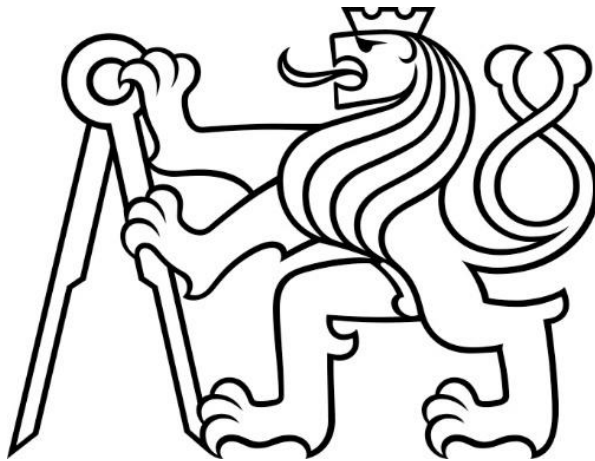


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A  
METROLOGIE



## Diplomová práce

Racionalizace výrobního postupu kalené součásti

Autor: Bc. Lukáš Flíček

Studijní program: (NVI) Výrobní inženýrství

Studijní obor: (N071TVIN) Bez specializace

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

Praha 2023

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Flíček** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **484721**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Výrobní inženýrství**  
Specializace: **Bez specializace**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Racionalizace výrobního postupu kalené součásti**

Název diplomové práce anglicky:

**Optimization of manufacturing process of hard component**

Pokyny pro vypracování:

1. Vytvrzené materiály - mechanické, fyzikální a technologické vlastnosti.
2. Možnosti obrábění kalených materiálů.
3. Nástrojové materiály.
4. Návrh technologického postupu.
5. CAM programování.
6. Ověření navrženého řešení.

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) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **31.03.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2023**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

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


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

  
doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

27.4.2023  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci na téma „Obrábění kalených ocelí“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Zdeňka Pitrmuce, Ph.D. a použil jsem pouze podklady, které jsou uvedené v seznamu citací.

V Praze dne:

.....

## Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat panu Ing. Zdeňku Pitrmucovi, Ph.D., za vedení mé diplomové práce a za cenné rady. Velký podíl na dokončení mé práce má také má rodina a přítelkyně Kateřina Krejčová, které bych chtěl tímto poděkovat a omluvit se jí za čas, který jsem ji nemohl věnovat ve významném období života.

## Anotace

Tato diplomová práce se zabývá problematikou obrábění kalených ocelí, a to především soustružení těchto materiálů. Práce je zaměřena na popis samotného soustružení, dále obrábění kalených ocelí a jeho využití. Ukazuje hlavní podmínky pro použití technologie tvrdého soustružení a také řezné materiály pro tuto technologii. Jsou zde popsány také možnosti a návrhy upínání obrobků typu náboj.

V další části práce je navržen postup výroby válcovacích nástrojů pro dosažení nejlepších možných geometrických tolerancí, zejména kolmosti a rovnoběžnosti čel a házení funkčního profilu. Jsou vybrány nástroje pro obrábění a také prostředí pro obrábění. Následuje výroba součásti s kontrolou.

## Klíčová slova

Obrábění, soustružení, kalené oceli, tvrdé soustružení, výrobní postup, válcovací nástroj

## Annotation

This thesis deals with the machining of hardened steels, especially the turning of these materials. The thesis focuses on the description of turning itself, as well as the machining of hardened steels and its applications. It shows the main conditions for the use of hard turning technology and also the cutting materials for this technology. It also describes the possibilities and designs for clamping hub type workpieces.

In the next part of the text, a procedure for the production of rolling tools is proposed to achieve the best possible geometric tolerances, in particular the perpendicularity and parallelism of the faces and the throw of the functional profile. The tools for machining as well as the machining environment are selected. This is followed by production of the part with inspection.

## Key words

Machining, turning, hardened steels, hard turning, production process, rolling tool

## Seznam použitých symbolů a zkratk

Označení	Popis	Jednotka
CNC	„Computer Numerical Control“ Číslicově řízené	[-]
CAM	„Computer Aided Machining“ Počítačová podpora obrábění	[-]
VBD	Vyměnitelná břitová destička	[-]
CVD	„Chemical Vapour Deposition“ Chemická depozice z plynné fáze	[-]
PVD	„Physical Vapour Deposition“ Nanášení odpařením z tuhé fáze	[-]
Ra	Střední aritmetická úchylka profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
Rz	Výška nerovnosti profilu z deseti bodů	[ $\mu\text{m}$ ]
Rmax	Maximální výška profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
Rt	Celková výška profilu drsnosti	[ $\mu\text{m}$ ]
Rv	Největší hloubka prohlubně profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
R Sm	Střední rozteč nerovnosti profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
SK	Slinutý karbid	[-]
KNB	Kubický nitrid bóru	[-]
ŘK	Řezná keramika	[-]
M <sub>s</sub>	Teplota martenzit start	[°C]
M <sub>f</sub>	Teplota martenzit finish	[°C]
HRC	Tvrdost dle Rockwella	[-]
HB	Tvrdost dle Brinella	[-]
VB <sub>k</sub>	Kritická šířka opotřebení hřbetu	[mm]
v <sub>c</sub>	Řezná rychlost	[m/min]
f	Posuv na otáčku	[mm/ot]
a <sub>p</sub>	Hloubka řezu	[mm]
CL	„Cutter location“ Dráhy virtuálního nástroje	[-]

## Obsah

1.	Úvod .....	10
2.	Soustružení .....	11
2.1.	Definice obrábění .....	11
2.2.	Soustružení .....	12
2.2.1.	Nástroje pro soustružení .....	12
2.2.2.	Upínání obrobků .....	16
2.2.3.	Kvalitativní parametry pro soustružení .....	20
3.	Kalené oceli .....	20
3.1.	Oceli .....	20
3.2.	Tepelné zpracování ocelí .....	21
3.2.1.	Kalení a popouštění .....	21
3.2.2.	Ocel 19 573 .....	23
4.	Obrábění kalených ocelí .....	26
4.1.	Popis technologie .....	26
4.2.	Tvrdé soustružení .....	27
4.3.	Výhody technologie .....	27
4.4.	Nevýhody technologie .....	28
4.5.	Obráběcí stroj .....	29
4.6.	Obráběcí nástroj .....	30
4.6.1.	Slinuté karbidy SK .....	31
4.6.2.	Řezná keramika ŘK.....	31
4.6.3.	Kubický nitrid bóru KNB.....	32
4.7.	Řezné prostředí.....	33
5.	Výrobci VBD z kubického nitridu bóru .....	33
5.1.	CERATIZIT .....	33



5.2.	DTS GmbH.....	34
5.3.	NTK CUTTING TOOLS Co., Ltd. ....	35
5.4.	KYOCERA UNIMERCO.....	35
6.	Návrh technologického postupu .....	37
6.1.	Analýza výrobní dokumentace .....	37
6.2.	Volba stroje.....	39
6.3.	Volba nástrojů.....	39
6.3.1.	Nástroje pro obrábění za měkka .....	39
6.3.2.	Nástroje pro obrábění kaleného materiálu .....	41
6.4.	Upnutí obrobku .....	42
6.5.	Výrobní postup .....	43
7.	CAM programování .....	47
7.1.	Volba nulových bodů .....	47
7.2.	Strojní programování.....	48
8.	Ověření navrženého řešení .....	53
8.1.	Nastavení stroje před obráběním.....	53
8.2.	Obrobení součásti.....	55
8.2.1.	Obrobení součásti před kalením.....	56
8.2.2.	Kalení součásti .....	58
8.2.3.	Obrobení součásti po kalení .....	59
8.3.	Rozměrová kontrola obrobku a kontrola dosažené drsnosti .....	63
9.	Závěr .....	66
	Citovaná literatura.....	68
	Seznam obrázků.....	71
	Seznam tabulek .....	73

## 1. Úvod

Tato diplomová práce se zabývá možností aplikace tvrdého soustružení na obrábění kalených nástrojových ocelí jakožto velmi efektivní alternativa ke konvenčnímu CNC broušení. Základním cílem práce je zjištění dosažitelných přesností a stavů povrchu při využití KNB nástrojů na CNC soustružnickém centru střední a vyšší střední třídy (Okuma Genos L200E-M). K racionalizaci výrobního postupu implementujícího tvrdé soustružení byla vybrána modelová součást – válcovací nástroj.

Důvodem racionalizace výroby válcovacího nástroje je její vnější kontura, která musí být broušena brusným kotoučem vyrobeným na míru. Nebo je další možností orovnění kotouče do požadovaného tvaru, což vyžaduje buď výrobu orovnávací diamantové kladky, což je v tomto případě neprodejné (cenový odhad takovéto kladky 70-100 tisíc Kč) nebo lze orovnění provést jednokrystalovým střeškovým orovnávačem. Tento způsob orovnění je použitelný jen pro CNC řízené brusky s režimem kontinuálního CNC řízení minimálně 2 os. Všechna tato řešení jsou drahá, a proto je výhodnější použít CNC řízený soustruh s nástroji vhodnými pro obrábění kalených materiálů.

Práce se skládá z rešeršní a praktické části. Rešeršní část práce zahrnuje definování technologie soustružení, nástroji a upínáním při soustružení. Je zde také popsána ocel použitá pro výrobu prototypu a její tepelné zpracování. Dalším bodem rešeršní části je tvrdé soustružení. Zde je zahrnut popis technologie, její zásady a také výhody a nevýhody v porovnání s broušením. V neposlední řadě jsou zde uvedeni dodavatelé nástrojů vhodných pro tvrdé soustružení.

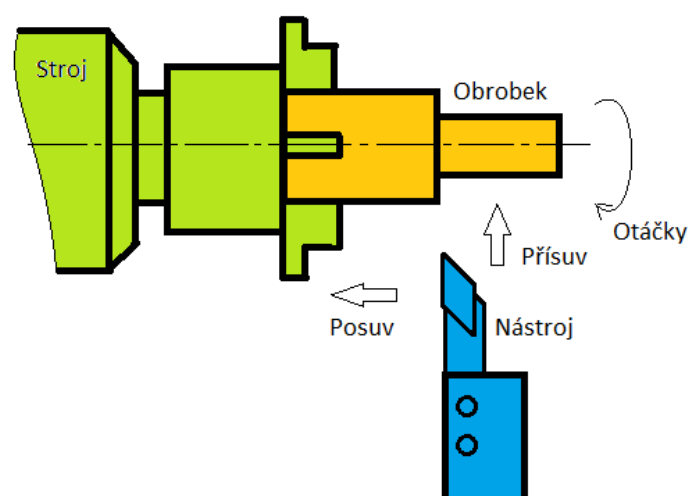
V praktické části je v první řadě návrh výrobního postupu zahrnující analýzu výrobní dokumentace, definici upnutí a také použité nástroje při obrábění. Dalším bodem praktické části bylo CAM programování. Pro toto programování byl zvolen nástroj od firmy Autodesk Fusion 360. Posledním krokem praktické části bylo obrobení součásti v měkkém žíhaném stavu, kalení součásti a následné obrobení kalené součásti s rozměrovou kontrolou.

## 2. Soustružení

### 2.1. Definice obrábění

Odebírání materiálu, tzv. „přídavku na obrábění“, je hlavní podstata obrábění. Děje se to za účelem dosažení geometrického tvaru s danou přesností, kvalitou obrobené plochy a s použitím obráběcího nástroje. Obrábění se dále dělí na hrubovací a dokončovací. Hrubovací metody se používají pro velké úběry materiálu, kde není zásadní přesnost a kvalita povrchu. Naproti tomu dokončovací metody se používají především pro dobrou přesnost a kvalitu povrchu. Další dělení je podle technologie odebírání materiálu. Dělí se na třískové, nekonvenční a speciální metody. U třískové technologie se používá mechanická práce. U nekonvenčních technologií se nedosahuje úběru pomocí mechanické práce, ale tyto technologie využívají fyzikální nebo fyzikálně-chemické principy úběru za vesměs bezsilového působení na obrobek. Do obrábění se zahrnují i speciální metody úběru materiálu, které vytvářejí konečný tvar součásti a kvalitu povrchu pomocí procesů tváření [1][2].

Obrábění probíhá v soustavě SNOP, kde „S“ zastupuje obráběcí stroj, „N“ zastupuje řezný nástroj, „O“ zastupuje obrobek a „P“ zastupuje přípravek (Obrázek 1). Obráběcí stroj přináší do soustavy mechanickou energii pro hlavní a vedlejší řezné pohyby. Řezný nástroj s danou geometrií břitu a řezivostí utváří třísku. Obrobek je hlavní objekt, který je obráběn a je charakteristický rozměry a tvarem obrobených a obráběných ploch. A přípravek, může a nemusí být součástí obráběcího procesu, se používá pro zvýšení jakosti nebo produktivity výroby [3].



Obrázek 1 - Schematické znázornění obráběcí soustavy SNO (zde bez P-přípravku)

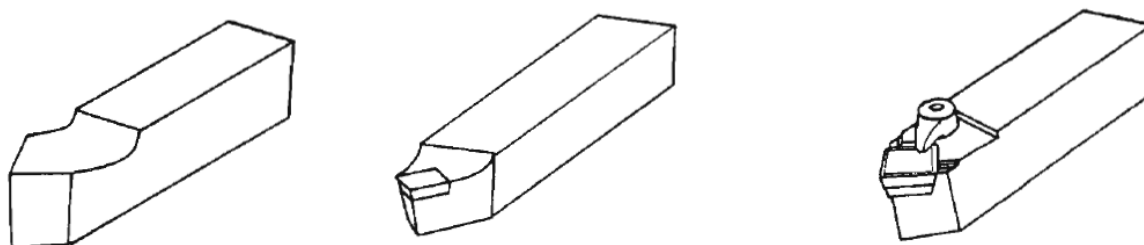
## 2.2. Soustružení

Soustružení se řadí mezi nejstarší a nepoužívanější metodu obrábění. Odhaduje se, že se používá přes 3 000 let. Hlavní podstatou soustružení je obrábění vnějších a vnitřních válcových ploch. Dále se dají obrábět kuželové plochy, rotační plochy s obecným tvarem, čelní rovinné plochy a také se dají řezat závity. Dále se na soustruzích dá vrtat, zahlubovat, vystružovat a někdy i frézovat [2].

Hlavní řezný pohyb koná obrobek svou rotací a nástroj vykonává posuvové pohyby podélným, příčným nebo obecným pohybem [2].

### 2.2.1. Nástroje pro soustružení

Nástroje pro soustružení (Obrázek 2) se dělí podle různých hledisek, jako je například druh materiálu břitu, konstrukce nástroje nebo geometrický tvar. Řezné materiály jsou například z rychlořezné oceli, které se většinou konstruují jako monolitní, dále nože s břitem ze slinutého karbidu, které se konstruují jako nože s pájenou destičkou nebo jako nože s výměnnou břitovou destičkou (dále VBD). Nože s VBD se používají i pro destičky z řezné keramiky, diamantu a kubického nitridu bóru, který se používá na obrábění kalených ocelí [2].



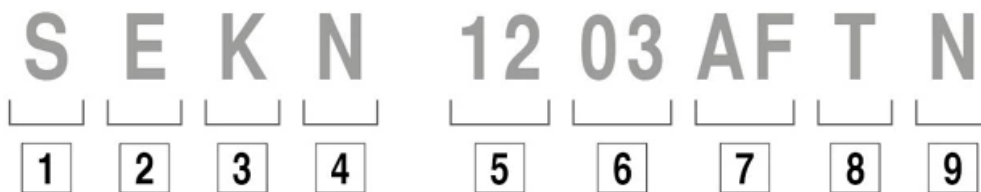
Obrázek 2 - Různé provedení soustružnických nožů [2]

Dále se dělí nástroje podle směru posuvového pohybu na pravé a levé. Podle způsobu obrábění dělíme nástroje na obrábění vnějších nebo vnitřních ploch a také dělíme nože podle tvaru těla na přímé a ohnuté [4].

V dnešní době se ve většině aplikací využívají nástroje s VBD. Při opotřebení břitu dojde k otočení destičky a může se dále obrábět. Nemusí být prováděno ostření a najíždění nástrojů, jako tomu bylo v dřívější době. Existuje obrovská škála tvarů, materiálů a mnoha dalších parametrů, které jsou dnes na trhu s VBD. Díky tomuto obrovskému portfoliu je nutno VBD třídit, a proto byla schválena mezinárodní norma ISO, která třídí VBD dle velikosti, tvaru,

upnutí, materiálových vlastností a také povlaků. Dle tohoto značení je možné volit konkrétní VBD na určitý druh obrábění [5].

Pro popis určité destičky se používá kód ISO, který může být až dvanáctimístný. Prvních sedm údajů je povinných a označují tvar destičky, úhel hřbetu a další parametry. Osmá a devátá místa jsou volitelná a označují tvar břitu (fazetka, zaoblení) a směr řezu. Poslední tři místa jsou také volitelná a slouží pro specifické značení od výrobce, jako je například utvařecí třísky (Obrázek 3) [5].



Obrázek 3 - ISO značení VBD [5]

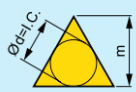
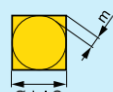
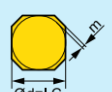
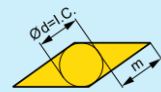

1. První místo označuje tvar destičky. Například čtvercové destičky nesou označení S a mají výhodu díky možnosti využití čtyř břitů. Dále hojně využívaná pro hrubování je kosočtverečná destička s označením C s vrcholovým úhlem 80°. Dá se s ní obrobit i roh v podobě přechodu mezi čelem a průměrem obrobku, ovšem její nevýhoda je použitelnost pouze dvou břitů. Kosočtverečné destičky se dále vyrábí s vrcholovými úhly 55° nebo 35°, ale ty jsou spíše použitelné pro dokončování díky jejich menší únosnosti břitu. Za zmínku stojí destička W, někdy zvaná trigon, která má stejné možnosti jako destička C, ale navíc má použitelné tři břity. Toto ovšem kompenzuje kratší řeznou hranou oproti destičce C (Obrázek 4) [6].

1			
Tvar destičky / Tvar doštičky			
H	O	P	R
S	T	C	D
E	M	V	W
L	A	B	K

Obrázek 4 - ISO tvary destiček [6]

2. Na druhém místě stojí úhel hřbetu destičky. Dělí se na pozitivní a negativní. Negativní má úhel hřbetu 0°. Pozitivní destičky mají úhel větší. Liší se poté už jen velikostí úhlu [6].
3. Třetí místo kódu popisuje toleranci destičky. Hlavní tolerované rozměry, které se u destičky řeší je průměr vepsané kružnice, rozměr  $m$  a tloušťka destičky. Většina destiček se pohybuje okolo tolerancí s označením G. Pro hrubování se používají destičky s tolerancemi s označením U a na dokončování destičky s tolerancemi F (Obrázek 5) [6].

3						
Tolerance / Tolerancia						
Označení / Označenie	Tolerance / Tolerancia [mm]			Tolerance / Tolerancia [Palce]		
	$m (\pm)$	$s (\pm)$	$d = I.C. (\pm)$	$m (\pm)$	$s (\pm)$	$d = I.C. (\pm)$
<b>A</b>	0,005	0,025	0,025	0,0002	0,001	0,0010
<b>F</b>	0,005	0,025	0,013	0,0002	0,001	0,0005
<b>C</b>	0,013	0,025	0,025	0,0005	0,001	0,0010
<b>H</b>	0,013	0,025	0,013	0,0005	0,001	0,0005
<b>E</b>	0,025	0,025	0,025	0,0010	0,001	0,0010
<b>G</b>	0,025	0,130	0,025	0,0010	0,005	0,0010
<b>J</b>	0,005	0,025	0,05 + 0,13	0,0002	0,001	0,002 + 0,005
<b>K</b>	0,013	0,025	0,05 + 0,13	0,0005	0,001	0,002 + 0,005
<b>L</b>	0,025	0,025	0,05 + 0,13	0,0010	0,001	0,002 + 0,005
<b>M</b>	0,08 + 0,18	0,130	0,05 + 0,13	0,003 + 0,007	0,005	0,002 + 0,005
<b>N</b>	0,08 + 0,18	0,025	0,05 + 0,13	0,003 + 0,007	0,001	0,002 + 0,005
<b>U</b>	0,05 + 0,38	0,130	0,08 + 0,25	0,005 + 0,015	0,005	0,003 + 0,010

Obrázek 5 - ISO tolerance rozměrů VBD [6]

4. Čtvrtým písmenem je popsáno provedení destičky. Destička, která nemá další úpravu se značí N, destička s utvařečem se značí R a například destička s utvařečem upínaná šroubkem se značí T [6].
5. Dalším číslem značení je délka řezné hrany. Dříve se destičky vyráběly v palcích, a tak to zůstalo dodnes. Například destička s 1/2" má délku řezné hrany 12,7 mm, ale značí se jako 12. Dále například destička s délkou řezné hrany 1" má délku 25,4 mm a značí se 25 [6].

