



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ TVRDÝCH MATERIÁLŮ NÁSTROJI S DEFINOVANOU GEOMETRIÍ BŘITU

HARD MACHINING WITH DEFINED GEOMETRY EDGE TOOLS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. ZDENĚK BUKÁČEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JAROSLAV PROKOP, CSc.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2008/09

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bukáček Zdeněk, Bc.

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie a průmyslový management (2303T005)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Technologie obrábění tvrdých materiálů nástroji s definovanou geometrií břitu

v anglickém jazyce:

Hard machining with defined geometry edge tools

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Technologická charakteristika obrábění tvrdých materiálů
2. Nástroje pro obrábění tvrdých materiálů
3. Řezné podmínky pro obrábění tvrdých materiálů
4. Parametry obrobené plochy při obrábění tvrdých materiálů

Cíle diplomové práce:

Analýza a zhodnocení parametrů obrobené plochy při obrábění tvrdých materiálů

Seznam odborné literatury:


1. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. Příručka obrábění – Kniha pro praktiky. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s.r.o. 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting – A Practical Handbook. ISBN 91-972299-4-6.
2. BEŇO, J. Teória rezania kovov. Prvé vydanie. Košice. Strojnícka fakulta TU košice, 1999. 255 s. ISBN 80-7099-429-0.
3. FOREJT, M. a PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 226 s. ISBN 80-214-2374-9.
4. HUMÁR, A. Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění. 1. vyd. Brno: CCB, 1995. 265 s. ISBN 80-85825-10-4.
5. HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. MM publishing, s.r.o. Praha 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
6. KOČMAN, K. a NĚMEČEK, P. Aktuální příručka pro technický úsek. 16. aktualizované vyd. Praha: Verlag Dashöfer 2001. 4250 s. ISBN 80-902247-2-5.
7. KOČMAN, K. a PROKOP, J. Technologie obrábění. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
8. KŘÍŽ, R. a VÁVRA, P. Strojírenská příručka 7. svazek. 1. vyd. Praha: Scientia, 1996. 212 s. ISBN 80-7183-024-0.


Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jaroslav Prokop, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/09.

V Brně, dne 18.11.2008




doc. Ing. Miroslav Piška, CSc.
Ředitel ústavu


doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Zdeněk Bukáček

Bytem: Krouna 212, Krouna 539 43

Narozen/a (datum a místo): 24.04.1985, Polička

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta strojního inženýrství

se sídlem Technická 2896/2, 616 69 Brno

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

doc. Ing. Miroslav PÍŠKA, CSc.

(dále jen „nabyvatel“)

Článek 1 Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
 - diplomová práce
 - bakalářská práce
 - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Technologie obrábění tvrdých materiálů nástroji s definovanou geometrií břitu

Vedoucí/ školitel VŠKP: doc. Ing. JAROSLAV PROKOP, CSc.

Ústav: Ústav strojírenské technologie

Datum obhajoby VŠKP: Červen 2009

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v*:

- tištěné formě – počet exemplářů2.....
- elektronické formě – počet exemplářů1.....

* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2 Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3 Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 22.4.2009.....


.....
doc. Ing. Miroslav PÍŠKA, CSc.


.....
Autor

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá tématem obrábění tvrdých materiálů nástroji s definovanou geometrií břitu. Cílem je analýza a zhodnocení parametrů obrobené plochy při obrábění tvrdých materiálů. Tato práce obsahuje charakteristiku tvrdých materiálů, používané technologie pro obrábění, ale i nástroje a řezné podmínky vhodné pro obrábění tvrdých materiálů. Závěrem jsou vyhodnoceny parametry plochy zkušebního obrobku.

Klíčová slova

Tvrdé materiály, technologie obrábění, nástroje, řezné podmínky, parametry obrobeného povrchu.

ABSTRACT

This master's thesis is concerned with subject matter hard machining with defined geometry edge tools. Aim master's thesis is analysis and parameters evaluation machined surface at hard machining. This master's thesis contain a characteristic of hard materials, used technology for cutting operation, but also tools and cutting conditions suitable for hard machining. In the conclusion are parameters evaluation machined surface the workpiece.

Key words

Hard materials, machining technology, cutting tools, cutting conditions, machined surface parameters.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BUKÁČEK, Z. *Technologie obrábění tvrdých materiálů nástroji s definovanou geometrií břitu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 73 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaroslav Prokop, Csc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Technologie obrábění tvrdých materiálů nástroji s definovanou geometrií břitu vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum 24.5.2009

.....
Zdeněk Bukáček

Poděkování

Děkuji tímto doc. Ing. Jaroslavu Prokopovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

Děkuji tímto doc. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

OBSAH

Abstrakt.....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah.....	7
Úvod.....	8
1 TECHNOLOGICKÁ CHARAKTERISTIKA OBRÁBĚNÍ TVRDÝCH MATERÁLŮ.....	9
1.1 Charakteristika tvrdých materiálů.....	9
1.2 Rozdělení tvrdých materiálů.....	10
1.2.1 Oceli.....	11
1.2.2 Litiny.....	15
1.3 Technologie obrábění.....	17
1.3.1 Broušení.....	17
1.3.2 Vysokorychlostní obrábění – High speed cutting (HSC).....	17
1.3.3 Obrábění nasucho (Dry machining).....	21
1.3.4 Obrábění s použitím přivedené řezné kapaliny (Wet machining).....	21
2 NÁSTROJE PRO OBRÁBĚNÍ TVRDÝCH MATERIÁLŮ.....	22
2.1 Vyměnitelné břitové destičky.....	22
2.1.1 Cermety.....	24
2.1.2 Řezná keramika.....	26
2.1.3 Polykrystalický kubický nitrid boru (PKB nebo CBN).....	30
2.1.4 Polykrystalický diamant (PKD).....	32
2.1.5 Povlakované slinuté karbidy.....	34
2.2 Monolitické nástroje.....	36
3 ŘEZNÉ PODMÍNKY PRO OBRÁBĚNÍ TVRDÝCH MATERIÁLŮ.....	37
3.1 Řezné podmínky pro soustružení.....	37
3.2 Řezné podmínky pro frézování.....	38
3.3 Řezné podmínky a jejich vliv na životnost nástroje.....	39
3.4 Řezné podmínky pro vyměnitelné břitové destičky.....	40
3.4.1 Cermety.....	40
3.4.2 Řezná keramika.....	41
3.4.3 Polykrystalický kubický nitrid boru.....	42
3.4.4 Polykrystalický diamant.....	43
3.4.5 Povlakované slinuté karbidy.....	44
4 PARAMETRY OBROBENÉ PLOCHY PŘI OBRÁBĚNÍ TVRDÝCH MATERIÁLŮ.....	45
4.1 Přesnost tvaru.....	45
4.2 Přesnost rozměrů.....	46
4.3 Drsnost povrchu.....	46
4.3.1 Průměrná aritmetická úchylka profilu Ra.....	47
4.3.2 Největší výška profilu Rz.....	48
4.4 Metodika vyhodnocení parametrů obrobené plochy.....	49
4.4.1 Metodika měření struktury povrchu.....	52
4.4.2 Vyhodnocení struktury povrchu.....	55
Závěr.....	61
Seznam použitých zdrojů.....	62
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	66

ÚVOD

Současný trend ve strojírenství je charakterizován neustále rostoucími požadavky na strojní součásti. Zvyšují se nároky na složitost výrobků, kvalitu povrchu, tvarovou a rozměrovou přesnost. Mnohem více žádaná je také výroba součástí z pevnějších a tvrdších materiálů. S rostoucími požadavky na kvalitu součástí však rostou i nároky na řezné nástroje, obráběcí stroje, ale také na vlastní výrobní proces.

Obrábění tvrdých materiálů bylo v minulosti velmi obtížné. Jedinou možností bylo elektrojiskrové obrábění nebo broušení. Vývoj moderních řezných materiálů (např. cermetů, řezné keramiky, polykrystalického kubického nitridu boru) přinesl pokrok i do obrábění tvrdých materiálů. V současné době je na trhu široký sortiment materiálů vhodných pro řezné nástroje, a proto mohou být i ty nejtvrdší materiály třískově obráběny. Hlubší znalosti procesu obrábění tvrdých materiálů umožnili aplikovat výrobní postupy s geometricky daným ostřím. Kompletní obrábění na jedno upnutí, zkrácení výrobních časů, vyšší flexibilita a nižší cena jsou nespornou výhodou těchto nástrojů.

Vlastnosti řezných materiálů jsou pro obrábění tvrdých materiálů velice důležité. V současnosti je na trhu široký výběr řezných materiálů a tvarů břitových destiček pro různé způsoby upnutí do nožových držáků či jiných řezných nástrojů. Technolog musí z široké nabídky zvolit vhodný řezný materiál, což mnohdy vede k dezorientaci a nesprávné volbě řezného nástroje. Výsledkem jsou pak ekonomické ztráty ve výrobním procesu. Problémem tedy není hledání nových, doposud nepoužitých materiálů pro řezné nástroje, ale především optimální využití těchto již známých materiálů v konkrétních aplikacích. Tedy jen po správné volbě řezného nástroje může následovat dokonalá optimalizace procesu obrábění.

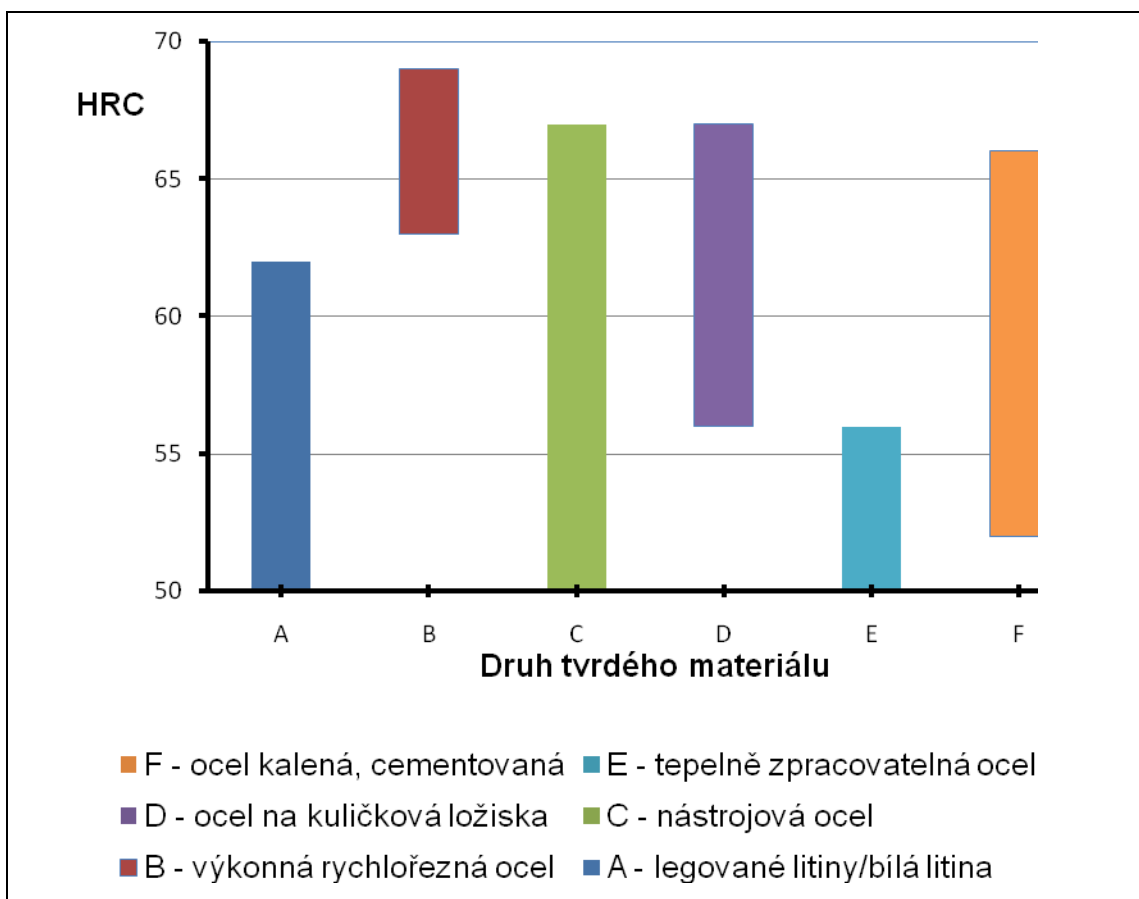
V dnešní době neexistuje žádná látka, která by mohla být použita jako univerzální řezný materiál, použitelný pro všechny obráběné materiály, technologie a především řezné podmínky. Z tohoto důvodu je velmi důležité podrobně znát vlastnosti tvrdých materiálů a v souladu s nimi vybrat vhodný typ řezného materiálu, vhodnou technologii obrábění a zejména vhodné řezné podmínky tak, aby výsledný obráběcí proces byl optimální jak z hlediska produktivity, časových nároků, ale také z hlediska minimalizace výrobních nákladů.

1 TECHNOLOGICKÁ CHARAKTERISTIKA OBRÁBĚNÍ TVRDÝCH MATERIÁLŮ

1.1 Charakteristika tvrdých materiálů

Rozvoj současné techniky je úzce spojený s používáním a vývojem tvrdých materiálů, které mají vysokou pevnost za tepla i za studena, vysokou odolnost proti korozi a další technologické vlastnosti. Vysokopevné, žárovečné a antikoroziční materiály obsahují Fe, Mo, Ni, Ti, W a další prvky [3].

Za tvrdý materiál je všeobecně považován materiál v rozsahu tvrdostí cca od 43 do 70 HRC [60]. Jsou to například materiály jako jsou legované a kalené oceli, některé typy litin, slinuté karbidy, sklo, technická keramika atd. Tvrdost se u materiálů udává jako číselná hodnota bez jednotek. Místo jednotky je za číslem uvedena zkratka metody, kterou byla tvrdost měřena (například podle Rockwella - HRC)[1]. Pouze v některých případech je tvrdost uvedena s jednotkou N/mm^2 [1]. Na následující obrázku je zobrazen rozsah tvrdosti jednotlivých typů tvrdých materiálů [2].



Obr 1.1 Rozsah tvrdosti pro hlavní druhy tvrdých materiálů

Hlavními způsoby jak získat tvrdost u kovu jsou [2]:

- přeměna výchozí struktury materiálu na strukturu martenzitickou
- tvorba karbidů ve struktuře oceli

Rozdělení obráběných materiálů podle ISO 513

Podle normy DIN ISO 513 se obráběné materiály dělí do šesti hlavních skupin, ve kterých se združují materiály, které vyvolávají kvalitativně stejný typ zatížení, namáhání břitu a tedy i podobný typ opotřebení nástroje. Identifikačními znaky hlavních skupin jsou barva a písmeno. Každá skupina je určena písmenem hlavní skupiny a klasifikačním číslem (např. H01). Uspořádání pořadí v hlavních skupinách vytvořili výrobci řezných materiálů podle relativního opotřebení a pevnosti. Čím nižší klasifikační číslo, tím je možné obrábět vyšší řeznou rychlostí s vyšší otěruvzdorností nástroje. Je – li klasifikační číslo vyšší rostou posuvové rychlosti a pevnost řezných materiálů.

Rozdělení hlavních aplikačních skupin uvádí následující tabulka:

Tab.1.1 Rozdělení obráběných materiálů podle DIN ISO 513 [54]

Identifikační písmeno a barva	Hlavní materiály
P	Uhlíkové, legované, feritické a nástrojové oceli, uhlíková ocelolitina skupiny 26, nízko a středně legované ocelolity skupiny 27, feritické a martenzitické korozivzdorné oceli
M	Nerezové oceli (austenitické a feriticko austenitické oceli korozivzdorné, žáruvzdorné a žárupevné)
K	Šedá litina nelegovaná i legovaná, tvárná litina, temperovaná litina
N	Neželezné kovy, nekovy (hliníkové slitiny, hořčíkové slitiny, slitiny mědi, bronz, mosaz, keramika a jiné vysoce abrazivní nekovy)
S	Super slitiny a titanové slitiny (žárupevné speciální slitiny na bázi niklu nebo kobaltu, titanové slitiny)
H	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.

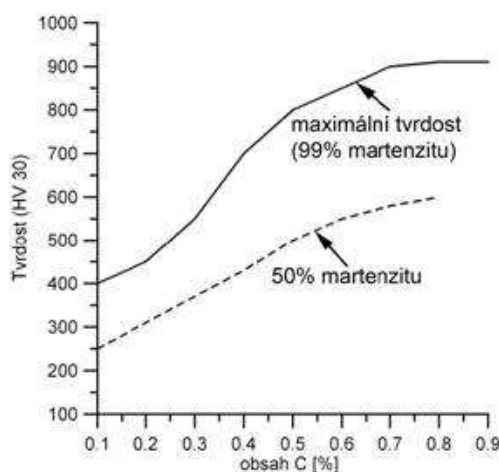
1.2 Rozdělení tvrdých materiálů

Tvrdé materiály se dají obecně rozdělit na oceli a litiny. Tvrdost lze u většiny typů ocelí získat následným tepelným zpracováním, především tedy kalením, po kterém následuje ve většině případů popouštění. V této kapitole je uveden základní přehled materiálů, které lze zařadit mezi tvrdé ve většině případů až po následném tepelném zpracování.

1.2.1 Oceli

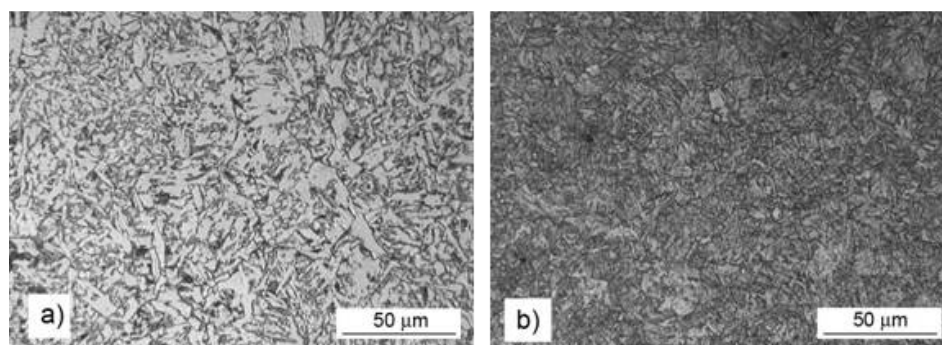
Kalené oceli

Kalení oceli se používá k dosažení vysokého stupně tvrdosti materiálu. Jedná se tedy o materiály po tepelném zpracování. Kalitelnost oceli je dána zejména obsahem uhlíku v austenitu a také množstvím vytvořeného martenzitu. Struktura oceli není tvořena pouze martenzitem, za zakalenou se obecně považuje struktura, která obsahuje alespoň 50% martenzitu (viz. obr. 1.2).



Obr. 1.2 Závislost tvrdosti oceli s 50 a 99,9% martenzitu na obsahu uhlíku [34]

Martenzit má po zakalení vysokou tvrdost, ale malou houževnatost a má velké vnitřní pnutí, proto po kalení následuje popouštění, při kterém se ocel zahřívá pod teplotu A1 a na této teplotě se udrží po stanovenou dobu. Struktura vybrané oceli po kalení a popouštění je zobrazena na následujícím obrázku (viz. obr. 1.3).

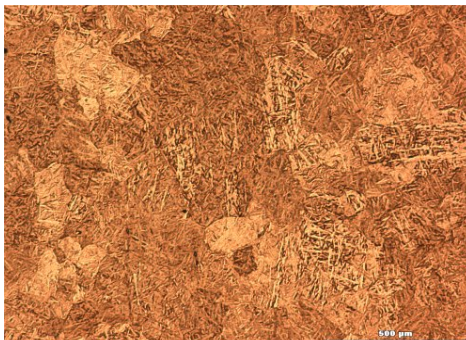


Obr. 1.3 Struktura oceli 16420: a) výchozí stav před kalením a popouštěním
b) kaleno z 850°C do oleje a popouštěno 1h při 500°C [34]

Typickými příklady použití kalené oceli jsou hřídele, vodící plochy, vačky, ozubená kola a kotouče z konstrukční uhlíkové oceli, u kterých je tvrdost po kalení 50 až 60 HRC.

