

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA STROJNÍ**



TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ V PŘÍKLADECH

1 Materiály řezných nástrojů

doc. Ing. Robert ČEP, Ph.D.
Ing. et Ing. Mgr. Jana PETRŮ, Ph.D.

Ostrava 2013

© doc. Ing. Robert ČEP, Ph.D., Ing. et Ing. Mgr. Jana PETRŮ, Ph.D.

© Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-3014-8



Tento studijní materiál vznikl za finanční podpory Evropského sociálního fondu (ESF) a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu: CZ.1.07/2.2.00/15.0463, MODERNIZACE VÝUKOVÝCH MATERIÁLŮ A DIDAKTICKÝCH METOD

OBSAH

1	MATERIÁLY ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ	4
1.1	Materiály řezných n Materiály řezných nástrojů	5
1.2	Rozdělení řezných materiálů dle ISO	6
1.3	Nástrojové oceli	7
1.3.1	Uhlíkové nástrojové oceli	7
1.3.2	Slitinové oceli	8
1.3.3	Rychlořezné oceli	8
1.3.4	Rychlořezné oceli vyrobené práškovou metalurgií	8
1.3.5	Povlakované rychlořezné oceli	8
1.4	Slinuté karbidy	9
1.4.1	Metody povlakování SK	9
1.4.2	Metoda PVD	10
1.4.3	Metoda CVD	10
1.4.4	Metoda MTCVD	11
1.5	Řezná keramika	12
1.5.1	Technické použití keramických materiálů	12
1.5.2	Historický vývoj	13
1.5.3	Rozdělení a značení ŘK	14
1.5.4	Výroba řezné keramiky	15
1.5.5	Obecný postup výroby keramických materiálů:	15
1.5.6	Povlakování řezné keramiky	16
1.5.7	Použití v oblasti obrábění	16
1.6	Cermety	17
1.6.1	Historický vývoj	18
1.6.2	Vlastnosti cermetů	18
1.6.3	Vliv jednotlivých přísad na vlastnosti cermetů	18
1.6.4	Povlakování cermetů	19
1.6.5	Zásady pro použití cermetů	19
1.7	Syntetické velmi tvrdé materiály	19
1.7.1	Kubický nitrid boru	19
1.7.2	Diamant	20
2	KONTROLNÍ OTÁZKY	21



3	PŘEDNÁŠKOVÝ TEXT SE VZTAHUJE K TĚMTO OTÁZKÁM.	22
4	POUŽITÁ LITERATURA	23



1 MATERIÁLY ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ



OBSAH KAPITOLY:

Požadavky na řezné materiály

Nástrojové oceli

Slinuté karbidy

Řezná keramika a cermety

Kubický nitrid boru a diamant

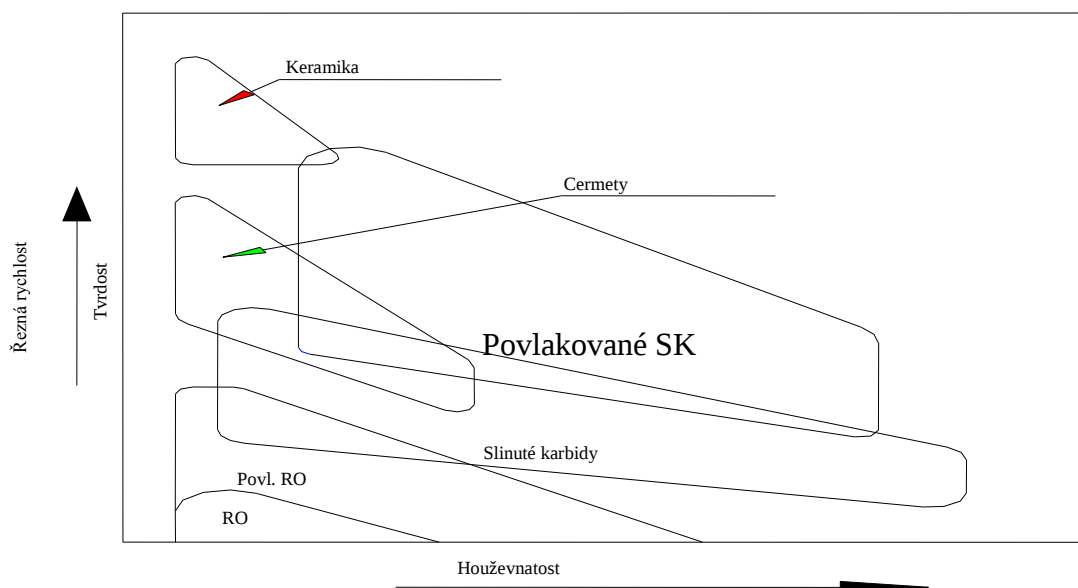


MOTIVACE:

Řezné materiály (materiál břitu) rozhodujícím způsobem ovlivňují produktivitu, výrobní náklady a kvalitu výroby. Jejich význam je charakterizován náročnými požadavky, ve kterých břit nástroje pracuje. Při obrábění bývají vystaveny intenzivnímu mechanickému a tepelnému namáhání. To vede k otupování břitu, případně i k celkové destrukci. Řezný materiál musí mít proto větší tvrdost než materiál obráběný, aby mohl řezný klín vniknout do obráběného materiálu a odřezávat třísku.



1.1 MATERIÁLY ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ



Obr. 10.1 Oblasti aplikace nejpoužívanějších materiálů pro řezné nástroje

Požadavky kladené na řezné materiály:

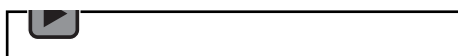
- pevnost a tvrdost v tlaku;
- houževnatost a pevnost v ohybu;
- pevnost za tepla a odolnost proti teplotním rázům;
- odolnost proti otěru (adheze, difuze, nárůstky...);
- chemická stálost a chemicky neutrální chování vůči obráběným materiálům;
- odolnost proti vzniku trhlin a pevnost vazby vnitřních fází;
- vysoká řezivost.

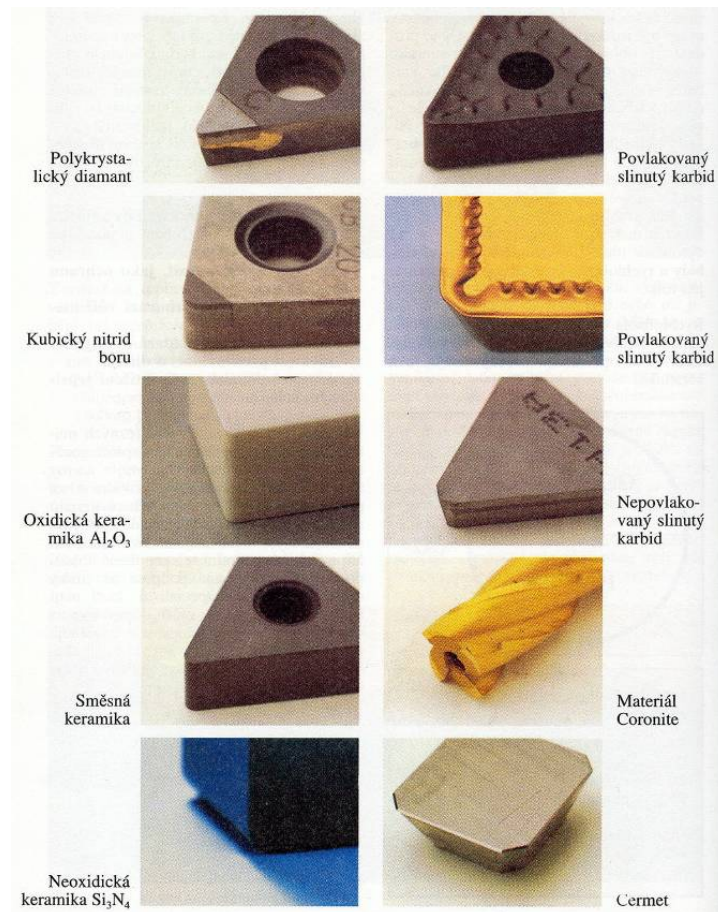
Pro nástroje s definovanou geometrií břitu se zpravidla používá následující rozdělení materiálů obráběcích nástrojů:

- kovové nástroje (vyrobené klasickým tavením);
- nástrojové oceli (NO);
- spékané tvrdokovy (vyrobené práškovou metalurgií);
- slinuté karbidy (SK);
- cermety;
- keramické materiály (nekovové lisované prášky);
- řezná keramika (ŘK);
- syntetické velmi tvrdé materiály;
 - o kubický nitrid boru (KBN);
 - o diamant (PKD).