6. U tloušťky je to samé jako u předešlého čísla. Destička s 1/8“ má tloušťku 3,18 mm a značí se 03. A navíc je zde značení VBD T3, kdy VBD je dlouhá v palcích 5/32“ a metrických jednotkách 3,97 mm (Obrázek 6) [6].

d=I.C.		R	S	T	C	D	V	W
mm	Palce							
3,97	5/32"			06				
5,00		05						
5,56	7/32"			09				03
6,00		06						
6,35	1/4"			11	06	07		04
8,00		08						
9,525	3/8"	09	09	16	09	11	16	06
10,0		10						
12,0		12						
12,7	1/2"	12	12	22	12	15		08
15,875	5/8"	15	15	27	16			
16,0		16						
19,05	3/4"	19	19	33	19			
20,0		20						
25,0		25						
25,4	1"	25	25		25			
31,75	1 1/4"	31						
32,0		32						
38,1	1 1/2"		38					

Obrázek 6 - ISO délka řezné hrany VBD [6]

7. Zaoblení špičky se používá například 1/64“ s označením 04 s poloměrem 0,4 mm. Kruhová destička se označuje 00 [6].
8. Nepovinné osmé místo uvádí provedení řezné hrany. Liší se například fazetkou, zaoblením a dalšími parametry [6].
9. Druhé nepovinné místo uvádí směr posuvu nástroje [6].

Při volbě VBD musíme hledět i na řezný materiál. Souhrnně lze říct, že materiál by měl být tvrdý a odolný proti deformacím, přičemž nesmí být křehký ale houževnatý a také musí být chemicky stabilní. VBD se vyrábějí ze slinutých karbidů, keramiky, kubického nitridu bóru a diamantu. Vlastnosti jednotlivých materiálů se doplňují a některý materiál bude vhodnější na určitou aplikaci a některý materiál nikoliv. Slinuté karbidy odolávají teplotám do 1000 °C, mají vysokou otěruvzdornost a pevnost v tlaku. Keramika odolává teplotám až 1200 °C, má vysokou tvrdost a je způsobila pro vyšší řezné rychlosti. Kubický nitrid bóru má odolnost až 2000 °C, má ještě vyšší otěruvzdornost a vysokou tvrdost. Diamant jakožto nejtvrděší materiál na Zemi má vynikající otěruvzdornost, ale díky afinitě k železu se jím nedají ocelové materiály obrábět [5].

Pro lepší vlastnosti řezných materiálů se v dnešní době většina VBD navíc povlakuje. Povlakem se rapidně zvyšuje otěruvzdornost a žáruvzdornost, hlavně díky nízké tepelné vodivosti, a tím malému přestupu tepla do substrátu. Nepovlakované VBD se dnes využívají typicky pro obrábění žáruvzdorných slitin, slitin titanu a soustružení kalených materiálů s nízkou řeznou rychlostí [5].

První skupinou povlaků jsou CVD povlaky. CVD povlaky vznikají chemickou depozicí z plynné fáze při teplotách 700-1050 °C. Aplikace těchto povlaků se využívají především na nástrojích pro soustružení, frézování a vrtání, kde povlak chrání materiál proti vymílání díky vysoké otěruvzdornosti [5].

Druhou skupinou jsou povlaky PVD, které vznikají fyzikální depozicí z plynné fáze při nižších teplotách než CVD. Nanesený povlak nezaobluje ostré rohy, a proto je vhodný pro obrábění adhezivních materiálů. Aplikace těchto povlaků jsou frézy, vrtáky, a nástroje pro upichování a závitování [5].

### 2.2.2. Upínání obrobků

Základem upínání je stabilní a bezpečný přenos sil působící na obrobek do vřetena obráběcího stroje. Nesmí dojít ke změně polohy obrobku nebo dokonce k jeho uvolnění. Velikost upínací síly spolu s řeznou silou a místy jejich působení jsou zásadní pro velikost deformací při obrábění, a tím ovlivňují i přesnost obráběcích operací [7].

Vysoké řezné rychlosti jsou základním rysem dnešní doby, což znamená i vysoké otáčky obráběného dílce. S tím souvisejí velké setrvačné a dynamické síly, které vznikají společně s přerušovaným řezem, dále pokud není díl osově symetrický nebo pokud se vřeteno rychle rozbíhá a zastavuje pro snížení vedlejších časů. Oproti frézování, kde je základní upínač pevný a nepůsobí na něj žádné velké setrvačné a dynamické síly, na upínání při soustružení jsou tyto nároky kladeny. Tyto síly musí být zachyceny třecími silami mezi upínačem a obrobkem [7].

Bezpečnost upnutí na soustruhu se nesmí podcenit. Výrobcem dané maximální otáčky nesmí být překročeny, protože by došlo k značnému snížení upínacích sil vlivem sil odstředivých. Musí se také dodržovat pravidelná údržba upínačů [7].



Obrobky při soustružení se upínají podle tvaru, velikosti, hmotnosti, průměru obrobku, podle druhu stroje a dalších parametrů. Dále je popsáno univerzální sklíčidlo, upnutí mezi hroty, opěra, kleština, upínací deska, soustružnické trny, ale existují i další způsoby [2].



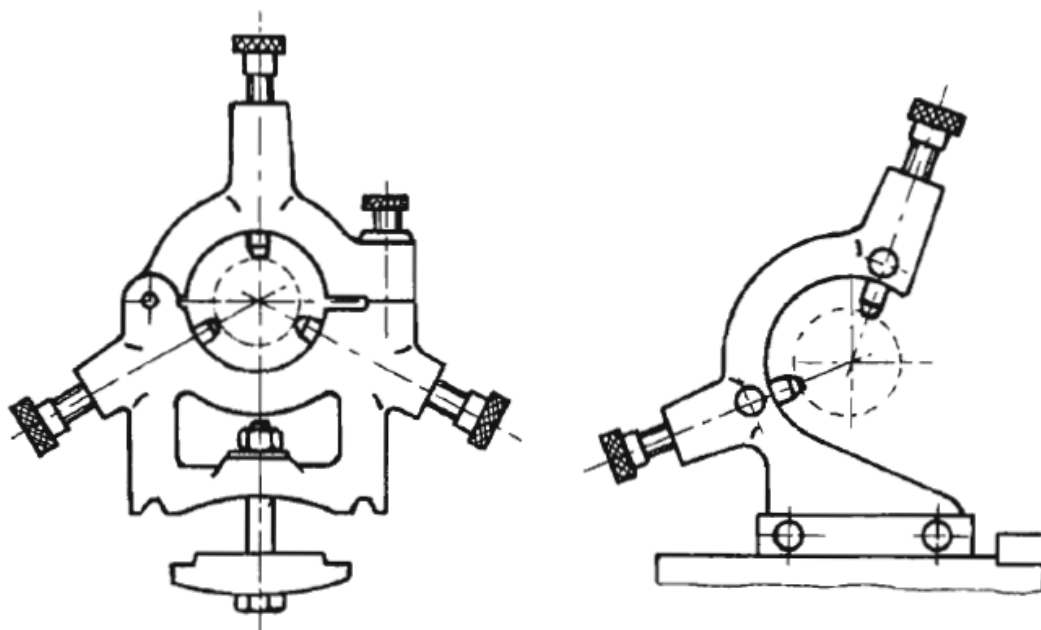
Obrázek 7 - Sklíčidlo TOS Svitavy IUS [27]

**Univerzální sklíčidlo** je nejpoužívanější druh upínání na soustruhu. Upnutí může být realizováno jak za vnější, tak i za vnitřní průměr obrobku. Podle počtu čelistí se rozeznávají tříčelistová, čtyřčelistová nebo dvoučelistová. Je nutné, aby obrobky byly dostatečně tuhé, aby nedocházelo k jejich deformaci při upnutí. Pokud dojde k moc velkému vyložení obrobku ze sklíčidla, musí se volný konec podepřít otočným hrotem. Používá se pro upínání, kdy je osa soustruhu totožná s osou obrobku. Výrobci udávají maximální otáčky, respektive závislost upínací síly na otáčkách, aby nedošlo ke snížení upínacích sil a nebyl obrobek uvolněn během obrábění. Nejčastěji je sklíčidlo realizováno spirálou, do které zapadají zuby čelistí a otáčením spirály dochází k utahování, respektive povolování čelistí. Výhodou tohoto provedení je nízká cena, velký upínací rozsah, snadná výměna čelistí nebo možnost upínání za vnitřní nebo vnější průměr. Na druhé straně nevýhody jsou nižší přesnost upnutí, kdy se radiální házení může pohybovat mezi 0,02 až 0,12 mm. Tuto nevýhodu lze potlačit užitím měkkých čelistí a protočením přímo na stroji. Další nevýhodou je místní opotřebení upínacích komponent při častém upínání stejného průměru. Nevýhody klasických sklíčidel vedly k vývoji dalších mnoha druhů sklíčidel jako jsou, sklíčidla s čelistmi ovládanými klínem nebo pákou, sklíčidla vysokootáčková, sklíčidla membránová, která díky své konstrukci mají opakovatelnost upnutí

až 0,005 mm, a další konstrukce. Na obrázku je zobrazeno typické ruční univerzální sklíčidlo od výrobce TOS Svitavy IUS (Obrázek 7) [2][7][8].

**Upínání mezi hroty** se realizuje mezi hroty vřetena a koníka především u obrobků delších rozměrů, u kterých je žádána maximální přesnost. Tato přesnost je dána totožností osy otáčení obrobku a osy upínacích hrotů, při řádném upnutí obrobku, kdy jsou hroty plně zatlačeny do obrobku a důlky nejsou nijak znečištěny a poškozeny. Před upnutím je zapotřebí zarovnat čela součásti na požadovanou délku a také vyvrtat středící otvory normalizovaných velikostí. Většinou bývá vrcholový úhel  $60^\circ$ , ale u mohutnějších obrobků se používá i  $90^\circ$  pro zvýšení tuhosti hrotu. Přenos kroutícího momentu je realizován buď užitím upínacího sklíčidla společně s hrotem či užitím separátního unášече jako je unášecí srdce. Upnuté srdce se na hřídeli při otáčení zarazí o kolík, který je upevněn na unášecí desce. Další možností pro přenos kroutícího momentu jsou středící kužele umožňující přenos kroutícího momentu pomocí čelních unášeců [2][7][8].

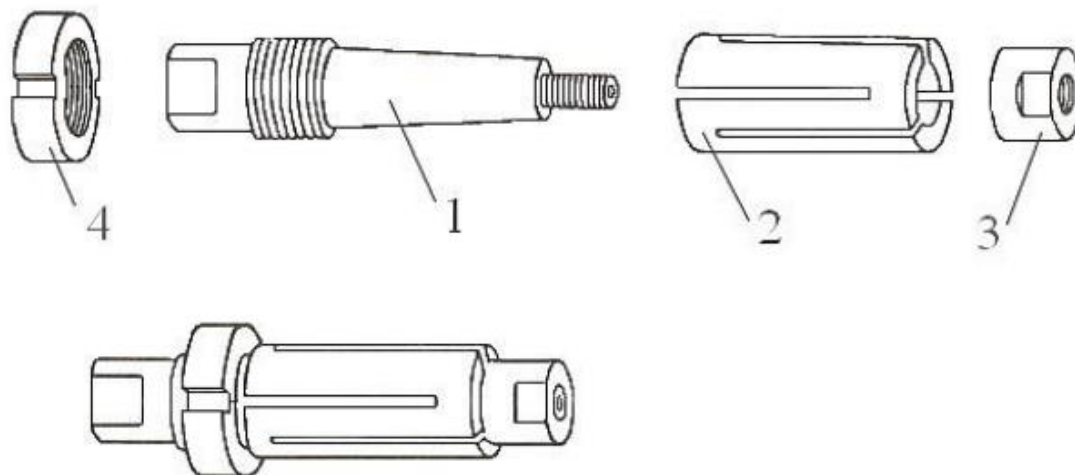
**Opěrami neboli lunetami** (Obrázek 8) se podpírají obrobky, které mají velký poměr délky k průměru a mohly by se prohýbat. Jsou buď připevněny přímo k loži soustruhu nebo k suportu naproti nožové hlavě a posunují se společně s nožem při podélném soustružení [2][8].



Obrázek 8 - Opěry a lunety pro podepření obrobku [2]

**Kleština** se používá pro upínání tyčového materiálu menších průřezů. Vnější průměr kleštiny je kuželový a kleština je po své délce rozříznuta. Při vtáhnutí kleštiny do kuželové díry dochází k sevření materiálu uvnitř kleštiny. Kleštiny se vyznačují menším poklesem upínací síly při vyšších otáčkách, a navíc jimi lze upínat i tenkostěnné dílce, díky rozložení sil do větší plochy. Mezi výhody patří malé radiální házení, které se pohybuje standardně okolo 0,03 mm, ale u provedení s vyšší přesností až okolo 0,015 mm. Nevýhodou naproti tomu je malý rozsah upínání, který se pohybuje v rozsahu desetin mm okolo jmenovitého rozměru. Snaha je o rychlou výměnu kleštin, aby se eliminovala tato nevýhoda, nebo použití pryžových kleštin, které mají mnohem větší rozsah [2][7].

**Upínací deska** je podobná upínacímu sklíčidlu, ale oproti sklíčidlu má deska nezávisle stavitelné čelisti, což ji umožňuje použít i na nepravidelné obrobky. Používá se především v malosériové výrobě pro upínání rozměrných obrobků. Jde o levný prostředek pro upínání vyznačující se nízkou produktivitou, díky ručnímu ustavení dílce [2][7].



Obrázek 9 - Systém rozpínacích trhů [6]

Další možností upínání jsou **soustružnické trny**. Princip upínání je podobný principu upínání kleštinou. Obrobek se nasadí na trn a ten se upne na soustruhu například mezi hroty. Rozlišujeme pevné a rozpínací trny (Obrázek 9). Na pevné trny se upínají obrobky s přesně obrobenou dírou. Dále se ještě dělí na válcové, kuželové, závitové a speciální. Na válcové trny se obrobky nasunou a vystředí díky válcovitosti dosedacích ploch. U kuželových trnů nemusí být tak přesná díra, obrobek se zde nasazuje na kužel a není tedy držen celou plochou a může dojít k vychýlení obrobku během soustružení. Další skupinou jsou rozpínací trny, které jsou podobně jako kleštiny rozřezány po své délce a po nasunutí na kužel dochází k jejich rozpínání,

a tím upínání obrobku. Rozsah upínání je oproti kleštině lepší a pohybuje mezi 1 až 2 mm podle průměru. Na obrázku je novodobé provedení takového upínacího prostředku od firmy KITAGAWA z řady KEM series (Obrázek 10) [7][9].



Obrázek 10 - Rozpínací trn od firmy KITAGAWA [28]

### 2.2.3. Kvalitativní parametry pro soustružení

Podle zvolených parametrů soustružení je možno dosahovat kvalitativní parametry uvedené v následující tabulce (Tabulka 1) [2]:

Tabulka 1 - Dosahované parametry při soustružení [1]

Soustružení	Přesnost IT	Drsnost Ra [ $\mu\text{m}$ ]
Hrubování	11 až 14	12,5 až 100
Obrábění na čisto	9 až 11	1,6 až 12,5
Obrábění jemné SK	7 až 8	0,4 až 1,6
Obrábění diamantem a KNB	5 až 6	0,2 až 0,8
Obrábění na přesných revolverových soustruzích a automatech	7 až 9	1,6 až 6,3

## 3. Kalené oceli

### 3.1. Oceli

Slitiny železa s uhlíkem dělíme podle metastabilní soustavy na oceli a litiny. Rozdíl těchto slitin je v obsahu uhlíku, kde oceli jsou slitiny železa s uhlíkem do 2,14 % C a litiny slitiny železa s uhlíkem nad 2,14 % C. Oceli lze dále dělit podle mnoha kritérií, například podle [10]:

- způsobu výroby na konvenční a práškové oceli

- míry dezoxidace na uklidněné, neuklidněné a polouklidněné oceli
- chemického složení na podeutektoidní, eutektoidní a nadeutektoidní oceli
- chemického složení na nelegované konstrukční, uhlíkové a legované oceli
- způsobu zpracování na oceli k tváření nebo odlévání
- použití na oceli konstrukční a nástrojové

A podle dalších kritérií.

### 3.2. Tepelné zpracování ocelí

Tepelné zpracování se v technické praxi dělí na 4 základní formy [10]:

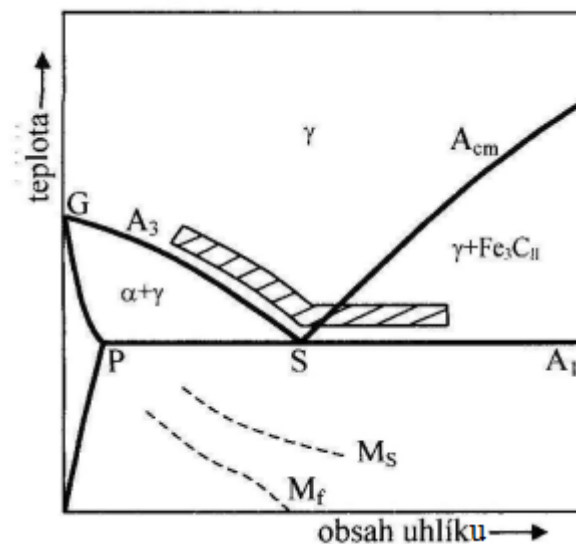
1. První forma zpracování spočívá v získávání rovnovážnější struktury, než je struktura výchozí. Takto nazýváme principy žíhání [2].
2. Další forma zpracování spočívá ve vytvoření většího stupně nerovnovážnosti struktury. V ocelích se jedná o kalení a popouštění a v hliníkových slitinách o vytvrzování [2].
3. Třetí formou zpracování je chemicko-tepelné zpracování, při kterém dochází nejen ke strukturním změnám, ale i ke změnám chemického složení povrchových vrstev [2].
4. Poslední formou zpracování je termomechanické zpracování, kde se požadovaných vlastností dosahuje kombinací intenzivního tváření a tepelného zpracování [2].

#### 3.2.1. Kalení a popouštění

Kalením se označuje proces, kdy dojde k zahřátí dílu těsně nad teplotu rekystalizace a následně dojde k prudkému ochlazení horní kritickou ochlazovací rychlostí. Ve struktuře se poté nachází martenzit nebo bainit s martenzitem a zbytkový austenit. Při obsahu alespoň 50 % martenzitu ve struktuře, můžeme považovat materiál za zakalený. Schopnost oceli dosáhnout vyšší tvrdosti se nazývá kalitelnost. Základní podmínka kalitelnosti je minimální obsah uhlíku 0,35 %. Prokalitelnost je schopnost materiálu být zakalen do určité hloubky vzorku a popisuje ji křivka prokalitelnosti, kde tvrdost v závislosti na hloubce ve vzorku klesá. Zásadní je skutečná rychlost ochlazování, která musí být vyšší než kritická rychlost ochlazování, aby vznikla martenzitická struktura. S vyšším obsahem uhlíku a legujících prvků se posouvá začátek rozpadu austenitu k delším časům a snižuje se tím kritická rychlost ochlazování, a tím roste i prokalitelnost. Naproti tomu stojí množství nežádoucího zbytkového austenitu. Protože

s větším obsahem uhlíku a legujících prvků klesá teplota  $M_s$  a  $M_f$ , a snížením  $M_f$  pod teplotu ochlazovacího média nedojde k dosažení teploty  $M_f$  a zvýší se množství zbytkového austenitu [10].