Stále za tepla, chromové, chromniklové, perlitické a martenzitické oceli (viz. obr. 1.4)

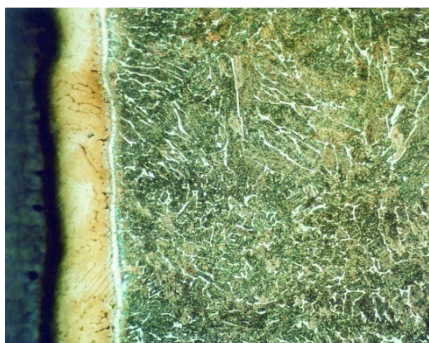
Jsou to oceli, které se nedeformují vlivem napětí v oblasti teplot do 550 °C a do této teploty na povrchu nevznikají okraje. Obsahují do 6% chromu, 3% niklu, 0,6% molybdenu, 0,8% vanadu a do 2% křemíku. Pevnost v tahu 600 až 900MPa. Používají se na výrobu ventilů spalovacích motorů, lopatek turbín a součástí parních kotlů, pracujících při teplotách 500 až 600°C. Obrobitelnost těchto ocelí je podobná jako u nízkolegovaných konstrukčních ocelí [3].



Obr. 1.4 Martenzitická struktura oceli [62]

Korozivzdorné, chromové oceli (viz. obr. 1.5)

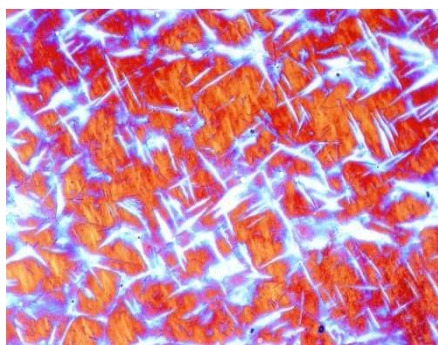
Vyznačují se odolností proti elektrochemické korozi. Mají vysoký obsah chromu (více než 12%) a malý obsah dalších legujících prvků (do 4%). Patří sem i vysokochromové oceli, které po zakalení a popouštění mají pevnost větší než 1600MPa. Korozivzdorné oceli mají pevnost 850 až 1550MPa. Používají se na výrobu armatur, lopatek turbín, které pracují při teplotách 500 až 550°C, valivých ložisek a chirurgických nástrojů. Obrobitelnost těchto ocelí je přibližně stejná jako u vysokopevných ocelí [3].



Obr. 1.5 Karbonitridovaná vysokolegovaná chromová ocel (13% Cr, 0,1%C) [61]

Žáruvzdorné oceli (austenitické oceli) (viz obr. 1.6)

Oceli odolné proti chemickému poškození povrchu v plynném prostředí při teplotě do 550°C. Obsahují velké množství chromu (více než 15%), více než 5% niklu a malé množství křemíku, titanu a dalších doprovodných prvků. Pevnost v tahu $R_m = 550$ až 1000MPa. Do této skupiny patří austeniticko-feritické a austeniticko-martenzitické oceli. Jsou korozivzdorné, žárupevné a kyselinovzdorné. Používají se na výrobu lopatek kompresorů, parních trubek a dalších součástí, pracujících v podmínkách vyvolávajících korozi nebo v prostředí vysokých teplot (do 800°C) [3].

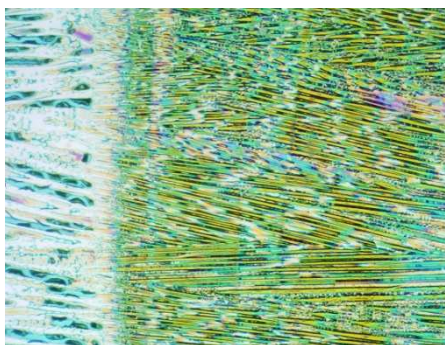


Obr. 1.6 Mikrostruktura lité austenitické manganové oceli (13%Mn, 1,3%C) [61]

Žárupevné oceli (viz obr. 1.7)

Žárupevné oceli dokáží určitý čas pracovat při vysokých teplotách (nad 700°C), aniž by se na povrchu kovu tvořily okuje. Patří sem složitě legované austenitické oceli obsahující velké množství chromu (12 až 25%), více než 5% niklu a malé množství manganu, molybdenu, titanu, vanadu a wolframu. Pevnost těchto ocelí se pohybuje od 700 až do 1000MPa. Používají se na výrobu lopatek a disků plynových turbín, součástí rozvodů plynu a součástí pracujících za teplot 650 až 750°C. Obrobitelnost těchto ocelí je 3 až 4-krát horší než u středněuhlíkových ocelí [3].

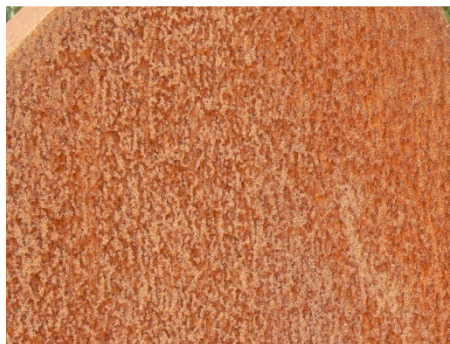
Pod žárupevné oceli patří i žárupevné oceli na tváření na bázi niklu legované velkým množstvím chromu (10 až 20%) a malým množstvím hliníku, molybdenu, titanu a wolframu. Pevnost $R_m = 900$ až 1250°C. Jsou vhodné na výrobu velmi namáhaných součástí pracujících při teplotách 750 až 950°C jako například disky a lopatky plynových turbín. Obrobitelnost těchto ocelí je 6 až 12-krát horší než u středněuhlíkových ocelí [3].



Obr. 1.7 Mikrostruktura vysokolegované austenitické oceli (Austenitický návar na austenitické oceli) [61]

Vysokopevné oceli (viz. obr. 1.8)

Jsou to nízkolegované vysokopevné oceli. Jejich pevnost v tahu je větší než 1600MPa. Po žíhání je jejich obrobiteľnosť podobná jako u konstrukčních ocelí. V případě kalení a popouštění se jejich obrobiteľnosť 5 až 8-krát zhoršuje. Obrobiteľnosť těchto vysokopevných ocelí v žíhaném stavu je 3 až 4-krát nižší a po kalení a stárnutí oceli 10 až 12-krát nižší než u středněuhlíkové oceli [3].



Obr. 1.8 Mikrostruktura nízkolegované oceli [10]

Tvrzená nerezová ocel

Tvrzené nerezové oceli dle ČSN 17024 a ČSN 17042 vykazují maximální tvrdost ve spojení s korozivzdorností. Tyto oceli jsou vhodné pro všechny aplikace, kde je vyžadována kombinace tvrdosti ve spojení s korozivzdorností. Tato nerezová ocel je magnetická. Tvrdost nerezové oceli ČSN 17024 se po tepelném zpracování pohybuje od 52 do 55 HRC, v této oceli je nejvíce obsažen chrom (12,5 – 14,5%), dále prvky jako je mangan, křemík a nikl (maximálně 1%), molybden (0,4 – 0,65), uhlík (0,42 – 0,5%) a v malém množství síra, fosfor a měď. Tvrdost u oceli ČSN 17042 je 58 – 65 HRC, obsahuje v největším množství chrom (16 -18%), mangan, křemík (max. 1%), uhlík (0,86 – 1,2%), nikl (maximálně 0,75%), molybden (0,4 – 0,65%), měď (0,5%), fosfor a síru (0,025%) [39].

Ložisková ocel

Ložisková ocel se používá zejména v ložiskových aplikacích, ale zároveň i v mnoha průmyslových aplikacích. Kuličky z ložiskové oceli mají díky tepelné úpravě kalením výborné povrchové vlastnosti, především vysokou tvrdost a pevnost. Kuličky do ložisek jsou vyráběny z oceli ČSN 14109. Tvrdost po tepelném zpracování je 60 – 66 HRC. Ocel na kuličková ložiska má následující chemické složení [38]:

- uhlík (0,98 – 1,1%)
- chrom (1,3 – 1,6%)
- mangan (0,25 – 0,45%)
- křemík (0,15 – 0,35%)
- síra (maximálně 0,025%)
- fosfor (maximálně 0,025%)

Legovaná ocel (Vysoce legovaná ocel)

Legovaná ocel obsahuje větší množství jednoho nebo více legujících prvků jako jsou mangan, křemík, fosfor, síra, chrom, nikl, molybden, vanad a wolfram. Za tvrdé legované oceli jsou považovány především vysoce legované oceli s podílem legujících prvků přesahujících 5%. Tyto druhy ocelí jsou tvrdší a stabilnější než uhlíkové oceli a kladou větší nároky na obrábění, neboť vyšší podíl legujících prvků zvyšuje pevnost materiálu, a tím zhoršuje obrobiteľnosť [2].

Například: Legovaná, vysoce otěruvzdorná chromová ocel s tvrdostí 60 – 65 HRC.

Cementovaná ocel

Při cementování oceli se do povrchové vrstvy oceli přidává uhlík v množství asi 1%, následuje kalení a popouštění, po kterém vzniká na povrchu extrémně tvrdá vrstva (asi 62 HRC). Jádro, které má nízký obsah uhlíku není kalením vůbec zasaženo a zachová si svoji houževnatost. Pro cementování jsou vhodné oceli třídy 12 (např. 12 010, 12 020, 12 024).

Nástrojové oceli

Nástrojová ocel má vysokou otěruvzdornost a odolnost proti oxidaci a pevnost. Normalizováno je 15 druhů tohoto typu oceli [47]. Z důvodu dosažení co nejčistší struktury, která se používá v tepelně namáhaných aplikacích je tuto ocel možné tavit a znovu přetavit ve vakuu. Tvrdost nástrojové oceli se po tepelném zpracování pohybuje od 52 do 65 HRC [40].

1.2.2 Litiny

Litina je slitina železa a uhlíku s obsahem uhlíku 2 – 4% [2]. Dalšími legujícími prvky jsou mangan, křemík, fosfor a síra. Tepelná odolnost a odolnost proti korozi mohou být zlepšeny přidáním prvků jako je chrom, nikl, molybden a měď. Litiny se dělí podle jejich mechanických vlastností a především podle způsobu vyloučení grafitu z železa. Různé typy litin mají základní složku struktury feritickou, perlitickou nebo smíšenou feriticko-perlitickou.

Dělení litin:

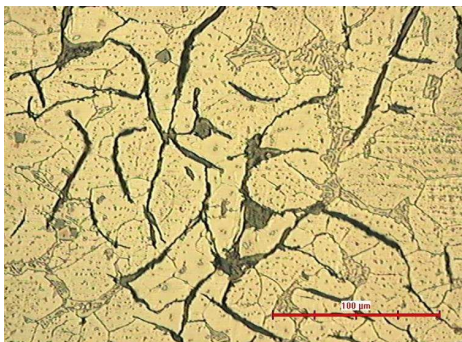
- tvárná litina – litina s kuličkovým grafitem
- šedá litina – litina s lupínkovým grafitem
- temperovaná litina – litina s vločkovým grafitem
- bílá litina – grafit se nevylučuje, zůstává v litině vázan na železo a vzniká karbid železa

a) Šedá litina

Šedá litina (viz. obr. 1.9) nebo také litina s lupínkovým grafitem je vícesložková slitina železa s uhlíkem, křemíkem, manganem, fosforem, sírou a dalšími prvky, ve které je obsah uhlíku větší než 2,14%. Obsah uhlíku se obvykle pohybuje od 2,8 do 4%. Šedá litina se vyznačuje poměrně vysokou pevností v tlaku, další mechanické vlastnosti jsou nepříznivě ovlivněny tvarem lamelárního grafitu. Lamely grafitu působí negativně na strukturu materiálu a snižují pevnost v tahu na 10 až 35

MPa. Vyrábí se přetavením surového železa a šrotu v elektrických pecích nebo kuplovnách.

Šedá litina se používá na odlitky, v automobilovém průmyslu, ve výrobě strojů, na umělecké odlitky, armatury, radiátory, odlitky pro stavební průmysl [36].



Obr. 1.9 Mikrostruktura šedé litiny [46]

b) Tvřzená litina

Legovaná chromem a niklem. Tento typ litiny se používá na mlecí válce pro mletí mouky [37].

c) Bílá litina

Bílá litina (viz. obr. 1.10) vznikne krystalizací podle metastabilního diagramu, a proto obsahuje cementit. Velmi tvrdý a křehký typ litiny. Tvrdost 35 – 48,3 HRC. Používá se pro výrobky odolné opotřebení nebo jako polotovary pro temperovanou litinu.



Obr. 1.10 Mikrostruktura Bílé litiny [46]

1.3 Technologie obrábění

Tvrdé materiály byly v minulosti velmi obtížně obrobitelné. Jedinou možností obrábění bylo elektrojiskrové obrábění nebo broušení jako metoda obrábění na jemno [1]. Zejména obrobky z kalené oceli byly obráběny broušením. Vývoj řezných materiálů (např. kubického nitridu boru, řezné keramiky) s vysokou odolností proti otěru a vyšší řezivostí přinesl pokrok i do obrábění tvrdých materiálů. V současné době mohou být i ty nejtvrďší materiály třískově obráběny. Hlubší znalosti procesu obrábění tvrdých materiálů umožnili aplikovat výrobní postupy s geometricky daným ostřím [1]. Výhody těchto nástrojů jsou např. kompletní obrábění na jedno upnutí, vyšší flexibilita, kratší výrobní časy, nižší cena a možnost optimalizace výroby s úsporami energií [2].

Obrábění tvrdých materiálů je spojeno se zvláštním mechanismem tvoření třísky. Při normálních teplotách a tlacích jsou tvrdé materiály plasticky neformovatelné. Při tvoření třísky nevzniká žádná oblast stříhu ani střížná rovina. V první části oddělování materiálu se před čelní plochou povrchu obrobku tvoří trhlinka, která se zvětšuje. Vznikající segmenty se převážně „spékají“. Při obrábění tvrdých materiálů dochází k namáhání, které klade následující požadavky na řezné materiály [1] (viz. tab. 1.2):

Tab.1.2 Požadavky kladené na řezné materiály při obrábění tvrdých materiálů [1]

Namahání při obrábění tvrdých materiálů	Požadavky na řezné materiály
Vysoký tlak v blízkosti ostří	Odolnost proti difuzi
Vysoké provozní teploty	Houževnatost, pevnost hran
Vysoké rázové zatížení v přerušovaném řezu	Pevnost v ohybu a tlaku

1.3.1 Broušení tvrdých materiálů

Broušení jako technologie obrábění tvrdých materiálů byla v minulosti velmi používanou technologií. V současnosti se tato technologie používá především jako dokončovací operace.

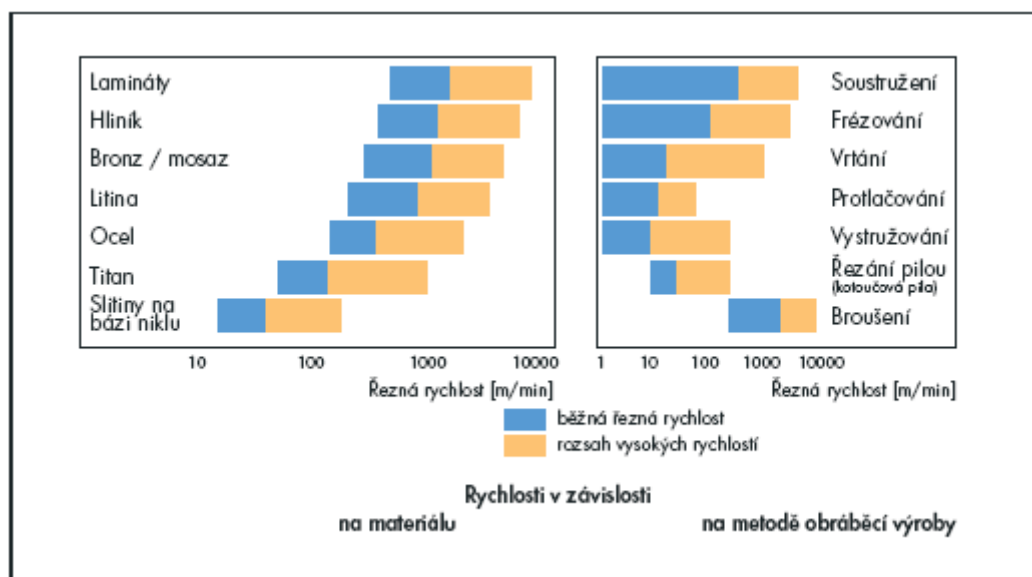
1.3.2 Vysokorychlostní obrábění – High speed cutting (HSC)

Samotná definice HSC obrábění je složitá. Za jednu jednoduchou definici je považováno to, že při vysokorychlostním obrábění dosahuje řezná rychlost 5 až 10x větších hodnot než při konvenčním obrábění. Hranice tzv. vysoké rychlosti obrábění je pro každý obráběný materiál rozdílná. Ovlivňuje ji druh řezného materiálu, geometrie břitu a samotné konstrukční provedení nástroje - tzn. je-li nástroj celistvý nebo s vyměnitelnými břitovými destičkami.

Hlavním cílem vysokorychlostního obrábění je zvýšení výkonu, zlepšení kvality obrobenej plochy a zvýšení životnosti nástroje. Podstatou HSC obrábění jsou vyšší otáčky a posuvy při zmenšené hloubce řezu, menší působící síly a menší tepelné ovlivnění obrobku.

Při HSC se teplota třísky blíží teplotě tavení obráběného materiálu. Pro ocel to znamená teplotu přibližně 1500°C, 1300°C pro šedou litinu, 1000°C pro bronz a pro hliník 600°C. Vysoká odchozí rychlost způsobí to, že tříška nestačí předat teplo obrobku ani nástroji. Tím je minimalizován přenos tepla do obrobku a

nástroje a drtivá většina tepla odchází s třískou, tudíž nedochází k výraznému tepelnému ovlivnění obráběného povrchu, a proto se zvyšuje tvarová a rozměrová přesnost povrchu. Zlepší se jakost a celková integrita obráběného povrchu, to může způsobit minimalizaci nebo úplné odstranění dokončovacích operací. Omezí se opotřebení nástroje. Poklesem řezných sil a snížením tepelného toku stoupne přesnost obrábění. V podstatě lze říci, že při vysokorychlostním obrábění převažují v tříске a v obráběném materiálu děje odpevňovací nad zpevňovacími. Velká teplota třísky je tedy pozitivním faktorem celého procesu a vlastně i zdrojem efektů HSC. Na následujícím obrázku je zobrazen rozsah řezných rychlostí při konvenčním a HSC obrábění (viz. obr. 1.11).

