

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství

Studijní zaměření: Strojírenská technologie – technologie obrábění

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Soustružení těžkoobrobitelných materiálů

Autor: **Karel NOSEK**

Vedoucí práce: **Ing. Jan MATĚJKA**

Akademický rok 2012/2013

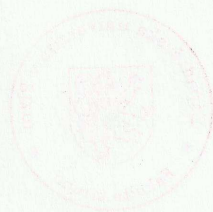
ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta strojní  
Akademický rok: 2012/2013

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Karel NOSEK**  
Osobní číslo: **S09B0402P**  
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Strojírenská technologie-technologie obrábění**  
Název tématu: **Soustružení těžkoobrobitelných materiálů**  
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

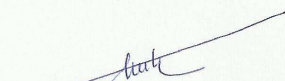
1. Charakteristika těžkoobrobitelných materiálů
2. Požadavky kladené na nástroj a stroj při soustružení těžkoobrobitelných materiálů
3. Technologické podmínky pro soustružení těžkoobrobitelných materiálů
4. Vyhodnocení získaných poznatků
5. Závěr




Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**  
Seznam odborné literatury:

**HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Praha: MM publishing, 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2**  
**STANĚK, J. Metodika zpracování a úprava diplomových (bakalářských) prací. 1.vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. 58 s. ISBN 80-7043-363-9**  
**DAVIM, J. PAULO. Machining of Hard Materials. London: Springer, 2011. ISBN 978-1-84996-449-4**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Matějka**  
Katedra technologie obrábění  
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Jan Matějka**  
Katedra technologie obrábění  
Datum zadání bakalářské práce: **29. října 2012**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **28. června 2013**

  
Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.  
děkan



  
Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 19. listopadu 2012

**Prohlášení o autorství:**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Nosek	<b>Jméno</b> Karel		
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	B2301 „Strojírenská technologie – technologie obrábění“			
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Ing. Matějka	<b>Jméno</b> Jan		
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU - FST - KTO			
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>	
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Soustružení těžkoobrobitelných materiálů			

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KTO	<b>ROK ODEVZD.</b>	2013
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	63	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	57	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	6
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b> <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Bakalářská práce se zabývá tématem soustružení těžkoobrobitelných materiálů. Práce obsahuje charakteristiku těžkoobrobitelných materiálů, nástroje používané pro soustružení těchto materiálů, požadavky na stroje a řezné podmínky vhodné pro soustružení těžkoobrobitelných materiálů. V závěru jsou vyhodnoceny získané poznatky.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b> <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	těžkoobrobitelné materiály, soustružení, nástrojové materiály, obráběcí stroje, řezné podmínky, trvanlivost břitů

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	<b>Surname</b> Nosek	<b>Name</b> Karel	
<b>FIELD OF STUDY</b>	B2301 "Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting"		
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname (Inclusive of Degrees)</b> Ing. Matějka	<b>Name</b> Jan	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KTO		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Turning of difficult-to-machine materials		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Department of Machining Technology	<b>SUBMITTED IN</b>	2013
----------------	------------------------	-------------------	------------------------------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	63	<b>TEXT PART</b>	57	<b>GRAPHICAL PART</b>	6
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	This bachelor thesis deals with turning of difficult-to-machine materials. The bachelor thesis contains the description of difficult-to-machine materials, tools used for turning of difficult-to-machine materials, machine requirements and cutting conditions suitable for this type of materials. In the conclusion is evaluation of the gained knowledge.
<b>KEY WORDS</b>	difficult-to-machine materials, turning, tool materials, machines, cutting conditions, tool life

## **Poděkování**

Děkuji tímto vedoucímu práce Ing. Janu Matějkovi za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

## Obsah

Obsah.....	8
1 Přehled použitých zkratk a symbolů .....	10
2 Úvod.....	11
3 Charakteristika těžkoobrobitelných materiálů .....	12
3.1 Rozdělení obráběných materiálů .....	12
3.1.1 ISO-M.....	12
3.1.2 ISO-S .....	13
3.1.3 ISO-H .....	17
3.2 Obrobitelnost .....	18
3.3 Vlastnosti materiálů obrobku.....	18
4 Požadavky na nástroj a stroj při soustružení těžkoobrobitelných materiálů.....	23
4.1 Požadavky na nástroj při soustružení těžkoobrobitelných materiálů .....	24
4.1.1 Přehled nepoužívanějších materiálů pro výrobu nástrojů pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů.....	26
4.1.2 Soustružení jednotlivých těžkoobrobitelných materiálů .....	32
4.2 Požadavky na stroj při obrábění těžkoobrobitelných materiálů .....	35
4.2.1 Požadavky z hlediska pracovní přesnosti.....	36
4.2.2 Požadavky na pohonné systémy obráběcích strojů .....	39
5 Technologické podmínky pro soustružení těžkoobrobitelných materiálů: .....	40
5.1 ISO M .....	41
5.2 ISO S.....	41
5.3 ISO H.....	42
5.4 Řezné podmínky pro VBD vhodné k soustružení těžkoobrobitelných materiálů .....	42
5.4.1 Slinuté karbidy .....	42
5.4.2 Cermety .....	43
5.4.3 CBN.....	43
5.4.4 Keramika .....	44
5.5 Řezné prostředí .....	45
5.5.1 Vodní roztoky.....	45
5.5.2 Emulzní kapaliny.....	45
5.5.3 Zušlechtěné řezné oleje .....	45
5.5.4 Syntetické kapaliny .....	45



6	Vyhodnocení získaných poznatků – test trvanlivosti břítu .....	46
6.1.1	Zkušební obrobek .....	46
6.1.2	Obráběcí stroj .....	46
6.1.3	Nástroj .....	47
6.1.4	Řezné podmínky .....	47
6.1.5	Měření opotřebení .....	47
7	Závěr .....	53
8	Literatura .....	55

# 1 Přehled použitých zkratk a symbolů

**HRC** ... Hardness Rockwell (jednotka tvrdosti materiálu)

**HB** ...Hardness Brinell (jednotka tvrdosti materiálu)

**PCBN**... Polycrystalline Cubic Boron Nitride (polykrystalický kubický nitrid bóru, slinutý karbid)

**SK**...slinutý karbid

**HSS**... High Speed Steel (rychlořezná ocel)

**PCD**...Polycrystalline Diamond (polykrystalický diamant)

**CBN**... Cubic Boron Nitride (kubický nitrid bóru)

**HRSA**... Heat Resistant Super Alloys (žárovzdorné slitiny)

**ISO**... International Organization for Standardization (mezinárodní organizace pro standardizaci)

**DIN**...Deutsche Industrie-Norm (německá národní norma vydaná Německým ústavem pro průmyslovou normalizaci)

**VBD**... vyměnitelná břitová destička

**CVD**...Chemical Vapor Deposition (chemická depozice z plynné fáze)

**PVD**...Physical Vapour Deposition (fyzikální depozice z plynné fáze)

**HT-CVD**... High Temperature Chemical Vapour Deposition (chemické depozice z plynné fáze za vysokých teplot)

**MT-CVD**...Middle Temperature Chemical Vapour Deposition (chemické depozice z plynné fáze za středních teplot)

**P-CVD**...Plasma-enhanced Chemical Vapor Deposition (chemická depozice z plynné fáze zesílená plasmou)

**CNC**... Computer Numeric Control (číslicové řízení počítačem)

**DLC**...Diamond Like Carbon (povlak uhlíku podobný diamantu)

## 2 Úvod

Strojírenství je jedním z nejstarších oborů lidstva. Zabývá se především výrobou nových součástí z nejrůznějších materiálů pro celou škálu různých odvětví. S rostoucími požadavky konstrukce jsou hledány nové materiály, případně jsou stále častěji využívány materiály žáruvzdorné, žárupevné, případně kalené a tvrzené. Stále větší důraz je kladen na kvalitu povrchu výrobků, na rozměrové přesnosti a v neposlední řadě na ekonomické hledisko. Toto zvyšuje nároky na nástrojové materiály. Jsou žádány stále odolnější, trvanlivější materiály.

Kalené materiály bylo možné dříve obrábět pouze broušením nebo nekonvenčními způsoby obrábění. Postupem času docházelo k vývoji nových nástrojových materiálů, jako jsou slinuté karbidy, řezná keramika, kubický nitrid bóru či diamantové nástroje. Díky těmto řezným materiálům je dnes možné obrábět tyto tvrdé a těžkoobrobitelné materiály klasickými metodami jako jsou soustružení, frézování, vrtání... Další nespornou výhodou při použití třískového obrábění je zkrácení výrobních časů, vyšší flexibilita a jednoznačně nižší cena. V současné době neexistuje univerzální materiál, který by byl vhodný pro všechny typy obráběných materiálů.

Těžkoobrobitelné materiály jsou v dnešní době zastoupeny v různých odvětvích, jako je energetika, zdravotnictví, letecký průmysl a další oblasti. Jedná se o materiály, které jsou svými vlastnostmi předurčeny pro tyto náročná použití. Jedná se především o vlastnosti, jako jsou tepelná odolnost, vysoká tvrdost za tepla, chemická odolnost atd.

Na trhu je celá řada vyměnitelných břitových destiček pro různé typy použití a je tedy úkolem technologa znát vlastnosti těžkoobrobitelných materiálů a následně vybrat vhodný nástroj a řezné podmínky takovým způsobem, aby obráběcí proces byl optimální z hlediska kvality, produktivity a z hlediska minimalizace výrobních nákladů.

Cílem této bakalářské práce je shrnutí poznatků z oblasti soustružení těžkoobrobitelných materiálů. V práci bude nejprve vysvětleno, jakým způsobem se dělí jednotlivé materiály. V dalších kapitolách budou řešeny požadavky na nástroj a stroj pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Následně bude v práci zhodnocen význam řezných podmínek při soustružení těžkoobrobitelných materiálů a uvedeny příklady řezných podmínek pro jednotlivé typy řezných materiálů.



obr:2-1 soustružení kalené oceli [40]

### 3 Charakteristika těžkoobrobitelných materiálů

#### 3.1 Rozdělení obráběných materiálů

Obráběné materiály se dělí podle normy DIN ISO 513 do šesti základních skupin, kdy každá z těchto skupin vyvolává kvalitativně stejný typ zatížení namáhání břitu a podobný typ opotřebení nástroje. Viz obr. 3-1.

Identifikační písmeno a barva	Hlavní materiály
<b>P</b>	Uhlíkové, legované, feritické a nástrojové oceli, uhlíková ocelolitina skupiny 26, nízko a středně legované ocelolitininy skupiny 27, feritické a martenzitické korozivzdorné oceli
<b>M</b>	Nerezové oceli (austenitické a feriticko austenitické oceli korozivzdorné, žáruvzdorné a žárupevné)
<b>K</b>	Šedá litina nelegovaná i legovaná, tvárná litina, temperovaná litina
<b>N</b>	Neželezné kovy, nekovy (hliníkové slitiny, hořčíkové slitiny, slitiny mědi, bronz, mosaz, keramika a jiné vysoce abrazivní nekovy)
<b>S</b>	Super slitiny a titanové slitiny (žárupevné speciální slitiny na bázi niklu nebo kobaltu, titanové slitiny)
<b>H</b>	Tvrdé materiály (uhlíkové nebo kalené oceli o tvrdosti 48 – 65 HRC, zušlechtnuté oceli s pevností nad 1500 MPa, nástrojové oceli, rychlořezné oceli, pružinové oceli, tepelně zpracované oceli, tvrzená litina, slitiny s tvrdou povrchovou vrstvou, slinuté karbidy, tvrdé niklové slitiny, atd.

Obrázek 3-1: Rozdělení obráběných materiálů podle DIN ISO 513 [21]

Tato práce je zaměřena na soustružení těžkoobrobitelných materiálů, které podle tohoto dělení spadají pod skupiny M, S a H. Dále se tedy zabývá pouze těmito skupinami materiálů.

##### 3.1.1 ISO-M

Korozivzdorné oceli jsou oceli obsahující alespoň 12% chromu, dále obsahují nikl, molybden a další legující prvky. Obrobitelnost korozivzdorných ocelí závisí na množství legujících prvků. Typická vlastnost těchto ocelí je zvýšená teplota vznikající při jejich obrábění. Kvůli tomu je břit nástroje vystaven vyšším teplotám a dochází k opotřebení ve tvaru vrubu a tvoření nárůstku. Zvýšený obsah dusíku v austenitické struktuře napomáhá zvyšovat odolnost proti korozi, avšak působí nepříznivě z hlediska obrobitelnosti, protože narůstá velikost deformačního zpevnění. Pro zlepšení obrobitelnosti se přidává síra. Relativně velký obsah uhlíku (více než 0,2%) způsobuje velké opotřebení hřbetu nástroje. [15, 21]

Obrobitelnost korozivzdorných ocelí se liší v závislosti na struktuře oceli. Feritické a martenzitické oceli vykazují dobrou obrobitelnost. Na druhé straně austenitické oceli vykazují horší obrobitelnost. Při jejich obrábění dochází k mechanickému zpevnění, ke vzniku tvrdého povrchu a velmi tvrdých třísek. Z tohoto důvodu dochází na nástroji k opotřebení ve tvaru vrubu. Dochází také k adheznímu opotřebení a vzniku nárůstku. Tento druh ocelí tvoří dlouhé a spojitě třísky. [15, 21]

Je vhodné použít ostré břity s pozitivní geometrií. Je třeba, aby řez probíhal pod mechanicky zpevněnou vrstvou. Dále je vhodné použití chladicích kapalin, protože vzniká velké množství tepla. [15]

### **Duplexní korozivzdorné oceli**

Dále do této skupiny spadají tzv. duplexní korozivzdorné oceli. Jedná se o oceli na bázi chromu, které jako přísadu obsahují nikl. Dochází tak k vytvoření smíšené feriticko-austenitické struktury. Vykazují ještě lepší hodnoty korozivzdornosti. Obvyklý obsah chromu je mezi 18-28% a 4-7% niklu. Obrobitelnost těchto ocelí je velmi špatná. Vzniká tvrdá tříška, narůstají řezné síly a vzniká velké množství tepla. Dochází k opotřebení ve tvaru žlábků. [15, 21]

Je vhodné použít malý úhel nastavení ostří, díky kterému se minimalizuje opotřebení ve tvaru vrubu a tvorba otřepů. Tento materiál klade zvýšené nároky na tuhost upnutí obrobku a nástroje. [15, 21]

### **3.1.2 ISO-S**

Žáruvzdorné slitiny zahrnují celou škálu různých legovaných ocelí a materiálů na bázi niklu, titanu, kobaltu (Inconel, Nimonic...). Typickou vlastností těchto materiálů je zpevňování během jejich obrábění, což vede ke značnému opotřebení nástroje a vzniku velkých teplot při obrábění. Obdobně jako materiály typu M, mají tyto materiály snahu ulpívat na břit nástroje a tvořit nárůstky. Jejich obrábění je ještě mnohem obtížnější a životnost břitu kratší. [15]

V dnešní době se používá dělení na HRSA (žáruvzdorné slitiny) a titan. Žáruvzdorné slitiny se dále dělí na slitiny na bázi niklu, na bázi železa a na bázi kobaltu. Vlastnosti při obrábění se u jednotlivých slitin velmi liší v závislosti na použitých legujících prvcích a na průběhu výroby, případně na procesech, kterými prošly během výroby. Procesy jako je žíhání a stárnutí výrazně ovlivňují obrobitelnost. Při umělém stárnutí dochází k precipitačnímu vytvrzování, které pak brání skluzu materiálu a obrábění se stává obtížnějším. Vzniká většinou článkovitá tříška. Požadavky na nástroj a stroj jsou velmi vysoké, neboť vznikají velké řezné síly. [15]

U slitin HRSA je vhodné použití VBD s velkým úhlem nastavení a pozitivní geometrie břitové destičky. Díky tomu se předchází k tvorbě opotřebení ve tvaru vrubu. Ve většině případů je nutno použít chladicích kapalin ke snížení vysokých teplot vznikajících obráběním. V závislosti na použité technologii, v našem případě soustružení, je možno použití řezné keramiky. [15]

Obrobitelnost slitin titanu je obdobná. Jsou kladeny vysoké nároky na nástroj a stroj. Titan má velmi špatnou tepelnou vodivost, která zapříčiňuje vznik velkých teplot v oblasti řezu. Je nutné věnovat pozornost výběru vhodného materiálu při obrábění titanu z několika důvodů. Je třeba zohlednit vysoké teploty v oblasti řezu. Materiál nástroje by neměl obsahovat mnoho kobaltu, a taktéž by neměl reagovat s titanem. Doporučuje se vybrat

jemnozrnný nepovlakovaný slinutý karbid. Volí se pozitivní geometrie s dobrou houževnatostí bříty. [15]

### Titan a slitiny titanu:

Titan kombinuje vysokou pevnost s malou hustotou a výbornou odolností proti korozi. Tato kombinace vlastností znamená, že titan a jeho slitiny jsou navzdory jeho ceně značně používány v mnoha oblastech, jako jsou letecký průmysl, turbíny, vysoce namáhané díly motorů, lékařství. [40]

Slitiny s přísadami hliníku, cínu, zinku tvoří hexagonální strukturu - tzv.  $\alpha$  slitiny. Svými vlastnostmi se hodí např. pro proudové motory. Přidáním vanadu, chromu, molybdenu a železa tvoří titan slitiny s kubickou prostorově středěnou mřížkou - tzv.  $\beta$  slitiny, které se vyznačují vyšší pevností a vyšší hustotou. Kompromisem je dvoufázová slitina ( $\alpha+\beta$ ) např. TiAl6V4, která je oblíbená díky vhodnému poměru pevnosti a hustoty. [40]

Ve srovnání s jinými lehkými kovy má titan speciální pozici v oblasti obrábění. Kvůli svým mechanickým a fyzikálním vlastnostem (nízká tepelná vodivost, nízký modul pružnosti) se řadí mezi těžkoobrobitelné materiály. [40]

Teplu vznikající při obrábění titanu je z důvodu velmi špatné tepelné vodivosti rozváděno do malé oblasti kolem místa řezu. Tříska má tendenci ulpívat na bříty nástroje. Nejsnáze se obrábí  $\alpha$ -slitiny, naopak nejhůře  $\beta$  [40]. Titan snadno reaguje například s kyslíkem, což může vést ke vzplanutí nebo výbuchu titanového prachu. [40].

