

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A
METROLOGIE



TVRDÉ SOUSTRUŽENÍ
HARD TURNING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2020

AUTOR: Luboš Jirák

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Zdeněk Pitrmuc

STUDIJNÍ PROGRAM: Teoretický základ strojního inženýrství

STUDIJNÍ OBOR: bez oboru



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jirák** Jméno: **Luboš** Osobní číslo: **474824**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Tvrdé soustružení

Název bakalářské práce anglicky:

Hard turning

Pokyny pro vypracování:

- 1) Technologická specifika tvrdého soustružení
- 2) Požadavky na strojní vybavení
- 3) Klasifikace řezných materiálů pro tvrdé soustružení
- 4) Průzkum trhu předních světových výrobců nástrojů

Seznam doporučené literatury:

- 1) DAVIM, J. P., ed. Modern machining technology: a practical guide. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011. Woodhead Publishing in mechanical engineering. ISBN 978-0-85709-099-7.
- 2) Aplikační návody výrobců nástrojů

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

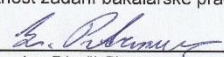
Ing. Zdeněk Pitrmuc, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

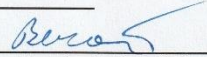
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

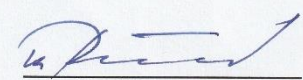
Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Ing. Zdeněk Pitrmuc
podpis vedoucí(ho) práce


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


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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

23.6.2020

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Zdeňka Pitrmuce s použitím literatury uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

V Praze

Luboš Jirák

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Zdeňku Pitrmucovi za věnovaný čas a cenné připomínky.

Abstrakt (Anotace)

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou tvrdého soustružení. Práce pojednává o výhodách, nevýhodách a důvodech, proč použít tuto technologii. V úvodní kapitole je popsána problematika tvrdého soustružení. Pozornost je věnována strojnímu vybavení a výrobcům strojů. Výrazná část práce obsahuje rozdělení a charakteristiku řezných materiálů a průzkum trhu předních světových výrobců nástrojů. V závěru je obsaženo technicko-ekonomické posouzení tvrdého soustružení.

Klíčová slova

obrábění, tvrdé soustružení, strojní vybavení, tvrdé materiály, řezné materiály, řezné podmínky

Abstract (Annotation)

This bachelor thesis deals with hard turning. It refers to the advantages, disadvantages and reasons for using this technology. The introductory chapter describes the issue of hard turning. It is focused on machinery equipment and machine manufacturers. A significant part of the work contains the division and characteristics of cutting materials and the market research of the world's leading tool manufacturers. At the end there is a technical and economic assessment of hard turning.

Keywords

machining, hard turning, machinery equipment, hard materials, cutting materials, cutting conditions

Obsah

1	Úvod	8
2	Tvrdé soustružení	9
2.1.1	Výhody tvrdého soustružení oproti broušení.....	9
2.2	Skupiny obráběcích materiálů.....	10
2.2.1	Klasifikace obráběných materiálů dle ISO S	11
2.2.2	Klasifikace obráběných materiálů dle ISO H	14
2.3	Požadavky na obráběcí stroje.....	15
2.3.1	Vlastnosti velmi přesných soustruhů pro tvrdé obrábění.....	16
2.4	Řezné podmínky pro tvrdé soustružení.....	17
2.5	Chlazení.....	17
3	Výrobci strojů pro tvrdé obrábění	19
3.1	Firma Hembrug Machine Tools	19
3.2	Firma Schaublin machines sa	21
3.3	Firma Hwacheon Machinery	22
3.4	Firma Hardinge Inc.	22
4	Přehled a charakteristika řezných materiálů.....	24
4.1	Klasifikace řezných materiálů.....	25
4.2	Přehled materiálů vhodných pro tvrdé obrábění	25
4.2.1	Řezná keramika.....	26
4.2.2	Supertvrdé řezné materiály	27
4.3	Průzkum trhu předních světových výrobců nástrojů.....	29
4.3.1	Iscar.....	29
4.3.2	Sandvik Coromant	32
4.3.3	Seco Tools AB	36
4.3.4	CeramTec GmbH.....	39

4.3.5	Tungaloy	41
4.4	Srovnání CBN a řezné keramiky (ŘK)	44
5	Technicko-ekonomické posouzení tvrdého soustružení.....	45
6	Závěr.....	47
7	Použitá literatura.....	48
8	Seznam obrázků.....	55
9	Seznam tabulek.....	56

1 Úvod

V této době se každá firma snaží co nejvíce snížit náklady. Toho lze nejlépe dosáhnout snížením výrobních časů. Tomuto snížení nákladů dopomáhají moderní rezné materiály, které mohou být použity za vysokých rezných podmínek.

V minulosti bylo broušení jediný způsob obrábění kalených a velmi tvrdých materiálů. Tato metoda je dnes už na ústupu. Nahrazuje ji technologie tvrdé obrábění.

Technologie tvrdého obrábění je obvykle definována jako obrábění součástí tvrdších než 45 HRC. Nejčastěji se provádí na součástech, které prošly tepelným zpracováním s tvrdostí povrchu v rozmezí 45 HRC až 68 HRC. [1]

Technologie tvrdého obrábění se snaží nahradit dokončovací operace broušení kalených a tvrdých materiálů obráběcím nástrojem s definovanou geometrií břitu, tj. soustružení, frézování, vrtání a vyvrtávání. Nejčastějšími materiály používanými při tvrdém obrábění jsou slinuté karbidy (SK), polykrystalický kubický nitrid bóru (PCBN) a rezná keramika (ŘK). [2]

Důležitou stránkou při tvrdém obrábění je volba stroje, určeného a navrženého na tuto technologii. Dále správně zvolené rezné materiály, kterých je na trhu veliké množství a díky tomu je možné si vybrat nejvhodnější nástroj pro konkrétní aplikaci. A v neposlední řadě správné nastavení optimálních rezných podmínek pro dosažení co největší spolehlivosti a produktivity obrábění.

2 Tvrdé soustružení

Tvrdé soustružení je definováno jako obrábění rotačních součástí, které prošly tepelným zpracováním s tvrdostí vyšší než 45 HRC. Hlavní rotační pohyb vykonává obrobek. Nástroj, tedy soustružnický nůž, vykonává pohyby vedlejší (posuv a přísuv).

Tvrdé soustružení se začalo rozvíjet začátkem devadesátých let. Důvodem byla dostupnost nových nástrojů a schopnost navrhnout soustruh, který byl tuhý, stabilní a dostatečně přesný. Výsledkem tohoto vývoje je, že povrchová úprava se stává skutečnou alternativou broušení, tedy přesnou operací dokončování. [3]

O tvrdém soustružení můžeme říci, že pracujeme s ocelí, jejíž tvrdost je mezi 55–65 HRC a je cenově výhodnou alternativou k broušení. [4]

2.1.1 Výhody tvrdého soustružení oproti broušení

- Vyšší kvalita
- Úspora nákladů – nižší náklady na vybavení
- Vyšší produktivita – vyšší úběr materiálu, to může ve srovnání s broušením zvýšit rychlost soustružení až 4krát a tím pádem se zajistí zkrácení dodacích lhůt
- Ekonomičnost – nevyžaduje nutně chladicí kapalinu
- Vysoká flexibilita – s jedním nástrojem a upínací sestavou je možné obrábět širokou škálu produktů různých tvarů a velikostí. [1] [5] [6]

Přestože tvrdé soustružení může dosáhnout působivých výsledků, není to alternativa pro všechny díly obvykle dokončené broušením. Broušení má velikou výhodu v tom, že ve srovnání s tvrdým soustružením může dosáhnout vyšší přesnosti. [1]

Tab. č. 1 - Tvrdé soustružení ve srovnání s broušením [6]

	Tvrdé soustružení	Broušení
1.	Krátké nastavovací časy	Dlouhé nastavovací časy
2.	Jednoduchá operace sevření	Více upínacích operací
3.	Doby cyklu až o 80% rychlejší	Dlouhé doby cyklu
4.	Možný vysoký objem třísky	Nízký objem třísky
5.	Jednobodový hrot nástroje	Profilovaný brusný kotouč
6.	Nízké investiční náklady	Vysoké investiční náklady
7.	Řezání za sucha, tedy čistý ekologický proces	Neekologické prostředí kvůli broušenému kalu

2.2 Skupiny obráběcích materiálů

V kovoobráběcím průmyslu se vyskytuje veliké množství obráběných materiálů a každý z nich má své specifické vlastnosti. Tyto vlastnosti mohou být ovlivněny množstvím legujících prvků, tepelným zpracováním apod. To vše rozhoduje o výběru geometrie nástroje a rezných podmínek. Pro jednodušší volbu nástrojů byly tyto materiály rozděleny v souladu s normami ISO do šesti skupin:

- ISO P (značené modrou barvou) – patří sem skupiny od nelegovaných až po vysokolegované materiály, oceli na odlitky a feritické a martenzitické korozivzdorné oceli
- ISO M (značené žlutou barvou) – je skupina určena k obrábění korozivzdorných ocelí
- ISO K (značená červenou barvou) – skupina pro obrábění litin
- ISO N (značené zelenou barvou) – do této skupiny patří neželezné kovy
- ISO S (značené hnědou barvou) – do této skupiny patří žáruvzdorné slitiny a titan
- ISO H (značené šedou barvou) – skupina kalených a vysoce tvrdých ocelí a tvrzených a kalených litin. Některé materiály nejen na bázi železa, ale i na bázi

niklu (vytvrditelné niklové slitiny), které náleží skupinám P a S, po tepelném zpracování nově spadají do této skupiny. Je tedy třeba vždy zohlednit, o jaký stav materiálu se jedná. [7]

V této práci se budu věnovat pouze skupině ISO S a ISO H, které souvisejí s tvrdým obráběním.

2.2.1 Klasifikace obráběných materiálů dle ISO S

Do skupiny materiálů dle ISO S řadíme žáruvzdorné slitiny, které se značí HRSA (heat resistant super alloys) a titan. Tyto materiály jsou velmi tvrdé a pevné za tepla a mají vysokou odolnost proti korozi. Využívají se například v letecké a kosmické technice. [7] [8]

Žáruvzdorné slitiny (HRSA)

Žáruvzdorné slitiny nabízejí výborné vysokoteplotní vlastnosti, včetně pevnosti při vysokých teplotách, z nichž mnohé jsou vhodné pro aplikace v jaderném prostředí. Velká část raného výzkumu žáruvzdorných kovových slitin byla zaměřena na aplikace v leteckém a kosmickém průmyslu. [9]

Tyto materiály jsou velmi tvrdé, pevné, odolné vůči korozi a oxidaci. Používají se až do teploty 1000 °C. Žáruvzdorné materiály se pro zvýšení pevnosti precipitačně vytvrzují. Většinou se k jejich vytvrzení používá proces stárnutí. Dělí se do tří skupin podle obrábělnosti: Niklové slitiny, kobaltové slitiny a slitiny na bázi železa. [7]

- **Niklové slitiny**

Mezi HRSA jsou niklové slitiny nejvíce používané. Slitiny na bázi niklu lze vytvrdit dvěma způsoby:

- a) Substituční zpevnění tuhého roztoku – základní matrice je zpevněna prvky Cr, W, Co, Fe, Mo, Ta
- b) Precipitační vytvrzení – slitina je legována Al, Ti

Mezi vytvrditelné niklové slitiny patří například: Inconel 718, Nimonic 80A, 706 Waspalloy. Používají se například v leteckém průmyslu. [10] [7]

- **Slitiny na bázi železa**

Hlavní prvek, obsažený v této slitině je železo. Dalšími prvky, které mají také velké zastoupení jsou Cr a Ni. Legujícími prvky jsou Mo, W, Co, C. Tyto materiály se vytvrzují pomocí precipitace, která je způsobena legováním Ti, Al a Nb. Do této skupiny patří například Incoloy 800, Incoloy 903, Incoloy 901. Tyto materiály mají nejnižší pevnost za tepla. [7] [10]

- **Kobaltové slitiny**

Hlavní prvek obsažený v této slitině je kobalt spolu s prvky Ni, W a Cr. Doplnujícími prvky jsou Mo, Ta, Ti, Fe, C. Tyto slitiny se vytvrzují substitučním zpevněním. Mají nejlepší technické vlastnosti za tepla a nejvyšší korozní odolnost a jsou nejvíce využívány v lékařské technice. Do této skupiny patří například Haynes 25, Haynes 188. [7] [10]

