VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ŘEZNÉ MATERIÁLY NA BÁZI DIAMANTU A JEJICH VYUŽITÍ V PRAXI
CUTTING MATERIALS BASED ON DIAMOND AND THEIR USE IN PRACTICE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE Vilém Nonn
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. Tomáš Trčka
SUPERVISOR

BRNO 2019

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	**Vilém Nonn**
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	**Ing. Tomáš Trčka**
Akademický rok:	2018/19

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 bakalářské práce:

Řezné materiály na bázi diamantu a jejich využití v praxi

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Řezným procesem je nazýván vlastní proces fyzikálně-mechanického oddělování materiálu obrobku břitem nástroje, jehož problematika zahrnuje mnoho vědních oborů. Jedním ze základních aspektů pro správný řezný proces je volba řezného materiálu dle materiálu obráběného. Vzhledem ke svým vlastnostem byl do obráběcího procesu implementován i minerál s názvem diamant. Konstrukční materiály založené na bázi diamantu jsou dnes standardně synteticky vyráběny v rozdílných formách a odlišnými metodami. To má následně vliv i na použití dané formy diamantu jako řezného materiálu.

Cíle bakalářské práce:

- stručný rozbor technologie obrábění a řezného procesu,
- rozdělení a rozbor řezných materiálů se zaměřením na materiály diamantové,
- stručná charakteristika výroby jednotlivých typů diamantů,
- rozdělení diamantů pro základní technologické operace a materiály obrobků,
- nové trendy v řezných nástrojích s řeznou části z diamantu.

Seznam doporučené literatury:

DAVIM, J. P., ed. Traditional Machining Processes [online]. New York: Springer, 2015 [cit. 2018-10-14]. ISBN 978-3-662-45088-8. Dostupné z: 10.1007/978-3-662-45088-8.

CHEN, Y. a L. ZHANG. Polishing of diamond materials: Mechanisms, Modeling and Implementation [online]. New York: Springer, 2013 [cit. 2018-10-13]. ISBN 978-1-84996-408-1. Dostupné z: 10.1007/978-1-84996-408-1

HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Praha: MM publishing, 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.

HOWARD, T. H., 1919-2008. South Jordan, Utah: Legacy Books, 2012. 566 s. ISBN 978-0-9856830-0-9. Dostupné také z: http://www.htracyhall.org/featured-content.php.

RAHIM, M. Z., G. LI, S. DING, J. MO a M. BRANDT. Electrical discharge grinding versus abrasive grinding in polycrystalline diamond machining-tool quality and performance analysis. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology [online]. 2015, 85(1-4), 263-277 [cit. 2018-10-14]. DOI: 10.1007/s00170-015-7935-z. ISSN 02683768. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/s00170-015-7935-z.

FOREJT M. a M. PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

KUDELA, M. Příručka obrábění: kniha pro praktiky. Praha: Sandvik CZ a Scientia, 1997. 857 s. ISBN 91-972299-4-6.

ZEMČÍK, O. Nástroje a přípravky pro obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. 193 s. ISBN 80-2147-2336-6.

DVOŘÁK, L. Nástroje se silnou vrstvou CVD-diamantu. MM Průmyslové spektrum [online]. 2013, (12), 62 [cit. 2018-10-15]. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-se-silnou-vrstvou-cvd-diamantu.html.

MONTEIRO, S. N., A. L. D. SKURY, M. G. DE AZEVEDO a G. S. BOBROVNITCHII. Cubic boron nitride competing with diamond as a superhard engineering material – an overview. Journal of Materials Research and Technology [online]. 2013, 2(1), 68-74 [cit. 2018-10-20]. DOI: 10.1016/j.jmrt.2013.03.004. ISSN 22387854. Dostupné z: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785413000057.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19.

V Brně, dne 24. 10. 2018

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ DĚKANÁT L. S. 11

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Řezné materiály na bázi diamantu patří mezi významné řezné materiály využívané v dnešním strojírenství. Unikátní vlastnosti diamantu umožňují efektivně obrábět i těžkoobrobitelné materiály. Současné technologie syntézy umožňují úpravou parametrů syntézy vyrobit diamant o požadovaných vlastnostech. Pro efektivní využití diamantových nástrojů je nutné zvolit diamant s vhodnými charakteristikami vzhledem k aplikaci.

Klíčová slova

diamantové řezné materiály, syntéza diamantu, PKD nástroje, CVD diamantové nástroje, aplikace diamantových nástrojů

ABSTRACT

Cutting tools based on diamond belong to important cutting tools used in today's mechanical engineering. The unique properties of diamond enable it to machine effectively even difficult-to-machine materials. Currently it is possible to manufacture particular sort of diamond by adjusting the parameters of synthesis. To use diamond tools efficiently, it is necessary to choose a diamond with appropriate application characteristics.

Key words

diamond cutting tools, diamond synthesis, PCD tools, CVD diamond tools, applications of diamond cutting tools

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NONN, Vilém. *Řezné materiály na bázi diamantu a jejich využití v praxi*. Brno 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 51 s. Vedoucí práce Ing. Tomáš Trčka.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Řezné materiály na bázi diamantu a jejich využití v praxi** vypracoval/la samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum	Vilém Nonn

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Tomáši Trčkovi za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

PROHLÁŠENÍ 4
PODĚKOVÁNÍ 5
OBSAH 6
ÚVOD 8
1 Technologie obrábění a řezný proces 9
1.1 Obrobek 9
1.2 Nástroj 9
1.3 Pohyby při obrábění 10
2 PŘEHLED NÁSTROJOVÝCH MATERIÁLŮ 11
2.1 Nástrojové oceli 11
2.2 Slinuté karbidy 12
2.3 Řezná keramika 12
2.4 Cermety 12
2.5 Supertvrdé řezné materiály 12
3 DIAMANT JAKO PRŮMYSLOVÝ MATERIÁL 13
4 PŘÍRODNÍ DIAMANT 16
4.1 Vznik a těžba 16
4.2 Vlastnosti 17
5 SYNTETICKÝ DIAMANT 18
5.1 HPHT syntéza 18
5.1.1 Monokrystalický HPHT diamant 19
5.1.2 PKD 19
5.2 CVD syntéza 21
5.2.1 Monokrystalický CVD diamant 22
5.2.2 CVD diamantové povlaky a vrstvy 22
6 ŘEZNÉ NÁSTROJE NA BÁZI DIAMANTU 24
6.1 PKD nástroje 24
6.1.1 Vlastnosti 24
6.1.2 Aplikace 27
6.1.3 Opotřebení 29
6.2 CVD nástroje 30
6.2.1 Vlastnosti 31

6.2.2 Aplikace 33
6.2.3 Opotřebení 34
6.3 Diamantové brousící kotouče 35
6.3.1 Vlastnosti 35
6.3.2 Aplikace 36
6.3.3 Opotřebení 37
6.4 Monokrystalické nástroje 37
6.4.1 Přírodní monokrystal 37
6.4.2 HPHT monokrystal 38
6.4.3 CVD monokrystal 38
6.5 Diamantové pasty 39
7 NOVÉ TRENDY 40
7.1 Diamantové nástroje s utvařečem třísek 40
7.2 DLC povlaky 41
ZÁVĚR 42
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 43
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK 51

ÚVOD

Unikátních vlastností diamantu, jakožto nejtvrdšího známého minerálu v přírodě, využíval člověk už dávno v minulosti. Nejdřív byl diamant používán na opracování ostatních minerálů. Od té doby postupně rostla oblast jeho využití. Výzkum a rozvoj v oblasti konstrukčních materiálů, zejména v 19. století, způsobil rostoucí nároky na jejich obrábění z důvodu zhoršené obrobitelnosti. To vedlo k vývoji řezných materiálů s uplatněním diamantu.

Diamant patří mezi supertvrdé řezné materiály. Díky svým vlastnostem je vhodný pro obrábění vysoce abrazivních a těžkoobrobitelných materiálů. Používá se převážně při soustružení, frézování, vrtání, broušení, leštění a řezání. Obrábění pomocí diamantových řezných nástrojů je v porovnávání s jinými řeznými materiály několikanásobně efektivnější. Nástroje ale nejsou vhodné pro aplikace, kde je během řezného procesu dosahováno vysokých teplot.

Zvládnutí technologie syntézy umělého diamantu otevřelo nové možnosti při použití diamantu jako řezného materiálu. Je k dispozici široký sortiment diamantových sort a diamantových řezných nástrojů. Znalost charakteristik diamantové sorty a nástroje je důležitá pro optimální použití a přesné vymezení oblasti aplikace.

1 TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ A ŘEZNÝ PROCES

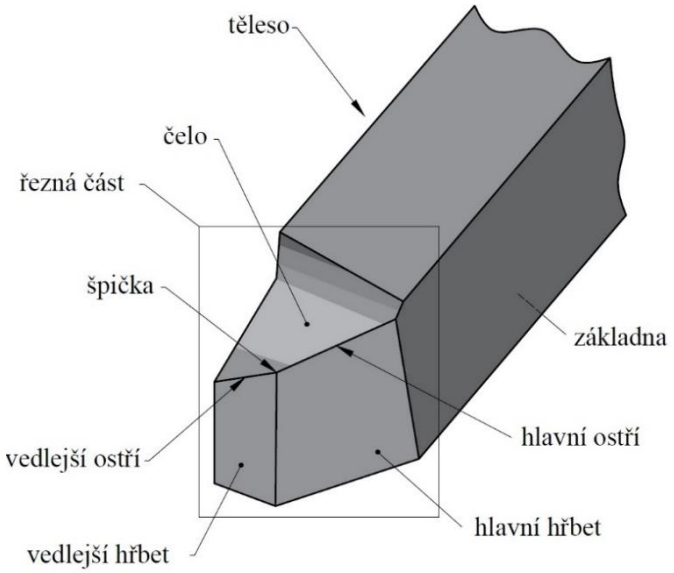
Obrábění je technologický proces, který patří mezi nejvýznamnější výrobní metody strojírenské technologie. Technologie obrábění se jako vědní obor zabývá vzájemnými souvislostmi a faktory obráběcího procesu. Zkoumání tohoto procesu zahrnuje téměř všechny přírodní vědy. Obráběním se vytváří povrchy obrobku konkrétních tvarů, rozměrů a jakostí. Toho je dosaženo řezáním, což je proces fyzikálně-mechanického oddělování materiálu obrobku ve tvaru třísky za určitých řezných podmínek. Řezný proces se v závislosti na způsobu oddělování materiálu dělí na kontinuální (soustružení, vrtání, vyvrtávání), diskontinuální (hoblování, obrážení) a cyklický (frézování, broušení). Obrábění se využívá pro výrobu součástí, případně pro výrobu nástrojů využívaných při jiných výrobních technologiích [1, 2, 3].

1.1 Obrobek

Obrábění probíhá v soustavě stroj – nástroj – obrobek – přípravek. Obrobek je označení obráběného nebo již obrobeného předmětu. Z geometrického hlediska je charakterizován obráběnou plochou (část povrchu obrobku, která má být obrobena), obrobenou plochou (plocha získaná jako výsledek řezného procesu) a přechodovou plochou (okamžitá plocha obrobku, vytvořená působením ostří řezného nástroje). Obrobená plocha je hlavním výstupem obráběcího procesu. Z technologického hlediska je určena svými rozměry, tvarem, polohou, strukturou povrchu a vlastnostmi povrchové vrstvy [2, 3, 4].

1.2 Nástroj

Realizaci řezného procesu umožňuje řezný nástroj. Nástroj svou pracovní částí (břitem) vniká do materiálu a odděluje z něho částice ve tvaru třísky. Nástroj lze z geometrického hlediska charakterizovat jeho prvky, plochami, ostřími a rozměry ostří, viz obr. 1.1. Břit je prvek řezné části nástroje ohraničený čelem a hřbetem. Používají se jednobřité i vícebřité nástroje. Čelo je plocha, případně soubor ploch, po kterých je odváděna tříska. Hřbet je plocha nebo soubor ploch, které během řezného procesu směřují k ploše obrobku. Nástroj je upnut do stroje upínací částí (stopkou) [2, 3, 4].



Obr. 1.1 Základní prvky, plochy a ostří soustružnického nože [2].

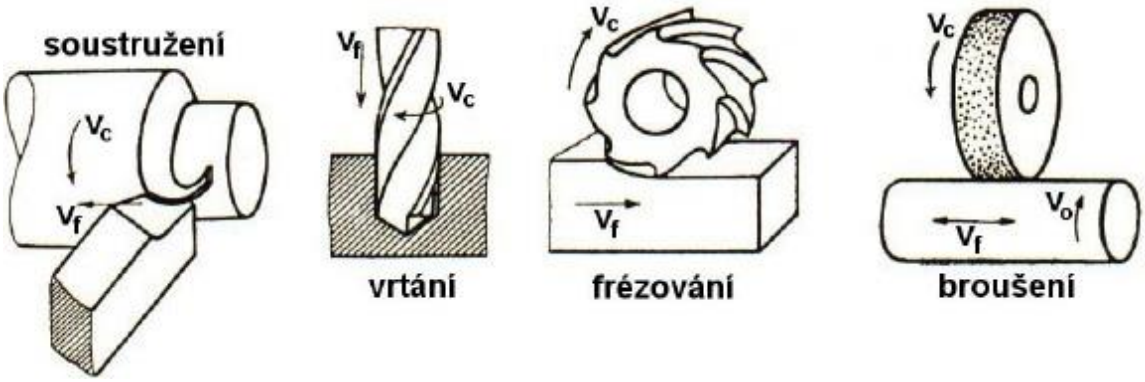
Geometrie nástroje ovlivňuje velikost řezných sil, teplotu řezání, podmínky tvorby třísky, hospodárnost obrábění, strukturu povrchu obrobku nebo vlastnosti povrchové vrstvy obrobené plochy. Vhodná geometrie nástroje se volí na základě vlastností obráběného materiálu, vlastností nástrojového materiálu, řezných podmínek a požadovaných vlastností obrobku a obráběné plochy [2].

1.3 Pohyby při obrábění

Obrábění je založeno na vzájemném pohybu nástroje a obrobku, který umožňuje úběr materiálu. Tuto problematiku popisuje kinematika řezného procesu.

- **Hlavní pohyb** je realizován obráběcím strojem a jedná se o vzájemný pohyb mezi nástrojem a obrobkem. Může být přímočarý, rotační nebo složený. Např. při soustružení je hlavní pohyb rotační a koná ho obrobek, při frézování a vrtání je hlavním pohybem rotace nástroje. Směr hlavního pohybu je definován jako směr okamžitého hlavního pohybu uvažovaného bodu ostří vzhledem k obrobku. Řezná rychlost $\mathbf{v_c}$ je určena jako okamžitá rychlost hlavního pohybu uvažovaného bodu ostří vzhledem k obrobku [2, 3].
- **Posuvový pohyb** realizuje obráběcí stroj a jedná se o další vzájemný pohyb mezi nástrojem a obrobkem. Může být postupný nebo plynulý. Směr posuvového pohybu je určen směrem okamžitého posuvového pohybu uvažovaného bodu ostří vzhledem k obrobku. Posuvová rychlost $\mathbf{v_f}$ je vyjádřena jako okamžitá rychlost posuvového pohybu v uvažovaném bodě ostří vzhledem k obrobku [2, 3].
- **Řezný pohyb** je výsledný vzájemný pohyb nástroje vůči obrobku. Vznikne součtem vektorů hlavního a posuvového pohybu. Směr řezného pohybu je dán směrem okamžitého řezného pohybu uvažovaného budu ostří vzhledem k obrobku. Rychlost řezného pohybu $\mathbf{v_e}$ je okamžitá rychlost řezného pohybu uvažovaného bodu ostří vzhledem k obrobku [2, 3].
- **Přísuv** je pohyb nástroje nebo obrobku, kterým se nástroj nastavuje do požadované pracovní polohy na příslušnou šířku záběru hlavního ostří $\mathbf{a_p}$ [2, 3].

Na obr. 1.2 je zobrazen hlavní a posuvový pohyb u některých metod obrábění.

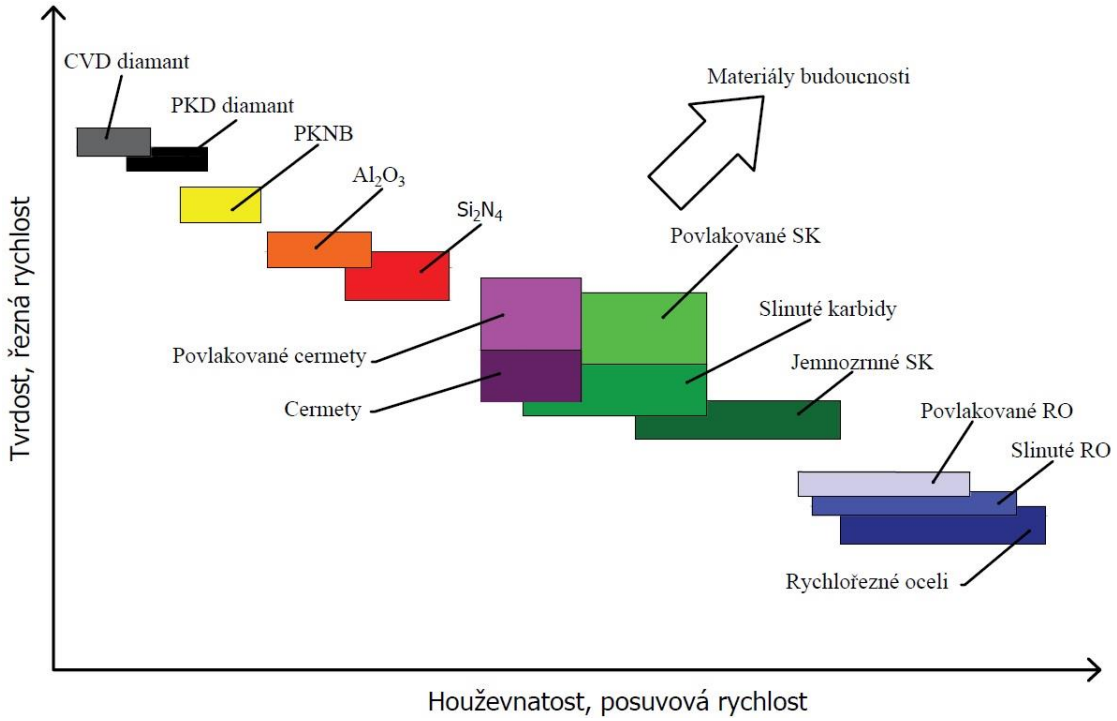


Obr. 1.2 Hlavní a posuvový pohyb pro některé metody obrábění [2].