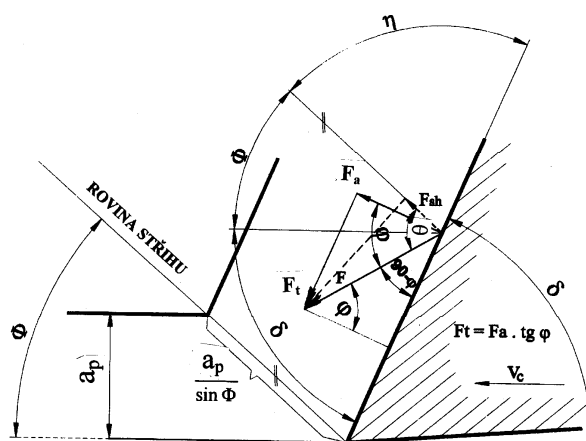


Obr. 1.11 Rozsah řezných rychlostí při vysokorychlostním obrábění [1]

Řezné podmínky a mechanismus tvorby třísky při HSC obrábění

Přesnou hranici parametrů strojů a řezných podmínek, při kterých by se dalo hovořit o HSC obrábění nelze jednoduše stanovit. Náhlé změknutí třísky při dosažení určité teploty a odpovídající pokles řezné síly jsou efekty, které nejvíce souvisí s vysokorychlostním obráběním. Nejvýhodnější je pracovat v oblasti nejvyšších výkonů stroje, kde kroutící moment a výkon dosahují maximálních hodnot. Zejména při hrubování, kdy je potřeba velký výkon vřetene je vhodné pracovat v těchto oblastech. Mimo oblast jmenovitých otáček stroje, hlavně při malých průměrech nástroje je možné pracovat při obrábění na čisto. To je způsobeno tím, že při obrábění na čisto malými průměry nástrojů je pro dosažení odpovídajících řezných podmínek potřeba vyšších otáček, ale nižších kroutících momentů a výkonů.

Rozdíly mezi konvenčním obráběním a vysokorychlostním se výrazně projevují v mechanismu tvorby třísky. Oddělování třísky je složitý proces, jehož průběh závisí zejména na fyzikálních vlastnostech obráběného materiálu a jejich závislosti na podmínkách plastické deformace. Při zvyšující se řezné rychlosti se oblast plastické deformace zúžuje a ke vzniku třísky dochází plastickým skluzem v rovině stříhu (viz. obr. 1.12) [55].



Obr. 1.12 Průběh tvorby třísky (rovina stříhu) [55]

Tečná síla ve střížné rovině F_s se vypočítá podle následujícího vztahu [55]:

$$F_s = \frac{\tau_k \cdot h_D \cdot b}{\sin \phi} = F \cdot \cos \theta \quad [N] \quad (1.1)$$

τ_k ...střední kritické kluzové napětí obráběného materiálu [MPa]

b ...šířka třísky [mm]

ϕ ...úhel směru maximálních tečných napětí

Z předcházející rovnice lze stanovit sílu F , kterou nástroj působí na odřezávanou vrstvu materiálu [55]:

$$F = \frac{\tau_k \cdot h_D \cdot b}{\sin \phi \cdot \cos \theta} = \frac{\tau_k \cdot h_D \cdot b}{\sin \phi \cdot \cos(\phi + \delta + \phi - 90^\circ)} \quad [N] \quad (1.2)$$

ϕ ...úhel tření [°]

δ ...úhel řezu [°]

Úhel střížné roviny ϕ závisí především na úhlu tření a úhlu řezu [55]:

$$\phi = 90^\circ - \frac{(\phi + \delta)}{2} \quad [^\circ] \quad (1.3)$$

Úhel střížné roviny je ovlivněn všemi řeznými podmínkami, které mají vliv na velikost úhlu ϕ [55].

Stroje a nástroje pro vysokorychlostní obrábění

Stroje pro vysokorychlostní obrábění mají proti strojům pro konvenční obrábění několikanásobně větší výkon a produktivitu. Hlavními technologickými požadavky na tyto stroje je především zvýšení úběru materiálu, slučování operací a snížení výrobních časů [12].

Nástroje pro HSC obrábění musí mít vysokou tvrdost povrchu, odolnost proti chemickému opotřebení a vysokou houževnatost proto, aby se předešlo možnému ulomení nástroje a snížilo se opotřebení. Tyto vlastnosti musí být zachovány i při těžkých zátěžových podmínkách a vysokých teplotách řezného procesu [12]. Při volbě řezného materiálu je hlavním cílem zajistit pro konkrétní

řezný a obráběný materiál dostatečnou převahu tvrdosti nástroje nad materiálem obráběným v potřebném rozsahu pracovních teplot. Vysokorychlostní obrábění ocelí umožňují zejména povlakované karbidy, cermety a řezná keramika. Litiny a kalené oceli se obrábí především kubickým nitridem boru (CBN) a vysokorychlostní broušení kalených materiálů se provádí kotouči s keramickým pojivem a kubickým nitridem boru.

Přednosti vysokorychlostního obrábění [1]

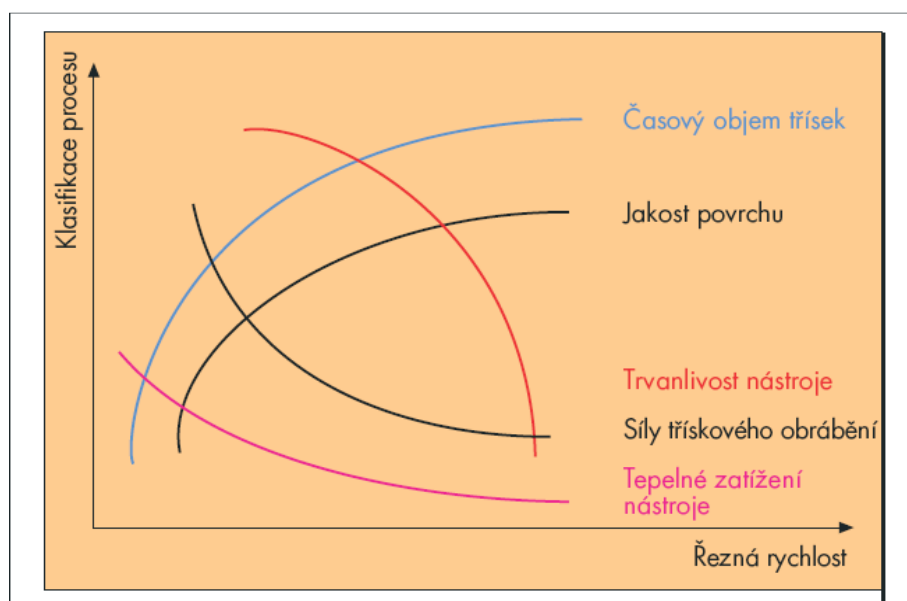
- Významné zkrácení časů obrábění
- Zvýšení posuvové rychlosti 5-10 krát
- Vysoká kvalita obráběného povrchu
- Vlivem vysoké řezné rychlosti je vzniklé teplo odváděno třískami
- Poklesem řezných sil a snížením tepelného toku stoupne přesnost obrábění
- Možnost aplikace obrábění bez chlazení

Použití HSC technologie

Technologie HSC se využívá například pro obrábění prostorově složitých povrchů, jako jsou třeba zápustky, formy a jiné obrobky. Používá se zejména frézování malými průměry fréz a soustružení. Touto technologií se obrábějí především litiny a tvrdé materiály, jako například kalená ocel o tvrdosti okolo 60 HRC, ale také lehké kovy a jejich slitiny [12].

Přínosy HSC obrábění

Technologie obrábění vysokými rychlostmi, především frézování malými průměry fréz a soustružení, přinesla podstatné snížení výrobních časů a nákladů. Hlavně nárůst otáček způsobil snížení časů a výrobních nákladů, neboť v minulosti se tvrdé materiály obráběly zejména při malých řezných rychlostech a nízkých otáčkách. Na následující obrázku jsou zobrazeny vlivy vysokorychlostního obrábění na jednotlivé vlastnosti (viz. obr. 1.13).



Obr. 1.13 Trendy vlivů HSC obrábění na proces třískového obrábění [1]

1.3.3 Obrábění nasucho (Dry machining)

Technologií obrábění nasucho rozumíme obrábění v přirozeném prostředí, které je tvořeno pouze upraveným nebo neupraveným vzduchem [17]. Obrábění nasucho spolu s kombinací geometricky daného ostří, ekonomických výhod a s pohledu ekologie přináší nejefektivnější využití třískového obrábění [1]. Tuto technologii obrábění je výhodné aplikovat zejména v souvislosti s vysokorychlostním obráběním [17].

V dnešní době používané vysoké řezné rychlosti HSC obrábění způsobují velmi horkou zónu řezu. Řez probíhá při teplotách nad 1000°C. To znamená, že chladicí kapalina přivedená k břítu v záběru se ihned vypaří a nemá prakticky žádný chladicí význam. Přivedená chladicí kapalina ochladí břit v době, když není v řezu a tak zvýrazní teplotní rozdíly, způsobující cyklické namáhání a vzniknou tepelné praskliny. To má za následek snížení životnosti nástroje. Moderní řezné materiály jako jsou cermety, řezná keramika, kubický nitrid boru a diamant jsou vyrobeny tak, aby vydržely vysoké teploty v řezu a řezné rychlosti [16].

Výhody obrábění nasucho [16]

- zvýšení produktivity
- při frézování bez chladicí kapaliny se prodlouží životnost nástroje až o 40% a v některých případech o ještě více
- snížení výrobních nákladů
- náklady na chladicí kapalinu a následnou likvidaci tvoří 15 – 20% celkových nákladů, ale samotné nástroje tvoří jen 4 – 5% nákladů
- čistší a zdravější pracovní prostředí bez zápachu a bakterií
- není potřebná údržba rozvodu a nádrží chladicí kapaliny
- při tomto obrábění dochází k lepšímu utváření třísky

1.3.4 Obrábění s použitím přivedené řezné kapaliny (Wet machining)

Obrábění nasucho je moderní a žádané, ale nemůže být použito na všechny obráběné materiály a technologie [18]. Na tyto ostatní materiály tedy musí být použito obrábění s přívodem chladicí kapaliny [18]. Například obrábění tepelně odolných slitin se provádí při nízkých řezných rychlostech a s přívodem chladicí kapaliny. Především však při frézování hlubokých drážek je potřeba použít chladicí kapalinu. Chladicí kapalina se také používá k omezení geometrické deformace při obrábění tenkostěnných součástí, dále může být výhodná pro oplach součástek a částí stroje od pilin a prachu nebo také díky svým vlastnostem na ochranu stroje před korozi. Je-li nutné frézovat „za mokra“, musí se přivádět velké množství chladicí kapaliny a použít nástroj vhodný pro frézování za mokra i sucha [16].

V současnosti jsou materiály jako vysoce legovaná ocel, extra slitiny a především titanové slitiny obráběny zasucha. Nicméně stále existují aplikace, kde chlazení a mazání zůstane nepostradatelné i v blízké budoucnosti.

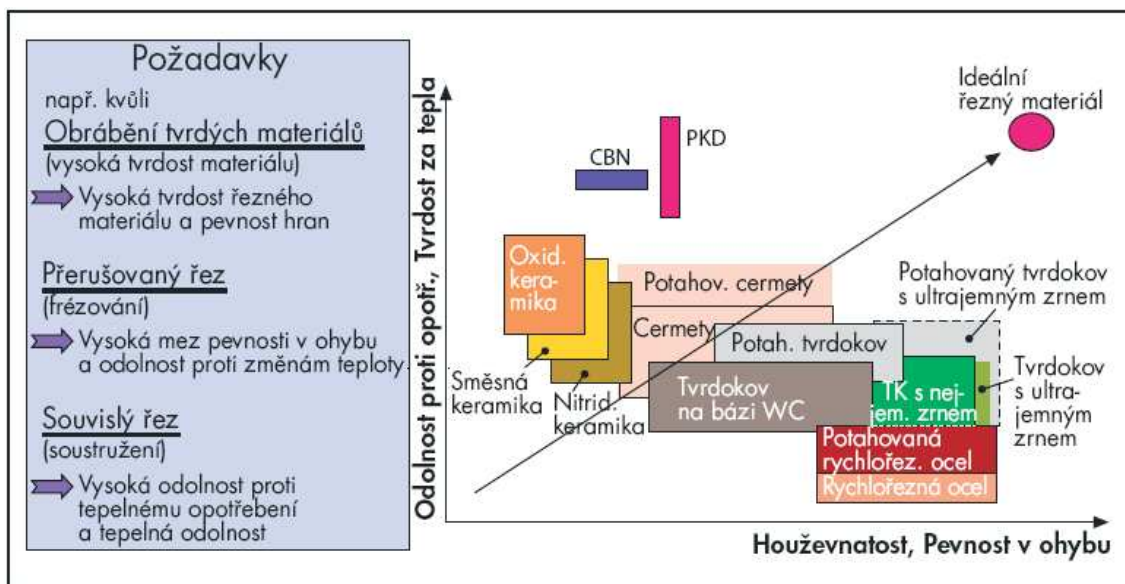
2 NÁSTROJE PRO OBRÁBĚNÍ TVRDÝCH MATERIÁLŮ

Výběr správného typu nástroje pro obrábění je důležitou součástí každé technologie. Použitím vhodných nástrojů, optimální technologie a řezných podmínek může být zlepšena kvalita povrchu součásti, snížen odpad a zejména sníženy náklady na výrobu. Volba nástroje na obrábění tvrdých materiálů je především ovlivněna obráběným materiálem. Vlastnosti řezné části nástroje významně ovlivňují průběh řezného procesu, ale i obráběný materiál [4]. Pro zvolení vhodného typu nástroje pro operaci obrábění, stejně tak i nástroje pro obrábění tvrdých materiálů je potřeba zohledňovat následující základní faktory [2]:

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

2.1 Vyměnitelné břitové destičky

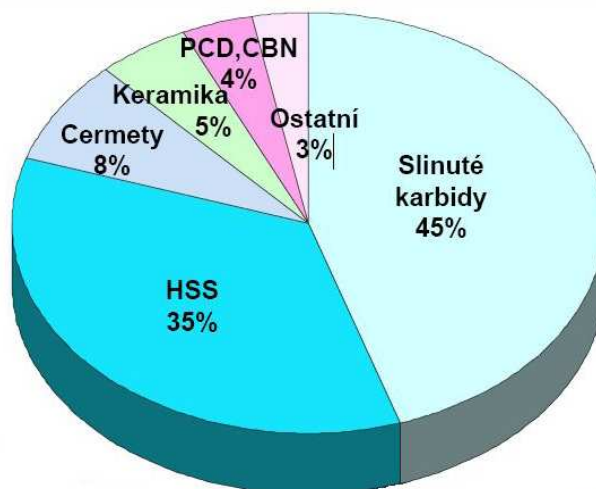
Na břitové destičky používané pro obrábění tvrdých materiálů jsou kladeny značné požadavky jako je například pevnost v tlaku a ohybu, houževnatost, chemická stabilita, tvrdost za tepla, odolnost proti abrazivnímu a difuznímu opotřebení [2]. Podle příslušné operace obrábění záleží, které z požadavků na materiál břitu jsou nejdůležitější [1]. Nástrojové materiály pro třískové obrábění se dají rozdělit následovně (viz obr. 2.1).



Obr. 2.1 Vlastnosti používaných řezných materiálů [1]

Řezné materiály, které se používají pro obrábění tvrdých materiálů jsou zejména cermety, kubický nitrid boru (CBN), řezná keramika, polykrystalický diamant (PKD), povlakované slinuté karbidy, ale také coronitové frézy.

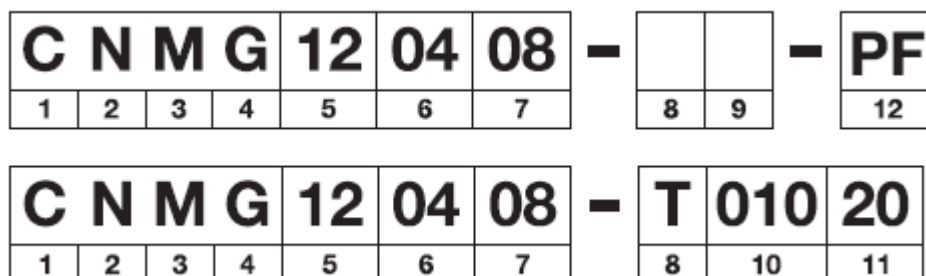
Následující obrázek (viz. obr. 2.2) graficky zobrazuje světovou produkci jednotlivých druhů rezných materiálů.



Obr. 2.2 Světová produkce nástrojových materiálů [23]

ISO systém značení pro vyměnitelné břitové destičky

Na následujícím obrázku je zobrazeno značení vyměnitelných břitových destiček pro všeobecné soustružení podle ISO normy (viz. obr. 2.3).



Obr. 2.3 ISO značení vyměnitelných břitových destiček [54]

Význam jednotlivých symbolů v předchozím obrázku:

- 1 – Tvar vyměnitelné břitové destičky (C, D, K, R, S, T, V, W)
- 2 – Úhel hřbetu břitové destičky (B, C, E, N, P, O)
- 3 - Tolerance
- 4 - Typ destičky
- 5 – Délka řezné hrany
- 6 – Tloušťka břitové destičky
- 7 – Poloměr špičky
- 8 – Tvar řezné hrany (F, E, T, K, S)
- 9 – Provedení nástroje – Směr řezu (R, L, N)
- 10 – Šířka fazety
- 11 – Úhel zkosení
- 12 – Možnost označení ponechaná na výrobcí

2.1.1 Cermety

Název Cermet vznikl spojením anglických slov CERamic + METal a znamená keramické částice s kovovým pojivem. Je to také společný název pro všechny tvrdé kovokeramické materiály. Cermet je žáruvzdorný, řezný materiál vyráběný slisováním a spékáním směsi kovových částic a keramických prášků [4]. Nízká měrná hmotnost, pohybující se v rozmezí $5,6 - 7,4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ je charakteristickou vlastností cermetů [5]. Vlastnosti cermetů závisí na vzájemném poměru složek. Tvrdé složky cermetů jsou zpravidla tvořeny nitridem titanu (TiN), karbidem titanu (TiC) nebo karbonitridem titanu (TiCN). Keramické složky propůjčují cermetům tepelnou a chemickou odolnost, kovové složky pevnost. Kovové pojivo může být tvořeno částicemi niklu (Ni), molybdenu (Mo), kobaltu (Co) [4].

Větší obsah tvrdé složky (TiC, TiCN, TiN) způsobí větší tvrdost cermetu a tedy i větší deformační odolnost. Cermety se pomalu opotřebovávají, a proto mají dlouhou životnost a dosahují vynikající přesnosti a jakosti obráběného povrchu [1]. Nevýhodnou vlastností cermetů je malá houževnatost. Cermety jsou velmi používané především pro dokončovací operace [5].

V praxi lze cermety také považovat za slinuté karbidy, vyrobené na bázi titanu, nikoliv na bázi karbidů wolframu [2]. Na následujícím obrázku jsou uvedeny tvary cermetových břitových destiček (viz. obr. 2.4).



Obr. 2.4 Tvary břitových cermetových destiček [23]

Zatímco v minulosti byly cermety citlivé na nárazy a tepelné rázy, dnes jsou houževnatější. Vývoj jemnozrných struktur zlepšil houževnatost cermetů. Mikroskopická fotografie jednoho takového cermetu ukazuje jak jemnozrná struktura vypadá (viz. obr. 2.5). V závislosti houževnatosti na odolnosti proti opotřebení jsou cermety těsně pod keramickými materiály (viz. obr. 2.2). V současnosti cermety zaujmuli výkonovou propast mezi keramickými materiály a nejtvrďšími karbidy.



Obr. 2.5 Konvenční cermet o průměrné velikosti zrn 1,5-2mikrometrů (vlevo). Jemnozrný cermet PV7020, průměrná velikost zrna 0,6mikrometrů [21]

Vlastnosti cermetů [2]

- Vysoká tvrdost za tepla a chemická stabilita
- Vysoká odolnost proti opotřebení hřbetu nástroje a odolnost proti opotřebení ve tvaru žlábků na čele
- Dobrá odolnost proti oxidačnímu opotřebení
- Dobrá odolnost proti tvorbě nárůstku

Výhody cermetů [33]





- Vysoká odolnost proti opotřebení
- ekonomické náklady
- vhodný k obrábění vysokými rychlostmi
- v destičce vylisované nebo vybroušené lamače třísky

Doporučené použití cermetů [33]

- soustružení na čisto a vrtání šedé litiny
- soustružení slinutých karbidů
- polodokončování a soustružení na čisto ocelí a tvárné litiny
- obrábění ložiskových drážek
- frézování ocelí

V následující tabulce jsou zobrazeny vybrané typy cermetových břitových destiček vhodných pro obrábění tvrdých materiálů (viz. tab. 2.1).

