



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

SUPERTVRDÉ MATERIÁLY A JEJICH EFEKTIVNÍ VYUŽITÍ

SUPERHARD CUTTING MATERIALS AND THEIR EFFECTIVE USE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Radek TEPLÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Anton HUMÁR, CSc.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Radek Teplý

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

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

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

Supertvrdé materiály a jejich efektivní využití

v anglickém jazyce:

Superhard cutting materials and their effective use

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce je zaměřena na polykrystalický diamant a polykrystalický kubický nitrid boru z hlediska jejich označování, fyzikálních, mechanických a řezných vlastností, užití a současných trendů vývoje a výroby u renomovaných špičkových producentů nástrojů a nástrojových materiálů. Cílem práce je komplexní zpracování získaných technických poznatků a zejména vyhodnocení a porovnání pracovních podmínek (druh obráběného materiálu, řezné podmínky - vc, f, ap), které vybraní výrobci doporučují pro efektivní soustružnické aplikace svých druhů supertvrдых nástrojových materiálů.

Cíle diplomové práce:

1. Charakteristika supertvrдых řezných materiálů (druh, výroba, značení, fyzikálně mechanické vlastnosti)
2. Polykrystalický kubický nitrid boru a polykrystalický diamant v sortimentu výroby nejvýznamnějších světových producentů nástrojů a nástrojových materiálů
3. Hodnocení řezivosti nástroje
4. Doporučené pracovní podmínky pro efektivní využití supertvrдых řezných materiálů

Seznam odborné literatury:

1. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cuttig - A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.
2. BOTHE, O. Strojirenská technologie IV. Třetí vydání. Praha: SNTL, 1989. 91 s. ISBN 2617 04-215-89.
3. BROOKES, K.J.A. World Directory and Handbook of Hardmetals and Hard materials. Sixth Edition. East Barnet Hertfordshire, United Kingdom: International Carbide Data, 1996. 220+528 p. ISBN 0 9508995 4 2.
4. ČSN-ISO 3685. Zkoušky trvanlivosti při soustružení jednobřitým nástrojem. Praha: Federální úřad pro normalizaci a měření, 1993.
5. HUMÁR, Anton. Materiály pro řezné nástroje. Praha: MM publishing s. r.o., 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
6. HUMÁR, A., PÍŠKA, M. Materiály pro řezné nástroje. MM Průmyslové spektrum - Speciální vydání. Zář 2004. ISSN 1212-2572., s. 84-96.
7. LEICHTFRIED, G., SAUTHOFF, G., SPRIGGS, G.E. Refractory, Hard and Intermetallic Materials. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2002. ISBN 3-540-42961-1.
8. Technické materiály a prospekty firem Ceramtec, Ceratizit, Iscar, Kennametal, Korloy, Kyocera, Mitsubishi, NTK, Sandvik Coromant, Seco, Sumitomo, Walter, Widia.
9. Odborné časopisy International Journal of Refractory Metals & Hard Materials (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/02634368>), Journal of Materials Processing Technology (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/09240136>), Journal of the European Ceramic Society (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/09552219>), Materials Science and Engineering: A (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/09215093>), Surface and Coatings Technology (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/02578972>), Thin Solid Films (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00406090>), Wear (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00431648>).

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Anton Humár, CSc.


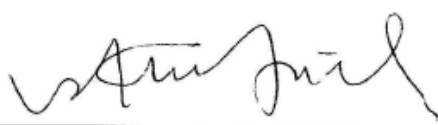
Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 31.10.2011

L.S.



prof./Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na supertvrdé materiály (polykrystalický diamant, polykrystalický nitrid boru) a uvádí jejich fyzikálně-mechanické vlastnosti, výrobu, efektivní použití, nové trendy vývoje. Hodnotí sortiment řezných materiálů a nástrojů jednotlivých předních světových producentů z hlediska optimálních řezných podmínek pro soustružnické operace a druhu obráběného materiálu. Dále jsou tyto řezné materiály porovnány mezi jednotlivými výrobci, aby vynikly rozdíly v řezných podmínkách.

Klíčová slova

Polykrystalický diamant, polykrystalický nitrid boru, opotřebení, nástroj, řezné podmínky

ABSTRACT

Diploma thesis is focused on the superhard cutting materials (polycrystalline diamond, polycrystalline boron nitride) and presents their physico-mechanical properties, production, efficient use, new trends. It assesses the range of cutting tool materials and individual front world producers in terms of optimum cutting conditions for turning operations and type of material to be machined. Further, these cutting materials are compared between different manufacturers to bring out their differences in cutting conditions.