Audio 1.1 Požadavky na řezné materiály



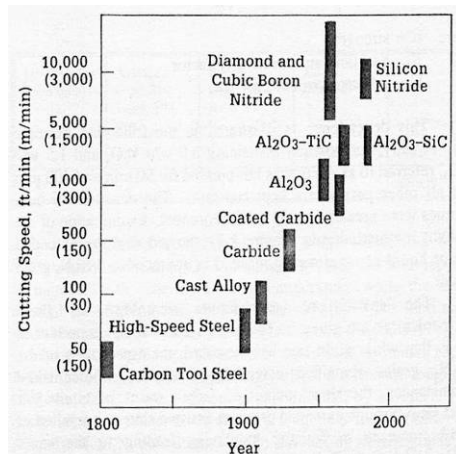


Obr. 10.2 Přehled výkonných řezných materiálů

oceli

ocel

SK



Obr. 10.3 Změna produktivity řezných materiálů v čase

Cutting speed – řezná rychlost

Year – rok

Carbon Tool Steel – uhlíková

High-speed steel – rychlořezná

Cast Alloy – slitinová ocel

Carbide – slinutý karbid

Coated Carbide – povlakovaný

Silicon Nitride – Si₃N₄

Diamond – diamant

Cubic Boron Nitride – KBN

1.2 ROZDĚLENÍ ŘEZNÝCH MATERIÁLŮ DLE ISO

Podle normy ISO 513 : 2002 se obráběcí materiály dělí do 6 hlavních aplikačních skupin a každá se dále dělí na aplikační skupiny. Hlavní aplikační skupiny se dělí podle materiálů, který se jimi obrábí. Identifikačními znaky jsou písmena a barva. Každá aplikační skupina je určena písmenem hlavní skupiny a klasifikačním číslem. Výrobci řezných materiálů bylo uspořádáno pořadí v aplikačních skupinách podle relativního opotřebení a pevnosti. Čím je číslo nižší, tím je možné obrábět vyšší rychlostí a má vyšší otěruvzdornost. A naopak čím je číslo vyšší, tím rostou rychlosti posuvu a pevnost řezných materiálů.

Rozdělení aplikačních skupin dle ISO 513 : 2002:



- P (modrá barva značení);
- M (žlutá barva značení);
- K (červená barva značení);
- N (zelená barva značení);
- S (hnědá barva značení);
- H (šedá barva označení).

Skupina P – je určena pro obrábění materiálů tvořící dlouhou třísku, jako uhlíkové oceli, slitinové oceli a feritické nerezavějící oceli. Řezný proces je doprovázen velkými řeznými silami a značným opotřebením na čele nástroje. Přísada TiC zaručuje vysokou odolnost proti difuzi za vysokých teplot a je jednou z hlavních příčin výmolů na čele nástroje.

Skupina M – má universální použití a je určena pro obrábění materiálů, které tvoří střední a delší třísku jako jsou lité oceli, nerezavějící austenitické a austeniticko – feritické oceli a tvárné litiny. Pro svoji relativně vysokou houževnatost se SK této skupiny používají pro těžké hrubovací práce a pro přerušované řezy. Síly řezání dosahují středních až vysokých hodnot a dochází k vydrolování ostří.

Skupina K – je určena pro obrábění materiálů, které vytváří krátkou drobivou třísku, zejména litiny, temperovaná litina a litina s globulárním grafitem. Síly řezání jsou obvykle relativně nízké a převládá abrazivní a adhezni opotřebením. SK této skupiny nejsou vhodné pro materiály tvořící dlouhou třísku, která zatěžuje tepelně čelo nástroje.

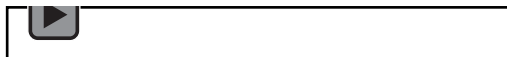
Skupina N – je určena k obrábění materiálů z neželezných kovů, zejména hliníku a dalších neželezných kovů, jejich slitin a nekovových materiálů.

Skupina S – používá se na obrábění tepelně odolných slitin na bázi železa, niklu a kobaltu, titanu a titanových těžce obrobitelných slitin.

Skupina H – je vhodná na obrábění kalených a vysoce tvrdých ocelí, tvrzených a kalených litin. Dalším velmi důležitým kritériem odolnosti materiálu vůči opotřebením je jeho tepelná odolnost.



Audio 1.2 Rozdělení řezných materiálů



1.3 NÁSTROJOVÉ OCELI

Tento druh řezného materiálu můžeme zařadit mezi ušlechtilé oceli. Zhotovují se z nich především nástroje na obrábění, řezání, stříhání, tváření za tepla i za studena, měřidla apod. Podle chemického složení je lze dále dělit na:

- uhlíkové oceli;
- slitinové oceli;
- rychlořezné oceli.

1.3.1 Uhlíkové nástrojové oceli

Obsahují asi 1,25 % C a menší množství Mn. Tvrdost a odolnost proti otupení (otěru) zajišťuje jejich martenzitická struktura. Se stoupajícím obsahem uhlíku roste tvrdost a tím i odolnost proti otupení, ale současně klesá jejich houževnatost. Tyto oceli jsou citlivé na tepelné zpracování a na druh použití, zejména při vyšších teplotách, kdy nástroje z uhlíkových ocelí ztrácí tvrdost. Jejich maximální teplotní odolnost je okolo 250°C.



Vyrábí se z nich málo namáhané nástroje jako např. ruční nástroje a nářadí (pilníky, škrabáky, nože, sekáče, sekery, kladiva...), nože strojních nůžek a kamenické nářadí.

1.3.2 Slitinové oceli

Tyto oceli obsahují méně než 1,25 % uhlíku a jsou legovány především manganem, chromem, molybdenem, niklem a wolframem. Jsou více odolné proti otupení a mají vyšší tvrdost a pevnost za tepla. Mají dobrou prokalitelnost, která je vhodná pro tvarově náročné nástroje.

Vyrábí se z nich nástroje s vyšším namáháním. Nejsou však vhodné pro výkonné řezání a obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Hlavními oblastmi použití jsou tvářecí nástroje, zápustky, formy na plasty a jednoduché řezné nástroje (výhrubníky, výstružníky, protahováky, závitníky, pilové listy, dřevoobráběcí nástroje...). Odolávají teplotám do 350 °C.

1.3.3 Rychlořezné oceli

Jsou vysokolegovány legujícími prvky, mezi které patří zejména wolfram, jehož obsah může činit až 18 %. V porovnání s ostatními nástrojovými oceli mají několikanásobně vyšší řezivost a dobrou pevnost v ohybu. Mají též vysokou tvrdost a odolnost proti popouštění a snášejí maximální teploty okolo 550 °C.

Vyrábějí se z nich především namáhané nástroje pro obrábění (soustružnické a hoblovací nože, frézy, pilové kotouče, závitové čelisti a závitníky, tvarové nože) a nástroje na opracovávání dřeva. Mohou se používat i při obrábění s rázy nebo při přerušovaném řezu.

1.3.4 Rychlořezné oceli vyrobené práškovou metalurgií

V budoucnu se budou prosazovat rychlořezné oceli vyrobené práškovou metalurgií. Tato metoda umožňuje vytvářet velmi homogenní strukturu a vývoj nestandardních chemických variant. K jejich výhodám patří:

- homogenní struktura;
- dobré technické vlastnosti – tvařitelnost, brousitelnost, leštitelnost;
- tvarová a rozměrová stálost při slinování;
- zlepšená houževnatost;
- materiálová a ekonomická náročnost.