Tab. 2.1 Vybrané typy cermetových destiček pro obrábění tvrdých materiálů [35], [54]

Typ	Označení	Operace - Vlastnosti	Doporučené použití
	CNMG	Velmi jemný povlakovaný cermet - Dokončování a střední obrábění při vysokých řezných rychlostech	Obrábění slitin, nerezové a lité oceli, legované oceli
	WNMG	Povlakovaný cermet - Dokončovací operace při velmi vysokých řezných rychlostech – nízký výskyt nárůstků hran	Šedá litina, tvrzená litina, temperovaná litina, feritické oceli
	DCMT	Cermet s povlakem pro jemné až střední řezné podmínky – dobrá tuhost a odolnost proti opotřebení, malý výskyt nárůstků hran	Šedá litina, tvrzená litina, temperovaná litina, litá ocel, feritické, martenzitické oceli
	TCMT	Nepovlakovaný cermet s vynikající odolností proti tvorbě nárůstku – zvýšená houževnatost	Dokončování legovaných ocelí při vysokých nárocích na kvalitu povrchu

2.1.2 Řezná keramika

Řezná keramika patří do anorganických, nekovových a převážně krystalických materiálů [23]. Keramické řezné materiály se často používají pro obrábění tvrdých materiálů. Keramika je pro tento druh obrábění velice vhodná protože je tvrdá, má vysokou tvrdost za tepla, je vysoce odolná proti opotřebení, má nízkou měrnou hmotnost a chemicky nereaguje s materiálem obrobku. Řezná keramika má dlouhou trvanlivost. Velkou výhodou řezné keramiky proti slinutým karbidům (kde tvrdost klesá už při dosáhnutí teploty 700°C), je zachování tvrdosti ostří i při vysokých teplotách (až 1200°C) [25]. Tento nástrojový materiál je však křehký a má nízkou tepelnou vodivost.

Nástroje s břitovými destičkami z řezné keramiky se používají zejména ve velkosériové a hromadné výrobě, ve všech náročnějších obráběcích procesech, kde chceme dosáhnout maximální efektivity, než umožňují nástroje s destičkami ze slinutého karbidu. Tento materiál je také vhodný pro obrábění materiálů, které jsou těžko obrobitelné nástroji s destičkami ze slinutých karbidů [25]. Řeznou keramikou je vhodná především pro obrábění kalené oceli, povrchově kalených obrobků, žáropevných slitin, šedé a tvrzené litiny.

Stroje, na kterých se nástroje s destičkami z řezné keramiky používají musí mít vysokou tuhost a přesnost vřetena, dostatečný výkon a velký rozsah otáček. Nutné je také zakrytí pracovního prostoru stroje. Při procesu obrábění může dojít k jiskření případně i hoření třísek.

Keramické vyměnitelné břitové destičky mají zpravidla „negativní“ tvar, který zajišťuje nejvyšší možnou spolehlivost a stabilitu při obrábění. Je-li to jen trochu možné měla by se při použití nástrojů z řezné keramiky dávat přednost vyměnitelným břitovým destičkám kruhového tvaru. Tento typ destičky má malý úhel nastavení hlavního ostří a stabilní břit. Na následujícím obrázku jsou zobrazeny jednotlivé typy keramických břitových destiček (viz. obr. 2.6).

K obrábění tvrdých materiálů se zejména používá oxidická keramika na bázi oxidu hlinitého a neoxidická keramika na bázi nitridu křemíku.



Obr. 2.6 Břitové destičky z řezné keramiky [25]

Vlastnosti keramických řezných materiálů

- Vysoká tvrdost zatepla
- Nereagují chemicky s materiálem obrobku
- Dlouhá trvanlivost bříty
- Možnost použití i při vysokých řezných rychlostech

Výhody řezné keramiky

- Vynikající odolnost proti opotřebení a dlouhá životnost nástroje
- Stabilní pro široký rozsah obráběcích operací
- jakost povrchu obráběného materiálu

Doporučené použití řezné keramiky

- Soustružení a vrtání šedé litiny
- Hrubování a dokončovací operace vložek válců
- Soustružení tvrdých materiálů (pod 65HRC)
- Polodokončování a soustružení načisto tvárné litiny
- Obrábění šedé litiny vysokými rychlostmi

Řezná keramika se dělí do následujících skupin

- Oxidická keramika na bázi oxidu hlinitého
 - Čistá
 - Polosměsná
 - Směsná
- Neoxidická (nitridová) řezná keramika na bázi nitridu křemíku
- Vyztužená keramika

a) Oxidická keramika na bázi oxidu hlinitého

Hlavní surovinou na výrobu této keramiky je velmi čistý a jemnozrný oxid hlinitý (Al_2O_3). K němu se přidává malé množství pomocných látek jako jsou například oxid zirkonia, yttria, chromu, titanu, niklu, hořčíku, kobaltu a molybdenu a karbidy těžkotavitelných kovů jako titan a wolfram [5]. Tyto prvky mají usnadnit slinování a zabránit růstu zrna. Tuto keramiku lze dále rozdělit na čistou, poločistou a směsnou. Oxidická keramika může být vyrobena lisováním za studena (proces podobný práškové metalurgii), lisováním za vysokých teplot (HP - Hot Pressing) nebo izostatickým lisováním za vysokých teplot (HIP – Hot Isostatic Pressing) [23].

Čistá oxidová keramika

Obsahuje až 99,9% kyslíčnicku hlinitého. Vyniká vysokou tvrdostí, chemickou odolností a odolností proti opotřebení za vysokých teplot (až 1200°C). Je nízkce odolná proti mechanickým a tepelným rázům. Čistá keramika lisovaná za tepla má šedou barvu a lisovaná za studena bílou. Používají se pro řezné rychlosti až $1000\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Je vhodná pro dokončovací obrábění šedé litiny, nízkolegovaných a uhlíkových ocelí s řeznou rychlostí vyšší než $100\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Vhodným příkladem použití tohoto typu keramiky je obrábění brzdových kotoučů ze šedé litiny [4].

Polosměsná keramika

Přidáním různých přísad do čisté keramiky vznikne polosměsná keramika. Nejčastěji se přidává kysličník zirkonu ZrO_2 , s obsahem až do 20%. Může však obsahovat i jiné přísady v kombinacích $Al_2O_3 + ZrO_2$, $Al_2O_3 + ZrO_2 + CoO$. Polosměsná řezná keramika má oproti čisté keramice zvýšenou pevnost. Přísada ZrO_2 snižuje lomovou náchylnost a zvyšuje houževnatost. Tyto břitové destičky vyráběné za tepla mají černou barvu. Používají se na obrábění šedé a temperované litiny, zušlechťených konstrukčních, ale i rychlořezných ocelí [4].

Směsná keramika

Obsahuje spolu s Al_2O_3 ještě přísadu 20 – 40% karbidu titanu TiC a nitridu titanu TiN. Přísada TiC zvyšuje odolnost proti tepelným rázům a TiN zvyšuje pevnostní vlastnosti a také zároveň odolnost proti tepelným rázům. Směsná břitová destička vyráběná za tepla má černou barvu. S touto keramikou je doporučeno obrábět kalené oceli, jak přerušovaným tak plynulým řezem i s použitím chladící kapaliny. Dále frézování šedé litiny, soustružení načisto a obrábění žárovevných slitin. Typickým příkladem použití směsné keramiky je soustružení kalených hřídelů [2].

b) Neoxidická (nitridová) řezná keramika na bázi nitridu křemíku

Neoxidická (nitridová) keramika na bázi nitridu křemíku Si_3N_4 má dvě modifikace α a β . α Si_3N_4 je tvrdší než modifikace β Si_3N_4 . V porovnání s keramikou oxidickou má nitridová keramika vyšší tepelnou vodivost, pevnost v ohybu, houževnatost a odolnost proti tepelným rázům. Tento druh keramiky má však proti oxidické nižší odolnost proti opotřebení a nižší chemickou stabilitu. Doporučuje se pro obrábění šedé a tvárné litiny za sucha i s chladící kapalinou, dále pro kalené oceli, niklové, titanové a žáruvzdorné slitiny. Neoxidická keramika na bázi Si_3N_4 má vysokou tvrdost za tepla i při teplotách, které slinutý karbid už nesnáší [23]. Nitridovou řeznou keramikou lze taky rozdělit podle složení na [23]:

- nitrid křemíku s přísadou nitridu titanu (TiN)
- nitrid křemíku s různými dalšími přísadami jako například Al_2O_3 , Y_2O_3 , MgO orientovanými na β - Si_3N_4 , tzv. „sialon“
- nitrid křemíku zpevněný vlákny SiC, tzv. „whiskery“

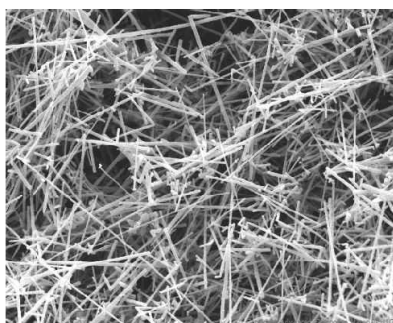
c) Vyztužená keramika

Všechny typy řezných keramik mohou být vyztuženy monokrystalickými tenkými vlákny submikrometrového průměru - whiskery (viz. obr. 2.7) [23]. Vyztužené (zpevněné, kompozitní) keramiky jsou velmi perspektivní materiály pro řezné nástroje, které značně zvyšují řezné vlastnosti. Vyrábějí se tak, že do základní matrice (Al_2O_3 , $Al_2O_3 + TiC$, Si_3N_4 , atd.) se přidávají vlákna SiC nebo Si_3N_4 (whiskery). Pevnost whiskerů se blíží teoretické pevnosti materialu a proto výrazně zpevňují i materiál. Whiskery mají délku asi 10 – 80 μm a průměr 0,5 - 1 μm [5].

Vlastnosti keramik vyztužených whiskery jsou ovlivněny především průměrem - d, délkou vlákna - l a štíhlostním poměrem l/d a množstvím whiskerů v matici materiálu. Poměr l/d má určitou kritickou mez, která je

ovlivněna především délkou l , pod tuto hodnotu vlákna nedosahují potřebné pevnosti, a proto nemohou zpevnit matici. Whiskery zlepšují mechanické vlastnosti keramiky proto, že nedovolují šíření trhlin [5].

Tento druh keramiky je vysoce odolný proti lomu, houževnatý a spolehlivý. Používá se pro soustružení žárovevných slitin a pro soustružení přerušovaným řezem. Je vhodný pro obrábění stelitu. Stelit je tvrdý materiál, který se nanáší na obrobky za účelem dosažení odolnosti proti opotřebení. Tvrdost obrobku s vrstvou stelitu činí asi 47 HRC. Vyztužené keramické břitové destičky se pro tento typ obrábění hodí nejlépe.



Obr. 2.7 whisker [23]

V následující tabulce jsou zobrazeny vybrané typy keramických břitových destiček vhodných pro obrábění tvrdých materiálů (viz. tab. 2.2).

Tab. 2.2 Vybrané druhy keramických destiček vhodných pro obrábění tvrdých materiálů [35], [54]

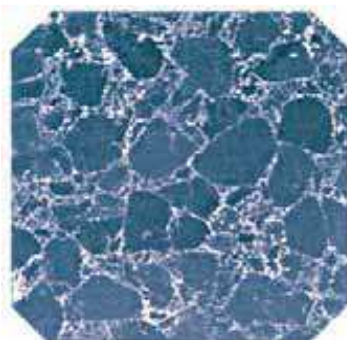
Typ	Označení	Operace - Vlastnosti	Doporučené použití
	DNGA	Směsná keramika na bázi oxidu hlinitého – dobré tepelné vlastnosti a dobrá odolnost proti opotřebení	Lehké nepřerušované řezy při dokončování
	SNGA	Směsná oxidová keramika – vyniká tvrdostí, houževnatostí a odolností proti opotřebení i za vysokých teplot	Obrábění šedé, tvrzené, temperované litiny, konstrukční, zušlechtné i rychlořezné oceli
	SNGN	Keramika na bázi Al_2O_3 , vyztužená vlákny karbidu křemíku – vysoká houževnatost a tvrdost	Obrábění tvrzené litiny a kalené oceli (do 64 HRC), střední a jemné frézování
	TNGN	Keramika na bázi oxidu hlinitého, vyztužená vlákny karbidu křemíku	Soustružení tvrzených součástí za nepříznivých pracovních podmínek

2.1.3 Polykrystalický kubický nitrid boru (PKB nebo CBN)

Tento druh řezného materiálu se nenachází ve volné přírodě [6]. Polykrystalický kubický nitrid boru je obzvláště tvrdý řezný materiál, jeho tvrdost se blíží tvrdosti diamantu a pohybuje se v rozmezí 4000 – 5500HV, což je mnohem více než má jakýkoliv kovový karbid [6]. Výroba tohoto řezného materiálu probíhá při vysokých tlacích a teplotách, při kterých se spojují kubické krystaly bóru s keramickým nebo kovovým pojivem. Krystal tohoto materiálu je hodně podobný krystalu syntetického diamantu [4]. Na následujícím obrázku je zobrazena mikrostruktura polykrystalického kubického nitridu boru (viz. obr. 2.8).

Kubický nitrid bóru se používá jako řezný materiál v těchto formách [1]

- jako vyměnitelná břitová destička
- jako řezné těleso naletované na podkladovém material ze slinutého karbidu
- jako na podkladu ze slinutého karbidu napečený povlak



Obr. 2.8 Mikrostruktura kubického nitridu bóru [1]

Vlastnosti

Kubický nitrid boru je houževnatý materiál velmi odolný proti abrazivnímu opotřebení, má vysokou tvrdost za tepla i při vysokých teplotách (až do 2000°C) a při obrábění vykazuje dobrou chemickou stabilitu [4]. Je vysoce odolný proti brusnému opotřebení. Přestože je křehčí než slinutý karbid a méně teplotně a chemicky stálý než keramika, má vyšší rázovou pevnost a je více odolný proti vylamování než keramické nástroje.

Vlastnosti tohoto řezného materiálu se dají upravit obsahem a typem pojiva nebo velikostí krystalů. Nízký obsah CBN s keramickým pojivem je chemicky stabilnější a je více odolný proti opotřebení. Nástroj s nízkým obsahem kubického nitridu boru je křehčí, ale je lepší pro obrábění tvrdých slitin železa [24]. Nástroje s vyšším obsahem kubického nitridu bóru jsou více houževnaté. Používají se tam, kde při hrubování dochází k velkému mechanickému namáhání břitu a vysokým tepelným zatížením. S tímto typem nástroje se obrábí především tvrdé litiny a tepelně odolné slitiny [1]. Vlastnosti a použití kubického nitridu boru s nízkým a vysokým obsahem CBN jsou uvedeny v následující tabulce (viz. tab. 2.3).

Doporučené použití

Kubický nitrid by měl být používán především pro obrábění materiálů s tvrdostí nad 48 HRC. Jsou-li obrobky příliš měkké dochází k mimořádně velkému opotřebení nástroje [1]. CBN destičky jsou vhodné i pro vysokorychlostní hrubování s prerušovaným řezem. Volbou správného typu CBN destičky a parametrů obráběcího procesu se předejde mikroskopickému vylamování nástroje a může se obrábět i prerušovaným řezem při velkých řezných rychlostech. Tyto vlastnosti kubického nitridu boru umožňují obrábění (hrubování) kalené oceli a perlitické šedé litiny [24].

Vyšší teploty v zóně řezu změkčují obráběný materiál obrobku a pomáhají oddělení třísky. S použitím CBN nástroje se získá vynikající jakost povrchu (lepší než $R_a = 1,6$). Kubický nitrid boru je oblíbený nástrojový materiál pro soustružení tvrdých materiálů (nad 45 až 65HRC) jako jsou kalené, vysocelegované, nástrojové a rychlořzné oceli HSS, tvrdá litina a také je vhodný pro vysokorychlostní frézování [24]. Při použití kubického nitridu bóru na obrábění měkkých materiálů, je nutné počítat s velkým opotřebením [1].

Výhody





- velmi odolný proti abrazivnímu a brusnému opotřebení
- má vysokou tvrdost zatepla i při vysokých teplotách (až do 2000°C)
- více odolný proti vylamování než keramické nástroje

Tab. 2.3 Vlastnosti polykrystalického kubického nitridu bóru [1]

	Nízký obsah CBN	Vysoký obsah CBN
Vlastnosti	Obsah CBN < 60% Nízká pevnost v tlaku Nízká tepelná vodivost	Obsah CBN 80 – 95% Vysoká lomová houževnatost Vysoká tepelná vodivost
Použití	Obrábění načisto: - kalená ocel - litiny - tvrdé povlaky (na bázi Ni, Co a Fe)	Hrubování: - kalená ocel - tvrzená litina - tvrdé povlaky (na bázi Ni, Co a Fe) Obrábění načisto: - tvrzená litina - perlitická šedá litina

V následující tabulce jsou zobrazeny vybrané typy destiček z kubického nitridu boru vhodných pro obrábění tvrdých materiálů (viz. tab. 2.4).

Tab. 2.4 Vybrané typy destiček osazených polykrystalickým kubickým nitridem bóru vhodné pro obrábění tvrdých materiálů [35], [54]

Typ	Označení	Operace - Vlastnosti	Doporučené použití
	CNMA	Vysokorychlostní obrábění a dokončování – jemnozrný, perfektní odolnost proti opotřebení	Dokončování šedé litiny (GG25) a super slitiny, slinuté práškové slitiny
	TNMA	Pro nepřetržité a mírně přerušované obrábění, vynikající odolnost proti opotřebení, pevnost v tlaku a houževnatost, kvalita povrchu Ra = 1,6 – 3,2	Obrábění kalených ocelí o tvrdosti 54 - 64 HRC, šedá litina, tvrzená ocel (45 – 62 HRC)
	CCMW	Polykrystalický s vysokým obsahem CBN, jemnozrný – vynikající odolnost proti opotřebení	Obrábění kalených ocelí s tvrdostí přes 50 HRC, dokončování šedé litiny (GG25), tvrzené oceli
	DCMW	Polykrystalický vyztužený malým množstvím CBN, jemnozrný – perfektní odolnost proti opotřebení a houževnatost	Obrábění tvrdých litin a tvrzených ocelí s tvrdostí nad 45 HRC

2.1.4 Polykrystalický diamant (PKD)

Polykrystalický diamant je nejtvrdější nástrojový materiál, ale ovšem křehký. Jeho vysoká tvrdost umožňuje odolávat velkým brusným otěrům. Životnost tohoto rezného materiálu je až 100-krát větší než u slinutého karbidu [1]. Polykrystalický diamant se vyrábí tak, že pomocí vysoké teploty a tlaku se spojí krystaly diamantu a podkladu ze slinutého karbidu (tzv. sintrování) [26]. PKD se dá napájet přímo na těla nástrojů a nebo na vyměnitelnou břitovou destičku ze slinutého karbidu [26].

Tento nástrojový materiál je vhodný k obrábění neželezných kovů, zejména hliníkových slitin (především s vysokým obsahem křemíku), mědi, hořčíku, slinutých karbidů, keramiky, drahých kovů, plastických hmot s abrazivními plniteli, grafitu a plasty s obsahem skla. S nástrojem z polykrystalického diamantu lze docílit při obrábění hliníkových slitin kvality povrchu Rz = 0,6 [26].

Pro obrábění plastů nebo grafitů s obsahem skla nemá PKD na trhu konkurenci, neboť tyto materiály jsou velmi abrazivní a jediný polykrystalický diamant je dokáže bez problému obrábět [26].

Zjednodušeně se dá tvrdit, že tam, kde klasické nástrojové materiály končí nastupuje polykrystalický diamant [26]. Na následujícím obrázku jsou zobrazeny vyměnitelné typy břitových destiček z polykrystalického diamantu (viz. obr. 2.9).