Key words

Polycrystalline diamond, polycrystalline boron nitride, wear, tool, cutting conditions

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TEPLÝ, Radek. *Supertvrdé materiály a jejich efektivní využití*. Brno 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 73 s. 2 přílohy. Vedoucí práce doc. Ing. Anton Humár, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Supertvrdé materiály a jejich efektivní využití** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

25. 5. 2012

Datum

Bc. Radek Teplý

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu doc. Ing. Antonu Humárovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

OBSAH

ABSTRAKT	6
PROHLÁŠENÍ.....	7
PODĚKOVÁNÍ	8
OBSAH.....	9
ÚVOD.....	11
1 MATERIÁLY ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ.....	12
1.1 Druhy řezných materiálů	12
1.1.1 Nástrojové oceli (NO).....	13
1.1.2 Slinuté karbidy (SK)	13
1.1.3 Cermety.....	14
1.1.4 Řezná keramika (ŘK)	14
1.1.5 Supertvrde řezné materiály	15
1.2 Diamant.....	15
1.2.1 Struktura diamantu.....	15
1.2.2 Fullereny	17
1.2.3 Vlastnosti diamantu	17
1.2.4 Vznik přírodního diamantu.....	21
1.2.5 Výroba syntetického diamantu	22
1.2.6 Výroba CVD diamantových vrstev (povlaků).....	25
1.2.7 Nanodiamanty (NPD)	28
1.2.8 Efektivní využití PKD	30
1.3 Kubický nitrid boru (CBN, KBN, c-BN).....	35
1.3.1 Základní fyzikálně mechanické vlastnosti KBN	36
1.3.2 Výroba KBN	36
1.3.3 Skladba PKBN	37
1.3.4 Finální úpravy na VBD.....	39
1.3.5 Efektivní využití PKNB.....	40
2 HODNOCENÍ ŘEZIVOSTI NÁSTROJE.....	44
3 PKNB A PKD V SORTIMENTU VÝROBY NEJVÝZNAMĚJŠÍCH SVĚTOVÝCH PRODUCENTŮ NÁSTROJŮ A NÁSTROJOVÝCH MATERIÁLŮ	46
3.1 Becker Diamantwerkzeuge GmbH	46
3.1.1 Základní charakteristika diamantových nástrojů	46
3.1.2 Doporučené řezné podmínky diamantových nástrojů	47

3.1.3	Základní charakteristika KBN nástrojů	48
3.1.4	Doporučené řezné podmínky KBN nástrojů.....	49
3.2	Element Six.....	49
3.2.1	Základní charakteristika ze sortimentu CBN Material	49
3.2.3	Doporučené řezné podmínky KBN nástrojů.....	51
3.3.4	Základní charakteristika diamantových materiálů.....	51
3.3.5	Doporučené řezné podmínky diamantových nástrojů	52
3.3	Mitsubishi Materials Corporation.....	53
3.3.1	Základní charakteristika ze sortimentu Mitsubishi Carbide	54
	Doporučené řezné podmínky ze sortimentu Mitsubishi Carbide.....	55
3.4	CeramTec GmbH.....	56
3.4.1	Základní charakteristika nástrojů z KBN.....	57
	Doporučené řezné podmínky pro nástroje z KBN.....	58
3.5	Sandvik Coromant	58
3.5.1	Základní charakteristika ze sortimentu Sandvik Coromant.....	59
3.5.2	Doporučené řezné podmínky nástrojů firmy Sandvik	60
3.6	Seco Tools AB	61
3.6.1	Základní charakteristika Secomax PCD ze sortimentu Seco Tools.....	61
3.6.2	Doporučené řezné podmínky Secomax PCD.....	62
3.6.3	Základní charakteristika Secomax PCBN.....	63
3.6.4	Doporučené řezné podmínky Secomax PCBN	64
4	DOPORUČENÉ PRACOVNÍ PODMÍNKY PRO EFEKTIVNÍ VYUŽITÍ SUPERTVRDÝCH ŘEZNÝCH MATERIÁLŮ	65
4.1	Vzájemné porovnání vybraných výrobců materiálů podle druhu obráběného materiálu	65
4.2	Shrnutí zjištěných poznatků supertvrдых materiálů.....	67
	ZÁVĚR	69
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	70
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A ZNAČEK.....	74
	SEZNAM PŘÍLOH.....	75

ÚVOD

V minulosti, kdy se začal člověk vyvíjet, potřeboval ke svému životu nástroje, kterými by si vyráběl předměty, jež by mu dále sloužily pro jeho osobní prospěch. Příkladem jsou zbraně, zemědělské nářadí, atd. Touto výrobou předmětů, převážně řezným způsobem, se zlepšoval v manuální a hlavně v myšlenkových dovednostech. Proto získával touhu vymyslet něco nového, nebo alespoň stávající věc nebo způsob výroby vylepšit. Díky nástrojům vytvořil plno věcí kolem sebe, a tím vytvářel i celkově kultivovanější společnost. Od primitivních nástrojových materiálů jako byl například pazourek, se člověk postupně vyvíjel tak, jak objevoval další nové materiály nejen pro své nástroje, ale i pro další výrobky. Takto se člověk dostal až do dnešní doby, kde má k dispozici tisíce nových materiálů, pro které se našlo uplatnění pro různé konstrukce a výrobky, s nimiž se běžně denně setkáváme.