1.3.5 Povlakované rychlořezné oceli

Mimo snahy o zlepšení vlastností základního materiálu, kvality tepelného zpracování a ostření mají mimořádný význam především metody úprav povrchových vrstev funkčních částí nástroje. Jejich cílem je nejen zvýšení životnosti nástroje, ale i jeho výkonnosti. Pro rychlořezné oceli se používá metoda povlakování PVD, která je založena na rozprašování nebo odpařování pevného terče (Ti, Cr, Al), na bombardování podložky (nástroje) směsí neutrálních atomů a iontů a kondenzaci chemické sloučeniny, např. nitridu, karbidu nebo oxidu zvoleného kovu na nástroje ve vakuové komoře.

Existují 3 základní typy povlakování metodou PVD. Jedná se o napařování, naprašování a iontové plátování. Dosud nejčastěji je aplikován povlak TiN (asi 75 % povlakovaných nástrojů), další v pořadí četnosti jsou (Ti, Al)N a Ti(C, N). Mezi výhody lze zařadit možnost povlakování ostrých hran, k nevýhodám všech metod PVD patří relativně složitý vakuový systém. Vzhledem k tomu, že rychlořezné oceli patří mezi nejvíce legované nástrojové oceli a jsou tedy nejnáročnější na deficitní legující prvky, optimální využívání rychlořezných ocelí má značný ekonomický význam.



1.4 SLINUTÉ KARBIDY

Jsou vyráběny práškovou metalurgií, kde je struktura tvořena karbidy vysocetavitelných kovů wolframu (WC), titanu (TiC) a pojícím kovem, kterým je nejčastěji kobalt (Co). Jako další přísady se používají karbidy tantalu (TaC) a niobu (NbC). Velký rozvoj zaznamenaly slinuté karbidy zejména na konci 50. let minulého století při změně v upevnění VBD z pájené na konstrukci s mechanickým upínáním.

V současné době většina výrobců slinuté karbidy povlakuje. Povlakované slinuté karbidy jsou složeny z pevného karbidového podkladu a termochemicky stabilního povlaku (karbidy, nitridy, oxidy a jejich kombinace). Výsledkem jsou lepší materiály pro vysoké řezné a posuvové rychlosti, vysoký úběr třísky a přerušovaný řez. Hlavním cílem povlaků je snížit součinitel tření, neulpívání třísek na čele, získání tvrdého povrchu při zachování houževnatého jádra, zamezení vzniku nárůstků a zejména prodloužení životnosti nástroje. Získáme tak vysoce kvalitní nástroje, zajišťující vysoký úběr materiálu, vysoké řezné a posuvové rychlosti i možnost využití pro přerušované řezy. Jako první se na trhu objevily povlaky z TiC a brzy na to byly vyvinuty povlaky typu TiN a TiCN, povlaky Al_2O_3 přišly na trh nejpozději. Mají vyšší teplotní odolnost oproti předchozí skupině materiálů a to přibližně 800 °C.

Obvykle se uvádějí tyto vývojové stupně povlakovaných slinutých karbidů:

1. generace: jednovrstvý povlak (téměř výhradně TiC) s tloušťkou asi 7 μm a špatnou soudržností podkladu a povlaku;
2. generace: jednovrstvý povlak (TiC, TiCN, TiN) bez etakarbidu na přechodu podklad - povlak. Zdokonalení technologie výroby umožnilo vytvořit vrstvy povlaků o větší tloušťce (až 13 μm), bez nebezpečí jejich odlupování při funkci nástroje;
3. generace: vícevrstvý povlak (dvě až tři, případně i více vrstev) s ostře ohraničenými přechody mezi jednotlivými vrstvami. Řazení vrstev odpovídá jejich vlastnostem tak, že jako první jsou na podklad obvykle nanášeny vrstvy s lepší přilnavostí k podkladu, které mají relativně nižší odolnost proti opotřebení a jako poslední jsou nanášeny vrstvy, které nemusí mít dobrou přilnavost k podkladu, ale požaduje se od nich zejména vysoká tvrdost a odolnost proti opotřebení. Nejčastěji bývají jednotlivé vrstvy řazeny v tomto pořadí (od podkladu k povrchu): TiC- Al_2O_3 , TiC-TiN, TiC-TiCN-TiN, TiC- Al_2O_3 -TiN;
4. generace: speciální vícevrstvý povlak (velmi často i více než 10 vrstev a mezivrstev), s méně či více výraznými přechody mezi jednotlivými vrstvami (užívají se stejné materiály povlaků jako u 3. generace).

Vůbec nejnovější povlaky firem mají mezi podkladem a vlastním povlakem vrstvu speciálního materiálu typu WC-Co. Je tedy zřejmé, že se aplikují jak jednovrstvé, tak i vícevrstvé povlaky, a to podle různých způsobů a podmínek obrábění. Různé druhy povlaků vykazují různé vlastnosti, např. TiC je nejtvrdší a má největší odolnost vůči abrazivnímu opotřebení, naproti tomu TiN je měkký a proto méně otěruvzdorný, ale termodynamicky stabilní a odolný proti tvorbě výmolů na čele nástroje. Al_2O_3 vykazuje největší otěruvzdornost při vysokých teplotách, tedy při vysokých řezných rychlostech. Proto má vícevrstvá technologie velký význam pro optimální kombinaci požadovaných vlastností povlakovaných destiček. Aplikace vícevrstvných povlaků má rostoucí tendenci a řazení vrstev je obvykle v posloupnosti substrát (podklad) - TiC - TiCN - TiN - Al_2O_3 .

1.4.1 Metody povlakování SK

Povlakované slinuté karbidy jsou vyráběny tak, že na podklad z běžného slinutého karbidu typu (v současné době jsou již povlaky většinou nanášeny na podkladové SK, vyrobené speciálně k tomuto účelu) se nanáší tenká vrstva materiálu s vysokou tvrdostí a vynikající odolností proti opotřebení (povlak ve formě tenké vrstvy má vyšší tvrdost i pevnost, než stej-



ný homogenní materiál v jakékoli jiné formě). Tyto výhodné vlastnosti vyplývají zejména z toho, že povlakový materiál neobsahuje žádné pojivo, má o jeden i více řádů jemnější zrnitost a méně strukturních defektů a tvoří bariéru proti difúznímu mechanismu opotřebení nástroje. Podle principu se metody povlakování dělí do dvou základních skupin:

1.4.2 Metoda PVD

Metoda PVD = fyzikální napařování, která je charakteristická nízkými pracovními teplotami. Tato metoda se používá zejména pro povlakování nástrojů z rychlořezných ocelí (nízká teplota zaručuje, že nedojde k tepelnému ovlivnění nástroje), pro povlakování slinutých karbidů se dosud využívala méně často (v posledním období ale dochází k poměrně významnému rozvoji metod PVD a rozšiřování jejich aplikací také v oblasti SK). Povlak je vytvářen napařováním, napařováním nebo iontovým plátováním. Fyzikální proces povlakování probíhá ve středním až vysokém vakuu. Při napařování je čistý kov (obvykle Ti) odpařován pomocí elektrického oblouku.

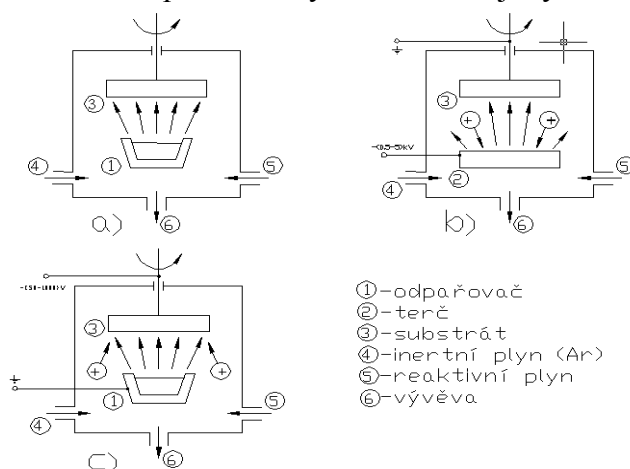
K nevýhodám všech výše uvedených metod PVD patří relativně složitý vakuový systém a požadavek pohybovat povlakovanými předměty, aby bylo zaručeno rovnoměrné ukládání povlaku po celém jejich povrchu (tento požadavek souvisí s tzv. stínovým efektem, který u dané metody způsobuje, že na plochách, které neleží ve směru pohybu odpařovaných částic, se vytváří nedokonalá vrstva povlaku, případně se povlak vůbec netvoří). Mezi *výhody* lze zařadit *možnost povlakování ostrých hran* (tedy i tzv. ostře provedeného ostří nástroje, s *poloměrem zaoblení bříty pod 20 μm*).