2 PŘEHLED NÁSTROJOVÝCH MATERIÁLŮ

Volba řezného materiálu vzhledem k aplikaci má zásadní vliv na produktivitu a efektivitu obrábění. V současné době existuje široká škála řezných materiálů. To je způsobeno dlouholetým a intenzivním výzkumem a vývojem v této oblasti. Vývoj řezných materiálů úzce souvisí s rozvojem konstrukčních materiálů a také s vývojem nových obráběcích strojů. Při zavedení nového konstrukčního materiálu je nutné zajistit jeho efektivní obrábění. Rozvoj obráběcích strojů vedl ke zlepšení jejich vlastností, což umožnilo implementovat řezné materiály jako řezná keramika a diamant, které kladou vysoké nároky na obráběcí stroj. Pro využití potenciálu řezných materiálů je navíc zapotřebí dosáhnout požadovaných parametrů obrábění [1, 5].

Nejintenzivnější vývoj probíhal ve 20. století. Příkladem rozvoje průmyslu může být porovnání času výroby stejné součásti na začátku a konci 20. století. Čas výroby dosáhl redukce ze 100 minut na 1 minutu obrábění. Na obr. 2.1 je znázorněn vliv mechanických vlastností řezného materiálu na pracovní podmínky [1, 3].



Obr. 2.1 Vliv mechanických vlastností řezného materiálu na pracovní podmínky [5].

2.1 Nástrojové oceli

Nástrojové oceli (dále „NO“) se začaly používat už ve druhé polovině 19. století, na začátku průmyslové revoluce. Postupným rozvojem, převážně změnou chemického složení, vznikly nové druhy NO s lepšími vlastnostmi a vyšší výkonností. NO je specifický typ vysoce kvalitní oceli, která je vhodná pro výrobu řezných nástrojů. V současnosti se spíše používají moderní řezné materiály, které mají ve většině případů lepší vlastnosti. Přesto mají NO jako řezný materiál stále uplatnění hlavně proto, že mají vysokou tvrdost za zvýšených

teplot, odolnost proti opotřebení a houževnatost. Požadované vlastnosti NO je možné získat změnou chemického složení, tepelným zpracováním nebo úpravou povrchu [1, 7].

2.2 Slinuté karbidy

Slinuté karbidy (dále „SK“) se začaly využívat ve 30. letech 20. století. Od té doby došlo k jejich masovému rozšíření a v současnosti se používají u většiny řezných nástrojů. SK zaznamenaly kvalitativní posun vpřed v řezných materiálech, protože umožnily několikanásobné zvýšení řezného výkonu nástrojů. Např. v porovnání s NO bylo možné obrábět vyššími řeznými rychlostmi. SK jsou tvořeny velmi tvrdými karbidovými částicemi těžkotavitelných prvků (wolfram, titan, tantal, chrom) v kovové vazbě. Vyrábějí se práškovou metalurgií, která spočívá ve výrobě předmětů ze směsí kovových i nekovových prášků, jež se lisují a slinují za teploty nižší, než je teplota tavení. SK se vyznačují vysokou tvrdostí, odolností proti opotřebení při vysokých teplotách, odolností proti korozi, pevností v tlaku, špatnou tepelnou a elektrickou vodivostí a malou pevností v ohybu [8, 9].

2.3 Řezná keramika

Počátkem 20. století vznikaly první keramické nástroje, které ale z důvodu špatné kvality a nesprávného používání dosahovaly nízké trvanlivosti. Od té doby zaznamenala řezná keramika výrazný posun vpřed. Efektivnímu využití řezné keramiky napomohl také rozvoj obráběcích strojů a metod obrábění. Keramické řezné materiály jsou tvrdé, mají vysokou tvrdost za tepla a chemicky nereagují s materiálem obrobku. Odolnost vůči teplotě je vyšší než u slinutých karbidů. Vyznačují se dobrou trvanlivostí břitu a mohou být použity při vysokých řezných rychlostech. Při správném použití je možné odebírat velký objem materiálu. Své výhody uplatňují keramické materiály zejména při obrábění litiny nebo ušlechtilých ocelí [1, 6].

2.4 Cermety

Cermety jsou řezné materiály, u kterých je karbid wolframu nahrazen převážně karbidem titanu, nitridem titanu nebo karbonitridem titanu s niklovým nebo kobaltovým pojivem. Dříve se jednalo o materiál pro dokončovací operace. Dnes už ale existují druhy např. pro frézování nebo soustružení korozivzdorných ocelí. Cermety se vyznačují vysokou odolností proti difuznímu a oxidačnímu opotřebení, vysokou chemickou stabilitou, malým sklonem k vytváření nárůstků a tvrdostí za tepla [1, 6].

2.5 Supertvrdé řezné materiály

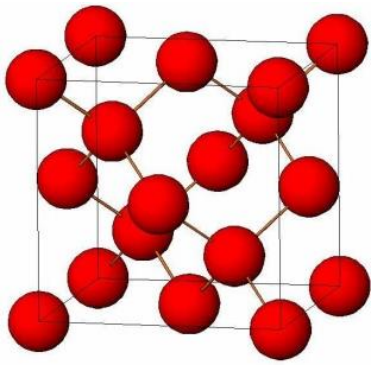
Mezi supertvrdé řezné materiály patří diamant a kubický nitrid boru (dále „KNB“). KNB se ve větší míře začal používat až v 70. letech 20. století. Jeho krystalografická struktura se podobá struktuře diamantu. Tvrdost KNB je 4 000–5 000 HV. Vyznačuje se odolností proti abrazivnímu opotřebení, dobrou chemickou stabilitou, vysokou tvrdostí i při extrémních teplotách a vysokou tepelnou vodivostí. Na rozdíl od diamantu je KNB stabilní za vyšších teplot a je s ním možné obrábět železné kovy. KNB se používá při obrábění nástrojových ocelí, kalených korozivzdorných ocelí, perlitické litiny, kalené litiny atd. Polykrystalický KNB (dále „PKNB“) se v praxi používá jako tenká vrstva o tloušťce menší než 5 μm na destičkách ze SK nebo jako kompaktní vyměnitelná břitová destička. Destičky se následně lisují na substrát, nejčastěji ze SK [1, 10]. Diamant jako řezný materiál je podrobněji rozebrán v následujících kapitolách.

3 DIAMANT JAKO PRŮMYSLOVÝ MATERIÁL

Diamant patří společně s grafitem k nejvýznamnějším z několika známých alotropických modifikací uhlíku. Monokrystalický diamant je na 10. pozici v Mohsově stupnici tvrdosti, je to tedy nejtvrdší známá látka volně se vyskytující v přírodě. Diamant je chemicky odolný, má nejlepší známou tepelnou vodivost ze všech přírodních materiálů a jeho mimořádná tvrdost mu umožňuje odolávat vysokému abrazivnímu opotřebení. Všechny tyto vlastnosti z něj tvoří zajímavý průmyslový materiál [5, 6, 11].

Jako řezný materiál se diamant začal ve větší míře využívat až v 70. letech 20. století. Je vhodný pro obrábění kompozitních materiálů, pryže, umělé pryskyřice, plastů, slinutých karbidů apod. Je možné ho také použít pro obrábění některých neželezných kovů jako mědi, mosazi, slitiny magnesia, slitiny hliníku a křemíku, olova, slitiny zinku, bronzu apod. [6].

Diamant krystalizuje v kubické soustavě, kde je každý atom uhlíku obklopen dalšími čtyřmi atomy uhlíku – viz obr. 3.1. Atomy jsou vázány kovalentní vazbou, která je nejsilnějším typem vazby. Toto těsné, husté a tuhé uspořádání je důvod, proč má diamant tak vysokou tvrdost [11]. Krystalografická mřížka je tvořena 18 atomy uhlíku, 6 atomů se nachází ve středech stran, 8 jich je ve vrcholech krychle a 4 jsou uvnitř krychle. Mřížkový parametr se při teplotě 25 °C pohybuje od 0,356686 ± 0,000001 nm do 0,356725 ± 0,000003 nm. Nejmenší meziatomová vzdálenost je 0,1545 nm [5].



Obr. 3.1 Krystalografická mřížka diamantu [5].

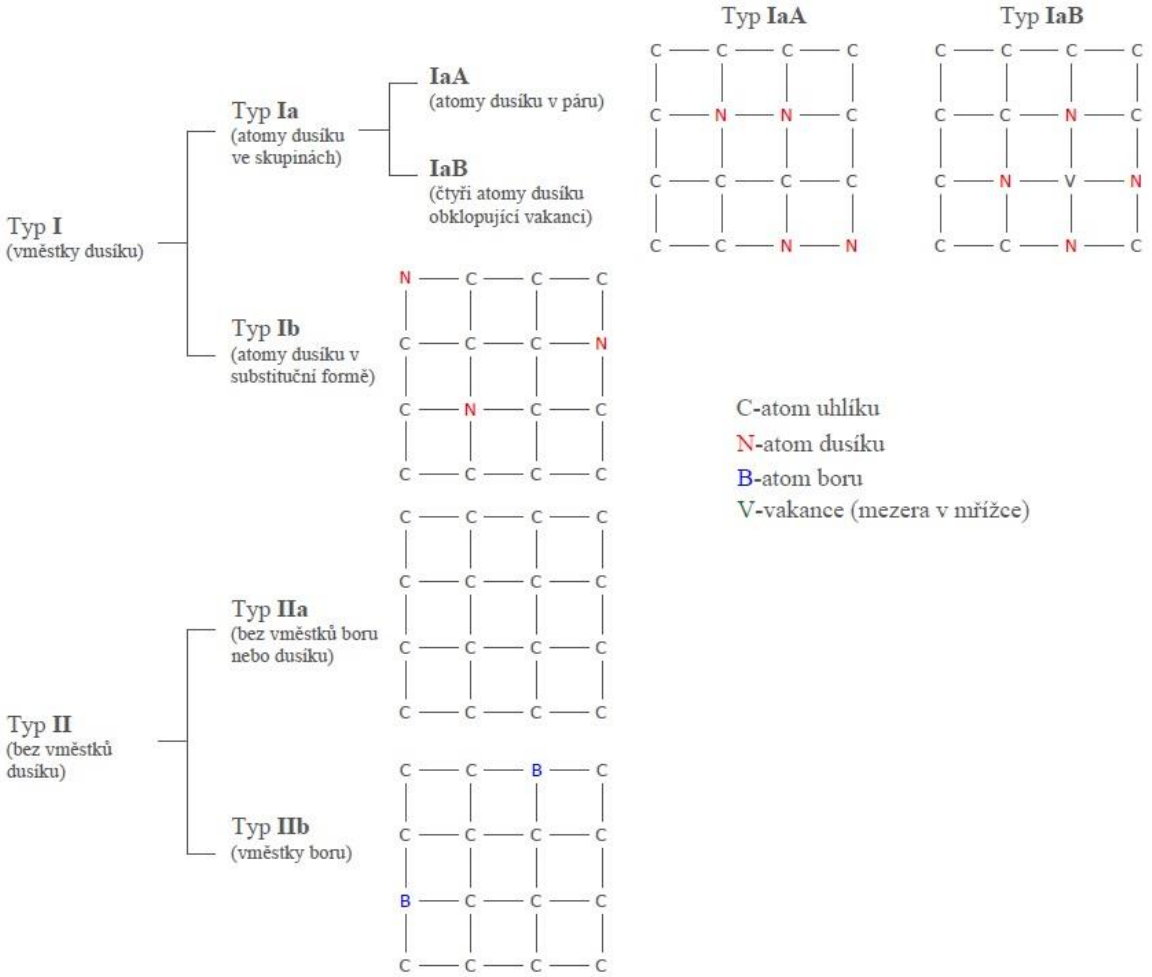
Ve struktuře diamantu se často vyskytují defekty způsobené nečistotami jiných prvků. Mezi nejčastější vměstky patří dusík, nikl, železo, hliník a bor. Do struktury se dostávají během formování diamantu. Na rozdíl od šperkařského průmyslu, kde je od diamantu požadována co nejvyšší čistota, která se promítne v ohodnocení, mohou být vměstky z průmyslového hlediska důležité. Ovlivňují totiž mechanické, elektrické, optické a tepelné vlastnosti. Nečistoty se vyskytují v přírodních i syntetických diamantech. Dusík je převládající a nejvýznamnější příměsí. Atomové poloměry dusíku a uhlíku jsou velmi podobné, proto lze atomy uhlíku nahradit atomy dusíku [5].

Diamanty se podle přítomnosti nebo absence vměstků dusíku a boru a jejich uspořádání v mřížce dělí na čtyři typy – viz obr. 3.2.

- **Diamanty typu Ia.** Množství dusíku a nečistot je měřitelné pomocí infračerveného spektrometru (až 0,2 %). Atomy dusíku spolu sousedí v mřížce. Páry se vyskytují

buď samostatně (typ A), nebo obklopují mezeru v krystalické mřížce (typ B). Patří sem většina přírodních diamantů [5, 12].

- **Diamanty typu Ib.** Obsahují měřitelný obsah dusíku. Atomy dusíku se nevyskytují v sousedních polohách, jsou rozptýleny v substituční formě. Patří sem většina syntetických diamantů [5, 12].
- **Diamanty typu IIa.** Neobsahují měřitelný obsah dusíku nebo boru. V přírodní formě jsou velmi vzácné, mají zlepšené optické a tepelné vlastnosti [5, 12].
- **Diamanty typu IIb.** Obsahují měřitelné množství boru, který je v mřížce rozptýlen v substituční formě. Bor ve struktuře způsobuje vyšší elektrickou vodivost. V přírodě jsou vzácné. U syntetických diamantů je možné bor včlenit [5, 12].



Obr. 3.2 Rozdělení diamantu podle obsahu vměstků [12].

Tvrdost diamantu je 6 000–10 000 HV. Hodnota tvrdosti závisí na krystalografickém směru, proto je určení maximální hodnoty tvrdosti problematické [6]. Závislost tvrdosti na krystalografickém směru lze experimentálně dokázat např. broušením monokrystalického diamantu. Z experimentu je patrné, že různé plochy monokrystalu nevykazují stejnou tvrdost. Diamant také dokáže odolávat vysokým statickým tlakům [14, 22].

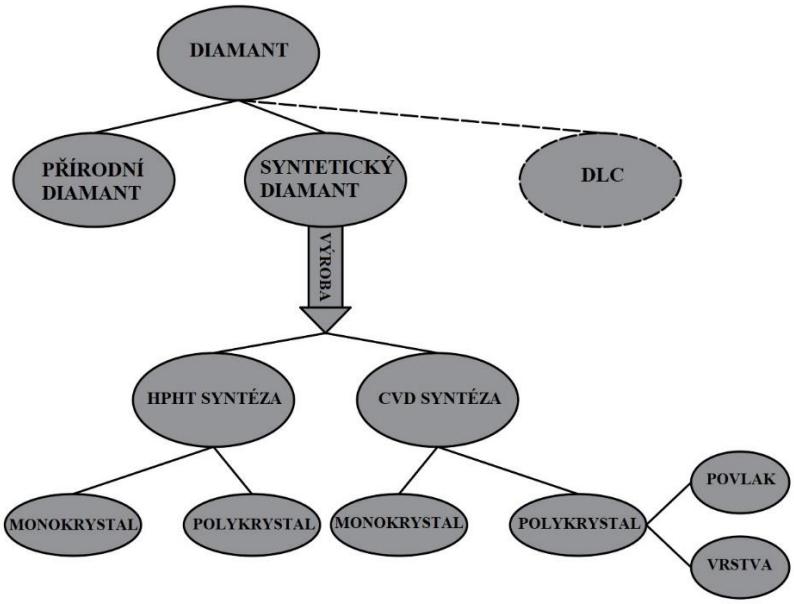
Čistý diamant je elektrický izolátor. V případě, že se ve struktuře nachází bor nebo fosfor, diamant získává polovodičové vlastnosti. Diamant obsahující vměstky boru a ochlazený pod teplotu 4 K je supravodič [13].

Diamant je vysoce chemicky inertní. Není ovlivnitelný žádnými kyselinami nebo jinými chemikáliemi. Výjimkou jsou látky, které při teplotách pod ~1 030 °C působí jako oxidační činidla [5]. Za zvýšených teplot diamant reaguje s prvky jako železo, nikl, titan, chrom, bor, kobalt apod., které tvoří s uhlíkem karbidy [10].

Nežádoucím dějem, který za zvýšené teploty způsobuje degradaci diamantu, je grafitizace. Na vzduchu za teplot přesahujících 600 °C se na povrchu diamantu začíná vytvářet černý povlak. Diamant se začíná transformovat na grafit. Tento proces lze považovat za určitou formu grafitizace. Grafitizace závisí na okolním prostředí. Její rychlost je ovlivněna teplotou, tlakem, přítomností kyslíku nebo jiných aktivačních činidel, defekty ve struktuře a typem krystalů. O skutečnou grafitizaci se jedná v případě, že transformace probíhá bez působení vnějších činitelů. V inertní atmosféře pak při zvyšování teploty z ~1 530 °C na ~2 130 °C dojde k úplné přeměně 0,1karátového krystalu diamantu na grafit za dobu kratší než 3 minuty. Grafitizace způsobuje degradaci diamantových řezných nástrojů a vede ke značným omezením při jejich aplikacích za vyšších teplot [5, 10, 15].