Zvolená kalící teplota závisí na chemickém složení materiálu a také na požadované velikosti zrna po kalení. U podeutektoidních ocelí se volí kalící teplota v rozmezí 30-50 °C nad teplotu  $A_{c3}$ , aby nedošlo ke hrubnutí zrna. U nadeutektoidních ocelí se volí teplota v rozmezí 30-50 °C nad teplotu  $A_{c1}$ , protože vyšší teplotou by se rozpustil i sekundární cementit ve struktuře a došlo by k nárůstu zbytkového austenitu. Podle obrázku také můžeme vidět, že teplota  $M_f$  klesá pod 0 °C při cca 0,7 % C, takže se zvyšuje při kalení obsah zbytkového austenitu (Obrázek 11) [10].



Obrázek 11 - Průběh teplot  $M_f$  a  $M_s$  podle obsahu uhlíku [10]

Používaná prostředí pro kalení jsou například: voda, vodní roztoky kyselin a zásad, oleje, solné roztoky a rozpuštěné kovy, vzduch a další. Ideální pro kalení by bylo prostředí, které intenzivně chladí v oblasti minimální stability podchlazeného austenitu a pomalu v oblasti martenzitické přeměny. Některá prostředí splňují například první podmínku a nesplňují druhou podmínku, proto může docházet například ke vzniku kalících trhlin. Musíme tedy volit i druh kalení a nejenom prostředí. Druhy kalení jsou přímé, lomené a termální [10].

Po kalení se výrazně zvyšuje mez pevnosti a tvrdost, ale naopak velmi klesá tažnost, kontrakce a lomová houževnatost. Díky těmto vlastnostem samotná kalená ocel je konstrukčně nepoužitelná, proto musí téměř vždy po kalení následovat popouštění.

Popouštění lze dělit na nízkoteplotní a vysokoteplotní. Nízkoteplotním popouštěním (do 300 °C) získáme velké snížení křehkosti oceli a zároveň si ocel dále zachovává svojí vysokou tvrdost, tento postup se používá například u ložiskových ocelí. Vysokoteplotním popouštěním (teploty nad 400 °C) získáme dobrou kombinaci pevnostních a tvárných vlastností. Kalení a vysokoteplotní popouštění se souhrnně nazývá zušlechťování [10].

Zušlechťováním získáme sorbitickou strukturu s výhodným poměrem pevnostních a tvárných vlastností, kde se dá tento poměr řídit pomocí volby vhodné teploty popouštění (vyšší teplotou získáme vyšší tvárné vlastnosti a naopak) [10].

### 3.2.2. Ocel 19 573

Praktická část diplomové práce je zaměřena na obrábění oceli 19 573 před kalením a po kalení. Ocel 19 573 je výkonná nástrojová ocel pro práci za studena. Jedná se o chrom-molybden-vanadovou, vysoce legovanou ledeburitickou ocel. Kalí se v oleji nebo na vzduchu a má velkou prokalitelnost [11].

Číselné značení této oceli je 1.2379. Má také další označení dle chemického složení, kde podle německé normy může nést označení X155CrVMo121, které odpovídá dle DIN 17 350. Další značení dle evropské normy je X153CrMoV12, a to odpovídá evropskému ČSN EN ISO 4957 [11].

#### Chemické složení (Tabulka 2) a vlastnosti oceli [11]

Tabulka 2 - Chemické složení obráběné oceli [11]

Označení	DLE	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	P	S
1.2379 X153CrMoV12	ČSN EN	1,45	0,10	0,20	11,00	0,70	0,70	max	max
	ISO 4957	1,60	0,60	0,60	13,00	1,00	1,00	0,03	0,035
1.2379 X155CrVMo121	DIN	1,50	0,10	0,15	11,00	0,60	0,90	max	max
	17 530	1,60	0,40	0,45	12,00	0,80	1,10	0,03	0,035
19 573	ČSN	1,40	0,20	0,20	11,00	0,60	0,80	max	max
	41 9573	1,65	0,45	0,45	12,50	0,95	1,20	0,03	0,035

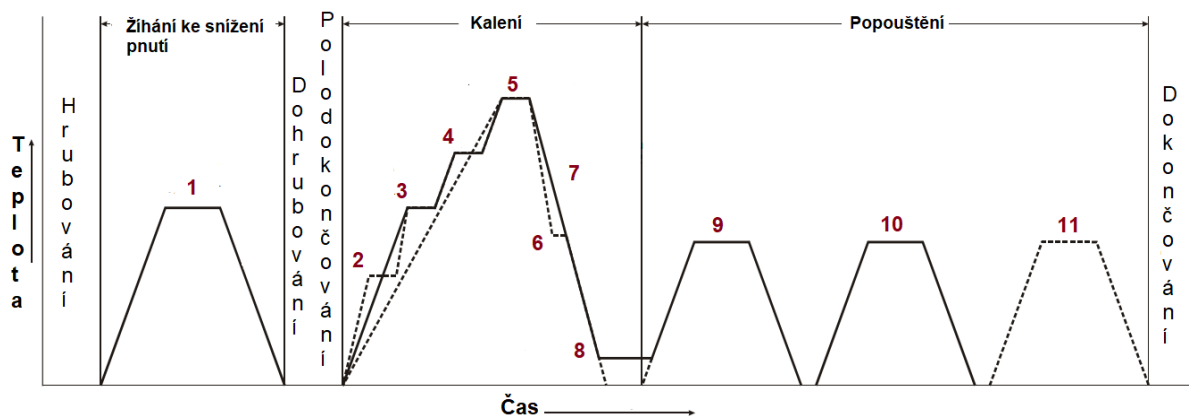
Ocel má vysokou odolnost proti otěru, dobrou houževnatost a prokalitelnost, rozměrovou stálost, vyšší korozní odolnost a je samokalitelná na vzduchu do tvrdosti 56 HRC. Je vhodná k nitridaci v lázni, plazmě a plynu. Je velmi vhodná pro kalení ve vakuu. Naproti

tomu má špatnou obrobiteľnosť díky chromu a uhlíku. Musí se obrábět nižšími řeznými podmínkami [11][12].

### Použití oceli

Tato ocel se používá pro střížné nástroje silnějších a tvrdších materiálů a také tenkých vrstev, nářadí pro lisovací techniku, pro válcování závitů, válcování za studena na víceliniových válcovacích tratích, pro průtlačné, tažné a hlubokotažné nástroje. Dále také pro lisování keramiky a ve farmacii. Materiál se také používá na nástroje pro opracování dřeva, na měřidla a pro formy na plast s vysokou odolností otěru. Další využití je jako řezný nástroj pro obrábění kovů o menší pevnosti a pro drcení a mletí [11][12].

### Tepelné zpracování (Obrázek 12 a Tabulka 3)



Obrázek 12 - Grafické zobrazení kalení obráběné oceli [18]

Aby se mohla ocel obrábět před kalením, musí se tepelně zpracovat, a to v podobě **žihání** na měkko a **žihání** na odstranění pnutí. Při žihání na měkko při 800-850 °C se mění lamelární perlit na globulární a zlepšuje se obrobiteľnosť oceli. Tvrdost dosahuje 250 HB. Žihání na odstranění vnitřních pnutí se provádí v peci při 650 °C a po něm následuje pomalé ochlazování pro zamezení vzniku vnitřního pnutí [11][12].



Tabulka 3 - Popis kroků tepelného zpracování [13]

Číslo	Název	Teplota	Doba trvání	Poznámka
1	Žihání	600-650 °C	-	Pomalé chlazení v peci
2	1.předeřtí	~ 400 °C	½ min/mm	-
3	2.předeřtí	~ 650 °C	½ min/mm	-
4	3.předeřtí	~ 850 °C	½ min/mm	-
5	Kalící teplota	1020-1040 °C nebo 1060-1080 °C podle druhu kalení	15-30 min	-
6	Chlazení v horké lázni	500-550 °C	-	-
7	Chlazení	-	-	Olej, vzduch, stlačený plyn (N <sub>2</sub> )
8	Vyrovnaní teplot	-	1 h/ 100 mm	-
9	1.popouštění	Podle požadované tvrdosti	1 h/ 20 mm	Alespoň 2 h
10	2.popouštění	Podle požadované tvrdosti	1 h/ 20 mm	Alespoň 2 h
11	3.popouštění	Podle požadované tvrdosti	1 h/ 20 mm	Alespoň 2 h

Tepelné zpracování, které je zásadní pro tuto ocel je **kalení**. U této oceli se kalení provádí nejdříve stupňovitým ohřevem na austenitizační teplotu 1020 až 1040 °C, kdy se prohřeje celý průřez v rozmezí 15-30 minut. Pro vyšší houževnatost nebo pokud se bude provádět nitridování nebo povlakování, je doporučeno zpracovávat materiál na sekundární tvrdost, kdy austenitizační teplota je 1060 až 1080 °C a poté následuje popouštění na sekundární tvrdost. Chladí se tlakem vzduchu, olejem či solnou lázní [12].

Ihned po kalení se realizuje **popouštění**. Ocel se ohřeje na popouštěcí teplotu a poté následuje výdrž 1 hodinu na 20 mm tloušťky materiálu, minimálně však 2 hodiny. Poté chlazení na vzduchu. Teplotu popouštění volíme podle požadované tvrdosti z popouštěcího diagramu. Při zpracování na sekundární tvrdost je realizováno popouštění minimálně 2x. Tepelným zpracováním lze získat tvrdost 61-63 HRC [11][12].

## 4. Obrábění kalených ocelí

### 4.1. Popis technologie

Obrábění kalených ocelí využívá také název tvrdé obrábění a je definováno jako obrábění součástí s tvrdostí nad 45 HRC, kdy se většinou pohybujeme okolo tvrdostí 58 až 68 HRC (Obrázek 13). Tvrdé obrábění se zabývá opracováváním kalených legovaných ocelí, nástrojových ocelí, cementovaných ocelí, superslitin, nitridovaných ocelí, tvrdě-chromovaných ocelí a ocelí zpracovaných práškovou metalurgií. Používá se většinou hlavně jako konečná úprava obrobků nebo polodokončovací proces obrábění pro dosažení vysoké přesnosti rozměrů a dobrých povrchových vlastností. K širšímu rozšíření této technologie došlo v 80. letech 20. století, kdy se používalo ve formě tvrdého soustružení. Od soustružení se tento proces rozšířil i do dalších technologií jako jsou frézování, vyvrtávání, protahování, odvalování a další. Díky vývoji strojů, řezných materiálů, nástrojových držáků a kompletního nastavení při tvrdém obrábění je dnes tvrdé obrábění dostupnější než dříve [14][15].



Obrázek 13 - Tvrdé soustružení [15]

Konvenčním postupem obrábění kalených součástí bylo broušení. Je zde ovšem mnoho výhod tvrdého soustružení oproti broušení. Tvrdé soustružení bylo použito v automobilovém průmyslu díky snadnější výrobě dílů převodovek. První využití byla náhrada broušení dosedacích ploch ozubených kol, kde se využily destičky z polykrystalického kubického nitridu bóru. Tvrdé obrábění se využívá u zmíněných ozubených kol, náprav, trnů, vačkových hřídelí,

kardanových kloubů, hnacích pastorků a spojovacích komponentů pro dopravní a energetické produkty a v mnoha dalších aplikacích všeobecného strojírenství [14].

#### 4.2. Tvrdé soustružení

Hlavní výhodou tvrdého soustružení je eliminace procesu broušení, nicméně v některých případech je tvrdé soustružení nedostačující a musí se použít broušení. Správně nastavený proces tvrdého soustružení může dosahovat parametrů drsnosti  $R_a = 0,4-0,8 \mu\text{m}$  a toleranci průměru  $\pm 3-7 \mu\text{m}$ . Tvrdé oceli patřící do skupiny ISO H se řadí mezi nejmenší skupinu obrábění a nejčastější je pro ni dokončování. Tvorbou třísky je velmi dobrá. Ovšem řezné síly a výkonové požadavky na stroj jsou vysoké. Měrná řezná síla při tvrdém soustružení se pohybuje mezi  $2550-4870 \text{ N/mm}^2$ . Pro porovnání při obrábění materiálů patřících do skupiny ISO P se měrná řezná síla pohybuje mezi  $1400-3100 \text{ N/mm}^2$ . Naproti tomu materiály patřící do skupiny ISO N (například hliníkové, hořčíkové a další slitiny) mají měrnou řeznou sílu v rozmezí  $350-700 \text{ N/mm}^2$ , což je skoro 10 % úbytek než u tvrdého obrábění. Nejčastější chybou při tvrdém soustružení je použití nesprávné VBD, díky její nižší ceně [14][16].

Inconel, Hastelloy, Stellite a další superslitiny jsou považovány také za materiály, které jsou tvrdě soustružené, ale toto tvrzení není správné. Při soustružení těchto materiálů se nejedná o tvrdé soustružení, protože materiály nemají tvrdost vyšší než 45 HRC a při obrábění se uplatňuje jiný mechanismus tvorby třísky a je potřebné i jiné vybavení. Nejlepší předvídatelnost procesu lze zajistit malou odchylkou tvrdosti, která by se neměla pohybovat o více než dva HRC body [14].

Se zvyšujícími se nároky na přesnost a povrchové charakteristiky se stává tuhost strojů větším a větším problémem. Nejlepší volbou pro proces tvrdého soustružení jsou speciální stroje nebo soustružnická centra určená přímo pro tvrdé obrábění [14].

#### 4.3. Výhody technologie

Jako hlavní rival této technologie působí broušení, proto jsou dále uvedeny především výhody tvrdého soustružení oproti broušení.

Pokud budeme uvažovat o tvrdém soustružení, tak mezi hlavní výhody této technologie v porovnání s broušením je podobnost tvrdého soustružení s konvenčním soustružením. Existují zde odlišnosti od konvenčního soustružení, ale základní principy jsou

stejně. Tím získává tato technologie výhodu, díky tomu, že obsluha stroje nemusí mít specifické znalosti a zkušenosti, které jsou potřebné u broušení [15].

Oproti broušení má tvrdé soustružení i další výhody. Další výhodou je typické upnutí a obrobení součásti na jedno upnutí, které není například u broušení proveditelné. Díky této skutečnosti dosahují tvrdě obrobené díly lepší soustřednosti a toleranci kolmosti [15].

Výhoda oproti broušení je i cena. První cenovou výhodou soustružení je cena obráběcího stroje nebo obráběcího centra, která je obecně nižší než cena brusky. Na jediném obráběcím centru je možno provádět i několik operací, které se například nedají provádět na jednom typu brusky. Mezi cenové výhody se dá počítat i možnost dokončování rádiusových a volně zakřivených ploch při tvrdém soustružení. Naproti tomu u broušení pro dokončení těchto ploch musí být upraven kotouč na zakázku, jehož výroba je časově náročná a drahá. Výměna VBD je u soustružení také kratší než u broušení výměna celého kotouče. Dále také automatizovatelnost procesu soustružení je snadnější než u procesu broušení. Také co se týče spotřeby je soustružení méně energeticky náročné než broušení. Ohledně chladicí kapaliny se tvrdé soustružení provádí často za sucha, čímž se sníží náklady o náklady na chladicí kapalinu (nákup, skladování, recyklace, likvidace). Z ekologického hlediska vznikají při soustružení snadno recyklovatelné třísky, naproti tomu při broušení vzniká kal, který musí být separován a likvidován jako průmyslový odpad [15].

#### 4.4. Nevýhody technologie

Nevýhody technologie většinou nikde uváděny nejsou, ale musí se s nimi počítat.

Cenová nevýhoda je náklad na jednotku nástroje, kdy ceny VBD pro tvrdé soustružení jsou značně vyšší [14].

Další nevýhoda je geometrie dílu. Vhodná geometrie dílu má mít malý poměr délky k průměru ( $L/D$ ). Obecně by poměr pro nepodporované obrobky neměl být vyšší než 4:1, protože by mohlo docházet k vibracím [14].

Přesnost soustružení je dána stupněm tuhosti systému. Tuhost systému ovšem není jen tuhost samotného obráběcího stroje, ale zahrnují se do toho i další prvky. Maximalizace tuhosti znamená také minimalizaci všech přesahů, prodloužení nástrojů a prodloužení dílů, obecně je cíl přiblížit vše co nejlíže k místu obrábění [14].

Otázka je také u použití chladicí kapaliny. Pokud by se například použilo chlazení u obrábění ozubených kol, došlo by nejspíše k destrukci nástroje díky obrovským teplotním šokům, proto se tyto kola většinou obrábí za sucha. Obrábění za sucha při plynulém řezu se může jevit jako výhodné, protože dochází k žíhání obráběného materiálu, a tím i snížení tvrdosti což usnadňuje proces obrábění. Problémy nastávají po obrobení s měřením a manipulací tepelně ovlivněné součásti [14].

#### 4.5. Obráběcí stroj

Hlavní úkol stroje je dodržovat předepsanou přesnost a povrchové charakteristiky. Některé soustruhy se na tvrdé soustružení nehodí. Stroje musí dosahovat vhodných řezných podmínek a musí udržovat tepelnou stabilitu, tuhost a přesnost v závislosti na čase [15].

Nepřítelem přesnosti je teplo. Nutností pro stabilní chod stroje je nejenom dobrý odvod generovaného tepla z místa řezu, ale také odvod tepla ze samotného stroje. Pro toto řešení byly vyvinuty speciální stroje se specifickými rámy. Jinou možností je chlazené vřeteno, které udržuje svou teplotu pro dobrou přesnost obrábění [15][17].

Další nepříjemností jsou vibrace, které souvisí s tuhostí stroje. Stroj musí zvládat absorbovat vysoké pracovní síly, které vznikají při tvrdém soustružení. Pro vyšší tuhost jsou některými výrobci používána rybinová vedení, která zajišťují vyšší tuhost a přesnost. Další optimalizací je vřeteno, které není poháněno řemeny, ale není to nutností. Důležitá je také délka vyložení nástroje a pevnost jeho upnutí [15][17].

Přesnost polohování je základem jakostního výrobku. Opakující se přesnost musí být samozřejmostí při tvrdém soustružení. Některé firmy toto řeší pomocí nezávisle se pohybujících os X a Z, kde pohyb v ose Z se provádí pohybem nástroje a pohyb v ose X se provádí pohybem vřetena. Samozřejmostí je i mazání kluzných vedení. Hledí se také na házení hlavního vřetena [15][17].

Jedna z firem, která se tvrdým obráběním zabývá je Hembrug Machine Tools. Tato firma produkuje velké portfolio strojů a některé jsou přímo určené na tvrdé obrábění. Další firmou působící v tomto odvětví je Hardinge GmbH, která nabízí například soustruh Super

precision T-42 (Obrázek 14). Tvrdý soustruh nabízí i japonská firma Miyano s označením GH-3200.



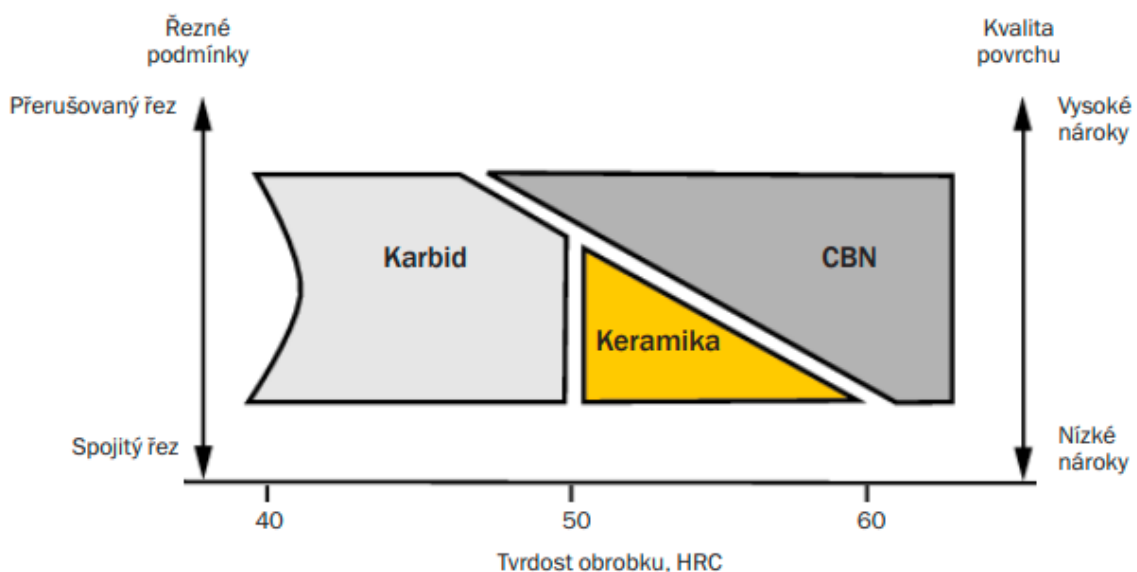
Obrázek 14 - Soustruh Hardinge Super-Precision T-42 [26]

#### 4.6. Obráběcí nástroj

Pro soustružení kalených ocelí se používají soustružnické nože s VBD. Nezbytnost pro obrábění je přesný a pevný držák, u kterého musíme dodržovat minimální délku vyložení pro minimalizaci vibrací, lepší kvalitu povrchu a také životnost nástroje. VBD určené na obrábění kalených ocelí jsou poměrně drahé, což se může zdát jako značná nevýhoda. Ale vysokou cenu VBD nahrazuje kompenzace ve formě zkrácení doby zpracování a doby výměny. Řezné materiály používané pro tvrdé soustružení jsou slinuté karbidy (SK), řezná keramika (ŘK) a polykrystalický kubický nitrid bóru (polykrystalický KNB) [15][18].