1.4.3 Metoda CVD

Metoda CVD = chemické napařování z plynné fáze, která probíhá za vysokých teplot; tato metoda je hlavní metodou povlakování slinutých karbidů a může být realizována ve třech variantách:

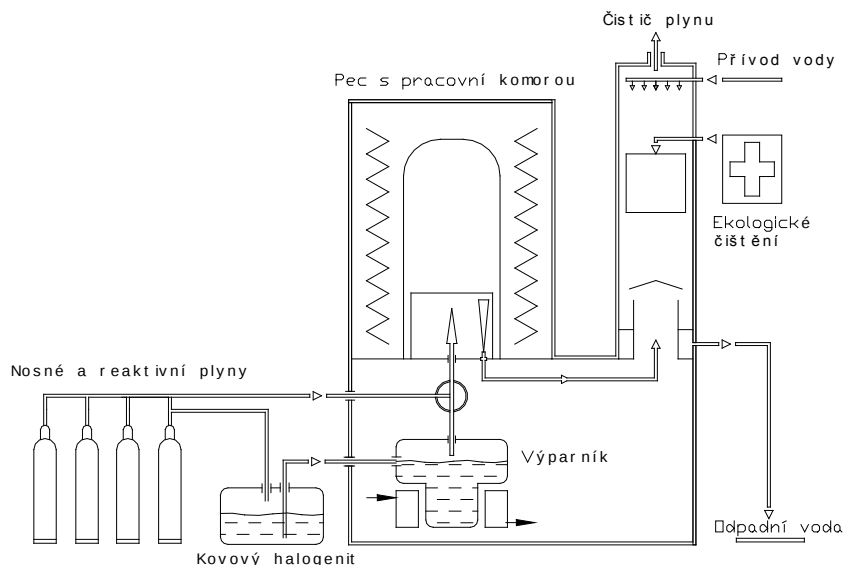
- tepelně indukovaná;
- plazmaticky aktivovaná;
- fotonově indukovaná (např. laserem).

Chemický proces povlakování je založen na reakci plynných chemických sloučenin v bezprostřední blízkosti povrchu podkladového slinutého karbidu a následném uložení produktů reakce na tomto povrchu. Poměrně velkým procentem je v přiváděných plynech zastoupen nosný plyn (např. Ar, H₂), který dopravuje danou směs plynů k povlakovanému předmětu, umožňuje řízení celého procesu a výrazně ovlivňuje rychlost růstu vrstvy povlaku.



Obr. 10.4 Povelkování metodou PVD (a-napařování, b-napařování, c-iontové plátování)





Obr. 10.5 Povlakování metodou CVD

Mezi hlavní výhody povlakování metodou CVD patří:

- vysoká hustota povlaku;
- vynikající adheze k podkladovému materiálu;
- dobrá stechiometrie povlaku;
- povlakování předmětu ze všech stran jako důsledek poměrně vysokých pracovních tlaků plynné směsi (1-100 kPa).

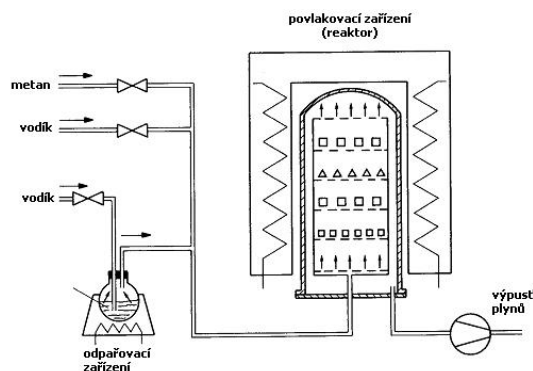
Nevýhodou metody CVD jsou vysoké pracovní teploty, které mohou mít nepříznivý vliv na vlastnosti povlakovaného předmětu po absolvování procesu (netýká se slinutých karbidů). Tím je omezen rozsah podkladových materiálů a proto je současný vývoj dané metody zaměřen zejména na snížení pracovní teploty.

1.4.4 Metoda MTCVD

Na rozdíl od konvenční CVD technologie, při které je teplota nanášení povlaku 1000 - 1040 °C, MTCVD technologie umožňuje použít teploty podstatně nižší (700 - 850 °C). Zatímco u konvenční CVD technologie slouží jako zdroj uhlíku a dusíku plynný metan CH_4 a plynný dusík N_2 , MTCVD metoda využívá jako vstupní sloučeninu acetonitril CH_3CN , též metylkyanid. Jedná se o vysoce toxickou a hořlavou kapalinu. Jako zdroj titanu používají obě technologie chlorid titaničitý TiCl_4 .

Hlavní výhodou MTCVD technologie je to, že v důsledku nižší reakční teploty dochází ke značnému nárůstu houževnatosti, případně jejímu zachování. Mikrotvrdotost běžně připravených karbonitridů má klesající tendenci ve směru od substrátu k povrchu vzorku. Je to logický důsledek faktu, že ve směru narůstání povlaku roste i jeho zrnitost, která je příčinou poklesu mikrotvrdotosti. Zrnitost MT-TiCN vrstvy je nejmenší právě v místech, kde MT-TiCN vrstva začíná růst. Mikrotvrdotost MT-TiCN vrstvy může obecně kolísat od 1600 do 3000 $\text{HV}_{0,05}$ v závislosti na zrnitosti a na reakčních podmínkách nanášení povlaku (tlak, teplota, koncentrace jednotlivých chemických látek).





Obr. 10.6 Povlakování metodou MTCVD

1.5 ŘEZNÁ KERAMIKA

Název keramika byl tradičně spojován s produkty, které byly „vypalovány“ z tvarovaného přírodního materiálu. Při tvarování tohoto typu keramiky tvořili částice silikátů základní fázi uloženou ve fluidním prostředí. Velká část průmyslu, která produkuje tyto poměrně laciné produkty, bude v tomto využití keramiky pokračovat. Postupem času však vzrostly požadavky na použití keramiky v prostředí s podstatně vyššími nároky. Od osmdesátých let dochází k rozvoji tzv. konstrukční keramiky založené na rozvoji takových mikrostrukturních charakteristik, které umožní dosažení speciálních mechanických a tepelně mechanických vlastností. Požadavky na nízkou měrnou hmotnost a tepelnou vodivost, odolnost proti tepelným rázům při zachování potřebné pevnosti a tvrdosti se musely řešit vhodnou kombinací použitých materiálů a makrostruktury.

Moderní definicí je keramika obecně považována jako převážně krystalický materiál, jehož hlavními složkou jsou anorganické sloučeniny nekovového charakteru. Tato definice zahrnuje nejen tradiční keramiku (porcelán, cihly, cement), ale i brousící materiály a řadu nových (speciálních, konstrukčních, strojírenských, průmyslových nebo jinak nazývaných keramických látek jako jsou oxidická keramika (Al_2O_3 , ZrO_2 , BeO ...), ferity, ferroelektrika, nitridy (na bázi Si, B, Al), karbidy (na bázi Si, B) a další. Pro současnou keramiku je charakteristické, že je vyráběna z poměrně čistých surovin a často z čistých výchozích chemikálií jako keramika syntetická. Jsou to látky označované jako keramika krystalická, na rozdíl od tradiční keramiky, která obsahuje i velký podíl skelné (amorfní) fáze. Keramické látky jsou vázány meziatomovými vazbami iontovými a kovalentními. Jejich vazba však není čistě iontová nebo čistě kovalentní. Zpravidla se vyskytují obě vazby zároveň. V krystalové struktuře převažují složité mřížky kubické a hexagonální.