#### 3-1: Doporučené řezné podmínky při obrábění různých titanových slitin[40].

Obráběný materiál	Nástrojový materiál	Řezná rychlost $v_c$ [m/min].	Posuv na otáčku $f_z$ [mm/ot].
čistý titan (99,8%)	HSS	30-75	0,13-0,4
	SK	50-170	0,13-0,5
$\alpha$ slitiny (stárnutí) např.: TiAl6V4, $\alpha+\beta$ slitiny (stárnutí) např.: TiAl7Mo4	HSS	6-24	0,13-0,4
	SK	18-80	0,13-0,4
$\alpha$ slitiny (stárnutí, kalení) např.: TiAl6V4, $\alpha+\beta$ slitiny (stárnutí, kalení) např.: TiAl7Mo4	HSS	9-20	0,13-0,4
	SK	12-60	0,13-0,4
$\beta$ slitiny (stárnutí) např.: Ti V8 Cr6 Mo4 Zr4 Al3	HSS	8-12	0,13-0,4
	SK	15-50	0,13-0,4
$\beta$ slitiny (stárnutí, kalení) např.: Ti V8 Cr6 Mo4 Zr4 Al3	HSS	8-10	0,13-0,4
	SK	12-35	0,13-0,4

### Slitiny na bázi niklu

Díky přidanému titanu a hliníku mají tyto slitiny značnou odolnost vůči vysokým teplotám. Přidáním kobaltu do těchto slitin je možné teplotní odolnost ještě zvýšit. Dalšími legujícími prvky jsou molybden a wolfram. [40]

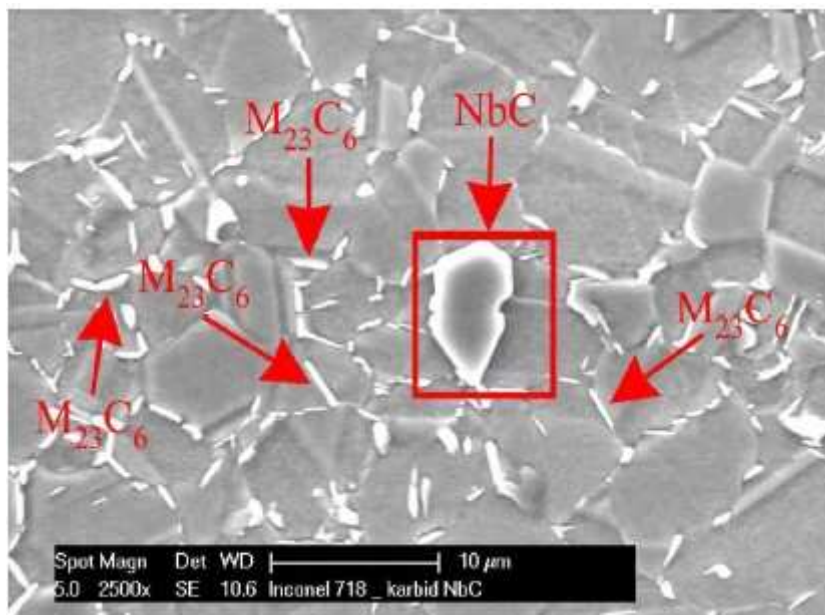
Díky přidanému chromu, molybdenu a mědi jsou niklové slitiny odolné korozi. Oproti austenitickým ocelím dosahují niklové slitiny lepších hodnot odolnosti proti korozi i chemické odolnosti. Díky tomu se tyto slitiny hodí pro použití v nejnáročnějších podmínkách jako je energetický, letecký nebo chemický průmysl. [40]

Slitiny na bázi niklu se řadí mezi těžkoobrobitelné materiály z důvodu zpevňování při obrábění, které je typické pro tyto slitiny. Důsledkem toho jsou vysoké řezné teploty. V případě použití nástrojů ze slinutých karbidů se doporučuje, obrábět slitiny na bázi niklu nástroji s ostrou geometrií. Je možné zvolit nástroje z řezné keramiky, které budou mít však rozdílnou geometrii než nástroje ze slinutých karbidů. Při obrábění těchto slitin se tvoří na břitu nástroje nárůstek. Nástroje vhodné pro obrábění niklových slitin by měli mít relativně velký úhel čela (doporučuje se 5 až 15°) a tomu odpovídající úhel hřbetu (6 až 10°).[40]

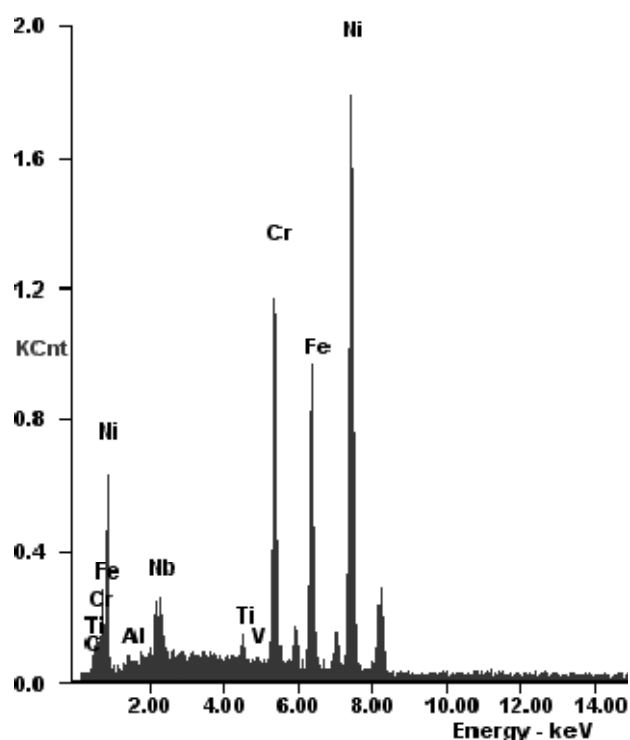
Typickým představitelem těchto materiálů je Inconel 718. Struktura a chemické složení je zobrazeno na obr. 3-2 a na obr. 3-3.

3-2: Doporučené řezné podmínky při soustružení niklových slitin [40]

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



Obrázek 3-2: struktura Inconelu 718 [13]



Obrázek 3-3: EDAX profil Inconelu 718 [46]



## Slitiny na bázi kobaltu

Kobaltové slitiny se používají jako konstrukční materiál v oblastech, kde je potřeba dobré odolnosti vůči vysokým teplotám. Trendy směřují k používání kobaltu jako dalšího prvku ve slitinách niklu, kterou je například výše zmiňovaný Nimonic. Slitiny na bázi kobaltu se hodí k použití v oblastech, kde se očekává zvýšené namáhání (např. kovací zápustky). Kobaltové slitiny jsou dnes zastoupeny v mnoha oblastech. Typickou kobaltovou slitinou je Stellite. [40]

Mezi nejdůležitější legující prvky mimo oceli a uhlíku jsou další žáruvzdorné kovy jako je chrom, nikl, wolfram tantal a niob. [40]

Pro obrábění kobaltových slitin se používá destiček třídy K. Při obrábění slitin, jako je Stellite, je vhodné použít destičky z CBN z důvodu možnosti použití vyšších řezných rychlostí. Při soustružení je tak docíleno stejné životnosti nástroje, avšak za 3x vyšší řezné rychlosti. Je vhodné použít řezné oleje ke zlepšení obrobitelnosti těchto slitin. Stejně jako niklové slitiny mají i slitiny na bázi kobaltu sklon ke zpevňování během obrábění. [40]

### 3-3: Doporučené řezné podmínky při soustružení kobaltových slitin [40]

Nástrojový materiál	Řezná rychlost $v_c$ [m/min]	Posuv $f_z$ [mm/ot]	Hloubka řezu $a_p$ [mm]
HSS	3-8	0,1-0,3	0,2-2
SK	8-15		
CBN	15-30		

### 3.1.3 ISO-H

Do této skupiny jsou řazeny oceli o vyšších tvrdostech (45-65 HRC) a tvrzené litiny (400-600 HB). Této tvrdosti je dosaženo kalením a popouštěním. Mezi těžkoobrobitelné materiály se řadí právě kvůli své tvrdosti. Při jejich obrábění, opět jako u skupin M, S, vzniká velké množství tepla a působí na břit velmi abrazivně. [15]

Na obrobitelnost materiálu má dále vliv tepelné zpracování daného materiálu jako je žhání, kalení a způsob výroby (kování, odlévání, atd.)

Kvůli výše uvedeným vlastnostem těžkoobrobitelných materiálů kladou tyto materiály zvýšené nároky na obráběcí stroj, a zvláště pak na nástroj a řezný materiál. Je třeba vybrat správné technologické podmínky podle typu obráběného materiálu. Tato problematika bude podrobněji rozebrána v dalších kapitolách.

### 3.2 Obrobitelnost

Obrobitelnost je vlastnost materiálu být dobře obráběn. Rozumí se tím souhrn vlastností (chemických, mechanických a dalších) obráběného materiálu z hlediska jeho vhodnosti pro výrobu součástí konkrétním způsobem. Tyto vlastnosti určují, jak jednoduché nebo naopak obtížné je obrábět obrobek při použití řezných nástrojů. Tyto vlastnosti se významně podílejí na kvalitě výsledného opracovaného povrchu. Pojem obrobitelnosti nelze jednoduše určit z důvodu různosti jednotlivých operací. Stejně tak nelze obrobitelnost měřit na základě srovnání hodnot. Vhodnějším způsobem, jak určovat obrobitelnost jednotlivých materiálů, se ukázalo uspořádání vlastností, které ovlivňují proces obrábění do porovnávacích tabulek. [15, 16]

Mezi hlavní faktory ovlivňující obrobitelnost patří [16]:

- způsob výroby
- tepelné zpracování materiálu
- chemické složení – vliv příměsí
- metoda obrábění
- řezné podmínky
- geometrie nástroje – kvalita břitu
- upnutí nástroje – kvalita držáku
- přítomnost metalurgických vměstků

Lepší obrobitelnost lze dosáhnout změnou některých z výše uvedených faktorů.

Obrobitelnost se zjišťuje pomocí praktických zkoušek, při kterých je třeba uvážit [16]:

- mikrostrukturu materiálu
- sklon materiálu k ulpívání na břitu nástroje
- typ obráběcího stroje
- stabilitu
- hlučnost
- životnost nástroje

Kombinací znalostí materiálu a výsledků praktických zkoušek obrábění lze získat dobrý základ hodnocení obrobitelnosti. Podle typu výroby může tento základ, který se vztahuje buď na jednotlivý speciální případ obrábění, nebo na celou výrobu, podstatně zlepšit chod výroby. [15,16]

### 3.3 Vlastnosti materiálů obrobku

Mezi nejdůležitější vlastnosti ovlivňující obrobitelnost patří [16]:

- Tvrdost a pevnost
- Tvárnost
- Tepelná vodivost
- Zpevnění za studena
- Vměstky
- Přísady pro zlepšení obrobitelnosti

### **Tvrdość a pevnost**

Obecně platí, že v případě tvrdosti a pevnosti jsou příznivé nízké hodnoty. Toto neplatí v případě obrábění materiálů, které mají tendenci tvořit dlouhou třísku, a u kterých dochází k tvorbě nárůstku na břitu nástroje. Vlivem těchto nežádoucích jevů je nepříznivým způsobem ovlivňována kvalita výsledného povrchu. Dochází k tvorbě otřepů a trvanlivost břitu nástroje je snížena. Vyšší tvrdost může mít pozitivní účinek v případě, kdy se jedná o důsledek tváření materiálu za studena. [16]

### **Tvárnost**

Positivní vliv mají většinou nízké hodnoty tvárnosti. Příznivě se podílejí na tvorbě třísky. Vzniká krátká tříska s dobrou lámavostí. Při takto utvářené třísce lze lépe využít výkon motoru obráběcího stroje. S tažností úzce souvisí i tvrdost. Platí, že čím větší vykazuje materiál hodnoty tvrdosti, tím menší jsou hodnoty tažnosti a naopak. Platí, že dobrá obrobiteľnosť je většinou vhodným kompromisem mezi tvrdostí a tažností materiálu. [16]

### **Tepelná vodivost**

Pokud obráběný materiál vykazuje vysoké hodnoty tepelné vodivosti, znamená to, že teplo vznikající při obrábění materiálu je rychle odváděno z místa řezu. Z hlediska obrobiteľnosti jsou tedy vyšší hodnoty tepelné vodivosti výhodné. [16]

### **Zpevňování za studena**

Zpevňování za studena vzniká při plastickém tváření kovů, kdy dochází ke zvyšování pevnosti. Rychlost, jakou je daný materiál zpevňován, ovlivňuje výslednou tvrdost materiálu. Platí, že čím rychleji probíhá zpevňování materiálu, tím rychleji probíhá zvyšování pevnosti v poměru k úbytku deformační rychlosti. Kromě rychlosti, jakou zpevňování za studena probíhá, závisí pevnost také na tom, jaké sklony daný materiál obrobku má ke zpevňování za studena. Materiály, u kterých dochází ke vzniku velké rychlosti tváření za studena, jsou austenitické korozivzdorné oceli a některé žárovevné slitiny. Naopak materiály, jako jsou uhlíkové oceli, jsou typickými představiteli materiálů, u kterých tváření za studena probíhá velmi pomalu. Čím vyšší je hodnota rychlosti zpevňování materiálu plastickou deformací za studena, tím větší je nutné vynaložit úsilí, na utváření třísky. Dalším výsledkem zpevňování materiálu tvářením za studena, je vznik výrazně tvrdší vrstvy na povrchu obrobku, která má za následek silné namáhání břitu. Vhodnou změnou geometrie břitu lze měnit zatížení břitu. [16]

### **Vměstky**

Makrovměstky jsou takové vměstky, u kterých se jejich velikost pohybuje okolo 0,15 mm. Jsou typickým znakem pro méně kvalitní oceli, pocházející z nečistot v peci, případně z nedostatečného odstranění strusky. Tyto vměstky bývají obvykle velmi tvrdé a mají značně abrazivní účinek na břit obráběcího nástroje. Z tohoto důvodu je vhodné zvolit jiný typ materiálu, ve kterém se tyto vměstky nevyskytují. [16]

Mikrovměstky jsou obsaženy v každém materiálu. Jejich dělení je možné provést následovně[16]:

- Nežádoucí vměstky jsou oxidy hliníku ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) a karbidy titanu (TiC). Jsou tvrdé a abrazivní.
- Méně žadoucími vměstky jsou oxidy železa a manganu (FeO, MnO). Mají vyšší hodnotu tváření než předchozí skupina.
- Žádoucí vměstky jsou takové vměstky, které při řezném procesu vytvářejí díky svým vlastnostem příznivé prostředí. Typickým příkladem jsou silikáty, které měknou při vysokých rychlostech vznikajících při obrábění a v zóně řezu vytvářejí vrstvu, která snižuje opotřebení břitu nástroje.

### **Přísady ovlivňující obrobiteľnosť**

Legující prvky jsou do slitin přidávány selektivně podle vlivu na požadované mechanické nebo tepelné vlastnosti. Následující část popisuje vliv některých nejdůležitějších prvků na mechanické vlastnosti ocelí. [40]

**Chrom a molybden** zlepšuje zpevňující vlastnosti ocelí a následně má vliv na jejich obrobiteľnosť. V případě cementovaných a tepelně zpracovaných ocelí má vliv na změnu jejich struktury a pevnosti. V případě ocelí s větším obsahem uhlíku se tyto prvky formují do pevných karbidů, které mohou vést ke zhoršení řezných vlastností. Wolfram má podobný účinek. [40]

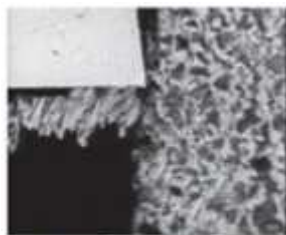
**Nikl** má vliv na pevnost ocelí a zvyšuje houževnatost, což má za následek zhoršení obrobiteľnosti, a to zejména u austenitických slitin s vyšším obsahem niklu. [40]

**Křemík** zvyšuje pevnost feritu a například ve spojení s hliníkem se formuje do tvrdých oxidů křemíku (tzv. silikátů). To může mít za následek zvýšené opotřebení nástroje. [40]

Přidáním **fosforu** je dosahováno krátké a křehké třísky. Při obsahu 0,1% má fosfor pozitivní vliv na obrobiteľnosť. S rostoucím obsahem fosforu se zvyšuje opotřebení nástroje navzdory lepším kvalitám povrchu obrobku. [40]

**Titan a vanad** mohou i ve velmi malém množství značně zvýšit pevnost slitiny. Z důvodu vysokého zjemnění zrna je nutno počítat s většími řeznými silami a špatnou tvorbou třísky. [40]

**Síra** je typickou přísadou zlepšující obrobiteľnosť materiálu. Ačkoliv má velmi malou rozpustnost v železe, tvoří v závislosti na obsahu prvků v oceli stabilní sulfidy, například sulfid manganu MnS. Tyto sulfidy jsou žadoucí, neboť vykazují menší tvrdost než okolní materiál. V průběhu obrábění dochází k deformaci těchto sulfidů a následně k lepšímu oddělování třísky (krátká, lámavá). Dochází ke zlepšení kvality povrchu. Samotný podíl síry v materiálu ovšem neznamená z hlediska obrobiteľnosti nic. Důležitým faktorem ovlivňující obrobiteľnosť materiálu je uspořádání jednotlivých sulfidových vměstků v materiálu obrobku. Spolu s rozmístěním vměstků má vliv na obrobiteľnosť materiálu také velikost, tvar a rozvrstvení vměstků. [40] Obsah síry se liší podle druhu oceli. U skupin ocelí se zlepšenou obrobiteľností se obsah pohybuje v intervalu 0,015 až 0,03 %. U automatových ocelí je obsah síry zvýšen na 0,15 až 0,3 %. Limitní množství síry je 0,3%. [30]



obsah síry 0,021 % -  
souvislá tříška



obsah síry 0,17 % -  
zvýšená lámavost třísky

3-4: Vliv obsahuj síry na tvorbu třísky [40]

**Mangan** zvyšuje tvrdost a pevnost materiálu. Následkem vyšší afinity k síře dochází k tvorbě výše zmíněných sulfidů. U oceli s nižším obsahem uhlíku a obsahem manganu kolem 1,5% je dosahováno příznivých hodnot obrobiteľnosti z důvodu dobré tvorby třísky. [40]

**Olovo** má relativně nízký bod tavení a je v oceli obsaženo ve formě submikroskopických inkluzí. Během obrábění se objevuje mezi obrobkem a nástrojem ochranná olověná vrstva, která redukuje opotřebení nástroje a specifické řezné síly. Tříška je křehká a krátká. [40]