Pro jednodušší volbu řezného nástroje byly obráběné materiály rozděleny v souladu se standardy ISO do šesti hlavních skupin. Pro materiály kalené a velmi tvrdé je určena skupina ISO H. Dle normy jsou to materiály obtížně obrobitelné a při jejich obrábění vzniká velké množství tepla. Nástroj je velmi abrazivně namáhán (Obrázek 15). Materiál nástroje musí

dobře odolávat plastické deformaci při vysoké teplotě, musí být chemicky stabilní za vysoké teploty, pevný a odolný abrazi [16].



Obrázek 15 - Použitelnost nástrojových materiálů podle tvrdosti obrobku a druhu řezu [16]

#### 4.6.1. Slinuté karbidy SK

Slinuté karbidy se považují za konvenční materiály, kterými lze obrábět tvrdé materiály. Řezné rychlosti se zde pohybují od 15 do 50 m/min, hloubka řezu 0,05 až 0,3 mm a posuv 0,05 až 0,2 mm. Při zkouškách obrábění kalených materiálů na Žilinské univerzitě byla použita řezná rychlost 150 až 300 m/min, kdy se určovala trvanlivost břitu do velikosti kritického opotřebení  $VB_k = 0,2$  mm. Trvanlivost se snižovala se zvyšováním řezné rychlosti a klesala až čtyřnásobně. Obráběné materiály se pohybovaly s tvrdostí od 30 do 50 HRC. Při 50 HRC nastalo velké snížení trvanlivosti. SK je tedy vhodný na obrábění materiálů do 45 HRC [18].

#### 4.6.2. Řezná keramika ŘK

Řezná keramika pro tvrdé soustružení je podstatně levnější než KNB. Oproti KNB má také lepší houževnatost, takže se lépe hodí na materiály s tvrdostí 45-55 HRC. Ovšem není vhodná pro přerušované řezy, hrubování nebo polodokončování. Ideální řezné rychlosti se pohybují v rozsahu 150 až 200 m/min. Při zkoušení byly použity i vyšší řezné rychlosti (400 a 600 m/min), ale poté docházelo ke značnému opotřebovávání. Snížením tvrdosti o 5 HRC došlo ke 100 % zlepšení trvanlivosti [15][18].

#### 4.6.3. Kubický nitrid bóru KNB

Materiál KNB je hlavní materiál pro tvrdé soustružení a bude také použit v druhé části práce, ve které se bude tímto materiálem obrábět, proto je tento materiál lépe popsán. Použití těchto materiálů velmi vzrostlo a jsou dnes velmi populární. Destičky KNB nereagují na karbidy, ale reagují na kyslík od 1200 °C. Díky těmto vlastnostem dokáže obrábět materiály neobrobitelné diamantem. Pro soustružení se používá materiál KNB ve formě polykrystalického KNB. Tento materiál vzniká spojením materiálu KNB se specifickými pojivy. Slinování polykrystalického KNB probíhá za vysoké teploty a tlaku. Obsah KNB v polykrystalickém KNB se většinou pohybuje mezi 40 až 65 %. Ale existují i třídy, které obsahují 85 %. Použitá pojiva jsou kovová a keramická. Keramická pojiva dodávají materiálu odolnost proti opotřebení a kovová pojiva zvyšují houževnatost (Obrázek 16) [19][20].



Obrázek 16 - VBD z kubického nitridu bóru [16]

KNB je po diamantu druhým nejtvrdějším materiálem. Chemické vazby, mřížkové konstanty a struktury jsou velmi podobné diamantům a jsou považovány za velmi blízké. Podle odolnosti proti opotřebení je KNB 50x lepší než SK, 30x lepší než SK s povlakem a 20x lepší než keramické nástroje [19].

Při pokusech na Žilinské univerzitě byly použity různé řezné rychlosti. Hranicí použitelnosti materiálu byla rychlost 350 až 400 m/min. Oproti ostatním materiálům docházelo se zvyšováním tvrdosti i k nárůstu trvanlivosti. Například pro tvrdost 40 HRC byla trvanlivost 6 min a při tvrdosti 63 HRC byla trvanlivost až 84 min. Proto je materiál určen především na tvrdší materiály nad 50 HRC. Při suchém obrábění docházelo k nalepování třísek na povrch. Tento problém se vyřešil přívodem stlačeného vzduchu do procesu [18].



#### 4.7. Řezné prostředí

Při tvrdém soustružení je nejvíce vhodné obrábění za sucha, tedy bez použití řezné kapaliny. Materiály jsou na tyto podmínky přizpůsobené a přináší to také výhody díky nepotřebnosti řezné kapaliny. Některé aplikace ale řeznou kapalinu vyžadují, kvůli tepelné stabilizaci obrobku [21].

### 5. Výrobci VBD z kubického nitridu bóru

#### 5.1. CERATIZIT

CERATIZIT je společnost vzniklá sloučením firem CERAMETAL a Plansee Tizit. Stalo se tomu tak v roce 2002 a vznikla velká konkurenčně schopná společnost v nástrojovém průmyslu [22].

Ohledně nástrojů pro obrábění kalených materiálů, má ve své nabídce CERATIZIT VBD z kubického nitridu bóru s různými obsahy KNB podle použití, na jaký materiál má být materiál VBD použit a také podle druhu řezu, který se dělí na hladký, lehce přerušovaný, přerušovaný a silně přerušovaný (Tabulka 4) [22].

Společnost má také patentovaný systém pro oboustrannou aplikaci vrstev KNB na tvrdokovový základ, který snižuje cenu řezné hrany a zároveň umožňuje používání progresivních sort KNB [22].

Tabulka 4 - CERATIZIT - KNB nástrojové materiály [22]

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

V nabídce společnosti jsou VBD z kubického nitridu bóru různých tvarů. VBD jsou pozitivní i negativní. Nabízené negativní VBD jsou tvarů: S, T, W. Mezi pozitivními VBD jsou tvary: S, T, W a R [22].

### 5.2. DTS GmbH

Název společnosti DTS je zkratkou Diamond Tooling Systems. Jak název napovídá, společnost DTS se zabývá vývojem, výrobou a prodejem přesných nástrojů z ultratvrdých materiálů, jako jsou PCD (polykrystalický diamant), CVD-D (diamantový povlak CVD), UltraDiamond (bez pojiva) a KNB (kubický nitrid bóru) [23].

V katalogu, zabývajícího se KNB VBD, této společnosti lze nalézt tabulku, kde jsou uvedeny obráběné materiály dle normy ISO. Podle tohoto rozdělení firma přiřazuje nabízené obráběcí KNB materiály materiálům dle ISO. KNB zde tedy neslouží jen pro obrábění kalených materiálů, ale k obrábění celého portfolia dostupných materiálů. Například pro obrábění titanových slitin je doporučován materiál CBN-S a jako druhou alternativou materiál CBN-X (CBN je anglickým označením KNB) (Obrázek 17) [23].

ISO	Material	CBN-P	CBN-K	CBN-S	CBN-H	CBN-X
H	Pulvermetallurgische Stähle, gehärtet	✓				✓
	Sonderlegierungen (ASP,CPM,Hardox)			✓		✓
	Stahl, gehärtet bis 72 HRC	✓			✓	
	Werkzeugstahl, gehärtet bis 72 HRC	✓				✓
P	Sinterstahl	✓				✓
	Sinterstahl, gehärtet			✓	✓	
K	Grauguss (GG)		✓	✓		
	Sphäroguss (GGG)		✓	✓		
	Schalenhartguss	✓			✓	
S	Ni-, Co-, Fe- und Cr-Legierungen			✓		✓
	Titan Legierungen			✓		✓
M	Edelstahl, gehärtet				✓	✓
N	Hartmetall, > 20% Co * <small>*Für die Bearbeitung von Hartmetall empfehlen wir die Verwendung von CVD-D Schneiden.</small>					✓

Obrázek 17 - DTS - KNB nástrojové materiály [23]

Společnost má podobně jako CERATIZIT ve své nabídce pozitivní i negativní VBD. Navíc má tato společnost větší portfolio tvarů: S, T, W, C, D, E, O, R, V [23].

Pro obrábění kalených a tvrzených materiálů, kterým se tato práce věnuje, zahrnuje portfolio společnosti DTS materiály CBN-H a CBN-X. Materiály CBN-H se dále dělí na H25, H35, H45, H65 a H85 podle druhu řezu (hladký, lehce přerušovaný a silně přerušovaný). Materiály CBN-X se dělí na X90 a X95 opět podle druhu řezu [23].

### 5.3. NTK CUTTING TOOLS Co., Ltd.

Společnost NTK zahájila prodej v roce 1958. V tomto roce přišla s přelomovou technologií pro obrábění litinových brzdových kotoučů. Běžně používané karbidové nástroje nahradila keramickými, a tím zefektivnila výrobu. V dnešní době se stále zabývá reznými nástroji pro vysoce efektivní a přesné obrábění [24].

Pro obrábění kalených materiálů nabízí společnost NTK 4 různé materiály z nichž 2 jsou navíc povlakované (B5K, B6K) (Tabulka 5) [24].

Tabulka 5 - NTK - KNB nástrojové materiály [24]

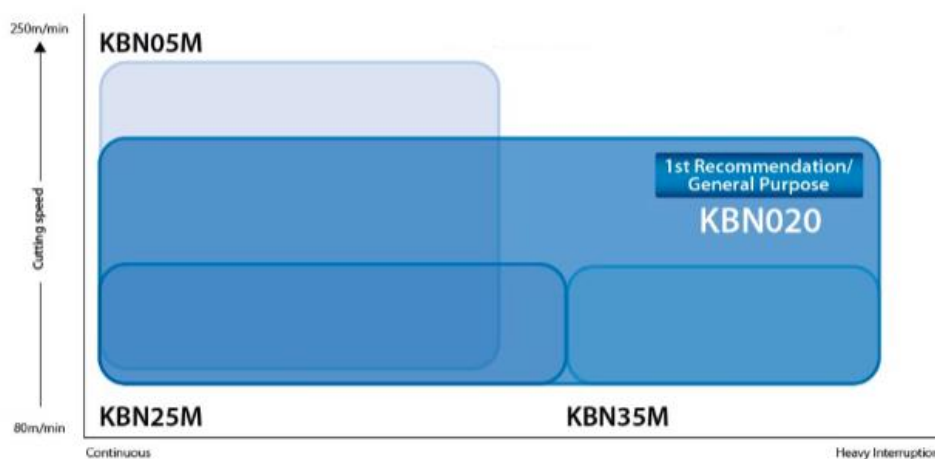
Označení rezného materiálu	Vlastnosti		Oblast použití
	Obsah KNB	Hlavní pojivo	
B5K	50 %	TiC	Kontinuální až lehce přerušované obrábění kalených materiálů
B6K	65 %	TiCN	Lehce přerušované až přerušované obrábění kalených ocelí
B40	65 %	TiN	Přerušované obrábění vysoce kalených materiálů
B52	50 %	TiC	Kontinuální obrábění vysoce kalených materiálů

B5K a B52 jsou materiály stejné, jediný rozdíl je mezi nimi v povlaku. Tyto dva materiály jsou vhodné na vyšší rezné rychlosti. Materiál B40 je vhodnější na nižší rezné rychlosti. Materiál B6K se rychlostmi pohybuje mezi těmito dvěma rozsahy. V nabídce jsou opět pozitivní a negativní VBD a tyto tvary VBD: C, D, S, T a V [24].

### 5.4. KYOCERA UNIMERCO

Tato společnost se stala v roce 2011 přidruženou společností Kyocera Corporation. Zabývá se především reznými nástroji, měřicími nástroji a upínacími prostředky [25].

Společnost má pro obrábění kalených materiálů 4 hlavní zástupce: KBN020, KBN25M, KBN35M a KBN05M. První uvedený je materiál pro obrábění kontinuálních i těžce přerušovaných řezů při použití nižších řezných rychlostí. Materiál KBN25M je materiál pro kontinuální řezy při nižších řezných rychlostech. Dalším materiálem KBN35M se obrábí těžce přerušované řezy při nižších řezných rychlostech. Materiálem KBN05M se dají obrábět spíše kontinuální řezy při nižších i vyšších řezných rychlostech. Graficky je to uvedeno na obrázku (Obrázek 18) [25].

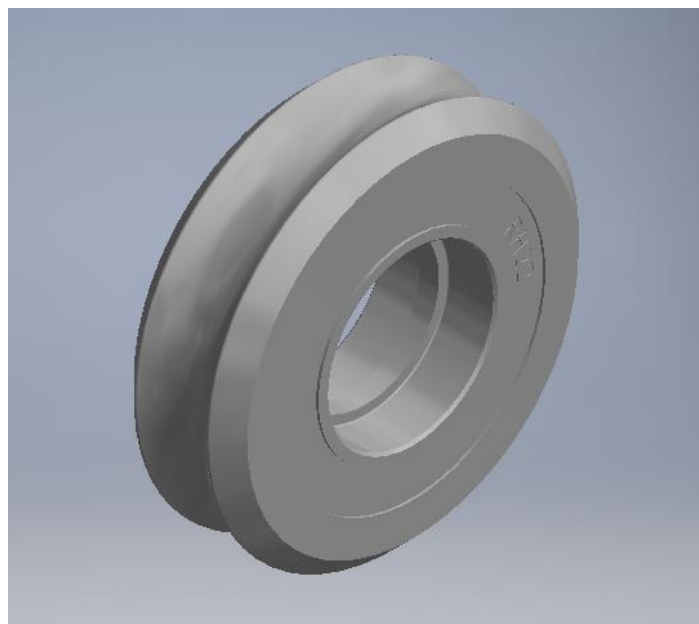


Obrázek 18 - KYOCERA - KNB nástrojové materiály [25]

Dále společnost nabízí ve svém sortimentu různé utvařeče třísek. Utvařeče typu HH jsou určeny pro obrábění kalených ocelí s tvrdostí vyšší než 55 HRC. Dalším typem HD se obrábějí kalené oceli s nižší tvrdostí než 55 HRC [25].

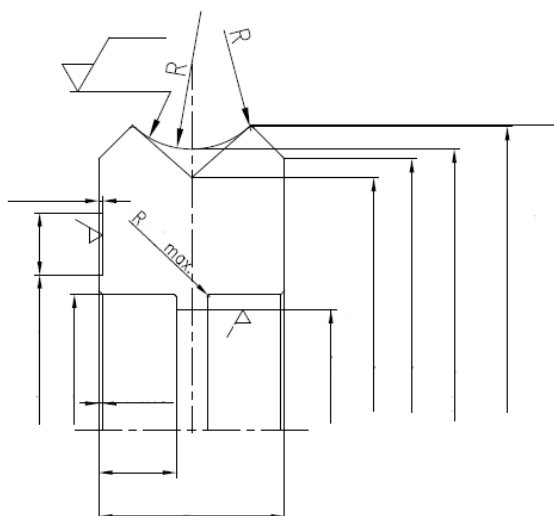
## 6. Návrh technologického postupu

### 6.1. Analýza výrobní dokumentace



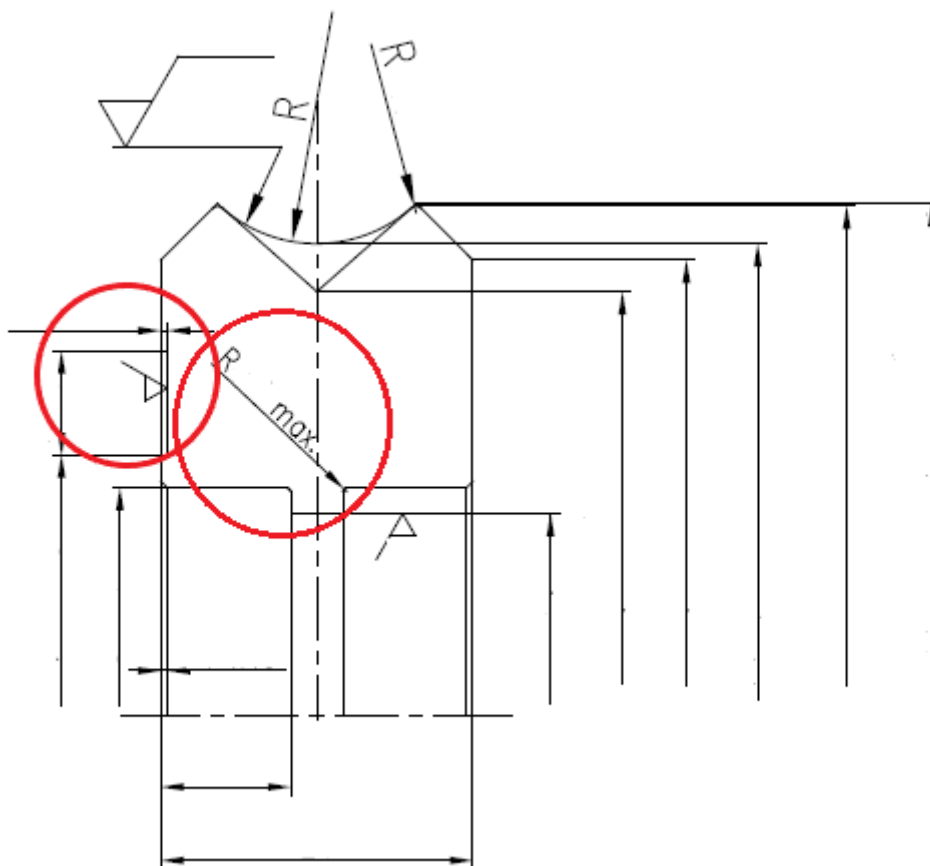
Obrázek 19 - Model válcovací rolly

Výkresová dokumentace nelze v rámci výrobního tajemství uveřejnit. Dále je uveden tedy pouze obrázek z výkresové dokumentace neobsahující příslušné kóty (Obrázek 20). Jedná se o válcovací nástroj (Obrázek 19). Ocel bude kalena a popuštěna na 60 +2 HRC. Při montáži válcovacího nástroje na válcovací trať, se rolly zarovnává podle čel. Proto je velmi žádoucí symetrie a tolerance tvaru a polohy vztaženou na tento profil. Do otvorů budou zalisována ložiska. Čelní zápich na jednom z čel slouží pouze pro popis rolly. Materiál rolly je nástrojová ocel 19 573.



Obrázek 20 - Výkresová dokumentace bez kót

Z důvodu nasazení technologie tvrdého soustružení muselo dojít i ke změnám ve výkresové dokumentaci. Hlavní důvod k tomuto kroku bylo vnitřní zaoblení v díře R max. Při tvrdém soustružení jsou typické nástroje z kubického nitridu bóru. Tyto nástroje jsou typické svojí cenou, která se pohybuje značně vysoko (podle výrobce 700-1400 Kč na břit). Nástroje jsou při obrábění velmi náchylné na změnu velikosti obráběné třísky. Proto při obrábění rolny v tvrdém stavu by s největší pravděpodobností došlo k destrukci velmi drahé VBD, což je nežádoucí. Tomuto jevu se předešlo vytvořením zápichu místo zaoblení na konci díry pro ložisko (Obrázek 21). Tímto krokem mohlo být obrábění provedeno bez větších problémů i v zakaleném stavu.