Přírodní a syntetický diamant mají rozdílné vlastnosti. To je primárně způsobeno rozdíly ve tvaru a koncentraci dusíku, případně jiných příměsí [5]. V současné době je většina diamantů využívaných ve strojírenství syntetických. Nevýhodou přírodních diamantů je jejich omezený výskyt a nestejnorodé vlastnosti, které souvisí s různými podmínkami při jejich vzniku. Přesto se přírodní diamanty ve strojírenském průmyslu stále využívají (až 85 % vytěženého diamantu je použito ve strojírenském průmyslu – řezání, vrtání, broušení a leštění) [10, 16].

Následující kapitoly jsou členěny na základě rozdělení na obr. 3.3. Jedná se o zjednodušené rozdělení průmyslového diamantu využívaného jako řezný materiál. DLC je označení materiálu, který se v mnoha ohledech podobá diamantu – viz kap. 7.2.



Obr. 3.3 Rozdělení průmyslového diamantu.

4 PŘÍRODNÍ DIAMANT

Výjimečných vlastností diamantu začal člověk využívat už v době kamenné k leštění seker z korundu. Existují důkazy o jeho použití při vrtání hornin 3 000 let před naším letopočtem. V té době se diamant vyskytoval v zemské kůře mnohem častěji než dnes. V roce 1495 byl podle návrhu Leonarda da Vinciho vyroben vrtací aparát osazený diamantem, určený na řezání skla. Postupný vývoj vedl k tomu, že se na diamant začalo nahlížet jako na důležitý průmyslový materiál. Britská vojenská norma v roce 1939 předepsala soustružení diamantem. Jednalo se stále o přírodní diamant [16, 17].

4.1 Vznik a těžba

Pro vznik diamantu v přírodě je zapotřebí teplot přibližně 1 040–1 340 °C a tlaků až 6 GPa [18]. Diamanty vznikají tak, že tavenina bohatá na uhlík pronikne do horniny v zemském plášti, kde na ni působí extrémní tlak a teplota. Nejčastěji se takto formují v hloubkách 150–330 km pod povrchem země [18, 19]. Vulkanickou činností se poté dostávají k povrchu v intruzivní vyvřelé hornině kimberlit, tj. ve vyvřelé hornině, která utuhla pod povrchem země v kůře – viz obr. 4.1 [40]. Pokud těžíme diamant přímo z této vyvřelé horniny, jedná se o primární naleziště – viz obr. 4.2. Zásoby diamantu jsou omezené, protože vulkanická činnost, která dostává diamanty do vyšších částí zemského povrchu, je velmi vzácná. Odhaduje se, že přibližně za 60 let budou vyčerpány zásoby diamantu v hloubce, ve které se těžba ekonomicky vyplatí [20].

Obr. 4.1 Kimberlit obsahující krystaly diamantu [22].

Hornina kimberlit podléhá zvětrávání a erozi. Zvětralé zbytky mohou zůstávat na místě, případně jsou přemístěny vodou nebo větrem. Diamant je odolný materiál a zůstává tak v nezměněné formě. V určitých místech, např. v povodí řek, se pak zvyšuje jeho koncentrace a vznikají ložiska. Těžba probíhá podobným principem jako rýžování zlata a mluvíme o sekundárním nalezišti. Diamanty se také mohou vyskytovat v oblastech

subdukce, tj. jevu, kdy se pod sebe zasouvají litosférické desky, případně v místech dopadu asteroidu nebo meteoritu. Nejvýznamnější světová ložiska se nacházejí v Jižní Africe. Mezi další významné producenty patří Austrálie, Kanada, Rusko, Botswana a Namibie [5, 11, 23, 24].

Obr. 4.2 Diamantový důl [21].

4.2 Vlastnosti

V tab. 4.1 je přehled základních mechanických a fyzikálních vlastností přírodního monokrystalického diamantu.

Tab. 4.1 Vlastnosti přírodního monokrystalického diamantu [25, 26].

Hustota	[kg/m^3]	3,515
Pevnost v tlaku	[GPa]	8,68
Lomová houževnatost	[MPa·m$^{1/2}$]	3,40
Tvrdost podle Knoopa	[GPa]	57-104
Youngův modul pružnosti	[GPa]	1 141
Modul pružnosti ve smyku	[GPa]	553
Poissonovo číslo	[-]	0,07
Koeficient teplotní roztažnosti	[10^{-6}·K^{-1}]	1,3-4,8
Součinitel tepelné vodivosti (typ II, 20 °C)	[W·m^{-1}·K^{-1}]	2 000-2 100

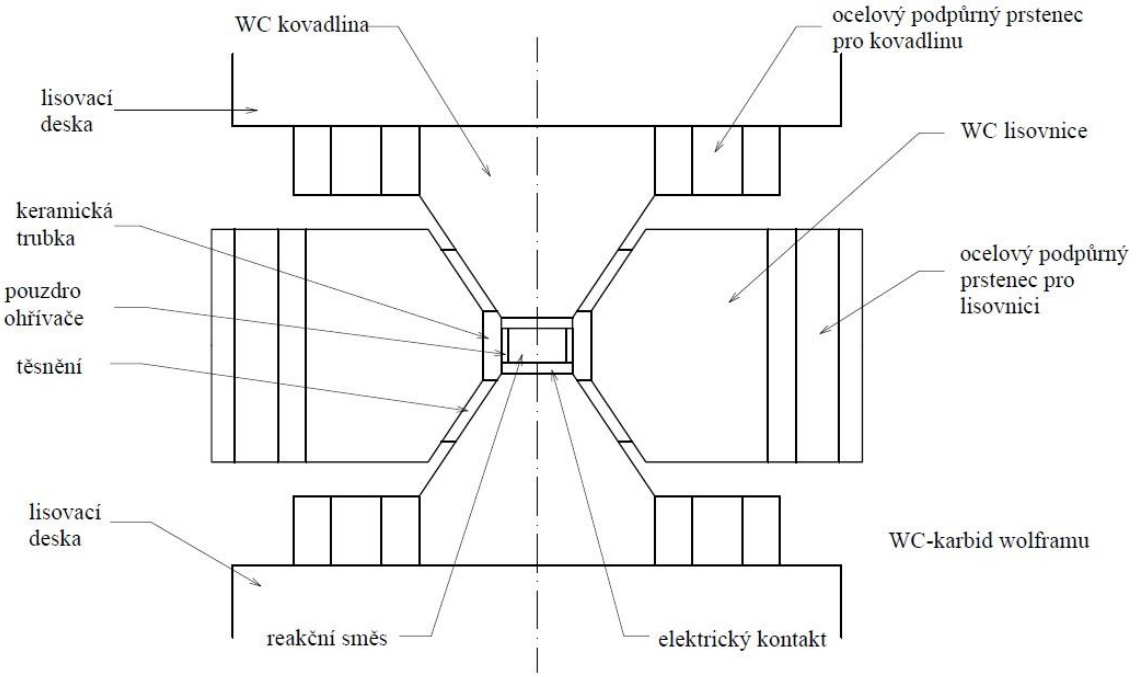
5 SYNTETICKÝ DIAMANT

V roce 1776 objevil Antoine Lavoisier, že diamant je krystalická forma uhlíku. Tímto objevem započala snaha vědců vytvořit umělý diamant. S rostoucím využitím diamantu jako průmyslového materiálu a vzhledem k omezeným zdrojům a ne zcela ideálním vlastnostem přírodního diamantu se ve 20. století potřeba vývoje umělého diamantu stupňovala [17]. V roce 1954 přišel první skutečný úspěch znamenající významný posun ke komerčnímu využití syntetických diamantů, kdy Tracy Hall ze společnosti General Electric postavil zařízení, které napodobovalo podmínky při vzniku přírodních diamantů. O rok později provedli F. P. Bundy, H. M. Hall, a H. M. Strong první úspěšnou laboratorní syntézu diamantu metodou HPHT [5, 27]. V dnešní době se syntetický diamant nejčastěji vyrábí metodou HPHT nebo CVD – viz kap. 5.1 a 5.2. Existují i jiné metody syntézy, např. dynamická výbušná metoda (Explosive Shock Synthesis). Při této metodě transformace grafitu na diamant probíhá působením rázové detonační vlny a trvá jednotky mikrosekund. Vzniká jemnozrnný diamant vhodný pro leštící pasty, případně pro slinování PKD nástrojů [10, 28].

Změnou podmínek syntézy, přidáním vměstků nebo použitím kovové matrice je možné ovlivnit výsledné vlastnosti syntetického diamantu jako houževnatost, lomové vlastnosti, zrnitost, elektrická a tepelná vodivost nebo tvar krystalu vzhledem k aplikaci [10].

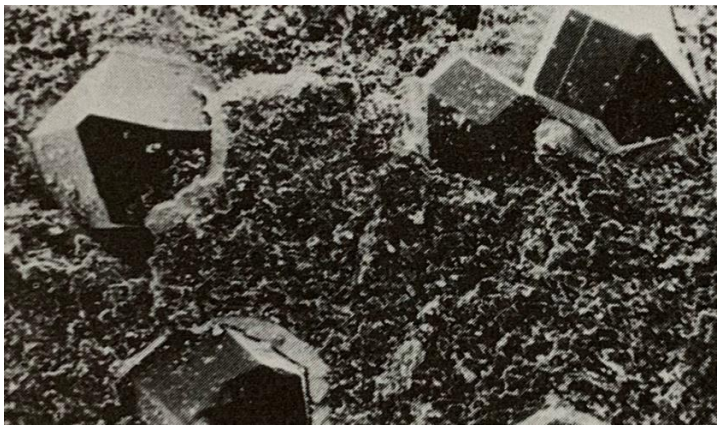
5.1 HPHT syntéza

Metoda HPHT – High Pressure High Temperature, je založena na syntéze diamantu za vysokých teplot a tlaků ve speciálních lisech – viz obr. 5.1. Principem metody je přeměna grafitu na diamant. Hexagonální mřížka grafitu se mění na kubickou mřížku diamantu. To vše se děje za podmínek, které se podobají podmínkám, za kterých vzniká diamant v přírodě. Dosahuje se teplot až 1 700 °C a tlaku přibližně 5–8 GPa [5, 6, 10, 25, 27, 29].



Obr. 5.1 Základní komponenty lisu pro HPHT syntézu [10].

Během tohoto procesu se využívá katalyzátor, který rozpouští grafický uhlík a navíc umožňuje jeho krystalizaci ve formě diamantu i při nižších teplotách a tlacích než v přírodních podmínkách, což je důležité z ekonomického hlediska. Jako katalyzátory se nejčastěji používají chrom, mangan, železo, kobalt a nikl, případně jejich slitiny či sloučeniny. Dále se používají nekovové sloučeniny jako uhličitany, sulfáty a hydroxidy. Krystaly diamantu se formují v rekční směsi – viz obr. 5.2. Metodou je možné syntetizovat polykrystalický i monokrystalický diamant. Po dokončení transformačního procesu se pomocí kyseliny rozpustí katalyzátor a získají se krystaly diamantu. Diamanty syntetizované touto metodou mají často žlutou barvu, což je způsobeno výskytem dusíku v jejich struktuře. Dusík se do struktury dostane z atmosféry, případně z katalyzátorů během syntézy [5, 6, 10, 25, 27, 29].



Obr. 5.2 Krystaly diamantu v reakční směsi [10].

5.1.1 Monokrystalický HPHT diamant

HPHT syntéza monokrystalického diamantu probíhá za pečlivě kontrolovaných růstových podmínek. Úpravou těchto podmínek je možné ovlivnit výsledné vlastnosti monokrystalu jako např. geometrii nebo délku ostří vzhledem k aplikaci. Monokrystalické diamanty prochází přísnou kontrolou kvality s ohledem na jejich rozměry a fyzikální vlastnosti. Kromě monokrystalů typu **Ib**, které jsou běžně používané pro řezné nástroje, je v dnešní době možné metodou HPHT syntetizovat monokrystaly typu **IIa**. Monokrystaly typu **IIa** obsahují výrazně menší množství dusíku a mají lepší optické a tepelné vlastnosti díky vysoké čistotě a mřížce, která obsahuje malé množství vad [30].

5.1.2 PKD

Polykrystalický diamant PKD (v zahraničí se používá zkratka „PCD“) je kompozitní řezný materiál s diamantovými krystaly uloženými v sekundární fázi. Polykrystalický diamant má v porovnání s monokrystalem jako součást řezných nástrojů pro většinu aplikací lepší vlastnosti. Diamant je anizotropní materiál, a z tohoto důvodu vlastnosti monokrystalu úzce souvisí s volbou krystalografického směru. V PKD jsou krystaly orientovány tak, že výsledné vlastnosti nástroje jsou pro všechny směry stejné [26].

Jednotlivé krystaly diamantu získané nejčastěji metodou HPHT, jsou slinovány za působení vysokých teplot a tlaků. Pro lepší slinování zrn se používá kovový katalyzátor, nejčastěji ve formě kobaltu. Kobalt vyplňuje dutiny, které vznikají ve struktuře, a zajišťuje

kompaktní elektrickou vodivost, což umožňuje následné elektroerozivní obrábění [26, 29]. Výsledný slinovaný diamant obsahuje přibližně 5–10 % sekundární fáze (kovový katalyzátor). V případě slinování syntetických krystalů může PKD obsahovat grafit a kovy ze samotné syntézy krystalů [10].

Nevýhodou použití sekundárních kovových fází je, že při zvýšených teplotách dochází k jejich expanzi (např. kobalt expanduje až čtyřikrát rychleji než diamant) a tlaku po hranicích zrn diamantu. Diamant a sekundární fáze mají totiž rozdílný koeficient teplotní roztažnosti. To zvyšuje grafitizaci a při teplotách, které přesahují 700 °C, dochází ke zvýšené degradaci nástroje. V případě, že aplikace vyžaduje vysokou teplotní stabilitu PKD, je možné kovovou fázi chemicky odstranit a ponechat pouze strukturu diamantových krystalů. Další možností je použít sekundární fázi, jejíž hodnota koeficientu teplotní roztažnosti se bude blížit diamantu, např. karbid křemíku. V takovém případě PKD dosahuje lepší teplotní stability, ale klesá výsledná pevnost [10, 26].

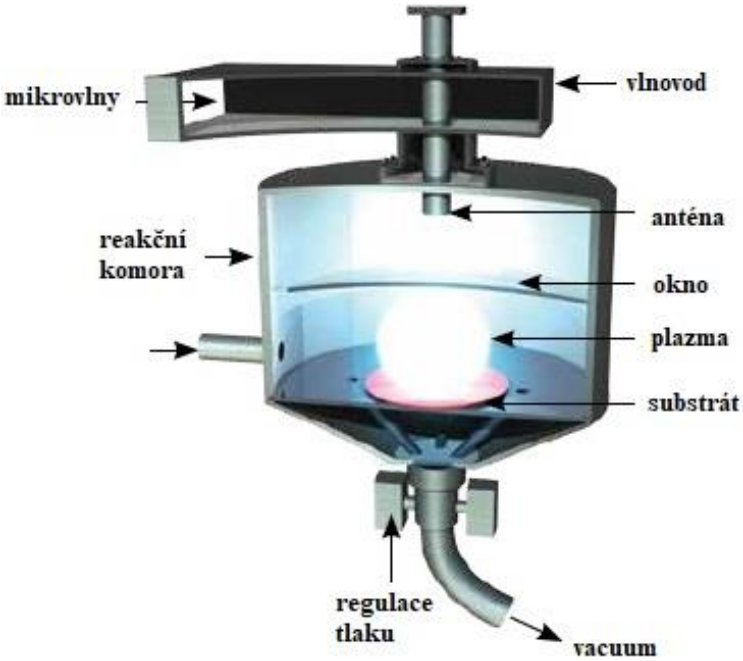
Obr. 5.3 PKD polotovar [31].

Slinováním vznikne polotovar, nejčastěji destička kruhového tvaru o průměru 70 mm – viz obr. 5.3. Tloušťka diamantové vrstvy se obvykle pohybuje mezi 0,3–1,5 mm. Polotovar je následně řezán na elektroerozivním stroji do požadovaných tvarů včetně všech úhlů a sražení. Využívají se speciální programy, které vhodně uspořádají vyřezávané tvary na polotovar s ohledem na minimální odpad. Takto připravená PKD destička se lepí, případně pájí na patřičně připravené tělo nástroje vyrobené z oceli nebo slinutého karbidu. Nejčastěji se používá pájka ze slitiny stříbra s teplotou tavení 600–750 °C. Pájená destička se nesmí přehřát, protože může dojít ke grafitizaci. Následuje očištění pískováním a erodování celého nástroje do konečných rozměrů s tolerancí ±0,01 mm, případně je možné dosáhnout přesnosti až v řádech tisícin milimetrů na superpřesných bruskách [10, 29, 32].

Broušení vrstvy PKD je vzhledem k její vysoké tvrdosti složité. Opotřebení brousících kotoučů je výrazné. V současnosti se používá také metoda elektroerozivního broušení, která je vhodnější pro broušení PKD s velkými zrny nebo nástrojů, kde se brousí dlouhé ostří, např. nástroje na obrábění dřeva. V případě broušení již připájené vrstvy vznikají uvnitř PKD tlaky, které při následné aplikaci způsobují degradaci nástroje. Z toho důvodu je vhodné provést veškeré možné tvarové a geometrické úpravy na destičce před pájením. PKD polotovary se ještě před elektroerozivním řezáním leští. Vyleštěný povrch PKD destičky zajišťuje lepší odvod třísky, zvyšuje odolnost vůči tvorbě nárůstku a umožňuje dosáhnout kvalitnějšího ostří [10, 33].