Hlavní legující prvky v HRSA materiálech

Jedním z legujících prvků těchto materiálů je nikl. Stabilizuje strukturu kovových materiálů a jejich vlastnosti za zvýšených teplot. Dalším prvkem je uhlík. Ten zvyšuje mez pevnosti při tečení za vysokých teplot. Kobalt, molybden a wolfram zvyšují pevnost za vysokých teplot. Pro zvýšení odolnosti proti oxidaci a korozi za vyšších teplot se používá chrom, hliník a křemík. [7]

Hlavní využití

Široké využití mají hlavně v leteckém průmyslu. Z těchto materiálů se vyrábí letecké motory a plynové turbíny. Další využití je v ropném a plynárenském průmyslu, kde se z HRSA slitin vyrábí zařízení pro těžbu z mořského dna. Dále se využívají pro náhrady kloubů v lékařství a pro aplikace vyžadující vysokou odolnost proti korozi. [7]

Obrobitelnost HRSA materiálů

Obrobitelnost se zhoršuje v tomto pořadí: materiály na bázi železa, niklové slitiny a kobaltové slitiny. Při obrábění tvoří člákovitou třísku. To způsobuje vznik velkých, vysoce dynamických řezných sil. Další problém nastává s generováním a odvodem tepla. Teplo mohou odvádět třísky utvářené při řezných procesech, ale vzhledem k tomu, že se

při obrábění tvoří článkovitá tříška, neplní se tato funkce příliš dobře. Navíc HRSA materiály nejsou samy o sobě dobrými vodiči tepla. Teploty v místech řezu dosahují až 1300 °C a pokud se teplo neodvádí tříškou, zvyšuje se teplota nástroje a obrobku. Vysoká pevnost, deformační zpevnování a adheze jsou příčinou vzniku opotřebení ve tvaru vrubu umístěného na úrovni maximální hloubky řezu a společně tvoří extrémně abrazivní prostředí pro břit. Výsledkem je pak kratší životnost nástroje, případně i deformace obrobku. [7] [8]

Obecně je doporučeno používat břitové destičky s velkým úhlem nastavení, které jsou kruhového tvaru. Kromě karbidových tříd lze pro soustružení v závislosti na aplikaci použít keramické nástrojové třídy a kubický nitrid boru. Tyto materiály se mohou používat při vyšších řezných podmínkách, a to vede k vyšší produktivitě. [7] [8]

Titan

Titan je relativně lehký kov. Má vysokou teplotu tání (1666 °C). Titan patří do této skupiny ISO S, ale jeho tvrdost se pohybuje okolo 36 HRC, a tudíž se nedá řadit do tvrdého soustružení. Jeho slitiny jsou v mnoha průmyslových odvětvích velmi atraktivní kvůli vysoké pevnosti, vlastnostech při vysokých teplotách a vynikající odolnosti proti korozi, zejména v oxidujících kyselinách, chloridových médiích a ve většině přírodních prostředích. Vzhledem k obtížné těžbě a zpracování je tento materiál velmi drahý. Má široké uplatnění v leteckém, potravinářském, biomedicinském a chemickém průmyslu. [11]

Slitiny titanu se v závislosti na jejich struktuře a přítomnosti jednotlivých prvků dělí do čtyř skupin:

- Neupravený, čistý titan
- Slitiny alfa – jsou středně pevné, odolné proti oxidaci a mají dobrou vrubovou houževnatost. Hlavními přísadami těchto slitin jsou hliník (Al), kyslík (O) nebo dusík (N). [7] [11]
- Slitiny beta – tyto slitiny se používají při vysokých teplotách. Hlavními přísadami jsou molybden (Mo), železo (Fe), vanad (vanad), chrom (Cr) nebo mangan (Mn). [7] [11]
- Smíšené slitiny $\alpha+\beta$ – obsahují směs obou uvedených druhů. Tyto slitiny mohou být tepelně zpracovány, kaleny a stárnuty, aby se zvýšila pevnost.

Nejoblíbenější slitinou této skupiny a zároveň v současnosti nejvíce používanou slitinou titanu je Ti-6Al-4V. [7] [11]

Titan má vysoký poměr pevnosti vůči hmotnosti, vysokou korozní odolnost a jen 60% hustotu ve srovnání s ocelí. To umožňuje konstrukci součástí s menší tloušťkou stěn. [7] [11]

Hlavní využití

Vzhledem k tomu, že titan je odolný proti korozi, je možné ho použít i ve velmi agresivním prostředí, kde většina konstrukčních materiálů nevydrží. Je tedy vhodný pro tepelné výměníky, odsolovací zařízení a různé součásti letounů. [7]

Obrobitelnost titanu

Obrobitelnost titanu je velmi špatná, a proto vyžaduje speciální obráběcí nástroje. Při jeho obrábění vznikají vysoké řezné síly a velké množství tepla. Je to způsobeno tím, že titan má velmi špatnou tepelnou vodivost a zachovává si pevnost i za vysokých teplot. Při obrábění titanu dochází k chemické reakci mezi třískou a materiálem nástroje a to může způsobit poškození či úplné zničení břitové destičky. Pro obrábění titanu se musí volit pozitivní geometrie nástroje s dobrou houževnatostí břitu. Tento nástroj by měl mít dobrou tvrdost za tepla, nízký obsah kobaltu a neměl by reagovat s titanem. Nejčastěji se tedy používá jemnozrný nepovlakovaný slinutý karbid. Na nástroji je tak možno zachovat ostrou řeznou hranu, která je při obrábění titanu velmi potřebná. Povlakované nástroje se již dnes také používají, hlavně z důvodu snížení prostupu tepla do nástroje. V minulosti měly povlaky větší tloušťky, to způsobovalo výrazné zaoblení břitu. V dnešní době jsou tloušťky povlakovaných nástrojů menší, a tudíž zachovávají ostřejší břit. [12] [7]

2.2.2 Klasifikace obráběných materiálů dle ISO H

Do této skupiny materiálů řadíme kalené a popouštěné oceli s tvrdostí vyšší jak 45 HRC do 68 HRC. Součásti určené pro soustružení se nejčastěji pohybují v rozmezí 55-68 HRC. Mezi nejběžnější tvrzené materiály patří:

- Cementované oceli – tvrdost 60 HRC
- Oceli pro kuličková ložiska – tvrdost 60 HRC
- Nástrojové oceli – tvrdost 68 HRC
- Bílá litina – tvrdost 50 HRC
- Konstrukční oceli – tvrdost 40–45 HRC
- Manganové oceli [7]

Nejběžnější součásti, které se obrábí jsou hřídele, pastorky, ozubená kola, lisovadla a další. [7]

Obrobitelnost tvrzené oceli

Při obrábění tvrzených ocelí vznikají poměrně vysoké řezné síly a požadavky na výkon jsou také vysoké. Nejčastěji se u nich provádí operace dokončování. Obráběcí nástroj musí mít dobrou tvrdost za tepla, stabilitu za vysokých teplot, mechanickou pevnost a odolnost proti abrazivnímu opotřebení. Nejčastěji používaným materiálem pro obráběcí nástroj, který splňuje tyto vlastnosti je kubický nitrid bóru (CBN), který je hned po diamantu druhý nejtvrdsí materiál na světě. Tento materiál umožňuje použít soustružení namísto broušení. Důvod, proč nelze použít diamant pro obrábění tvrzené oceli je, že diamant reaguje s uhlíkem v oceli a v důsledku toho se diamant mění na grafit. Dále je možné k obrábění těchto ocelí použít řeznou keramiku. [7]

2.3 Požadavky na obráběcí stroje

Pro volbu obráběcího stroje je potřeba vědět, s jakou přesností má být daná součást vyrobena. Při použití obyčejných konvenčních soustruhů se při tvrdém obrábění za dodržení daných podmínek dá dosáhnout přesnosti obrobků v rozsahu IT 6-7. Taková přesnost samozřejmě závisí na rozměru obrobku. Pro dosažení větší přesnosti výrobků je potřeba použít obráběcí stroje s vysokou tuhostí. Při tvrdém soustružení je jeden z nejdůležitějších faktorů negativní geometrie břitu. Kvůli tomuto faktoru je tangenciální složka řezné síly o hodně menší než složka pasivní. Pasivní složka řezné síly výrazně

způsobuje deformace v technologické soustavě, a to se také projevuje v přesnosti výrobků. [13] [14]

Pro dosažení lepší přesnosti výrobků se tedy používají vysoce přesné soustruhy. Tyto soustruhy díky přesnosti posuvů, vřetenovému systému, tepelné stabilitě a dynamické tuhosti dosahují přesnosti v rozsahu IT 4–6 a $R_z = 1 \mu\text{m}$, jako brousící stroje. Dosažení těchto parametrů je podmíněno, kromě soustruhu, také konstrukcí a specifických podmínek nástrojů. [13] [14]

2.3.1 Vlastnosti velmi přesných soustruhů pro tvrdé obrábění

- Přírodní žulový základ – základna z žuly perfektně tlumí vibrace, má vysokou dynamickou a statickou tuhost. Žula má velmi nízký koeficient tepelné roztažnosti, díky tomu zajišťuje vysokou tepelnou stabilitu a nekoroduje. [15]
- Vřeteno a suport s hydrostatickým uložením – vřetenová ložiska a kluzná vedení jsou nejdůležitějšími prvky soustruhu, které určují přesnost obrobků a životnost stroje. Tyto komponenty zajišťují: vynikající přesnost běhu, tlumící vlastnosti, vysokou tuhost nezávislou na rychlosti, dobrou tepelnou stabilitu, delší životnost nástroje. [15]
- Prvky vytvářející teplo a vibrace jsou zcela izolovány od stroje. [15]
- Přesnost porovnatelná s brousícími stroji. [15]
- Rozměrová a tvarová přesnost IT 4-6. [15]

Tab. č. 2 - Technické parametry soustruhů [13] [16] [17]

Technické parametry			
Výkon	5-41 kW	Kluzné vedení	
Vřeteno		Tuhost	720 N. μm^{-1}
Otáčky	2 000-12 000 ot/min	Nejmenší pohybový krok	0,05 μm^{-1}
Přesnost vřetena:	0,1 μm	NC- řízení	
Tuhost	1000 N. μm^{-1}	Systémové rozlišení	0,05 μm

2.4 Řezné podmínky pro tvrdé soustružení

Konvenční řezné parametry pro obrábění tvrzených materiálů slinutým karbidem se pohybují v rozsahu 15 až 60 m.min⁻¹, hloubka řezu 0,05 až 0,3 mm a posuv 0,05 až 0,2 mm. Nové řezné materiály, jako je řezná keramika a kubický nitrid bóru, jsou schopné dosahovat násobně vyšších řezných parametrů, a tím se zařazují k vysokoproduktivnímu obrábění. Rozsah řezné rychlosti může být 200 až 400 m.min⁻¹, hloubka řezu do 0,8 mm a posuv až 0,5 mm. [2]

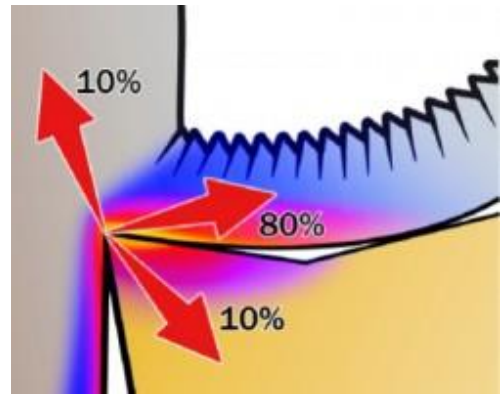
Tab. č. 3 - Příklad obecných řezných podmínek pro tvrdé soustružení [16]

Hrubovací operace	
Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	150
Posuv f [mm.ot ⁻¹]	0,3-0,4
Hloubka řezu a_p [mm]	0,2-0,3
Dokončovací operace	
Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	180
Posuv f [mm.ot ⁻¹]	0,1-0,2
Hloubka řezu a_p [mm]	0,1-0,2

2.5 Chlazení

Obrábění kalených součástí bez řezné kapaliny je naprosto žádoucí situací. CBN i keramické břitové destičky mají schopnost odolat vysokým teplotám přesahujících 1000 °C, a tím se odstraňují náklady, které souvisejí s použitím řezné kapaliny, usnadní se manipulace s třískami a sníží se zatížení životního prostředí. Stává se, že některé aplikace vyžadují použití řezné kapaliny, a to například z důvodu kontroly tepelné stability v obrobku, pro usnadnění dělení třísek nebo při odvádění tepla při obrábění velkých součástí. V takovýchto případech je potřeba zajistit nepřetržitý přívod kapaliny po dobu trvání celého soustružení. [18]

Je obecně známo, že teplo, které vzniká během obrábění, se přenáší z 80 % do třísky, z 10 % do obroku a z 10 % do břitové destičky. Z toho je patrné, jak je velmi důležité odvádění třísek z místa řezu (viz obr. č. 1). [19]



Obr. č. 1 - Odchod tepla z místa řezu [19]

3 Výrobci strojů pro tvrdé obrábění

Pro porovnání jsem vybral několik významných firem, které se zabývají výrobou a prodejem vysoce přesných soustruhů pro tvrdé obrábění. Jedná se o výrobce se širokou nabídkou obráběcích strojů, které se uplatňují v nejrůznějších průmyslových odvětvích.