Tab.:3-4: vliv přísad na obrobiteľnost materiálu [16]

Negativní vliv na obrobiteľnost	Pozitivní vliv na obrobiteľnost
Mn	Pb
Ni	S
Co	P
V	
C<0,3 %	C 0,3-0,6 %
C>0,6%	
Mo	
Nb	
W	
Cr	

Mezi ostatní faktory, které mohou mít vliv na obrobiteľnosť, patrí[16]:

- struktura materiálu
- stav obrobku
- stav povrchové vrstvy

### Struktura materiálu

Struktura materiálu môže ovplyvňovať obrobiteľnosť v prípade, že obsahuje štruktúru, ktorá vykazuje vyššie hodnoty abrazivity. Abrazívnymi zložkami v oceli sú predovšetkým karbidy. Podľa množstiev a rozmiestnení ovplyvňujú obrobiteľnosť. Podľa množstiev uhlíku rozlišujeme tri základné druhy štruktúr[16]:

- ferit
- perlit
- cementit

Ferit je mäkký ťažný, cementit naopak tvrdý a abrazívny. Perlit je tvorený tenkými plátkami feritu a cementitu. Množstvo feritu, perlitu, cementitu je závislé na množstve uhlíku obsaženom v materiáli. Najväčší podiel na opotrebení bŕitu obrábacieho nástroja má cementit. Již malé množství značně snižuje trvanlivost bŕitu nástroja, a tudíž zhoršuje obrobiteľnosť materiálu. [16]





### Stav obrobku

Určité tepelné spracovanie môže mať vplyv na štruktúru materiálu obrobku, a to nejen spôsobom ovplyvňujúcim jeho mechanické vlastnosti, ale i vlastnosti s vplyvom na obrobiteľnosť. V tab. 3-5 je shrnutí rôznych tepelných spracovaní a jejich vplyv na obrobiteľnosť oceli s ohľadom na opotrebení nástroja a formaci třísky. [16,40]

Tab.:3-5: vplyv tepelného spracovania na obrobiteľnosť[40]

Tepelné spracovanie	Struktura materiálu	vplyv na obrobiteľnosť
normalizačne žiháno	Austenitizace a chladnutí na vzduchu. Pravidelná a jemná štruktúra materiálu z dôvodu rekrytalizácie.	V závislosti na obsahu uhlíku v oceli: ferit – špatná lámavost třísky, nízké opotrebení perlit – lepší lámavost třísky, vysoké opotrebení
plně žiháno	Hrubé zrno, štruktúra s uzavřenou sítí feritu s včleněným perlitom a bainitem, snížení pevnostních vlastností	Relativně nízké opotrebení nástroja, dobrá lámavost třísky, dobrá kvalita povrchu
jemně žiháno	Snížení tvrdosti materiálu, feriticko perlitická matrice s globulárním cementitem	Nízké opotrebení nástroja, se zvyšujícím se obsahem feritu se zhoršuje lámavost třísky
kaleno	Austenitizace a rychlé ochlazení – změna austenitu na martenzit, zvýšení materiálové tvrdosti a pevnosti	Vysoké opotrebení nástroja při použití konvenčních řezných materiálů, dobrá lámavost třísky
kaleno popouštěno	Martenzit je narušen opakovaným zahřátím na vybranou teplotu a následně chlazen	Obrobiteľnosť se zlepšuje s vyšším narušením martenzitu.

Tab.:3-6: struktura oceli C60, různé tepelné zpracování[40]

			
počáteční stav	normalizačně žháno	žháno	kaleno

## 4 Požadavky na nástroj a stroj při soustružení těžkoobrobitelných materiálů

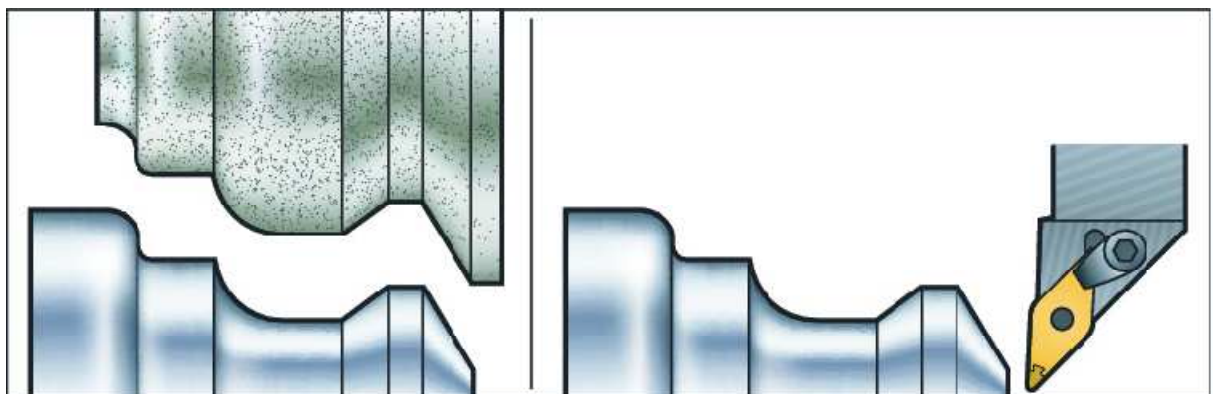
Požadavky kladené na nástroj případně na stroj jsou odvislé od typu obráběného materiálu, jak již bylo zmíněno v kap. 3. V této kapitole bude blíže rozebrána vhodnost jednotlivých typů materiálů nástroje, vhodná geometrii nástrojů a požadavky kladené na stroje při soustružení těžkoobrobitelných materiálů.

Soustružení těžkoobrobitelných materiálů má oproti dříve využívanému broušení mnoho kladů i záporů.

Mezi výhody patří [3]:

- snadné přizpůsobení se tvaru povrchu
- rychlá výměna nástroje
- více operací na jedno upnutí
- vysoký úběr materiálu
- možnost použití numerické kontroly CNC
- nízké náklady na obráběcí nástroje
- ekologická tříska

Příklad vhodného použití soustružení namísto tvarového broušení je zobrazen na obr. 4-1. Odpadá tak nutnost časově náročného tvarového přestřování brusných kotoučů. [15]



obr. 4-1: příklad použití soustružení namísto tvarového broušení [15]

### Nevýhody a omezení [3]:

- Oproti klasickému obrábění je cena nástroje na jednotku výrazně dražší.
- V některých případech není možné použít soustružení. Typickým příkladem je obrábění dlouhých obrobků. Ideální je délka L:D ne více jak 4:1. Částečně je možno tento problém řešit podpěrami, ale z důvodu velkých řezných sil dochází ke chvění.
- Nevýhodou je potřeba kvalitnějších obráběcích strojů. Tato potřeba negativně ovlivňuje náklady na obrábění.
- Další nevýhodou jsou jistá omezení při obrábění procesními kapalinami. Kapaliny se používají pro dosažení optimalizace řezného procesu. U některých materiálů je nutné používat procesní kapaliny, což vede ke zvyšování nákladů. Běžně se dnes v praxi vyskytují nástroje s tlakovým přívodem kapaliny (až 80 bar). Takto přiváděná kapalina příznivě ovlivňuje řezný proces, avšak nese s sebou požadavky na lepší parametry stroje.
- Těžkoobrobitelné materiály kladou vyšší nároky na nástroj, více ho opotřebovávají. Řešením je používat odolnější nástroje z řezné keramiky nebo slinutých karbidů, popřípadě deponovaných řezných materiálů.



Obrázek 4-2 pec pro slinování karbidů [8]



Obrázek 4-3 proces deponování nástrojů ve firmě Gühring[8]

## 4.1 Požadavky na nástroj při soustružení těžkoobrobitelných materiálů

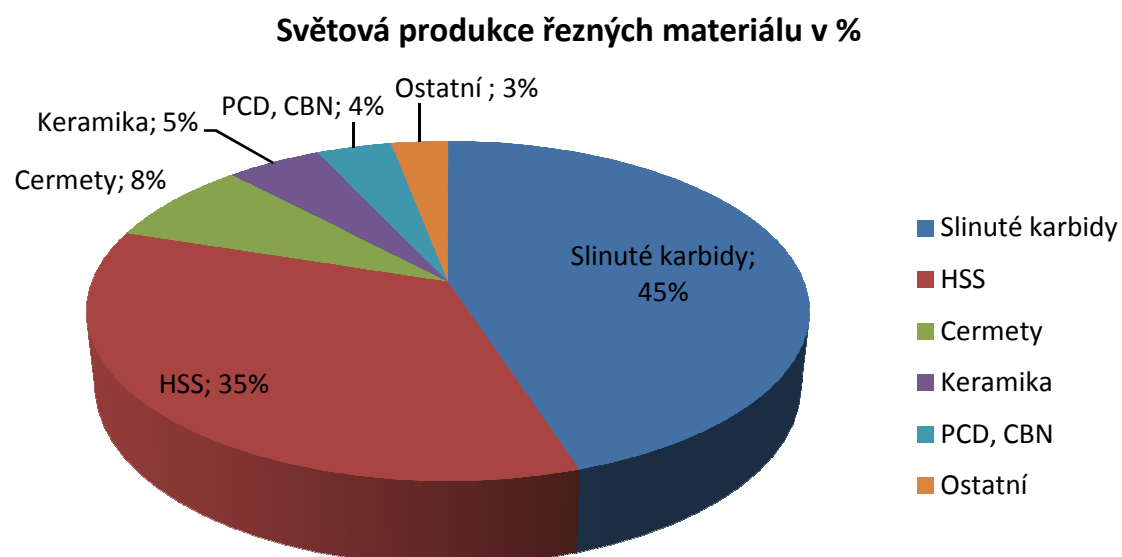
V současné době se v praxi většinou uplatňují nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami. Soustružení těžkoobrobitelných materiálů je technologicky náročné a použití monolitních nástrojů by bylo ekonomicky nevýhodné. V závislosti na obráběném materiálu se používají destičky ze slinutých karbidů, řezné keramiky, případně kubického nitridu bóru. Z ekonomického hlediska je použití nástrojů s VBD výhodnější z mnoha důvodů, proto se v této práci objevují pouze nástroje s VBD. Pro zvolení správného typu nástroje je potřeba zohlednit následující faktory [16]:

- typ operace obrábění
- obráběný materiál a tvar obrobku
- obráběcí stroj
- řezné podmínky
- výslednou jakost povrchu
- stabilitu technologie obrábění
- celkové náklady na obrábění



Mezi požadavky kladené na nástrojové materiály patří [4]:

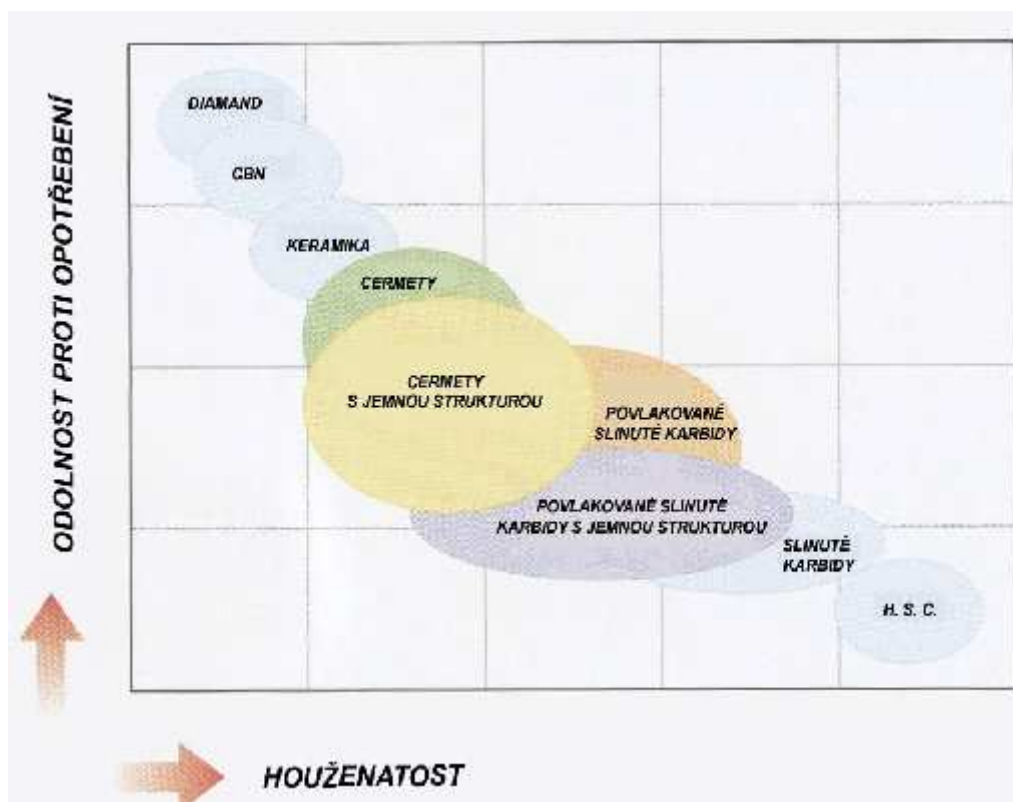
- odolnost proti opotřebení
- houževnatost nástrojového materiálu
- tvrdost za tepla
- odolnost vůči teplenému šoku
- tepelná roztažnost
- tepelná vodivost



4-4: Světová produkce řezných materiálů

#### 4.1.1 Přehled nejpoužívanějších materiálů pro výrobu nástrojů pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů

Rozdělení nástrojových materiálů pro třískové obrábění je zobrazeno na obr. 4-5.



4-5: rozdělení nástrojových materiálů pro třískové obrábění [4]

#### Řezná keramika:

Keramika je materiál převážně krystalický, složený v první řadě z anorganických sloučenin nekovového charakteru. Většina keramik jsou dobrými tepelnými izolátory. Keramika se vyznačuje poměrně malou hustotou, ale zároveň patří k vůbec nejtvrdším látkám [4].

Řezná keramika našla využití v oblasti obrábění těžkoobrobitelných materiálů s tvrdostí až 58-60 HRC, mezi které patří, jak již bylo uvedeno výše, například kalená ocel. Trend posledních let, snaha o zvyšování produktivity, má vysoké nároky na nástrojové materiály. Tudíž dochází k intenzivnímu vývoji a zdokonalování v oblasti nových typů tenkých otěruvzdorných vrstev – deponování keramiky. V současné době existuje mnoho různých vrstev o různém složení, které je upravené podle typu obrábění a obráběného materiálu [2,4].

Vývoj se zaměřuje na materiály, které při vysoké otěruvzdornosti a delší trvanlivosti dobře snášejí tepelné a dynamické namáhání při velkých řezných rychlostech a posuvech. Řezná keramika je materiál s mnohostranným využitím, ale není tak rozšířeným materiálem jako je dnes třeba slinutý karbid. Řezná keramika je využívána například pro materiály, jako jsou šedé litiny, kalená ocel, žárovečné a žáruvzdorné materiály. V jistých oblastech, jako je letecký, kosmický, automobilový průmysl, přišla řezná keramika ke značnému rozvoji. V automobilovém průmyslu se keramika používá ve výrobě pístů, ventilů, stěn válců,

výfukových potrubí a na dalších místech, na kterých je třeba vysoká žáruvzdornost a otěruvzdornost nástrojového materiálu [2,4].

Řezná keramika není rozdělena podle konkrétní normy, ale všeobecně je dělena podle chemického složení na dvě základní skupiny [16]:

- na bázi oxidu hlinitého ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )
  - čistou (oxidickou)
  - směšnou
  - vyztuženou
- na bázi nitridu křemíku ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )

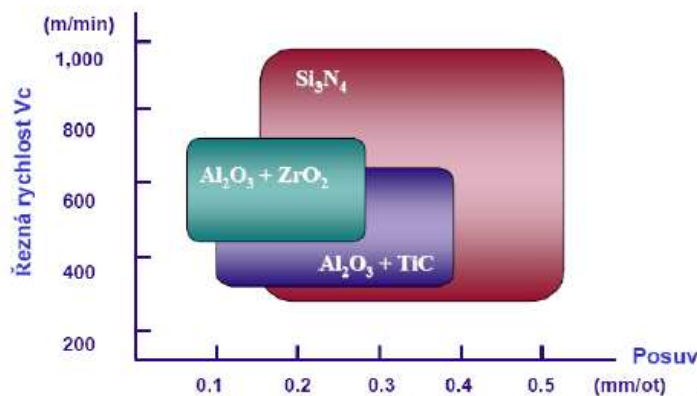
Čistá oxidická keramika se vyznačuje relativně nízkou pevností, houževnatostí a malou tepelnou vodivostí. Tyto vlastnosti jsou příčinou vylamování břitů při nepříznivých podmínkách obrábění [16].

Přidáním malého množství oxidu zirkoničitého je možné podstatně zlepšit uvedené vlastnosti čisté keramiky. Díky obsaženému zirkonu, a tudíž zlepšené houževnatosti spolu s tvrdostí, hustotou a stejnoměrnou velikostí zrna, se značně zvyšuje rozsah použití čisté oxidické keramiky. Barva keramiky lisované za studena je bílá, u keramiky lisované za tepla je šedá. [16].

Směšná keramika na bázi oxidu hlinitého získává přidáním kovové fáze (karbid titaničitý a nitrid titanu) vyšší odolnost proti teplenému šoku. Pro svou malou tepelnou vodivost je méně náchylný k lomu, avšak houževnatost těchto materiálů nelze srovnávat se slinutými karbidy. Lisováním za tepla vznikají destičky s černou barvou [16].

Vyztužená keramika (whiskerová keramika) je materiálem na bázi oxidu hlinitého vyztuženého whiskerem. Jedná se o vlákna z karbidu křemíku (v průměru  $1\mu\text{m}$  s délkou  $20\mu\text{m}$ ), která mají vysokou pevnost. Tímto vyztužením se mimořádně zvyšuje houževnatost, pevnost v tahu, odolnost proti tepleným šokům a současně tvrdost za tepla a odolnost proti opotřebení. Podíl whiskeru činí cca 30% materiálu. Lisováním za tepla vznikají destičky zelené barvy. Svými vlastnosti se hodí tento typ řezné keramiky pro obrábění žáruvzdorných slitin, kalené oceli, šedé litiny, a to i při obrábění přerušovaným řezem [16].