Přednosti PKD nástrojů [26]

- vysoká životnost
- odolnost proti abrazivnímu opotřebení
- rychlost a výkon
- přesnost
- výborná kvalita povrchu

Použití



- neželezné kovy
- grafit
- plasty s obsahem skla



Obr. 2.9 Břitové destičky z polykrystalického diamantu od společnosti LPW [26]

V následující tabulce jsou zobrazeny vybrané typy destiček z polykrystalického diamantu vhodné pro obrábění tvrdých materiálů (viz. tab. 2.5).

Tab. 2.5 Vybrané typy destiček osazených polykrystalickým diamantem vhodné pro obrábění tvrdých materiálů [35], [54]

Typ	Označení	Operace - Vlastnosti	Doporučené použití
	TCMW	Dokončování - Polykrystalický diamant s podkladem ze slinutého karbidu, dobrá odolnost proti opotřebení a houževnatost	Žárovzdorné slitiny, neželezné materiály a neželezné kovy, slinuté karbidy
	VCMW	Polykrystalický diamant – dobrá trvanlivost břitu nástroje a dobrá kvalitu povrchu	Dokončování a polodokončování neželezných a nekovových materiálů

2.1.5 Povlakované slinuté karbidy[4]

Slinuté karbidy se poprvé objevily už v roce 1926. Vyrábí se metodou práškové metalurgie z různých karbidů a kovového pojiva. Nejčastěji se používá karbid wolframu WC, karbid titanu TiC, karbid tantalu TaC a karbid niobu NbC. Jako kovové pojivo se nejvíce používá kobalt [4].

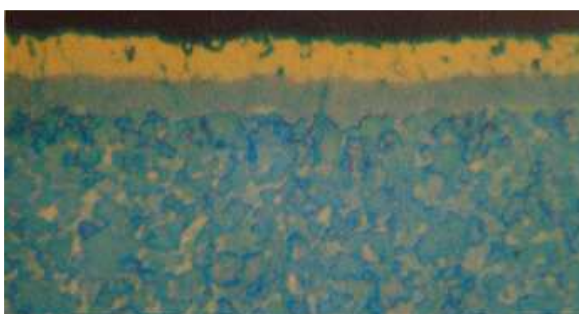
Povlakováním slinutých karbidů se významně zlepší vlastnosti vyměnitelné břitové destičky. Povlakované břitové destičky ze slinutého karbidu se poprvé na trhu objevily koncem 60. let, kdy byla jako povlak použita povrchová vrstva karbidu titanu TiC. Postupem času byly vyvinuty další povlaky jako například povlaky typu nitridu titanu TiN, karbonitridu titanu TiCN, oxidu hlinitého Al_2O_3 . V dnešní době jsou slinuté karbidy běžně povlakovány kubickým nitridem bóru nebo diamantem. Vzhledem k rostoucím požadavkům na řezné materiály je každoročně zdokonalováno a vyvíjeno několik druhů povlakovaných slinutých karbidů. Povlaky se navzájem liší typem, tloušťkou, kombinací vrstev, metodou povlakování atd. Povlaky mohou být jednovrstvé nebo vícevrstvé s jedním nebo více prvky [5].

Jednovrstvé povlaky (viz. obr. 2.10) jsou především tvořeny TiC, TiCN, TiN. Tloušťka vrstvy může dosáhnout až $13\mu m$.



Obr. 2.10 Jednovrstvý povlak [2]

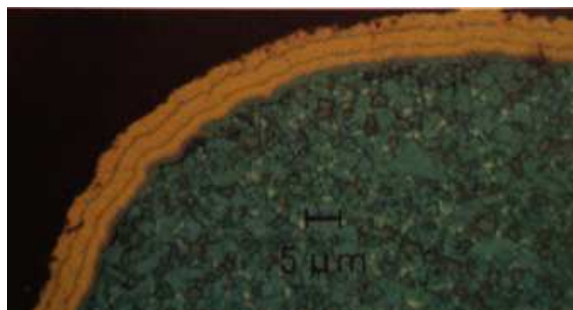
Vícevrstvé povlaky jsou tvořeny dvěma (viz. obr. 2.11) až třemi, případně i více vrstvami.



Obr. 2.11 Dvouvrstvý povlak [2]

Speciální vícevrstvé povlaky mají velmi často více než deset vrstev a mezivrstev (viz. obr. 2.12). Jako první jsou na slinutý karbid nanášeny vrstvy z prvků s dobrou přilnavostí k základnímu podkladovému materiálu, které ale mají menší odolnost proti opotřebení. Nakonec jsou nanášeny vrstvy, které jsou dobře přilnavé k předchozí nanášené vrstvě a zároveň mají vysokou odolnost

proti opotřebení a vysokou tvrdost. Jednotlivé typy vrstev jsou na podkladový slinitý karbid nanášeny v tomto pořadí: TiC – Al₂O₃, TiC – TiN, TiC – TiCN – TiN a jako poslední vrstva TiC – Al₂O₃ – TiN.







Obr. 2.12 Vícevrstvý povlak [2]

Použití

Povlakované slinité karbidy se používají pro soustružení, frézování a vrtání většiny strojírenských materiálů, včetně tvrdých materiálů.

V následující tabulce jsou zobrazeny vybrané typy povlakovaných destiček ze slinitého karbidu vhodných pro obrábění tvrdých materiálů (viz. tab. 2.6).

Tab. 2.6 Vybrané typy destiček ze slinitého karbidu vhodné pro obrábění tvrdých materiálů [35], [54]

Typ	Označení	Operace - Vlastnosti	Doporučené použití
	DNMG	Vícevrstvý povlak CVD – vysoká odolnost proti opotřebení	Dokončování až hrubování se spojitým až lehce přerušovaným řezem v tvrzených materiálech
	SNMG	Vícevrstvý povlak CVD – velká odolnost proti opotřebení	Hrubování až polodokončování tvrzených ocelí spojitými řezy při malých řezných rychlostech
	DCMX	Vícevrstvý povlak CVD – dobrá houževnatost a tvrdost, vysoká odolnost proti opotřebení	Obrábění tvrzených ocelí a litin, obrábění zamokra i zasucha
	RCMT	Vícevrstvý povlak CVD – vysoká odolnost proti opotřebení	Hrubování až polodokončování tvrzených ocelí a litin spojitými řezy při malých řezných rychlostech

2.2 Monolitické nástroje

Tato část je zaměřena především na frézy. Použití povlakovaných fréz s podkladem ze slinutého karbidu je stále populárnější v oblasti obrábění tvrdých materiálů [27]. Tyto speciální nástroje jsou konstruovány pouze pro obrábění tvrdých materiálů, a proto je nutné zaručit pro tento druh obrábění vysokou spolehlivost [26]. Nástroje musí splňovat následující podmínky [27]:

- speciálně vybraný typ jemnozrnného slinutého karbidu
- výběr vhodných povlaků odolných proti otěru a vysokým teplotám
- správné řezné podmínky
- řezná geometrie nejvyšší kvality
- tuhé a přesné upínací přípravky

Společnost Franken vyvinula dvě nové řady dokončovacích fréz pro tvrdé materiály. Řezným materiálem je speciální jemnozrnný slinutý karbid [27].

a) Válcové frézy Hard – Cut (pro materiály o tvrdosti maximálně 56 HRC (viz. obr. 2.13)

- frézy s rovným čelem
- frézy s kulovým čelem
- frézy toroidní



Obr. 2.13 Válcové frézy Hard - Cut [27]

b) Válcové frézy S – Hard – Cut (viz. obr. 2.14)

- Tvrdokovové frézy s rovným čelem (pro materiály o tvrdosti 52 – 66 HRC)
- Tvrdokovové frézy s kulovým čelem (pro materiály o tvrdosti 40 – 63 HRC)



Obr. 2.13 Válcové frézy S-Hard-Cut [27]

Na následujícím obrázku jsou zobrazeny frézy a frézovací hlavy s vyměnitelnými břitovými destičkami (viz. obr. 2. 15).



Obr. 2.15 Frézy a frézovací hlavy od společnosti Sandvik Coromant [32]

3 ŘEZNÉ PODMÍNKY PRO OBRÁBĚNÍ TVRDÝCH MATERIÁLŮ

Volba optimálních řezných podmínek je nezbytnou součástí každého obráběcího procesu. Volbou řezných podmínek se při obrábění rozumí volba řezné rychlosti, posuvu a šířky záběru ostří [28]. Při vypracování výrobního postupu se snažíme zvolit optimální řezné podmínky pro obrábění tvrdých materiálů a pro požadované výsledky obrábění. Optimální řezné podmínky jsou takové podmínky, při kterých se dosáhne nejnižších výrobních nákladů při nejnižším možném výrobním čase [28]. Maximální možné hodnoty řezných podmínek není v praxi možné zcela aplikovat, neboť volba řezných podmínek je závislá na požadovaných vlastnostech obrobku (přesnost rozměrů a tvaru, drsnost povrchu, ovlivnění povrchové vrstvy obrobené plochy atd.), ale zejména také na vlastnostech:

- obráběcího stroje (rozsah otáček a posuvů, výkon elektromotoru, tuhost a pevnost stroje)
- nástroje (materiál, geometrie břitu, trvanlivost, pevnost a tuhost nástroje)
- obráběné součásti (materiál, obrobitelnost)
- prostředí (chlazení apod.)

Tato kapitola je zaměřena na hodnoty posuvů, šířky záběru ostří, ale především na řeznou rychlost při soustružení a frézování tvrdých materiálů pro jednotlivé druhy vyměnitelných břitových destiček.

3.1 Řezné podmínky pro soustružení

Řezné podmínky při soustružení volíme obecně tak, že z celkového přídatku na obrábění nejprve stanovíme šířku záběru ostří (přídavek odebíráme pokud možno na jednu třísku) poté stanovíme hodnotu posuvu a řeznou rychlost [56].

Šířka záběru ostří (a_p)

Šířku 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 tvrdých materiálů se zpravidla volí malé hodnoty šířky záběru ostří [56].

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 [56]. Pro rychlost posuvu v_f platí následující vztah [1]:

$$v_f = f \cdot n \quad [mm / min] \quad (3.1)$$

f ...posuv [mm/ot.]

n ...počet otáček [ot./min]

Řezná rychlost (v_c)

Řezné rychlosti pro soustružení jsou závislé zejména na druhu obráběného materiálu, na způsobu obrábění a na druhu nástrojového materiálu. Řezná rychlost pro konvenční metody obrábění se pohybuje v rozsahu $v_c = 10$ až 600 m/min . Pro obrábění tvrdých materiálů zpravidla platí nižší řezné rychlosti [56].

Řezná rychlost pro soustružení válcových ploch [8]:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad [\text{m/min}] \quad (3.2)$$

D ... výchozí obráběný průměr [mm]
 n ... frekvence otáček obrobku [ot./min]

Není-li známa velikost frekvence otáček (n), nebo řezná rychlost (v_c), zjištěné z normativů nebo podle výrobce nástroje, platí:

Optimální řezná rychlost [8]:

$$v_{Copt} = \frac{C_v}{a_p^{x_v} \cdot f^{y_v}} \quad [\text{m/min}] \quad (3.3)$$

C_v ... konstanta pro daný režim obrábění [-]

a_p ... šířka záběru ostří [mm]

f ... posuv [mm/ot.]

x_v, y_v ... exponenty pro daný režim obrábění [-]

3.2 Řezné podmínky pro frézování**Šířka záběru ostří (a_p)**

Šířka záběru ostří při frézování se pohybuje v rozsahu $0,5$ až 20 mm i více [56].

Posuv na zub (f_z)

Posuv na zub by neměl klesnout pod $0,05 \text{ mm}$, neboť pak se začíná projevovat vliv poloměru ostří břítu nástroje, to platí především pro nástroje s břitý z povlakovaných slinutých karbidů. Posuv na zub se obvykle pohybuje v rozsahu $0,05$ až $0,4 \text{ mm}$ [56]. Pro rychlost posuvu v_f platí následující vztah [1]:

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n \quad [\text{mm/min}] \quad (3.4)$$

f_z ... posuv na zub [mm/zub]

z ... počet zubů

n ... počet otáček [ot./min]

Posuv na zub [57]:

$$f_z = \frac{f_{ot}}{z} = \frac{f_{min}}{n \cdot z} \quad [mm / zub] \quad (3.5)$$

f_{ot} ... posuv na otáčku [mm/ot.]

f_{min} ... minutový posuv [mm/min]

Řezná rychlost (v_c)

Řezné rychlosti pro frézování se obvykle pohybují v rozsahu $v_c = 20$ až 570 m/min. Jsou závislé stejně tak jako u soustružení především na druhu obráběného materiálu, na materiálu nástroje a na způsobu frézování [56].

Řezná rychlost pro frézování [1]:

$$v_{C_f} = \frac{\pi \cdot D_s \cdot n_s}{1000} \quad [m / min] \quad (3.6)$$

D_s ... průměr frézy [mm]

n_s ... frekvence otáček frézy [ot./min]

3.3 Řezné podmínky a jejich vliv na životnost nástroje

Největší vliv na životnost nástroje má řezná rychlost, dále posuv a šířka záběru ostří. Dalšími parametry, které ovlivňují životnost nástroje jsou ještě materiál obrobku a nástroje, geometrické podmínky, jako jsou úhly čela, hřbetu [1].

S rostoucí řeznou rychlostí klesá životnost nástroje. Se zvyšujícím se posuvem a hloubkou řezu klesá životnost nástroje. Životnost nástroje lze vypočítat pomocí Taylorova vztahu [1]:

$$T = v_c^k \cdot C_v \quad [min] \quad (3.7)$$

C_v ... životnost T pro $v_c = 1$ m/min [min]

k ... strmost přímky ($k = \lg \alpha_v$)

$$T = \frac{v_c^k}{C_T^k} \quad [min] \quad (3.8)$$

C_T ... řezná rychlost v_c pro $T = 1$ min [min]

$$v_c = T^{\frac{1}{k}} \cdot C_T \quad [m / min] \quad (3.9)$$

3.4 Řezné podmínky pro vyměnitelné břitové destičky

Tato kapitola obsahuje řezné podmínky pro vyměnitelné břitové destičky vhodné k obrábění tvrdých materiálů. Jsou zde uvedeny řezné podmínky pro jednotlivé typy vyměnitelných břitových destiček pro vnější soustružení použitých ve druhé kapitole.

3.4.1 Cermety

Moderní vysoce výkonné řezné materiály jsou charakterizovány dostatečnou houževnatostí a vysokou odolností proti opotřebení. Většinu těchto náročných požadavků splňují cermety. V historii se cermety používaly na obrábění v šířkách záběru ostří asi do 1,5mm, ale v dnešní době cermety umožňují obrábět ocel v hloubkách řezu až 3mm [21]. Cermety se používají při vysokých řezných rychlostech, malých hodnotách posuvů a rovnoměrných hloubkách řezu [1].

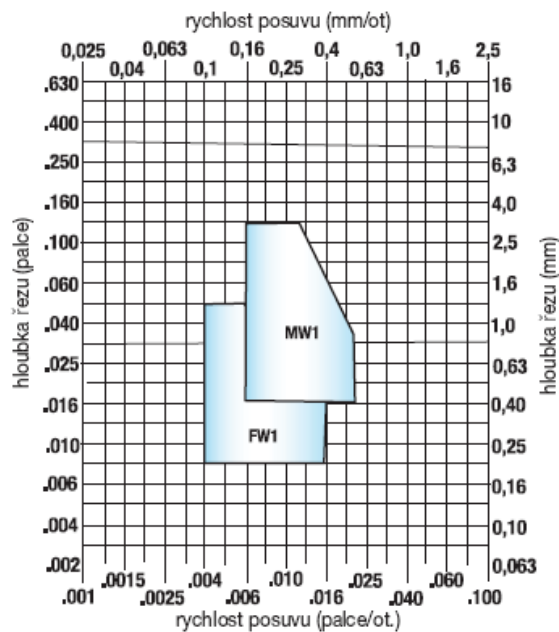
V následující tabulce jsou uvedeny doporučené řezné podmínky pro vybrané typy vyměnitelných cermetových břitových destiček vhodných pro obrábění tvrdých materiálů. V závorce je vždy uvedeno přesné označení břitové destičky, pro kterou byly vybrány konkrétní hodnoty řezných podmínek.

Tab. 3.1 Doporučené řezné podmínky pro vybrané cermetové břitové destičky [54]

Druh destičky (Přesné označení)	Obráběný materiál	Doporučené řezné podmínky					
		V_c [m/min]		f [mm/ot.]		a_p [mm]	
		min.	max.	min.	max.	min.	max.
CNMG (CNMG090304- QM)	Perlitická temperovaná litina	95	145	0,05	0,25	0,30	1,50
WNMG (WNMG060404- WF)	Šedá litina	205	280	0,07	0,30	0,25	1,50
DCMT (DCMT11T308- PM)	Tvárná martenzitická litina	85	115	0,08	0,30	0,10	1,50
TCMT (TCMT090202- PF)	Feritická temperovaná litina	135	200	0,03	0,13	0,06	1,70

Geometrie Wiper

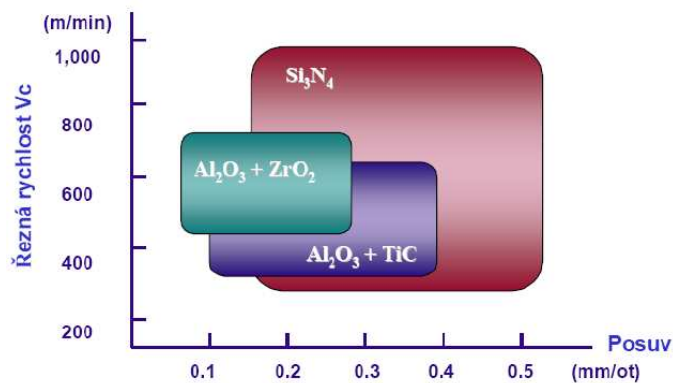
Na následujícím obrázku jsou uvedeny doporučené hodnoty posuvů pro cermetové břitové destičky Kennametal s geometrií Wiper (viz. obr. 3.1). Geometrie Wiper je ideální pro středně hrubé obrábění při velkých posuvech [20]. Geometrie destičky je složena z několika různých poloměrů, na rozdíl od běžných destiček s jedním poloměrem zaoblení. Tento typ destičky způsobí, že při stejném posuvu je kvalita povrchu dvakrát lepší než při použití tradičního typu destičky nebo také může být přibližně dvakrát větší posuv při zachování stejné kvality povrchu [58].



Obr. 3.1 Negativní břitové destičky s geometrií Wiper [20]

3.4.2 Řezná keramika

Řezná keramika může být použita při vysokých řezných rychlostech až $300 - 1600 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ [4]. Použití keramiky při správných podmínkách obrábění umožní dosáhnout mimořádně velkého úběru materiálu. Vysoké řezné podmínky způsobí jiskření nebo žhnutí destičky do červeného žáru. Chlazení keramických destiček se používá jen vyjíměčně [25]. Na následujícím obrázku je zobrazen rozsah použití jednotlivých druhů řezné keramiky (Si_3N_4 – nitridová keramika, $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$ – polosměsná, $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ – směsná keramika) (viz. obr. 3.2).



Obr. 3.2 Rozsah použití řezné keramiky [23]

V následující tabulce jsou uvedeny doporučené řezné podmínky pro vybrané typy vyměnitelných keramických břitových destiček vhodných pro obrábění tvrdých materiálů. V závorce je uvedeno přesné označení břitové destičky, pro kterou byly vybrány konkrétní hodnoty řezných podmínek.