- Firma Hembrug Machine Tools
- Firma Schaublin machines sa
- Firma Hwacheon Machinery
- Firma Hardinge Inc.

3.1 Firma Hembrug Machine Tools

Hembrug je nizozemská firma se sídlem v Haarlemu. Tato společnost byla jedním z průkopníků technologie tvrdého obrábění a nyní se zcela zabývá extrémně přesnou technologií tvrdého obrábění. Již více než 50 let navrhuje, vyrábí a prodává po celém světě nejpreciznější soustružnické stroje pod názvem Mikrotun. Tato řada umožňuje výrobcům obrábět obrobky v nejvyšší třídě přesnosti až do průměru 1500 mm s tvrdostí až do 70 HRC. Při použití těchto strojů lze dosáhnout tolerancí: přesnost povrchu $R_a = 0,1$ až $0,4 \mu\text{m}$, tvarová přesnost mezi $0,0002$ a $0,001$ mm a rozměrová přesnost $0,002$ mm nebo méně. S takovými tolerancemi jsou stroje Mikrotun konkurencí především pro obvodové brusky, nad nimiž vynikají i v několika dalších oblastech. [20]

Všechny stroje řady Mikrotun jsou charakteristické tím, že mají základnu z přírodní žuly s integrovaným systémem tlumení vibrací. Přírodní žula je ideální základna pro vysoce přesné stroje, protože má velmi dobré tlumící vlastnosti a vysokou tepelnou stabilitu. [21]

Dále jsou vybaveny hydrostatickými ložisky vřetene a vodícími drážkami, které poskytují strojům vynikající tlumící vlastnosti a vysokou tuhost nezávislou na rychlosti. Výhodou je, že vřeteno je zcela bez opotřebení a zajišťuje nízké provozní náklady s dlouholetou přesností. Opakovatelnost a házení dosahují přesnosti $0,1$ mikrometrů. [21]

Všechny soustruhy mají regulaci teploty oleje na $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$. To zaručuje stabilní a spolehlivý proces, nezávislý na okolní teplotě. [21]

Hembrug nabízí 5 horizontálních a 5 vertikálních verzí svých strojů. Horizontální jsou určeny pro malé až střední obrobky do průměru 500 mm a hmotnosti 300 kg. Vertikální jsou určeny pro velké obrobky do průměru 1 500 mm a hmotnosti 2 000 kg. [20]

Tab. č. 4 - Technické parametry horizontálních verzí Hembrug Mikrotun [22] [23]

	Baseline	Mikrotun 100	Mikrotun 100 XLS	Mikrotun 100XLD	Mikrotun 500XL
Max. obráběný průměr	ø 380 mm	ø 380 mm	ø 350 mm	ø 610 mm	ø 500 mm
Max. hmotnost obrobku	50 kg	100 kg	50 kg	200 kg	300 kg
Otáčky vřetene	4000 ot/min	4000 ot/min	4000 ot/min	2000 ot/min	2000 ot/min
Házení vřetena	0.15 µm	0.1 µm	0.15 µm	0.2 µm	-
Přesnost opakovatelnosti	0.1 µm	0.1 µm	0.1 µm	± 0.1 µm	0.1 µm
Přesnost polohování	1 µm	1 µm	1 µm	1 µm	1 µm
Rychlost posuvu	12 m/min	12 m/min	12 m/min	12 m/min	30 m/min



Obr. č. 2 - Horizontální verze Hembrug Mikrotun [23]

3.2 Firma Schaublin machines sa

Schaublin machines sa je švýcarská firma se sídlem v oblasti Jura Arc, odkud pochází spousta firem s mezinárodní reputací. Tato společnost se zabývá konstrukcí vysoce přesných strojů. Klíčové pojmy, které charakterizují tuto firmu jsou vysoká přesnost, opakovatelnost, spolehlivost, automatizace a efektivita. [24]

Firma Schaublin nabízí pět vysoce přesných soustruhů pro tvrdé obrábění obrobků s tvrdostí do 65 HRC až do průměru 330 mm. Tyto stroje dosahují drsnosti $R_a = 0,1$ až $0,4 \mu\text{m}$. [25]

Tab. č. 5 - Parametry přesných soustruhů firmy Schaublin [24]

	225 TMi-CNC	180-CCN	125-CCN	202 TG	225 TM-CNC
Max. obráběný průměr	ø 270 mm	ø 330 mm	ø 270 mm	ø 80 mm	ø 270 mm
Max. obráběná délka	410 mm	721 mm	409 mm	150 mm	409 mm
Výkon	5,5 kW	18,5 kW	7,5 kW	6 kW	5,5 kW
Otáčky včetně	8000 ot/min	5000 ot/min	5000 ot/min	7000 ot/min	5000 ot/min
Přesnost polohování	1 μm	1 μm	0,1 μm	0,01 μm	1 μm
Rychlost posuvu	-	-	7,5 m/min	20 m/min	10 m/min



Obr. č. 3 - Soustruhy firmy Schaublin [24]

3.3 Firma Hwacheon Machinery

Společnost Hwacheon machinery je nejstarší jihokorejský výrobce obráběcích strojů s více jak 70 lety zkušeností.

Firma nabízí pro tvrdé soustružení vysoce robustní horizontální soustruhy řady Hi-TECH, které se vyznačují vysokou pevností, plochým širokým těžkým ložem a výkonnými pohony. [26]

Tab. č. 6 - Parametry soustruhů Hwacheon Machinery řady Hi-TECH [26]

	Hi-TECH-200	Hi-TECH-230	Hi-TECH- 450
Max. obráběný průměr	Ø 350 mm	Ø 400/425 mm	Ø 420/500 mm
Max. délka obrábění	380-615 mm	560-1060 mm	700/1360 mm
Výkon vřetene	11/15 kW	15/18,5/22 kW	18,5/22 KW
Otáčky vřetene	3500/5000 ot/min	3500/4500 ot/min	1800/2500/3500 ot/min
Rychlost posuvu	30 m/min	30/10 m/min	20 m/min



Obr. č. 4 - Soustruhy firmy Hwacheon [26]

3.4 Firma Hardinge Inc.

Americká společnost Hardinge je předním světovým poskytovatelem vysoce přesných obráběcích strojů a je uznávaným výrobcem na trhu v poskytování soustruhů pro tvrdé obrábění. Společnost má více než 125 let zkušeností a stojí v čele inovací.

Poskytují celé spektrum vysoce spolehlivých CNC soustružnických, frézovacích a brusných strojů. [27]

Pro tvrdé obrábění firma nabízí super přesné soustruhy řady T-Series. Stroje jsou konstruovány pro výrobu nejnáročnějších součástí v nástrojářském průmyslu a pro složité operace obrobku, které vyžadují vysokou přesnost, opakovatelnost, kvalitu povrchu a tepelnou stabilitu.

Tyto soustruhy jsou charakteristické integrovaným motorem pro vysoká zatížení vřetene s vylepšenou tepelnou stabilitou. Dále mají optimální lineární vedení sestavené z kluzných členů a lineárních kolejnic, které poskytují stabilní přesnost, vysokou tuhost a nízké tření. To vše leží na robustní litinové základně s polymerním kompozitem Harcrete (syntetická žula) a proto nabízí zvýšenou tuhost s vynikajícími vlastnostmi tlumení vibrací. Výsledkem je také prodloužená životnost nástroje. [28]

Tab. č. 7 - Parametry soustruhů firmy Hardinge Inc. řady T-Series [28]

	T-42	T-51	T-65
Max. obráběný průměr	Ø 368,3 mm	Ø 387,2 mm	Ø 387,2 mm
Max. délka obrábění	232 mm	457 mm	428 mm
Otáčky vřetene	6000 ot/min	5000 ot/min	4000 ot/min
Výkon vřetene	11 kW	15 kW	26 kW
Rychlost posuvu	30,5 m/min	38 m/min	38 m/min
Přesnost opakovatelnosti	0,76 µm	0,76 µm	0,76 µm
Kruhovitost	0,25 µm	0,5 µm	0,625 µm
Povrchová úprava součástí	0,15 µm	0,2 µm	0,2 µm



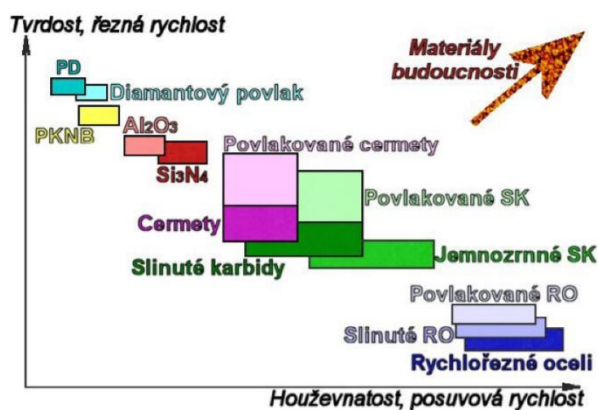
Obr. č. 5 - Soustruhy firmy Hardinge [28]

4 Přehled a charakteristika řezných materiálů

Řezné nástroje pro obrábění se vyrábí z různých materiálů. Od rychlořezných ocelí, přes slinuté karbidy, cermety, řeznou keramiku až po kubický nitrid boru a syntetický diamant. Každý nástroj by měl splňovat určité vlastnosti, protože při obrábění jsou řezné materiály vystaveny mechanickému a tepelnému namáhání. Tyto vlastnosti jsou:

- vysoká tvrdost
- houževnatost
- odolnost proti opotřebení
- pevnost v ohybu a v tlaku
- odolnost proti náhlým teplotním změnám [29] [30]

Obrázek č. 7 vyjadřuje vztah mezi základními vlastnostmi (tvrdost, houževnatost) a základními řeznými podmínkami (řezná rychlost, posuv). [29] [30]

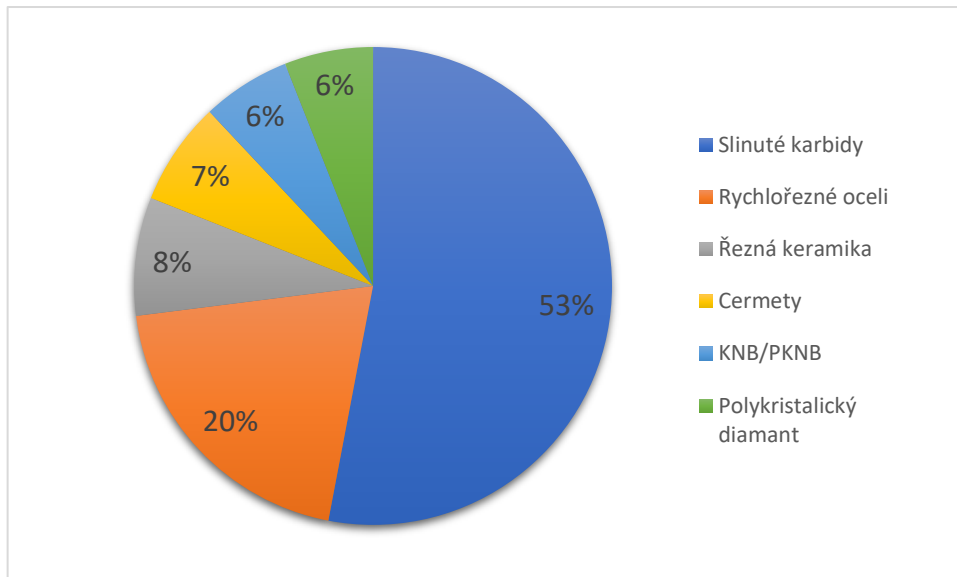


Obr. č. 6 - Oblast použití řezných materiálů [29]