Neoxidická keramika na bázi nitridu křemíku je svým chováním při tepelném šoku a svou houževnatostí lepší, než keramika na bázi oxidu hlinitého. Oproti slinutým karbidům si tento materiál udržuje svou tvrdost i za velkých teplot [16].



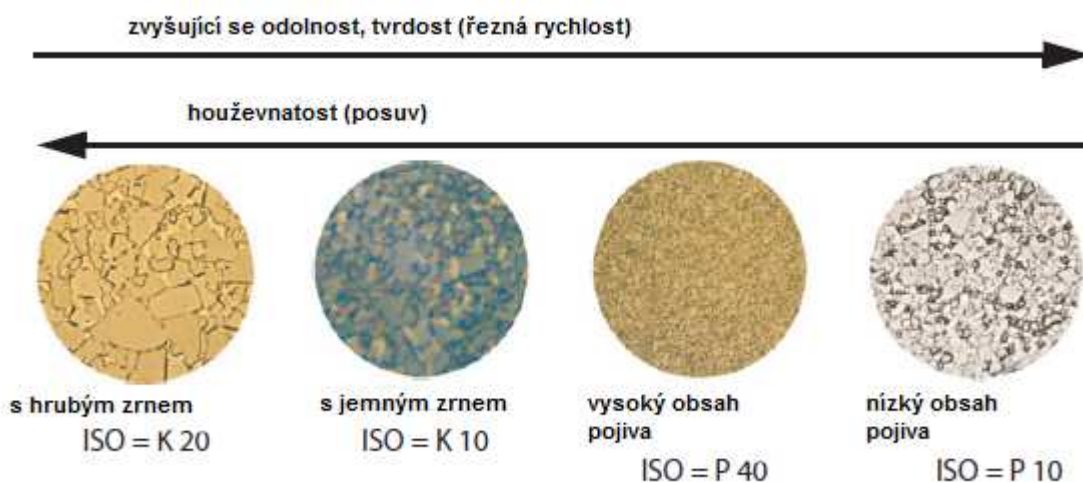
4-6: rozsah použití řezné keramiky [21]

### Slinuté karbidy:

Slinuté karbidy jsou materiály skládající se z karbidového základu a pojícího kovu. Základem pro výrobu všech SK je karbid wolframu (WC), pojícím kovem je kobalt (Co). Jako další složky jsou používány karbidy titanu (TiC), tantalu (TaC), niobu (NbC) a chromu (Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>). [40,11]

Karbidy se podle ISO dělí do 6 skupin [40,11]:

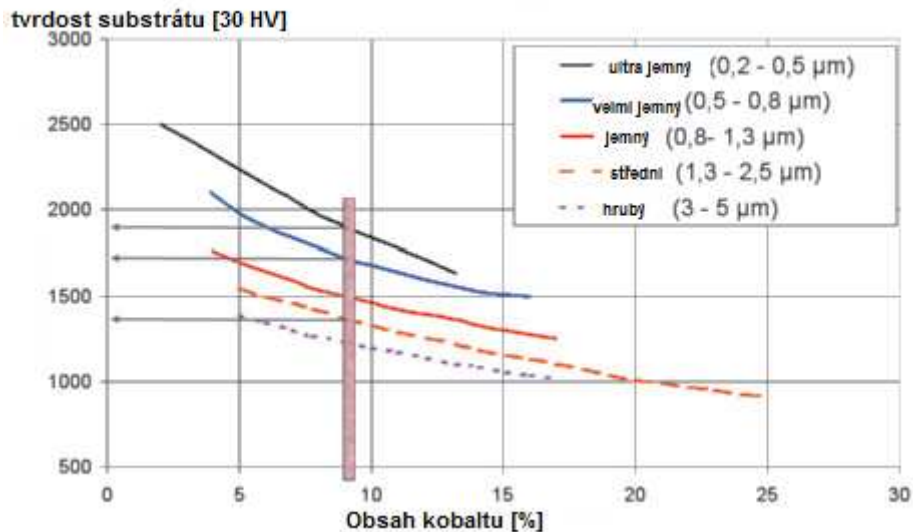
- P – pro materiály tvořící dlouhou třísku (např. uhlíkové oceli, slitinové oceli, feritické korozivzdorné oceli). Z důvodu větších řezných sil a značného opotřebení na čele nástroje obsahuje tato skupina karbidů velké množství TiC a TaC, které zlepšují odolnost proti vymílání na čele nástroje.
- M – pro materiály tvořící dlouhou a střední třísku (např. lité oceli, austenitické korozivzdorné oceli a tvárné litiny). Díky vysoké houževnatosti této skupiny se tyto destičky hodí pro hrubovací a přerušované řezy.
- K – pro materiály tvořící krátkou, drobnou třísku (např. šedá litina, nezelezná slitina a nekovové materiály). Jedinou tvrdou strukturální složkou zde tvoří karbid wolframu, který má za pokojové teploty srovnatelnou tvrdost s ostatními karbidy, avšak s rostoucí teplotou jeho tvrdost klesá. Z tohoto důvodu se skupina K nehodí pro materiály tvořící dlouhou třísku, při které vzniká větší množství tepla, které následně zatěžuje čelo nástroje.
- N – třída určená speciálně pro obrábění nekovových materiálů (např. hliník, plasty).
- S – pro těžkoobrobitelné materiály (např. titan, titanové slitiny, slitiny na bázi niklu, kobaltu).
- H – pro obrábění kalených ocelí a tvrzených litin.



4-7: struktura karbidů různých tříd [40]

Velikost tvrdých částic, které tvoří základ slinutých karbidů, se v závislosti na výrobci pohybuje v rozmezí 1-5  $\mu\text{m}$ . V případě, kdy jsou na nástroj kladeny vyšší nároky na tuhost, pevnost ostří, odolnost proti opotřebení, je vhodné použít karbidu s velikostí zrna 0,5-0,8  $\mu\text{m}$ . V poslední době je možné se setkat i s tzv. mikrokarbidy, u kterých se velikost zrna pohybuje v rozmezí 0,2-0,5  $\mu\text{m}$ . Jedná se především o karbidy na základě WC-Co. Změna velikosti zrna je způsob, jak lze dosáhnout lepších tvrdostí a pevnosti v ohybu nástroje, aniž by se měnil

obsah kobaltu. Obecně platí, že zvýšené množství kobaltu napomáhá zlepšovat houževnatost nástroje. [40]



4-8: charakteristika karbidů různých velikostí zrn [40]

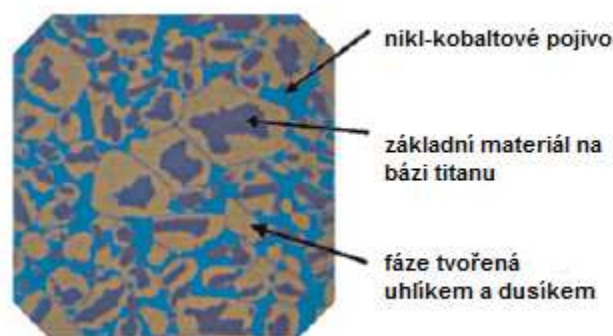
## Cermety

Jedná se o slinuté materiály tvořené tvrdou fází, zejména z TiC, TiN nebo TiCN. Cermety dovolují použití vyšších řezných rychlostí ve srovnání s konvenčními slinutými karbidy, protože TiC je termochemicky stabilnější než WC. [11]

Vlastnosti cermetů [40]:

- vysoká odolnost proti opotřebení hřbetu nástroje
- vysoká chemická stabilita a tvrdost i za vysokých teplot
- nízká tendence k vytváření nárůstku
- nízká tendence k oxidačnímu opotřebení

Díky pomalému opotřebení mají cermety dlouhou životnost a při jejich použití je dosahováno výborných přesností a povrchových vlastností obrobku. Používají se především při vysokých řezných rychlostech, nízkých rychlostech posuvu a stejně tak hloubky řezu. Pro nasazení cermetů je vhodné, aby byly řezné podmínky stabilní. Z toho vyplývá, že se hodí především pro dokončovací práce. [40]



4-9: struktura cermetů [40]

## Kubický nitrid bóru (CBN)

Kubický nitrid bóru se vyskytuje ve 3 různých verzích[40]:

- vyměnitelná břitová destička z CBN
- povlak CBN na karbidovém podkladu
- pájený řezný břit z CBN na karbidovém podkladu

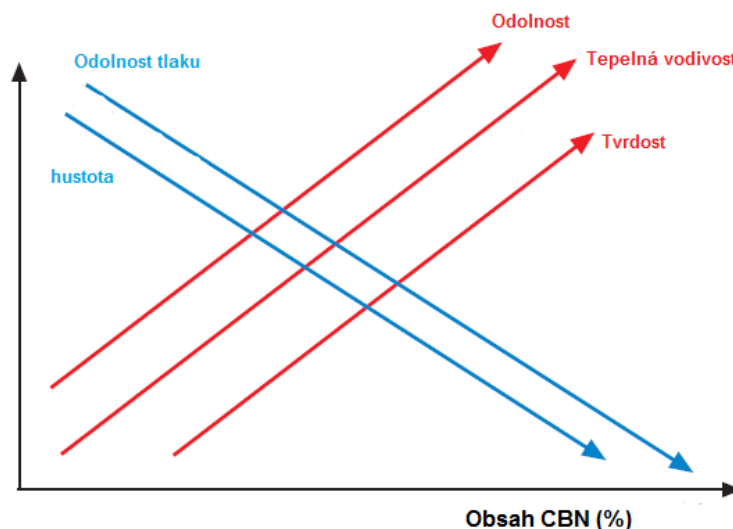
Mezi typické vlastnosti kubického nitridu bóru patří především vysoká tvrdost, a to i za vysokých teplot (až 2000 °C). Dále jsou to vlastnosti jako vysoká odolnost proti otěru a dobrá chemická stabilita během obrábění. Přestože je CBN relativně křehký materiál oproti slinutým karbidům a řezné keramice, dosahuje vyšší rázové pevnosti a je více odolný proti vylamování než keramické nástroje.[40]



4-10: Mikrostruktura CBN [40]

Vlastnosti nástroje z CBN se různí podle velikosti krystalu a dále pak podle obsahu a typu pojiva. Obecně platí, že nízký obsah CBN v kombinaci s keramickým pojivem vytváří lepší odolnost materiálu proti opotřebení otěrem a lepší chemickou stabilitu. Takovýto materiál je vhodný spíše pro dokončovací práce kalených ocelí a tvrzených litin. [40]

Naopak vysoký obsah CBN vede k lepší trvanlivosti nástroje. Použití takových materiálů je vhodné při náročných hrubovacích pracích, kdy dochází k většímu mechanickému a teplotnímu namáhání nástroje. Takové materiály jsou určeny především pro obráběcí procesy kalených ocelí, tvrzených litin a žáruvzdorných slitin. Rozdíl mezi obsahem CBN v nástroji je znázorněn na následujícím obrázku. [40]



4-11: vliv obsahu CBN na vlastnosti nástroje [40]

Tab.4-1: Oblasti použití různých CBN materiálů [40]

	Nízký obsah CBN	Vysoký obsah CBN
Charakteristické vlastnosti	obsah CBN <60% Nízká odolnost proti tlaku Nízká teplotní vodivost	obsah CBN 80-95% Vysoká odolnost proti lomu Vysoká teplotní vodivost
Doporučené použití materiálu	Dokončovací práce: <ul style="list-style-type: none"> <li>• kalená ocel</li> <li>• tvrzená litina</li> <li>• tvrdé povlakované materiály (na základě Co, Ni, Fe)</li> </ul>	Hrubovací práce: <ul style="list-style-type: none"> <li>• kalená ocel</li> <li>• tvrzená litina</li> <li>• tvrdé povlakované materiály (na základě Co, Ni, Fe)</li> </ul> Dokončovací práce: <ul style="list-style-type: none"> <li>• tvrzená litina</li> <li>• perlitická šedá litina</li> </ul>

Je doporučeno používat řezné nástroje z CBN pro materiály okolo 45-65 HRC. Jestliže je materiál měkčí, dochází na nástroji k většímu opotřebení. Z toho vyplývá vhodnost použití pro materiály, jako jsou již zmiňované kalené oceli a tvrzené litiny. Žáruvzdorné slitiny a superslitiny na bázi kobaltu, niklu.[40]

### Tenké deponované vrstvy

Tenké deponované vrstvy aplikované na řezný nástroj mají podstatný vliv na obráběcí proces. Deponováním vyměnitelných břitových destiček se významně zlepšují její vlastnosti, a tak i rozsah jejího použití. Výběrem vhodné vrstvy pro řezný nástroj je možno dosáhnout následujících výhod [40]:

- prodloužení životnosti nástroje
- snížení řezných sil
- zvýšení řezných rychlostí a posuvů
- zlepšení kvality povrchu
- zlepšení obrábění bez chlazení
- lze obrábět materiály až do tvrdosti 68 HRC

Vrstvy jsou nanášeny dvěma různými způsoby:

- CVD (Chemical vapour deposition)
- PVD (Physical Vapour Deposition)

CVD deponování se hodí pro celou škálu materiálů, zvláště pak slinutých karbidů. Tyto povlaky jsou zvláště vhodné pro nanášení ve více vrstvách. Vrstvy o různých složeních se snadno nanášejí.

HT-CVD je proces chemického deponování za vysokých teplot. Používá se pro většinu karbidových nástrojů. Charakteristickou vlastností tohoto typu povlaků je jejich velká adheze k základnímu substrátu. Nevýhodou tohoto způsobu je snížení houževnatosti karbidového jádra oproti nedeponovaným slinutým karbidům.

MT-CVD je proces chemického deponování za středních teplot, díky čemuž je tepelné zatížení nástroje menší. Díky tomu vzniká menší riziko vytvoření zkrhlé fáze, a tak vznikají

nástroje s odolnějším jádrem než při HT-CVD. Díky jejich vynikající houževnatosti nacházejí nástroje deponované touto metodou uplatnění především při frézování.

PA-CVD je deponování za nižších teplot. Tyto teploty samy o sobě nestačí pro uložení jemnozrné vrstvy, a tak se při tomto procesu přivádí další energie ve formě plazmy. Tento způsob umožňuje, aby chemické reakce probíhaly i při nižších teplotách. Díky nižším teplotám při tomto způsobu deponování zůstávají charakteristické vlastnosti slinutých karbidů v podstatě nedotčeny. Nástroje deponované metodou PA-CVD se hodí především pro obrábění materiálů se zvýšenou pevností v tahu při nepřerušovaném řezu.

Výhodou PVD deponování oproti metodám CVD je uložení žáruvzdorných látek při nízkých teplotách a je tedy šetrnější metodou k podkladovému materiálu

#### 4-2: vlastnosti různých povlaků [40]

typ vrstvy	vlastnosti
TiN	odolnost vůči opotřebení ve tvaru vrubu a odolnost difuznímu opotřebení
TiCN	tvrdost, trvanlivost
TiAlN	zvýšení tvrdosti za vyšších teplot, oxidační odolnost
DLC	tvrdost, dobré třecí vlastnosti, odolnost opotřebení otěrem, zvýšená korozivzdornost
Diamant	tvrdost, odolnost opotřebení otěrem

### 4.1.2 Soustružení jednotlivých těžkoobrobitelných materiálů

Požadavky kladené na jednotlivé nástroje při soustružení těžkoobrobitelných materiálů jsou odvislé od typu obráběného materiálu. V této části je respektováno rozdělení obráběných materiálů tak, jak bylo probráno v kapitole „Charakteristika těžkoobrobitelných materiálů“.

#### Soustružení korozivzdorné oceli:

##### třída ISO-M

##### *Feritické a martenzitické oceli*

Při soustružení feritických a martenzitických ocelí není třeba použití speciálních nástrojů, neboť obrobitelnost těchto ocelí je srovnatelná s obrobitelností nízkolegovaných ocelí.[15]

##### *Austenitické oceli*

Při soustružení austenitických ocelí se s úspěchem využívají materiály ze slinutých karbidů.