Tab. 3.2 Doporučené řezné podmínky pro vybrané vyměnitelné břitové destičky z řezné keramiky [54]

Druh destičky (Přesné označení)	Obráběný materiál	Doporučené řezné podmínky					
		V_c [m/min]		f [mm/ot.]		a_p [mm]	
		min.	max.	min.	max.	min.	max.
DNGA (DNG8150408 T01020)	Kalená a popouštěná ocel (65 HRC)	50	105	0,05	0,20	0,07	0,4
SNGA (SNGA120408 T01020)	Kalená a popouštěná ocel (60 HRC)	60	120	0,10	0,50	0,07	0,60
SNGN (SNGN120416 T01020)	Kalená a popouštěná ocel (55 HRC)	95	140	0,05	0,30	0,07	0,80
TNGN (TNGN160408 T01020)	Kalená a popouštěná ocel (50 HRC)	110	165	0,05	0,12	0,07	0,80

3.4.3 Polykrystalický kubický nitrid boru

Hodnoty posuvů jsou poměrně nízké. Aby se předešlo tepelným šokům a tím vzniku trhlin mělo by obrábění probíhat zasucha. Chladicí kapalina by v případě použití měla být přivedena přímo na břit [1]. Doporučené řezné podmínky pro soustružení tvrdých materiálů kubickým nitridem boru se pohybují v tomto rozmezí [59]:

- Řezná rychlost: $v_c = 80 - 350$ m/min
- Posuv: $f = 0,05 - 0,4$ mm
- Šířka záběru ostří: $a_p = 0,05 - 0,6$ mm

V následující tabulce jsou zobrazeny doporučené řezné podmínky pro vybrané typy vyměnitelných břitových destiček z polykrystalického kubického nitridu boru vhodných pro obrábění tvrdých materiálů. V závorce je uvedeno přesné označení břitové destičky, pro kterou byly vybrány konkrétní hodnoty řezných podmínek.

Tab. 3.3 Doporučené řezné podmínky pro v druhé kapitole vybrané vyměnitelné břitové destičky z CBN

Druh destičky (Přesné označení)	Obráběný materiál	Doporučené řezné podmínky					
		V_c [m/min]		f [mm/ot.]		a_p [mm]	
		min.	max.	min.	max.	min.	max.
CNMA (CNMA120404 S01020E)	Kalená a popouštěná ocel (65 HRC)	125	160	0,08	0,20	0,10	0,4
TNMA (TNMA160404 S01020E)	Kalená a popouštěná ocel (60 HRC)	145	185	0,08	0,15	0,06	0,4
CCMW (CCMW060204 FP)	Kalená a popouštěná ocel (55 HRC)	155	210	0	0,26	0,08	0,3
DCMW (DCMW11T304 S01020E)	Kalená a popouštěná ocel (50 HRC)	225	350	0,05	0,12	0,05	0,6

3.4.4 Polykrystalický diamant

Polykrystalický diamant je velmi křehký materiál a proto vyžaduje při obrábění stabilní podmínky, tuhé nástroje a stroje a vysoké řezné rychlosti. Chladicí kapalinu lze obvykle použít [1].

V následující tabulce jsou zobrazeny doporučené řezné podmínky pro vybrané typy vyměnitelných břitových destiček z polykrystalického diamantu vhodných pro obrábění tvrdých materiálů. V závorce je uvedeno přesné označení břitové destičky, pro kterou byly vybrány konkrétní hodnoty řezných podmínek.

Tab. 3.4 Doporučené řezné podmínky pro vybrané vyměnitelné břitové destičky z polykrystalického diamantu [54]

Druh destičky (Přesné označení)	Obráběný materiál	Doporučené řezné podmínky					
		V_c [m/min]		f [mm/ot.]		a_p [mm]	
		min.	max.	min.	max.	min.	max.
TCMW (TCMW11020 8FP)	Slitiny mědi	65	630	0,05	0,12	0,10	2,70
VCMW (VCMW16040 4FP)	Slitiny mědi	38	375	0,05	0,27	0,10	0,3

3.4.5 Povlakované slinuté karbidy

Pro povlakované slinuté karbidy vhodné k obrábění tvrdých materiálů se doporučují nízké nebo střední hodnoty řezných rychlostí. Malé až střední posuvy a šířky záběru ostří [1]. Slinuté karbidy mají široké zastoupení v průmyslu, a proto i řezné podmínky pro jednotlivé typy vyměnitelných břitových destiček mají široký rozsah.

V následující tabulce jsou zobrazeny doporučené řezné podmínky pro vybrané typy vyměnitelných břitových destiček z polykrystalického diamantu vhodných pro obrábění tvrdých materiálů. V závorce je uvedeno přesné označení břitové destičky, pro kterou byly vybrány konkrétní hodnoty řezných podmínek.

Tab. 3.5 Doporučené řezné podmínky pro vybrané povlakované vyměnitelné břitové destičky ze slinutých karbidů [54]

Druh destičky (Přesné označení)	Obráběný materiál	Doporučené řezné podmínky					
		V_c [m/min]		f [mm/ot.]		a_p [mm]	
		min.	max.	min.	max.	min.	max.
DNMG (DNMG15040 4-PF)	Kalená a popouštěná ocel (45 HRC)	26	65	0,07	0,30	0,25	1,5
SNMG (SNMG150608 -PR)	Kalená a popouštěná ocel (45 HRC)	29	70	0,20	0,50	0,10	1,5
DCMX (DCMX070204 -WF)	Kalená a popouštěná ocel (43 HRC)	15	45	0,05	0,25	0,30	2,0
RCMT (RCMT1204M O)	Kalená a popouštěná ocel (43 HRC)	17	50	0,08	0,38	0,5	2,0

4 PARAMETRY OBROBENÉ PLOCHY PŘI OBRÁBĚNÍ TVRDÝCH MATERIÁLŮ

Jakost obrobků z hlediska technologie výroby je možné definovat pomocí mnoha parametrů, kterými jsou například přesnost rozměrů, přesnost tvaru atd. Jedním z nejdůležitějších parametrů je struktura (drsnost) povrchu. Tato kapitola je zaměřena především na drsnost povrchu.

4.1 Přesnost tvaru

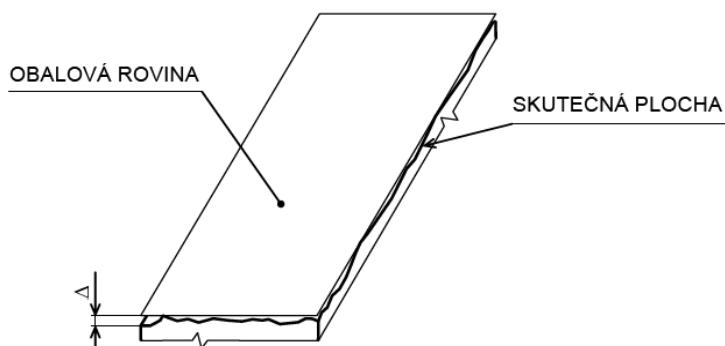
Každý stroj je sestaven z mnoha součástí spojených různým způsobem. Rozměry součástí je potřeba volit tak, aby splňovaly kladené požadavky a vyhovovaly předepsané funkci. K tomuto účelu je potřeba dodržet tyto vzájemně související faktory:

- rozměry součásti
- geometrický tvar a vzájemná poloha ploch
- drsnost povrchu součásti

Skutečné plochy vyrobené součásti se od ideálních (teoretických) ploch liší svými rozměry, vzájemnou polohou a tvarem. Jednodušeji řečeno, nejsou vyrobeny absolutně přesně. Neboť výrobu součástí lze zajistit jen s určitou přesností, je dobré předepsat dovolenou nepřesnost výše uvedených faktorů formou úchylek drsnosti povrchu a úchylek tvaru a polohy. Dodržovat předepsané úchyly je zejména nutné u funkčních ploch, tj. těch, které se stýkají s jinými plochami a dodržují správnou funkci součásti.

Obalové plochy a křivky

Mezní úchyly jsou definovány pomocí tzv. obalových ploch, případně obalových čar. Obalová plocha (čára) má tvar ideální (teoretické – předepsané výkresem) plochy, dotýká se skutečné plochy a leží vně materiálu součásti.



Obr. 4.1 Obalové a skutečné plochy [52]

Úchytky (tolerance) tvaru

Úchylka tvaru skutečné plochy od tvaru ideální plochy (Δ) vyjadřuje největší vzdálenost bodů skutečné plochy od obalové plochy ve směru normály k obalové ploše (viz. obr. 4.1).

Tolerance tvaru jsou:

- tolerance přímosti
- tolerance rovinnosti
- tolerance kruhovitosti
- tolerance válcovitosti
- tolerance tvaru profilu
- tolerance tvaru plochy

4.2 Přesnost rozměrů

Skutečný rozměr součásti musí ležet mezi dvěma stanovenými mezními rozměry. Předepisování mezních rozměrů součásti, tj. vytvoření předpokladu správného vztahu mezi dvěma součástmi, které jsou vzájemně uloženy nebo na sebe dosedají, se označuje obecným pojmem lícování.

Přesnost rozměrů souvisí s přesností polohy a tvaru. Při výrobě je potřeba zohlednit to, že obrobek bude vyroben v určité výrobní toleranci, která je předepsána výkresovou dokumentací. Přesnost rozměrů je dána řeznými podmínkami, při kterých je řezný proces realizován. Doporučuje se nastavit takové řezné podmínky, aby nedocházelo ke vzniku nežádoucího chvění a řezný proces byl plynulý.

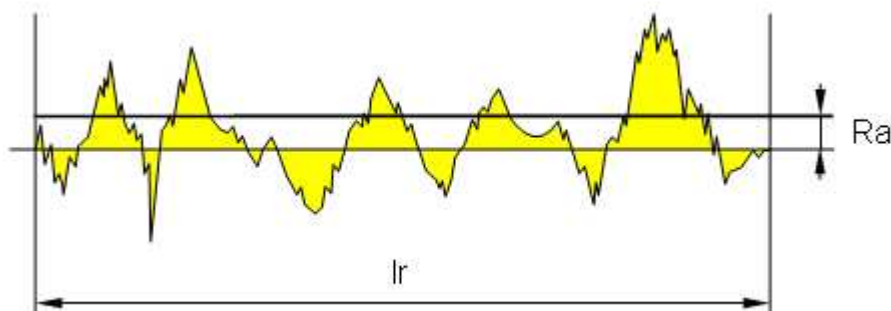
4.3 Drsnost povrchu

Tento ukazatel ovlivňuje spolehlivost a životnost součásti a odolnost proti korozi. Kvalita povrchu tedy závisí na procesu obrábění tvrdých materiálů, na řezných podmínkách, na řezném nástroji a jeho stupni opotřebení, ale také na tuhosti celé soustavy. Metodiku měření drsnosti udává norma ISO 468. Existují různé druhy charakterizující drsnost profilu součásti jako jsou Ra, Rz, Rm, Ry, Rq, Rp, Rpm. Za nejdůležitější se dají považovat Ra a Rz, na které je tato kapitola zaměřena.

Drsnost je souhrn nerovností povrchu s poměrně malou vzdáleností, které vznikají při výrobě nebo jejím vlivem. Do drsnosti se nepočítají vady povrchu, jako jsou náhodné nepravidelné nerovnosti (rysky, trhlinky, důlky atd.), které vznikají vadami nebo poškozením materiálu. Podle převládajícího směru nerovností se drsnost vyhodnocuje v příčném nebo podélném směru. Drsnost povrchu je vzhodnocována v mikrometrech, například Ra = 3,2.

4.3.1 Průměrná aritmetická úchylka profilu Ra

Ra se přednostně používá k vyhodnocování struktury povrchu. Jedná se o aritmetický průměr absolutních odchylek profilu od střední čáry v rozsahu základní délky l_r (viz. obr. 4.2).



Obr. 4.2 Průměrná aritmetická úchylka profilu Ra [50]

Reálné hodnoty parametrů Ra

Závisí především na konkrétních technologických podmínkách obráběcího procesu. Střední aritmetickou úchylku profilu vyhodnotíme dotykovým měřicím přístrojem, u kterého je nutné nastavit správnou citlivost. Pro měření Ra lze však také použít bezdotykové měřicí přístroje.

Teoretické hodnoty

Vyjadřují se s ohledem na geometrii nástroje a kinematiku procesu obrábění. Výpočtem lze zjistit hodnotu Ra podle vztahu 4.1 [2].

$$Ra = \frac{1}{l_r} \cdot \int_0^{l_r} [Z(x)] dx \quad [\mu m] \quad (4.1)$$

a) Teoretická hodnota průměrné aritmetické úchylky profilu soustružené plochy

Pro případ dokončovacího obrábění se specifikuje závislost teoretické hodnoty průměrné aritmetické úchylky profilu podle následujícího vztahu [9]. Předpokladem tohoto vztahu je, že struktura povrchu je realizována jako reprodukce obloukové části špičky nástroje, protože reálné ostří není tvořeno přímkou, ale je zaoblené.

$$Ra_t = \frac{10^3 \cdot r_\epsilon^2 \cdot (2 \cdot \alpha_A - \sin 2\alpha_A)}{f} \quad [\mu m] \quad (4.2)$$

Pro předchozí výpočet si musíme nejprve vyjádřit hodnotu úhlu α_A podle vztahu [9]:

$$\alpha_A = \arccos \left[\frac{r_\epsilon}{f} \cdot \left(\arcsin \frac{f}{2r_\epsilon} + \frac{f}{4r_\epsilon^2} \cdot \sqrt{4r_\epsilon^2 - f^2} \right) \right] \quad [rad] \quad (4.3)$$

b) Teoretická hodnota průměrné aritmetické úchyvky profilu frézovaných ploch stopkovou frézou s kulovým čelem [9]

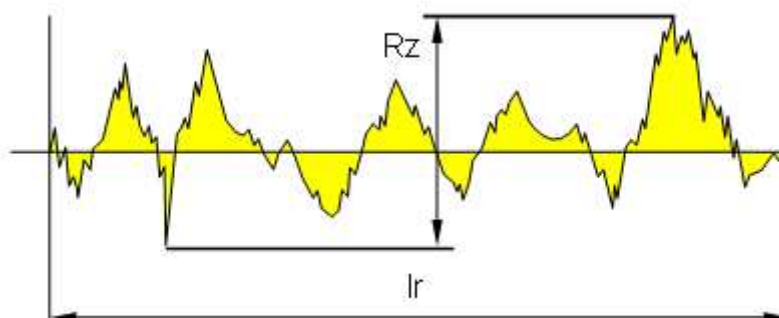
$$Ra_t = \frac{10^3 \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot (2\alpha_A - \sin 2\alpha_A)}{a_\varepsilon} \quad [\mu m] \quad (4.4)$$

Pro vyjádření Ra_t si musíme nejprve vypočítat úhel α_A podle vztahu [9]:

$$\alpha_A = \arccos \left[\frac{D}{2} \cdot \left(\arcsin \frac{a_\varepsilon}{D} + \frac{a_\varepsilon}{D^2} \cdot \sqrt{D^2 - a_\varepsilon^2} \right) \right] \quad [rad] \quad (4.5)$$

4.3.2 Největší výška profilu Rz

Je součet výšky největší špičky profilu (R_p) a hloubky největší prohlubně profilu (R_v) v rozsahu základní délky l_r . Schematické znázornění je na následujícím obrázku (viz obr. 4.3).



Obr. 4.3 Největší výška profilu Rz [50]

Reálné hodnoty parametrů Rz

Jako u parametru Ra se vztahuje na konkrétní technologické podmínky obráběcího procesu.

Teoretické hodnoty

Vyjadřují se s ohledem na geometrii nástroje a kinematiku obráběcího procesu. Základní výpočet Rz je uveden v následujícím vztahu [1].

$$Rz = R_p + R_v \quad (4.6)$$

a) Teoretická hodnota největší výšky profilu soustružené plochy

Teoretická hodnota největší výšky profilu se vyjadřuje pro poloměr špičky r_ε :

$$r_\varepsilon = 0$$

$$r_\varepsilon > 0$$

- Poloměr špičky $r_\varepsilon = 0$

Struktura povrchu je tvořena reprodukcí přímkových částí hlavního a vedlejšího ostří a Rz_t se vypočítá podle následujícího vztahu [9]:

$$Rz_t = f \cdot \frac{\sin \chi_r \cdot \sin \chi_r'}{\sin(\chi_r + \chi_r')} \cdot 10^3 \quad [\mu m] \quad (4.7)$$

- Poloměr špičky $r_\varepsilon > 0$

Struktura povrchu je tvořena reprodukcí obloukové části špičky nástroje bez záběru hlavního a vedlejšího ostří. Rz_t se tedy vypočítá podle vztahu [9]:

$$Rz_t = f(r_\varepsilon, f) = \left(r_\varepsilon - \sqrt{r_\varepsilon^2 - 0,25 \cdot f^2} \right) \cdot 10^3 \quad [\mu m] \quad (4.8)$$

b) Teoretická hodnota největší výšky profilu frézovaných ploch stopkovou frézou [9]

$$Rz_t = f\left(\frac{D}{2}, a_\varepsilon\right) = \left(\frac{D}{2} - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - 0,25 \cdot a_\varepsilon^2} \right) \cdot 10^3 \quad [\mu m] \quad (4.9)$$

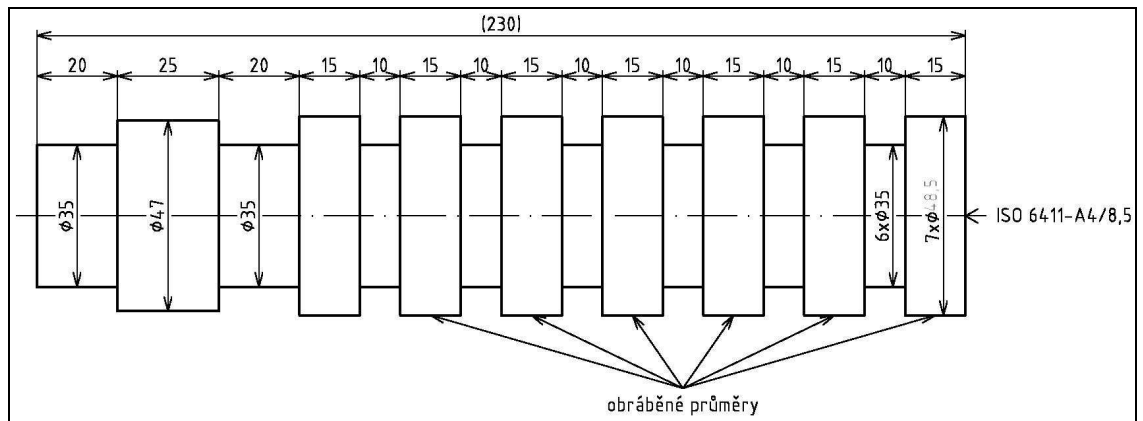
4.4 Metodika vyhodnocení parametrů obrobené plochy

Na měření a vyhodnocení parametrů kvality povrchu je zaměřena tato kapitola o metodice měření.

Zkušební obrobek

Zkušebním obrobkem je součást válcového tvaru. K experimentu byla použita kalená ložisková ocel 14 209 o tvrdosti 62 – 64 HRC. Rozměry obrobku jsou zobrazeny na následujícím obrázku (viz. obr. 4.4). Obrábění zkušební obrobku (viz. obr. 4.5) bude probíhat na klasickém univerzálním hrotovém soustruhu SV18 RA. Součást byla upnuta do univerzálního sklíčidla a podepřena koníkem. Při obráběcím procesu se s každým obráběným průměrem měnil posuv. Průběh obráběcího procesu je zachycen na obrázku (viz. obr. 4.6).