4.1 Klasifikace řezných materiálů

Pro nástroje s definovanou geometrií břitu se používá následující rozdělení:

- Nástrojové oceli (NO)
- Slinuté karbidy (SK)
- Cermety
- Řezná keramika (ŘK)
- Supertvrde řezné materiály
 - Kubický nitrid boru (KBN, PKBN)
 - Diamant (PKD) [29]



Obr. č. 7 - Světový podíl jednotlivých druhů řezných materiálů [31]

4.2 Přehled materiálů vhodných pro tvrdé obrábění

Obrábění tvrdých materiálů vyžaduje velmi vysokou tvrdost, pevnost a tvrdost v tlaku. Otěruvzdornost a odolnost proti vysokým teplotám a teplotním rázům z důvodu kontaktu se žhavými třískami. Dále také dobrou vrubovou houževnatost, odolnost řezné hrany vůči lomu a vydrolování. Tyto vlastnosti splňují:

- Řezná keramika (ŘK)
- Supertvrde nástrojové materiály (CBN/PCBN a PCD) [32]

4.2.1 Řezná keramika

O řezných keramikách se dá říci, že se jedná o křehké chemicky velmi stabilní látky, které mají vysokou tvrdost (75-85 HRC), tlakovou pevnost a odolnost proti vysokým teplotám (až 1800 °C) a jsou charakteristické odolností proti opotřebení při vysokých teplotách a nízkou tepelnou vodivostí. K jejich nevýhodám patří nízká odolnost proti teplotním šokům, malá lomová houževnatost a křehkost. Hlavní materiály pro výrobu ŘK jsou oxidy Al_2O_3 , ZrO_2 , karbidy TiC, TiN a nitrid Si_3N_4 , podle kterých se následně rozdělují: [30]

- **Oxidická keramika**

Oxidická keramika se skládá z oxidu hlinitého a je doplněna oxidem zirkoničitým, který má schopnost bránit vzniku a šíření trhlin. Její nevýhodou je, že postrádá odolnost proti tepelným šokům. [33]

- **Smíšená keramika**

Smíšená keramika je oxidická keramika, která obsahuje přísady karbidů TiC nebo TiN. Tyto přísady zvyšují houževnatost a zlepšují tepelnou vodivost. [33]

- **Nitridová keramika**

Nitridová keramika je ŘK na bázi nitridu křemíku (Si_3N_4). Tato keramika má vysokou houževnatost díky podlouhlému tvaru krystalů a je vhodná pro obrábění šedé litiny. [33]

- **Keramika vyztužená whiskery**

Je oxidická nebo nitridová keramika vyztužená pomocí whiskerů SiC. To má za následek zvýšení houževnatosti a umožňuje použití řezné kapaliny. Tato keramika je ideální pro obrábění niklových slitin. [33]

- **Sialon (SiAlON)**

To jsou třídy, které kombinují pevnost sítě krystalů nitridu křemíku s vysokou chemickou stabilitou. Je to nejodolnější materiál ze všech výše uvedených rozdělení ŘK. Jsou ideální pro obrábění žáruvzdorných slitin (HRSA). [31] [33]

Použití řezné keramiky

Tyto keramické třídy je možné použít pro široký okruh aplikací a materiálů, ale nejčastěji jsou využívány pro vysokorychlostní soustružení. Pro obrábění tvrdých materiálů se volí směsná keramika (nejčastěji Sialon) a využívá se pro dokončovací operace při nepřerušovaném řezu, kde obráběný materiál má tvrdost pod 55 HRC. [33] [32]

4.2.2 Supertvrdé řezné materiály

Pod název supertvrdé materiály se zahrnují dva synteticky vyráběné materiály. Řadíme mezi ně polykrystalický kubický nitrid boru (KBN/CBN/PCBN/PKBN) a polykrystalický diamant (PKD/PCD). V této době představují nejtvrděší známé látky, které se používají hlavně ve velkosériové výrobě a pro speciální metody obrábění. [29]

Polykrystalický kubický nitrid bóru

Tento materiál je po diamantu druhý nejtvrděší známý materiál na světě. Má velmi vysokou tvrdost za tepla a lze ho používat při velmi vysokých řezných rychlostech. Je také charakteristický velmi dobrou houževnatostí a odolností proti teplotním rázům. Dnešní CBN nástrojové třídy se dají rozdělit do dvou skupin. Jsou to keramické kompozitní materiály s obsahem CBN 40-65 %, kde keramické pojivo zvyšuje odolnost CBN, ale materiál se může opotřebit chemickým otěrem. Další skupina jsou nástrojové třídy s vysokým obsahem CBN dosahujícím téměř až 100 %. Tyto třídy jsou charakteristické tím, že obsahují kovové pojivo, které zvyšuje jejich houževnatost. [33]

Vyměnitelné břitové destičky se vyrábí ze dvou vrstev. Podložka je ze slinutého karbidu, na kterou je připájen hrot z CBN. [33]



Obr. č. 8 - Příklad vyměnitelných břitových destiček (VBD) z CBN [33]

Použití CBN

CBN se používá převážně na dokončovací soustružení tvrzených ocelí s tvrdostí nad 45 HRC, vzhledem k vysoké ceně nástroje je neekonomické obrábět měkčí materiály. Přesahuje-li materiál tvrdost 55 HRC, CBN je jediný materiál, který dokáže nahradit tradiční metody broušení. Vysoce přesné tvrdé soustružení vyžaduje nástrojové břity s relativně nízkým obsahem CBN, asi 50 % a zbytek je keramické pojivo. [3] [33]

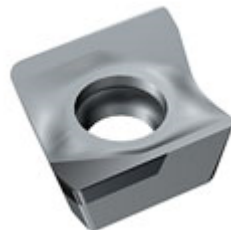
Polykrystalický diamant (PCD)

Diamant je nejtvrdší ze všech materiálů a tím pádem je nejodolnější ze všech. PCD je kompozitní materiál, který se skládá z diamantových částic slinutých dohromady pomocí kovového pojiva. Jako nástrojový materiál má velmi dobrou odolnost proti otěru, ale postrádá chemickou stabilitu za zvýšených teplot a má vysokou afinitu k železu. [33]

Vyměnitelné břitové destičky se vyrábí stejným způsobem jako u CBN ze dvou vrstev. Podložka je ze slinutého karbidu, na kterou je připájen hrot z PCD. [33]

Použití PCD

Nástroje z polykrystalického diamantu jsou omezeny na neželezné kovy, jako jsou například slitiny hliníku s vysokým obsahem křemíku, kompozity s kovovou maticí a plasty vyztužené uhlíkovými vlákny. Dále je jejich využití také pro obrábění bronzu, mosazi, mědi a jiných neželezných materiálů. PCD lze také použít pro velmi jemné dokončovací operace při obrábění titanu, pokud se použije řezná kapalina. Nemůže být použit pro obrábění oceli, protože diamant reaguje s uhlíkem v oceli a v důsledku toho se diamant mění na grafit. [3] [33]



Obr. č. 9 - Příklad vyměnitelné břitové destičky z PCD [33]

4.3 Průzkum trhu předních světových výrobců nástrojů

Pro porovnání sortimentu výroby jsem vybral několik významných firem, které nabízejí širokou škálu nástrojových materiálů. V této části se budu zabývat sortimentem řezných materiálů jednotlivých firem, zejména materiály z polykrystalického kubického nitridu boru (PCBN) a řezné keramiky (ŘK). Dále také volbou řezných podmínek pro jednotlivé materiály a nejběžnějšími tvary břitových destiček, které firmy nabízejí.

Vybrané firmy:

- Iscar
- Sandvik Coromant
- Seco Tools AB
- CeramTec GmbH.
- Tungalloy

4.3.1 Iscar

Izraelská firma Iscar je jedna z největších společností, která vyrábí nástroje pro všechny aplikace třískového obrábění kovu. Nabízí široký sortiment vyměnitelných břitových destiček a monolitních nástrojů. [34]

Řezné materiály firmy Iscar pro obrábění ISO H

IB50 – pájená vrstva s 50 % CBN určená pro dokončovací operace kalených ocelí o tvrdosti 45-64 HRC bez přerušovaného řezu. [35]

IB10H – extra jemný substrát PCBN (53 % CBN), který umožňuje vybrousit na destičce velmi ostrý břit. Tento materiál je vhodný pro dokončovací operace při soustružení kalené oceli, kde dosahuje velmi dobré drsnosti obroběných ploch [35]

IB55 – pájená vrstva s 55 % CBN určená pro dokončovací operace soustružení kalených ocelí s tvrdostí 45-65 HRC s nepřerušovaným nebo mírně přerušovaným řezem. [35]

IB20H – tento materiál je kombinací hrubozrnného a jemného karbidu PCBN (65 % CBN). Má dobrou odolnost proti opotřebení a rázům. Je určený pro obrábění s přerušovaným řezem na kalených ocelích. [35]

IB25HC – středně hrubozrnný substrát PCBN (75 %) s TiN povlakem. Doporučený pro lehké a středně těžké přerušované řezy kalených ocelích. [35]

IN420 – černá keramika (Al₂O₃/TiCN) s TiN povlakem. Tento materiál je určen pro vysokorychlostní dokončování kalené oceli, která má tvrdost větší než 45 HRC a pro tvrzené litiny. [35]

IN22 – černá keramika (Al₂O₃/TiCN) používaná pro lehké hrubovací operace při vysokorychlostním obrábění kalené oceli a tvrzené litiny. [35]

IN23 – černá keramika (Al₂O₃/TiCN) používaná pro dokončovací operace šedé litiny za středních řezných podmínek. [35]

IB25HA – houževnatý materiál PCBN (65 %) s AlTiN povlakem pro všeobecné obrábění kalené oceli. [35]

Řezné materiály firmy Iscar pro obrábění ISO S

IW7 – je whiskerová keramika s vysokou houževnatostí a tvrdostí určená pro obrábění kalené oceli a slitin s vysokým obsahem niklu. [35]

IS9 – silicon nitridová keramika, velmi houževnatá s velkou stabilitou řezné hrany. Tato keramika se používá pro vysoké řezné rychlosti a přerušovaný řez při obrábění slitin na bázi Ni a žárupevných slitin a tvrdých litin. [35]

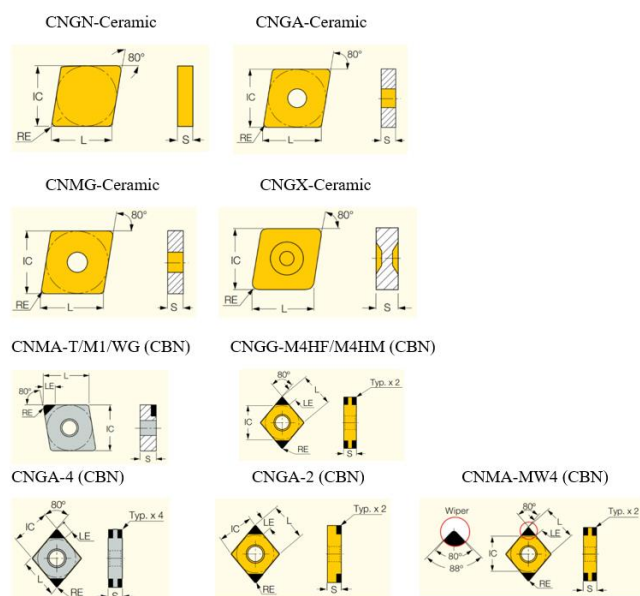
IB10S – jemný substrát velmi tvrdého PCBN pro obrábění slinutých kovů a slitin titanu. [35]

