48,55	91,86	97,6
	0,4	78,2	300	0,2	0,05	0,195	1,345	1,723	1,723	0,562	21,58	99,69	100	100
	0,4	78,2	300	0,2	0,08	1,048	4,648	4,874	5,108	2,263	80,12	30,27	53,04	77,7
	0,4	78,2	300	0,2	0,1	1,499	6,394	6,733	6,78	2,813	100	20,73	32,18	49
	0,4	78,2	300	0,2	0,12	1,877	7,551	9,692	9,692	3,682	120,1	22,71	36,65	46,2
ověření, zda je VBD poškozená	0,4	78	300	0,1	0,05	0,545	2,327	2,493	2,6	1,357	44,32	67,59	97,82	100
	0,4	78	300	0,1	0,08	0,503	3,564	4,308	4,601	1,5	35,29	57,9	91,8	100
	0,4	78	300	0,1	0,1	0,907	4,304	4,487	4,644	2,322	82,99	28,35	55,67	87,1
	0,4	78	300	0,1	0,12	1,399	6,448	7,028	7,334	3,491	120	25,03	49,4	62,1

Příloha 2 – Naměřené hodnoty po obrábění VBD č.2 Garant CNGA 120404F

Garant CNGA 120404F														
Řezné podmínky							Naměřené hodnoty							
Re [mm]	d [mm]	vc [m/min]	otáčky [ot/min]	ap [mm]	f [mm/ot]	Ra [μm]	Rz [μm]	Rmax [μm]	Rt [μm]	Rv [μm]	R Sm [μm]	R Mr (-1.00, 5.00) [%]	R Mr (-2.00, 5.00) [%]	R Mr (-3.00, 5.00) [%]
VBD č.2	0,4	77,8	400	1637	0,1	0,05	1,037	1,218	1,245	0,425	41,17	100	100	100
	0,4	77,8	400	1637	0,1	0,08	1,888	1,988	1,988	0,812	79,66	64,94	100	100
	0,4	77,8	400	1637	0,1	0,1	0,525	2,342	2,36	1,162	99,9	51,95	99,5	100
	0,4	77,8	400	1637	0,1	0,12	0,731	3,098	3,131	1,418	120,1	41,56	71,37	100
	0,4	77,6	300	1231	0,1	0,05	0,187	1,083	1,187	0,522	19,84	100	100	100
	0,4	77,6	300	1231	0,1	0,08	0,339	1,766	1,775	0,857	43,85	78,1	100	100
	0,4	77,6	300	1231	0,1	0,1	0,485	2,095	2,135	1,062	90,49	58,55	100	100
	0,4	77,6	300	1231	0,1	0,12	0,677	3,324	3,324	1,353	120	30,04	65,08	100
	0,4	77,3	300	1235	0,15	0,05	0,209	1,554	1,554	0,556	22,78	98,63	100	100
	0,4	77,3	300	1235	0,15	0,08	0,303	1,501	1,527	0,653	39,72	91,32	100	100
	0,4	77,3	300	1235	0,15	0,1	0,392	2,222	2,222	0,882	62,9	59,27	100	100
	0,4	77,3	300	1235	0,15	0,12	0,555	2,775	2,8	1,188	120	35	90,71	100
	0,4	76,9	300	1242	0,2	0,05	0,2	1,141	1,16	0,562	22,85	100	100	100
	0,4	76,9	300	1242	0,2	0,08	0,222	1,438	1,463	0,726	20,15	97,82	100	100
	0,4	76,9	300	1242	0,2	0,1	0,25	1,377	1,41	0,804	37,15	97,17	100	100
	0,4	76,9	300	1242	0,2	0,12	0,332	2,119	2,344	0,976	48,89	79,14	100	100
Nedoporučené řezné podmínky	0,4	76,7	300	1245	0,1	0,02	0,088	0,706	0,762	0,319	20,7	100	100	100
	0,4	76,7	300	1245	0,1	0,03	0,142	0,984	1,004	0,456	29,99	100	100	100
	0,4	76,7	300	1245	0,1	0,04	0,141	1,028	1,028	0,447	19,32	100	100	100
	0,4	76,7	300	1245	0,1	0,05	0,154	1,037	1,077	0,502	18,67	100	100	100