5.2 CVD syntéza

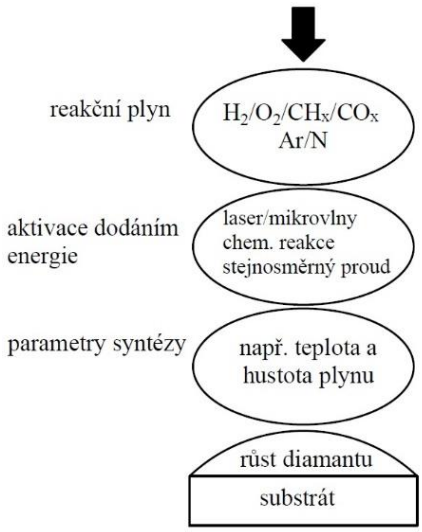
Chemical Vapour Deposition je technologie, která umožňuje syntézu diamantu chemickou reakcí za nízkých tlaků. Metoda je prováděna napařováním z plynné fáze, což je jedna ze dvou základních metod povlakování. CVD syntézou je možné syntetizovat monokrystal nebo polykrystalický diamantový povlak, respektive vrstvu. První syntéza touto metodou byla provedena v roce 1952. Následoval její postupný výzkum a rozvoj. Pro komerční účely se CVD diamantová syntéza začala používat až v 90. letech. Umožňuje nanášet polykrystalický diamantový povlak na velké plochy, což není možné dosáhnout metodou HPHT nebo pomocí přírodního diamantu. Zatímco obvyklé PKD polotovary mají průměr do 100 mm, tenké diamantové CVD povlaky se nanáší i na plochy s rozměry, které přesahují 300 mm [1, 25, 29, 34].



Obr. 5.4 Reakční komora [25].

Syntéza probíhá v reakční komoře, viz obr. 5.4, za tlaku asi 100 hPa. Pro syntézu existuje několik variant reakčních plynů, ale nejčastěji se využívá směs vodíku a methanu. Pro různé variace se přidává kyslík, malé množství dusíku, případně příměsi. Kyslík umožňuje lepší uchycení povlaku i za nižších teplot substrátu, což za určitých podmínek zvyšuje kvalitu diamantu, ale také to může vést ke snížení tvrdosti polykrystalického diamantu. Vodík má velký význam, jeho primární funkcí je ukončování uhlíkových vazeb na povrchu diamantové vrstvy nebo jeho zárodku. Vodík navíc brání růstu grafitu. Methan funguje jako zásobárna atomárního uhlíku. Směs je bombardována nabitými částicemi nebo přímo plazmou s teplotou přesahující 2 000 °C. To vyvolá složitou chemickou reakci, po které uhlík dopadá na substrát. Plazmě je dodávána energie pomocí laseru, mikrovln, chemickou reakcí nebo stejnosměrným proudem. Na obr. 5.5 je vidět zjednodušené schéma procesu CVD syntézy. Proces CVD syntézy je možné lépe regulovat než syntézu HPHT. Je tedy jednoduší syntetizovat CVD diamant s konkrétními vlastnostmi. Vlastnosti CVD diamantu závisí na teplotě během syntézy, způsobu dodávání energie plazmě, složení

reakčního plynu, přidání vměstků nebo použití prvků jako dusík a kyslík. [25, 27, 34, 35, 36].



Obr. 5.5 Schéma CVD syntézy [35].

5.2.1 Monokrystalický CVD diamant

Regulací podmínek syntézy, např. změnou čistoty reakčního plynu, je možné syntetizovat monokrystal s ideálními vlastnosti vzhledem k aplikaci. Vysoká chemická čistota je hlavní předností CVD monokrystalu. Vlastností CVD monokrystalu se využívají převážně v optice, elektronice a pro některé mechanické aplikace [30].

Monokrystaly dopované borem mají vyšší elektrickou vodivost a jsou využívané v detektorech a elektrických senzorech. CVD diamanty vhodné pro optické aplikace mají nízký absorpční koeficient, vysokou tepelnou vodivost, nízký koeficient teplotní roztažnosti a propouští široké vlnové spektrum. CVD diamant se v optice používá primárně pro laserové aplikace [30].

5.2.2 CVD diamantové povlaky a vrstvy

Během CVD syntézy uhlík dopadá na vhodný substrát, kde se formuje diamantový povlak, respektive vrstva. Diamantové krystaly zpočátku rostou do všech směrů. Následně na sebe začnou vzájemně působit a rostou směrem vzhůru. Některé krystaly rostou rychleji, z toho důvodu s rostoucí tloušťkou klesá počet krystalů. CVD diamanty se podle tloušťky dělí do dvou skupin. Tenké vrstvy, neboli CVD povlaky, mají tloušťku menší než 50 μm. Tlusté vrstvy, tzv. CVD diamantové vrstvy, dosahují větší tloušťky než 50 μm. Je možné vyrobit vrstvu tlustou až 1 mm. Syntetizované krystaly jsou typické vysokou čistotou, která souvisí s pomalým růstem krystalů, asi 1–10 $\mu m \cdot h^{-1}$ [10, 29, 37].

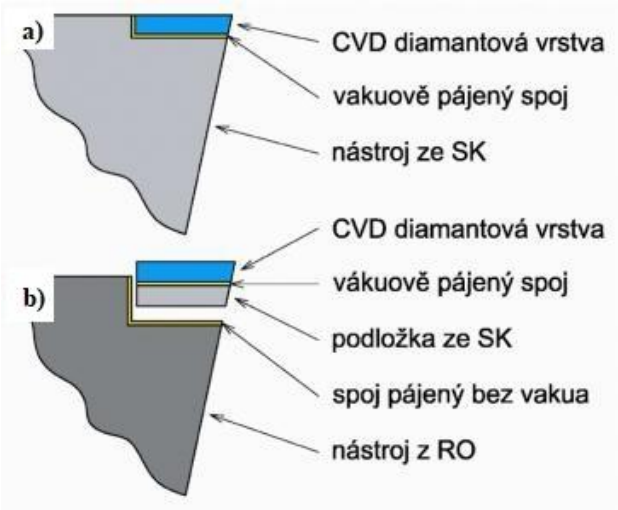
Při povlakování CVD povlaky je jako substrát možné použít přímo řezný nástroj, což je výhoda proti povlakování CVD vrstvami. Tlusté diamantové vrstvy se totiž nenanášejí přímo na nástroj. Nejprve je vyrobena diamantová destička o průměru až 150 mm, která je následně nařezána laserem. Sorty CVD diamantu, které jsou dopovány borem, je možné díky

zvýšené elektrické vodivosti opracovávat elektroerozivně. Vyleštěné destičky jsou pájeny na nástroj, nejčastěji ze SK, viz obr. 5.6 a) [10, 29].

Volba vhodného substrátu je důležitá. Je nutné zajistit dostatečnou přilnavost a adhezi diamantového povlaku na substrát. V dnešní době se jako substrát nejčastěji využívají určité typy SK. Problémem při této aplikaci je výskyt kobaltu ve struktuře SK. Kobalt totiž způsobuje grafitizaci na rozhraní diamantového povlaku a povrchu substrátu, což vede ke zhoršení nukleace a růstu diamantu. Odstranění kobaltu chemickým leptáním zlepšuje adhezi diamantu na hranici se substrátem. Nicméně povrchové nebo hloubkové leptání způsobuje difuzi zbytkového kobaltu během CVD syntézy. To zhoršuje přilnavost diamantu. Z toho důvodu se v dnešní době jako substrátové materiály nejčastěji využívají SK s nízkým obsahem kobaltu, obvykle 3–6 % [29, 38].

Na druhou stranu mají nástroje ze SK s vyšším obsahem kobaltu vyšší houževnatost, pevnost, trvanlivost a výkonnost. Bylo publikováno několik prací, které se zabývaly CVD povlakováním karbidů s vysokým obsahem kobaltu. Byl zkoumán vliv leptání a použití mezivrstvy. Mezivrstvy z niobu, chromu nebo tantalu zlepšují přilnavost diamantu k substrátu. Bylo zjištěno, že nejlepších výsledků je dosaženo kombinací leptání a mezivrstvy. Lepší přilnavosti lze dosáhnout také použitím mezivrstvy ze **SiO2** nebo **SiC**. V případě nevhodného substrátu je také možné povlakovat podložku, která je následně připájena na nástroj [29, 38].

Během CVD syntézy se substrát zahřívá až na 800 °C. Nevhodně zvolený substrát, který má výrazně rozdílný koeficient teplotní roztažnosti než diamant, způsobí svou expanzí zbytkové napětí, které vede k odlamování diamantových povlaků. Volbu substrátu omezují také vysoké teploty, které na něj negativně působí během syntézy. Např. rychlořezné oceli (dále „RO“) při takových teplotách ztrácejí své mechanické vlastnosti, a navíc difundují uhlík během růstu diamantu. Pro porovnání – RO se povlakují při teplotách přibližně 600 °C. Nižší teploty výrazně neovlivňují vlastnosti substrátu a nevzniká tak velké zbytkové napětí. Používají se mezivrstvy, které brání difuzi uhlíku a zlepšují přilnavost diamantu k substrátu. Nižší teplota během syntézy způsobuje syntézu CVD diamantu s vyšší drsností povrchu. V dnešní době se také používají podložky ze SK, které jsou následně připájeny k nástroji z RO – viz obr. 5.6 b) [29, 36].



Obr. 5.6 a) nástroj s CVD diamantovým povlakem, b) připevnění diamantové vrstvy [29].

6 ŘEZNÉ NÁSTROJE NA BÁZI DIAMANTU

Diamantové řezné nástroje umožňují obrábět abrazivní a tvrdé materiály mnohem efektivněji v porovnání s nástroji ze SK nebo KNB. Mnohdy jsou diamantové nástroje jedinou možností pro obrábění vysoce abrazivních a tvrdých materiálů. Jejich hlavní předností je jejich vysoká odolnost proti abrazi a s tím spojená trvanlivost, výkonnost a schopnost dosáhnout vysoké kvality obráběného povrchu. V současnosti se vyrábí široká škála diamantových nástrojů. To je možné díky značnému pokroku, který byl za posledních 50 let učiněn v oblasti technologie syntézy diamantu. V současné době je možné syntetizovat různé druhy diamantu s vhodnými vlastnostmi vzhledem k výrobě a aplikaci nástroje. Diamantové nástroje se v dnešní době používají zejména na frézování, soustružení, vrtání, broušení, řezání a leštění.

6.1 PKD nástroje

Nástroje, které mají ostří z PKD, umožňují opracovávat vysoce abrazivní a hůře obrobitelné materiály. Při těchto aplikacích jsou velice efektivní. Dosahují vysoké trvanlivosti a procesní spolehlivosti. Obrobené povrchy mají vysokou kvalitu [27]. Zvládnutí technologie PKD a její zavedení v praxi rozšířilo oblast využití diamantu např. o automobilový průmysl, kosmonautiku nebo zpracovávání dřeva [26]. Z PKD je možné vyrábět komplexnější řezné nástroje, které by nebylo možné vyrobit z monokrystalického diamantu. Nástroje vyráběné z PKD jsou především vrtáky, frézy, výstružníky a řezné destičky. Na obrázku 6.1 je několik nástrojů, které mají ostří z PKD. Podle požadavků zákazníka jsou také vyvíjeny, konstruovány a vyráběny specifické nástroje určené pro komplexní obráběcí operace [27].

Obr. 6.1 PKD nástroje a řezné destičky [39].

6.1.1 Vlastnosti

V současné době nabízejí firmy zabývající se výrobou PKD nástrojů širokou škálu sort. Výsledné vlastnosti nástroje závisí převážně na velikosti zrn, množství a druhu sekundární fáze a úrovní slinování diamantových krystalů. Vždy je důležité zvolit správnou sortu PKD nástroje vzhledem k aplikaci, aby bylo zajištěno využití jeho plného potenciálu [26]. V tab. 6.1 je vidět srovnání vlastností PKD nástroje s jinými řeznými materiály.

Tab. 6.1 Srovnání vlastností PKD nástrojů s jinými řeznými materiály [10].

	PKD (Syndite 010)	PKNB (Amborite)	SK (K10)
Hustota [kg/m^3]	4,12	3,12	14,7
Pevnost v tlaku [GPa]	7,60	3,80	4,50
Lomová houževnatost [MPa·m$^{1/2}$]	8,80	630	10,8
Tvrdost podle Knoopa [GPa]	50	28	13
Youngův modul pružnosti [GPa]	776	680	620
Modul pružnosti ve smyku [GPa]	363	279	258
Poissonovo číslo [-]	0,07	0,22	0,22
Koeficient teplotní roztažnosti [10^{-6}·K^{-1}]	4,20	4,90	5,00
Součinitel tepelné vodivosti [W·m^{-1}·K^{-1}]	560	100	100

U běžných PKD nástrojů se velikost zrna pohybuje v rozmezí 2–50 µm. Zrna se podle velikosti dělí do třech kategorií: jemná zrna, velikost 2–4 µm; střední zrna, velikost 5 µm; hrubá zrna, velikost 20–50 µm. Na velikosti zrna závisí schopnost nástroje odolávat abrazivnímu opotřebení, kvalita obrobeného povrchu nebo brousící vlastnosti nástroje. Jemná zrna jsou vhodná pro dokončovací operace a pro aplikace, kde je požadována vysoká kvalita opracovávaného povrchu. U jemnozrnných nástrojů je možné dosáhnout vyšší kvality ostří. Na obr. 6.2 je jasně patrný rozdíl v kvalitě ostří v závislosti na velikosti zrn a jemnosti výbrusu. Na obr. 6.2 c) je pro porovnání vidět ostří monokrystalického diamantu. Jemnozrnné nástroje jsou vhodné pro obrábění dřeva. Nástroje s jemnými, potažmo středními zrny mají široké uplatnění v automobilovém průmyslu při obrábění slitin s nízkým obsahem hliníku a křemíku. Hlavní předností hrubozrnných nástrojů v porovnání s jemnozrnnými je jejich vyšší trvanlivost. Nejsou také tolik citlivé na volbu obráběného materiálu. Své uplatnění nachází při obrábění vysoce abrazivních materiálů, slitin mědi, slitin křemíku (které obsahují víc jak 16 % Si) a kompozitů s podílem skelných vláken. Hrubozrnné nástroje jsou vhodné pro frézování. Objevují se i superhrubá zrna 50–150 µm, která se používají pro vrtání do kamenů [10, 26, 33].

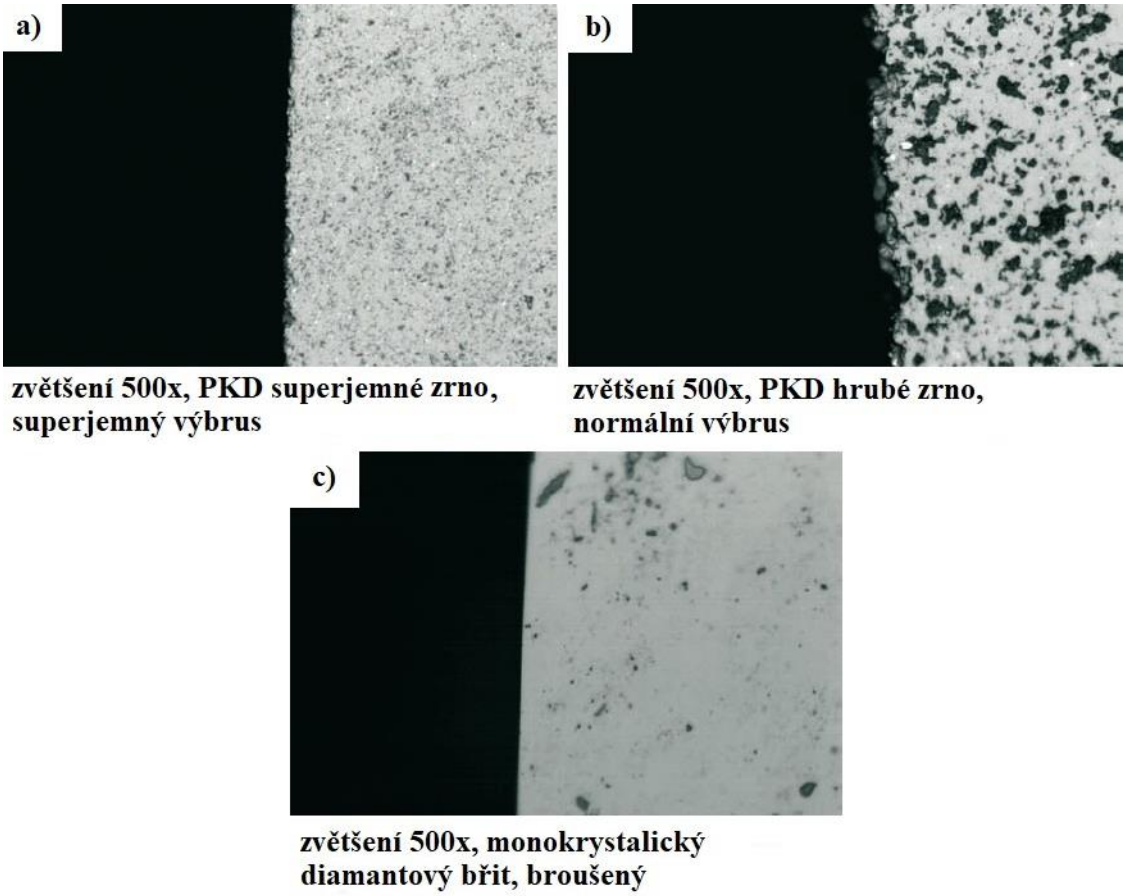
Tab. 6.2 Výrobní vlastnosti pro různé sorty firmy Element Six [41].

Charakteristika sorty		Výrobní charakteristiky																			
Značení	Velikost zrna	Elektroerozivní obrobitelnost											Brusitelnost								
CMX850	**0,5-1 µm**																				
CTX002	**2 µm**																				
CTB010	**10 µm**																				
CTH025	**25 µm**																				
CTM302	**2-30 µm**																				

Tab. 6.3 Charakter opotřebení pro různé sorty firmy Element Six [41].