IS25 – zesílená SiAlON keramika, která se používá pro obrábění vysokoteplotních slitin na bázi niklu. [36]

IS35 – SiAlON keramika, která má vysokou tvrdost a výbornou houževnatost pro obrábění vysokoteplotních slitin na bázi niklu. Je také vhodná pro vysokou hodnotu posuvu a velkou hloubku třísky. [36]

Tab. č. 8 - Doporučené řezné podmínky Iscar [37] [36] [38]

Kalené oceli – ISO H			
Řezný materiál	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Posuv na otáčku f [mm]	Hloubka řezu a_p [mm]
IB50	100-200	0,03-0,18	0,05-0,3
IB10H	80-220	0,03-0,18	0,05-0,3
IB55	100-200	0,03-0,25	0,05-0,5
IB20H	100-220	0,03-0,25	0,05-0,5
IB25HC	100-220	0,05-0,5	0,1-0,5
IN420	50-300	0,1-0,2	0,1-0,6
IN22	50-250	0,05-0,15	0,1-0,5
IN23	100-280	0,1-0,2	0,1-0,8
IB25HA	100-220	0,05-0,25	0,05-0,5
Žáruvzdorné materiály – ISO S			
IW7	150-450	0,1-0,3	0,5-2,5
IS9	180-230	0,1-0,3	1,0-3,0
IB10S	100-250	0,1-0,3	0,05-0,5
IS25	200-350	0,1-0,4	1,0-4,0
IS35	150-250	0,2-0,5	1,0-4,5



Obr. č. 10 - Konkrétní břitové destičky tvaru C [37]

Základní tvary břitových destiček pro obrábění

Výrobce Iscar nabízí tyto základní tvary břitových destiček pro tvrdé obrábění, které se dále rozdělují podle konkrétních požadavků na obráběný materiál:

Tab. č. 9 – Tvary břitových destiček Iscar [37]

Tvar CBN destiček	Počet břitů	Tvar řezné keramiky
C	1/2/4	C
D	1/2/4	D
T	1/3/6	V
V	1/2/4	W
W	3/6	R

4.3.2 Sandvik Coromant

Švédská firma Sandvik Coromant je předním světovým dodavatelem nástrojů a poskytovatel znalostí v oblasti obrábění kovů. Vytváří nástrojová řešení a rozvíjí znalosti v obrábění.

Řezné materiály firmy Sandvik Coromant pro obrábění ISO H

CB7015 – tato třída je tvořena 50 % jemnozrnného CBN a keramickým pojivem. Je vhodná pro spojitě a lehce přerušované řezy. [18]

CB7025 – tato třída obsahuje 60 % CBN s bimodálním rozdělením velikosti zrna v keramickém pojivu. Třída má velmi vysokou odolnost proti vzniku lomu, a tudíž se jedná o vysoce univerzální třídu pro soustružení tvrzených součástí. Má také dobrou životnost při přerušovaných řezech. [18]

CB7525 – tato třída je velice houževnatá, tvořena 90 % jemnozrnného CBN a keramickým pojivem. Určená spíše pro obrábění šedé litiny. [18]

CB7925 – je tvořena 75 % CBN a keramickým pojivem. Směs je tvořena velkými a malými zrny CBN. Třída je určena pro vysokolegované litiny, ale dobrých výsledků dosahuje i při soustružení tvrzených ocelí. Tyto CBN destičky jsou k dispozici pouze v provedení z monolitního CBN. [18]

CB7105 – materiál s nízkým obsahem CBN. Má zvýšenou odolnost proti opotřebení ve tvaru žlábků při vyšších řezných rychlostech. Obsahuje PVD povlak z TiN, který

umožňuje dosažení vysoké kvality obrobené plochy. Je ideální pro spojité řezy, menší hloubky řezu a menší průřezy třísky při vysokých rychlostech. [39]

CB7115 – materiál s nízkým obsahem CBN, který dobře odolává proti opotřebení ve tvaru žlábků. Je vhodný pro spojité až lehce přerušované řezy. [39]

CB7125 – materiál se středním obsahem CBN a novým PVD povlakem, který zajišťuje dlouhou životnost a dobrou odolnost proti tvorbě trhlin. Ideální pro středně těžké přerušované řezy. [39]

CB7135 – materiál s vysokým obsahem CBN, který zaručuje vysokou odolnost proti křehkému lomu, používaný pro těžké přerušované řezy. [39]

CC6050 – je smíšená keramika, která je vhodná na lehké, spojité dokončovací operace na tvrzených materiálech [40]

Řezné materiály firmy Sanvik Coromant pro obrábění ISO S

CC6060/CC6065 – řezná keramika označována jako Sialon. Vyznačuje se vysokou chemickou stabilitou. Tyto třídy jsou ideální pro obrábění žáruvzdorných slitin. [40]

CC670 – řezná keramika vyztužená whiskery. Vyznačuje se dobrou houževnatostí. Ideální pro obrábění slitin niklu a kalených součástí za nepříznivých pracovních podmínek. [40]

Tab. č. 10 - Doporučené řezné podmínky Sandvik [18] [40] [41]

Kalené oceli – ISO H			
Řezný materiál	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Posuv na otáčku f [mm]	Hloubka řezu a_p [mm]
CB7015	120-220	0,05-0,25	0,05-0,3
CB7025	90-150	0,05-0,25	0,05-0,3
CB7525	80-150	0,05-0,3	0,05-0,3
CB7925	60-110	0,1-0,4	0,3-0,6
CB7105	150-250	0,05-0,15	0,05-0,25
CB7115	120-220	0,05-0,25	0,05-0,3
CB7125	100-200	0,05-0,3	0,05-0,5
CB7135	80-160	0,05-0,4	0,05-0,5
Žáruvzdorné materiály – ISO S			
CC6060	250-300	0,15-0,2	2-3
CC6065	200-250	0,15-0,2	2
CC670	200-300	0,1-0,15	2

Technologická doporučení společnosti Sandvik

Upnutí součástí

Společnost Sandvik doporučuje používat místo běžných tříbodových upínacích čelistí široké upínací čelisti. Toto platí spíše pro tenkostěnné součásti, které vyžadují extrémně spolehlivé upnutí. Společnost také doporučuje umístit součást co nejbližší k ložiskům vřetena. Je obecně známo, že v případě podepření obrobku pouze na jednom konci, je doporučený poměr délky vůči průměru 2:1 (maximálně 4:1). Jestliže je použit koník, je možné tuto hodnotu zvýšit na 8:1. Zvýšení tuhosti upnutí je samozřejmě dosaženo správným seřízením sousostí koníku a vřetena. [18]

Strategie jednoho nebo dvou řezů

Pro vysoce kvalitní stroj, který má dostatečně velikou tuhost a dostatečně vysoký výkon, lze při použití strategie jednoho řezu dosáhnout velmi uspokojivé kvality obrobené plochy i rozměrových tolerancí. Ale v případě horšího, méně stabilního stroje nebo pokud obráběné součásti nevykazují dostatečnou shodu a požadované tolerance

nebo požadavky na výslednou kvalitu povrchu jsou velmi vysoké, doporučuje se spíše strategie dvou řezů. [18]

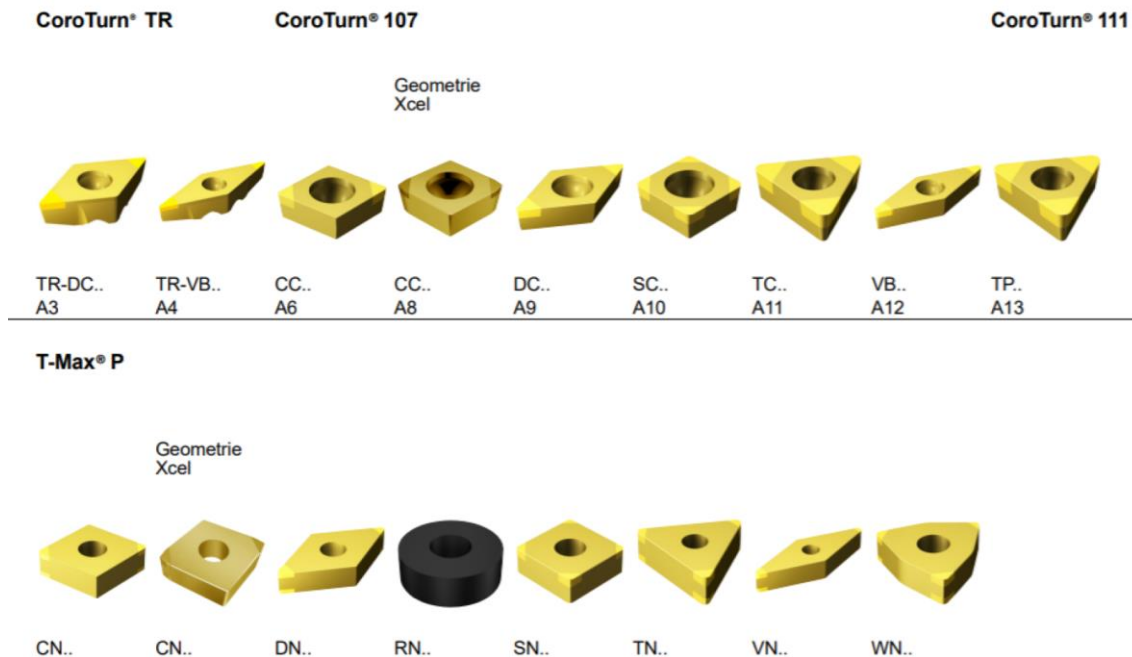
Opotřebení nástroje a jejich řešení

K opotřebení CBN nástrojů při tvrdém obrábění nejčastěji dochází k opotřebení ve tvaru žlábků a opotřebení hřbetu, které závisí na materiálu obrobku, třídě CBN, řezných podmínkách, geometrii břitu a stabilitě stroje. Viz tabulka č. 11.

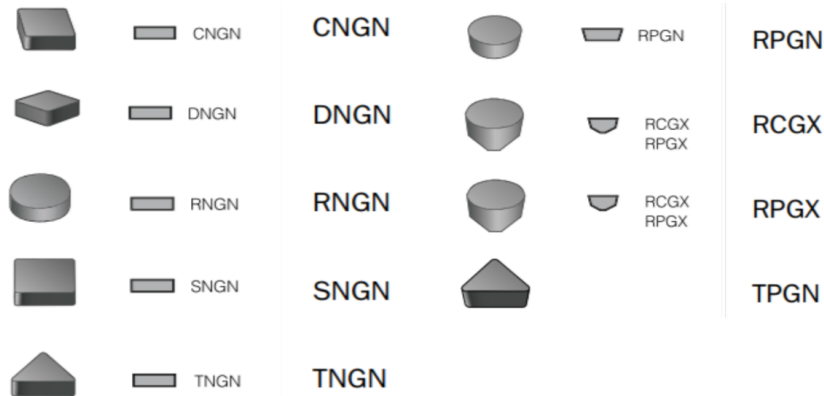
Tab. č. 11 - Nejčastější opotřebení a jejich řešení [18]

Opotřebení	Řešení
Opotřebení hřbetu	<ul style="list-style-type: none"> • zvýšit řeznou rychlost • zvýšit posuv
Opotřebení ve tvaru žlábků	<ul style="list-style-type: none"> • snížit řeznou rychlost • snížit posuv
Odštěpení části ostří	<ul style="list-style-type: none"> • kontrola stability, zamezení vzniku vibrací • nepoužívat řeznou kapalinu • použít odolnější břit
Vznik trhlin	<ul style="list-style-type: none"> • použít nepovlakované břit. destičky • zamezit vzniku vibrací • nepoužívat řeznou kapalinu • snížit posuv • snížit hloubku řezu • použít odolnější břit
Opotřebení ve tvaru vrubu	<ul style="list-style-type: none"> • zvýšit řeznou rychlost • snížit posuv • snížit/změnit hloubku řezu

Základní tvary břitových destiček pro soustružení tvrzených součástí firmy Sandvik



Obr. č. 11 - Základní tvary CBN břitových destiček [41]



Obr. č. 12 - Základní tvary keramických břitových destiček [40]