V této moderní době je člověk stále hnán k pokroku a vytváří stále nové věci, na které jsou kladeny stále větší nároky. Například zvyšováním převážně pevnostních vlastností materiálu, zapříčiní to, že se daný materiál hůře zpracovává na hotový výrobek. Tak přicházejí na řadu moderní řezné nástroje, které musejí odolávat obtížným pracovním podmínkám. Na tyto nástroje jsou kladeny hlavně nároky odolnosti vůči mechanickým zatížením a opotřebování. Pro tyto účely jsou vhodné právě supertvrdé materiály, mezi ně patří diamant a kubický nitrid boru. Jelikož se jedná o dva nejtvrděší známé materiály na světě, tak lze s nimi obrobit téměř jakýkoliv jiný materiál. I přes některé omezující podmínky, které diamant má, například že nemůže obrábět železné kovy, díky k chemické afinitě k železu dochází k velkému opotřebení řezných nástrojů. Tak tento druh obráběného materiálu lze zase obrábět kubickým nitridem boru.

Proto v dnešní době už není takový problém vyrobit nějakou součástku, ale stále se hledají možnosti, jak danou součástku vyrobit co nejlevněji. Jedním z hlavních činitelů, které stanovují výši výrobních nákladů je podmínka, za jak dlouho se daná součástka vyrobí. Když se opomenou nutné přípravné časy na výrobu, tak hlavní veličinou, kterou se dají snížit výrobní časy, jsou řezné podmínky. Stále s dokonalejšími nástrojovými materiály dosahujeme vyšších řezných podmínek, převážně řeznou rychlost. Díky skvělým mechanickým vlastnostem supertvrdých materiálů můžeme tyto materiály zatížit vysokými řeznými rychlostmi. Tím pádem se nám projeví i snížení výrobního času a tím dosáhneme i snížení nákladů na výrobu.

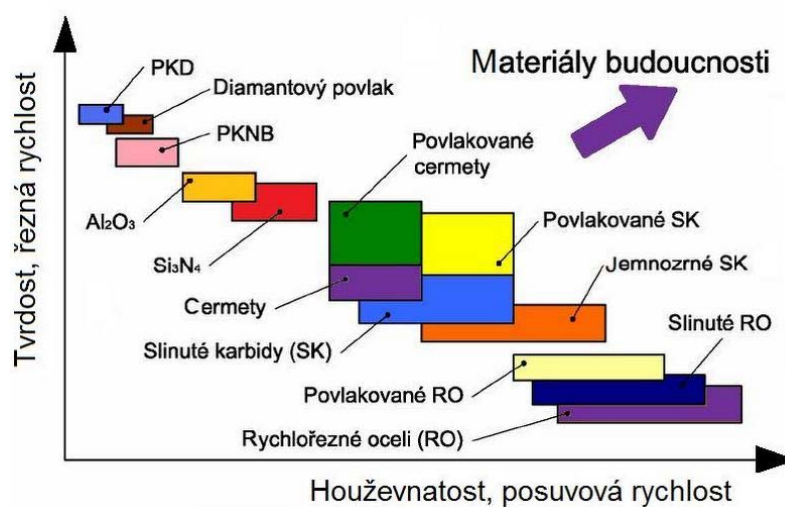
Cílem zpracování této práce je získat potřebné vědomostní poznatky z oblasti supertvrdých materiálů, popsat jejich vlastnosti a možnosti efektivního využití v praxi.



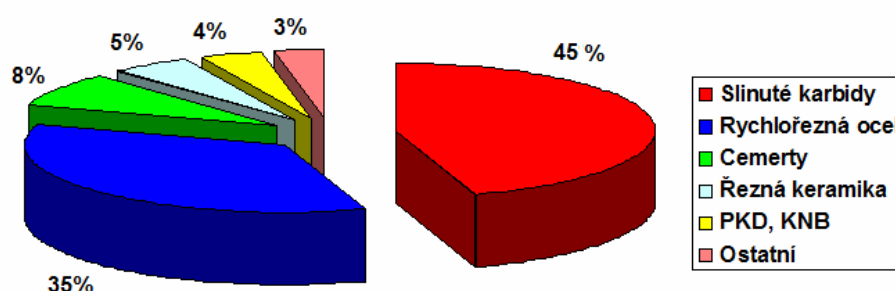
Obr. 1 Na moderní nástroje z kubického nitridu boru jsou kladeny vysoké požadavky [11].

1 MATERIÁLY ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ

V moderní době kdy používáme stále nové konstrukční materiály je zapotřebí pro ně nalézt i vhodnou metodu obrábění. Produktivita obrábění je přímo úměrná zvolenému druhu řezného materiálu. V důsledku celosvětového materiálového výzkumu je dnes k dispozici široký sortiment materiálů vhodných pro řezné nástroje. Od nástrojových ocelí po diamant. Neexistuje žádný univerzální nástrojový materiál, proto se každý z řezných materiálů hodí na určité aplikace. Dané aplikace jsou podmíněny mechanickými vlastnosti daného materiálu (obr.2). Zcela nové řezné materiály asi už nebudou objeveny, alek je snaha stávajícím materiálům zlepšovat mechanické a jiné vlastnosti [12].



Obr. 2 Vliv mechanických vlastností nástrojových materiálů na pracovní podmínky [16].



Obr. 3 Světový podíl použití nástrojových materiálů [8].