Charakteristika sorty		Charakteristiky opotřebení	
Značení	Velikost zrna	Odolnost proti vyštípnutí	Odolnost proti abrazi
CMX850	**0,5-1 µm**		
CTX002	**2 µm**		
CTB010	**10 µm**		
CTH025	**25 µm**		
CTM302	**2-30 µm**		

Tabulky 6.2 a 6.3 znázorňují vliv velikosti zrna na vlastnosti nástroje. Tuto charakteristiku zpracovala firma Element Six pro své PKD sorty.



Obr. 6.2 Kvalita ostří [42].

Vysoká odolnost PKD nástrojů proti opotřebení patří k hlavním důvodům jejich širokého využití v praxi. V případě, že je PKD nástroj vystaven abrazivnímu opotřebení, dosahuje přibližně desetkrát vyšší odolnosti proti opotřebení než PKNB nástroj. V porovnání se slinutým karbidem wolframu dosahuje až stokrát vyšší odolnosti. Bylo prokázáno, že odolnost proti opotřebení závisí na lomové houževnatosti, Youngově modulu pružnosti a tvrdosti podle rovnice 6.1 [10].

$$W_r = K_{IC}^{0,5} \cdot E^{-0,8} \cdot HK^{1,43} \qquad (6.1)$$

Kde: Wr [-] – odolnost proti opotřebení,

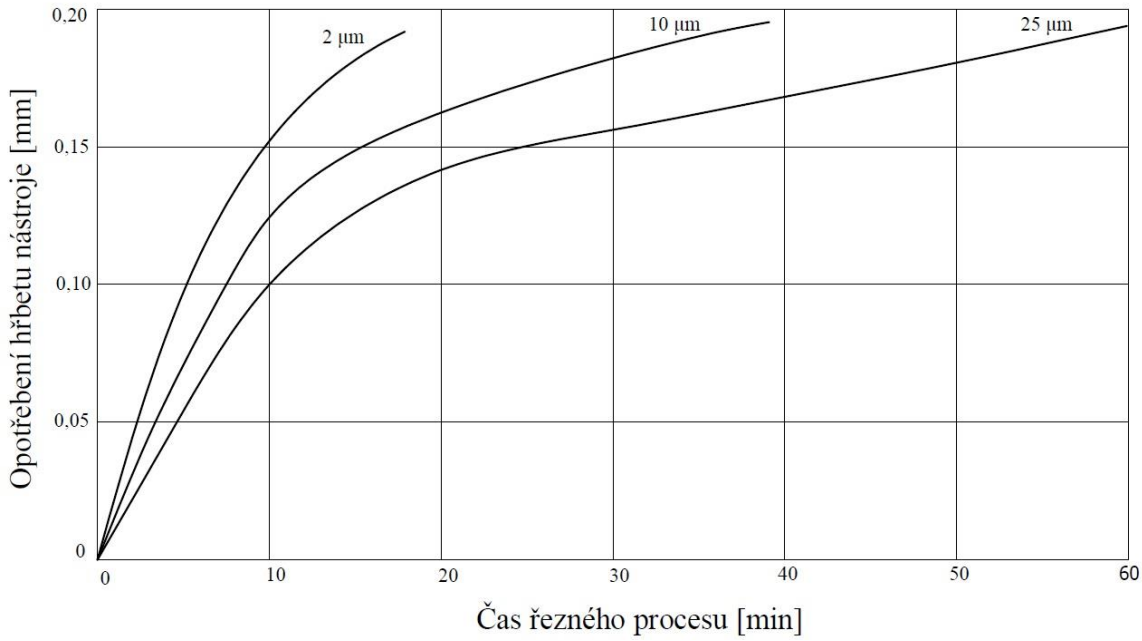
K_{IC} [MPa.m$^{1/2}$] – lomová houževnatost,

E [GPa] – Youngův modul pružnosti,

HK [GPa] – tvrdost podle Knoopa.

Tento vztah platí pouze pro případ jednoduchého abrazivního opotřebení, které není výrazně ovlivněno chemickým nebo adhezním opotřebením. Takto ovlivněno je např. obrábění kovových obrobků [10].

Odolnost proti opotřebení je také ovlivněna velikostí zrna. Na obr. 6.3 je vidět závislost opotřebení hřbetu nástroje na čase trvání řezného procesu pro různé velikosti zrn. Pro měření bylo použito běžně vyráběných kompozitních PKD nástrojů s velikostmi zrna 2 µm, 10 µm a 25 µm. Byl obráběn vysoce abrazivní obrobek z epoxidové pryskyřice plněný křemennou moučkou. Z pokusu vyplývá, že se odolnost hřbetu nástroje zvyšuje s rostoucí velikostí zrna [10].



Obr. 6.3 Závislost opotřebení nástroje na čase trvání řezného procesu [10].

6.1.2 Aplikace

S rozvojem konstrukčních materiálů přišlo postupné rozšiřování vhodných aplikací pro PKD nástroje. V dnešní době je možné PKD nástroji ve většině aplikací nahradit nástroje ze slinutého karbidu wolframu. V porovnání s nimi dosahují PKD nástroje vyšší trvanlivosti, což z ekonomického hlediska vyrovná jejich vyšší cenu. Polykrystalická struktura PKD je v porovnání s monokrystalem odolnější proti nárazům, proto je možné obrábět

přerušovaným řezem a frézovat. PKD nástroje se dále uplatňují při soustružení, vrtání, řezání závitů apod. [1, 10, 43].

PKD nástroje jsou vhodné pro obrábění neželezných kovů, nekovových materiálů a plastů.

- Vhodné neželezné kovy: hliník a jeho slitiny s vysokým obsahem křemíku, měď, bronz, mosaz, zinek a jeho slitiny, hořčík a slinutý karbid s vysokým obsahem kobaltu [1, 43, 44].
- Vhodné nekovové materiály: materiál s podílem vláken (skelných, aramidových, kevlarových, uhlíkových apod.), kamenný materiál (žula, syntetický mramor nebo syntetický kámen), dřevotříska, keramika, grafit, dřevěné produkty, tvrdý kaučuk a sklo [1, 43, 44].
- Vhodné plasty: akryl, nylonové kompozity, skelné vlákno, umělé hmoty a teflonové kompozity [1, 43, 44].

Doporučené parametry včetně vhodné geometrie pro soustružení některých materiálů PKD nástroji viz tab. 6.4.

Na druhou stranu není vhodné diamantem obrábět železo a jeho slitiny. Uhlík se za zvýšené teploty v oblasti řezu slučuje s železem a dochází k chemickému opotřebení. Z tohoto důvodu je trvanlivost nástroje při obrábění ocelí a litin nízká. Velké opotřebení diamantu nastává i při obrábění niklových slitin [1, 43].

Tab. 6.4 doporučené parametry pro soustružení PKD nástroji [44].

Obráběný materiál	**Poloměr zaoblení špičky [mm]**	**Úhel hřbetu [°]**	**Úhel čela [°]**	**Řezná rychlost [m/min]**	**Šířka záběru hl. ostří [mm]**	**Posuv na otáčku [mm]**
Slitiny hliníku	0,15-1,0	5-10	+0-10	3 000-5 000	0,13-0,51	0,051-0,20
Slitiny mědi	0,25-1,0	5-30	+10-20	1 500-3 500	0,13-0,51	0,025-0,15
Slinutý karbid wolframu	1,0-3,2	5-12	0	500-1 500	0,013-0,13	0,025-0,076
Skelné vlákno	0,76-2,3	5-20	+0-6	400-3 600	0,025-0,076	0,025-0,25
Karbonové/plastové kompozity	0,51-1,0	5-20	+0-6	500-2 000	0,25-2,54	0,13-0,38
Keramika s vysokým obsahem hliníku	0,25-1,0	5-20	+0-6	1 500-3 000	0,013-0,13	0,025-0,10

V případě, že teplota během řezného procesu stoupá nad 600–650 °C, je možné použít řeznou kapalinu k odvodu tepla. Řezná kapalina by měla být přiváděna přímo na břit nástroje. Důležitou složkou takové řezné kapaliny je složka chladící, která zajišťuje dobrý prostup tepla a měla by převažovat nad složkou mazací a konzervační. Velká část nekovových materiálů, které jsou obráběny pomocí PKD jsou porézní, např. dřevěné produkty. Použitím řezné kapaliny by mohlo dojít k poškození obrobku. V takovém případě je nutné snížit teplotu řezného procesu jinak, např. úpravou řezných podmínek [10, 45].

Využití plného potenciálu PKD nástrojů je podmíněno použitím vhodného obráběcího stroje, na který jsou kladeny vysoké nároky. Je vyžadována vysoká tuhost a stabilita stroje, včetně stabilního upnutí obrobku. To vše i za působení vysokých parametrů otáček vřetena a extrémně vysokých posuvech. Stroje musí být absolutně bez chvění. Házivost vřetena musí být minimální. Důležité je vhodně konstrukčně vyřešit uložení vřetene a vedení posuvových částí. Dnešní stroje obvykle disponují vnitřním vysokotlakým chlazením [27].

6.1.3 Opotřebení

Mezi nejběžnější typy opotřebení PKD nástrojů patří opotřebení hřbetu, nárůstek na břitu a vylamování částic břitu, viz obr 6.4 [46].

Opotřebení hřbetu znamená postupný úbytek materiálu na hřbetní ploše destičky. Důvodem může být chemické složení materiálu. Materiál obsahující železo, nikl nebo kobalt způsobuje chemické poškození. Dalším důvodem může být příliš abrazivní materiál obrobku vzhledem k volbě sorty PKD [46]. Nápravná opatření jsou [46]:

- snížení řezné rychlosti,
- použití hrubozrnější sorty PKD,
- kontrola chemického složení materiálu,
- použití chlazení.

Nárůstek vzniká v důsledku přilnavosti materiálu obrobku k břitu. Příčinou je nevhodná teplota obráběcího procesu nebo nesprávná volba sorty PKD [46]. Nápravná opatření jsou [46]:

- snížení nebo zvýšení řezné rychlosti,
- použití ostřejší destičky,
- volba jemnozrnější sorty PKD.

Vylamování částic břitu je jev, který nastává v případě, kdy není zajištěna dostatečná tuhost a stabilita břitu, případně obrobku. Dalším důvodem je nesprávná volba sorty PKD, špatně zvolené řezné podmínky nebo dlouhý výběh řezného nástroje [46]. Nápravná opatření jsou [46]:

- minimalizace chvění a vibrací,
- použití houževnatější sorty PKD,
- změna řezných podmínek,
- kontrola nastavení stroje.

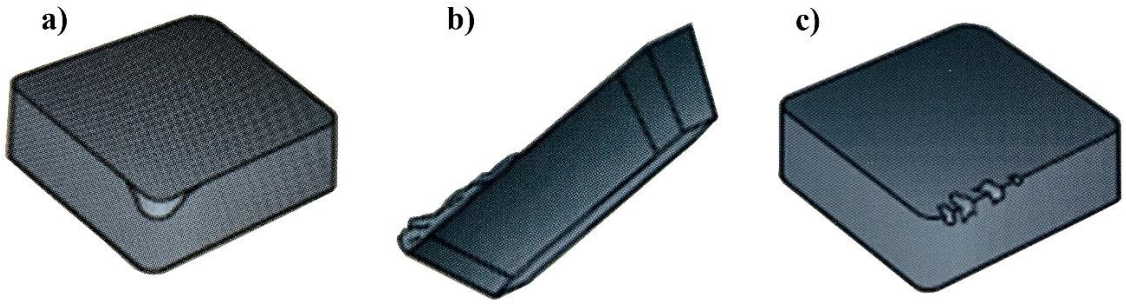
U většiny aplikací PKD nástrojů je požadována vysoká kvalita obráběného povrchu. V případě, že povrch nedosahuje požadované kvality, může to být z několika důvodů, jako jsou příliš vysoké řezné podmínky, nevhodná sorta PKD, problémy spojené se stabilitou obrábění nebo nesprávná poloha stěrače ostří [46]. Nápravná opatření jsou [46]:

- zvýšení stability obrábění,
- použití sorty s jemnějšími zrny PKD,
- změna úhlu břitu,

- snížení řezných podmínek (šířky záběru ostří),
- kontrola nastavení plochy stěrače ostří.

Další problém, který se v praxi vyskytuje je odlamování hran na obrobku. Při vřezávání nebo vyjíždění břitů do záběru a ven ze záběru, dochází v oblasti rohů k odlamování [46]. Nápravným opatřením je [46]:

- snížení řezných sil (jiný úhel břitu, snížit šířku záběru ostří, úpravou hran obrobku).



Obr. 6.4 Typy opotřebení PKD nástrojů: a) opotřebení hřbetu, b) nárůstek na břitu, c) vylamování částic břitu [46].

6.2 CVD nástroje

Základ řezného nástroje tvoří vhodný substrát, na který je nanesen CVD povlak, případně připájena destička CVD vrstvy. Diamantový povlak zvyšuje trvanlivost nástroje a zlepšuje jeho vlastnosti a výkonnost. CVD nástroje mohou být mnohem komplexnější než PKD nástroje. CVD syntéza totiž umožňuje povlakovat nástroje s předem připraveným tvarem a geometrií, včetně tvarově složitých prvků, jako jsou např. lamače třísek. Na obr. 6.5 jsou nástroje různých tvarů povlakované CVD diamantem. CVD nástroje jsou navíc ekonomicky výhodnější než PKD nástroje, protože CVD syntéza není tak cenově a technicky náročná jako syntéza HPHT [29, 37].

Obr. 6.5 Nástroje povlakované CVD diamantem [47].

6.2.1 Vlastnosti

V dnešní době jsou k dispozici různé sorty CVD nástrojů, které se liší výslednými vlastnostmi. Na rozdíl od PKD neobsahuje CVD diamant žádné pojivo. Je tvořen z 99,9 % krystaly diamantu, které jsou spojeny molekulárními silami. Jeho struktura se tak více podobá přírodnímu diamantu. CVD nástroje mají proto v porovnání s PKD nástroji vyšší tvrdost, vyšší odolnost proti abrazi, vyšší chemickou inertnost, vyšší tepelnou vodivost a nižší koeficient tření. Na druhou stranu absence sekundární fáze způsobuje nižší lomovou houževnatost [29, 48]. Porovnání odolnosti proti opotřebení a houževnatosti CVD diamantu s jinými řeznými materiály – viz obr 6.6. Některé mechanické a fyzikální vlastnosti CVD diamatu – viz tab. 6.5.

Výsledné vlastnosti CVD nástroje závisí převážně na tloušťce diamantového povlaku, respektive vrstvy, struktuře diamantu (mikro nebo nanokrystaly), obsahu vměstků a použitém substrátu. Výsledné vlastnosti je také možné ovlivnit přípravou substrátu nebo úpravou syntetizovaného diamantu [10, 36, 49].

Tab. 6.5 Vlastnosti CVD diamantu firmy Element Six (sorty CDM a CDD) [50].

Hustota	[kg/m^3]	3,52
Lomová houževnatost	[MPa·m$^{1/2}$]	8,5
Tvrdost podle Knoopa	[GPa]	85-100
Youngův modul pružnosti	[GPa]	1 000-1 100
Poissonovo číslo	[-]	0,07
Koeficient teplotní roztažnosti	[10^{-6}·K^{-1}]	1,3-2,1
Součinitel tepelné vodivosti (20 °C)	[W·m^{-1}·K^{-1}]	1 000-1 200

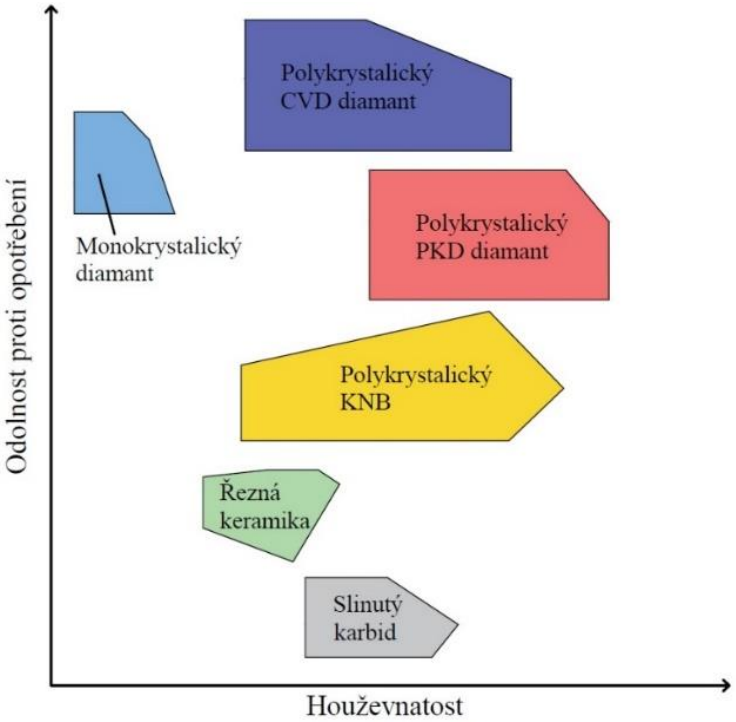
Tabulky 6.6 a 6.7 názorně ukazují vliv velikosti zrna na vlastnosti nástroje. Tuto charakteristiku zpracovala firma Element Six pro své CVD sorty.

Tab. 6.6 Výrobní vlastnosti pro různé sorty firmy Element Six [41].

Charakteristika sorty		Výrobní charakteristiky																					
Značení	Velikost zrna	Elektroerozivní obrobitelnost											Brusitelnost										
CDE	**60-80 µm**	■	■	■	■	■	■	■	□	□	□		■	■	■	■	□	□	□	□	□	□	
CDM	**60-80 µm**	Není k dispozici											■	■	■	□	□	□	□	□	□	□	
CTB010	**10 µm**	■	■	■	■	■	■	■	■	■	□		■	■	■	■	■	■	■	□	□	□	

Tab. 6.7 Charakter opotřebení pro různé sorty firmy Element Six [41].