4.3.3 Seco Tools AB

Společnost Seco, sídlící ve Švédsku, patří mezi přední světové výrobce v oblasti frézování, soustružení, obrábění otvorů a závitování. Seco se pohybuje na trhu již více jak 80 let a má zastoupení ve více než 70 zemích světa. Poskytuje nástroje, technologie a služby, které směřují k dosažení maximální produktivity. [42]

Řezné materiály firmy Seco pro obrábění ISO H

CBN010 – řezný materiál, který obsahuje 50 % CBN a keramické pojivo TiC. Tato třída má průměrnou velikost zrna 2 μm . Ideální pro použití při nepřerušovaném až středně přerušovaném řezu kalených ocelí. [43]

CBN060K – řezný materiál z kubického nitridu boru (60 % CBN) a s TiCN keramickým pojivem s PVD povlakem. [43]

CBN150 – řezný materiál z kubického nitridu boru (45 % CBN) s průměrnou velikostí zrna menším jak 1 μm a s TiCN keramickým pojivem. Ideální pro dokončovací soustružení kalených ocelí s přerušovanými povrchy. [43]

CH0550 – materiál z kubického nitridu boru (40 % CBN) s průměrnou velikostí zrna 3 μm a s TiCN keramickým pojivem. Ideální pro vysokorychlostní plynulé řezy v aplikacích s vysokými požadavky na kvalitu povrchu. [43]

CH2540 – řezný materiál z kubického nitridu boru (65 % CBN) s průměrnou velikostí zrna 6 μm a s TiCN keramickým pojivem. Tato třída zaručuje vysokou odolnost vůči opotřebení a houževnatost při přerušovaných řezech při obrábění kalených materiálů. [43]

CH3515 – řezný materiál složený z 90 % CBN a s velikostí zrna 4 μm a s AlN keramickým pojivem. Je to nejhouževnatější třída, která se doporučuje pro těžké obrábění kalených ocelí s přerušovanými řezy. [43]

CBN200 – řezný materiál složený z 85 % CBN a s CO-W-Al keramickým pojivem. Třída je vhodná pro hrubovací a dokončovací operace kalených ocelí a litin. [43]

CBN300/CBN300P – řezný materiál složený z 90 % CBN a s Al keramickým pojivem s průměrnou velikostí zrna 22 μm . Tato třída je vhodná pro obrábění šedé litiny. [43]

CBN400C – třída s povlakem PVD složená z 90 % CBN a z Al keramického pojiva. velikost zrna je 3-6 μm . Třída je vhodná pro obrábění šedé litiny. [43]

CBN500 – třída s 90 % CBN s průměrnou velikostí zrna 15 μm a s keramickým pojivem Al. Tento materiál je vhodný pro obrábění bílé litiny s vysokým obsahem Mn. [43]

CBN600 – řezný materiál složený z 90 % CBN a z keramického pojiva Al. Vhodná pro obrábění šedých a bílých litin. [43]

Řezné materiály firmy Seco pro obrábění ISO S

CBN170 – třída s obsahem 65 % CBN a keramickým pojivem TiCN + SiCw a velikostí zrna 2 μm . Tato třída je ideální pro obrábění vysocelegovaných slitin na bázi niklu. [43]

SC100 – sialonová (Si, Al, O, N) keramická třída vhodná při hrubovacích operacích vysocelegovaných žáruvzdorných slitin na bázi niklu. [43]

CS300 – je sialonová keramická třída, která je houževnatější než třída SC100. Vhodná pro obrábění slitin vysoce legovaných niklem. [43]

Tab. č. 12 - Doporučené řezné podmínky Seco [43]

Kalené oceli – ISO H		
Řezný materiál	Řezná rychlost v_c [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	Posuv na otáčku f [mm]
CBN010	80-200	0,05-0,36
CBN060K	80-250	0,05-0,36
CBN150	70-180	0,05-0,36
CH0550	90-300	0,05-0,36
CH2540	80-230	0,05-0,36
CH3515	90-200	0,05-0,36
CBN200	70-150	0,1-0,5
CBN400C	-	-
CBN500	90-200	0,1-0,6
CBN600	70-200	0,1-0,6
CBN300/CBN300P	90-230	0,1-0,6
Žáruvzdorné materiály – ISO S		
CBN170	100-220	0,05-0,24
SC100	150-300	0,1-0,4
CS300	150-300	0,1-0,4

Základní tvary břitových destiček pro obrábění

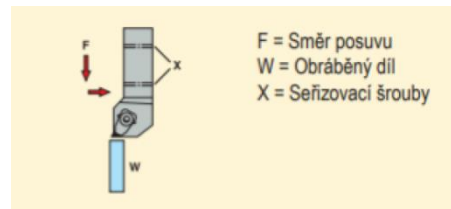
Tab. č. 13 – Tvary břitových destiček Seco tools [43]

PCBN destičky		Keramické destičky
CC	TN	CN
CN	WB	
DC	WN	
DN	VB	
TC	VN	

Nové technologie firmy Seco

Soustružení zanořením

Soustružení zanořením je nová patentovaná metoda společnosti Seco. Proces zanoření sestává ze složení dvou kolmých pohybů, podélným a příčným posuvem. Tato metoda přináší dvě velké výhody ve srovnání s konvenčním tvrdým soustružením. Snižuje řezný čas až o 90 % a zlepšuje jakost povrchu. Všeobecné řezné podmínky pro soustružení zanořením: $v_c = 200-400 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a $f = 0,04 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$. Ostřiny, které způsobují břitové destičky a které ovlivňují celkovou jakost povrchu se eliminují dokončovací operací, tedy malým axiálním pohybem na konci záběru. Pro tento způsob se používají tyto materiály: CBN150, CBN060K, CH0550 nebo CH2540. [43]



Obr. č. 13 - Soustružení zanořením [43]

4.3.4 CeramTec GmbH.

CeramTec je německá firma, která je jedním z předních světových výrobců technické keramiky a specializuje se na vývoj, výrobu a prodej dílů z keramických materiálů. CeramTech se již více jak 60 let věnuje řezným materiálům z PCBN a řezné keramiky. [44] [45]

Řezné materiály firmy CeramTec pro obrábění ISO H

SL 658 C – vysoce výkonná sialinová keramika určená pro soustružení tvrzených ocelí a litin. Má vícevrstvý povlak Al_2O_3 pro vysoké řezné rychlosti a velké průřezy třísek. [46]

SH 2 – smíšená keramika, která se vyznačuje extrémně homogenní submikronovou strukturou, která dodává materiálu zvýšenou mechanickou a tepelnou stabilitu. Tento materiál je určený pro tvrdé obrábění při nepřetržitém řezání. [47]

SH 4 – smíšená keramika, která nabízí velmi dobré vlastnosti při pevném soustružení s vysokou tvrdostí za tepla a s velmi vysokou pevností a odolností materiálu proti opotřebení. Ideální pro dokončovací operace kalených ocelí a litin s hladkými souvislými řezy. [47]

WXM 155 – řezný materiál z PCBN, který má vysokou tepelnou stabilitu a tvrdost za tepla, a proto činí tento materiál velmi odolný proti opotřebení. Používá se pro obrábění kalené oceli zejména při nepřerušovaném řezu. [48]

WXM 255 – třída z PCBN mimořádně odolná proti opotřebení. Tento materiál je vhodný pro obrábění kalených ocelí na kuličková ložiska, protože má vysokou tepelnou stabilitu pojiiva a nízkou chemickou afinitu k chromu. Ideální pro nepřerušované řezy. [48]

WXM 355 – třída z PCBN. Tato třída má ideální vyváženost mezi houževnatostí a odolností proti opotřebení, a proto je určená pro obrábění kalených ocelí s přerušovanými řezy. [48]

WXM 455 – řezný materiál z PCBN, který je ideální volbou pro obrábění s nejvíce přerušovanými řezy. Tento materiál je vysoce houževnatý a odolný vůči otěru. [48]

Tab. č. 14 - Doporučené řezné podmínky CeramTec [49]

Kalené oceli – ISO H			
Řezný materiál	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Posuv na otáčku f [mm]	Hloubka řezu a_p [mm]
SL 658 C	400-800	0,25-0,5	0,2-0,5
SH 2	80-180	0,1-0,3	0,1-0,5
WXM 155	140-180	0,1-0,2	0,1-0,25
WXM 255	160-220	0,25-0,3	0,1-0,25
WXM 355	140-200	0,2-0,35	0,1-0,25
WXM 455	140-180	0,2-0,35	0,1-0,25

4.3.5 Tungaloy

Tungaloy je jeden z předních světových výrobců CBN řezných materiálů s hlavním sídlem v Japonsku. Uvádí na trh systémy aplikací kubického nitridu boru a vyměnitelné břitové destičky. [50]

Řezné materiály firmy Tungaloy pro obrábění ISO H

BXA20 – třída z CBN, která se vyznačuje vynikajícím výkonem při obrábění kalené oceli [51]

BXM10 – třída z CBN vhodná pro vysokorychlostní obrábění kalené oceli a plynulý řez [51]

BXM20 – třída z CBN vhodná pro širokou škálu operací při obrábění kalené oceli [51]

BXC50 – řezný materiál z CBN, který má vysokou odolnost proti lomu při plynulém i přerušovaném řezu [51]

BX310 – třída z CBN, která se vyznačuje vysokou odolností proti opotřeбенí a je určena pro plynulý řez kalené oceli vysokou řeznou rychlostí [51] [51]

BX330 – třída z CBN, která má vysokou odolnost břítu a je určena pro dokončovací operace kalené oceli [51]

BX360 – třída z CBN vhodná pro všeobecné obrábění kalené oceli [51]

BX380 – třída z CBN, jež má vysokou odolnost proti lomu a je vhodná pro přerušovaný řez kalené oceli [51]

BX530 – třída z CBN vhodná pro dokončování kalené oceli s vysokou kvalitou opracovaného povrchu [51]

LX11 – řezná keramika s povlakem na bázi oxidu hlinitého, která je vhodná pro plynulý a nepřerušovaný řez kalených ocelí [51]

Řezné materiály firmy Tungaloy pro obrábění ISO S

BX470 – třída z CBN, vhodná pro povrchové úpravy materiálů [52]

BX480 – třída z CBN, která má excelentní výdrž a odolnost proti rázům, vhodná pro obecné použití [52]

BX950 – třída z CBN, která má vysokou odolnost proti lomu a je vhodná pro vysokorychlostní obrábění [51]

M714B – třída z CBN, která má vysokou tepelnou stabilitu a odolnost proti opotřebení, vhodná pro vysokorychlostní obrábění [51]

Tab. č. 15 - Doporučené řezné podmínky Tungaloy [52] [53] [54]

Kalené oceli – ISO H			
Řezný materiál	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Posuv na otáčku f [mm]	Hloubka řezu a_p [mm]
BXA20	60-180	0,05-0,3	0,05-0,8
BXM10	150-300	0,03-0,18	0,05-0,3
BXM10	70-200	0,05-0,15	0,05-0,3
BXC50	100-220	0,05-0,32	0,1-0,55
BX310	100-300	0,05-0,15	0,05-0,5
BX330	50-200	0,05-0,15	0,05-0,5
BX360	50-200	0,05-0,2	0,05-0,5
BX380	50-250	0,05-0,2	0,05-0,5
LX11	100-200	0,05-0,3	0,1-0,4
Žárovzdorné materiály – ISO S			
BX950	70-200	0,05-0,3	0,05-0,5
BX470	100-280	0,05-0,3	0,05-0,5
BX480	100-280	0,1-0,15	0,05-0,5

Základní tvary břitových destiček pro obrábění

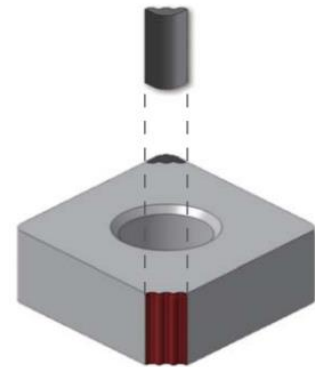
Tab. č. 16 - Tvary břitových destiček Tungaloy [55]

Tvar CBN destiček	Počet břitů	Tvar řezné keramiky
C	1/2/4	C
D	1/2/4	D
S	1/2/4	S
T	3/6	T
V	2/4	R
W	3/6	