1.1 Druhy řezných materiálů

Řezných nástrojových materiálu je celá rozsáhlá řada. Každý materiál má odlišné vlastnosti a je vhodný jen pro určité řezné aplikace. Mezi nejrozšířenější řezné materiály jsou stále rychlořezné oceli a slinuté karbidy (viz. obr.3), jelikož mají univerzální použití. Řezný materiál je tvořen velkým množstvím prvků, sloučenin nebo směsí, které pak tvoří výsledný materiál ve formě slitin (oceli), kompozitů (SK, Cermety, PKD) nebo i ve formě čistého prvku (přírodní diamant). Základní rozdělení řezných materiálů se dělí na:

1.1.1 Nástrojové oceli (NO)

Nástrojové oceli se dělí podle chemického složení na [12]:

- nelegované (uhlíkové) oceli,
- legované oceli (nízko, středně legované),
- vysokolegované (rychlořezné oceli HSS).

Uhlíkové nástrojové oceli:

Nejstarší nástrojový materiál. Musí mít dostatečný obsah uhlíku ($0,50 \div 1,35$ %). Tvrdost materiálu je způsobena martenzitickou strukturou. Jsou kaleny z oblasti austenitu rychlým zchlazením do vody nebo oleje. Po kalení vždy následuje popuštění, při kterém dojde k přeměně tetragonálního martenzitu na stabilnější kubický.

Legované nástrojové oceli:

Legováním oceli se zvyšuje prokalitelnost a snížení intenzity ochlazování, tak aby se samovolně ochlazovali na vzduchu a nedocházelo k vnitřním pnutím a deformacím.

Rychlořezné nástrojové oceli:

Mají vysoký podíl karbidotvorných prvků, proto je po kalení tvrdost nízká, až následným několikanásobným popuštěním se rozpustí zbytkový austenit a vyprecipitují se jemné karbidy legujících prvků a tím tvrdost stoupá. Obsahují karbidotvorné prvky (W, Cr, V, Mo), které tvoří 10 až 25 % tvrdých karbidových částic, zbytek tvoří popuštěný kubický martenzit a nežádoucí zbytkový austenit.

1.1.2 Slinuté karbidy (SK)

Jsou to materiály vyrobeny technologií metodou práškové metalurgie s vysokým obsahem tvrdých karbidických částic (90% i více), se zachováním dobré houževnatosti, díky kovové matici. Základní složení slinutých karbidů je WC+Co, to ale neumožňuje universální použití, proto se slinuté karbidy dělí dle druhu obráběného materiálu na skupiny dle normy ISO 513 na [15, 16, 37]:

Skupina K je určena pro obrábění materiálů, které vytvářejí krátkou, drobnou třísku (zejména pro litiny, nezelezné slitiny a nekovové materiály). Jako jedinou strukturální složkou této skupiny SK je karbid wolframu WC, který má za přibližně stejnou tvrdost jako TiC, ale s rostoucí teplotou klesá tvrdost rychleji než TiC. Proto tyto SK této skupiny nevhodné pro obrábění materiálů, tvořících plynulou třísku, která mnohem více tepelně zatěžuje čelo nástroje.

Skupina P je určena pro obrábění materiálů, které tvoří dlouhou třísku (uhlíkové oceli, slitinové oceli a feritické korozivzdorné oceli). Přítomnost TiC zaručuje vysokou odolnost proti difúzi za vysokých teplot, která je hlavní příčinou vytváření výmolu na čele nástroje. Vhodnost SK skupiny P pro obrábění materiálů, které tvoří plynulou třísku je dána vyšší tvrdostí TiC (též TaC.NbC) za vyšších teplot, než s WC.

Skupina M obsahuje velké množství různých karbidů, má univerzální použití a je určena pro obrábění materiálů, které tvoří dlouhou a střední třísku, jako jsou lité oceli, austenitické korozivzdorné oceli a tvárné litiny. Vzhledem k relativně vysoké houževnatosti se SK této skupiny též často používají pro těžké hrubovací a přerušované řezy.

Skupina N je určena pro obrábění nezelezných kovů. Tyto karbidy mohou být nepovlakované nebo s diamantovým povlakem určené pro dokončovací až hrubovací práce hliníku, hořčíku, mědi, mosazi, plastů atd. Diamantový povlak poskytuje skvělou odolnost proti opotřebení a snižuje tvorbu nárůstku na břitech, což přináší vysokou kvalitu obroběného povrchu.

Skupina S je vhodná pro obrábění pro obrábění superslitin niklu a titanu a žáruvzdorných slitin na bázi niklu, kobaltu nebo železa. Některé substráty se skládají z tvrdého jemnozrnného WC a příměsí 6% kobaltu, což zaručuje zvýšenou tvrdost za vysokých teplot a dobrou odolnost vůči plastické deformaci. Dále tenký PVD povlak z TiAlN, který má vynikající přilnavost i k ostrým břitům, zaručuje houževnatost, rovnoměrné opotřebení hřbetu a vysokou výkonnost při obrábění tepelně odolných superslitin.

Skupina H pro obrábění zušlechťených a kalených ocelí a obrábění tvrzených litin.