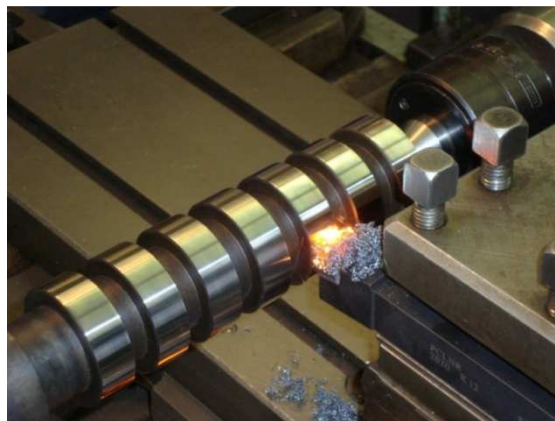
- Materiál obrobku: 14 209
- Počet zkušebních obrobků: 1



Obr. 4.4 Rozměry zkušebního obrobku



Obr. 4.5 Zkušební obrobek (materiál 14 209)



Obr. 4.6 Průběh obrábění

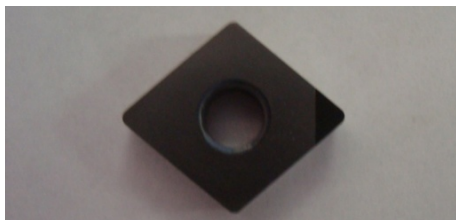
Obráběcí stroj

Parametry univerzálního hrotového soustruhu :

- Typ: SV 18 RA
- Výrobní číslo: 766
- Napětí střídavé: 3 x 380V 50Hz
- Napětí stejnosměrné: 220V 35A
- Hmotnost: 119 Kg

Nástroj

- Soustružnický nůž uběrací stranový - pravý
- Vyměnitelná břitová destička z polykrystalického kubického nitridu bóru (viz. obr. 4.7) - CMNA 120408 FN-PB2 s poloměrem špičky $r_\epsilon = 0,8$ mm
- Nožový držák - PCLNR 2020 K12 (viz. obr. 4.8)



Obr. 4.7 Vyměnitelná břitová destička



Obr. 4.8 Upnutý nástroj

Řezné podmínky

Pro experiment byly zvoleny následující řezné podmínky:

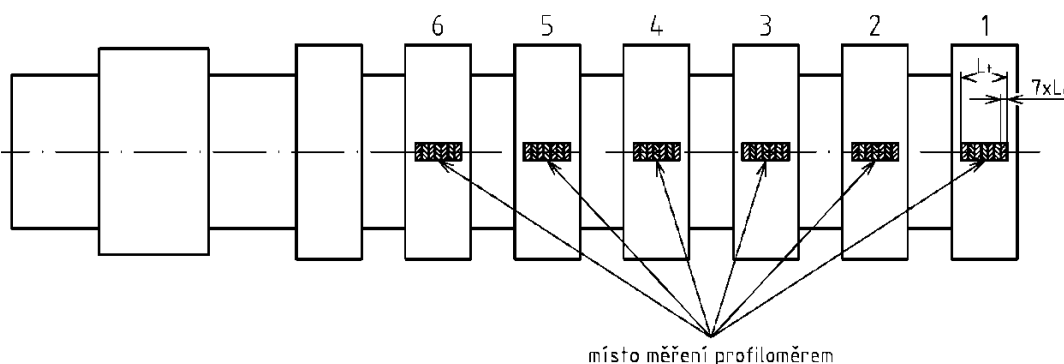
- řezná rychlost: $v_c = 172$ m/min
- soustružený průměr: $d = 48,5$ mm
- otáčky vřetene: $n = 1120$ min⁻¹
- šířka záběru ostří: $a_p = 0,2$ mm
- posuv na otáčku:
 - $f_1 = 0,061$ mm
 - $f_2 = 0,070$ mm
 - $f_3 = 0,088$ mm
 - $f_4 = 0,100$ mm
 - $f_5 = 0,108$ mm
 - $f_6 = 0,122$ mm

4.4.1 Metodika měření struktury povrchu

Pozornost byla zaměřena na nepoužívanější parametry drsnosti povrchu ve strojírenství, a to na:

- R_a (průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu)
- R_z (největší výška profilu)

Měření probíhalo v celkové délce $L_t = 5,6$ mm, konkrétně v šesti místech (tzn. po $0,80$ mm) (viz obr. 4.9).



Obr. 4.9 Princip a místa měření drsnosti

Měřilo se pomocí profiloměru Mahr Perthometer M2 s měřicím rozsahem $150\mu\text{m}$. Tento přístroj pracuje pomocí dotykové metody řezu, jedná se o metodu sloužící k dvourozměrnému zachycení povrchu. Posuvové zařízení pohybuje snímací ploškou konstantní rychlostí horizontálně přes povrch. Dotykovou metodou řezu je zachycen obalový profil skutečného povrchu. Obsahuje nejdůležitější tvarové odchylky, jako je drsnost, vlnitost a úchylky tvaru, které se přenáší do digitálního měřicího přístroje (viz. obr. 4.10). Měření struktury povrchu profiloměrem je zobrazeno na obrázku (viz. obr. 4.11).



Obr. 4.10 Měřicí přístroj



Obr. 4.11 Princip a místa měření drsnosti

Měřicí zařízení a pomůcky

- profiloměr Mahr Perthometer M2, měřící rozsah do 150 μ m
- držák profiloměru DKP 217
- univerzální svěrák
- prizmatický držák s aretačním zařízením

Výsledky měření

Měření parametrů drsnosti Ra a Rz probíhalo podle metodiky normy ČSN EN ISO 4288. Naměřené hodnoty byly zaznamenány do tabulky (Tab. 4.1). Z naměřených hodnot Ra a Rz byly následně vytvořeny grafické závislosti drsnosti obrobenej plochy na velikosti posuvu.

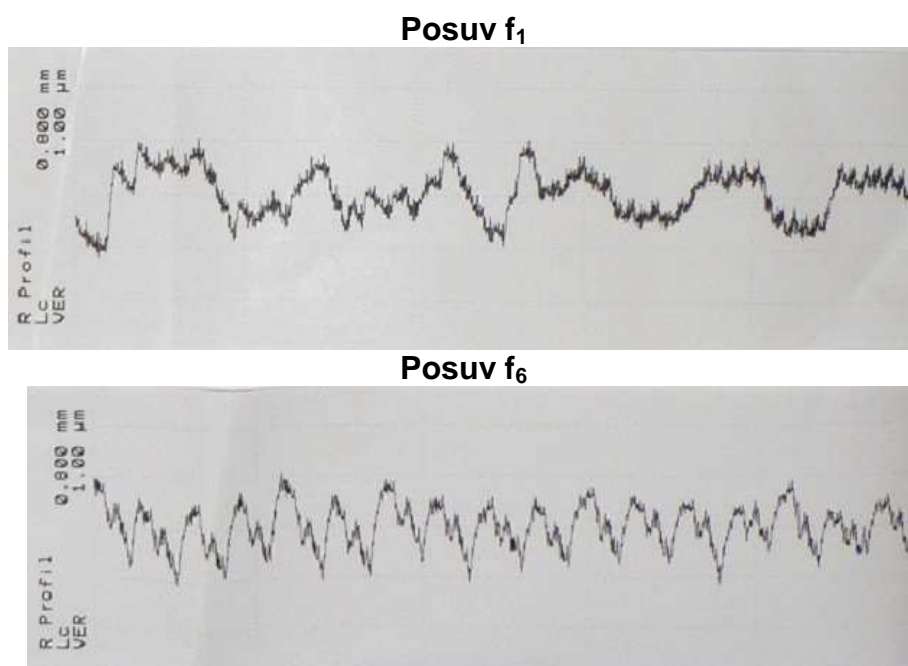
Tab. 4.1 Naměřené hodnoty

Posuv (obrobek):	Ra [μ m]	Rz [μ m]
f1 = 0,061	0,381	1,71
f2 = 0,070	0,269	1,63
f3 = 0,088	0,307	1,72
f4 = 0,100	0,32	1,76
f5 = 0,108	0,293	1,73
f6 = 0,122	0,344	1,98

Na následujících dvou grafech jsou zobrazeny výsledky měření pro počáteční posuv $f1 = 0,061$ mm a konečnou hodnotu posuvu $f6 = 0,122$ mm (viz. obr. 4.12 a 4.13), které vyhodnotil Perthometer M2.



Obr. 4.12 Výstup z Perthometeru M2



Obr. 4.13 Výstup z Perthometeru M2

4.4.2 Vyhodnocení struktury povrchu

a) Průměrná aritmetická úchylka profilu Ra

- **Odhad střední hodnoty**

Odhad střední hodnoty vypočítáme podle vztahu [9]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.10)$$

$$\sum_{i=1}^6 Ra_i = 0,381 + 0,269 + 0,307 + 0,32 + 0,293 + 0,344 = 1,914 \mu m \quad (4.11)$$

$$\overline{Ra} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Ra_i = \frac{1}{6} \cdot \sum_{i=1}^6 11,382 = 0,319 \mu m \quad (4.12)$$

- **Odhad směrodatné odchytky**

Odhad směrodatné odchytky vypočítáme podle vztahu [9]:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^6 (Ra_i - \overline{Ra})^2 &= (0,381 - 0,319)^2 + (0,269 - 0,319)^2 + (0,307 - 0,319)^2 + \\ & (0,32 - 0,319)^2 + (0,293 - 0,319)^2 + (0,344 - 0,319)^2 = 0,00779 \mu m \end{aligned} \quad (4.14)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (Ra_i - \overline{Ra})^2} = \sqrt{\frac{1}{6-1} \cdot 0,00779} = 0,03947 \mu m \quad (4.15)$$

- **Jednostranný konfidenční interval střední hodnoty**

- konfidenční úroveň $1-\alpha = 0,95$

Horní mez jednostranného konfidenčního intervalu středních hodnot vypočítáme podle vztahu [9]:

$$t_{1-\alpha;n-1} = 1,833$$

$$m_{H1} = \bar{x} + t_{1-\alpha;n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4.16)$$

$$m_{H1} = \overline{Ra} + t_{1-\alpha;n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} = 0,319 + 1,833 \cdot \frac{0,03947}{\sqrt{6}} = 0,34854 \mu m \quad (4.17)$$

- **Jednostranný statistický toleranční interval**

- konfidenční úroveň $1-\alpha = 0,95$

- podíl souboru $p = 0,95$

Horní mez jednostranného statistického tolerančního intervalu vypočítáme podle vztahu [9]:

$$k_1(n, p, 1-\alpha) = 2,91$$

$$L_{s1} = \bar{x} + k_1 \cdot s \quad (4.18)$$

$$L_{s1} = \bar{Ra} + k_1 \cdot s = 0,319 + 2,91 \cdot 0,03947 = 0,43386 \mu m \quad (4.19)$$

- **Výpočet Ra – teoretické**

Teoretické hodnoty průměrné aritmetické odchylky profilu vypočteme podle vztahu:

$$Ra_t = \frac{10^3 \cdot r_\varepsilon^2 \cdot (2 \cdot \alpha_A - \sin 2\alpha_A)}{f} \quad [\mu m] \quad (4.2)$$

$$\alpha_A = \arccos \left[\frac{r_\varepsilon}{f} \cdot \left(\arcsin \frac{f}{2r_\varepsilon} + \frac{f}{4r_\varepsilon^2} \cdot \sqrt{4r_\varepsilon^2 - f^2} \right) \right] \quad [rad] \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{A1} &= \arccos \left[\frac{r_\varepsilon}{f_1} \cdot \left(\arcsin \frac{f_1}{2r_\varepsilon} + \frac{f_1}{4r_\varepsilon^2} \cdot \sqrt{4r_\varepsilon^2 - f_1^2} \right) \right] = \\ &= \arccos \left[\frac{0,8}{0,061} \cdot \left(\arcsin \frac{0,061}{2 \cdot 0,8} + \frac{0,061}{4 \cdot 0,8^2} \cdot \sqrt{4 \cdot 0,8^2 - 0,061^2} \right) \right] = 0,02201 rad \end{aligned} \quad (4.20)$$

$$\begin{aligned} Ra_{t1} &= \frac{10^3 \cdot r_\varepsilon^2 \cdot (2 \cdot \alpha_{A1} - \sin 2 \cdot \alpha_{A1})}{f_1} = \\ &= \frac{10^3 \cdot 0,8^2 \cdot (2 \cdot 0,02201 - \sin 2 \cdot 0,02201)}{0,061} = 0,14914 \mu m \end{aligned} \quad (4.21)$$

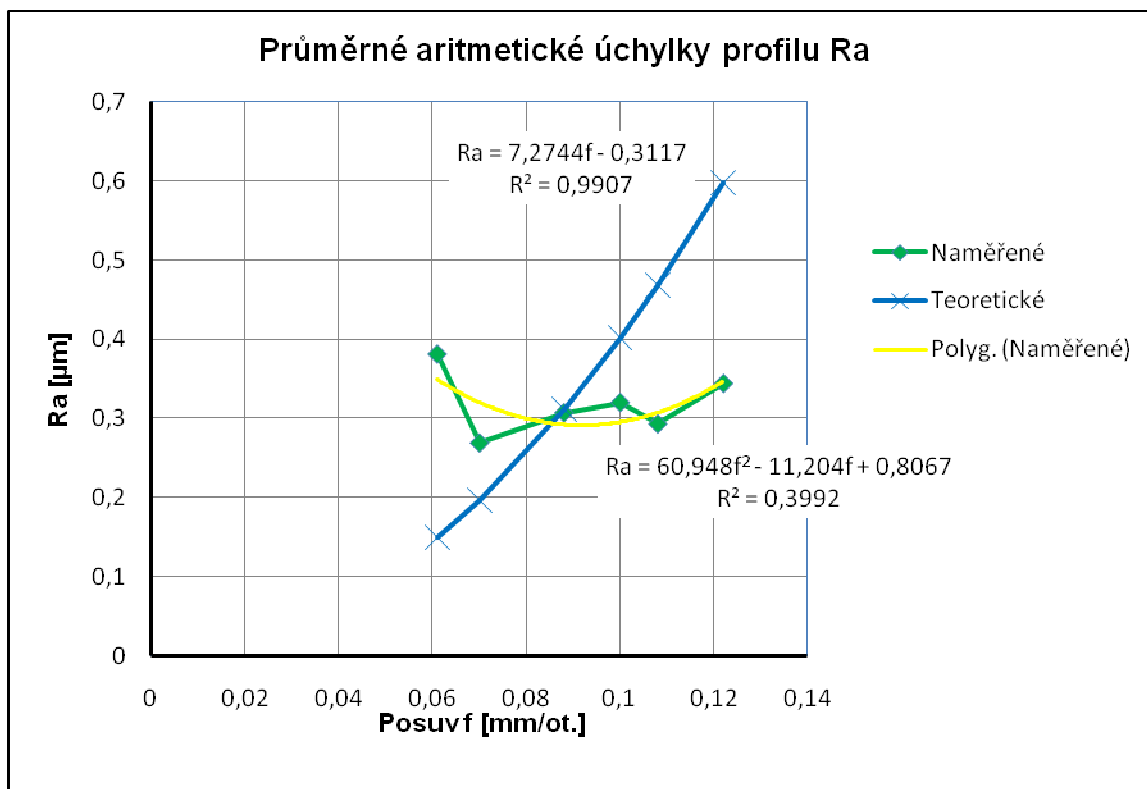
Uvádím zde jen příklad pro výpočet první teoretické hodnoty Ra. Ostatní vypočítané hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce:

Tab. 4.2 Vypočítané hodnoty α_A , R_{a_t} a naměřené hodnoty R_a

Posuv (obrobek):	α_A [μm]	R_{a_t} [μm]	R_a [μm] (naměřené)
$f_1 = 0,061$	0,02201	0,14914	0,381
$f_2 = 0,070$	0,02526	0,19646	0,269
$f_3 = 0,088$	0,03176	0,31059	0,307
$f_4 = 0,100$	0,0361	0,40135	0,32
$f_5 = 0,108$	0,03899	0,46819	0,293
$f_6 = 0,122$	0,04405	0,59762	0,344

Grafické znázornění

Na následujícím obrázku je zobrazeno grafické znázornění naměřených hodnot průměrné aritmetické úchyly profilu R_a v porovnání s hodnotami teoretickými (vypočtenými). Jsou zde také zobrazeny rovnice pro charakteristiky R_a naměřené a teoretické. Z následujícího grafu plyne, že se zvyšující se hodnotou posuvu rostou hodnoty průměrné aritmetické úchyly profilu R_a .



b) Největší výška profilu Rz

- **Odhad střední hodnoty**

Odhad střední hodnoty vypočítáme ze vztahu:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.10)$$

$$\sum_{i=1}^6 Rz_i = 1,71 + 1,63 + 1,72 + 1,76 + 1,73 + 1,98 = 10,53 \mu m \quad (4.22)$$

$$\overline{Rz} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Rz_i = \frac{1}{6} \cdot 10,53 = 1,755 \mu m \quad (4.23)$$

- **Odhad směrodatné odchylky**

Odhad směrodatné odchylky vypočítáme podle vztahu:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^6 (Rz_i - \overline{Rz})^2 &= (1,71 - 1,755)^2 + (1,63 - 1,755)^2 + (1,72 - 1,755)^2 + \\ &+ (1,76 - 1,755)^2 + (1,73 - 1,755)^2 + (1,98 - 1,755)^2 = 0,07015 \end{aligned} \quad (4.24)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (Rz_i - \overline{Rz})^2} = \sqrt{\frac{1}{6-1} \cdot 0,07015} = 0,11845 \mu m \quad (4.25)$$

- **Jednostranný konfidenční interval střední hodnoty**

- konfidencí úroveň $1-\alpha = 0,95$

Horní mez jednostranného konfidenčního intervalu středních hodnot vypočítáme podle vztahu:

$$t_{1-\alpha;n-1} = 1,833$$

$$m_{H1} = \bar{x} + t_{1-\alpha;n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4.16)$$

$$m_{H1} = \overline{Rz} + t_{1-\alpha;n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} = 1,755 + 1,833 \cdot \frac{0,11845}{\sqrt{6}} = 1,84364 \mu m \quad (4.26)$$

- **Jednostranný statistický toleranční interval:**

- konfidencí úroveň $1-\alpha = 0,95$

- podíl souboru $p = 0,95$

Horní mez jednostranného statistického tolerančního intervalu vypočítáme podle vztahu:

$$k_1 = 2,91$$

$$L_{s1} = \bar{x} + k_1 \cdot s \quad (4.18)$$

$$L_{s1} = \bar{Rz} + k_1 \cdot s = 1,755 + 2,91 \cdot 0,11845 = 2,09969 \mu m \quad (4.27)$$

- **Výpočet Rz – teoretické**

Teoretické hodnoty největší výšky profilu vypočteme podle vztahu:

$$Rz_t = f(r_\varepsilon, f) = \left(r_\varepsilon - \sqrt{r_\varepsilon^2 - 0,25 \cdot f^2} \right) \cdot 10^3 \quad [\mu m] \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned} Rz_{t1} &= \left(r_\varepsilon - \sqrt{r_\varepsilon^2 - 0,25 \cdot f_1^2} \right) \cdot 10^3 = \\ &= \left(0,8 - \sqrt{0,8^2 - 0,25 \cdot 0,061^2} \right) \cdot 10^3 = 0,58162 \mu m \end{aligned} \quad (4.28)$$

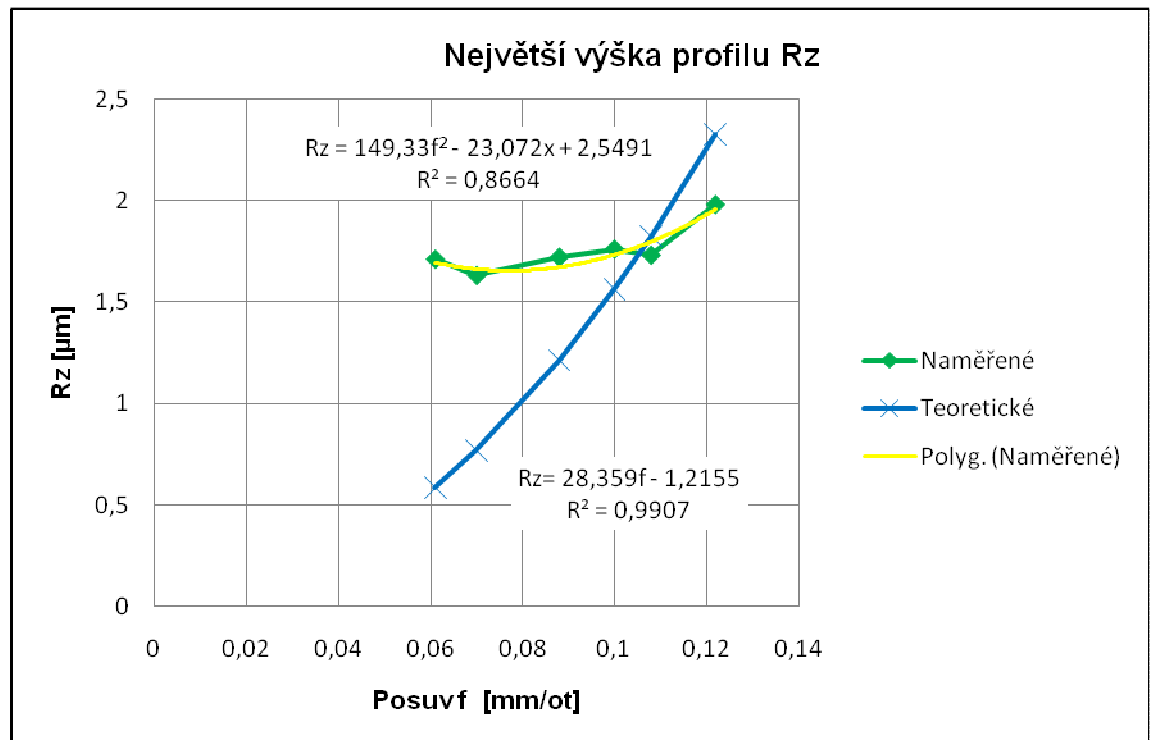
Uvádím zde jen příklad pro výpočet první teoretické hodnoty Rz. Ostatní vypočítané hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce:

Tab. 4.3 Vypočítané a naměřené hodnoty Rz_t

Posuv (obrobek):	Rz_t [μm]	Rz [μm] (naměřené)
$f_1 = 0,061$	0,58162	1,71
$f_2 = 0,070$	0,76599	1,63
$f_3 = 0,088$	1,21092	1,72
$f_4 = 0,100$	1,56403	1,76
$f_5 = 0,108$	1,82458	1,73
$f_6 = 0,122$	2,32902	1,98

Grafické znázornění

Na následujícím obrázku je zobrazeno grafické znázornění naměřených hodnot největší výšky profilu Rz v porovnání s hodnotami teoretickými (vypočtenými). Jsou zde také zobrazeny rovnice pro charakteristiky Rz naměřené a teoretické. Z následujícího grafu plyne, že se zvyšující se hodnotou posuvu rostou hodnoty největší výšky profilu Rz.