Nové technologie firmy Tungaloy

WavyJoint – aplikace CBN řezných materiálů na vyměnitelné destičky

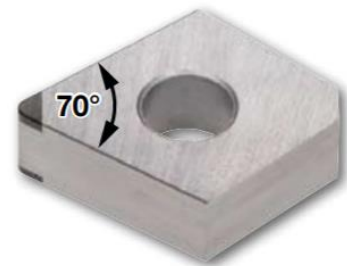
Tato nová technologie společnosti Tungaloy zvyšuje produktivitu. Vše spočívá ve větší velikosti CBN bříty a speciálnímu tvaru spojení s destičkou, kde v místě spojení došlo k zvětšení stykové plochy a dosáhlo se lepšího rozložení teplot. Díky této technologii je možné zvýšit hloubku řezu až na 0,8 mm. [56]



Obr. č. 14 – WavyJoint [56]

Nový tvar CBN destiček G

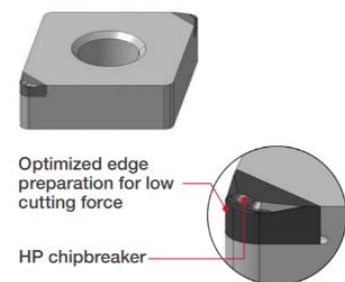
Nový tvar destičky má úhel bříty 70° a vytváří velký prostor mezi destičkou a materiálem, který se obrábí. Tato mezera snižuje řezné síly a opotřebení bříty a zajišťuje plynulý odchod třísky, aby se zabránilo poškrábání již obrobeneho povrchu. [55]



Obr. č. 15 - Tvar CBN destičky G [55]

Nový lamač třísky Hardbreaker HP

Díky této technologii se snižuje řezná síla na špičce destičky během obrábění, díky této technologii se prodlužuje životnost nástroje až o 1,8x. Dále také zajišťuje vynikající kvalitu obrobeneho povrchu. [57]



Obr. č. 16 - Lamač třísky Hardbreaker HP [57]

4.4 Srovnání CBN a řezné keramiky (ŘK)

Řezná keramika i CBN se svými vlastnostmi a oblastmi použití navzájem doplňují. Při tvrdém soustružení tyto dva materiály mohou dosahovat stejných řezných podmínek. Výsledkem tedy budou stejné obráběcí časy. Dále je možné oba materiály použít pro obrábění za sucha nebo pro obrábění s použitím řezné kapaliny. Většinou a pokud to požadovaná výsledná kvalita obrobku dovoluje, volí se obrábění za sucha, protože tato metoda vede ke snížení nákladů na výrobu a šetrnost k životnímu prostředí. [32]

Výběr řezného materiálu je založen na informacích z předchozí kapitoly a také na těchto zásadách:

- Pro dokončovací operace při nepřerušovaném řezu je vhodné zvolit řeznou keramiku
- Pro volbu vyšších řezných rychlostí je vhodné zvolit řeznou keramiku
- Pro nutnost použít větší hloubku řezu nebo nutnost přerušovaného řezu je potřeba zvolit CBN
- Pro vyšší tvrdosti zejména nad 50 HRC je ideální zvolit CBN [32]

Řezný materiál z CBN má jednoznačnou převahu nad ŘK a to hlavně z důvodu menšího opotřebení na hřbetě, lepší životnosti a kvalitě obrobeného povrchu. Z ekonomického hlediska, tedy pořizovací ceny vyměnitelných břitových destiček (VBD), má velikou výhodu řezná keramika. Proto je třeba zvážit, do jakého typu výroby bude daný materiál použit. Řeznou keramiku lze použít spíše pro kusovou a malosériovou výrobu a materiál z CBN je spíše vhodný pro středně až velkosériovou výrobu. [58]

Tab. č. 17 - Srovnání ŘK a CBN

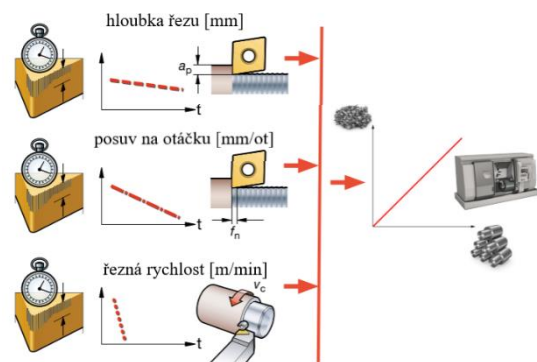
	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Hloubka řezu a_p [mm]	Posuv na otáčku f [mm]	Chlazení	Orientační cena VBD [CZK]
ŘK	50-800	0,05-0,5	0,05-0,5	ANO/NE	1200-5400
CBN	50-300	0,05-0,8	0,05-0,5	ANO/NE	300-700

5 Technicko-ekonomické posouzení tvrdého soustružení

Pro hlubší pochopení výhod tvrdého soustružení je dobré zvážit několik faktorů. **Vysoká kvalita a přesnost**, kterých je možné dosáhnout díky vysoce přesným a tuhým soustruhům, které jsou pro tvrdé soustružení určeny. **Výměna nástroje** může být provedena za méně než dvě minuty, oproti ztrátám času na výměnu brusného kotouče. **Vyměnitelné břitové destičky** mohou mít rychle změněnou hranu nebo mohou být vyjmuty a nahrazeny novými. **Struktura řezných materiálů**, které jsou vhodné pro tvrdé soustružení, obvykle umožňuje produktivní obrábění i v obtížných podmínkách, jako jsou přerušované řezy. Dalším velkým bonusem je možnost **suchého obrábění**, které znamená úsporu značných nákladů na nákup řezných kapalin, jejich zpracování a likvidaci a v neposlední řadě šetrnost k životnímu prostředí. Efektivita procesu tvrdého soustružení je způsobena také vysokou **flexibilitou a produktivitou**. Pomocí jednoho nástroje lze obrobít různé povrchy a tvary za použití vysokých úběrů materiálu. [59]

Díky těmto výhodám může být v mnoha aplikacích doba obrábění výrazně zkrácena. Konečné stanovení doby obrábění a nákladů lze provést pouze podle konkrétního výrobního zadání. [59]

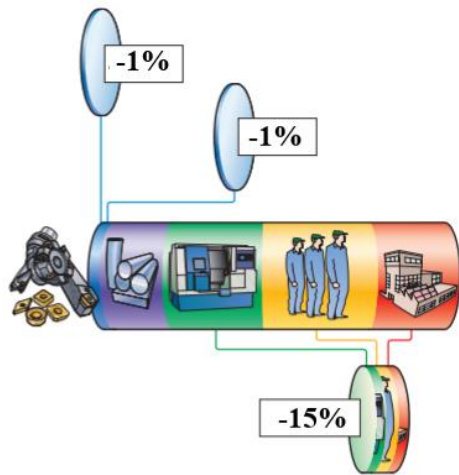
Ve všech průmyslových provozovnách rostou náklady na provoz (např. suroviny, práce, vybavení) rychleji než cena vyráběného zboží. Proto je potřeba překonat tento problém a zůstat v podnikání maximalizováním produktivity. Nejlepší cesta, jak zvýšit produktivitu je optimalizování hloubky řezu, posuvu na otáčku a řezné rychlosti. Tyto tři parametry mají největší vliv na životnost nástroje. Hloubka řezu má nejmenší vliv, následuje posuv a řezná rychlost, která má vliv největší. Produktivita (Q) měří množství materiálu odebíraného ve stanoveném časovém období. Produktivita se pro soustružení vypočítá ze vztahu: $Q = v_c \times a_p \times f_n$ [cm³/min]. [60]



Obr. č. 17 - Optimalizované řezné podmínky [60]

Zvýšením hodnot řezných podmínek a jejich optimalizací se výrazně sníží náklady na součást a tím pádem se zvýší i zisk firmy. Ve většině případů je vhodnější zvýšit řezné podmínky než prodloužit životnost nástroje, proto je také vhodné používat nástroje, které

umožňují používat vysokých hodnot řezných podmínek než používat levné nástroje. [60]



Obr. č. 18 - Snížení nákladů na výrobek při zvýšení řezných podmínek [60]

- Snížení ceny nástroje o 30 % nebo navýšení životnosti nástroje o 50 % obvykle znamená snížení nákladů na součást pouze o 1 %. [60]

- Zvýšením řezných podmínek o 20 % umožní snížení nákladů až o 15 %, v důsledku příznivého ovládnutí nákladů na stroj, obsluhu a režijní náklady. [60]

Priority při tvrdém soustružení

- Vhodné vybavení – dostatečně kvalitní, přesný soustruh s vysokou tuhostí
- Vhodný držák obrobku
- Využití co nejlepšího postupu pro zajištění potřebné kvality
- Dosažení stálých rozměrů obrobku (tvar, tvrdost, házení)
- Zvážení vlastností nástroje a jeho správné použití
- Zajištění optimalizovaných řezných podmínek pro dosažení co největší spolehlivosti a produktivity obrábění [61]

6 Závěr

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou tvrdého soustružení. V práci je rozebrána technologie tvrdého soustružení a její výhody oproti broušení. Jsou zde také charakterizovány obráběné materiály, které jsou pro tuto technologii určené.

Pozornost je věnována strojům a jejich vlastnostem určených pro tvrdé soustružení a také jednotlivým firmám, které se zabývají výrobou přesných soustruhů s vysokou tuhostí. Zjistil jsem, že všechny tyto firmy nejvíce lpějí na kvalitě, a proto jsou vlastnosti obráběcích strojů těchto firem velmi podobné.

Řezné materiály, určené pro tvrdé soustružení jsou řezná keramika a kubický nitrid boru. Značná část práce obsahuje charakteristiku těchto materiálů a průzkum trhu vybraných výrobců nástrojů. Každý zmíněný výrobce nabízí veliké množství řezných materiálů pro tvrdé soustružení, kde každý je určený na konkrétní aplikaci. Zároveň každý výrobce udává doporučené řezné podmínky pro jednotlivé řezné materiály.

Hlavními výhodami těchto materiálů je použití vyšších řezných podmínek, možnost dosáhnout stejných hodnot drsnosti srovnatelných s broušením. Dále také ekonomičnost, protože tvrdé soustružení nevyžaduje nutně řeznou kapalinu oproti broušení. Pomocí jednoho nástroje lze obrobit různé povrchy a tvary za použití vysokých úběrů materiálu. Díky těmto výhodám může být v mnoha aplikacích doba obrábění výrazně zkrácena.

Hlavní nevýhoda je ve vysoké pořizovací ceně břitových destiček, hlavně tedy v případě kubického nitridu boru.

Z technicko-ekonomického hlediska se dá říci, že tvrdé soustružení se bude dál rozvíjet, hlavně tedy z důvodu výrazného zkrácení obráběcích časů a tím i dosažení větší produktivity a snížení nákladů na výrobu.

7 Použitá literatura

1. Production machining: Hard Turning as an Alternative to Grinding [online]. 2010 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.productionmachining.com/articles/hard-turning-as-an-alternative-to-grinding>.
2. FS, Žilinská univerzita v Žiline. MM Průmyslové spektrum: Trvanlivost' rezných materiálů při suchom tvrdom sústružení ocele 100Cr6 [online]. 2006, (060125) [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/trvanlivost-reznych-materialov-pri>.
3. HEMBRUG MACHINE TOOLS: Hard Turning Process [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.hembrug.com/hard-turning/hard-turning-process/>.
4. Sandvik Coromant: Jak postupovat při soustružení různých typů materiálů [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general-turning/pages/how-to-do-turning-in-different-materials.aspx>.
5. Canadian metalworking: Hard Turning [online]. 2011 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.canadianmetalworking.com/canadianindustrialmachinery/article/management/-hard-turning->.
6. HEMBRUG MACHINE TOOLS: Hard turning vs Grinding [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <http://www.hembrug.com/hard-turning/hard-turning-compared-to-grinding/>.
7. Sandvik Coromant: Obráběné materiály [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/workpiece-materials.aspx>.
8. Seco: NOVÉ NÁSTROJE A STRATEGIE PRO MATERIÁLY ISO S [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.secotools.com/article/21491?language=cs>.