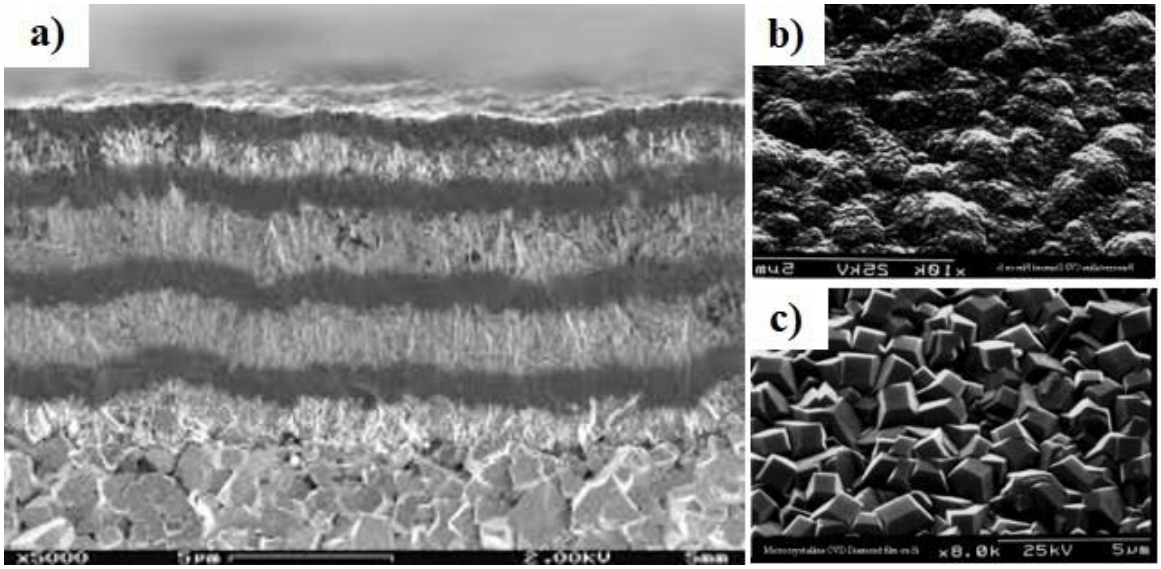
Charakteristika sorty		Charakteristiky opotřebení																					
Značení	Velikost zrna	Odolnost proti vyštípnutí											Odolnost proti abrazi										
CDE	**60-80 µm**	■	■	■	■	■	■	□	□	□	□		■	■	■	■	■	■	■	■	■	□	
CDM	**60-80 µm**	■	■	■	■	■	□	□	□	□	□		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
CTB010	**10 µm**	■	■	■	■	■	■	■	■	□	□		■	■	■	■	■	■	■	■	□	□	



Obr. 6.6 Porovnání vlastností CVD diamantu s PKD, monokrystalickým diamantem a dalšími řeznými materiály [42].

Povlaky, které jsou tvořeny mikrokrystalickým diamantem (dále „MKD“), mají vyšší drsnost povrchu. Takové povlaky se tolik nehodí pro dokončovací operace. Zato mají vyšší tvrdost. Hrubá zrna navíc zajišťují lepší mechanické vazby a vyšší adhesi na rozhraní substrátu a diamantového povlaku. Proti tomu povlaky tvořené nanokrystalickým diamantem (dále „NKD“), mají nižší drsnost povrchu, což je v praxi využívané hlavně pro dokončovací operace, kde je požadována vysoká jakost obráběného povrchu. Pro vznik nanokrystalické struktury je nutné snížit teplotu syntézy. Při nižších teplotách nedochází k tak silnému chemickému spojení se substrátem. Pro výrobu NKD za vyšších teplot je nutné zvýšit podíl metanu. To vede ke vzniku nediamantových fází na hranicích zrn. Nanokrystalická zrna tak mají nižší adhesi s povrchem substrátu. Povlak ztrácí tvrdost a klesá odolnost proti opotřebení [49, 51].

Pro kombinaci vhodných vlastností MKD – viz obr. 6.7 c) a NKD – viz obr. 6.7 b) se v dnešní době využívají multivrstvé CVD povlaky – viz obr. 6.7 a). Jako první se nanáší MKD, který má vyšší adhesi k povrchu substrátu. Následující vrstva NKD zajistí povrch s nízkou drsností. Kromě základních dvouvrstvých povlaků se využívají i vícevrstvé CVD povlaky. MKD a NKD vrstvy jsou kombinovány pro získání nejvhodnějších vlastností nástroje vzhledem k aplikaci [49, 51]. NKD v multivrstvém diamantovém povlaku navíc brání snadnému šíření trhliny. Ve vrstvě MKD se trhlina šíří po hranicích zrn a prostupuje až k povrchu nástroje. NKD zvyšuje lomovou houževnatost nástroje, protože trhlina se šíří pod úhlem 45° k povrchu nástroje [48].



Obr. 6.7 a) multivrstvý CVD povlak, b) NKD, c) MKD [52, 53].

6.2.2 Aplikace

Oblast konstrukčních materiálů, které je vhodné obrábět CVD nástroji, je do značné míry podobná s PKD nástroji. Platí, že CVD nástroje jsou vhodné pro obrábění vysoce abrazivních neželezných materiálů. Většina vlastností těchto nástrojů je lepší v porovnání s vlastnostmi PKD nástrojů. Vyšší tvrdost a zároveň vyšší odolnost proti opotřebení CVD nástrojů znamená možnost obrábět abrazivnější konstrukční materiály v porovnáním s PKD nástroji. Trvanlivost CVD nástrojů je vyšší. Na druhou stranu jejich nižší lomová houževnatost znamená, že nejsou tolik vhodné pro frézování a obrábění přerušovaným řezem. Jinak se uplatňují převážně při soustružení a vrtání [50]. Typické materiály, které je vhodné obrábět CVD nástroji jsou:

- kompozity s kovovou matricí,
- slitiny hliníku,
- laminát, sklolaminát a materiály s karbonovými vlákny,
- grafit,
- plasty a pryže,
- dřevovláknité a cementové desky [50].

U CVD nástrojů je možné dosáhnou menších zrn v porovnání s PKD nástroji. Vyleštěné CVD nástroje tak disponují vyšší kvalitou ostří a jsou vhodné pro dokončovací operace nebo aplikace, kde je požadována vysoká kvalita obrobené plochy. S vysokou kvalitou ostří souvisí i schopnost dobrého odvodu třísky. CVD diamant navíc díky vysoké tepelné vodivosti dobře odvádí teplo z místa řezu [36].

CVD nástroje mají nízkou citlivost na vlhkost a jsou vysoce chemicky inertní, proto je možné je kombinovat s řadou řezných kapalin. Řezná kapalina zvyšuje výkon procesu díky působení mazací složky a složky, která slouží k odvodu tepla. Na druhou stranu mají

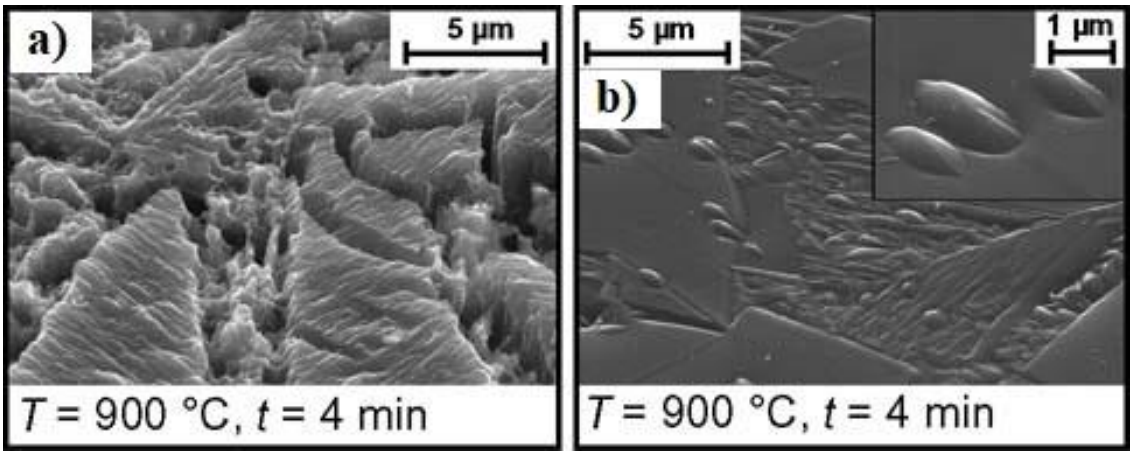
CVD nástroje nízký koeficient tření, což umožňuje efektivní suché obrábění. Nástroje navíc nejsou tolik náchylné ke grafitizaci. Grafitizace zde nastává až při teplotách přesahujících 700 °C. Na rozdíl od PKD nástrojů je tak možné CVD nástroje použít při aplikacích, kde vznikají vyšší teploty během řezného procesu. Suché obrábění je z důvodu absence řezné kapaliny ekologické [36, 50].

6.2.3 Opotřebení

Hlavním problémem nástrojů s CVD diamantovým povlakem je nedostatečná přilnavost, respektive adhese povlaku k nástroji. Riziko poškození stoupá u tenčích povlaků s jemnějšími zrny. Snížení přilnavosti povlaku je způsobeno také mikrotrhlinami, které vznikají abrazivním opotřebením nástroje. Nedostatečná adheze diamantového povlaku může způsobit odlamování povlaku z nástroje, které vede k selhání nástroje [54]. Opatření jsou [54]:

- použití hrubších zrn, která jsou následně opracována, např. laserem,
- použití multivrstvých CVD povlaků,
- úprava nástroje před povlakováním (leptání),
- použití mezivrstev.

V případě obrábění kovových materiálů je adheze hlavním mechanizmem opotřebení nástroje s CVD povlakem nebo vrstvou. Nárůstek vzniká na hřbetu nástroje, od kterého je periodicky oddělován kontinuálním pohybem materiálu obrobku. Oddělování nárůstku způsobuje uvolnění diamantových zrn. Tvorbu nárůstku je možné omezit změnou geometrie nástroje [54].



Obr. 6.8 Opotřebení CVD nástroje při teplotě 900 °C po 4 minutách a) nedopovaný diamant, b) diamant dopovaný borem [54].

Oxidační proces způsobuje vznik kráterů ve struktuře, zvýšení drsnosti povrchu a úbytek materiálu. Proces je způsoben reakcí diamantu s kyslíkem. Závažnost tohoto poškození roste se zvyšující se teplotou. V případě, že se teplota řezného procesu pohybuje nad 800 °C, objeví se už po několika minutách znatelné poškození na povrchu nástroje. Odolnost proti poškození za vysokých teplot je možné zvýšit dopováním diamantu borem. Na obr. 6.8 je vidět rozdíl v opotřebení CVD řezného nástroje bez přítomnosti boru

obr. 6.8 a) a dopovaného borem obr. 6.8 b). Defekty většinou vznikají na hranicích zrn. U tenkých povlaků vzniká opotřebení dříve, protože se skládají z většího počtu zrn. Materiál substrátu nemá žádný vliv na odolnost proti poškození za zvýšených teplot. Je to rozdíl proti PKD, kde sekundární kovová fáze způsobuje grafitizaci a tlak po hranicích zrn. U PKD se tak poškození objevuje už při teplotě 600 °C [54].

6.3 Diamantové brousící kotouče

Broušení je považováno převážně za dokončovací operaci. V dnešním průmyslu se broušení využívá také pro rychlý úběr materiálu. Jeho efektivnost závisí mimo jiné na správné volbě brousícího materiálu. Úběr materiálu probíhá pomocí ostrých zrn brusiva. Z tohoto důvodu, díky svým vlastnostem, patří diamant mezi významné brousící materiály využívané v průmyslu. Výrazný podíl průmyslových diamantů (syntetických i přírodních) se v současnosti používá právě na brousící nástroje. Diamantové brousící kotouče – viz obr 6.9 – mají vysokou trvanlivost a umožňují brousit materiály s vysokou tvrdostí a křehké materiály. Jsou vhodné pro přesné broušení. Povrchy broušené diamantovým kotoučem dosahují vysoké jakosti a geometrické přesnosti. V dnešní době se vyrábějí diamantové brousící kotouče nejrůznějších tvarů, včetně vyříznutých profilů. Tvary a rozměry kotoučů jsou normalizované. Důležité je zvolit správný typ kotouče podle broušené plochy [4, 28, 55, 56, 57, 58].

Obr. 6.9 Diamantové brousící kotouče [58].

6.3.1 Vlastnosti

Výsledné vlastnosti diamantového brousícího kotouče závisí na typu kotouče, zrnitosti, tvrdosti, druhu pojiva, koncentraci a struktuře. Aby mělo broušení dostatečnou účinnost a obráběná plocha dosahovala požadované kvality, je nutná kombinace vhodných charakteristik kotouče vzhledem k obráběnému materiálu, způsobu broušení, podmínek broušení a velikosti úběru materiálu [4, 58].

Diamantový brousící kotouč se skládá z diamantových zrn, které jsou slinovány a spojeny pojivy. Je důležité zvolit vhodné parametry výroby podle charakteristik kotouče. Nesprávné parametry, převážně během slinování, mají za následek poškození zrn, které vede ke snížení výkonnosti nástroje. Z tohoto důvodu se v dnešní době pro určení vhodných parametrů používají počítačové modely, které simulují výrobní proces [55].

Velikost použitých zrn charakterizuje zrnitost. Velikost diamantových zrn se určuje jejich prosévánim přes síta. Oka sít mají jmenovité rozměry. Na základě toho, mezi kterými síty diamantová zrna zůstanou, je jim přiděleno označení. Zrnitost se volí na základě obráběného materiálu a předepsané drsnosti broušené součásti. Jemná zrnitost se využívá pro dokončovací operace. Hrubší zrnitosti jsou vhodné pro měkké a houževnaté materiály a pro větší úběry materiálu [4, 28].

Pojivo nemá brousící účinky, přesto výrazně ovlivňuje efektivnost brousícího kotouče. Při volbě pojiva je nutné zohlednit druh diamantu, obráběný materiál a podmínky broušení. Pro diamantové kotouče se obvykle používají pojiva kovová, keramická nebo pryskyřice. Diamantové kotouče se v dnešní době také galvanicky pokovují niklem nebo mědí. Povlak zajišťuje vyšší trvanlivost nástroje [4, 28, 58].

Koncentrace udává obsah diamantu v brousící vrstvě nástroje. Je to charakteristika, která výrazně ovlivňuje řezivost, trvanlivost a produktivitu nástroje. Vzhledem k tomu, že cena diamantového nástroje závisí převážně na množství použitého diamantu, je správná volba koncentrace vzhledem k aplikaci z ekonomického hlediska důležitá. Kotouče s nižší koncentrací se používají pro přesné broušení. Vyšší koncentrace se používá pro kotouče s požadavkem na dodržení tvaru a pro sériové broušení [28].

Tvrdost vyjadřuje míru houževnatosti a pružnosti můstků pojiva mezi jednotlivými zrny brusiva. Je to vlastnost charakterizující odpor zrn brusiva proti vylomení. Tvrdost kotouče se volí podle druhu broušeného materiálu a podle způsobu broušení. U měkkých kotoučů dochází ke snadnému odlomení zrn, která se tak uvolňují z kotouče. Měkké kotouče se obvykle používají na tvrdý materiál, který má větší styčnou plochu s brousícím kotoučem. U tvrdých kotoučů je odlamování omezeno. Tvrdé kotouče vydrží větší síly, mají vyšší trvanlivost a používají se pro dokončovací operace a měkčí materiály. Správná volba tvrdosti je důležitá. Během broušení dochází k otupení diamantových zrn. Pokud je zvolena správná tvrdost vzhledem k aplikaci, dochází k odlomení tupých zrn a kotouč se ostří. Při použití příliš tvrdého kotouče zůstanou otupená zrna na kotouči. Pro naostření je pak nutné použít orovnávací nástroj. V případě použití příliš měkkého kotouče dojde k opotřebení a kotouč má nízkou trvanlivost [4, 58].

6.3.2 Aplikace

Diamantové brousící kotouče jsou vhodné pro broušení [58, 59]:

- slinutých karbidů,
- keramiky,
- cermetů,
- PKD a KNB,
- kamene,
- neželezných kovů,
- drahokamů a polodrahokamů,
- skla, porcelánu, křemene,
- grafitu, karbonu,
- žáruvzdorných materiálů,
- plastů,
- plastů s obsahem skelných vláken,
- polovodičových materiálů.

Využívají se také v automobilovém a leteckém průmyslu, mimo jiné pro výrobu ložisek a při výrobě vačkových hřídelí a rotorů pro proudové motory. Diamantové brousící kotouče mají své velké uplatnění při broušení keramických nebo kovových lékařských a stomatologických výrobků, jako např. chirurgické nástroje a zubní implantáty [58].

6.3.3 Opotřebení

Charakter a vliv opotřebení diamantových zrn brousícího nástroje je závislý na obráběném materiálu a řezných podmínkách. Hlavní druhy opotřebení diamantových brousících kotoučů jsou [28]:

- adhezní (únavové),
- abrazivní,
- difuzní,
- chemické,
- oxidační.

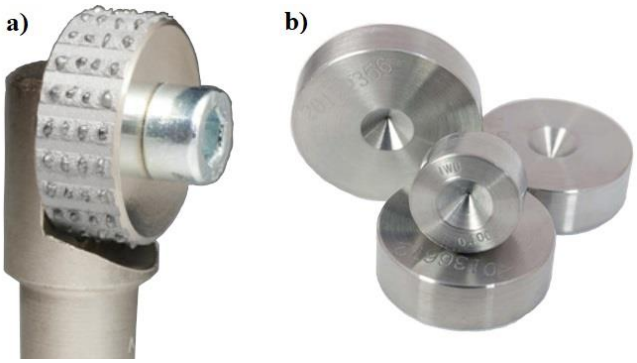
Při broušení neželezných kovů, keramiky, skla a jiných materiálů, které nezpůsobují tak vysoké abrazivní opotřebení, je hlavním mechanizmem opotřebení adheze. Intenzita adhezního opotřebení při broušení těchto materiálů diamantovým brousícím kotoučem je přesto v porovnáním s jinými brousícími materiály výrazně nižší. Difuzní a chemické opotřebení nastává při broušení materiálů jako železo a nikl. Příčinou je chemická afinita uhlíku k těmto materiálům. Oxidační opotřebení je vzniká převážně při dosažení vysokých teplot během broušení [28].