Aby se zamezilo opotřebení ve tvaru vrubu, které u těchto ocelí často vzniká, je doporučeno použití destiček s co největším poloměrem špičky, v lepším případě kruhových destiček nebo malého úhlu nastavení hlavního ostří. Dalším typickým jevem korozivzdorných ocelí je ulpívání obráběného materiálu na hřbetu nástroje, tvorba tzv. nárůstku. Nárůstek negativně ovlivňuje kvalitu obrobeného povrchu, zhoršuje tvorbu třísky a v neposlední řadě zapříčiňuje vylomení břitu při oddělování nárůstku od povrchu nástroje. Tento problém úspěšně eliminuje použití destiček s pozitivní geometrií viz. obr. 4-12. [15]





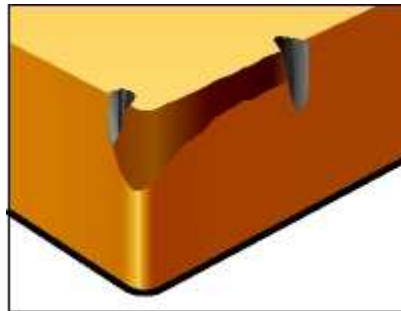
Obrázek 4-12: Pozitivní geometrie VBD [15]

### **Duplexní oceli**

V případě soustružení tzv. duplexních ocelí je vhodné zařadit do výroby nástroje s destičkami, které mají malé úhly nastavení hlavního ostří. Je vhodné používat geometrii, která nabízí dobrou pevnost v linii řezu, protože při obrábění austenitických ocelí vznikají nepříznivě vysoké řezné síly. [15]

### **Soustružení HRSA a titanu třída ISO-S:**

Většinou se volí řezné nástroje ze slinutých karbidů nebo řezné keramiky. Obrábění žáruvzdorných vysokolegovaných slitin a titanu klade speciální požadavky na geometrii nástroje a na řezné podmínky. Tak jako u dalších těžkoobrobitelných materiálů vzniká při obrábění těchto slitin opotřebení nástroje ve tvaru vrubu (viz obr. 4-13). V důsledku tohoto opotřebení je výsledná kvalita obrobeneho povrchu špatná. Řešení tohoto problému je obdobné jako u dalších těžce obrobitelných materiálů. Používají se zejména kruhové destičky, které úspěšně zamezují tomuto problému, případně lze opět použít destiček s menším úhlem nastavení hlavního ostří. Jako další možnost se jeví úprava řezné rychlosti, případně je možné zvolit houževnatější materiál. [15]



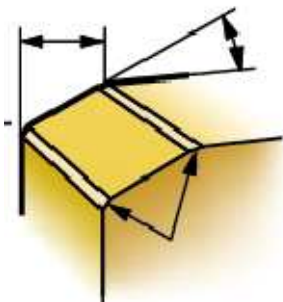
Obrázek 4-13: Poškození břitu nástroje ve tvaru vrubu [15]

### **Tvrzené součásti třída ISO-H:**

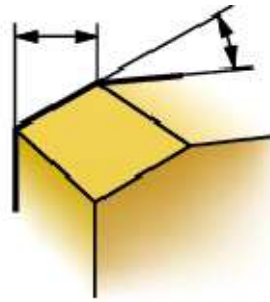
Obrábění těchto materiálů je typickým příkladem, kdy bylo nahrazeno broušení soustružením. Soustružení je prokazatelně ekonomicky výhodnější variantou. Šetří se čas na samotný proces úběru materiálu, což ve výsledku snižuje celkový výrobní čas obrobku. Zvyšuje se flexibilita nástroje, kdy je jedním nástrojem možno obrábět celou řadu různých tvarových ploch. [15]

Jako vhodný materiál pro obrábění tvrdých součástí se používá slinutý karbid, řezná keramika a CBN. Volba řezného materiálu je odvislá od tvrdosti obráběné plochy. Obecně platí, že slinuté karbidy je možno použít do tvrdostí 50 HRC obráběného materiálu. V případě vyšších tvrdostí se doporučuje použití řezné keramiky, která je schopna obrábět i materiály o

tvrdostech 50-60 HRC. Řeznou keramikou je dosahováno průměrné kvality obrobené plochy. Pokud je kladen požadavek na výsledný povrch v lepší kvalitě, je vhodné použití destiček z kubického nitridu bóru (CBN). Při obrábění kubickým nitridem bóru musíme dbát na to, aby obráběný materiál nebyl měkký než 48 HRC. Při obrábění pomocí kubického nitridu bóru se osvědčily dvě základní geometrie destiček. První typ S (obr. 4-14) nabízí vysokou pevnost řezné hrany. Tato geometrie je velmi odolná proti vzniku mikroskopických trhlin, avšak nenabízí nejlepší kvalitu povrchu. V případě potřeby nejvyšší jakosti výsledného povrchu se doporučuje použití druhého typu. Typ T (obr. 4-15) nemá oproti typu S honované hrany. Z tohoto důvodu je možné použití při menších řezných silách, avšak tato geometrie eliminuje tvorbu ořepů a tvoří lepší kvalitu obráběné plochy. [15]



4-14: Typ S [15]



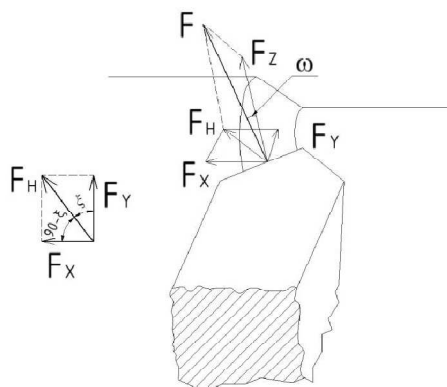
4-15: Typ T [15]

## 4.2 Požadavky na stroj při obrábění těžkoobrobitelných materiálů

Mezi hlavní požadavky kladené na obráběcí stroj při obrábění těžkoobrobitelných materiálů jsou stejně jako u jiných typů obrábění především vysoká produktivita a dokonalá kvalita výsledného povrchu obrobku. Ostatní požadavky, jako jsou provozní spolehlivost, trvanlivost, snadná ovladatelnost, účinnost, úzce souvisejí s dvěma hlavními požadavky a jsou takřka samozřejmostí.

Jak bylo napsáno výše, při obrábění těžkoobrobitelných materiálů vznikají velké řezné síly, které kladou zvýšené nároky jak na nástroj, tak i na samotný stroj. Stroje využívané pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů musí mít pevnější konstrukci, aby nedocházelo ke chvění, a tím následně k horší kvalitě obráběného povrchu. S požadavky na kvalitu povrchu roste úměrně i požadavek na kvalitnější a pevnější stroj, což znamená opětovné zvýšení nákladů. Aby se zamezilo chvění materiálu, je snaha o zpevňování konstrukce stroje a změny uspořádání jednotlivých částí stroje. Je snaha o zmenšení převisů jednotlivých komponentů stroje, ideální je uspořádání všech prvků co nejbližší revolverové hlavě [3].

Základním problémem, vznikajícím při soustružení těžkoobrobitelných materiálů, je působení větších řezných sil z důvodu například vyšších tvrdostí obráběných materiálů popřípadě zvýšenou houževnatostí některých materiálů. Těmito řeznými silami působí nástroj během soustružení na obrobek. V zásadě jsou tyto síly rovny řeznému odporu, tj. odpor, který klade materiál nástroji v procesu oddělování třísky (obr. 4-16). [18]



Obrázek 4-16: Rozložení řezných sil [18]

Je třeba, aby stroj použitý pro soustružení těžkoobrobitelných materiálů zajistil dostatečné množství řezného výkonu, který pokryje jednak řezné síly působící na stroj ale i další síly vznikající během obrábění. Mezi tyto síly působící na stroj při soustružení těžkoobrobitelných materiálů patří [18]:

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

#### 4.2.1 Požadavky z hlediska pracovní přesnosti

##### Tuhost

Aby stroj dokázal obrábět i materiály se zhoršenou obrobiteľnosťou a prenést síly vznikající při obrábění, musí jeho konstrukce dosahovat zvýšené tuhosti. Statická tuhost stroje je základním faktorem, podílejícím se na kvalitě výsledného povrchu obráběné součásti. Je definována jako měřítko odolnosti konstrukce proti deformaci, obecně jako derivace zatížení podle deformace vyvolané tímto zatížením [18].

$$k = \frac{dF}{dy}$$

Tuhost stroje lze ovlivnit použitým materiálem, který závisí zejména na modulu pružnosti [18]. Srovnání modulů pružnosti používaných materiálů viz.: tab.:4-3.

4-3: materiály používané na výrobu rámu obráběcích strojů [19]

Materiál	Modul pružnosti [MPa]
Ocel St 37	2,1.10 <sup>5</sup>
Ocelolitina	1,7.10 <sup>5</sup>
Šedá litina	0,8-1,1.10 <sup>5</sup>
Měď	1,2.10 <sup>5</sup>
Hliník	0,7.10 <sup>5</sup>
Mosaz	0,9.10 <sup>5</sup>
Titan	1,1.10 <sup>5</sup>
Beton	0,2.10 <sup>5</sup>
Polymerbeton	0,4-0,6.10 <sup>5</sup>
Granit	0,9.10 <sup>5</sup>
Al.oxid keramika	2,4.10 <sup>5</sup>

Dalším způsobem, jak je možno ovlivnit tuhost stroje, je zvolit vhodný tvar nosníků [18].

Nejčastěji používanými materiály pro konstrukci rámu jsou litina a ocel [18]. Srovnání vlastností těchto konvenčních materiálů je v tabulce 5-4.

**4-4: Srovnání vlastností litinových a ocelových rámu [18]**

Materiál	Výhody	Nevýhody
Šedá litina	levná nenákladná technologie dobré tlumicí vlastnosti	nebezpečí vnitřních pnutí v odlitku – 6 měsíců stárnutí nebo nutno žíhat malý modul pružnosti oproti oceli.
Tvárná litina	vyšší modul pružnosti než šedá litina	dražší
Ocel	dobré mechanické vlastnosti modul pružnosti vyšší než tvárná litina	menší tlumicí schopnosti než litina

Provedení klasických kovových rámu může být provedeno dvěma způsoby, buď formou odlitku nebo svařence[18]. V tabulce 5-5 jsou srovnány jejich výhody a nevýhody:

**4-5: Srovnání vlastností odlitků a svařenců [18]**

	Výhody	Nevýhody
Odlitky	nižší materiálové náklady	nutné vyrobít model a formu vychází hmotnější – to je dáno technologickými možnostmi odlévání časová prodleva kvůli stárnutí odlitku
Svařence	rychlejší výroba snadné opravy a změny	nutnost odstraňovat pnutí vzniklé v dílu svařováním nutnost vždy obkládat ocelové vodící plochy

V případě použití nekonvenčních materiálů na stavbu rámu je třeba zohlednit jejich někdy zajímavé vlastnosti. Oproti konvenčním materiálům mají tyto materiály zpravidla menší tuhost, což je nevýhodou pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Avšak na druhé straně mají mnohdy lepší vlastnosti dynamické i teplotní. Jsou to taktéž materiály ekologické, protože jejich likvidace i způsob výroby je mnohdy jednodušší [18].

**Dynamická stabilita**

Kmitání či chvění stroje je jev, který je pevně spojený s chodem obráběcího stroje. Kmitání stroje způsobuje zvýšené namáhání součástí, zvýšenou hladinu hluku při obráběcím procesu. V neposlední řadě kmitání stroje negativně zasahuje do průběhu obráběcího procesu. Dynamická stabilita je definována jako odolnost stroje proti kmitání [18.]

***Důsledkem kmitání stroje je [18]:***

- zhoršení tvarové přesnosti
- zhoršení kvality povrchu
- nemožnost využití daného výkonu stroje
- možnost mechanického poškození nástroje

Obráběcí stroj je soustavou hmotných dohromady spojených těles. Na stroji je možno nalézt všechny druhy kmitání - volné, vynucené i samobuzené. Samobuzené kmitání je největším problémem, protože vzniká samovolně. Pro jeho vznik a udržení není třeba přidávat do systému žádnou vnější sílu. Amplitudy tohoto kmitání velmi rychle narůstají. U tohoto druhu kmitání nepomáhá ani změna řezných podmínek, které by jinak kmitání vyvolaly [18].

***Samobuzené kmitání lze dále dělit na dva typy[18]:***

- Relaxační kmitání – Jedná se o kmitání, které není přímo spjaté s procesem řezání. Závisí na velikosti třecích sil na vodících plochách
- Samobuzené kmity vyvolané řezným procesem - Takto vyvolané kmity se vyskytují jen při určitých řezných podmínkách, tedy je lze snadno omezit

***Způsoby, kterými je možno samobuzenému kmitání zabránit[18]:***

- snaha o zvýšení tuhosti některé části systému: stroj-nástroj-obrobek.
- úprava řezných podmínek, kterými jsou: hloubka řezu, úhly nástroje, zvýšení otáček...
- zvýšit tlumící účinek – použití tlumičů nebo jiného materiálu rámu stroje

## **Teplotní stabilita**

Teplo, které vzniká v průběhu obráběcího procesu, má negativní vliv na výsledky obrábění. Působením tepla dochází ke zhoršení přesnosti obráběných ploch. Teplo působící při obráběcím procesu může pocházet z různých zdrojů[18]:

- teplo z okolí
- teplo vzniklé při řezném procesu
- teplo vzniklé pasivními odpory ve stroji

Teplo z okolí se dá celkem snadno předcházet regulací teploty, ve které se nachází obráběcí stroj. Teplo vzniklé při řezném procesu lze snížit použitím procesních kapalin nebo změnou řezných podmínek (hloubka řezu, úhly nástroje...) Teplo vzniklé pasivními odpory lze snížit vhodnou konstrukcí stroje. Snaha o co nejmenší tření ve stroji.

Při změně teploty částí stroje i obrobku dochází k teplotním deformacím. Změna délkového rozměru je definována jako[18]:

$$\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta T$$

kde :  $\alpha$ .....délkový teplotní součinitel roztažnosti [1/K]

$l$ .....délka

$\Delta T$ ...změna teploty

***Pro posílení teplotní stability obráběcího stroje lze navrhnout tato opatření[18]:***

Omezení zdrojů tepla

- Odstraňování horké třísky, která způsobuje lokální deformace rámu.
- Zdroj tepla jsou motory, brzdy a třecí spojky. Doporučuje se umisťovat motory mimo stroj. Pokud to není možné, je třeba alespoň zajistit jejich řádnou izolaci.
- Zajištění mazání ložisek a ozubených kol.
- V případě dutých částí stroje, je možno navrhnout chlazení proudícím vzduchem těmito částmi.
- Vřetena, ložiska, převody lze chladit proudícím olejem.
- Odstraňování tepla do okolí dílen pomocí klimatizace.

Minimalizace vlivu nevyhnutelných teplotních deformací

- Je třeba volit vhodný materiál rámu s malou délkovou roztažností a s velkou tepelnou kapacitou.
- Je vhodné navrhovat symetrické konstrukce rámu.
- Automaticky kompenzovat teplotní deformace.

#### **4.2.2 Požadavky na pohonné systémy obráběcích strojů**

Obecně se pohonný systém skládá z hnacího a z převodového mechanismu. Úkolem hnacího mechanismu stroje je přeměna vstupní energie v energii mechanickou. Převodový mechanismus zajišťuje změnu rozsahu vstupních veličin. Pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů je nutné, aby stroj a jeho pohonný systém dosahoval dostatečně velkého kroutícího momentu. Další parametry jako jsou posuvová rychlost, posuvová síla, účinnost motoru, životnost motoru se neliší od strojů pro obrábění klasických materiálů [17,18,19].

## 5 Technologické podmínky pro soustružení těžkoobrobitelných materiálů

Volba vhodných technologických podmínek při soustružení těžkoobrobitelných materiálů závisí zejména na typu obráběného materiálu, na způsobu obrábění a na druhu nástrojového materiálu. Následně se volí vhodný řezný materiál, vhodná geometrie nástroje, dráhy nástroje a řezné prostředí.

### Šířka záběru ostří ( $a_p$ )

Šířka záběru ostří je omezena délkou ostří nože (v záběru by neměly být více jak 2/3 délky ostří), ale také výkonem a tuhostí stroje. Šířka záběru ostří se obvykle pohybuje v rozsahu  $a_p=0,03$  až 30mm. Pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů se volí malé hodnoty šířky záběru ostří. [21]

### Posuv ( $f$ )

Velikost posuvu závisí na požadované jakosti povrchu a je také ovlivněna geometrií břitu, výkonem a tuhostí stroje. Posuv by se měl volit tak, aby vyhovoval uvedeným kritériím. Obvykle se pohybuje v rozsahu  $f=0,05$  až 2 mm/ot [21]

Vztah pro posuvovou rychlost  $v_f$  [29]:

$$v_f = f_{ot} \cdot n \text{ [mm/min]}$$

kde:  $n$  [ $\text{min}^{-1}$ ] – otáčky obrobku

$f_{ot}$  [mm] – posuv na otáčku obrobku

### Řezná rychlost ( $v_c$ )

Řezná rychlost je závislá na druhu soustruženého materiálu a na druhu nástrojového materiálu. Pro konvenční metody obrábění se řezná rychlost pohybuje v rozsahu  $v_c=10$  až 600 m/min. Pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů výrobci doporučují zpravidla nižší řezné rychlosti. [21]

Řezná rychlost pro soustružení válcových ploch [29]:

$$v_c = \pi \cdot D \cdot n \cdot 10^{-3} \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}$$

kde:  $D$  [mm] – průměr obráběné plochy

$n$  [ $\text{min}^{-1}$ ] – otáčky obrobku

$f_{ot}$  [mm] – posuv na otáčku obrobku



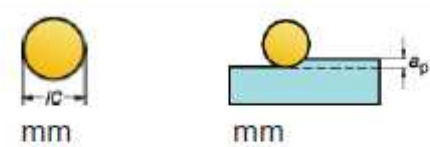
## 5.1 ISO M

V případě soustružení feritických a martenzitických ocelí není třeba použít speciální řezné podmínky, protože jejich obrobiteľnosť je srovnateľná s obrobiteľnosťí nízkoaloyovaných ocelí. [31]

Při soustružení austenitických a duplexních ocelí je výrobcí řezných nástrojů doporučováno použití řezných kapalin, které snižují opotřebení ve tvaru žlábků, pomáhají utvářet třísku a dovolují použití vyšších řezných rychlostí [31]. Výrobcí je doporučováno při soustružení korozivzdorných ocelí použití VBD ze slinutých karbidů případně cermetů pro dokončovací operace. [38]

## 5.2 ISO S

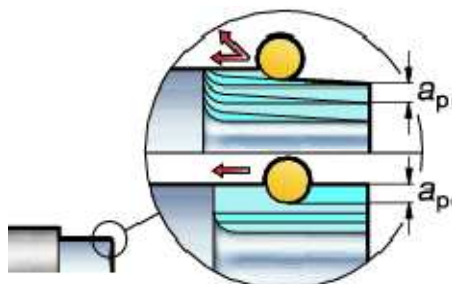
U slitin titanu a HRSA je výrobcí doporučeno vybírat kruhové destičky, které dovolují zvýšit posuv a prodlouží trvanlivost břitů. Při volbě hloubky řezu je vhodné nepřekračovat 15% průměru destičky, případně 15% průměru špičky, v případě použití klasických destiček (obr. 5-1) [25].



mm	mm
6.35	0.889
9.52	1.397
12.70	1.905
19.06	2.794
25.40	3.81

Obrázek 5-1: Doporučená hloubka řezu [25]

Vhodným plánováním drah nástroje je možno omezit opotřebení destičky ve tvaru vrubu. Při využití CNC soustruhu je vhodné kombinovat kolísavou hloubku řezu z důvodu rozložení negativních účinků po celé délce břitů. Případně je možno volit průchody nástroje s různou hloubkou řezu (obr. 5-2) [25].



Obrázek 5-2: Proměnná hloubka řezu [25]

Při soustružení HRSA a titanu je nutné používat řeznou kapalinu. Titan není vhodné obrábět keramikou z důvodu vznikajících rázů při jeho obrábění. Pro superslitiny je

doporučováno použití keramických destiček případně slinutý karbid. Titan a titanové slitiny je nutno obrábět pomocí slinutých karbidů. [25]

### 5.3 ISO H

Soustružení těchto materiálů se ukázalo jako vhodná cenově výhodnější alternativa k broušení. U soustružení tvrdých materiálů (45-60 HRC) má zásadní vliv dobrá stabilita stroje, upnutí a vyrovnání obrobku. Aby byla tuhost systému co největší, musí být všechna vyložení co nejmenší. Je nanejvýš vhodné obrábět bez použití řezné kapaliny. Jak destičky s CBN, tak keramické VBD odolávají vysokým teplotám v řezu, což přináší snížení nákladů a odstranění problémů s manipulací s řeznou kapalinou.[31] V některých případech je však použití řezné kapaliny nezbytné, například z důvodu udržení tepelné stability obrobku. V takových případech je nutné zajistit nepřetržitý přívod řezné kapaliny v průběhu trvání celé soustružnické operace. [31]

## 5.4 Řezné podmínky pro VBD vhodné k soustružení těžkoobrobitelných materiálů

### 5.4.1 Slinuté karbidy

Slinuté karbidy jsou materiály tvořené směsí částic karbidu (WC) a kovového pojiva bohatého na kobalt (Co). Důležitým parametrem je velikost zrna, která má vliv na tvrdost a houževnatost dané třídy. Při daném obsahu pojiva znamená menší velikost zrna vyšší tvrdost [39]. Slinuté karbidy se svým složením hodí spíše pro soustružení materiálů skupiny ISO M nebo k soustružení slitin titanu, niklu a kobaltu, kde je jejich použití možné pouze za velmi nízkých řezných rychlostí.