Obrázek 21 - Úprava výkresu pro danou technologii

Další úpravou, která byla na díle provedena, byla změna geometrie čelního zápichu. Původně byl čelní zápich s kolmými stěnami vůči čelu součásti. Po dohodě, pro jednodušší obrábění, byly tyto kolmé stěny změněny na sražení, které je obrobitelné axiálním osovým nožem a není potřeba pořizovat čelní zapichovací nůž, který by byl schopen kolmé stěny obrobit (Obrázek 21).

## 6.2. Volba stroje

Pro obrábění byl použit fakultní soustruh OKUMA Genos L200E-M (Obrázek 22). Tento soustruh disponuje třemi řízenými osami X, Y, Z a také možností poháněných nástrojů. Maximální obráběný průměr soustruhu je 450 mm a maximální obráběná délka je 380 mm. Maximální otáčky stroje jsou 5000 ot/min. Soustruh má 12 pozic v nástrojové hlavě s upínáním VDI. Toto upínání je použito pro upnutí vnějších nožů rozměrů 20x20 mm a pro upnutí vnitřních nožů o průměru 32 mm [29].



Obrázek 22 - OKUMA Genos L200E-M

## 6.3. Volba nástrojů

### 6.3.1. Nástroje pro obrábění za měkka

Volba nástrojů pro obrábění se týkala dvou různých stavů obráběných materiálů. Prvním materiálem byla nástrojová ocel žíhaná na měkko. Pro obrábění tohoto materiálu byl zvolen nejvhodnější materiál, a to slinutý karbid. Hlavním důvodem obrobení za měkka je odebrání velkého množství materiálu, které by bylo neefektivní obrábět v kaleném stavu. Při obrábění za měkka bylo cílem dosáhnout obrobení ploch, které nejsou zásadní pro použití rolny na čisto, a také k obrobení funkčních ploch s určitým přídavkem na dokončení v tvrdém

stavu. Tento přídavek byl na součásti zanechán, kvůli tvarové deformaci, která vzniká při kalení. Při obrábění funkčních ploch bylo také zásadní zrovnoměnění přídavku, který by mohl být problémový, kdyby rovnoměrný nebyl.

Maximálně byly využity nástroje dostupné na fakultě a byl tomu přizpůsoben i postup obrábění. Například při vrtání díry o průměru 40 mm by bylo určitě ekonomičtější použít destičkový vrták o průměru 35 mm, a ne destičkový vrták s průměrem 25 mm, kterým se nakonec obrábělo (Tabulka 6).

Tabulka 6 - Nástrojový list

<b>Nástrojový list</b>				
Číslo nástroje	Popis nástroje	Držák nástroje	VBD nástroje	Výrobce VBD
T1	Vrták $\varnothing$ 25 mm	803D-25-75-S32	XPET 0703AP:D8345	Pramet
T2	Vnější nůž (W-trigon)	MWLNR 2020K-06W	WNMG 06T304-GN	Iscar
T3	Vnitřní nůž (C)	A16Q-SCLCR 09	CCMT 09T304N-LU	Sumitomo
T4	Vnitřní nůž (D)	A20Q - SVUNR-12	VCMT 160404E-FM	Sumitomo
T5	Vnější nůž (D)	PDJNR 2020K-15	DNMG 150604E-SM	Pramet
T6	Vnější nůž (V)	SVJCR-2020K-16	VCMT 160404E-FM	Pramet
T7	Axiální vnější nůž (V)	SDNCN 2020 K 11-M-A	DCMT 11T304E-UR	Pramet
T8	Vnější osový nůž (V)	SVVBN 2020 K 11	VCMT 160408E-UR	Pramet



Ukázka VBD u nástroje T5, který se používá pro dohrubování vnější kontury (Obrázek 23).



Obrázek 23 - VBD pro dohrubování vnější kontury

### 6.3.2. Nástroje pro obrábění kaleného materiálu

Jak už bylo zmíněno v teoretické části, pro obrábění kalených materiálů jsou nejvhodnější nástroje z kubického nitridu bóru. Kalené materiály patří do skupiny ISO H a vyznačují se obtížnou obrobiteľností a také vznikem velkého množství tepla.

Na základě rešeršní části práce byly pro obrobení použity nástroje z kubického nitridu bóru. Díky jejich velké ceně byl kladen maximální důraz na úspěšné obrobení součásti vhodnými podmínkami (Tabulka 7).

Tabulka 7 - Nástrojový list pro tvrdé soustružení

Nástrojový list				
Číslo nástroje	Popis nástroje	Držák nástroje	VBD nástroje	Výrobce VBD
T9	Vnější nůž (C)	SCLCR 2020 K 12 M-A	CNGA 120408TN-009C_L3	Ceratizit
T10	Vnitřní nůž (C)	A20Q-SCLCR 09	CCGW 09T304E-B	Pramet
T11	Třídotekový mikrometr Mahr			
T12	Vnější osový nůž (V)	SVJCR 2020 K 16	VBGW 160408S01020B	Pramet

Ukázka VBD u nástroje T10, který se používá pro dokončení díry (Obrázek 24).



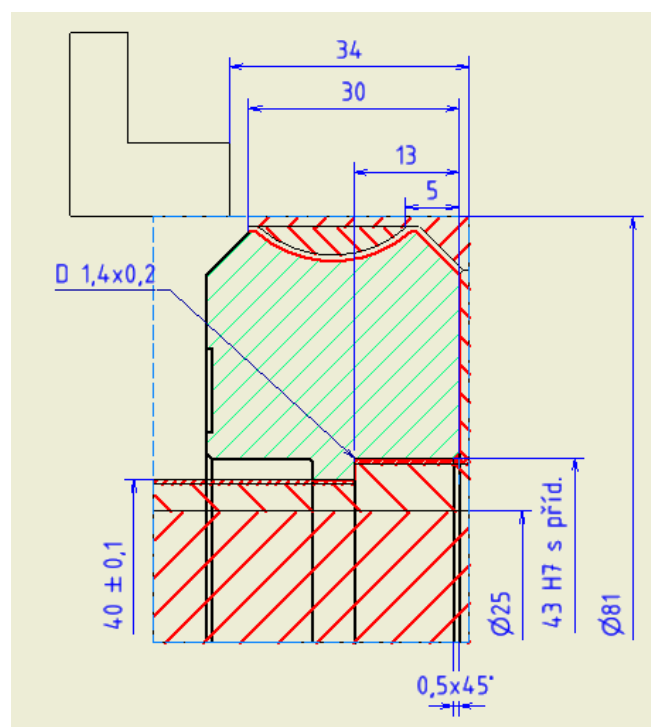
Obrázek 24 - VBD pro dokončení díry

#### 6.4. Upnutí obrobku

V první operaci byly použity tvrdé čelisti pro upnutí za velký průměr výchozího polotovaru.

Pro další obrábění bylo potřebné upínání za vnitřní průměr. Z tohoto pohledu byly vybrány dva možné upínací systémy. První možností byly měkké čelisti do sklíčidla. Tyto čelisti by museli být dále obrobeny pro použití. Druhou možností by mohlo být nasazení rozpínacích trnů. Pro tento způsob upínání byl vytipován rozpínací trn od firmy KITAGAWA z řady KEM series. Jedná se ovšem o poměrně drahé řešení, kdy samotný trn je investice okolo 100 tisíc Kč a každá další vložka okolo 8 tisíc Kč. I přes tuto investici, ale přetrvává obava z nízké tuhosti pro tvrdé soustružení. Nakonec proto byly pro upnutí použity měkké čelisti, které byly upraveny dle dále uvedeného výrobního postupu. Hlavním důvodem použití měkkých čelistí byla přesnost.

### 6.5. Výrobní postup



Obrázek 25 - Operace 10

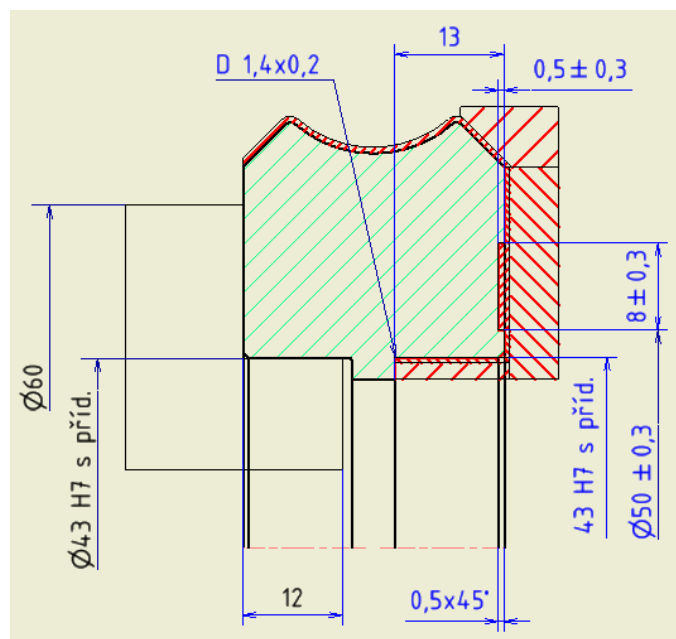
Pro výrobu rolny byl vypracován výrobní postup pro obrobení součásti v měkkém a poté v tvrdém zakaleném stavu. Polotovaru byl zvolen s ohledem na velikost série a minimální nevyužitý materiál. Byla použita kruhová tyč o průměru 81 mm dané jakosti. Materiál byl dělen pomocí pásové pily na délku polotovaru 47 mm. Větší přídavek byl použit pro upnutí do čelistí tak, aby došlo k obrobení největší míry materiálu z první strany. Pro upnutí byly použity tvrdé zakusovací čelisti určené pro upínání za vnější průměr.

V první operaci došlo k upevnění polotovaru do tvrdých čelistí na doraz. Vyložení bylo zvoleno 34 mm, aby došlo k co největšímu úběru materiálu z první strany. Počátek souřadnicového systému byl zvolen jako čelo neobrobeného polotovaru. Na nulový bod bylo najeto pomocí spárových měrek. První činností bylo vrtání polotovaru pomocí dostupného destičkového vrtáku s průměrem 25 mm. Následně došlo k hrubování kontury modelu, čela a díry. Byl obroben zápich v díře a také sražení mezi čelem a dírou. Dohrubována byla i kontura nástrojem s menším vrcholovým úhlem. Následně bylo obrobena čelo a díra s přídávkem 0,2 mm pro dokončení v tvrdém stavu. Obrobená součást byla vyjmuta (Obrázek 25, Tabulka 8).

Tabulka 8 - Popis postupu operace 10

Popis činnosti (Operace 10)	Nástroj	vc [m/min]	f [mm/ot]	ap [mm]
Upnout za $\varnothing$ 81 do tvrdých čelistí s vyložení 34 mm	-	-	-	-
Vrtat průchozí díru $\varnothing$ 25	T1	70	0,1	-
Hrubovat vnější konturu a čelo s přídávkem 0,5 mm	T2	120	0,12	1
Hrubovat díru s přídávkem 0,5 mm	T3	120	0,1	1
Soustružit sražení 0,5x45° a díru $\varnothing$ 40 na čisto	T3	120	0,1	1
Soustružit zápich D 1,4 x 0,2; čelo v díře na čisto ve vzdálenosti 10 mm	T4	150	0,1	0,5
Soustružit díru $\varnothing$ 43 H7 s přídávkem 0,2 mm	T3	120	0,1	0,3
Dohrubovat vnější konturu s přídávkem 0,5 mm od vzdálenosti 5 mm do vzdálenosti 30 mm	T5	130	0,12	0,8
Soustružit čelo s přídávkem 0,2 mm	T6	150	0,1	0,3
Vyjmout obrobenou součást	-	-	-	-

V následující operaci byly upraveny měkké čelisti dle obrázku. Po upnutí došlo ke kontrole házení na čele součásti u čelistí. Počátek souřadného systému byl zvolen na čele čelistí. Po kontrole házení začalo obrábění hrubováním kontury modelu, pokračovalo se hrubováním čela a díry. Po hrubování následovalo dokončení zápichu v díře, dokončení sražení a také došlo k obrobení čelního zápichu na čisto. Dalším krokem bylo obrobení díry, čela a celé kontury s přídkem 0,2 mm pro obrobení v tvrdém stavu. Poté byla součást vyjmuta (Obrázek 26, Tabulka 9).

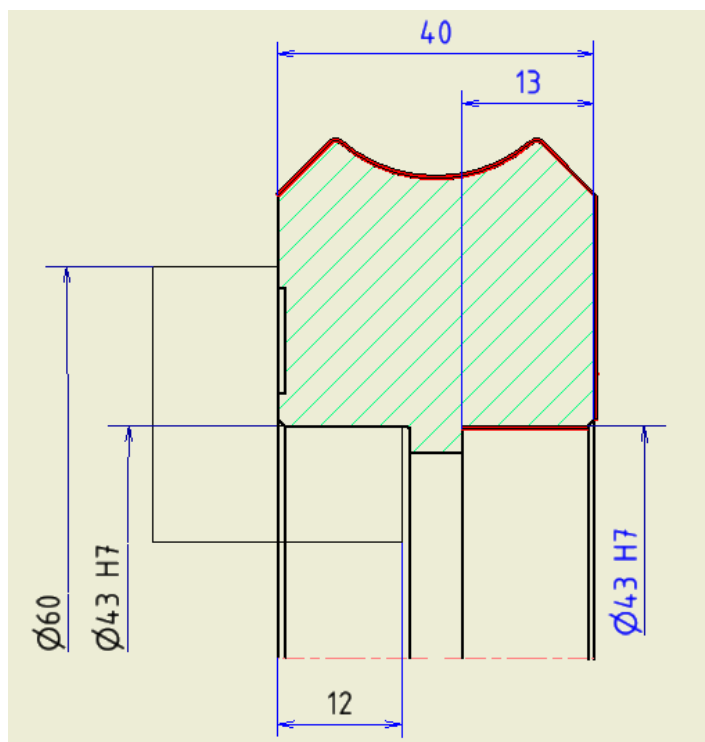


Obrázek 26 - Operace 20

Tabulka 9 – Popis postup operace 20

Popis činnosti (Operace 20)	Nástroj	vc [m/min]	f [mm/ot]	ap [mm]
Dorazit součást na čelisti a upnout do měkkých čelistí	-	-	-	-
Hrubovat vnější konturu a čelo s přídkem 0,5 mm	T2	120	0,12	1
Hrubovat díru s přídkem 0,5 mm	T3	120	0,1	1
Soustružit sražení 0,5x45° na čisto	T3	120	0,1	1
Soustružit zápich D 1,4x0,2; čelo v díře na čisto ve vzdálenosti 13 mm	T4	150	0,1	0,5
Soustružit díru Ø 43 H7 s přídkem 0,2 mm	T3	120	0,1	0,3
Soustružit zápich na Ø 50 do hloubky 0,5 mm na čisto	T7	130	0,07	0,3
Soustružit čelo s přídkem 0,2 mm	T6	150	0,1	0,3
Soustružit vnější konturu a čelo s přídkem 0,2 mm	T8	140	0,08	0,3
Vyjmout obrobenou součást	-	-	-	-

Příští operací bylo kalení. Jednalo se o vakuové kalení, které se liší od běžných metod použitím vakua, díky čemuž nemá k součásti přístup vzduch, který v interakci s kovem vytváří nežádoucí okuje na povrchu.



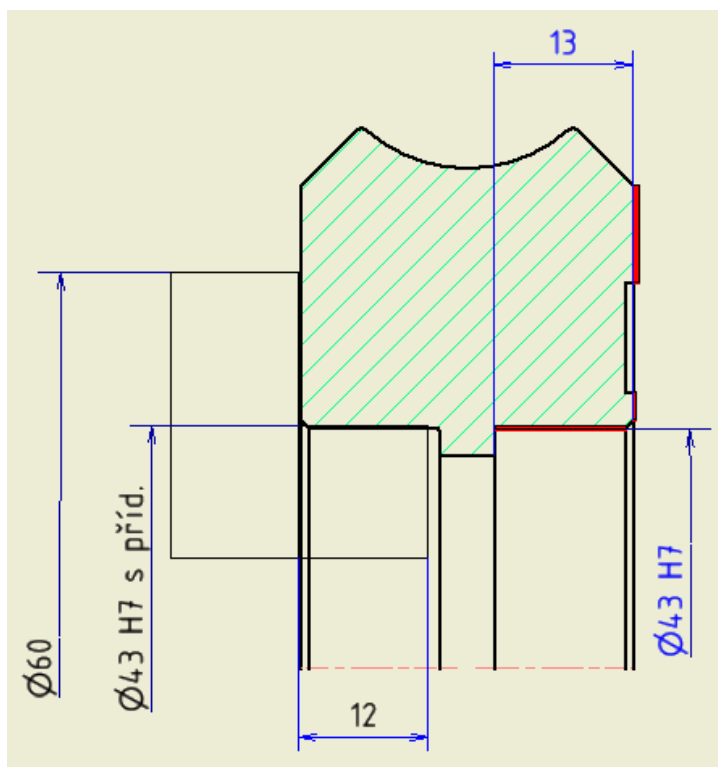
Obrázek 27 - Operace 40

Po kalení následovalo tvrdé soustružení. V této operaci byla součást opět upnuta do měkkých čelistí za vnitřní průměr. Došlo ke kontrole házení. Na čisto byla obrobena díra a také čelo součásti. Mezioperační kontrolou byl změřen průměr díry a došlo k případné změně korekce při neodpovídajícím rozměru. Poté byla součást vyjmuta (Obrázek 27, Tabulka 10).

Tabulka 10 - Popis postupu operace 40

Popis činnosti (Operace 40)	Nástroj	vc [m/min]	f [mm/ot]	ap [mm]
Dorazit součást na čelisti a upnout do měkkých čelistí za díru	-	-	-	-
Soustružit čelo na čisto	T9	250	0,06	0,1
Soustružit díru $\varnothing 43$ H7 na čisto do vzdálenosti 13 mm	T10	120	0,05	0,1
Soustružit vnější konturu na čisto do vzdálenosti 40 mm	T12	110	0,05	0,1
Mezioperační kontrola průměru $\varnothing 43$ H7 s případnou úpravou korekce nástroje	T11	-	-	-
Vyjmout obrobenu součást	-	-	-	-

V poslední operaci byla součást upnuta za dokončenou díru a došlo ke kontrole házení. Následně došlo k obrobení čela, vnější kontury a díry na čisto. Poté pokračovala mezioperační kontrola průměru díry s případnou úpravou korekce nástroje. Následně byl obrobek vyjmut (Obrázek 28, Tabulka 11).



Obrázek 28 - Operace 50

Tabulka 11 - Popis postupu operace 50

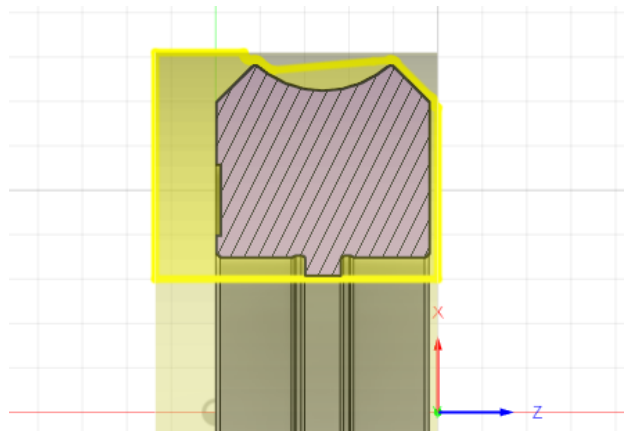
Popis činnosti (Operace 50)	Nástroj	vc [m/min]	f [mm/ot]	ap [mm]
Dorazit součást na čelisti a upnout do měkkých čelistí za díru	-	-	-	-
Soustružit čelo na čisto	T9	250	0,06	0,1
Soustružit díru Ø 43 H7 na čisto do vzdálenosti 13 mm	T10	120	0,05	0,1
Mezioperační kontrola průměru Ø 43 H7 s případnou úpravou korekce nástroje	T11	-	-	-
Vyjmout obrobenou součást	-	-	-	-

## 7. CAM programování

### 7.1. Volba nulových bodů

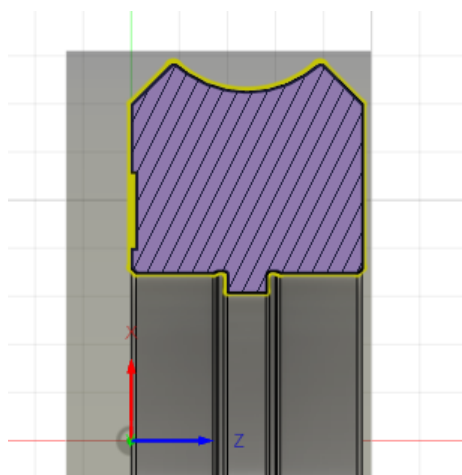
Pozici nulového bodu obrobku programuje programátor. U soustružení se většinou jedná o bod na součásti, který je v ose a jsou od něj zobrazeny výkresové kóty. Pro první operaci byl počáteční bod obrobku zvolen na čele polotovaru, protože při opakované výrobě by se polotovár mohl velikostně lišit po nařezání na pile od našeho zvoleného a mohlo by dojít

k nežádoucí kolizi. Na obrázku níže je zobrazen nulový bod, který byl použit u první operace (Obrázek 29).