6.4 Monokrystalické nástroje

Přírodní a syntetický monokrystalický diamant se ve strojírenském průmyslu využívá převážně pro dokončovací operace. Ostří monokrystalických nástrojů dosahuje vyšší kvality než ostří PKD nástrojů nebo nástrojů s CVD povlaky. Monokrystalický diamant má kromě strojírenství široké uplatnění v optice a elektronice.

6.4.1 Přírodní monokrystal

Přírodní monokrystalický diamant se jako řezný materiál využívá pro dokončovací operace, kde je požadována vysoká jakost obráběného povrchu. Malé krystaly přírodního diamantu se používají jako součásti pilových listů, vrtáků a brousících kotoučů. Z drobných, případně rozemletých diamantů se vyrábějí diamantové pasty, které se používají k leštění a jemnému broušení [11, 60]. Přírodní diamant se efektivně využívá jako materiál pro orovnávače brousících kotoučů – viz obr. 6.10 a). Struktura a geometrie přírodního diamantu je vhodná pro silné bodové působení při této aplikaci. Jeho struktury a vysoké čistoty se také využívá v průvlacích na tažení drátů – viz obr. 6.10 b). U průvlaků z PKD např. hrozí, že sekundární kovová fáze, kterou PKD obsahuje, způsobí jiskření, které může vést až ke vznícení maziva. Přírodní diamanty se také používají pro výrobu vysoce přesných nástrojů a nožů. Diamantové nože se využívají v chirurgii. Další oblastí využití jsou přístroje na měření tvrdosti [60].



Obr. 6.10 a) vícezrnný orovnávač [61], b) průvlak na tažení drátů [62].

6.4.2 HPHT monokrystal

Monokrystaly syntetizované metodou HPHT jsou vhodné pro [63]:

- aplikace, kde je nutné dlouhé ostří,
- řezné nástroje pro superfinišování a leštění,
- průvlaky pro tažení drátů,
- orovnávací nástroje.

Na obr. 6.11 je vidět široká škála HPHT monokrystalických diamantů využívaných v dnešní době v praxi. Jedná se o část sortimentu firmy Element Six.

Obr. 6.11 Monokrystalický HPHT diamant [63].

6.4.3 CVD monokrystal

CVD monokrystaly se používají pro přesné obrábění. Jsou vhodné pro dokončovací operace vysoce abrazivních materiálů. CVD monokrystaly vhodné pro mechanické aplikace mají vysokou odolnost proti opotřebení, odolnost proti vzniku nárůstku, vysokou tepelnou vodivost a nízkou teplotní roztažnost. Disponují vysokou kvalitou ostří. Jsou bezbarvé a dosahují vysoké čistoty. Výsledné materiálové vlastnosti CVD monokrystalu jsou konzistentní a předvídatelné na základě syntézy, což je značná výhoda v porovnání s přírodním monokrystalem. Obr. 6.12 ukazuje CVD monokrystal vyráběný firmou Element Six využívaný pro mechanické operace [63].

Obr. 6.12 CVD monokrystalický diamant [63].

6.5 Diamantové pasty

Diamantové pasty se skládají z pojiva a diamantového prášku, který obsahuje diamantová zrna určité velikosti. Zrnitost u běžně používaných diamantových past se pohybuje od 1 µm do 90 µm. Prášky se podle aplikace vyrábějí z přírodního nebo syntetického diamantu. Pojiva zajišťují soudržnost diamantových zrn, a navíc slouží jako mazací a chladící prostředek. Pojiva se vyrábí z takových materiálů, aby byla zajištěna omyvatelnost pasty vodou nebo organickými rozpouštědly. Výsledné vlastnosti pasty závisí na zrnitosti, pojivu a koncentraci diamantu. Diamantové pasty se dodávají v plastových dávkovačích, které mají tvar injekční stříkačky – viz obr. 6.13 [64, 65, 66].

Diamantové pasty se používají pro [64, 65, 66]:

- dokončovací operace funkčních ploch (nástrojů, lisovacích forem, trysek, průvlaků a zápustek),
- metalografické výbrusy,
- lapování a leštění povrchů (kalených nástrojů, vstřikovacích a vyfukovacích forem, střižných a ohýbacích nástrojů, přesných dílců hydraulických, pneumatických a palivových systémů, kamene a polodrahokamů) a honování.

Diamantové pasty se používají k obrábění kovových i nekovových materiálů. Jsou vhodné pro použití na tvrdých materiálech jako kalená ocel, keramika a karbid wolframu. Pomocí diamantových past je možné dosáhnout vysoké kvality povrchu (až Ra 0,04). Takto opracovaný povrch dosahuje zrcadlového lesku. Malý rozptyl diamantových zrn umožňuje lepší leštění. Diamantové pasty jsou stabilní i při vysokých teplotách [64].

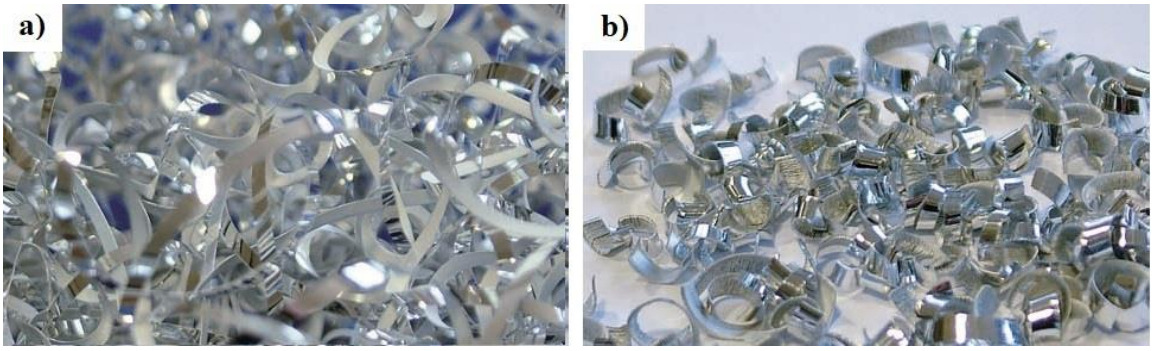
Obr. 6.13 Diamantové pasty [65].

7 NOVÉ TRENDY

Současný výzkum a vývoj je zaměřen převážně na zdokonalování stávajících řezných materiálů. S tím souvisí i rozvoj materiálu DLC, jehož využití patří mezi nové trendy [67]. S cílem zdokonalit řezný proces je také veden výzkum geometrie a tvaru řezných nástrojů. Zvládnutí laserové technologie otevřelo nové možnosti při úpravách řezné části nástroje.

7.1 Diamantové nástroje s utvařečem třísek

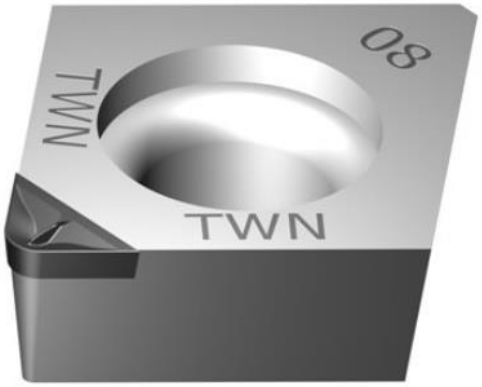
Utvařeče třísek ovlivňují tvar třísky a zajišťují snížení hodnoty objemového součinitele třísek. Používají se při aplikacích, kde vzniká nevhodný druh třísky. Dlouhé a plynulé třísky – viz obr. 7.1 a) – se mohou namotat na nástroj a způsobit jeho poškození. Utvařeče třísek se používají pro zlepšení třískového hospodářství. Cílem je vytvořit dělenou třísku, ideálně elementárního tvaru, se kterou se dobře manipuluje při odvodu ze stroje a následné dopravě a zpracování – viz obr. 7.1 b) [4, 68].



Obr. 7.1 Rozdíl ve tvaru třísky formované nástrojem a) bez utvařeče, b) s utvařečem [42].

Problémem při vytváření účinného utvařeče třísky na PKD nebo CVD nástroji je vysoká tvrdost diamantu. Utvařeče se totiž vytvářejí přímo na břitu nástroje. Tento problém se podařilo vyřešit rozvojem mikroobráběcích center s pikosekundovými lasery. Laserová technologie umožňuje tvorbu řezů bez povrchových trhlin a vytváření libovolných povrchových reliéfů. Je možné vytvářet libovolné 3D utvařeče, a to i přímo v ostří diamantového nástroje. Kromě toho umožňuje vyrobit téměř všechny představitelné geometrie a vytvářet ostří o vysoké kvalitě. Na obr. 7.2 je vidět laserem vyrobený utvařeč třísky. V současnosti je možné vytvořit utvařeč třísky na nástrojích nebo VBD z téměř libovolných sort PKD i CVD diamantu. Při obrábění laserem navíc nevzniká prakticky žádný odpad a není nutné použít žádné řezné kapaliny, proto je tato technologie ekologická [42, 69, 70].

Diamantové nástroje s utvařečem třísky se používají pro soustružení, frézování, vrtání a zapichování. Uplatňují se především v automobilovém, leteckém a kosmickém průmyslu, ale také v oblastech medicíny, optiky a přesné mechaniky. Utvařeče se vytváří podle použití nástroje. Zlepšují odvod a lom třísek a brání tvorbě nárůstků. Dalšími přednostmi nástrojů s utvařeči je vyšší bezpečnost výroby (díky kontrolovanému lomu třísek), vyšší produktivita a trvanlivost, redukce řezných sil a omezení tvorby otřepů (díky měkkému řezu) [70].



Obr. 7.2 Laserem vyrobený utvářeč TiroWave pro běžné obrábění [70].

7.2 DLC povlaky

DLC je zkratka anglického Diamond Like Carbon, které lze přeložit jako „uhlík podobající se diamantu“. Jedná se o označení metastabilního stavu amorfního uhlíku, který tvoří povlak. Jak už vyplývá z názvu, vlastnosti DLC povlaků se blíží diamantu. Povlaky dosahují 60–80 % tvrdosti diamantu. Jsou chemicky inertní a mají výborné tribologické vlastnosti. K jejich přednostem navíc patří i relativně nízká cena. Pro vytváření DLC povlaků se používá např. metoda CVD nebo depozice iontovým svazkem. Jejich depozice probíhá za nízkých teplot, proto nehrozí ovlivnění vlastností substrátu. DLC povlaky je možné nanášet na celou řadu materiálů včetně ocelí, litin a barevných kovů. Problém může nastat v případě aplikace povlakovaných železných podkladů za vyšších teplot. Hrozí totiž nauhličení substrátu, které vede ke ztrátě tvrdosti a změně funkčních vlastností. Běžná tloušťka povlaků se pohybuje v jednotkách μm [71, 72, 73, 74]. Základní charakteristiky DLC povlaků – viz tab. 7.1.

DLC povlaky zvyšují odolnost řezného nástroje proti opotřebení. Nástroje tak dosahují vyšší trvanlivosti, což je významné z ekonomického hlediska. Povlaky dále zajišťují lepší odvod třísek, snižují řezné síly, snižují tření, omezují vznik nárůstku a umožňují dosáhnout vyšší jakosti obráběného povrchu. Nástroje s DLC povlaky jsou vhodné pro obrábění neželezných kovů, nekovových materiálů a plastů [71, 75, 76].

Značné využití mají DLC povlaky v automobilovém průmyslu. Kromě řezných nástrojů se povlakují i samotné automobilové součástky. Povlaky zvyšují tvrdost, snižují třecí ztráty, a chrání součástky před korozí a opotřebením. Vlastností DLC povlaků se také využívá v lékařství a optice [71].

Tab. 7.1 Charakteristiky DLC povlaku firmy VÚHŽ (sorta DLC Hard) [71].

Mikrotvrdost	[HV 0,025]	4 000-7 000
Tloušťka	[μm]	1-3
Koef. tření	[-]	0,05-0,15
Poissonovo číslo	[-]	0,07
Povlakovací teplota	[°C]	80-200
Pracovní teplota	[°C]	300

ZÁVĚR

Diamantové řezné materiály jsou důležitou součástí světového strojírenského průmyslu. Za poslední 50 let došlo k jejich obrovskému rozvoji a rozšíření. Zásadním průlomem v jejich vývoji bylo zvládnutí a následné zdokonalování technologie diamantové syntézy. Syntetický diamant vyřešil problém s omezenými zdroji přírodního diamantu. Dnešní pokročilé metody syntézy navíc umožňují vytvářet diamanty s konkrétními vlastnostmi vzhledem k výrobě řezného nástroje a následné aplikaci.

Z teoretické studie uvedené v předkládané práci vyplynulo, že:

- diamantové řezné materiály při vhodné aplikaci vynikají vysokou tvrdostí, odolností proti opotřebení, výkonností, trvanlivostí a tepelnou vodivostí,
- v současnosti je většina diamantů používaných ve strojírenství syntetických. Přesto se přírodní diamant při některých aplikacích stále využívá,
- pro depozici diamantu je důležité zvolit vhodný substrát,
- vlastnosti diamantového řezného nástroje závisí na typu a sortě diamantu. Pro využití jeho plného potenciálu je důležitá volba diamantu se správnými vlastnostmi vzhledem k aplikaci,
- nástroje z CVD diamantu mají v porovnání s PKD nástroji vyšší tvrdost, odolnost proti abrazi, tepelnou vodivost a nižší koeficient tření. Na druhou stranu PKD nástroje dosahují vyšší lomové houževnatosti,
- diamantové řezné materiály nejsou vhodné pro obrábění železa a jeho slitin. Z důvodu vysoké chemické afinity uhlíku k železu dochází k velkému opotřebení. Dalším nevhodným materiálem jsou niklové slitiny,
- diamantové řezné nástroje nejsou vhodné pro aplikace, kde během řezného procesu působí vysoké teploty. Ty způsobují grafitizaci, která vede k degradaci řezného nástroje,
- rozvoj laserové technologie umožňuje efektivně opracovávat ostří diamantového nástroje a tvorbu utvařečů třísek, což vede ke zdokonalování řezného procesu.

Vzhledem k výše zmíněným nedostatkům, i z důvodu, že se jedná o moderní progresivní řezný materiál, stále probíhá výzkum a vývoj, který má za cíl zlepšení diamantových řezných materiálů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
2. ANTON, Humár. TECHNOLOGIE I: TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 1. část [online]. Brno, 2003 [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
3. KOCMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. Technologie obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001, 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
4. Obrábění a zpracování kovů. ELUC [online]. [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1059
5. HUMÁR, Anton. Materiály pro řezné nástroje. Praha: MM publishing, 2008, 235 s. (převážně barev.) ; 26 cm. ISBN 978-80-254-2250-2.
6. KUDELA, Miroslav. SANDVIK COROMANT (FIRMA). Příručka obrábění: kniha pro praktiky. Praha: Scientia, 1997, 1 sv. (různé stránkování) ISBN 91-972299-4-
7. BÍZA, Michal. Oceli na nástroje [online]. Brno, 2017 [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: http://hdl.handle.net/11012/67500. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce Eva Molliková.
8. ZEMČÍK, Oskar. Nástroje a přípravky pro obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, 193 s. obr. + 1 CD-ROM. ISBN 80-214-2336-6.
9. BARAN, Jan. Slinuté karbidy a jejich efektivní využití [online]. Brno, 2008 [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: http://hdl.handle.net/11012/4799. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Anton Humár
10. DAVIS, J. R. (Joseph R.). Tool materials. Materials Park: ASM International, 1995, v, 501 s. : ilustrace. ISBN 0-87170-545-1.
11. Diamond. Geology.com [online]. c2005-2019 [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: https://geology.com/minerals/diamond.shtml
12. BREEDING, C. a J. SHIGLEY. The "type" classification system of diamonds and its importance in gemology. Gems and Gemology[online]. Gemological Institute of America (GIA), 2009, 45(2), 96-111 [cit. 2019-03-01]. DOI: 10.5741/GEMS.45.2.96. ISSN 0016626X. Dostupné z: https://www.gia.edu/doc/The-%E2%80%9CType%E2%80%9D-Classification-System-of-Diamonds.pdf
13. EKLMOV, E. a., V. a. SLDOROV, E. o. BAUER, N. n. MEI'NIK, N. j. CURRO, J. o. THOMPSON a S. m. STISHOV. Superconductivity in diamond. Nature [online]. 2004, 428(6982), 542-545 [cit. 2019-03-16]. DOI: 10.1038/nature02449. ISSN 00280836.