Tabulka 5-1: Doporučené řezné podmínky pro vybrané VBD ze slinutých karbidů [38,41,26]

Druh destičky	Obráběný materiál	Doporučené řezné podmínky					
		$V_c$ [m/min]		f[mm/ot]		$a_p$ [mm]	
		min.	max.	min.	max.	min.	max.
GC 2025	Austenitická korozivzdorná ocel (200 HB)	75	130	0,2	0,6	0,2	0,6
GC 2035	Austenitická korozivzdorná ocel (200 HB)	70	100	0,2	0,6	0,2	0,6
GC 4035	Austenitická korozivzdorná ocel (200 HB)	80	130	0,2	0,6	0,2	0,6
CNMG120404-SM (T6130) tungaloy	Austenitická korozivzdorná ocel (200 HB)	100	200	0,2	0,5	1	4
CNMG120408-MR3 (Seco)	Inconel 718 (36-48 HRC)	37	44	-	0,25	-	2

## 5.4.2 Cermety

Tabulka 5-2: Doporučené řezné podmínky pro vybrané cermetové VBD [42,43]

Druh destičky	Obráběný materiál	Doporučené řezné podmínky					
		$V_c$ [m/min]		$f$ [mm/ot]		$a_p$ [mm]	
		min.	max.	min.	max.	min.	max.
GT 720 CNMG120408-ZM	ocel 300 HB	80	250	0,18	0,4	0,1	0,2
GT 730 CNMG120408-ZM	ocel 300 HB	80	200	0,18	0,4	0,1	0,2
NS 730 CNMG120408-ZM	ocel 300 HB	80	180	0,18	0,4	0,1	0,2
CPMT120408(AH 905) tungaloy	Inconel 718	20	100	0,08	0,13	0,5	3

## 5.4.3 CBN

Vyměnitelné břitové destičky z CBN se hodí pro obrábění velmi tvrdých materiálů (40-65 HRC). Doporučuje se k použití nad hodnotu 55 HRC. Měkčí oceli pod 45 HRC vykazují větší obsah feritu, který působí nepříznivě na odolnost CBN vůči otěru. [45]

CBN odolává velmi vysokým teplotám, z toho vyplývá jeho použití při vysokých řezných rychlostech bez použití řezných kapalin. [45]

Tabulka 5-3 Doporučené řezné podmínky pro vybrané VBD z CBN [44]

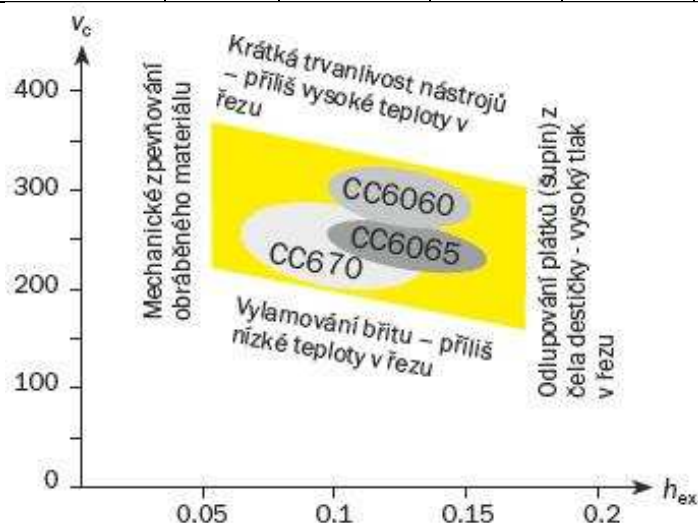
Druh destičky	Obráběný materiál	Doporučené řezné podmínky					
		$V_c$ [m/min]		$f$ [mm/ot]		$a_p$ [mm]	
		min.	max.	min.	max.	min.	max.
BXM 10 (Tungaloy) 2QP- CNGA120408	SCM415H (59 ~ 61HRC)	150	300	0,03	0,18	0,05	0,3
BXM 20 (Tungaloy) 2QP- CNGA120408	SCM415H (59 ~ 61HRC)	70	220	0,05	0,18	0,05	0,3

### 5.4.4 Keramika

U keramických destiček musí být rychlost volena tak, aby v oblasti řezu vznikalo dostatečné množství tepla ke změknutí třísek, ale ne příliš mnoho, aby nedocházelo k nestabilitě keramiky. Posuv je nutné volit tak, aby vznikající tříska byla dostatečné tloušťky, aby nedocházelo k mechanickému zpevňování materiálu, ale ne zas tak vysoký aby nedocházelo k hydrolování hrotů. [25]

Tabulka 5-4: Doporučené řezné podmínky pro vybrané keramické VBD [25]

Druh destičky	Obráběný materiál	Doporučené řezné podmínky					
		$V_c$ [m/min]		f[mm/ot]		$a_p$ [mm]	
		min.	max.	min.	max.	min.	max.
CC 670	Inconel 718 (38-46 HRC)	200	250	0,1	0,15	2	-
CC6060	Inconel 718 (38-46 HRC)	250	300	0,15	0,2	2	3
CC6065	Inconel 718 (38-46 HRC)	200	250	0,15	0,2	2	3
CC 650	Tvrdá ocel – kalená popouštěná (50 HRC)	85	170	0,1	0,4	0,1	0,4
CC 6050	Tvrdá ocel – kalená popouštěná (50 HRC)	145	240	0,05	0,25	0,1	0,3
CC650	Zvlášť tvrdá ocel – kalená popouštěná (65 HRC)	50	105	0,1	0,4	0,1	0,4
CC 6050	Zvlášť tvrdá ocel – kalená popouštěná (65 HRC)	90	145	0,05	0,25	0,1	0,3



Obrázek 5-3: Vhodné podmínky pro vybrané keramické třídy Sandvik [25]

## 5.5 Řezné prostředí

Prostředí v zóně řezání má významný vliv na kvantitativní, kvalitativní a ekonomické parametry řezného procesu. Řezné prostředí je vytvářeno řeznými médii – řeznými pastami, kapalinami, plyny a mlhami. Všechna tato média jsou vyrobena a užívána tak, aby měla chladicí, mazací a čistící účinek. [29]

Procesní kapaliny je možno obecně rozdělit do dvou skupin podle jejich převažujícího účinku, který mají na proces řezání. Jsou to kapaliny s převažujícím chladícím účinkem a kapaliny s převažujícím mazacím účinkem. Dále se řezné kapaliny rozdělují na vodní roztoky, emulzní kapaliny, mastné oleje, zušlechtěné řezné oleje, rostlinné oleje a syntetické kapaliny [29].

### 5.5.1 Vodní roztoky

Roztoky na vodní bázi jsou nejjednodušší, a tím i nejlevnější řezné kapaliny. Je nutná řada úprav vody, přidávání přísad proti korozi, změkčování, přísady pro zlepšení smáčivosti a proti pěnovosti. V těchto kapalinách je možný výskyt anaerobních bakterií, kvůli kterým vznikají kaly a nepříjemný zápach. Vodní roztoky mají dobré chladicí a čistící účinky, ale téměř žádný mazací účinek. [29]

### 5.5.2 Emulzní kapaliny

Emulzní kapalinu tvoří dvě vzájemně nerozpustné kapaliny. Jedna z těchto kapalin tvoří mikroskopické kapky rozptýlované v kapalině druhé, např. olej a voda. Do těchto kapalin je přidáván tzv. emulgátor, který snižuje mezipovrchové napětí a napomáhá tak mísení dvou kapalin. Emulzní kapaliny spojují výhody vodních roztoků na straně jedné a zároveň mazacích olejů na straně druhé. Chladicí účinek emulzní kapaliny je závislý na koncentraci emulze, s jejím nárůstem klesá. [29]

### 5.5.3 Zušlechtěné řezné oleje

Jedná se o látky na bázi minerálních olejů. Přísady zvyšují tlakovou únosnost a mazací vlastnosti. Mastné látky jako mastné oleje, mastné kapaliny nebo syntetické estery zvětšují přílnavost oleje ke kovu a zlepšují jeho mazací schopnosti. Organické sloučeniny na bázi síry, chromu, fosforu se osvědčily jako vysokotlaké přísady. Na obráběném povrchu vytvářejí vrstvu, která zabraňuje svařování a usnadňuje kluzný pohyb. Dále se přidávají do těchto kapalin pevná maziva jako je grafit a sirník molybden. Svou afinitou ke kovu vytvářejí mezní vrstvu, která zlepšuje mazací schopnosti oleje [29].

### 5.5.4 Syntetické kapaliny

Syntetické kapaliny neobsahují minerální oleje. Mazací schopnost u nich zastupují rozpustné glykoly. Jsou průsvitné, takže umožňují sledovat průběh obráběného procesu. Oproti kapalinám na bázi oleje mají tyto kapaliny ekonomické výhody. Dále zajišťují rychlé odvádění tepla, mají dobrý čistící účinek a jejich příprava je jednoduchá. V těchto kapalinách je možné také rozptýlit minerální oleje, čímž vznikají polosyntetické kapaliny, které mají lepší mazací vlastnosti. [29]

## 6 Vyhodnocení získaných poznatků – test trvanlivosti břitu

V rámci této práce byl proveden test trvanlivosti břitu podle výše získaných poznatků popsanych v literatuře. Bylo provedeno měření opotřebenění v závislosti na čase obrábění. Kritériem pro ukončení obrábění byla nevyhovující kvalita povrchu obrobku nebo vylomení břitu destičky.

### 6.1.1 Zkušební obrobek

Zkušebním obrobkem byla zvolena válcová tyč z kalené oceli 19 452 o tvrdosti 58 HRC. Obrábění zkušebního obrobku probíhalo na CNC soustruhu Masturn 50 C/800. Tyč byla upnuta do univerzálního sklíčidla a podepřena koníkem.

- Materiál obrobku: 19 452
- Počet zkušebních obrobků: 1

### 6.1.2 Obráběcí stroj

Parametry soustruhu:

- Typ: Masturn 50 C/800
- oběžný průměr nad ložem: 500 [mm]
- oběžný průměr nad příčným suportem: 350 [mm]
- vzdálenost hrotů: 800 [mm]
- Max. hmotnost obrobku: 350 [kg]
- Výkon motoru/jmenovité otáčky: 15/1500 [kW/min]
- Rozsah otáček vřetena: 20-3000 [ot/min]



6-1: Soustruh Masturn 50 C/800

### 6.1.3 Nástroj

Soustružnický nůž uběrací stranový - pravý

Vyměnitelná břitová destička z řezné keramiky – SNGN 120408 LX11

Nožový držák – Kennametal CSRNR2525M12 – MN4



Obrázek 6-2: Průběh soustružení

### 6.1.4 Řezné podmínky

Pro daný experiment byly zvoleny následující řezné podmínky:

První měření

- řezná rychlost:  $v_c=150$  [m/min]
- šířka záběru ostří:  $a_p=0,3$  [mm]
- posuv na otáčku:  $f=0,15$  [mm/ot]

Druhé měření:

- řezná rychlost:  $v_c=200$  [m/min]
- šířka záběru ostří:  $a_p=0,3$  [mm]
- posuv na otáčku:  $f=0,15$  [mm/ot]

### 6.1.5 Měření opotřebení

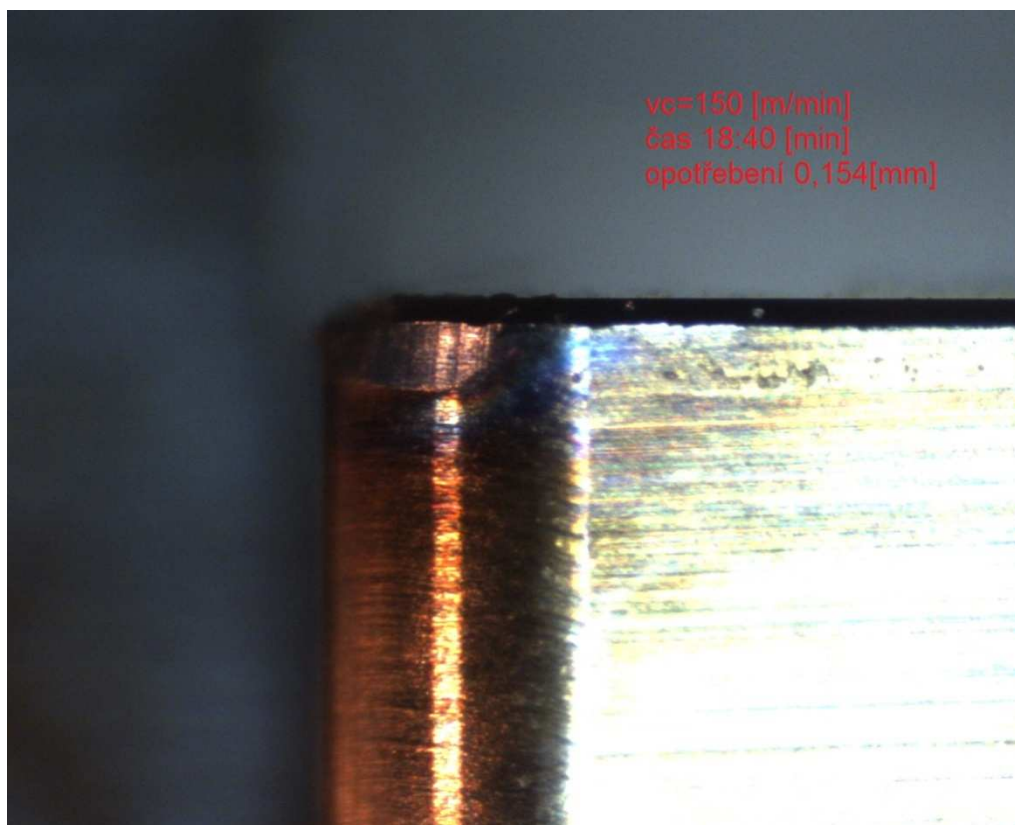
Měření opotřebení VBD probíhalo na dílenském mikroskopu BLICKLE Multicheck PC 500, který disponuje přesností měření 0,005 mm. Na základní žulové desce je uchyceno vedení, osa X a vertikální osa Y. Pomocí kliček je možné měnit polohu CCD kamery, která je usazena na vertikálním vedení. Mikroskop Multicheck PC 500 je osazen výměnnými objektivy se zvětšením 10x, 30x, 75x a 150x.



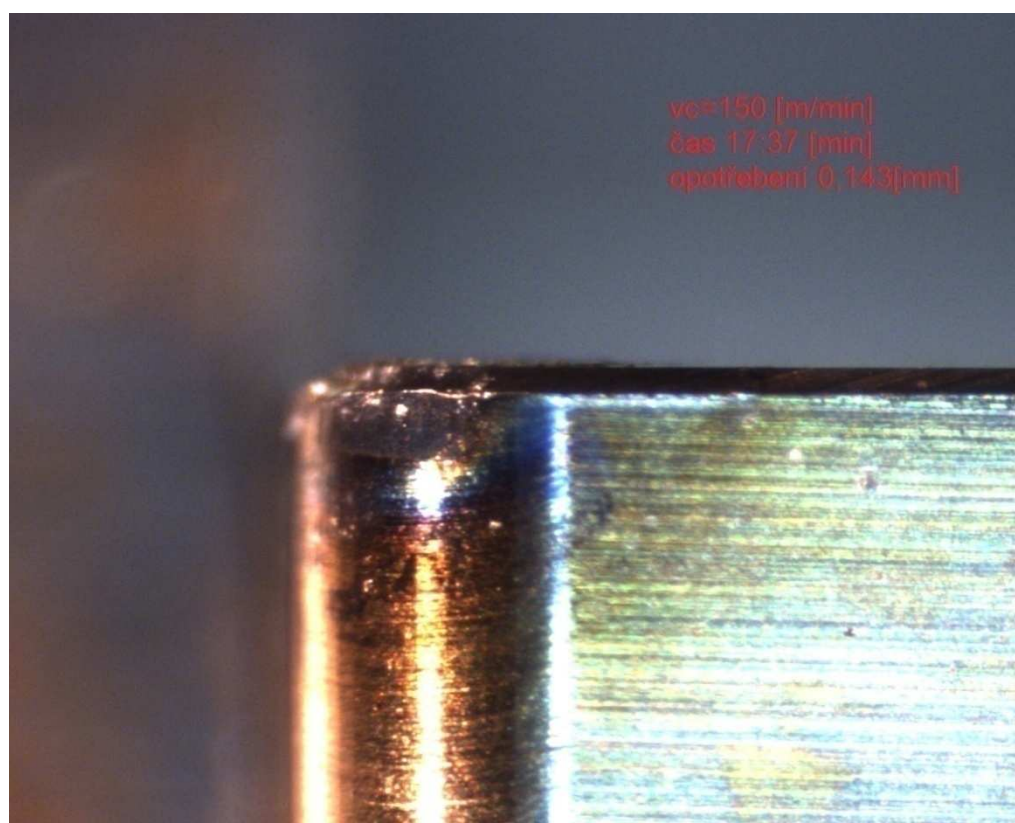
Obrázek 6-3 Mikroskop Multicheck PC 500



### Výsledné opotřebení při $v_c=150$ [m/min]

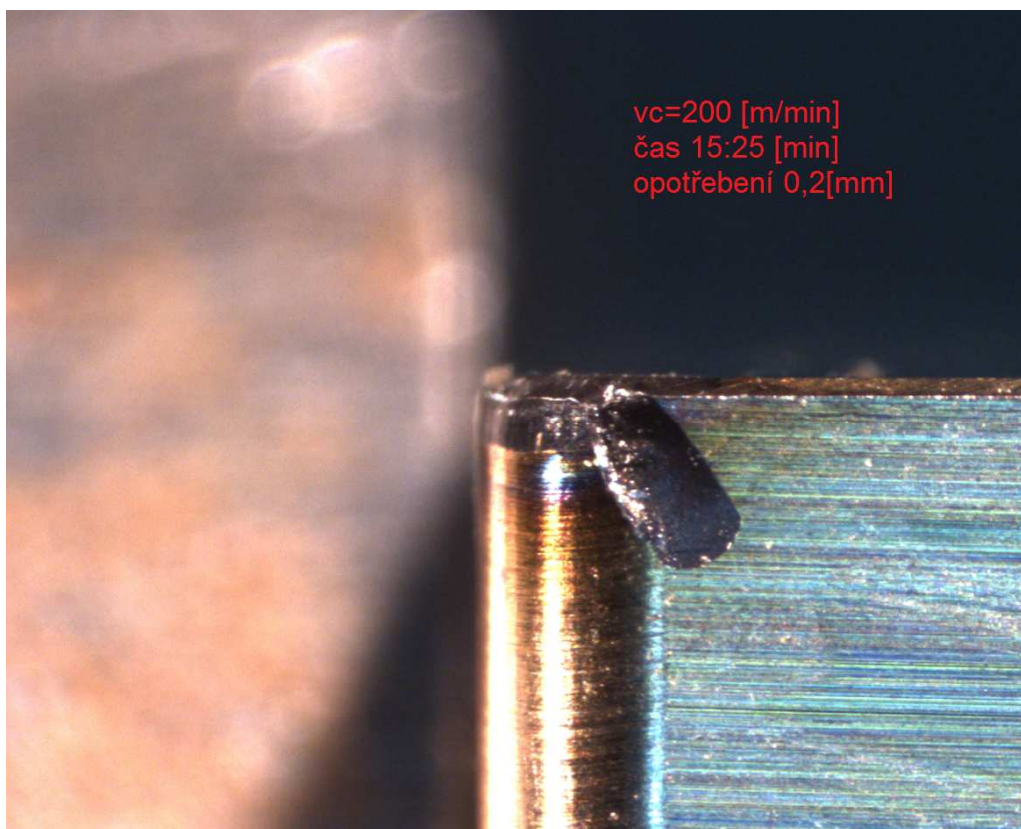


Obrázek 6-4 Výsledné opotřebení při rychlosti  $v_c=150$  [m/min] – 1. jízda: 0,154 [mm]