V široce rozvětveném používání obecné keramiky zaujímá oblast technické nebo řezné keramiky zatím relativně malý podíl. Pro její vynikající vlastnosti se jí však otvírají stále nové oblasti použití. Je důležité zdůraznit, že o keramice tak jak ji známe z denního použití (porcelán, kamenina) máme určitou představu. Známé vlastnosti jako křehkost, náchylnost k rozbití, apod. se pak přenáší i na technickou keramiku. Mluvíme-li však o řezné keramice, jedná se o technologicky vyspělé výrobky, které jsou určeny pro extrémní podmínky, kde se požaduje např. vysoká odolnost proti opotřebení, vysoká tepelná stálost, vysoká tvrdost, atd.

1.5.1 Technické použití keramických materiálů

Intenzivní výzkumnou činností byly výrazně zlepšeny některé vlastnosti keramických materiálů. To umožnilo podstatné rozšíření jejich aplikací ve strojírenské výrobě. Charakteristické vlastnosti umožňují používat keramické materiály v těchto oblastech technické praxe:



- tepelné aplikace – odolnost vůči vysokým teplotám, stabilita tvaru při tahu a tlaku i za vysokých teplot, odolnost proti náhlým změnám teploty, nízká tepelná roztažnost, schopnost akumulace tepla, dobrá tepelná vodivost;
- mechanické aplikace – vysoká tvrdost, vysoká odolnost proti opotřebení dobré a stabilní kluzné vlastnosti, nepřítomnost statického náboje, nízká měrná hmotnost, vysoká přesnost tvaru, úzké rozměrové tolerance;
- elektrotechnika, elektronika – výborné izolační vlastnosti, vysoká dielektrická pevnost, velká stabilita výboje, vysoký výkon zhášení výboje, definovaná dielektrická konstanta, dobré vysokofrekvenční vlastnosti, dobré mechanické vlastnosti;
- fyzikální a chemické aplikace – chemická odolnost vůči kyselinám a louhům, chemická inertnost, odolnost vůči korozi a erozi, akumulací a pohlcovací schopnost, velký geometrický a měrný povrch, filtrační schopnosti;
- medicína – biologická slučitelnost, chemická inertnost a stabil., filtrační schopnost;
- stavebnictví – odolnost vůči horku a mrazu, příjemnost na dotyk, hygienické vlastnosti, mechanická stabilita, plynotěsnost, chemická inertnost.

Jednotlivé vlastnosti keramik lze různě kombinovat a měnit podle konkrétního použití na jednotlivé aplikace. Proto se vybrané keramické materiály úspěšně používají pro výrobu řezných nástrojů pro třískové obrábění. Jsou zde s výhodou využívány tyto vlastnosti řezné keramiky:

- vysoká tvrdost;
- odolnost proti mechanickému namáhání;
- odolnost proti působení vysokých teplot;
- odolnost proti opotřebení;
- vysoká trvanlivost a řezivost;
- odolnost proti korozi a chemickým vlivům;
- nízká měrná hmotnost;
- dostupnost základních surovin;
- ekologická nezávadnost;
- příznivá cena.

1.5.2 Historický vývoj

Pravděpodobně vůbec první keramický nástroj byl použit již v době kamenné, kdy člověk používal pískovcové bloky obsahující velké množství SiO_2 k ostření nožů a dalších nástrojů. Tyto pískovcové kotouče se staly po dlouhou dobu brousicím nástrojem číslo jedna.

Počáteční pokusy s využitím keramických řezných nástrojů sahají do 20. let minulého století (keramika na bázi oxidů). První keramický materiál na bázi Al_2O_3 použitelný pro řezný nástroj vyvinula německá firma Degussa v období II. světové války jako pokus o náhradu slinutých karbidů WC-Co. Vzhledem k vysoké křehkosti byly aplikace omezeny na nepřerušovaný řez a k širšímu rozšíření nedošlo, protože technologie výroby nebyla zdaleka propracována tak, aby bylo možno zhotovit nástroj požadovaných vlastností.

První keramické materiály na bázi oxidu hlinitého byly úspěšně aplikovány až koncem 50. let na základě intenzivního výzkumu. Ten byl zaměřen na odstranění hlavních nedostatků (hrubozrnná struktura, nízká ohybová pevnost, nízká odolnost proti teplotním rázům). Masivnějšímu rozšíření bránil i nedostatek dostatečně výkonných strojů s potřebným výkonem a rozsahem otáček vřetene, a to bez ohledu na přesnost. První nástroje obsahovaly většinu oxidu hlinitého (Al_2O_3) a malé množství slinovacích přísad (obvykle okolo 1 %).



Oxid hlinitý má z nástrojových materiálů nejlepší termochemickou stabilitu a vysokou odolnost proti opotřebení, ovšem nízkou odolnost proti vydrolování ostří.

Na začátku 70. let byly vyvinuty keramiky typu $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$, které měly zlepšit odolnost proti vydrolování a spolehlivost keramických řezných nástrojů. Jedná se o dnes nejrozšířenější typ řezné keramiky, která se zasloužila o vstup keramických VBD na trh obráběcích nástrojů. Slinovací proces se postupně změnil z vysokoteplotního lisování na vysokoteplotní izostatické lisování (HIP), a to za účelem snížení ceny nástroje a zvýšení produktivity výroby.

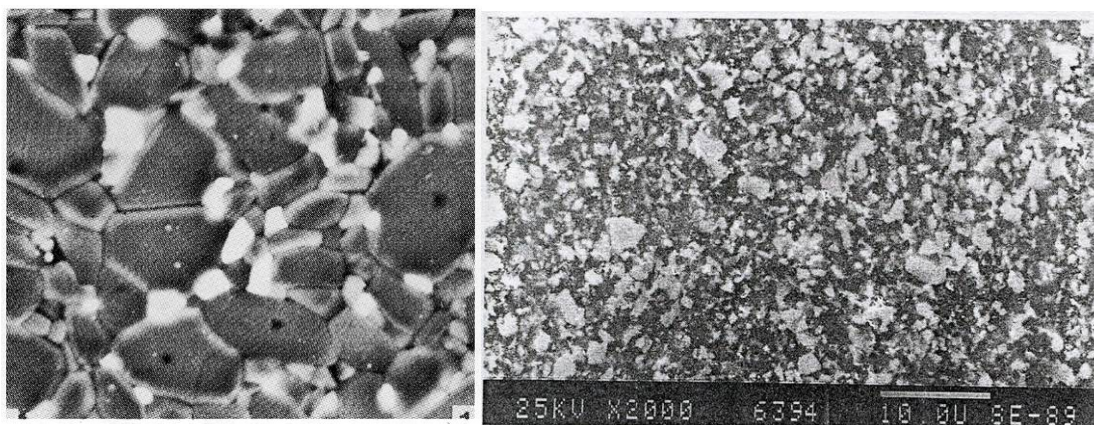
V polovině 80. let byly vyvinuty kompozity Al_2O_3 vyztužené vlákny whiskery (SiC). Karbid křemíku má sice tendenci reagovat se slitinami železa, což zapříčiňuje větší opotřebení nástroje, ovšem přidáním jeho vláken se výrazně zvýší odolnost proti vydrolení a vylamování ostří v důsledku zpevnění a odolnosti proti oxidaci. Výsledkem jsou vynikající řezné výkony těchto materiálů při obrábění superslitin, kde hrozí nebezpečí vylamování ostří. Počátkem 80. let se na trh dostávají i první keramické nástroje na bázi Si_3N_4 . Ve srovnání s oxidickými keramikami se dají používat až při dvojnásobné posuvové rychlosti. Nevýhodou je poměrně rychlé opotřebování, zejména při obrábění ocelí a tvárné litiny.

1.5.3 Rozdělení a značení ŘK

Pro dělení a značení keramických řezných materiálů neexistuje konkrétní norma, jako je tomu např. u slinutých karbidů či nástrojových ocelí. Každý autor si uvádí své rozdělení ŘK. Všeobecně se však přijímá následující dělení:

- na bázi oxidu hlinitého (Al_2O_3);
- čistá (oxidická) - 99,5% Al_2O_3 ;
- směsná - $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2 + \text{CoO}$;
- vyztužená - $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2 + \text{TiC}$...;
- na bázi nitridu křemíku (Si_3N_4) - $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Y}_2\text{O}_3$, $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{TiC}$, sialony.