Obrázek 29 - Zobrazení nulového bodu u prvního upnutí

Při dalších operacích byly použity měkké čelisti s přesně definovanou plochou dorazu. Zde bylo proto výhodné zvolit nulový bod na dorazu měkkých čelistí (Obrázek 30). Tento postup je výhodnější z hlediska produktivity, jelikož nemusíme zaměřovat nulový bod u každého polotovaru jako tomu bylo v předešlé operaci. Pokud se na čele nacházel ještě přídavek na dokončení v kaleném stavu, došlo k případné korekci vzdálenosti nulového bodu (Operace 20 a 40).



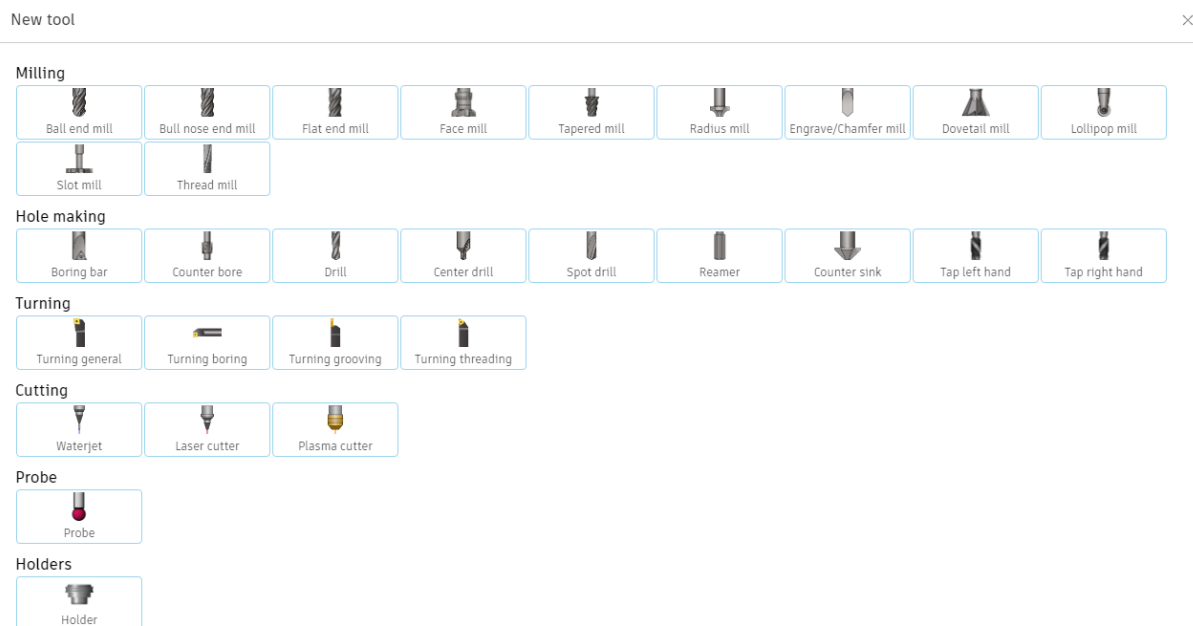
Obrázek 30 - Zobrazení nulového bodu u dalších upnutí

## 7.2. Strojní programování

Pro tvorbu NC kódu byl použit CAM software od firmy Autodesk Fusion 360. Prvotním krokem bylo nahrání modelu do softwaru. Model byl dodán ve formátu STEP, takže s jeho importem do programu nebyl problém. Následovalo vytvoření nástrojů v knihovně, kde jsou

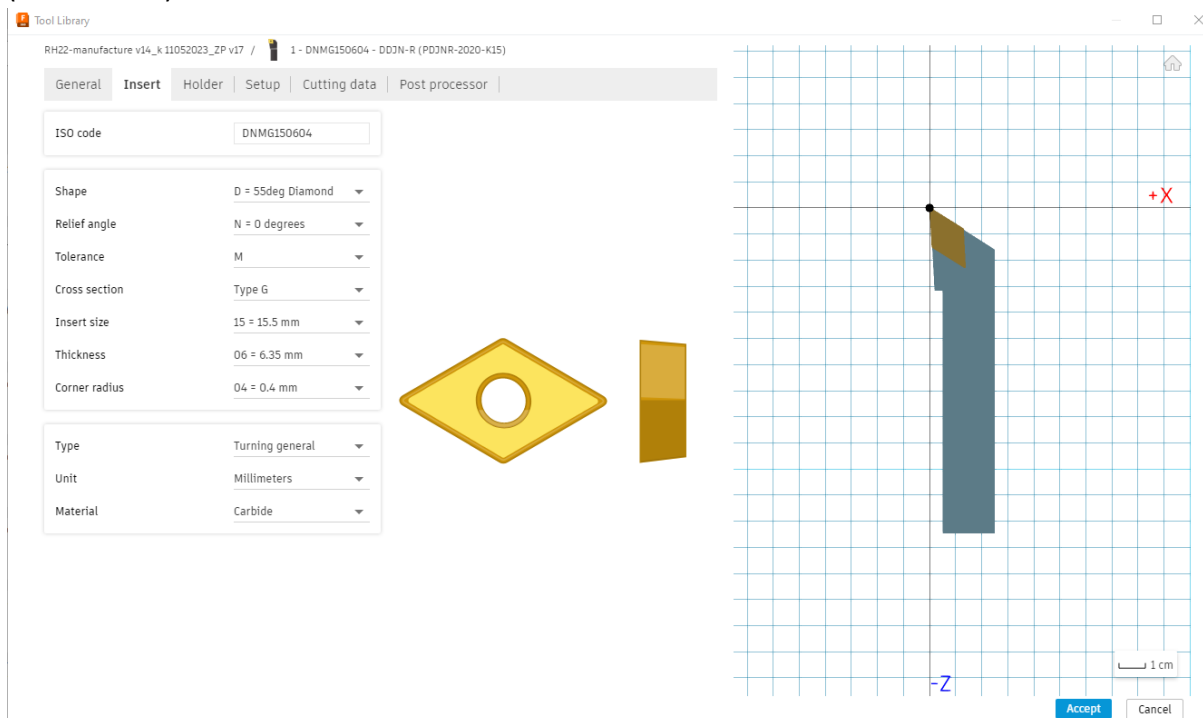


nástroje seřazeny podle technologií výroby podporovaných programem Fusion 360. Na obrázku je uvedena nabídka těchto nástrojů (Obrázek 31).



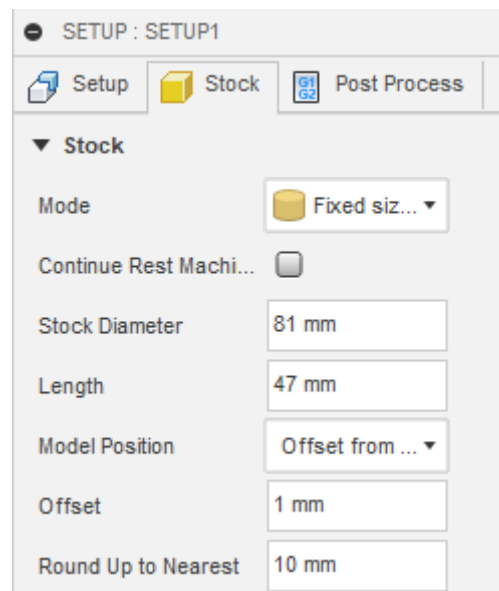
Obrázek 31 - Zobrazení tabulky nástrojů ve Fusionu 360

Výběrem zvoleného nástroje pokračovala práce definováním nástroje. Definice nástroje začala jeho popisem. Definovaly se parametry VBD a držáku nástroje, řezné parametry nástroje a vybíral se postprocesor. Definice VBD nástroje T5 je uvedena na obrázku (Obrázek 32).



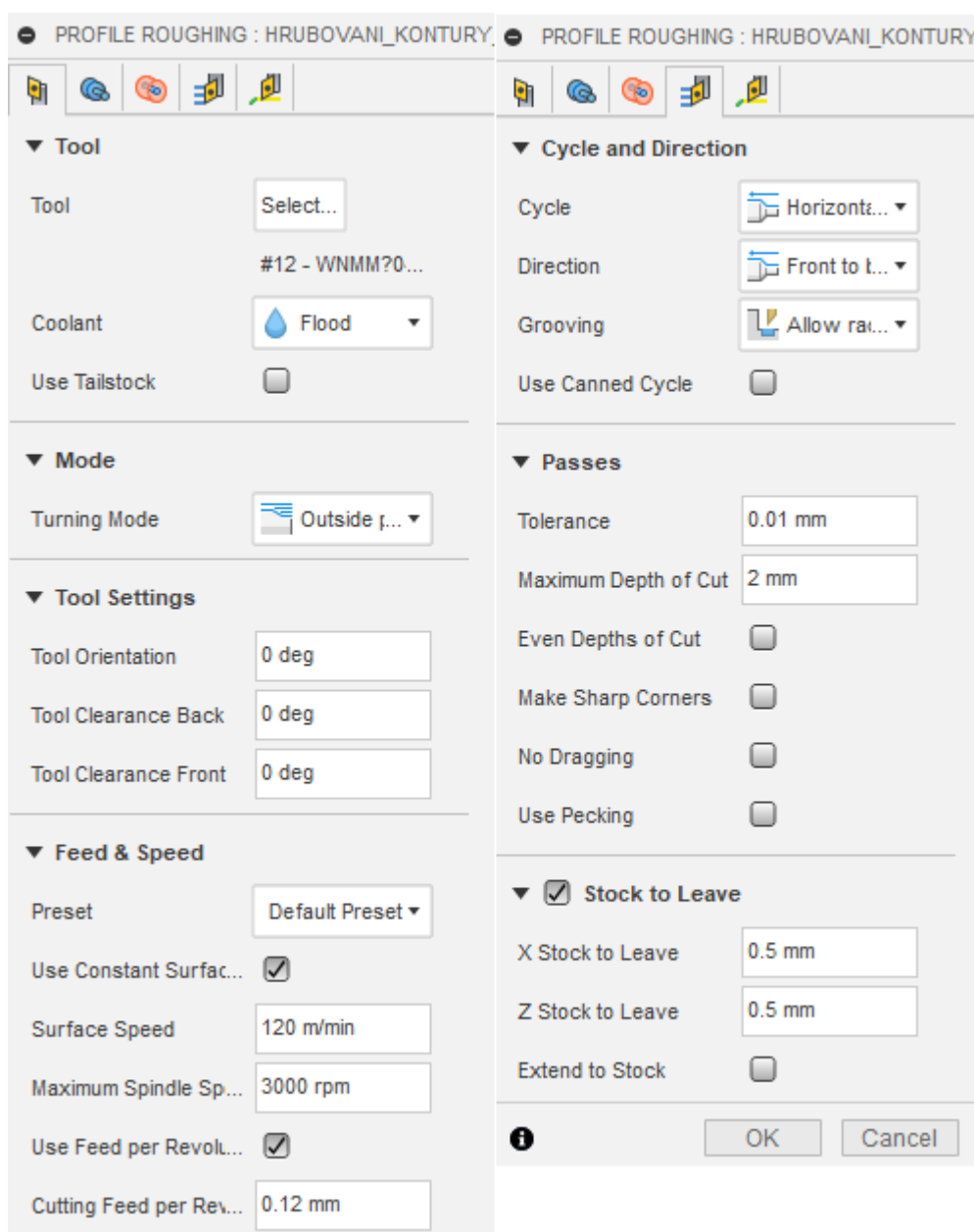
Obrázek 32 - Tabulka definice nástroje ve Fusionu 360

Následovala definice souřadného systému a volba polotovaru. Souřadné systémy budou více rozvedeny v dalších kapitolách. Polotovar u prvního Setupu byl zvolen podle vytvořeného souřadného systému a je vyobrazen na následujícím obrázku (Obrázek 33). U dalších Setupů byl polotovar počítán podle předchozích operací.



Obrázek 33 - Definice polotovaru u první operace

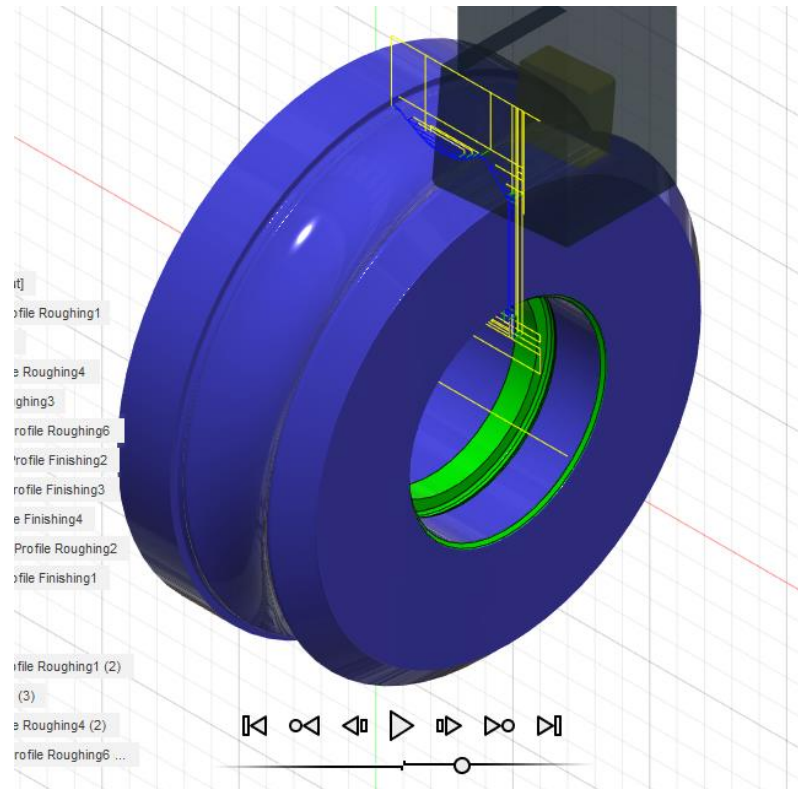
Nastavením základních parametrů následovaly kroky vytváření drah obrábění. Operace se dělí na hrubovací s velkým úběrem materiálu nebo dokončovací s důrazem na výslednou kvalitu povrchu. Při zvolení obráběcí strategie následuje definování, jakým způsobem se mají výsledné dráhy generovat. Možnosti změn výsledných drah jsou rozsáhlé, dají se měnit bezpečné oblasti, nájezdy, posuvy, velikosti záběrů, řezné rychlosti, velikosti přídavek a další parametry. Na dalším obrázku je znázorněna část nabídky, která slouží k této definici (Obrázek 34).



Obrázek 34 - Definice drah pro obrábění

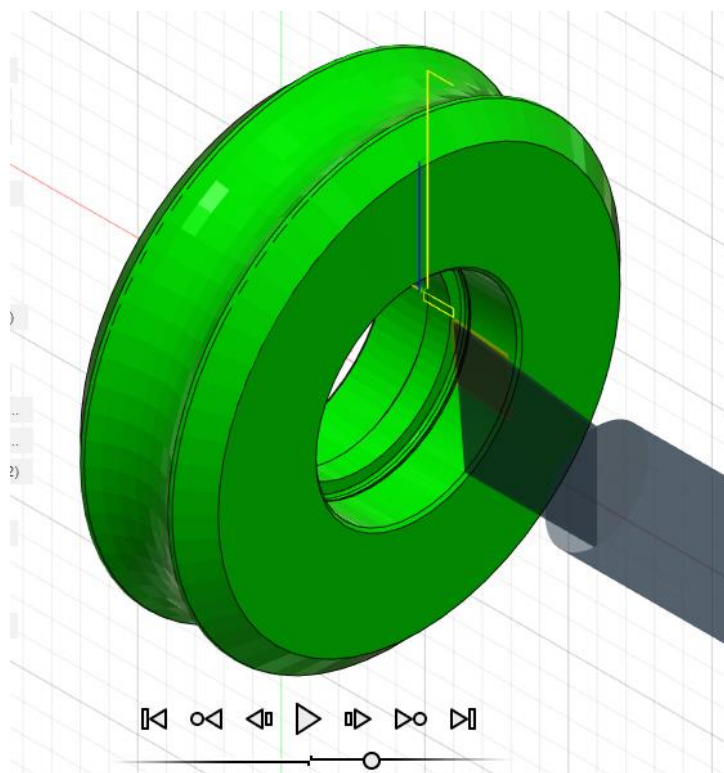
Dalším krokem byla simulace generovaných drah. Simulace sloužila jako věrný nástroj pro kontrolu těchto dat. Po kontrole drah, následoval převod CL dat do NC kódu pro daný řídicí systém pomocí postprocessingu. Vygenerovaný NC kód byl nahrán pomocí USB flash disku do stroje. Poté už následovalo odbavení na stroji s následným obráběním. Na dalších snímcích je zobrazen postup obrábění po jednotlivých operacích, kde v rámci simulace se zobrazují ještě nedokončené plochy jako modré a plochy dokončené na čisto jako zelené.

**Operace 10** – zobrazení modelu po obrobení v měkkém stavu (Obrázek 35)



Obrázek 35 - Zobrazení modelu po první operaci

**Operace 50** – zobrazení modelu po obrobení v tvrdém stavu (Obrázek 36)



Obrázek 36 - Zobrazení modelu po poslední operaci

## 8. Ověření navrženého řešení

### 8.1. Nastavení stroje před obráběním

Před samotným obráběním musí dojít k nezbytným úkonům, aby obrábění mohlo být provedeno. Jedním z kroků je příprava upínání obrobku. V tomto případě se nejdříve jednalo o upnutí zakusovacích čelistí pro obrábění z první strany a poté byly upnuty čelisti měkké, které musely být upraveny na požadovaný rozměr. Na obrázku jsou vidět tvrdé zakusovací čelisti upnuté ve stroji (Obrázek 37).



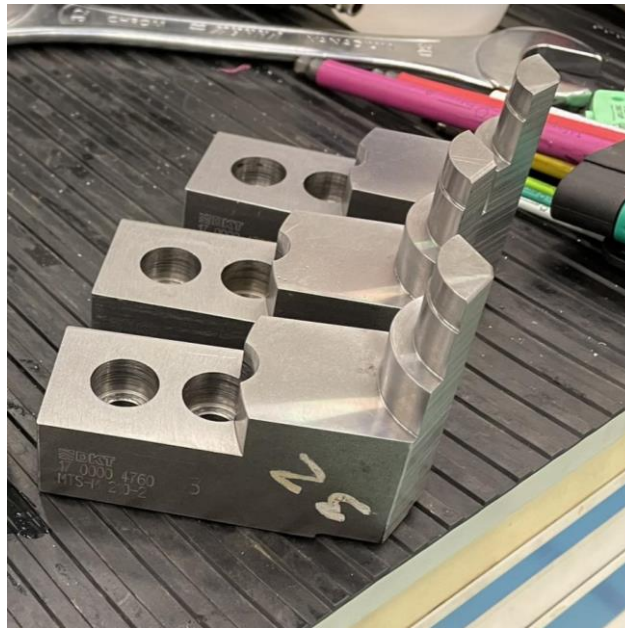
Obrázek 37 - Zakusovací čelisti upnuté ve stroji

Dalším nezbytným krokem je zaměření korekcí nástrojů. Při výměně VBD nebo opotřebením se vytváří nepřesnosti polohování seřizovacího bodu nástroje, a tím se i obrábění stává nepřesným. Proto se nástroje zaměřují pomocí nástrojové sondy, která je v použitém soustruhu provedena ve formě ramena, které se upevní do daného místa ve stroji. Na rameni se nachází destička, která má definovanou polohu v prostoru a díky dotyku nástroje a destičky je změřena korekce (Obrázek 38).