9. LEONARD, K.J. Radiation Effects in Refractory Metals and Alloys [online]. 2012 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080560335000884>.
10. KUDRNA, Miloš. Obrábění součástí ze slitiny Ni80TiAl [online]. Brno, 2009 [cit. 2020-07-24]. Dostupné z:
https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:WIXNoGB7k-MJ:https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php%3Ffile_id%3D16236+&cd=2&.
11. MRIDHA, S. Metallic Materials [online]. 2016 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128035818040972>.
12. Iscar: Obrábění Titanu - řešení pro lékařský průmysl [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z:
<https://www.iscar.fr/Media/pdf/ObrabenTitanuProLekarskyPrumysl.pdf>.
13. VRAŠTIL, Marián. Silové poměry při tvrdém soustružení [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2020-04-26]. Disertační práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Prof. Dr. Ing. Josef Brychta.
14. KUČAVIK, Viktor. Základné technologické charakteristiky sústruženia tvrdých a kalených materiálov [online]. Žilina, 2019 [cit. 2020-04-26]. Bakalářská práce. Žilinská univerzita v Žiline. Vedoucí práce Jozef Mrázik, Ing.
15. HEMBRUG MACHINE TOOLS: Mikroturn® Base Line [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.hembrug.com/machine/the-mikroturn-300/>.
16. Sandvik Coromant: ToolGuide [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z:
<https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/Pages/toolguide.aspx>.
17. CEJNAROVÁ, Andrea. Dokončovací tvrdé soustružení nahrazuje broušení [online]. 2006 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z:
https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/dokoncovaci-tvrde-soustruzeni-nahrazuje-brouseni_15570.html.

18. Sandvik Coromant: Soustružení tvrzených součástí pomocí CBN [online]. 2012 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z:
https://www.sandvik.coromant.com/_layouts/15/tibp/downloadshandler.ashx?url=https://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global.
19. Sandvik Coromant: Jak při soustružení dosáhnout dobré kvality součástí [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general-turning/pages/how-to-achieve-good-component-quality-in-turning.aspx>.
20. HEMBRUG MACHINE TOOLS: About Hembrug Machine Tools [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.hembrug.com/about-hembrug/>.
21. HEMBRUG MACHINE TOOLS: Machine construction [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.hembrug.com/machine-construction/>.
22. HEMBRUG MACHINE TOOLS: FINISH HARD TURNING UP TO PART Ø 450 MM MIKROTURN® 100 [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.hembrug.com/machines/#horizontal>.
23. HEMBRUG MACHINE TOOLS: Hembrug Mikroturn® 500 XL Horizontal [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.hembrug.com/machines/#horizontal>.
24. Schaublin machines sa [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.smsa.ch/en/index.html>.
25. Schaublin machines sa: HARD TURNING [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.smsa.ch/en/Products/Hard-turning.html>.
26. Hwacheon Machinery [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.hwacheon-europe.com/en>.
27. Hardinge Inc. [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.hardinge.com/>.
28. HARDINGE T-Series SUPER-PRECISION Turning Centers [online]. 2014 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.hardinge.com/>.

29. HUMÁR, Anton. TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 1. část: Studijní opory pro magisterskou formu studia [online]. Brno, 2003 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf. VUT Brno.
30. HUMÁR, Anton. MATERIÁLY PRO ŘEZNÉ NÁSTROJE: Interaktivní multimediální text pro všechny studijní programy FSI [online]. Brno, 2006 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje.
31. PÍŠKA, Miroslav a Katrin BUČKOVÁ. Řezné materiály současnosti [online]. 2018 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/rezne-materialy-soucasnosti.html>.
32. Řezná keramika a kubický nitrid boru [online]. 2003 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/rezna-keramika-a-kubicky-nitrid-boru.html>.
33. Sandvik Coromant: Nástrojové materiály [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/cutting-tool-materials.aspx>.
34. Iscar [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.iscar.cz/index.aspx/countryId/6>.
35. Iscar: KARBIDY podle APLIKACÍ a MATERIÁLU [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/eCatalog/gradesTable/gradesTable.aspx>.
36. Iscar: Nové SiAlON keramické destičky pro soustružení vysokoteplotních slitin [online]. [cit. 2020-06-30]. Dostupné z: <https://www.iscar.cz/newarticles.aspx/countryid/6/newarticleid/3007>.
37. Iscar: Complete Machining Solutions Non-Rotating Tool Lines [online]. 2019 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.iscar.cz/Catalogs/publication-2019/nonrotating-tools-2019-iso-turn-tools.pdf>.
38. ISCAR: PCBN PCD Ceramic Inserts [online]. 2018 [cit. 2020-06-30]. Dostupné z: https://www.iscar.cz/Catalogs/publication-2018/CBN_2018.pdf.

39. Sandvik Coromant: Soustružení tvrzených součástí s pomocí nové generace CBN nástrojových tříd [online]. 2018 [cit. 2020-06-30]. Dostupné z:
https://www.sandvik.coromant.com/_layouts/15/tibp/downloadshandler.ashx?url=https://www.sandvik.coromant.com/siteco.
40. Sandvik Coromant: Řezná keramika [online]. 2012 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z:
https://www.sandvik.coromant.com/_layouts/15/tibp/downloadshandler.ashx?url=https://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/brochures/cs-cz/c-2929-61.
41. Sandvik Coromant: Soustružení tvrzených součástí [online]. 2019 [cit. 2020-06-30]. Dostupné z:
<https://tibp.blob.core.windows.net/coromant/4ea1dfb0-8095-43fa-8560-4ba8dfa745f2.pdf?sv=2014-02-14&sr=b&sig=Bg8d2tUuXTE1Y4D67Femyd6jF0U8DAcbAERYCatsE8%3D&st=20>.
42. Seco Tools: O společnosti Seco [online]. [cit. 2020-07-01]. Dostupné z:
<https://www.secotools.com/article/742>.
43. Seco Tools: Katalog a technický průvodce 2020 [online]. 2020 [cit. 2020-07-01]. Dostupné z:
<https://usercontent.azureedge.net/Content/UserContent/Documents/027808.pdf>.
44. CeramTec: Machining [online]. [cit. 2020-07-02]. Dostupné z:
<https://www.ceramtec.com/machining/>.
45. CeramTec: About us [online]. [cit. 2020-07-02]. Dostupné z:
<https://www.ceramtec.com/about-us/>.
46. CeramTec: SiAlON Ceramics for Machining Applications [online]. [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: <https://www.ceramtec.com/spk-cutting-materials/sialon-ceramics/>.
47. CeramTec: Mixed Ceramics for Machining Applications [online]. [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: <https://www.ceramtec.com/spk-cutting-materials/mixed-ceramics/>.

48. CeramTec: SPK® HD-LINE for Machining Applications [online]. [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: <https://www.ceramtec.com/spk-cutting-materials/hd-line/>.
49. CeramTec: Ceramic Inserts for Metalworking [online]. [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: <https://www.ceramtec.com/spk-cutting-materials/>.
50. Tungaloy: About us [online]. [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: <https://www.tungaloy.com/about-us/>.
51. Tungaloy: Řezné materiály [online]. 2018 [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: https://www.tungaloy.com/wp-content/uploads/GC_2018-2019_CZ_A_Grade.pdf.
52. Tungaloy: PCBN Tool Grades - T-CBN Series [online]. 2009 [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: <https://www.tungaloy.com/wp-content/uploads/368.pdf>.
53. Tungaloy: New coated CBN grade for hardened steel turning - BXM Series [online]. 2010 [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: <https://www.tungaloy.com/wp-content/uploads/388.pdf>.
54. Tungaloy: BXA20 - Offering new shapes and geometries for expanded coverage [online]. 2019 [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: <https://www.tungaloy.com/wp-content/uploads/511.pdf>.
55. Tungaloy: Soustružení [online]. 2018 [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: https://www.tungaloy.com/wp-content/uploads/GC_2018-2019_CZ_B_TurnLine.pdf.
56. Tungaloy: T-CBN Series - CBN with WavyJoint technology achieves stable machining of hardened steels [online]. 2018 [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: <https://www.tungaloy.com/wp-content/uploads/515.pdf>.
57. Tungaloy: NEW chipbreaker for efficient hard turning [online]. 2019 [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: <https://www.tungaloy.com/wp-content/uploads/518.pdf>.
58. VALLA, Tomáš. Vliv opotřebení na řezivost VBD při obrábění speciálních slitin [online]. Ostrava, 2015 [cit. 2020-07-06]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/109420/VAL0024_FS_N2301_2303T002_20_2015.pdf?sequence=1. Diplomová práce. VŠB.

59. ANAND, Abhishek, Ajay Kumar BEHERA a Sudhansu Ranjan DAS. An overview on economic machining of hardened steels by hard turning and its process variables, *Manufacturing Rev.* [online]. 2019 [cit. 2020-07-09]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net>.
60. Sandvik Coromant: Training Handbook - Metal cutting technology [online]. Sweden: AB Sandvik Coromant, 2017 [cit. 2020-07-08]. Dostupné z: <https://tftp.blob.core.windows.net/coromant/a93f0199-f68b-43cf-a235-005133232107.pdf?sv=2014-02-14&sr=b&sig=m6I58GfXf>.
61. JENDROL, Lubomír. Opracování obtížně obrobitelných dílů [online]. 2002 [cit. 2020-07-09]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/opracovani-obtizne-obrobitelnych-dilu.html>.

8 Seznam obrázků

Obr. č. 1 - Odchod tepla z místa řezu [18].....	18
Obr. č. 2 - Horizontální verze Hembrug Mikrotun [22]	20
Obr. č. 3 - Soustruhy firmy Schaoubli [23]	21
Obr. č. 4 - Soustruhy firmy Hwacheon [25]	22
Obr. č. 5 - Soustruhy firmy Hardinge [27]	24
Obr. č. 6 - Oblast použití řezných materiálů [28]	24
Obr. č. 7 - Světový podíl jednotlivých druhů řezných materiálů [30].....	25
Obr. č. 8 - Příklad vyměnitelných břitových destiček (VBD) z CBN [32].....	27
Obr. č. 9 - Příklad vyměnitelné břitové destičky z PCD [32].....	28
Obr. č. 10 - Konkrétní břitové destičky tvaru C [36].....	31
Obr. č. 11 - Základní tvary CBN břitových destiček [40]	36
Obr. č. 12 - Základní tvary keramických břitových destiček [39].....	36
Obr. č. 13 - Soustružení zanořením [42].....	39
Obr. č. 14 – WavyJoint [55]	43
Obr. č. 15 - Tvar CBN destičky G [54]	43
Obr. č. 16 - Lamač třísky Hardbreaker HP [56]	43
Obr. č. 17 - Optimalizované řezné podmínky [59]	45
Obr. č. 18 - Snížení nákladů na výrobek při zvýšení řezných podmínek [59].....	46

9 Seznam tabulek

Tab. č. 1 - Tvrdé soustružení ve srovnání s broušením [6].....	10
Tab. č. 2 - Technické parametry soustruhů [12] [15] [16].....	16
Tab. č. 3 - Příklad obecných řezných podmínek pro tvrdé soustružení [15]	17
Tab. č. 4 - Technické parametry horizontálních verzí Hembrug Mikrotun [21] [22].....	20
Tab. č. 5 - Parametry přesných soustruhů firmy Schaublin [23]	21
Tab. č. 6 - Parametry soustruhů Hwacheon Machinery řady Hi-TECH [25]	22
Tab. č. 7 - Parametry soustruhů firmy Hardinge Inc. řady T-Series [27].....	23
Tab. č. 8 - Doporučené řezné podmínky Iscar [36] [35] [37].....	31
Tab. č. 9 – Tvary břitových destiček Iscar [36].....	32
Tab. č. 10 - Doporučené řezné podmínky Sandvik [17] [39] [40].....	34
Tab. č. 11 - Nejčastější opotřebení a jejich řešení [17]	35
Tab. č. 12 - Doporučené řezné podmínky Seco [42]	38
Tab. č. 13 – Tvary břitových destiček Seco tools [42]	39
Tab. č. 14 - Doporučené řezné podmínky CeramTec [48]	40
Tab. č. 15 - Doporučené řezné podmínky Tungaloy [51] [52] [53]	42
Tab. č. 16 - Tvary břitových destiček Tungaloy [54]	42
Tab. č. 17 - Srovnání ŘK a CBN	44