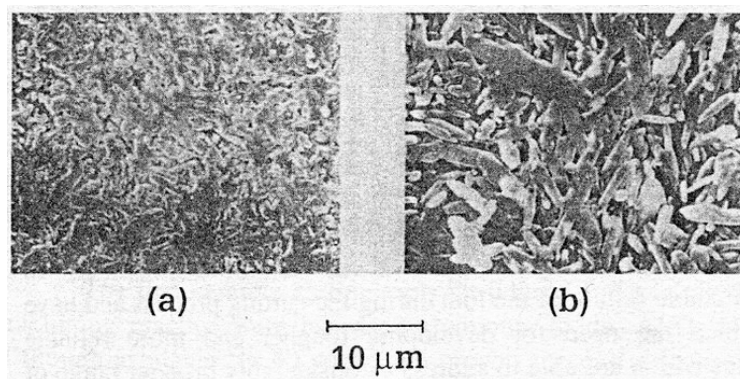
Jednotliví výrobci keramických nástrojů dodávají nástroje v celém rozsahu sortimentu. Obchodní značení konkrétních výrobců odpovídá zvyklostem jednotlivých výrobců. Zlepšení fyzikálních a mechanických vlastností umožnilo rozšířit oblast použití z původního soustružení na obrábění téměř všech materiálů na bázi železa a to i při hrubování a přerušovaném řezu.



a) čistý Al_2O_3

b) $\text{Al}_2\text{O}_3 + 30\% \text{TiC}$

Obr. 10.7 Struktura oxidické keramiky Al_2O_3

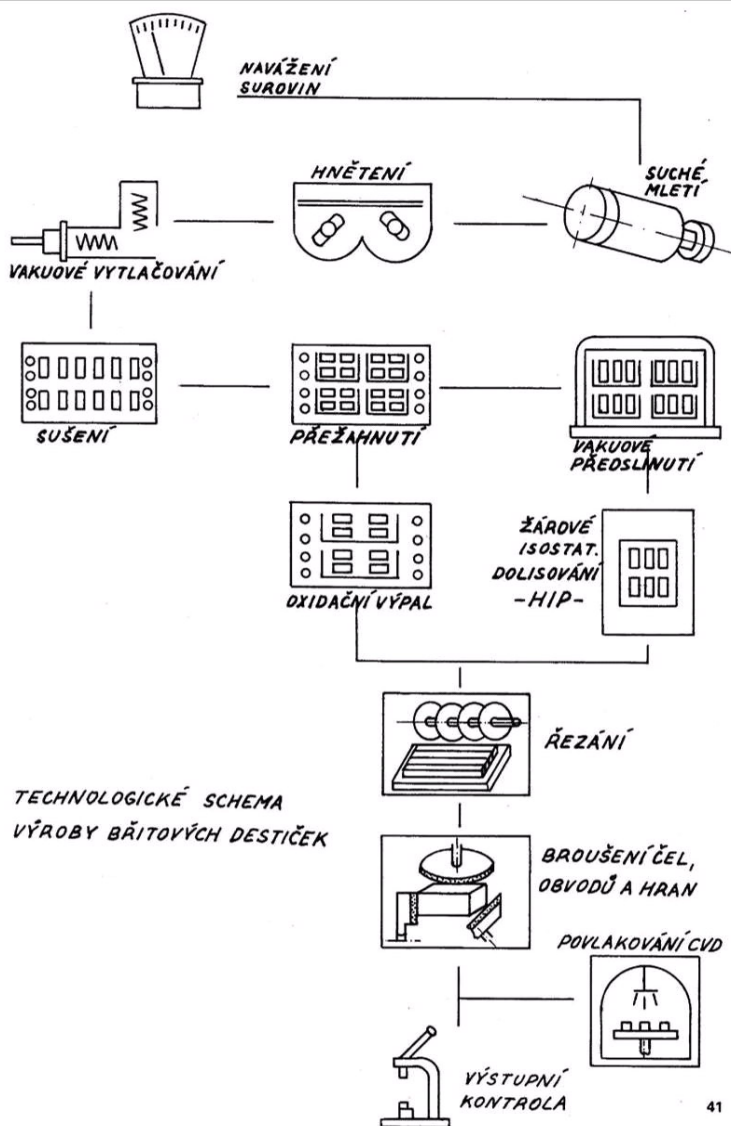
*a) lisováno 90 minut**b) lisováno 400 minut**Obr. 10.8 Struktura nitridické keramiky Si_3N_4*

1.5.4 Výroba řezné keramiky

Proces výroby kompaktních keramických součástí (a tedy i vyměnitelných břitových destiček pro řezné nástroje) je velmi podobný procesu výroby součástí ze slinutých karbidů a cermetů. Zásadní rozdíl je ale v tom, že keramické materiály neobsahují žádný materiál jehož funkcí by bylo spojení jednotlivých zrn tvrdé fáze do jednolitého tělesa. Tato skutečnost výrobu řezné keramiky znesnadňuje a klade vysoké nároky na výrobní zařízení. Další důležitou podmínkou úspěšné výroby je dodržení všech předepsaných parametrů technologického postupu výroby. Vývoj mikrostruktury a slinovatelnost keramických materiálů je možno ovlivnit přidáním přísad. Tyto přísady v průběhu slinování vytvářejí kapalnou fázi. Tímto způsobem lze dosáhnout hustějšího uspořádání částic a rychlejšího i lepšího zhutnění výrobku. Velikost zrn jednotlivých keramických prášků a aditiv se pohybuje kolem 200 nm.

1.5.5 Obecný postup výroby keramických materiálů:

- příprava práškové směsi;
- mletí;
- míchání;
- tvarování;
- sušení;
- předslinování;
- slinování;
- úpravy povrchu.



Obr. 10.9 Technologické schéma výroby VBD z řezné keramiky

1.5.6 Povlakování řezné keramiky

Povlakování řezné keramiky není tak obvyklé jako u slinutých karbidů. Používá se téměř výhradně metoda CVD (Chemical Vapour Deposition). V poslední době se začíná díky firmě CemeCon používat i metoda PVD (Physical Vapour Deposition). Hlavním posláním povlaku je zvýšení houževnatosti pomocí snížení šíření mikrotrhlinek základního materiálu nebo zvýšení otěruvzdornosti řezných hran. Nanáší se jedna vrstva karbidů nebo nitridů kovů (např. TiN, TiCN, apod.) popř. povlak Al_2O_3 na základní materiál Si_3N_4 .

1.5.7 Použití v oblasti obrábění

Řezná keramika patří mezi výkonné řezné materiály. Její nasazení ve strojírenské výrobě vyžaduje, mimo správné volby řezných podmínek, dodržení určitých zásad, aby mohlo být využito jejich výhodných vlastností v plné míře a nevýhodné co nejvíce potlačit. Mezi hlavní podmínky efektivního využití řezné keramiky patří:

- vysoká tuhost systému stroj – nástroj – obrobek (zamezení kmitání jakéhokoliv druhu, které zvyšuje intenzitu opotřebení nástroje);



- použití výkonných obráběcích strojů se širokým rozsahem posuvů a otáček s možností nastavení vysokých řezných rychlostí, plynulá regulace otáček;
- výborný stav obráběcího stroje;
- zabezpečení pevného a spolehlivého upnutí obrobku, zejména při vysokých otáčkách, kdy působí velké odstředivé síly;
- zakrytování pracovní části obráběcího stroje;
- výběr vhodného tvaru a velikosti břitové destičky;
- správná volba tvaru ostří břitové destičky (velikost a sklon negativní fazetky na čele);
- překonání nedůvěry k novému nástrojovému materiálu u technologa i pracovníka, který stroj obsluhuje.