Obrázek 38 - Nástrojová sonda pro měření korekcí

V dalších operacích byly pro upínání používány měkké čelisti. Čelisti musely být upraveny obrobením na přesný průměr a také na přesnou vzdálenost pro upnutí za vnitřní průměr díry. Čelisti sloužili také pro upínání jiných dílů z jiných projektů, proto byly tyto čelisti navíc osazeny ještě dalším přesným průměrem. Z tohoto důvodu musel být také vyroben vymežovací kroužek, který sloužil jako doraz mezi čely součásti a čelistí. Kroužek byl přebroušen na přesnou tloušťku, aby byla dosažena co největší opakovatelnost upnutí. Tloušťka vyrobeného vymežovacího kroužku byla změřena v několika bodech a byl z ní stanoven největší rozměr 14,788 mm. Měřením házení čela rolny po pouhém zatlačení rolny do čelistí se zjistila velikost házení pohybující se okolo setiny milimetru, což je velmi dobrý výsledek. Následně bylo zkoušeno doklepnutí dílu pomocí paličky pro lepší výsledek házení. Tímto způsobem ovšem došlo vždy ke zhoršení celkového házení, které se poté blížilo až k desetině milimetru, proto byl pro upínání zvolen první způsob. Tyto čelisti od firmy DKT jsou zobrazeny na následujícím obrázku (Obrázek 39).



Obrázek 39 - Měkké upínací čelisti

## 8.2. Obrobení součásti

Prvním krokem bylo nařezání polotovaru. Délka polotovaru byla uříznuta podle výrobního postupu na délku 47 mm. Pro řez byla použita pásová pila od firmy PILOUS. Na obrázku níže je tento proces zobrazen (Obrázek 40).



Obrázek 40 – Řez polotovaru

Dalším krokem po očištění polotovaru bylo upnutí součásti do soustruhu. Po upnutí následovalo stanovení nulového bodu polotovaru ve stroji. Ke stanovení nulového bodu byl zvolen jeden z nástrojů, který se přiblížil k polotovaru co nejlíže a za pomoci spárových měrek byla stanovena vzdálenost nástroje od polotovaru a tato hodnota byla zapsána do posunutí v souřadném systému stroje. Na následujícím obrázku je znázorněno zapisování nulového bodu programu do stroje (Obrázek 41).

Nahráný program byl zkontrolován pomocí simulace ve stroji. Zde bylo hlavním důvodem zjištění, že žádný z nástrojů nezajíždí do námi stanoveného modelu a také do čelistí.



Obrázek 41 - Zápis nulového bodu do stroje

### 8.2.1. Obrobení součásti před kalením

Dalším krokem byla operace soustružení z první strany do žíhaného materiálu. Nejdříve bylo provedeno zkušební obrábění do měkké oceli třídy 11. Tímto postupem byl získán požadovaný tvar, a proto došlo k obrobení součásti z nástrojové oceli. Na následujícím obrázku je zobrazen obrobek z nástrojové oceli (Obrázek 43).





Obrázek 43 - Obrobená součást z první strany v žíhaném stavu

Další operací bylo soustružení součásti z druhé strany. Došlo k výměně čelistí a poté k upnutí obrobku. Opět byl stejný postup, kdy došlo nejdříve k obrobení součásti z měkké oceli a poté k obrobení součásti z nástrojové oceli. Na obrázku je zobrazen výsledek obrábění z nástrojové oceli v žíhaném stavu (Obrázek 42).



Obrázek 42 – Obrobená součást z druhé strany v žíhaném stavu

Při následné kontrole obrobků byla velmi znatelná rozdílná kvalita obrobených ploch mezi obrobky z měkké oceli a z nástrojové oceli. Obrobky z měkké oceli měly znatelně horší povrchové vlastnosti oproti obrobkům z nástrojové oceli. Toto může být způsobeno několika faktory. Hlavním z faktorů je čistota oceli, kde hraje hlavní roli vyšší obsah nežádoucích prvků

ve struktuře měkčí oceli oproti nástrojové (síra a fosfor). Dalším faktorem je vyšší tvrdost a žáruvzdornost nástrojové oceli oproti měkčí oceli (například obsah niklu), což způsobuje menší tendenci se mazat a nalepovat na nástroj. Porovnatelný rozdíl kvality je zobrazen na následujícím obrázku, kde se obrobek z měkčí oceli nachází vlevo (Obrázek 44).



Obrázek 44 - Porovnání kvality povrchu dílů

### 8.2.2. Kalení součásti

Další operací bylo kalení. Kalení nebylo prováděno na fakultě, protože zvolená technologie vakuového kalení není možná, a proto bylo kalení prováděno u externí firmy. Zde se zjevil menší problém se zakalením, kdy externí firma stále oddalovala dodání zakaleného dílu, ale naštěstí se vše podařilo vyřešit. Na následujícím obrázku je zobrazen zakalený díl.

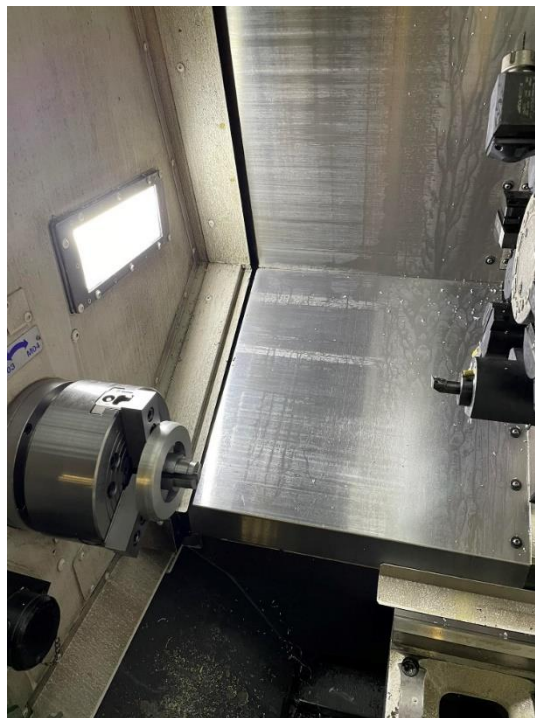


Obrázek 45 - Zakalený díl

### 8.2.3. Obrobení součásti po kalení

Obrábění po kalení probíhalo po delší době od doby obrábění před kalením. Mezitím byl soustruh používán. Při opětovném osazení sklíčidla našimi připravenými čelistmi a upnutím nezakaleného (nezdeformovaného) dílu bylo zjištěno velké házení na obvodu dílu, které nešlo i po opakovaném přeupnutí zlepšit. Hodnota obvodového házení činila 0,05 mm. Pro zlepšení hodnoty obvodového házení bylo rozhodnuto o přetočení upínací části čelistí.

Pro přetočení obvodu čelistí musel být vyroben hliníkový rozpěrný kroužek, který nám zajistil rozepnutí čelistí, bez kterého by nebylo možné průměr upínací části čelistí obrobit. Na následujícím obrázku je viditelný rozpěrný kroužek upnutý ve stroji před přetočením upínacích čelistí (Obrázek 46).



Obrázek 46 - Úprava čelistí

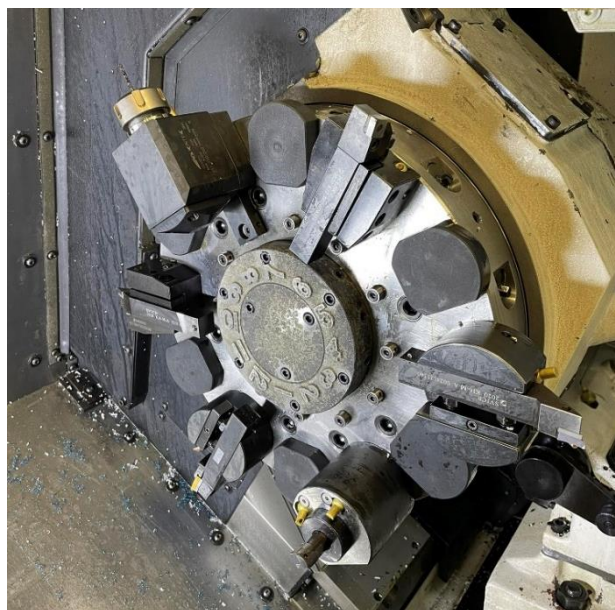
Po přetočení čelistí byl do stroje upnut referenční nezakalený díl, který vykazoval obvodové házení menší než 0,005 mm. Tímto byly čelisti připraveny pro upnutí zakaleného dílu. Následovalo upnutí tohoto dílu. Po upnutí bylo změřeno házení kaleného dílu, které bylo dle očekávání horší než u referenčního dílu. Toto zhoršení bylo způsobeno rozměrovými změnami v průběhu kalení. Obvodové házení dílu se pohybovalo okolo 0,025 mm. Průběh měření je názorný na následujícím obrázku (Obrázek 47).



Obrázek 47 - Měření obvodového házení

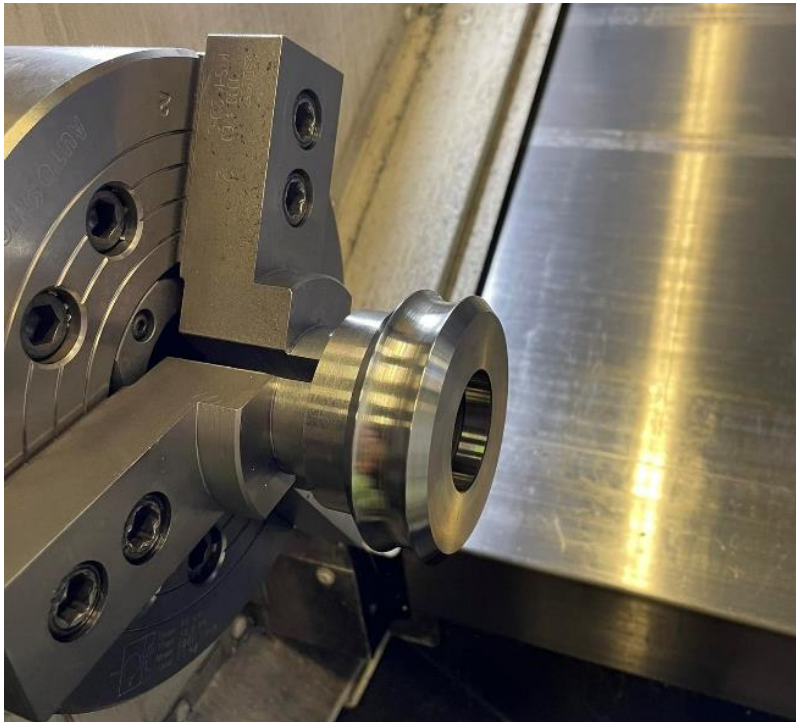
Dalším krokem bylo změření nulového bodu. Nulový bod byl zvolen na dorazu čelistí v místě, kde se opíral broušený vymezovací kroužek. Najetí nulového bodu se provedlo přiblížením nástroje k obrobku a poté následným přiložením spárových měrek byla stanovena mezera mezi nástrojem a čelem obrobku a tato korigovaná hodnota vzdálenosti byla načtena do stroje.

Nástroje použité k obrábění kaleného materiálu byly upnuty do revolverové hlavy stroje na pozice 2, 6 a 10. Bylo velmi dbáno na minimální vyložení nástrojů pro maximální tuhost obráběcí soustavy. Na následujícím snímku je vyobrazena osazená revolverová hlava (Obrázek 48).



Obrázek 48 - Osazená revolverová hlava

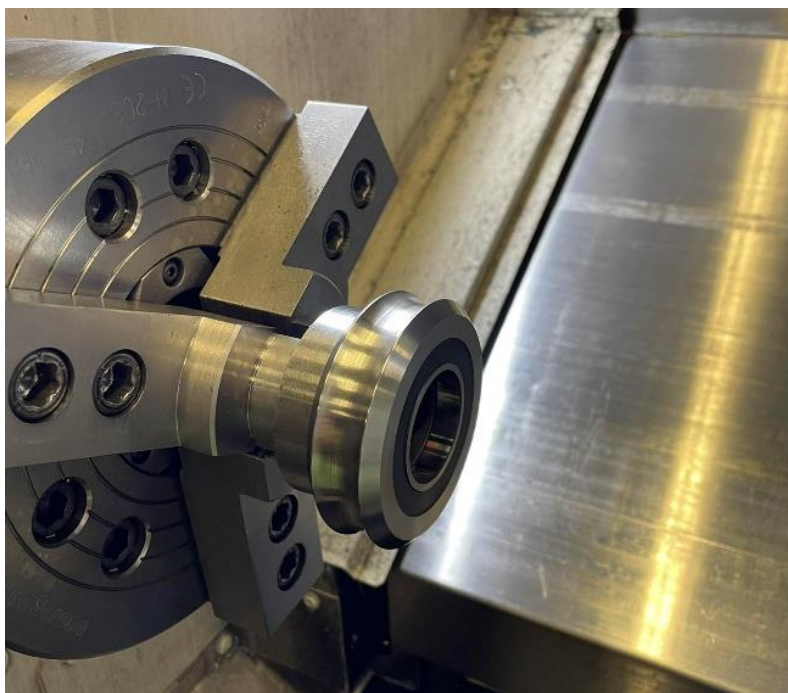
Následovalo obrobení čela součásti. Nejdříve bylo čelo obrobena s přídavkem, aby byla možná ještě následná korekce kvůli možnému odtažení nástroje nebo z důvodu dalších faktorů. Stanovením korekce a následnou úpravou bylo možné obrobení součásti z první strany. Došlo k obrobení čela, díry a vnější kontury dílu. Vnější konturu bylo výhodnější obrábět v prvním kroku, jelikož kdyby byla kontura obrobena z druhé strany, mohlo dojít ke vzniku otřepu na hraně mezi konturou a čelem první strany. Na obrázku je vidět obrobena díl z první strany (Obrázek 49).



Obrázek 49 - Obrobena díl z první strany v kaleném stavu

Dalším krokem postupu bylo přeupnutí dílu za druhou neobrobenou stranu. Přeupnutím vznikla malá nepřesnost při měření obvodového házení, která se nedala zmírnit ani opakovaným přeupnutím. Tato nepřesnost se pohybovala okolo 0,02 mm a vyhovovala tolerancím daných na výkrese. V porovnání například s velikostí vlasu, která se pohybuje okolo 0,06 mm, je toto házení opravdu minimální.

Přeupnutím bylo možné obrobení druhé strany dílu. V tomto kroku bylo obrobena čelo a díra součásti. Upnutý díl je viditelný na následujícím snímku (Obrázek 51).



*Obrázek 51 - Obrobený díl z druhé strany v kaleném stavu*

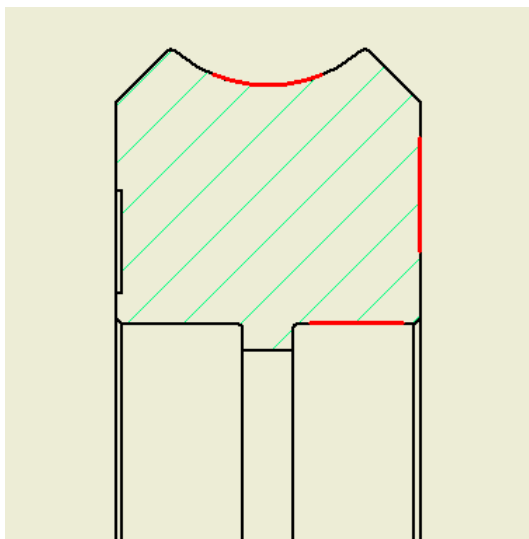
Následovala kontrola všech dostupných rozměrů, jestli jsou rozměry v tolerancích. Obrobek byl následně vyjmut ze stroje a podroben podrobnějšímu měření. Vyjmutý díl je na následujícím snímku (Obrázek 50).



*Obrázek 50 - Hotový díl vyjmutý ze stroje*

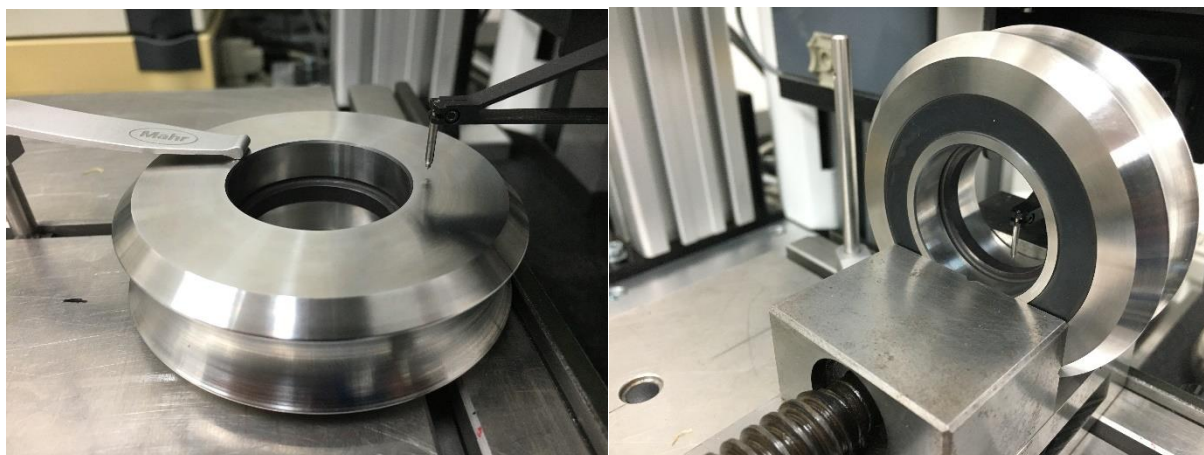
### 8.3. Rozměrová kontrola obrobku a kontrola dosažené drsnosti

Rozměrová kontrola probíhala za pomoci komunálních měřidel. Bylo použito digitální posuvné měřítko Mahr MarCal 16ER 150/0,01; digitální mikrometr Mahr Micromar 40EWV 0-25 mm a třídotekový dutinoměř Mahr Micromar 40EWV na kontrolu rozměru díry. Všechny rozměry odpovídaly rozměrům v tolerancích, které předepisuje výrobní dokumentace.



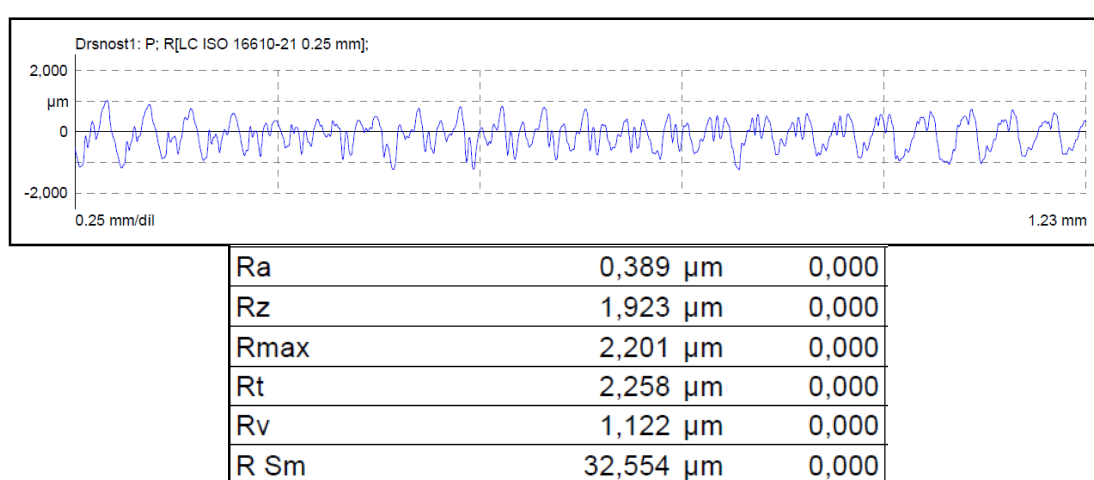
Obrázek 52 - Vyznačení oblastí, kde byla měřena drsnost

Dalším krokem byla kontrola drsností. Kontrola byla provedena drsnoměrem od firmy Mahr MarSurf LD 120. Pro měření byla zvolena základní délka měření v souladu s normou  $\lambda_c=0,25$  mm. Vyhodnocení bylo provedeno na standartní vyhodnocované délce  $l_t=1,5$  mm. Měření bylo provedeno ve třech oblastech. V každé oblasti probíhala 3 měření. Na předcházejícím obrázku jsou tyto 3 oblasti vyznačeny (Obrázek 52). Jednalo se o čelo (Obrázek 53), vnější konturu a díru (Obrázek 53).