Pro zlepšení řezných vlastností SK se řezné nástroje povlakuji tenkou vrstvičkou z odolného materiálu proti opotřebením, z počátku TiC poté TiN, TiCN, Al₂O₃. Pro ještě lepší vlastnosti se povlaky nanášejí do několika vrstev a střídá se materiál povlaku.

Metoda CVD (Chemical Vapour Deposition = chemické napařování z plynné fáze za vysokých teplot (900÷1200) °C. Mezi výhody patří výborná adheze mezi podkladem a povlakem, možnost napaření vrstvy o větší tloušťce (10÷13) μm, povlakování předmětů složitějších tvarů.

Za nevýhody lze považovat tepelné ovlivnění podkladového materiálu (snížení ohybové pevnosti), není možné napovlakovat ostré hrany a další nevýhoda je tahová zbytková napětí v povlaku. Povlaky jsou výhodné, že jsou celistvé díky tomu, že neobsahují pojivo. Mohou mít různé fyzikální a chemické vlastnosti. Mohou být ve více vrstvách (vícevrstvé povlaky), různých složení a různě se tyto vrstvy prolínat. Povlaky zabraňují abrazi, difúzi a šíření transkrystalických trhlin. Mají nízký součinitel tření a tlakovou zbytkovou napjatost.

Metoda PVD (Physical Vapour Deposition = fyzikální napařování) je charakteristická nízkými pracovními teplotami. Proto byla tato metoda vyvinuta pro povlakování nástrojů z HSS. Výhodou je nízká pracovní teplota, takže nedojde k tepelnému ovlivnění materiálu, Nyní se používá i pro SK určené pro přerušované řezy (frézování). Další výhodou je tlakové zbytkové napětí, které vzniká v povlaku. Lze povlakovat i ostré hrany. Mezi nevýhody patří důkladnější přípravu povrchu vzorku před povlakováním (odmašťování, čištění) a nižší tloušťky povlaků [15, 16].

1.1.3 Cermety

Tento materiál měl původně představovat kombinaci vlastností keramiky a kovu (**CER**amics, **MET**al). Z jejich mechanických vlastností měl mít tvrdost keramiky a houževnatost kovu. Ono čekávání se nenaplnilo, a vznikl tento materiál, který je podobný s některými svými vlastnostmi s SK. Výhoda cermetů je vysoká tvrdost za vysokých teplot, též odolnost proti oxidaci a difúzi, která je lepší než u SK. Navíc jsou cermety levnější než SK, jelikož neobsahují drahý kobalt. Hlavní nevýhoda je nízká houževnatost, ve srovnání s hodnotami SK. Cermety se používají pro dokončovací operace ocelí, díky vysoké odolnosti proti adhezi a reakcemi s obráběným materiálem, kde vytváří plochy s velmi nízkou drsností povrchu. Cermety lze použít pro obrábění korozivzdorných ocelí, kde mají vyšší trvanlivost než nepovlakované slituté karbidy [12,3].

1.1.4 Řezná keramika (ŘK)

Je definovaná jako krystalický materiál, jehož hlavní složení jsou anorganické sloučeniny nekovového charakteru. Keramické látky jsou vázány iontovými a kovalentními meziatomovými vazbami, mohou se vyskytovat obě vazby zároveň. Keramika se podle složení dělí na [12]:

- oxidická - čistá keramika (Al₂O₃)
- polosměsná (Al₂O₃ + ZrO₂, Al₂O₃ + ZrO₂ + CoO)
- směsná (Al₂O₃ + TiC, Al₂O₃ + ZrO₂ + TiC, Al₂O₃ + TiN + TiC)

- neoxidická nitridovaná (Si_3N_4 , $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Y}_2\text{O}_3$, $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{TiN}$, sialony - speciální skupina na bázi Si-Al-O-N)
- vyztužená (oxidická nebo nitridová keramika vyztužená pomocí vláken whiskerů SiC nebo Si_3N_4)

Řezná keramika má lepší teplotní odolnost než SK, z tohoto důvodu u nich nedochází téměř k difúzi a oxidaci, pouze k abrazivnímu otěru.

1.1.5 Supertvrdé řezné materiály

Mezi supertvrdé materiály patří přírodní diamant, uměle vytvořený polykrystalický diamant PKD a kubický nitrid bóru KNB. Tyto materiály mají vysokou tvrdost a jsou určeny pro speciální použití. Nejčastěji pro obrábění tvrdých materiálu, pro velmi přesné obrábění a také vhodné pro vysokorychlostní obrábění (HSC). Tyto materiály se na řezných nástrojích objevují ve formě celistvého tělesa (roubíky na VBD) a nyní už i ve formě povlaků na nástrojích z SK nebo jako zrna na brousicích nástrojích.