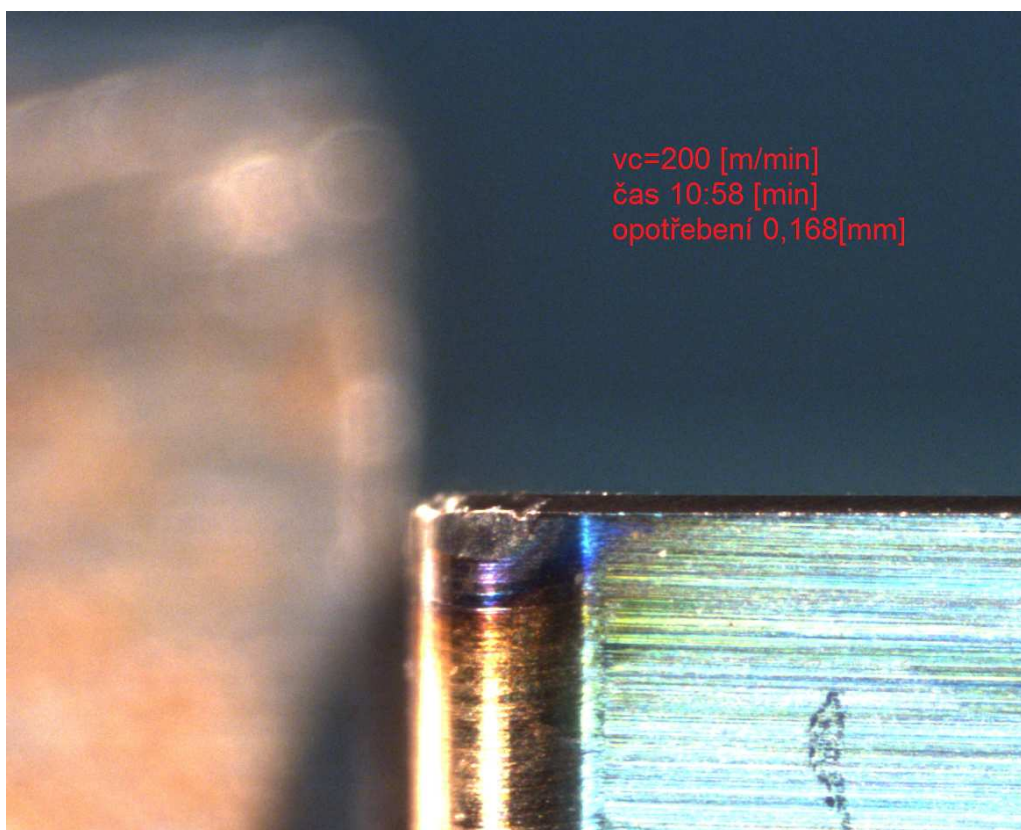


Obrázek 6-5: Výsledné opotřebení při rychlosti  $v_c=150$  [m/min] – 2. jízda: 0,143 [mm]

**Výsledné opotřebení při  $v_c=200$  [m/min]**



**Obrázek 6-6: Výsledné opotřebení při rychlosti  $v_c=200$  [m/min] – 1. jízda: 0,2 [mm]**



**Obrázek 6-7: Výsledné opotřebení při rychlosti  $v_c=200$  [m/min] – 2. jízda: 0,168 [mm]**

První destička byla testována při výše uvedených řezných podmínkách. Z důvodu zajištění případných nepřesností během měření bylo provedeno druhé měření při stejných řezných podmínkách. Z grafu na obr. 6-8 je vidět, že bylo dosaženo velmi podobných výsledků.

První destička byla v záběru 18 minut a 40 sekund a vykazovala opotřebení 0,154 mm na hřbetu nástroje. Druhá destička byla v záběru 17 minut a 37 sekund a hřbet nástroje vykazoval opotřebení 0,143 mm. Bylo tedy zjištěno velmi podobné opotřebení.

Třetí a čtvrté měření probíhalo za vyšší řezné rychlosti ( $v_c=200$  m/min). Třetí destička byla v záběru 15 minut a 25 vteřin a vykazovala opotřebení 0,2 mm a výrazný lom. Výsledný povrch vykazoval nepříznivé vlastnosti. Docházelo k „chlupatění“ povrchu. Opět z důvodu vyloučení možných chyb bylo provedeno další měření při této rychlosti. Čtvrtá destička byla v záběru 10 minut a 58 vteřin a hřbet nástroje vykazoval opotřebení 0,168 mm. Měření na této destičce bylo zastaveno dříve z důvodu nepřijatelné kvality obráběného povrchu. Opět došlo k „chlupatění“ povrchu.

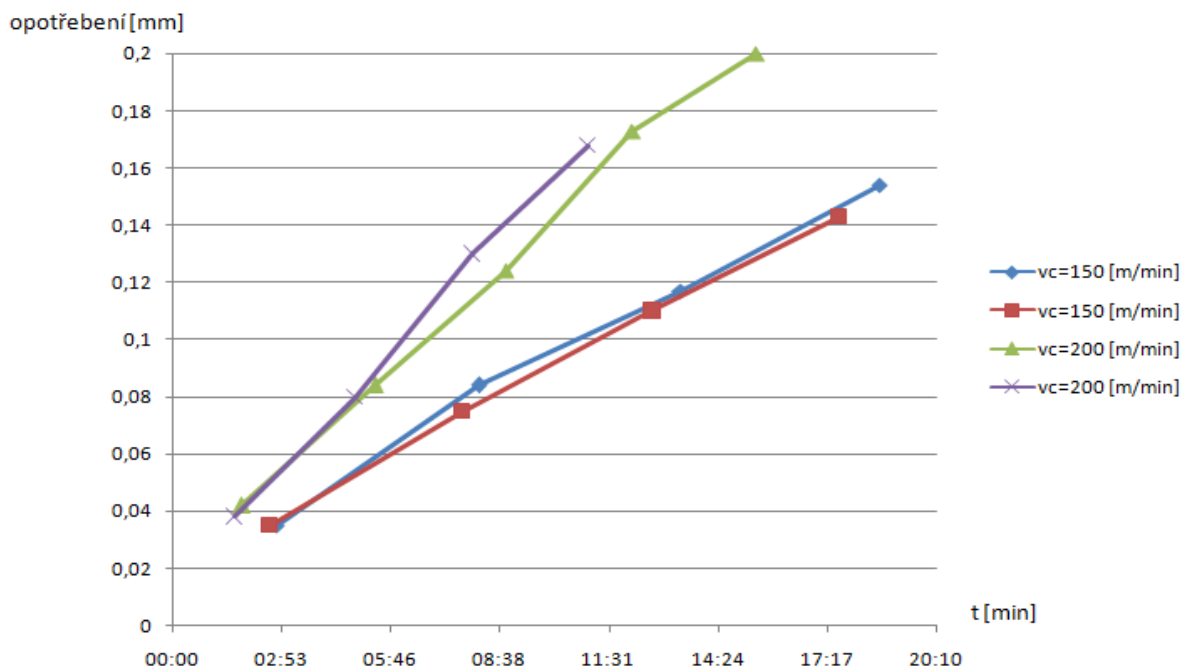
Bylo zjištěno, že testovanou VBD je možno obrábět tento typ materiálu i za vyšších řezných rychlostí na úkor značně se snižující trvanlivosti břitů.

Na obr. 6-8 je srovnání opotřebení hřbetu jednotlivých břitů testované destičky. Osa x představuje čas, po který byla destička v záběru, osa y opotřebení hřbetu v mm.

Dále byla v průběhu testu sledována tříska. Na obr. 6-9 je srovnání třísky po 2 minutách obrábění (vlevo) a po 7 minutách (vpravo). Na třísce je dobře patrný rozdíl v teplotě vznikající v místě řezu. Tříska vpravo vykazuje větší lámavost a je značně spálená.

materiál obrobku: 19452 (58 HRC)  
posuv na otáčku:  $f=0,15$  [mm/ot]  
hloubka záběru ostří:  $a_p=0,3$  [mm]

VBD: SNGN 120408 LX11



Obrázek 6-8: Graf závislosti opotřebení břitů na čase obrábění



**Obrázek 6-9: Srovnání třísek**

## 7 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo sumarizovat známé poznatky z oblasti soustružení těžkoobrobitelných materiálů.

V práci jsou podrobně zmapovány jednotlivé těžkoobrobitelné materiály používané v různých odvětvích průmyslu. Byla zhodnocena vhodnost jednotlivých těžkoobrobitelných materiálů pro použití v různých strojních aplikacích. Byl stanoven pojem obrobitelnost a byly popsány faktory, které obrobitelnost materiálů ovlivňují:

- způsob výroby
- tepelné zpracování materiálu
- chemické složení – vliv příměsí
- metoda obrábění
- řezné podmínky
- geometrie nástroje – kvalita břitu
- upnutí nástroje – kvalita držáku
- přítomnost metalurgických vměstků

Velká část práce se zabývá požadavky na obráběcí nástroj a stroj při soustružení těžkoobrobitelných materiálů a následně určení vhodných řezných podmínek pro soustružení těžkoobrobitelných materiálů. Řezné materiály využívané při soustružení těžkoobrobitelných materiálů jsou v současnosti tyto:

- slinutý karbid
- cermety
- řezná keramika
- kubický nitrid bóru
- polykrystalický diamant

U nástrojů používaných pro soustružení těžkoobrobitelných materiálů je trendem, z důvodu časových a ekonomických úspor, používání nástrojů s vyměnitelnými břitovými destičkami namísto nástrojů monolitních. Optimalizací nástrojů pro soustružení těžkoobrobitelných materiálů je umožněno rychlejší obrábění, je zvýšena trvanlivost břitu a snižuje se počet potřebných nástrojů. V současné době je trendem použití třískového obrábění namísto použití technologie přesného broušení.

Při soustružení těžkoobrobitelných materiálů je nutné myslet na vyšší nároky kladené těmito materiály na obráběcí stroj. V práci byly zhodnoceny materiály vhodné pro stavbu strojů pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Dále byly představeny požadavky kladené na obráběcí stroje, mezi které patří:

- tuhost
- dynamická stabilita
- teplotní stabilita
- dostatečný výkon

V poslední části práce byla zkoumána trvanlivost řezné keramiky při různých řezných podmínkách. Byly potvrzeny poznatky získané z literatury. Trvanlivost břitu řezného nástroje je možno ovlivnit volbou řezných podmínek, kterými jsou řezná rychlost, posuv, hloubka záběru ostří, řezné prostředí. V následující tabulce jsou shrnuty výsledky provedeného měření. Je vidět, že vyměnitelná břitová destička vykazovala při nižší rychlosti menší opotřebení břitu a vydržela v záběru delší čas. Při soustružení vyšší rychlostí docházelo brzy ke špatné kvalitě povrchu obrobku a hrozilo vylomení břitu, ke kterému došlo v posledním měření. Vhodnější variantou se ukázala být volba nižší řezné rychlosti (150 m/min), při které nedocházelo k tak velkému opotřebení břitu jako při druhé testované rychlosti (200 m/min).

7-1: Shrnutí výsledků trvanlivosti

Řezná rychlost[m/min]	posuv [mm/ot]	hloubka záběru ostří[mm]	opotřebení [mm]	čas obrábění [min]
150	0,15	0,3	0,154	18:40
150	0,15	0,3	0,143	17:37
200	0,15	0,3	0,2	15:25
200	0,15	0,3	0,168	10:58

Bylo též potvrzeno, že testovaná vyměnitelná břitová destička se hodí pro soustružení kalených ocelí. V případě nepřerušovaného řezu nedocházelo k vylamování destičky. Destička odolávala vysokým teplotám v místě řezu a taktéž kvalita výsledného povrchu byla dobrá.

## 8 Literatura

- [1] Special Metals. *Special metals* [online]. 2008 [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: <http://www.specialmetals.com/products/index.php>
- [2] MATĚJKA, J., ČESÁNEK, J. a PRILUKOVA, J. *Řezná keramika při soustružení těžkoobrobitelných materiálů*. Plzeň, 2006. ISBN 80-7043-484-8. Stat'. ZČU.
- [3] DAVIM, P. *Machining of Hard Materials*. London: Springer, 2011. ISBN 978-1-84996-449-4.
- [4] ATEAM. *Keramika* [online]. [2010] [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: <http://www.ateam.zcu.cz/keramika.pdf>
- [5] HUMÁR, A. *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. 1. vyd. Brno: CCB, 1995. ISBN 80-85825-10-4.
- [6] BOOTHROYD, G., KNIGHT *Fundamentals of machining and machine tools*. 3rd ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2005. 573 p. ISBN 1-57444-659-2.
- [7] GRZESLIK, W. *Advanced machining processes of metallic materials*. Elsevier: Elsevier Science, 2008. 446 p. ISBN 978-0-08-044534-2.
- [8] Guehring. *Hard machining* [online]. © 2010 [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: [http://www.guehring.co.th/Guehringcatalogs/Hard\\_machining.pdf](http://www.guehring.co.th/Guehringcatalogs/Hard_machining.pdf)
- [9] Výběr obráběcích a chladících kapalin pro těžkoobrobitelné materiály. *MM průmyslové spektrum*. 2001, roč. 2001, č. 11, s. 38. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vyber-obrabecich-a-chladicich-kapalin-pro-tezkoobrobitelne-materialy.html> .
- [10] Wikipedia. *Nimonic* [online]. 2013 [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Nimonic>
- [11] HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing, 2008. 235 p. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [12] Wikipedia. *Nimonic* [online]. 2013 [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: <http://it.wikipedia.org/wiki/Nimonic>
- [13] ATEAM. *Hliník a slitiny hliníku* [online]. [2008] [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: [http://www.ateam.zcu.cz/download/Slitiny09\\_10.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/download/Slitiny09_10.pdf)
- [14] Wikipedia. *Inconel* [online]. 2013 [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Inconel>
- [15] RPB s.r.o. *Technická příručka Sandvik 2010* [online]. 2010 [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: [http://www.rpb.cz/sites/default/files/catalogues/sandvik/MTG\\_Intro.pdf](http://www.rpb.cz/sites/default/files/catalogues/sandvik/MTG_Intro.pdf)
- [16] AB SANDVIK COROMANT *Příručka obrábění*. 1st ed. Praha: Scientia, s.r.o., 1997. ISBN 91-97 22 99-4-6.
- [17] Píč, J.; Breník, P. *Obráběcí stroje (základy konstrukce a výpočtů)*, 1st ed.; SNTL-Nakladatelství technické literatury: Praha, 1970.