Soustružení

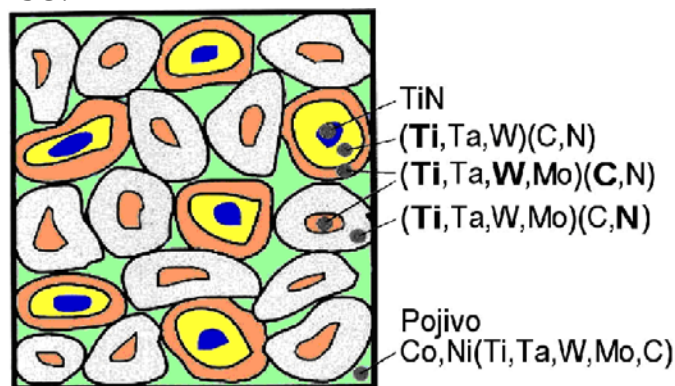
Podobně jako u slinutých karbidů uvádějí jednotliví výrobci doporučené řezné podmínky i pro soustružnické práce svých keramických břitových destiček. U keramických materiálů hraje velmi důležitou roli i otázka chlazení. U většiny druhů keramických vyměnitelných břitových destiček je chlazení chladicí kapalinou výslovně zakázáno. Pro obrábění tvrdých materiálů (kalené oceli, tvrzené litiny) keramickými destičkami je nutné volit poměrně nízké hodnoty hloubky řezu a_p .

Frézování

V počátcích vývoje a výroby byly keramické řezné materiály doporučovány a používány výhradně pro obrábění nepřerušovaným řezem, tedy hlavně soustružení. Postupným vývojem a zlepšováním mechanických vlastností dnes většina výrobců řeznou keramiku doporučuje i pro přerušované řezání. Jednou ze základních podmínek pro použití při přerušovaném řezu je vysoká stabilita systému STROJ – NÁSTROJ – OBROBEK a tedy zamezení vzniku vibrací. Toho se dá úspěšně dosáhnout použitím frézovacích hlav osazených vyšším počtem břitů.

1.6 CERMETY

Název CERMET vznikl složením prvních tří hlásek slov „CERamics (keramika)“ a „METal (kov)“. Má tak vyjadřovat materiál, jehož mechanické vlastnosti vykazují výhodnou kombinaci tvrdosti keramiky a houževnatosti kovu. Jsou velmi rozšířené při dokončovacím obrábění, protože tvrdá fáze cermetů vytváří při obrábění plochy s velmi nízkou drsností povrchu (v důsledku vynikající odolnosti proti adhezi a nízké náchylnosti k reakci s obráběným ocelovým materiálem). Cermety nové generace dosahují hodnot lomové houževnatosti a ohybové pevnosti srovnatelné se slinutými karbidy, které patří do stejné skupiny aplikace dle ISO.



Obr. 10.10 Struktura cermetů



1.6.1 Historický vývoj

Cermety nejsou žádným novým vynálezem, původně byly vyvinuty v rakouské firmě Plansee a byly navrženy tak, aby obešly patenty německé firmy Krupp. V té době byly tyto materiály velmi křehké. První generace použitelných cermetů byla vyvinuta v USA až v polovině 50. let. Tyto materiály však nevyvolaly velkou pozornost ani v USA ani v Evropě, a to zejména v důsledku své nedostatečné houževnatosti. Naproti tomu byly velmi uznávány v Japonsku jako levný a lehce dostupný materiál pro řezné nástroje, protože neobsahují W ani Co. Jejich vývoj byl realizován hlavně v Japonsku, kde našly větší uplatnění. Stimulem vývoje byl nedostatek wolframu v Japonsku a konkurence slinutých karbidů.

1.6.2 Vlastnosti cermetů

Charakteristickou vlastností cermetů je nízká měrná hmotnost, která se pohybuje v rozmezí $5,6 - 7,4 \text{ g.cm}^{-3}$, což je přibližně polovina měrné hmotnosti slinutých karbidů. Jejich hlavní nevýhodou, podobně jako u keramiky je nízká houževnatost, která je sice neustále zvyšována, ale přesto nedosahuje hodnot obvyklých u slinutých karbidů. Jednou z cest, jak zlepšit mechanické vlastnosti slinutých karbidů, cermetů a řezné keramiky, je snižování velikosti zrna tvrdých strukturních složek. Materiály s jemným zrnem vykazují obecně vyšší tvrdost, lomovou houževnatost a pevnost v ohybu, což se výrazně projeví na zvýšení řezivosti i trvanlivosti břitových destiček, které jsou z nich vyrobeny.

1.6.3 Vliv jednotlivých přísad na vlastnosti cermetů

Starší cermety obvykle obsahovaly směs kovů jako Ti, Ta, V, Nb, Mo, W C, N, Ni a Co. Tyto materiály byly obvykle kombinovány, dokud nebylo dosaženo uspokojivých výsledků. Základním pojivem cermetů je nikl, ke kterému je často přidáván kobalt kvůli snížení rozpustnosti Ti v Ni a stabilizaci karbonitridů. Molybden je prvkem, který výrazně zpevňuje tuhý roztok niklu, a proto je do některých cermetů přidáván pro zvýšení pevnosti pojiva.

Dnes se do pojiva namísto kobaltu přidává značné množství chromu, a to pro zvýšení smáčivosti, houževnatosti, vysokoteplotní pevnosti a odolnosti proti oxidaci. Tím se dosáhlo vyšší bezpečnosti při obrábění, širší oblasti aplikace, lepší schopnosti udržovat jakost povrchu a přesnost. Dále byla zlepšena schopnost vykonávat přerušované operace. Zlepšené vlastnosti byly dosaženy v důsledku zdokonalení rovnováhy mezi odporem k plastické deformaci a houževnatosti. Byla zvýšena trvanlivost řezné hrany a zlepšil se odpor k tepelnému praskání.



Obr. 10.11 Vlastnosti přísad na vlastnosti CERMETů

1.6.4 Povlakování cermetů

Cermety mohou být dále povlakovány kvůli prodloužení trvanlivosti břitu nebo zvýšení řezné rychlosti. Pro povlakování se používají hlavně technologie CVD (Chemical vapour deposition) a technologie PVD (Physical vapour deposition). Tloušťka povlaku se u břitových destiček pohybuje od 2 do 15 μm . Nové generace VBD jsou opatřeny jednoduchými, dvojnásobnými, trojnásobnými a dokonce vícenásobnými vrstvami. PVD povlak je pro cermety nejvhodnější. Povlak nanášený metodou CVD často používaný u slinutých karbidů typu WC/Co se pro cermety nehodí. Způsobuje totiž často v cermetovém substrátu vznik vlasových trhlinek, které mohou být příčinou výlomů břitů.

1.6.5 Zásady pro použití cermetů

Při používání vyměnitelných břitových destiček z cermetů je pro jejich optimální využití nutné dodržet několik obecných zásad:

- při soustružení čelní plochy se volí posuv směrem od povrchu obrobku k jeho ose, tedy od maximální řezné rychlosti po minimální;
- při soustružení na čisto má být konstantní šířka záběru ostří po celou dobu soustružení a má zde být předhrubovaný profil podle tvaru součásti;
- zápichy soustružit na několik řezů;
- soustružit s použitím řezné kapaliny jen při malých průřezech třísky, šířka záběru ostří do 0,5 mm a posuv na otáčku do 0,2 mm;
- soustružení závitů na několik záběrů při hloubce řezu do 0,25 mm;
- soustružit jen při nepřerušovaných řezech;
- při zapichování možné chlazení pro posuv na otáčku do 0,15 mm;
- frézovat bez použití řezné kapaliny;
- frézovat sousledným způsobem, kdy se mění průřez třísky od maximální po minimální hodnotu.

1.7 SYNTETICKÉ VELMI TVRDÉ MATERIÁLY

Jsou to technické materiály, které svými vlastnostmi (především tvrdostí a otěruvzorností) převyšují dosud známé běžné řezné materiály. Radíme zde polykrystalické materiály na bázi kubického nitridu boru (KBN) a na bázi diamantu (PKD). Pro vysokou cenu a u PKD někdy ochotnou reakci s obráběným materiálem se zatím příliš nerozšířily. Používají se vesměs pro velkosériovou výrobu a speciální metody obrábění.

1.7.1 Kubický nitrid boru

Měkkou hexagonální modifikací vystupuje nitrid boru v určité analogii s uhlíkem, kde krystalizuje se stejným typem mřížky jako grafit a tvrdou modifikací, která má identickou strukturu mřížky jako diamant. Přírodní CBN není vhodný pro nástroje s definovanou geometrií břitu, neboť na rozdíl od hexagonálního křemíku je měkký. Teprve transformací na kubickou mřížku za vysokých teplot a tlaků se stává kubický nitrid boru druhým nejtvrdějším materiálem po diamantu.