Diamant je nejtvrděší známý materiál. Jeho tvrdost se pohybuje v rozmezí (6000÷1000) HV. Vysoká tvrdost je dosažena díky kovalentní vazbě každého atomu uhlíku ke čtyřem sousedních atomů, které jsou umístěny ve vrcholech čtyřstěnu. Přírodní monokrystalický diamant se používá jako součást v měřicích zařízení (indentory, doteky). V oboru obrábění se využívají pro velice přesné řezání, jelikož u nich lze vytvořit dokonalé ostří. Polykrystalický diamant není vhodný pro obrábění materiálů s vysokou teplotou tavení (oceli, niklové slitiny, atd.), jelikož se při teplotě (750÷850) °C začíná rozpadat (přechod zpátky na grafit). Naopak je diamant vhodný pro obrábění hliníkových slitin (zejména s vysokým obsahem Si) a nekovových materiálů, jako jsou: umělé hmoty, keramika, materiály vyztuženými skelnými, uhlíkovými, aramidovými a kevlarovými vlákny.

Kubický nitrid bóru má vysokou tvrdost podobně jako diamant mezi 4500-5500 HV. Jeho výhodou oproti diamantu je jeho větší stabilita při vysoké teplotě ve styku s železnými kovy. Lze proto s ním obrábět kalené materiály a při dodržení řezných podmínek tak není potřeba plochy přebroušovat [12, 16].

1.2 Diamant

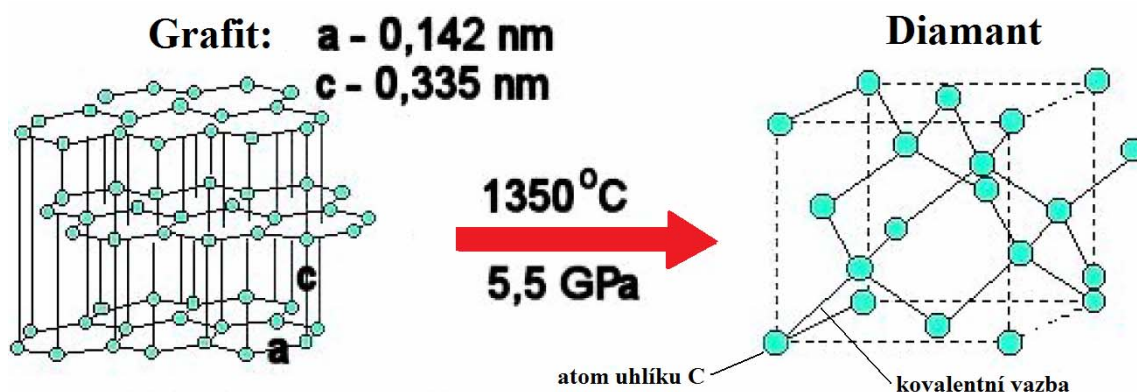
Je to výjimečný materiál s vysokou tvrdostí. Přírodní diamanty se převážně používají pro klenotnické práce na výrobu briliantů, podle čistoty se rozdělují na typy dle (tab. 1.1). Uměle vytvořené diamanty se používají pro průmyslové využití, převážně jako řezný materiál, buď v kovozpracujícím průmyslu, tak i v hornictví a při geologických průzkumech. Nové uplatnění získává i v elektrotechnice, jelikož s různými příměsi má diamant polovodičové vlastnosti.

1.2.1 Struktura diamantu

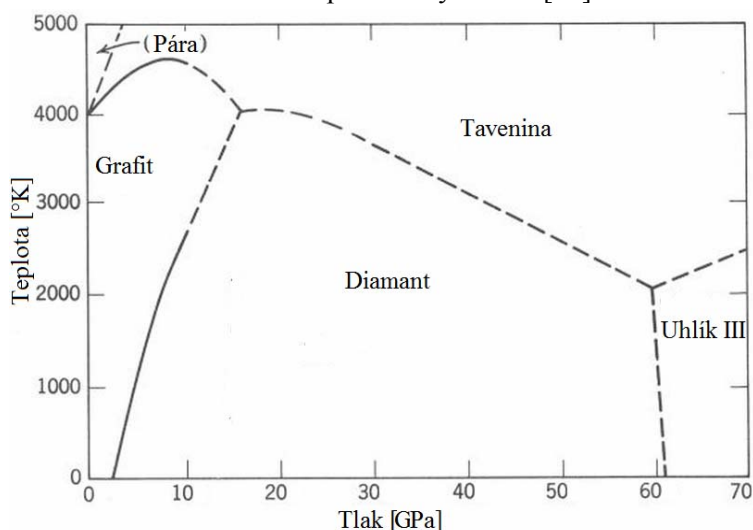
Diamant je modifikace čistého uhlíku, který krystalizuje dle fázového diagramu (obr.5) v kubické mřížce ve které je každý atom uhlíku vázán čtyřmi kovalentními vazbami k dalším atomům umístěným ve vrcholu čtyřstěnu (obr.1.3).

V přírodě se uhlík dále vyskytuje v další čisté modifikaci a to jako grafit. Ten krystalizuje v hexagonální soustavě ve formě desek. Vzdálenost mezi těmito deskami je velká, proto jsou tyto síly malé. Z toho pak plyne, že grafit je velice měkký, má nízký koeficient tření. Je dobrým vodičem elektřiny i tepla. Další formy uhlíku v přírodě jsou ve sloučeninách.