- [18] LAŠOVÁ, V. *Základy stavby obráběcích strojů* [online]. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2012 [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: [http://www.zcu.cz/pracoviste/vyd/online/Zaklady\\_stavby.pdf](http://www.zcu.cz/pracoviste/vyd/online/Zaklady_stavby.pdf)
- [19] MAREK, J. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. 2nd ed. Praha: MM publishing, 2010. 420 p. ISBN 978-80-254-7980-3.
- [20] ČEP, Robert. *Technologie II 1.díl*. Ostrava, [2010]. Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta\\_Technologie\\_II\\_1díl.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_1díl.pdf)
- [21] BUKÁČEK, Zdeněk. *Technologie obrábění tvrdých materiálů nástroji s definovanou geometrií břitu*. Brno, 2008. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=18708](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18708). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [22] Secotools. *Duratomic for stainless steel turning* [online]. 2007 [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: [http://www.secotools.com/CorpWeb/Products/Turning/General\\_turning/duratomic\\_stainless\\_gb\\_lr.pdf](http://www.secotools.com/CorpWeb/Products/Turning/General_turning/duratomic_stainless_gb_lr.pdf)
- [23] Duratomic® TM2000 & TM4000. *Secotools* [online]. © 2013 [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: <http://www.secotools.com/cs/Global/Products/Milling1/General-Turning/TK1000TK20001/>
- [24] Sandvik Coromant. *Soustružnické nástroje* [online]. 2012 [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: [http://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/catalogues/cs-cz/turn\\_a.pdf](http://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/catalogues/cs-cz/turn_a.pdf)
- [25] Sandvik Coromant. *Soustružení HRSA a titanu* [online]. © 2013 [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: [http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general\\_turning/getting\\_started/turning\\_different\\_materials/hrsa\\_and\\_titanium\\_turning/Pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general_turning/getting_started/turning_different_materials/hrsa_and_titanium_turning/Pages/default.aspx)
- [26] Secotools. *TS2000 & TS2500* [online]. 2008 [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: [http://www.secotools.com/CorpWeb/Products/Turning/General\\_turning/st20086176\\_ts2000\\_ts2500\\_gb\\_lr.pdf](http://www.secotools.com/CorpWeb/Products/Turning/General_turning/st20086176_ts2000_ts2500_gb_lr.pdf)
- [27] Secotools. *TS2000 & TS2500* [online]. © 2013 [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: <http://www.secotools.com/cs/Global/Products/Milling1/General-Turning/TS2000TS2500/>
- [28] Secotools. *TH 1000* [online]. © 2013 [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: [http://www.secotools.com/CorpWeb/Downloads/seconews1\\_2010/concertinafolds/GB\\_Folde\\_r\\_TH1000\\_HR\\_\(CMYK\).pdf](http://www.secotools.com/CorpWeb/Downloads/seconews1_2010/concertinafolds/GB_Folde_r_TH1000_HR_(CMYK).pdf)
- [29] HUMÁR, Anton. *Technologie I: Základní metody obrábění*. Brno, 2004. Dostupné z: <http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/ust/zakl.m.obr.1.pdf>
- [30] STRNAD, Tomáš. *Obrobitelnost austenitické oceli*. Plzeň, 2011. Dostupné z: [http://portal.zcu.cz/wps/PA\\_Courseware/DownloadDokumentu?id=43007](http://portal.zcu.cz/wps/PA_Courseware/DownloadDokumentu?id=43007)
- [31] Sandvik Coromant. *Soustružení tvrzených součástí* [online]. © 2013 [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: [http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general\\_turning/getting\\_started/turning\\_different\\_materials/hard\\_part\\_turning/pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general_turning/getting_started/turning_different_materials/hard_part_turning/pages/default.aspx)
- [32] Taking The Fear Out Of Hard Turning. *MMS online* [online]. 1996 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://www.mmsonline.com/articles/taking-the-fear-out-of-hard-turning>

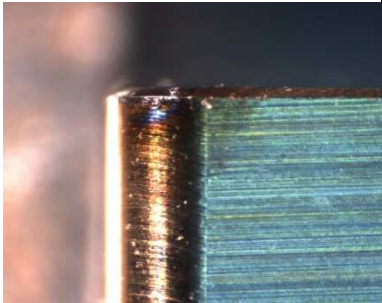
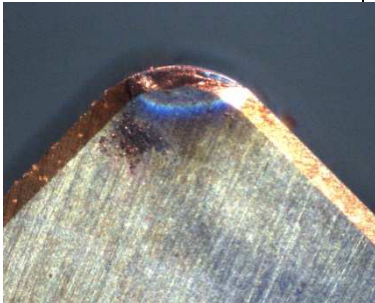
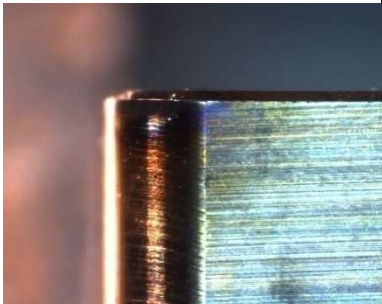
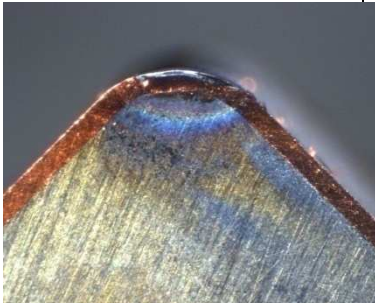
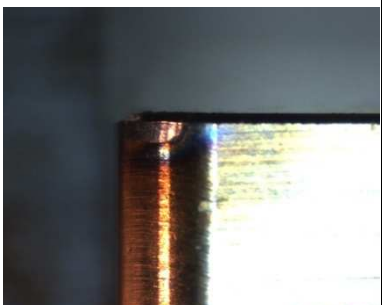
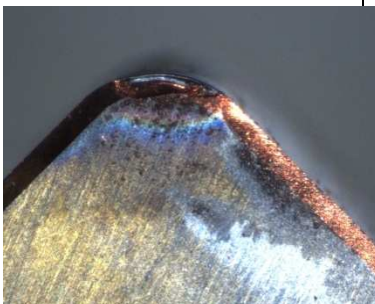

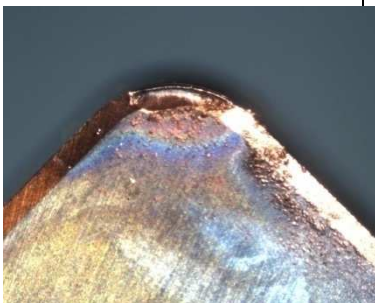


- [33] GRZESIK, W, K ŽAK a M PRAZMOVSKI. Effects of cryogenic cooling on surface layer characteristics produced by hard turning. *Archives of Materials Science and Engineering* [online]. 2012, č. 54, s. 5-12 [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: [http://www.archivesmse.org/vol54\\_1/5411.pdf](http://www.archivesmse.org/vol54_1/5411.pdf)
- [34] Kryogenní chlazení při obrábění. In: *INInet* [online]. 2011 [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: [http://www.ininet.cz/index.php?option=com\\_content&view=article&id=44:kryogenni-chlazení-pri-obrabení&catid=7:clanky&Itemid=14](http://www.ininet.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=44:kryogenni-chlazení-pri-obrabení&catid=7:clanky&Itemid=14)
- [35] ŠEBELA, Radek. *Obrábění těžkoobrobitelných materiálů* [online]. Brno, 2012 [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: [https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/9590/Obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD%20t%C4%9B%C5%BEkoobrobiteln%C3%BDch%20materi%C3%A1l%C5%AF\\_%C5%A0ebela.pdf?sequence=1](https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/9590/Obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD%20t%C4%9B%C5%BEkoobrobiteln%C3%BDch%20materi%C3%A1l%C5%AF_%C5%A0ebela.pdf?sequence=1). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [36] Sandvik Coromant. *GC4215 – increasing productivity through secure performance* [online]. © 2013 [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: [http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/pdf/Supplement\\_20072/eng/A2\\_A4.pdf](http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/pdf/Supplement_20072/eng/A2_A4.pdf)
- [37] Sandvik Coromant. *Třídy Sandvik Coromant* [online]. © 2013 [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: [http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting\\_tool\\_materials/sandvik\\_coromant\\_grades/pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting_tool_materials/sandvik_coromant_grades/pages/default.aspx)
- [38] Sandvik Coromant. *General turning* [online]. © 2013 [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: [http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/pdf/metalworking\\_products\\_061/tech\\_a\\_8.pdf](http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/pdf/metalworking_products_061/tech_a_8.pdf)
- [39] Sandvik Coromant. *Povlakovaný slinutý karbid* [online]. © 2013 [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: [http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting\\_tool\\_materials/coated\\_cemented\\_carbide/pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting_tool_materials/coated_cemented_carbide/pages/default.aspx)
- [40] HOFFMAN GROUP. *GARANT ToolScout: Machining Handbook* [online]. 2012 [cit. 2013-04-14]. ISBN 3-00-016882-6. Dostupné z: [http://www.hoffmann-group.com/fileadmin/user\\_upload/1\\_International/catalog/en/ZHB/ZHB.pdf](http://www.hoffmann-group.com/fileadmin/user_upload/1_International/catalog/en/ZHB/ZHB.pdf)
- [41] Tungaloy. *Stainless steel turning series: T6100 series and AH600 series* [online]. 2013 [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: [http://www.tungaloy.co.jp/common/products/pdf/323\\_high\\_unprinted.pdf](http://www.tungaloy.co.jp/common/products/pdf/323_high_unprinted.pdf)
- [42] Tungaloy. *Turnline: AH905* [online]. 2011 [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: <http://www.tungaloy.co.jp/common/products/pdf/404.pdf>
- [43] Tungaloy. *GT/NS700series* [online]. 2006 [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: <http://www.tungaloy.co.jp/common/products/pdf/354.pdf>
- [44] Tungaloy. *BXMseries* [online]. 1996 [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: <http://www.tungaloy.co.jp/common/products/pdf/388.pdf>
- [45] Sandvik Coromant. *Polykrystalický kubický nitrid bóru* [online]. © 2013 [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: [http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting\\_tool\\_materials/polycrystalline\\_cubic\\_boron\\_nitride/pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting_tool_materials/polycrystalline_cubic_boron_nitride/pages/default.aspx)
- [46] THAKU, D, B RAMAMOORTHY a L VIJAYARAGHAVAN. Effect of high speed cutting parameters on the surface characteristics of superalloy Inconel 718. *Proceedings of the World Congress on Engineering* [online]. 2010, č. 3 [cit. 2013-04-14]. ISSN 2078-0966. Dostupné z: [http://www.iaeng.org/publication/WCE2010/WCE2010\\_pp2108-2111.pdf](http://www.iaeng.org/publication/WCE2010/WCE2010_pp2108-2111.pdf)

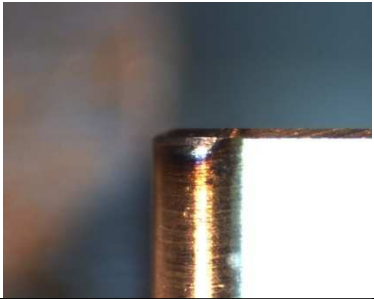
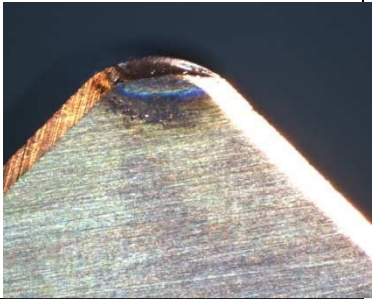
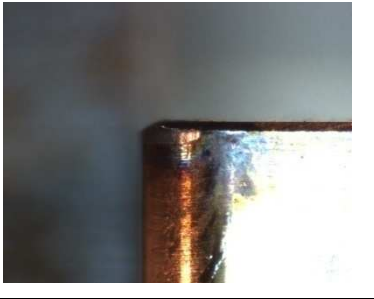
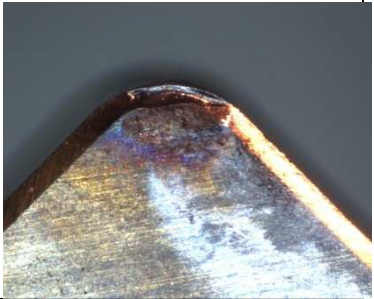
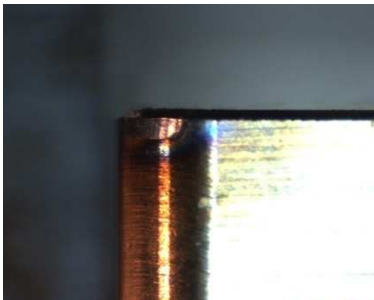

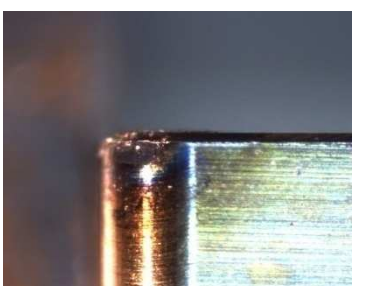
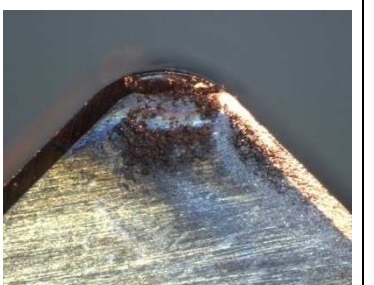
## **PŘÍLOHA č.1**

### **Průběh měření opotřebení během testu trvanlivosti břitu**

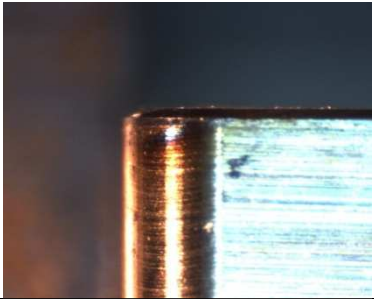
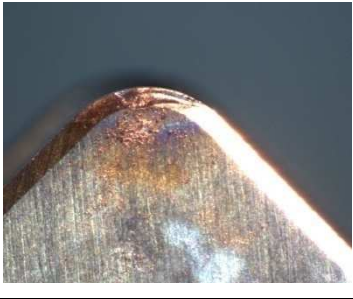
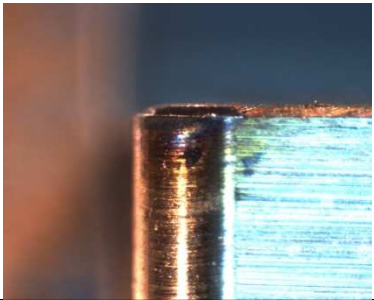
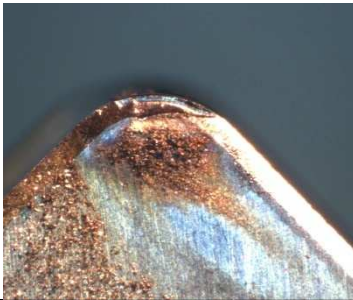
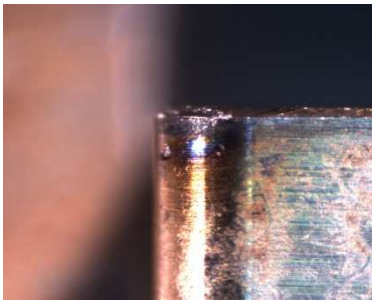
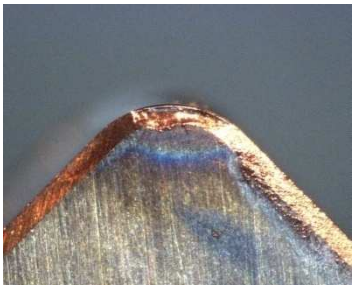
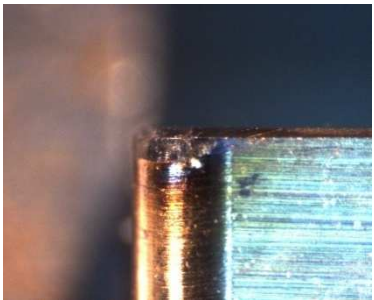
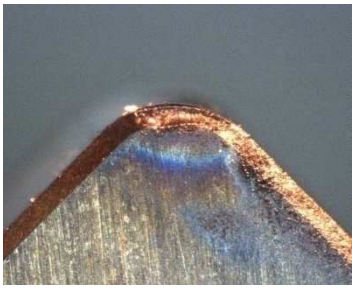
Tabulka 8-1: Průběh soustružení při rychlosti  $v_c=150$  [m/min] – 1. jízda

přejezd	čas přejezdu (celkem)	opotřebení hřbetu [mm]	hřbet	čelo
1	2:45 (2:45)	0,035		
2	2:42			
3	2:41 (8:06)	0,084		
4	2:40			
5	2:39 (13:25)	0,117		
6	2:38			
7	2:37 (18:40)	0,154		

Tabulka 8-2 Průběh soustružení při rychlosti  $v_c=150$  [m/min] – 2. jízda

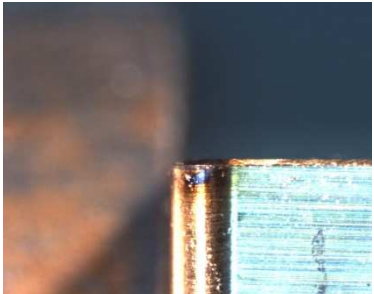
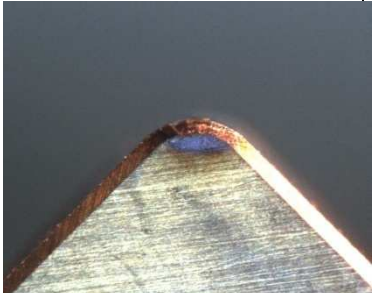
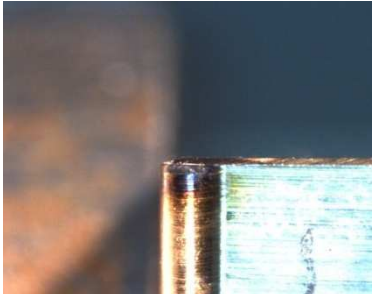

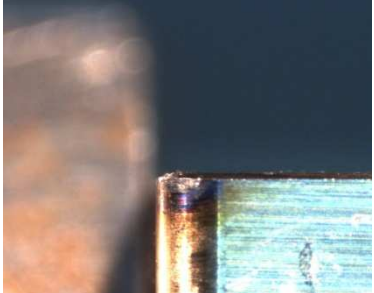

přejezd	čas přejezdu (celkem)	opotřebení hřbetu [mm]	hřbet	čelo
1	2:34 (2:34)	0,035		
2	2:33			
3	2:32 (7:39)	0,075		
4	2:31			
5	2:29 (12:40)	0,11		
6	2:29			
7	2:28 (17:37)	0,143		

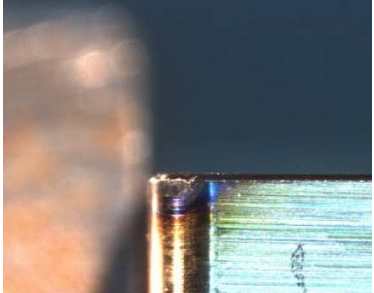

Tabulka 8-3 Průběh soustružení při rychlosti  $v_c=200$  [m/min] – 1. jízda

přejezd	čas přejezdu (celkem)	opotřebení hřbetu [mm]	hřbet	čelo
1	1:49 (1:49)	0,042		
2	1:47			
3	1:45 (5:21)	0,084		
4	1:44			
5	1:42 (8:47)	0,124		
6	1:41			
7	1:40 (12:08)	0,173		
8	1:39			

9	1:38 (15:25)	0,2		
---	-----------------	-----	--	---

Tabulka 8-4 Průběh soustružení při rychlosti  $v_c=200$  [m/min] – 2. jízda

přejezd	čas přejezdu (celkem)	opotřebení hřbetu [mm]	hřbet	čelo
1	1:37 (1:37)	0,038		
2	1:36			
3	1:35 (4:48)	0,08		
4	1:34			
5	1:33 (7:55)	0,13		
6	1:32			

7	1:31 (10:58)	0,168		
---	-----------------	-------	--	---