Příloha 3 – Naměřené hodnoty po obrábění VBD č.1 a č.2 Ceratizit CNGA 120404

Cerazit CNGA 120404															
Řezné podmínky										Naměřené hodnoty					
Re [mm]	d [mm]	vc [m/min]	otáčky [ot/min]	ap [mm]	f [mm/ot]	Ra [μm]	Rz [μm]	Rmax [μm]	Rt [μm]	Rv [μm]	R Sm [μm]	R.Mr (-1.00, 5.00) [%]	R.Mr (-2.00, 5.00) [%]	R.Mr (-3.00, 5.00) [%]	
VBD č.1	0,4	76,6	280	1164	0,05	0,254	1,291	1,364	1,416	0,568	39,615	97,93	100	100	
	0,4	76,6	280	1164	0,05	0,209	1,335	1,45	1,482	0,622	41,323	98,92	100	100	
	0,4	76,6	280	1164	0,05	0,261	1,351	1,502	1,502	0,537	47,793	94,64	100	100	
	0,4	76,6	280	1164	0,05	0,397	2,022	2,09	2,15	0,911	60,023	61,62	100	100	
	0,4	76,4	280	1167	0,1	0,173	1,081	1,232	1,255	0,577	25,705	99,97	100	100	
	0,4	76,4	280	1167	0,1	0,15	0,956	1,031	1,114	0,509	24,677	100	100	100	
	0,4	76,4	280	1167	0,1	0,36	1,853	1,948	1,977	0,751	100,03	51,15	100	100	
	0,4	76,4	280	1167	0,1	0,464	2,025	2,206	2,293	1,003	119,98	63,79	100	100	
VBD č.2	0,4	75,8	280	1176	0,15	0,134	0,88	1,081	1,099	0,404	27,654	100	100	100	
	0,4	75,8	280	1176	0,15	0,253	1,533	1,693	1,693	0,692	38,655	89,91	100	100	
	0,4	75,8	280	1176	0,15	0,323	1,659	1,89	1,995	0,783	50,152	82,5	100	100	
	0,4	75,8	280	1176	0,15	0,503	2,541	2,686	2,686	1,279	119,97	51,96	95,8	100	
	0,4	75,4	280	1182	0,2	0,262	1,233	1,326	1,327	0,654	35,411	97,15	100	100	
	0,4	75,4	280	1182	0,2	0,312	2,02	2,105	2,209	1,054	79,622	82,09	100	100	
	0,4	75,4	280	1182	0,2	0,215	1,358	1,48	1,615	0,697	104,93	97,03	100	100	
	0,4	75,4	280	1182	0,2	0,518	2,045	2,387	2,504	1,081	120,28	57,67	99,9	100	

Příloha 4 – Naměřené hodnoty po obrábění VBD č.1 Ceratizit CNGA 120408

Ceratizit CNGA 120408															
Řezné podmínky										Naměřené hodnoty					
Re [mm]	d [mm]	vc [m/min]	otáčky [ot/min]	ap [mm]	f [mm/ot]	Ra [μm]	Rz [μm]	Rmax [μm]	Rt [μm]	Rv [μm]	R Sm [μm]	R.Mr (-1.00, 5.00) [%]	R.Mr (-2.00, 5.00) [%]	R.Mr (-3.00, 5.00) [%]	
VBD č.1	0,8	75,2	280	1185	0,05	0,277	1,239	1,275	1,308	0,699	40,301	97,8	100	100	
	0,8	75,2	280	1185	0,05	0,374	1,679	1,758	1,8	0,875	76,833	74,7	100	100	
	0,8	75,2	280	1185	0,05	0,32	1,883	2,035	2,035	0,959	59,485	78,7	100	100	
	0,8	75,2	280	1185	0,05	0,486	2,704	2,876	2,876	1,404	109,71	44,5	89,8	100	
	0,8	75	280	1188	0,1	0,221	1,441	1,513	1,543	0,805	36,616	96,8	100	100	
	0,8	75	280	1188	0,1	0,258	1,658	1,773	1,803	0,939	69,555	92,6	100	100	
	0,8	75	280	1188	0,1	0,339	1,75	1,972	1,972	0,958	99,961	81,4	100	100	
	0,8	75	280	1188	0,1	0,361	1,921	2,087	2,124	0,805	119,96	54,5	100	100	
	0,8	74,7	280	1193	0,15	0,2	1,238	1,455	1,597	0,599	52,013	99,8	100	100	
	0,8	74,7	280	1193	0,15	0,241	1,382	1,577	1,583	0,643	49,294	98,2	100	100	
	0,8	74,7	280	1193	0,15	0,376	1,696	1,956	2,003	0,738	99,987	62,6	100	100	
	0,8	74,7	280	1193	0,15	0,509	2,249	2,375	2,454	0,991	120,02	49,4	100	100	
	0,8	74,3	280	1200	0,2	0,261	1,827	2,667	2,716	0,743	48,195	98,3	100	100	
	0,8	74,3	280	1200	0,2	0,294	1,736	1,776	1,899	0,842	68,719	80,6	100	100	
	0,8	74,3	280	1200	0,2	0,411	2,606	3,537	3,537	1,158	97,438	70,8	99,9	100	
	0,8	74,3	280	1200	0,2	0,519	2,737	2,919	2,919	1,514	119,61	62,7	93,1	100	