Z anorganických látek to jsou to různé vápence a dolomity (CaCO_3 , $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) a plynný oxid uhličitý CO_2 . Dalšími zdroji uhlíku z organického původu je uhlí, ropa a zemní plyny. S kombinací s vodíkem je základní stavební složkou všech živočichů a rostlin [16].



Obr. 4 Alotropie mřížky uhlíku [15].



Obr. 5 Fázový diagram uhlíku [32].

Tab. 1.1 Typy diamantů [30].

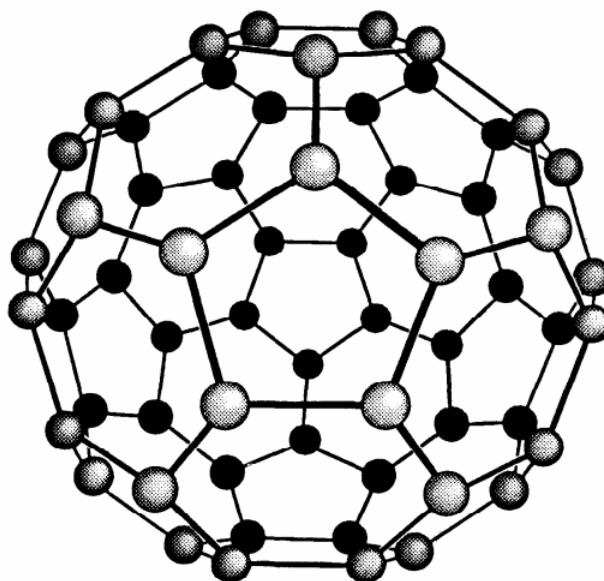
Typ	původ	Nečistoty, vlastnosti
la	98% všech přírodních diamantů	Obsahuje dusík jako nečistotu v poměrně značném množství přibližně 0,1% dusíku obsaženého ve formě malých shluků ve formě destiček. Přesné složení nečistot je neznámé.
lb	Vzácný v přírodní formě, méně než 0,1%. Patří sem všechny syntetické diamanty.	Také obsahuje dusík (0,5 %) jako nečistotu, ale v rozptýlené formě a obsažen substitučně v mřížce. Paramagnetický.
IIa	Velmi vzácný v přírodní formě.	Téměř bez dusíkových nečistot (jen několik ppm dusíku). Lepší optické a tepelné vlastnosti.
IIb	Extremě vzácné v přírodní formě. Mají namodralou barvu. Polovodičové vlastnosti.	Ještě méně dusíku než v IIa. U synteticky vyrobených diamantů se polovodičové vlastnosti získávají dopováním bórem.

1.2.2 Fullereny

Fullereny jsou molekuly, které jsou považovány za další alotropie uhlíku. Jsou tvořené atomy uhlíku uspořádané do vrstvy tvořené z pětiúhelníků a šestiúhelníků s atomy spojených ve vrcholech, vrstvy jsou prostorově svinuty do uzavřeného tvaru (nejčastěji do tvaru koule nebo elipsoidu). Vzhledem k této struktuře jsou mimořádně odolné vůči vnějším fyzikálním vlivům. V dutině molekuly fullerenu může být uzavřený jiný atom, několik atomů či malá molekula. Zatím nejstabilnější známý fullerén obsahuje 60 atomů uhlíku. Jeho čistá krystalická forma, která je tvrdší než diamant, dostala název [fullerit](#) (obr.6).

Fullereny se uměle připravují nejčastěji pyrolýzou organických sloučenin laserem. Fullereny byly nazvány po americkém proslulém architektovi Buckminsteru Fullerovi, který projektoval geodetické kopule podobného tvaru. V současné době je výzkum vlastností a metod přípravy fullerenu velmi intenzivně studován na řadě vědeckých institucí po celém světě. V budoucnu možné praktické aplikace fullerenu mají širokou škálu použití v oblastech [30]:

- polovodičů,
- supravodičů (v případě dopování draslíkem nebo rubidiem),
- výroba nekovových feromagnetických materiálů,
- skladování a separace plynů,
- čištění zemního plynu,
- palivové články a vodíkové skladování,
- úložiště pro radioaktivní izotopy,
- při výrobě maziv.



Obr. 6 Molekula fullerenu C₆₀ [30].

1.2.3 Vlastnosti diamantu

Index světelných lomů

Diamant, charakteristický kubickou krystalovou mřížkou je opticky jednoosý - má jen jedinou hodnotu indexu lomu - nevykazuje dvojlom. Hodnota indexu lomu je 2,418. Z jednolomných materiálů je index lomu diamantu nejvyšší. Vyšší hodnoty jsou naměřeny jen u přírodního anatasu a rutilu, přičemž oba jsou dvojlomné.