Dostupné z: http://web.b.ebscohost.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=1&sid=5b885cb2-00eb-4325-9bf9-c3b5ee0aae00%40pdc-v-sessmgr02

14. Improved diamond-anvil cell allows higher pressures than ever before. Physics World [online]. 02.11.2012 [cit. 2019-03-16]. Dostupné z: https://physicsworld.com/a/improved-diamond-anvil-cell-allows-higher-pressures-than-ever-before/

15. PANTEA, C., J. QIAN, G. a. VORONIN a T. w. ZERDA. High pressure study of graphitization of diamond crystals. Journal of Applied Physics [online]. American Institute of Physics, 2002, 91(4), 1957-1962 [cit. 2019-03-01]. DOI: 10.1063/1.1433181. ISSN 0021-8979. Dostupné z: https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.1433181

16. Natural Diamonds. Gemone Diamonds [online]. c2018 [cit. 2019-03-27]. Dostupné z: https://www.gemonediamond.com/natural-diamonds/

17. Diamant jako řezný materiál. T+T Technika a trh [online]. Brno, c2019 [cit. 2019-03-27]. Dostupné z: https://www.technikaatrh.cz/obrabeni/diamant-jako-rezny-material

18. STACHEL, T. a R.w. LUTH. Diamond formation — Where, when and how?. LITHOS [online]. Elsevier B.V, 2015, 220-223, 200-220 [cit. 2019-03-01]. DOI: 10.1016/j.lithos.2015.01.028. ISSN 0024-4937. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002449371500050X?via%3Dihub

19. COOMBS, Amy. Mineral Flaws Clarify How Diamonds Form. Eos [online]. 2016, 97 [cit. 2019-03-01]. DOI: 10.1029/2016EO054833. ISSN 2324-9250. Dostupné z: https://eos.org/articles/mineral-flaws-clarify-how-diamonds-form

20. Nález posledního diamantu se blíží. VVDIAMONDS [online]. Praha [cit. 2019-03-02]. Dostupné z: https://www.vvdiamonds.cz/blog/nalez-posledniho-diamantu-se-blizi-41.html

21. OSBORNE, Hannah. Russia: Mystery rock containing 30,000 diamonds discovered in Udachnaya mine. In: International Business Times: Russia: Mystery rock containing 30,000 diamonds discovered in Udachnaya mine [online]. c2019, 18.12.2014 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: https://www.ibtimes.co.uk/russia-mystery-rock-containing-30000-diamonds-discovered-udachnaya-mine-1480056

22. DIAMOND IN KIMBERLITE. In: Crystal Classics [online]. c2016 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: https://www.crystalclassics.co.uk/product/cc8883/

23. Těžba a vznik diamantu. VVDIAMONDS [online]. Praha [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: https://www.vvdiamonds.cz/blog/vznik-a-tezba-diamantu-14.html

24. JIRÁNEK, Jaroslav. Diamonds. SWL.

25. Element Six. THE ELEMENT SIX CVD DIAMOND HANDBOOK. c2017, 28 s. [cit. 2019-03-03]. Dostupné také z: https://e6-prd-cdn-01.azureedge.net/mediacontainer/medialibraries/element6/documents/brochures/element_six_cvd_diamond_handbook.pdf?ext=.pdf

26. COELHO, R.t., S. YAMADA, D.k. ASPINWALL a M.l.h. WISE. The application of polycrystalline diamond (PCD) tool materials when drilling and reaming aluminium based alloys including MMC. International Journal of Machine Tools and Manufacture [online]. Elsevier, 1995, 35(5), 761-774 [cit. 2019-03-16]. DOI: 10.1016/0890-6955(95)93044-7. ISSN 0890-6955. Dostupné z: https://www-sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/0890695595930447

27. PLÁNIČKA, František. PKD a CBN nástroje. MM Průmyslové spektrum [online]. 2012, (9), 67 [cit. 2019-03-02]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/pkd-a-cbn-nastroje.html

28. ŠVARAL, Štefan. Obrábanie nástrojmi z diamantu a kubického nitridu bóru. Bratislava: Alfa, 1977, 230 s.

29. KOUŘIL, Karel. Nová generace průmyslového diamantu. MM Průmyslové spektrum [online]. 2010, (9), 106 [cit. 2019-03-02]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/nova-generace-prumysloveho-diamantu.html

30. HPHT large single crystal synthetic diamond. Element Six [online]. c2017 [cit. 2019-05-0505-05]. Dostupné z: https://asia.e6.com/en/Home/Materials+and+products/Single+crystal+synthetic+diamond/HPHT+large+single+crystal+synthetic+diamond/

31. PCD Cutter Tools. In: DIAMONDWK [online]. [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: https://www.diamondwk.com/pcd-cutting-tools/diamond-cutter.html

32. VONDRÁČEK, Milan. Diamant jako řezný materiál. MM Průmyslové spektrum [online]. 2012, (3), 73 [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/diamant-jako-rezny-material.html

33. RAHIM, Mohammad, Guangxian LI, Songlin DING, John MO a Milan BRANDT. Electrical discharge grinding versus abrasive grinding in polycrystalline diamond machining—tool quality and performance analysis. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology [online]. London: Springer London, 2016, 85(1), 263-277 [cit. 2019-03-17]. DOI: 10.1007/s00170-015-7935-z. ISSN 0268-3768. Dostupné z: https://link-springer-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1007/s00170-015-7935-z

34. BALMER, R s, J r BRANDON, S l CLEWES, et al. Chemical vapour deposition synthetic diamond: materials, technology and applications. Journal of Physics: Condensed Matter [online]. 2009, 21(36), 364221 [cit. 2019-03-23]. DOI: 10.1088/0953-8984/21/36/364221. ISSN 0953-8984. Dostupné z: https://iopscience-iop-org.ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1088/0953-8984/21/36/364221

35. SCHWANDER, Michael a Knut PARTES. A review of diamond synthesis by CVD processes. Diamond & Related Materials [online]. Elsevier B.V, 2011, 20(9), 1287-1301 [cit. 2019-03-03]. DOI: 10.1016/j.diamond.2011.08.005. ISSN 0925-9635. Dostupné z: https://www-sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0925963511002913

36. GICQUEL, Alix, Khaled HASSOUNI, François SILVA a Jocelyn ACHARD. CVD diamond films: from growth to applications. Current Applied Physics [online]. Elsevier B.V, 2001, 1(6), 479-496 [cit. 2019-03-24]. DOI: 10.1016/S1567-1739(01)00061-X. ISSN 1567-1739. Dostupné z: https://www-sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S156717390100061X

37. LU, Ping, Humberto GOMEZ, Xingcheng XIAO, Michael LUKITSCH, Delcie DURHAM, Anil SACHDEVE, Ashok KUMAR a Kevin CHOU. Coating thickness and interlayer effects on CVD-diamond film adhesion to cobalt-cemented tungsten carbides. Surface & Coatings Technology [online]. Elsevier B.V, 2012, 215 [cit. 2019-03-27]. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.08.093. ISSN 0257-8972. Dostupné z: https://www-sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0257897212010924

38. CUI, Yu-xiao, Wei-song WANG, Bin SHEN a Fang-hong SUN. Reprint of "A study of CVD diamond deposition on cemented carbide ball-end milling tools with high cobalt content using amorphous ceramic interlayers". Diamond & Related Materials [online]. Elsevier B.V, 2016, 63, 51-59 [cit. 2019-03-24]. DOI: 10.1016/j.diamond.2016.01.017. ISSN 0925-9635. Dostupné z: https://www-sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0925963516000145

39. PCD Cutting Tools. In: EUROGRIND [online]. Swansea [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: https://eurogrind.com/pcd-tooling/

40. Intruzivní hornina. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Intruzivn%C3%AD_hornina

41. Element Six. GIVING TOOLMAKERS A COMPETITIVE EDGE. c2017, 19 s. [cit. 2019-03-23]. Dostupné také z: https://asia.e6.com/wps/wcm/connect/2451c5c3-4738-41d0-aea4-0de96bc8f72e/E6_Metalworking_A4_English_R6_AwVIZ.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=2451c5c3-4738-41d0-aea4-0de96bc8f72e

42. DIA-Praha. Diamantové nástroje pro třískové obrábění. 60 s. [cit. 2019-04-26]. Dostupné také z: http://diapraha.cz/uploads/assets/katalogy/pkd-katalog_becker_2011_cz.pdf

43. BARÁNEK, Ivan. Rezné materiály pre rýchlostné, tvrdé a suché obrábanie. Trenčín: Trenčianska univerzita Alexandra Dubčeka, 2004. ISBN 80-8075-013-0.

44. Abrasive Technolog. Superabrasive CUTTING TOOLS & WEAR PARTS. C2019, 7 s. Dostupné také z: https://assets.abrasive-tech.com/literature/SuperabrasiveCuttingToolWearParts.pdf

45. VRBA, Pavel. PKD a CBN nástroje pro obrábění v automobilovém průmyslu. Automobil Industry [online]. 2008, (3), 74 [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: http://infocube.cz/old/images/automobilindustry/clanky/PKD%20a%20CBN%20n%E1stroje%20pro%20obr%E1b%ECn%ED%20v%A0automob.%20pr%F9m_74-75.pdf

46. DE VOS, Patrick, Jan-Eric STÅHL, Kateřina DUFKOVÁ, Miroslav PÍŠKA a Martin SLANÝ. Opotřebení řezných nástrojů: praktické zkušenosti. Fagersta: Seco Tools AB, 2014, 168 s. : barevné ilustrace, fotografie.

47. CVD Cutting Tools. In: Grinder [online]. c2019 [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: http://www.drillbitgrinder.com/what-are-the-advantages-of-cvd-diamond-coated-tool/

48. ĆMIEL, Milan. VÝVOJ NÁSTROJŮ S PKD, CVD VRSTVOU A CVD POVLAKEM PRO DOKONČOVÁNÍ DĚR [online]. Brno, 2009 [cit. 2019-03-27]. Dostupné z: http://hdl.handle.net/11012/9338. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Karel Kouřil.

49. CHEN, Naichao, Jun AI, Yingchao CHEN, Ping HE, Jianxin REN a Dongmei JI. Multilayer strategy and mechanical grinding for smoothing CVD diamond coated defective substrate. Materials & Design [online]. Elsevier, 2016, 103, 194-200 [cit. 2019-03-27]. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.04.069. ISSN 0264-1275. Dostupné z: https://www-sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0264127516305433

50. Element Six. CVD DIAMOND FOR DRESSING AND CUTTING APPLICATIONS. c2016, 8 s. [cit. 2019-04-06]. Dostupné také z: https://asia.e6.com/wps/wcm/connect/797f1738-98b1-447d-a762-e5ec1a64982d/E6_Single+Crystal+Brochure_A4_16pp_R4_VIZ.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=797f1738-98b1-447d-a762-e5ec1a64982d

51. SALGUEIREDO, E., M. AMARAL, F.a. ALMEIDA, A.j.s. FERNANDES, F.j. OLIVEIRA a R.f. SILVA. Mechanical performance upgrading of CVD diamond using the multilayer strategy. Surface & Coatings Technology [online]. Elsevier B.V, 2013, 236, 380-387 [cit. 2019-03-27]. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2013.10.017. ISSN 0257-8972. Dostupné z: https://www-sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0257897213009511

52. Multilayer CVD Diamond. In: CemeCon: CemeCon Diamond Coating Technology [online]. [cit. 2019-03-27]. Dostupné z: http://www.cluster-thueringen.de/fileadmin/thcm/pdf/veranstaltungen/vortraege/synthetischer_diamant_2016/cemecon_diamond.pdf

53. Diamond films on Planar (Flat) Substrates. In: University of Bristol [online]. Bristol, c2002-2019 [cit. 2019-03-27]. Dostupné z: http://www.chm.bris.ac.uk/pt/diamond/semflat.htm

54. UHLMANN, E. a M. BRÜCHER. Wear Behavior of CVD-Diamond Tools. CIRP Annals - Manufacturing Technology [online]. Elsevier, 2002, 51(1), 49-52 [cit. 2019-04-12]. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61463-2. ISSN 0007-8506. Dostupné z: https://www-sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0007850607614632

55. KUNDRÁK, J., V. FEDOROVICH, A.p. MARKOPOULOS, I. PYZHOV a N. KRYUKOVA. Diamond grinding wheels production study with the use of the finite element method. Journal of Advanced Research [online]. Elsevier B.V, 2016, 7(6), 1057-1064 [cit. 2019-04-13]. DOI: 10.1016/j.jare.2016.08.003. ISSN 2090-1232. Dostupné z: https://www-sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S209012321630056X

56. BHOWMIK, Swagata a Rudra NAIK. Selection of Abrasive Materials for Manufacturing Grinding Wheels. Materials Today: Proceedings [online]. Elsevier, 2018, 5(1), 2860-2864 [cit. 2019-04-13]. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.01.077. ISSN 2214-7853. Dostupné z: https://www-sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S2214785318300877

57. Broušení. SPŠ Zenerova [online]. Ostrava [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: https://www.spszengrova.cz/texty/texty/STT/STT2-12_Brouseni_RAJ.pdf

58. ZHAO, Brian. Why Diamond Grinding Wheels Are Super-Abrasives. Forturetools [online]. Zhengzhou, c1996-2019, 13.10.2015 [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: https://www.forturetools.com/why-diamond-grinding-wheels-are-super-abrasives/

59. Application of Diamond and CBN Grinding Wheels. ROTMESS [online]. [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: https://www.rotmess.de/application-diamond-cbn-grinding-wheels

60. ROFFMAN, Steve a LIEBER & SOLOW. NATURAL DIAMONDS: FROM MINES TO MACHINES. Lieber & Solow [online]. New York, c2019, 2000 [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: http://www.lieberandsolow.com/3.pdf

61. Orovnávání. In: DIA-Praha [online]. Praha, c2014 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: http://www.diapraha.cz/orovnavani

62. Diamond Drawing Dies. In: IWD [online]. c2012-2019 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: http://www.diamondwiredrawingdies.com/products/single-crystal-diamond-die/natural-diamond-drawing-die/mono-diamond-drawing-die/

63. Element Six. TAKING UNPREDICTABILITY OUT OF MECHANICAL APPLICATIONS. c2019, 16 s. [cit. 2019-04-26]. Dostupné také z: https://asia.e6.com/wps/wcm/connect/797f1738-98b1-447d-a762-

e5ec1a64982d/E6_Single+Crystal+Brochure_A4_16pp_R4_VIZ.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=797f1738-98b1-447d-a762-e5ec1a64982d

64. Lapovací a leštící pasty. DIAMA [online]. Česká Třebová, c2009-2013 [cit. 2019-04-26]. Dostupné z: http://www.diama.cz/lapovaci_lestici_pasty.html

65. Mepac. DIAMANTOVÉ PASTY KEMET. 4 s. [cit. 2019-04-26]. Dostupné také z: https://www.mepac.cz/files/enoviny/diamantove_pasty_kemet-18-3810.pdf

66. Mepac. LEŠTÍCÍ, LAPOVACÍ A BROUSÍCÍ TECHNIKA. 36 s. [cit. 2019-04-26]. Dostupné také z: https://www.mepac.cz/files/katalogy/lestici--lapovaci-a-brousici-technika-cz.pdf

67. KROULÍK, Zbyněk. MSV 2017 představí klíčové oborové vystavovatele. MM Průmyslové spektrum [online]. 2017, (5), 25 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/msv-2017-predstavi-klicove-oborove-vystavovatele.html

68. KUBELA, Petr. Analýza tvorby třísky pomocí digitální vysokorychlostní kamery [online]. Brno, 2009 [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: http://hdl.handle.net/11012/13566. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Aleš Polzer.

69. PÍŠKA, Miroslav a Katrin BUČKOVÁ. Řezné materiály současnosti. MM Průmyslové spektrum [online]. 2018, 09.05.2018, (5), 50 [cit. 2019-04-26]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/rezne-materialy-soucasnosti.html

70. DVOŘÁK, Luděk. Nástroje se silnou vrstvou CVD-diamantu. MM Průmyslové spektrum [online]. 2013, 17.12.2013, (12), 62 [cit. 2019-04-26]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-se-silnou-vrstvou-cvd-diamantu.html

71. LOUDA, Martin. Použití DLC povlaků (nejen) v automobilovém průmyslu. MM Průmyslové spektrum [online]. 2013, 04.06.2013, (6), 92 [cit. 2019-04-26]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/pouziti-dlc-povlaku-nejen-v-automobilovem-prumyslu.html

72. GRYČ, Jan. Nové frézy pro obrábění neželezných kovů. MM Průmyslové spektrum [online]. 2015, 09.12.2015, (12) [cit. 2019-04-26]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/nove-frezy-pro-obrabeni-nezeleznych-kovu.html

73. NOVÁK, Zdeněk. Přesné měření tloušťky povlaků. MM Průmyslové spektrum [online]. 2015, 09.12.2015, (12), 130 [cit. 2019-04-26]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/presne-mereni-tloustky-povlaku.html

74. IHI Ibond AG [online]. C2019 [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: https://www.ionbond.com/cz/

75. DAI, Mingjiang, Kesong ZHOU, Zhenghai YUAN, Qian DING a Zhiqiang FU. The cutting performance of diamond and DLC-coated cutting tools. Diamond & Related Materials [online]. Elsevier B.V, 2000, 9(9), 1753-1757 [cit. 2019-04-30]. DOI: 10.1016/S0925-9635(00)00296-X. ISSN 0925-9635. Dostupné z: https://www-sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S092596350000296X

76. FOLEA, Milena, Adriana ROMAN a Nouras-Barbu LUPULESCU. AN OVERVIEW OF DLC COATINGS ON CUTTING TOOLS PERFORMANCE. ACADEMIC JOURNAL OF MANUFACTURING ENGINEERING [online]. 2010, (3), 30 [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/285897475_An_overview_of_DLC_coatings_on_cutting_tools_performance

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis
CVD	Chemical Vapour Deposition
DLC	Diamond Like Carbon
HPHT	High Pressure High Temperature
HV	tvrdost podle Vickerse
KNB	kubický nitrid boru
MKD	mikrokrystalický diamant
NKD	nanokrystalický diamant
NO	nástrojová ocel
PKD/PCD	polykrystalický diamant
PKNB	polykrystalický kubický nitrid boru
RO	rychlořezná ocel
SK	slinutý karbid
VBD	vyměnitelná břitová destička
WC	karbid wolframu

Symbol	Jednotka	Popis
E	[GPa]	Youngův modul pružnosti
HK	[GPa]	tvrdost podle Knoopa
K_{IC}	[MPa.m$^{1/2}$]	lomová houževnatost dle I. módu zatěžování
Ra	[μm]	průměrná aritmetická úchylka drsnosti
T	[°C]	teplota
Wr	[-]	odolnost proti opotřebení
a_p	[mm]	šířka záběru hlavního ostří
t	[min]	čas
v_c	[m.min^{-1}]	řezná rychlost
v_e	[m.min^{-1}]	rychlost řezného pohybu
v_f	[mm.min^{-1}]	posuvová rychlost