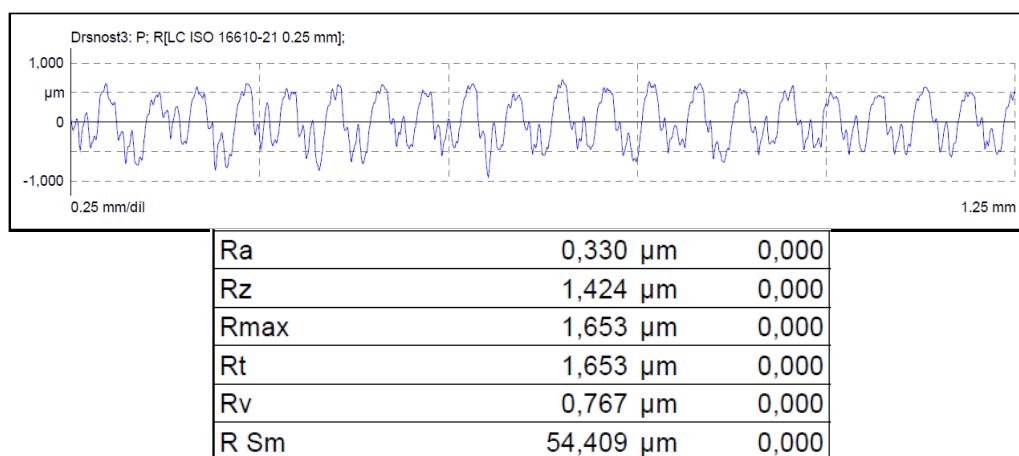
Obrázek 53 - Měření drsností

První zkoumanou oblastí byla vnější kontura. Zde byla očekávaná určitá odchylka u dna kontury, protože během obrábění se zde měnil směr, kdy se nástroj nejdříve zanořoval do materiálu a potom na středu kontury přecházel směr k vynořování. Odchylka byla očekávaná kvůli možným vůlím stroje, toto se ovšem nepotvrdilo a přechod byl plynulý. Na obrázku je akorát znatelný mírně rozdílný průběh drsnosti na stranách grafu, což může být hledaný přechod mezi zanořováním a vynořováním nástroje. Na následujícím obrázku je zobrazeno jedno z měření s průběhem drsnosti na základní délce ve dně kontury dílu (Obrázek 54). Jednotlivé ukazatele drsnosti jsou uvedeny pod průběhem. Průměrně ze všech měření vycházela střední aritmetická úchylka profilu okolo  $R_a$  0,4  $\mu\text{m}$ .



Obrázek 54 - Průběh drsnosti měření kontury s ukazateli popisující drsnost

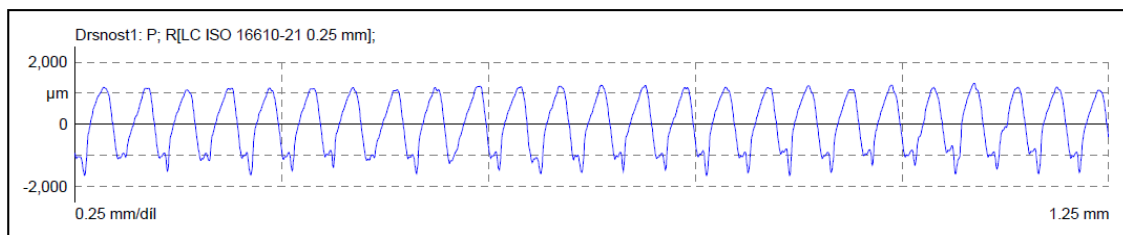
Druhou zkoumanou oblastí bylo čelo. Zde nebyla očekávána žádná odchylka. Měření je viditelné na následujícím obrázku (Obrázek 55). Průběh drsnosti s výslednými parametry je viditelný na obrázku. Zde vycházela drsnost ze všech měření nejlépe. Pohybovala se okolo  $R_a$  0,33  $\mu\text{m}$ .



Obrázek 55 - Průběh drsnosti měření čela s ukazateli popisující drsnost



Poslední zkoumanou oblastí byla díra. Zde vycházela drsnost nejhůře. Průměrně se hodnota drsnosti pohybovala okolo Ra 0,77 μm (Obrázek 56).



Ra	0,770 μm	0,000
Rz	2,866 μm	0,000
Rmax	2,925 μm	0,000
Rt	2,977 μm	0,000
Rv	1,615 μm	0,000
R Sm	50,125 μm	0,000

Obrázek 56 - Průběh drsnosti měření díry s ukazateli popisující drsnost

Drsnost daná výrobní dokumentací byla v rámci dílu splněna. I nejhorší výsledek u obrobené díry je stále v rámci tolerancí. Ostatní tolerance, které jsou ještě přísnější jsou také splněny. Díl je tedy v rámci drsností v pořádku.

Z výsledků měření drsnosti vychází že nejhorší výsledky drsnosti má díra. Toto může být způsobeno menší tuhostí nástroje a obrobku při obrábění díry, což bylo pozorovatelné při obrábění vznikem slyšitelných vibrací. Dalším faktorem mohla být nižší řezná rychlost (120 m/min) například v porovnání při obrábění čela (250 m/min). Samozřejmě nižší řezná rychlost byla i při obrábění kontury, ale zde byla použita VBD s poloměrem špičky 0,8 mm. Větší poloměr špičky dopomohl k lepšímu výsledku drsnosti než u díry.

## 9. Závěr

Diplomová práce se zabývá tvrdým soustružením. Tvrdé soustružení je dokončovací technologie obrábění tvrdých materiálů, které ve většině případů je realizováno broušením. Tvrdé soustružení má mnoho výhod oproti broušení, ale také naopak má i některé nevýhody. Výhody a nevýhody jsou popsány v práci. Základním cílem práce je zjištění dosažitelných přesností a stavů povrchu použitím KNB nástrojů na CNC soustružnickém centru. Celá práce je rozdělena na dvě části.

První část práce se zabývá definováním a pojmy v oblasti soustružení. Dále popisuje nástroje pro soustružení, upínání obrobků a také uvádí kvalitativní parametry při soustružení. V rámci práce byl podrobně analyzován trh se soustruhy pro tvrdé soustružení a byly identifikovány některé klíčové konstrukční řešení těchto strojů. Nejúspěšněji v této oblasti působí výrobci Hembrug, Hardinge, Schaublin a Miyano. Dalším bodem v práci je popis, výhody a nevýhody tvrdého soustružení a stroje a nástroje pro obrábění kalených ocelí. Posledním bodem v rešeršní části práce je porovnání a ukázky z katalogů vybraných výrobců nástrojů z kubického nitridu bóru. Největší portfolio má v této sféře společnost CERATIZIT.

Druhá část práce je již zaměřena na výrobu válcovacího nástroje. První částí je návrh výrobního postupu dílu podle dodané výrobní dokumentace. Dále práce pokračuje také volbou stroje, nástrojů a upínání dílu při obrábění. CAM programování následuje po stanovení výrobního postupu. V rámci práce je zde vytvořen partprogram pro obrábění a poté následuje generování drah obrábění. Díl se obráběl v měkkém žíhaném stavu a po kalení následovalo zmiňované tvrdé soustružení. Poslední částí byla rozměrová kontrola a také kontrola drsností. Rozměry po obrobení odpovídaly tolerancím na výkrese, takže obrobení proběhlo v pořádku. Následovala také kontrola drsností, kdy drsnosti také odpovídaly tolerancím dodané výrobní dokumentace. Nejlepší dosažená drsnost byla na čele součásti, kdy ukazatel drsnosti byl Ra 0,33  $\mu\text{m}$ . Druhou nejlepší dosaženou drsností byla drsnost na vnější kontuře dílu a ta dosahovala okolo Ra 0,4  $\mu\text{m}$ . Nejhorší drsnost byla dosažena v díře s Ra 0,77  $\mu\text{m}$ .

Racionalizace výrobního postupu spočívala v nahrazení dokončovací technologie. Pro tento výrobní postup byla nová zvolená technologie tvrdého soustružení velmi vhodná. Cíle diplomové práce byly splněny.

Provedená výroba prototypu prokázala možnost realizace tvrdého soustružení i na soustruzích běžných přesností. Pro další zkvalitnění dosažených výsledků, zejména drsnosti povrchu, by bylo vhodné provést optimalizaci nástrojů a porovnávací zkoušky více mikrogeometrií řezné hrany od více výrobců.

## Citovaná literatura

- [1] MÁDL, Jan, Jindřich KAFKA, Martin VRABEC a Rudolf DVOŘÁK. *Technologie obrábění*. 3.díl. Praha: ČVUT, 2007.
- [2] MÁDL, Jan a Jaroslav BARCAL. *Základy technologie II*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02610-8.
- [3] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Úvod do teorie obrábění*. Ostrava: 5, 2013. ISBN 978-80-248-3013-1.
- [4] HUMÁR, Anton. *Technologie obrábění - 1.část* [online]. Brno, 2003 [cit. 2023-08-06]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI\\_TO-1cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-1cast.pdf). Studijní opory pro magisterskou formu studia. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [5] *Výběr správných vyměnitelných břitových destiček - na co je třeba brát zřetel?* [online]. CERATIZIT Group, 2023 [cit. 2023-02-17]. Dostupné z: [https://cuttingtools.ceratizit.com/cz/cs/nastroje/soustru\\_eni/p\\_iru\\_ka/volba-vym\\_nitelnycutech-bitovyacutech-destiek.html](https://cuttingtools.ceratizit.com/cz/cs/nastroje/soustru_eni/p_iru_ka/volba-vym_nitelnycutech-bitovyacutech-destiek.html)
- [6] ISO - SYSTÉM ZNAČENÍ VYMĚNITELNÝCH BŘITOVÝCH DESTIČEK: Soustružení-pramet [online]. Pramet [cit. 2023-02-17]. Dostupné z: <https://www.naradi-nastroje.eu/prilohy/katalogy/britove-desticky-pramet.pdf>
- [7] *T-support "trvalá podpora vašich provozů...": upínání rotačních obrobků - 1.část (6)* [online]. Technický deník, 2012 [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: <https://www.t-support.cz/kat/upinani-rotacnich-obrobku-1-cast-6>
- [8] SOVA, František. *Technologie obrábění a montáže*. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2001. ISBN 80-7082-823-4.
- [9] JANYŠ, Bohumil. *Upínání obrobků na soustruhu*. Praha: SNTL, 1961. Knižnice strojírenské výroby.
- [10] SKOČOVSKÝ, Petr. *Náuka o materiálu pro odbory strojnícké*. Žilina: EDIS - vydavatelstvo ŽU, 2000. ISBN 80-7100-831-1.
- [11] *1.2379 (19 573): Materiálový list* [online]. Bolzano [cit. 2023-02-08]. Dostupné z: [https://bolzano.cz/wp-content/uploads/2020/01/1.2379\\_19-573.pdf](https://bolzano.cz/wp-content/uploads/2020/01/1.2379_19-573.pdf)
- [12] *Nástrojové a rychlořezné oceli - dodavatelský program* [online]. Praha: BÖHLER [cit. 2023-02-08]. Dostupné z: [https://bolzano.cz/wp-content/uploads/2020/01/1.2379\\_19-573.pdf](https://bolzano.cz/wp-content/uploads/2020/01/1.2379_19-573.pdf)

- [13] 1.2379: *Data sheet* [online]. Dörrenberg edelstahl [cit. 2023-02-13]. Dostupné z: <https://www.finemetal.ro/wp-content/uploads/2020/09/1.2379-CPPU-X153CrMoV12.pdf>
- [14] DAVIM, J. Paulo. *Machining of Hard Materials*. London: Springer, [2011].
- [15] KOEPFER, Chris. *Hard Turning as an Alternative to Grinding* [online]. PRODUCTION Machining, 2010 [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://www.productionmachining.com/articles/hard-turning-as-an-alternative-to-grinding>
- [16] *Obráběné materiály* [online]. SANDVIK Coromant [cit. 2023-02-13]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece-materials>
- [17] *Hard turning* [online]. Hembrug Danobat, 2016 [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://www.hembrug.com/hard-turning/hard-turning-compared-to-grinding-2/>
- [18] CZÁN, Andrej, Lukáš ĎURECH, Dana STANČENKOVÁ a Dušan ŠTEKLÁČ. *Trvanlivosť rezných materiálov pri suchom tvrdom sústružení ocele 100Cr6* [online]. MM průmyslové spektrum, 2006 [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/trvanlivost-reznych-materialov-pri-suchom-tvrdom-sustruzeni-ocеле-100cr6>
- [19] *What is PCBN material?* [online]. Precision cutting tools [cit. 2023-02-13]. Dostupné z: <http://www.pcbn-insert.com/FAQ/what-is-pcbn-material.html>
- [20] *PCBN -ISO destičky pro soustružení* [online]. SECO TOOLS [cit. 2023-02-13]. Dostupné z: <https://www.secotools.com/article/66778?language=cs>
- [21] *Příručka obrábění: SANDVIK Coromant* [online]. [cit. 2023-02-13]. Dostupné z: <https://forum.strojirenstvi.cz/viewtopic.php?t=21701>
- [22] *Soustružnické nože s vyměnitelnými destičkami: Katalog CERATIZIT* [online]. CERATIZIT Group [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: [https://cdn.plansee-group.com/is/content/planseemedia/gd\\_kp\\_kt-hk-01-21-00021-kp-wp-dre\\_scs\\_asc\\_pim](https://cdn.plansee-group.com/is/content/planseemedia/gd_kp_kt-hk-01-21-00021-kp-wp-dre_scs_asc_pim)
- [23] *CBN Wendeschneidplatten: Katalog DTS* [online]. Deutschland: DTS [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: [https://diamond-toolingsystems.com/wp-content/uploads/2021/11/02\\_CBN-Drehplatten-Katalog\\_DTSGmbH.pdf](https://diamond-toolingsystems.com/wp-content/uploads/2021/11/02_CBN-Drehplatten-Katalog_DTSGmbH.pdf)

- [24] *CBN: Katalog NTK* [online]. NTK Cutting tools [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: <https://www.ntkcuttingtools.com/de/media/download/catalog/pdf/ezcube.pdf>
- [25] *CBN inserts: Nabídka KYOCERA* [online]. KYOCERA Unimerco A/S [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.kyocera-unimerco.com/products-and-services/metal/turning/general-turning/cbn-inserts/>
- [26] *T series super-precision: Soustruh Hardinge* [online]. Hardinge [cit. 2023-02-17]. Dostupné z: <https://hardinge.com/product/turning/t-series/>
- [27] *Skličidlo univerzální ČSN 243801, TOS IUS 200/3-2M1 (203210)* [online]. BO-IMPORT [cit. 2023-02-20]. Dostupné z: <https://www.bo-import.cz/sklicidlo-univerzalni-csn-243801-tos-ius-200-3-2m1-203210-p734/?cid=5527>
- [28] *Expanding Mandrels: KEM Series* [online]. KITAGAWA, 2018 [cit. 2023-02-20]. Dostupné z: <https://du4zy4y6zgbbu.cloudfront.net/en/store/KEMSeries.pdf>
- [29] *Okuma Genos L2000-e M: Obráběcí stroje a nástroje* [online]. Misan [cit. 2023-06-05]. Dostupné z: <https://www.misan.cz/okuma/katalog-detail/genos-l2000-e-m-okuma-genos-l2000-e-m/?viewpart=2>

## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Schematické znázornění obráběcí soustavy SNO (zde bez P-přípravku) ..	11
Obrázek 2 - Různé provedení soustružnických nožů [2] .....	12
Obrázek 3 - ISO značení VBD [5] .....	13
Obrázek 4 - ISO tvary destiček [6] .....	13
Obrázek 5 - ISO tolerance rozměrů VBD [6] .....	14
Obrázek 6 - ISO délka řezné hrany VBD [6] .....	15
Obrázek 7 - Sklíčidlo TOS Svitavy IUS [27] .....	17
Obrázek 8 - Opěry a lunety pro podepření obrobku [2].....	18
Obrázek 9 - Systém rozpínacích trhů [6] .....	19
Obrázek 10 - Rozpínací trn od firmy KITAGAWA [28] .....	20
Obrázek 11 - Průběh teplot $M_f$ a $M_s$ podle obsahu uhlíku [10].....	22
Obrázek 12 - Grafické zobrazení kalení obráběné oceli [18] .....	24
Obrázek 13 - Tvrdé soustružení [15] .....	26
Obrázek 14 - Soustruh Hardinge Super-Precision T-42 [26].....	30
Obrázek 15 - Použitelnost nástrojových materiálů podle tvrdosti obrobku a druhu řezu [16].....	31
Obrázek 16 - VBD z kubického nitridu bóru [16] .....	32
Obrázek 17 - DTS - KNB nástrojové materiály [23].....	34
Obrázek 18 - KYOCERA - KNB nástrojové materiály [25].....	36
Obrázek 19 - Model válcovací rolny .....	37
Obrázek 20 - Výkresová dokumentace bez kót .....	37
Obrázek 21 - Úprava výkresu pro danou technologii .....	38
Obrázek 22 - OKUMA Genos L200E-M .....	39
Obrázek 23 - VBD pro dohrubování vnější kontury .....	41
Obrázek 24 - VBD pro dokončení díry .....	42
Obrázek 25 - Operace 10 .....	43
Obrázek 26 - Operace 20 .....	45
Obrázek 27 - Operace 40 .....	46
Obrázek 28 - Operace 50 .....	47
Obrázek 29 - Zobrazení nulového bodu u prvního upnutí .....	48

Obrázek 30 - Zobrazení nulového bodu u dalších upnutí.....	48
Obrázek 31 - Zobrazení tabulky nástrojů ve Fusionu 360 .....	49
Obrázek 32 - Tabulka definice nástroje ve Fusionu 360 .....	49
Obrázek 33 - Definice polotovaru u první operace .....	50
Obrázek 34 - Definice drah pro obrábění .....	51
Obrázek 35 - Zobrazení modelu po první operaci .....	52
Obrázek 36 - Zobrazení modelu po poslední operaci.....	52
Obrázek 37 - Zakusovací čelisti upnuté ve stroji .....	53
Obrázek 38 - Nástrojová sonda pro měření korekcí.....	54
Obrázek 39 - Měkké upínací čelisti.....	55
Obrázek 40 – Řez polotovaru .....	55
Obrázek 41 - Zápis nulového bodu do stroje .....	56
Obrázek 42 – Obrobená součást z druhé strany v žíhaném stavu .....	57
Obrázek 43 - Obrobená součást z první strany v žíhaném stavu .....	57
Obrázek 44 - Porovnání kvality povrchu dílů.....	58
Obrázek 45 - Zakalený díl .....	58
Obrázek 46 - Úprava čelistí.....	59
Obrázek 47 - Měření obvodového házení .....	60
Obrázek 48 - Osazená revolverová hlava .....	60
Obrázek 49 - Obrobený díl z první strany v kaleném stavu.....	61
Obrázek 50 - Hotový díl vyjmutý ze stroje .....	62
Obrázek 51 - Obrobený díl z druhé strany v kaleném stavu .....	62
Obrázek 52 - Vyznačení oblastí, kde byla měřena drsnost .....	63
Obrázek 53 - Měření drsností.....	63
Obrázek 54 - Průběh drsnosti měření kontury s ukazateli popisující drsnost.....	64
Obrázek 55 - Průběh drsnosti měření čela s ukazateli popisující drsnost.....	64
Obrázek 56 - Průběh drsnosti měření díry s ukazateli popisující drsnost .....	65



## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Dosahované parametry při soustružení [2] .....	20
Tabulka 2 - Chemické složení obráběné oceli [11] .....	23
Tabulka 3 - Popis kroků tepelného zpracování [13] .....	25
Tabulka 4 - CERATIZIT - KNB nástrojové materiály [22] .....	33
Tabulka 5 - NTK - KNB nástrojové materiály [24] .....	35
Tabulka 6 - Nástrojový list .....	40
Tabulka 7 - Nástrojový list pro tvrdé soustružení .....	42
Tabulka 8 - Popis postupu operace 10 .....	44
Tabulka 9 – Popis postup operace 20.....	45
Tabulka 10 - Popis postupu operace 40 .....	46
Tabulka 11 - Popis postupu operace 50 .....	47