Obr. 4.17 Funkční závislost $Rz = f(f)$

ZÁVĚR

Pro optimální volbu technologie obrábění tvrdých materiálů je důležité znát vlastnosti obráběného materiálu. Podle těchto vlastností vybrat vhodný typ řezného materiálu, následně v souladu s obráběcím strojem určit vhodné řezné podmínky a vlastní technologii obrábění. Zejména správná volba řezných podmínek pro danou technologii obrábění je velmi důležitá z hlediska kvality povrchu a životnosti nástroje. Volba nevhodného nástrojového materiálu a řezných podmínek obráběcího procesu vede k ekonomickým ztrátám ve výrobním procesu.

V této diplomové práci byly charakterizovány tvrdé materiály, technologie obrábění, vlastnosti a řezné podmínky pro vyměnitelné břitové destičky vhodné pro obrábění tvrdých materiálů. V poslední části byly zkoumány parametry obrobené plochy při obrábění kalené oceli nástrojem s destičkou z kubického nitridu boru. Z výsledků experimentu lze jednoznačně říci, že se zvyšující se hodnotou posuvu se zvyšují i hodnoty parametrů drsnosti povrchu Ra a Rz. Z hlediska požadované kvality povrchu je tedy nutné dodržovat optimální řezné podmínky.

Je samozřejmostí, že nástroje osazené výkonnými tvrdými materiály nejsou univerzálně použitelné pro všechny druhy obráběných materiálů, ale vzhledem k rostoucím požadavkům na tvrdost a pevnost vyráběných součástí se budou stále používat.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. *Garant – příručka obrábění* [online] [cit. 2009-4-28]
URL:<<http://www.hoffmann-group.com/download/cz/zerspanungshandbuch/cz-zerspanungshandbuch.pdf>>.
2. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění – Kniha pro praktiky*. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s.r.o. 1997. 857 s. Přel. z: *Modern Metal Cutting – A Practical Handbook*. ISBN 91-972299-4-6
3. Buda, J. - Souček, J. - Vasilko, K. *Teória obrábania*. Bratislava: Vydavateľství ALFA, 1983. 360s.
4. KOČMAN, K. a PROKOP, J. *Technologie obrábění 1.vyd.* Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
5. HUMÁR, A. *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. 1. vyd. Brno: CCB, 1995. 265 s. ISBN 80- 85825-10-4.
6. FOREJT, M. a PÍŠKA, M. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 226 s. ISBN 80-214-2374-9.
7. KŘÍŽ, R. a VÁVRA, P. *Strojírenská příručka 7. svazek*. 1. Vyd. Praha: Scientia, 1996. 212s. ISBN 80-7183-024-0.
8. ZEMČÍK, O. *Technologická příprava výroby*. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002.160 s. ISBN 80-214-2219-X.
9. PROKOP, J. *Aplikovaná teorie obrábění – Přednášky*. Akademický rok 2008/2009
10. *Wikimedia – File: Cor-TEN-Steel detail 3.JPG* [online] [cit. 2009-4-28]
URL:<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:COR-TEN-Steel_detail_3.JPG >.
11. *Slitiny a pseudoslitiny* [online] [cit. 2009-4-28]
URL:<<http://www.ujp.cz/?section=vYROBKY-a-sluzby&lang=cs&subsection=slitiny-a-pseudoslitiny&part=3>>.
12. *Technologie HSC* [online] [cit. 2009-4-28]
URL:<http://technik.ihned.cz/c4-10004030-11353150-800000_d-technologie-hsc>.
13. *Vysoce výkonné frézování (HPM) / Vysoce výkonné řezání (HPC)* [online] [cit. 2009-4-28]
URL:<<http://www.gfac.com/cz/produkty/vysoce-vykonna-obrabceni-centra.html>>.
14. *Aplikace HPC a strategické otázky* [online] [cit. 2009-4-28]
URL: <<http://www.techtydenik.cz/detail.php?action=show&id=923&mark=>>.
15. *High-performance cutting materials increase productivity for the mass production industry* [online] [cit. 2009-4-28]
URL:<http://www.kyocera.lu/index/news/news_detail.L2N1dHRpbmdfdG9vbHMvbmV3cy8yMDA1L2hpZ2gtcGVyZm9ybWFuY2VfY3V0dGluZw~~.html>
16. *Důležité aspekty vysokorychlostního obrábění* [online] [cit. 2009-4-28]
URL:<<http://www.mmspektrum.com/clanek/dulezite-aspekty-vysokorychlostniho-obrabeni>>.
17. *Suché frézování materiálu Ti6Al4V vysokými rychlostmi* [online] [cit. 2009-4-28]
URL:<<http://www.mmspektrum.com/clanek/suche-frezovani-materialu-ti6al4v-vysokymi-rychlostmi>>.

18. *News and press releases* [online] [cit. 2009-4-28]
URL: <http://www.cerazit.com/3074_ENG_HTML.htm>.
19. *Machining Capabilities - Technical* [online] [cit. 2009-4-28]
URL: <<http://www.wagma.com.au/technical-machining.htm>>.
20. *Kennametal KT1120 and KT5020 Cermet Grades and Geometries for steel* [online] [cit. 2009-4-28]
URL:<
http://www.trigon.sk/mediafiles/S_RstruYZenie/Nove_typy_Cermetov.pdf
>.
21. *Cermets Get Assertive* [online] [cit. 2009-4-28]
URL: <<http://www.mmsonline.com/article.aspx?id=14980>>.
22. *“THICK“ PVD coatings* [online] [cit. 2009-4-28]
URL:<http://www.cemecon.de/information/news/thick_pvd_coatings/index_eng.html>.
23. *Keramika* [online] [cit. 2009-4-28]
URL: <<http://www.ateam.zcu.cz/download/rezna%20keramika08-09.pdf>>.
24. *CUTTING TOOL ENGINEERING Plus* [online] [cit. 2009-4-28]
URL:<<http://www.cuttingtoolengineering.com/dynamic.articles.php?id=223>>.
25. *Břítové destičky z řezné keramiky* [online] [cit. 2009-4-28]
URL: <<http://www.sgac-turnov.cz/index.php?content=210&lang=cs>>.
26. *Nástroje osazené umělým diamantem* [online] [cit. 2009-4-28]
URL: <<http://www.lpw.cz/show.php?show=55>>.
27. *HRC program pro obrábění tvrdých materiálů* [online] [cit. 2009-4-28]
URL: <<http://www.emugefranken.cz/index.php?menu=85>>.
28. *Základy obrábění* [online] [cit. 2009-4-28]
URL: <<http://jhamernik.sweb.cz/obrabeni.htm>>.
29. *Aplikace PC pro optimalizaci řezných podmínek* [online] [cit. 2009-4-28]
URL: <<http://fstroj.utc.sk/journal/sk/015/015.htm>>.
30. *Dormer* [online] [cit. 2009-4-28]
URL:<[http://www.dormertools.com/Sandvik/2531/internet/German/S004454.nsf/Alldocs/Product*2DCarbideCatalogue*2APDF*2DCCInfo/\\$file/infoCE.pdf](http://www.dormertools.com/Sandvik/2531/internet/German/S004454.nsf/Alldocs/Product*2DCarbideCatalogue*2APDF*2DCCInfo/$file/infoCE.pdf)>.
31. *Karbid pro soustružení WIDIA TN5120™* [online] [cit. 2009-4-28]
URL:<http://www.tyroline.cz/data/upload/Flyer_WIDIA_TN5120_CZ_V04.pdf>.
32. *Direct Industry* [online] [cit. 2009-4-28]
URL:<<http://www.directindustry.es/prod/sandvik-coromant-usa/fresa-dos-cortes-35541-218287.html>>.
33. *NTK CUTTING TOOLS* [online] [cit. 2009-4-28]
URL: <<http://www.ntkcuttingtools.com>>.
34. *Tepelné zpracování oceli - teorie* [online] [cit. 2009-4-28]
URL:<http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_tepelne_zprac_oceli/teorie2.htm>.
35. *ARNO* [online] [cit. 2009-4-28]
URL: <<http://tmc.webcage.cz/arno/soustruzeni/TURNING.pdf>>.
36. *Šedá litina* [online] [cit. 2009-4-28]
URL: <http://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%A0ed%C3%A1_litina>.
37. *Materiály* [online] [cit. 2009-4-28]
URL: <<http://www.vuhz.cz/?co=sortiment&akce=odlitky1&ur3=Materialien>>.

38. *Ložisková ocel* [online] [cit. 2009-4-28]
URL: <http://www.redhill-balls.cz/cz/loziskova_ocel.html>.
39. *Tvrzená nerezová ocel* [online] [cit. 2009-4-28]
URL: <http://www.redhill-balls.cz/cz/tvrzena_ocel.html>.
40. *Nástrojová ocel* [online] [cit. 2009-4-28]
URL: <http://www.redhill-balls.cz/cz/nastrojova_ocel.html>.
41. *Ocel pro práci za studena* [online] [cit. 2009-4-28]
URL: <<http://www.thyssenkrupp-ferrosta.cz/nastrojova-ocel-studena.php>>.
42. *Oceli určené k výrobě forem pro výrobky z plastů* [online] [cit. 2009-4-28]
URL: <<http://www.thyssenkrupp-ferrosta.cz/nastrojova-ocel-formy.php>>.
43. *Oceli rychlořezné a TSP* [online] [cit. 2009-4-28]
URL: <<http://www.thyssenkrupp-ferrosta.cz/nastrojova-ocel-rychlorezane.php>>.
44. *Analýza integrity povrchu obrobeného PVD povlaky* [online] [cit. 2009-4-28]
URL: <<http://www.metal2009.com/sbornik/Lists/Papers/008.pdf>>.
45. *Litina* [online] [cit. 2009-4-28]
URL: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Litina>>.
46. *Oceli a litiny* [online] [cit. 2009-4-28]
URL: <<http://tzs.kmm.zcu.cz/ocelilitiny3.pdf>>.
47. *Technické slitiny železa* [online] [cit. 2009-4-28]
URL: <<http://www.strojnylyceum.wz.cz/maturita/tep/tep3.pdf>>.
48. *Disertační práce* [online] [cit. 2009-4-28]
URL: <http://home.vsb.cz/robert.cep/PDF/disertacni_prace.pdf>.
49. *Řezné podmínky při obrábění* [online] [cit. 2009-4-28]
URL: <http://www.kom.tul.cz/soubory/tob_rp.pdf>.
50. *Technická dokumentace* [online] [cit. 2009-4-28]
URL: <http://www.umz.fme.vutbr.cz/Methodiky_%20mereni%5Cstruktura%20povrchu.htm>.
51. *Perthometer Parametry (drsnosti) povrchu* [online] [cit. 2009-4-28]
URL: <[http://www.zeiss.sk/C12571AF002D4699/EmbedTitelIntern/Prospekt_Drsnost/\\$File/drsnost.pdf](http://www.zeiss.sk/C12571AF002D4699/EmbedTitelIntern/Prospekt_Drsnost/$File/drsnost.pdf)>.
52. *Rozměrová a tvarová přesnost, přesnost polohy, drsnost povrchu* [online] [cit. 2009-4-28]
URL: <<http://www.fbi.vsb.cz/shared/uploadedfiles/fbi/presnost.pdf>>.
53. *Předepisování přesnosti rozměrů, tvaru a polohy* [online] [cit. 2009-4-28]
URL: <zcu.yc.cz/TD/TOLEROVANI.doc>.
54. *Všeobecné soustružení* [online] [cit. 2009-4-28]
URL: <http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/downloads/catalogue/CZE/MC_2009_Klick_CZE_A.pdf>.
55. *Ekologické a technologické aspekty HSC obrábění* [online] [cit. 2009-4-28]
URL: <esf.fme.vutbr.cz/modul/5/hsc_obrabeni_1.pps>.
56. *Řezné podmínky při obrábění* [online] [cit. 2009-4-28]
URL: <<http://www.cs-marketing.cz/Index.asp?id=49>>.
57. *Příručka obrábění* [online] [cit. 2009-4-28]
URL: <http://www.ostravanastroje.cz/download/rezne-nastroje/pramet_prirucka.zip>.
58. *EdgeCAM je první CAM s podporou Wiper břitových destiček* [online] [cit. 2009-4-28]
URL: <<http://www.edgecam.sk/www/2produkty/novinky/novinky95.php>>.

59. *Tyroline* [online] [cit. 2009-4-28]
URL: <http://www.tyroline.cz/data/upload/catalogues/w2005_ru_cz_pl.pdf>.
60. *MM Průmyslové spektrum – Obrábění kalených materiálů řeznou keramikou* [online] [cit. 2009-4-28]
URL: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/obrabeni-kalenych-materialu-reznou-keramikou>>.
61. *Barevná leptadla a jejich použití* [online] [cit. 2009-4-28]
URL:<<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/bmsz/datastranek/blap.htm>>.
62. *Metalografie* [online] [cit. 2009-4-28]
URL: <<http://www.ateam.zcu.cz/metalografie.html>>.
63. BEŇO, J. *Teória rezava kovov*. Prvé vydanie. Košice. Strojnicka fakulta TU Košice, 1999. 255s. ISBN 80-7099-429-0.
64. HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. MM publishing, s. r. o. Praha 2008. 235s. ISBN 978-80-254-2250-2.
65. KOČMAN, K. a NĚMEČEK, P. *Aktuální příručka pro technický úsek*. 16. Aktualizované vyd. Praha: Verlag Dash“ofer 2001. 4250s. ISBN 80-902247-2-5.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
Fe		Železo
Mo		Molybden
Ni		Nikl
Ti		Titan
W		Wolfram
C		Uhlík
Co		Kobalt
Cr		Chrom
HRC		Tvrдость podle Rockwella
HV		Tvrдость podle Vickerse
MPa		Megapascal
Rm	[MPa]	Pevnost v tahu
HSC		High speed cutting – vysokorychlostní obrábění
VBD		Vyměnitelná břitová destička
PKD		Polykrystalický diamant
CBN		Polykrystalický kubický nitrid boru
PKB		Polykrystalický kubický nitrid boru
HSS		Rychlořezná ocel
F_s	[N]	Tečná síla ve střížné rovině
τ_k	[MPa]	Střední kritické kluzové napětí obráběného materiálu
b	[mm]	Šířka třísky
ϕ	[°]	Úhel směru maximálních tečných napětí
F	[N]	Řezná síla
V_c	[m/min]	Řezná rychlost
ϕ	[°]	Úhel tření
δ	[°]	Úhel řezu
TiN		Nitrid titanu
TiC		Karbid titanu
TiCN		Karbonitrid titanu
WC		Karbid wolframu
TaC		Karbid tantalu
NbC		Karbid niobu
Al ₂ O ₃		Oxid hlinitý
HP		Hot dressing – lisování za vysokých teplot
HIP		Hot isostatic dressing – izostatické lisování za vysokých teplot
ZrO ₂	[μm]	Kysličník zirkonu
Si ₃ N ₄	[μm]	Nitrid křemíku
SiC		Karbid křemíku
Ra	[μm]	Průměrná aritmetická úchylka profilu
Rz	[μm]	Největší výška profilu
GG25		Označení šedé litiny
CVD		Povlak (chemické napařování)

PVD		Fyzikální napařování
a_p	[mm]	Šířka záběru ostří
f	[mm/ot.]	Posuv
n	[ot./min]	Počet otáček
D	[mm]	Výchozí obráběný průměr
v_{copt}	[m/min]	Optimální řezná rychlost
x_v, y_v		Exponenty pro daný režim obrábění
f_z	[mm/zub]	Posuv na zub
z	[-]	Počet zubů
f_{ot}	[mm/ot.]	Posuv na otáčku
f_{min}	[mm/min]	Minutový posuv
D_s	[mm]	Průměr frézy
n_s	[ot./min]	Frekvence otáček frézy
T	[min]	Životnost nástroje
k	[-]	Strmost přímky
C_v	[min]	Životnost T pro $v_c = 1$ m/min
C_T	[min]	Řezná rychlost v_c pro $T = 1$ min [min]
l_r	[mm]	Základní délka
Ra_t	[μ m]	Teoretická hodnota průměrné aritmetické úchylky profilu
R_p	[μ m]	Největší špička profilu
R_v	[μ m]	Největší prohlubeň profilu
r_ϵ	[mm]	Poloměr špičky
Rz_t	[μ m]	Teoretická hodnota největší výšky profilu
SV18 RA		Univerzální hrotový soustruh
L_t	[mm]	Délka měření
s	[μ m]	Směrodatná odchylka
$t_{1-\alpha; n-1}$	[-]	Kvantil studentova rozdělení
m_{H1}	[μ m]	Horní mez jednostranného konfidenčního intervalu středních hodnot
$k_1(n, p, 1-\alpha)$	[-]	Hodnoty součinitelů pro stanovení jednostranného statistického
L_{s1}	[μ m]	Horní mez jednostranného statistického tolerančního intervalu
\overline{Ra}	[μ m]	Střední hodnota Ra
\overline{Rz}	[μ m]	Střední hodnota Rz
x_i	[-]	Číslo měření
n_i	[-]	Četnost výsledků seskupených do tříd
\bar{x}	[-]	Aritmetický průměr