Nástroje osazené kubickým nitridem boru se používají při obrábění bílé litiny s tvrdostí nad 50 HRC, legované litiny a tvrdých návarů a stelitů. Při opracování těchto materiálů



dosáhneme mnohem vyšší životnosti nástroje než při obrábění slinutými karbidy či řeznou keramikou a dosahovaná odolnost proti teplotnímu namáhání se blíží 1500 °C.

Pro své vlastnosti, vysokou životnost a schopnost dosahovat vysoké jakosti povrchu, jsou vhodné jako nástroje nahrazující broušení třískovým obráběním. Je to z důvodu jak ekonomických, tak i ekologických.

1.7.2 Diamant

Díky vysoké vazebné energii kubické mřížky je nejtvrdějším známým materiálem. Diamanty dělíme v zásadě na dvě skupiny: přírodní a syntetické. Oba tyto druhy se vyskytují ve tvaru monokrystalickém a polykrystalickém. Synteticky vyrobené diamanty jsou výhodnější jak ekonomicky, tak i technologicky.

Nástroje a VBD osazené diamantem jsou používány pro obrábění neželezných kovů a slitin (hliník, měď, mosaz, bronz, titan a jejich slitiny). Jedná se vesměs o materiály které nemají afinitu k uhlíku. Stále více jsou tyto nástroje nasazovány při obrábění keramických a plastických hmot s abrazivními plnidly, grafitové hmoty, gumy a jiné kompozitní materiály.



2 KONTROLNÍ OTÁZKY

- Jaké jsou požadavky kladené na řezné nástroje?
- Jaké znáte materiály řezných nástrojů?
- Nakreslete oblast aplikací pro jednotlivé řezné materiály.
- Do jakých skupin dělíme řezné materiály dle IS 513 a jak značíme?
- Jaké znáte metody povlakování řezných nástrojů?
- Jaké znáte druhy nástrojů z řezné keramiky?
- K čemu lze a k čemu nelze použít nástroje z diamantu?
- Co je to CERMET a jaké jsou podmínky jeho nasazení?
- Jaké známe druhy a k čemu jsou vhodné nástroje z rychlořezných ocelí?



3 PŘEDNÁŠKOVÝ TEXT SE VZTAHUJE K TĚMTO OTÁZKÁM.

- 9. Řezné materiály – nástrojové oceli, SK
- 10. Řezné materiály – keramika, KBN, diamant



4 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BILÍK, O. *Obrábění I. (2.Díl): Fyzikálně mechanické záležitosti procesu obrábění*. Ostrava: Vysoká škola báňská –TU Ostrava, 2002. 80 s. ISBN 80-248-0033-0.
- [2] BILÍK, O. *Obrábění II. (1.Díl): Fyzikálně mechanické záležitosti procesu obrábění*. Ostrava: Vysoká škola báňská –TU Ostrava, 1994. 132 s. ISBN 80-7078-228-5.
- [3] BILÍK, O. *Obrábění II. (2.Díl)*. Ostrava: Vysoká škola báňská –TU Ostrava, 2001. 118 s. ISBN 80-7078-994-1.
- [4] BRYCHTA, J. *Obrábění I. Návod pro cvičení 1. část*. Ostrava: Vysoká škola báňská - TU Ostrava, 1998. 84 s. ISBN 80-7078-436-9.
- [5] BRYCHTA, J. *Obrábění I. Návod pro cvičení 2. část*. Ostrava: Vysoká škola báňská - TU Ostrava, 1998. 120 s. ISBN 80-7078-470-9.
- [6] BRYCHTA, J. *Výrobní stroje obráběcí*. Ostrava: Vysoká škola báňská - TU Ostrava, 2003. 150 s. ISBN 80-248-0237-6.
- [7] HOFMAN, P. *Technologie montáže*. Plzeň: Vydavatelství Západočeské univerzity Plzeň, 1997. 90 s. ISBN 80-7082-382-8.
- [8] KOČMAN, K. *Speciální technologie obrábění*. Brno: PC-DIR Real, s.r.o., 1993. 213 s. ISBN 80-214-1187-2.
- [9] KOČMAN, K., PROKOP, K. *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERN Brno, s.r.o., 2001. 274 s. ISBN 80-214-196-2.
- [10] KRÍŽ, R., VÁVRA, P. a kol. *Strojírenská příručka*. Praha: Scientia, spol. s r. o., 1996. 220 s. ISBN 80-7183-024-0.
- [11] TICHÁ, Š. *Strojírenská metrologie část 1*. Ostrava: Vysoká škola báňská –TU Ostrava, 2004. 112 s. ISBN 80-248-0672-X.
- [12] VIGNER, M., PŘIKRYL, Z. a kol. *Obrábění*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, n. p., 1984. 808 s.
- [13] VLACH, B. a kol. *Technologie obrábění a montáží*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, n. p., 1990. 472 s. ISBN 80-03-00143-9.
- [14] HAVRILA, M., ZAJAC, J., BRYCHTA, J., JURKO, J. *Top trendy v obrábění 1. část – Obráběné materiály*. Žilina: MEDIA/ST, s. r. o., 2006. ISBN 80-968954-2-7.
- [15] JURKO, J., ZAJAC, J., ČEP, R., *Top trendy v obrábění 2. část – Nástrojové materiály*. Žilina: MEDIA/ST, s. r. o., 2006. ISBN 80-968954-2-7.
- [16] VASILKO, K., HAVRILA, M., NOVÁK – MARCINČIN, J., MÁDL, J., ZAJAC, J. *Top trendy v obrábění 3. část – Technologická obrábění*. Žilina: MEDIA/ST, s. r. o., 2006. ISBN 80-968954-2-7.
- [17] MONKA, P., PAULIKOVÁ, A. *Top trendy v obrábění 4. část – Upínanie, prípravky a meradlá*. Žilina: MEDIA/ST, s. r. o., 2007. ISBN 80-968954-2-7.
- [18] PŘIKRYL, Z., MUSÍLKOVÁ, R. *Teorie obrábění*. Praha : SNTL – Nakladatelství technické literatury, n. p., 1971. 200 s.
- [19] HUMÁR, A. *TECHNOLOGIE I TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 1. část*. Studijní opory pro magisterskou formu studia "Strojírenská technologie". Brno: VUT Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003. 138 s. Dostupné na World Wide Web: <http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/TI_TO-1cast.pdf>.
- [20] HUMÁR, A. *TECHNOLOGIE I TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 2. část*. Studijní opory pro magisterskou formu studia "Strojírenská technologie". Brno: VUT Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2004. 94 s. Dostupné na World Wide Web: <http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/TI_TO-2cast.pdf>.



- [21] HUMÁR, A. *TECHNOLOGIE I TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 3. část*. Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program "Strojírenství". Brno: VUT Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2005. 57 s. Dostupné na World Wide Web: <http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/TI_TO-3cast.pdf>.
- [22] HUMÁR, A. *Výrobní technologie II* [online]. Studijní opory pro podporu samostudia v oboru "Strojírenská technologie" BS studijního programu "Strojírenství". VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2002. 84 s. Dostupné na World Wide Web: <http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/VyrobniTechnologie_II.pdf>.
- [23] AB SANDVIK COROMANT - SANDIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění - Kniha pro praxe*. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.
- [24] STEPHENSON, D. A., AGAPIOU, J. S. *Metal Cutting Theory and Practice*. New York: Marcel Dekker, Inc., 1996. 905 s. ISBN 0-8247-9579-2.
- [25] VASILKO, K., NOVÁK – MARCINČIN, J., HAVRILA, M. *Výrobné inžinierstvo*. Prešov: Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove, 2003. 424 s. ISBN 80-7099-995-0.
- [26] PILC, J., STANČEKOVÁ, D. *Základy stavby obrábacích strojů*. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 2004. 110 s. ISBN 80-8070-281-0.
- [27] VASILKO, K., HRUBÝ, J., LIPTÁK, J. *Technológia obrábania a montáže*. Bratislava: Alfa, š. p., 1991. 494 s. ISBN 80-05-00807-4.