Disperze

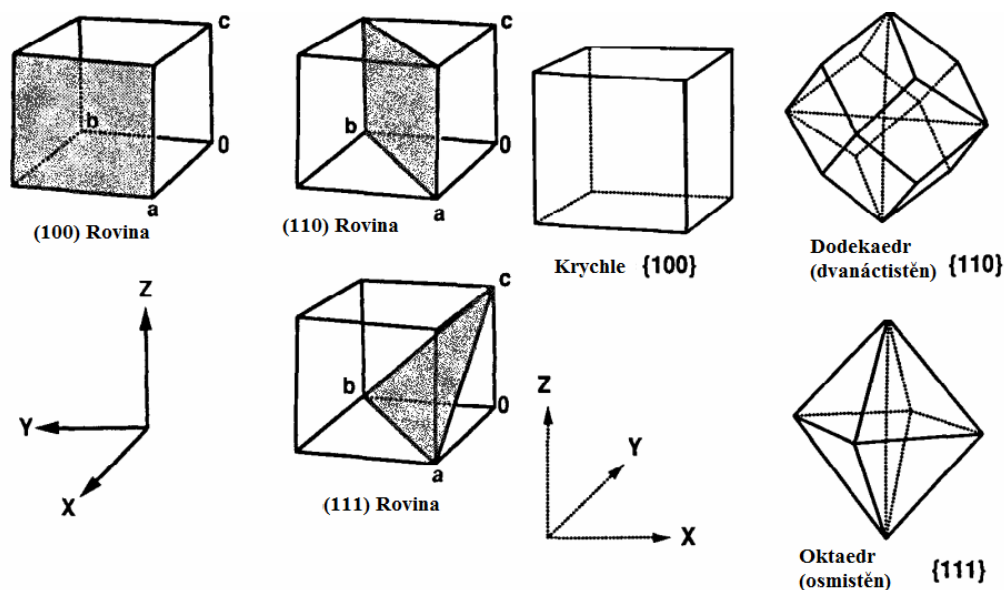
Disperze je optická vlastnost vyjadřující závislost indexu lomu na vlnové délce (tedy barvě) vstupujícího světla. Barevné efekty, pozorovatelné u vystupujících paprsků světla jsou způsobeny právě touto vlastností. Diamant má vzhledem k indexu lomu 2,42 poměrně nízkou hodnotu disperze -0,044.

Rentgenové záření v diamantu

Přenos RTG záření v diamantu je výborný na základě jeho nízkého atomového čísla. Toho se využívá při těžbě diamantů, při separování diamantů z kimberlitové rudy viz. (obr.11). V tenkých vrstvách dokonce umožňuje přenos charakteristické rentgenové záření generované nízkooenergetických prvků, jako jsou boru, uhlíku, a kyslíku, čímž se dá určit obsah příměsí.

Tepelná stabilita

Grafit je stabilní alotropie uhlíku a je jeden z nejvíce žáruvzdorných materiálů se sublimací nad 4000 K při atmosférickém tlaku. Diamant má odlišné chování a je nestabilní, při převodu na grafit je zapotřebí negativní změna volné energie $-2,88 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ při pokojové teplotě a atmosférickém tlaku. Převod diamantu na grafit je nepatrný za běžných teplot a pro všechny praktické účely diamant je stabilní, o čemž svědčí důkaz, že přírodní diamanty v některých naplaveninách, které byly vytvořeny před miliardy lety se od té doby nezměnily.



Obr. 7 Indexy základních rovin a krystalových mřížek diamantu [30].

Například 0,1 karátů (0,02 g) oktaedrického krystalu (obr. 7) se úplně konvertoval na grafit za méně než tři minuty při teplotě 2100°C . Transformace diamantu na grafit je také funkcí okolního prostředí, obzvláště rychlý převod je v přítomnosti karbidových segmentů nebo uhlíku rozpuštěného v kovu. Toto je hlavní příčinou vysokého opotřebení při obrábění ocelí. Například v přítomnosti kobaltu (jež je obsažen jako pojivo v PKD) k transformaci může dojít při nízké teplotě jako je 500°C , což je v případě obrábění zcela normální teplota. Nicméně, ve vodíku je diamant stabilní až do 2000°C a ve vysokém vakuu až do 1700°C .

Grafitizace vzniká, pokud jsou diamanty zahřívány na vysokou teplotu, změny které při tom vznikají, závisí výrazně na prostředí kolem diamantu. Pokud kyslík (nebo jiná aktivní látka) je přítomen, může se tvořit na povrchu diamantu černý povlak od teplot vyšších jak 900 K . To

ovšem se ještě nejedná o samotnou grafitizaci (která zahrnuje přechod diamantu na grafit bez pomoci vnějších činitelů). Pokud jsou diamanty zahřívány v inertní atmosféře, nástup grafitizace začíná být detekována od teplot přibližně 1800 K [16, 26, 29].

Tab. 1.2 Mohsova stupnice tvrdosti [5].

Tvrđost	Látka	Chemický název	Chemický vzorec
1	mastek	kyselý metakřemičitan hořečnatý	$H_2Mg_3(SiO_3)_4$
2	sůl kamenná	chlorid sodný	NaCl
3	kalцит (vápenec)	uhličitan vápenatý	$CaCO_3$
4	fluorit (kazivec)	fluorit vápenatý	CaF_2
5	apatit		$Ca_5(PO_4)_3(OH, Cl, F)$
6	živec (ortoklas)	křemičitan hlinitodraselný	$KAlSi_3O_8$
7	křemen	oxid křemičitý	SiO_2
8	topaz		$Al_2SiO_4(F, OH)_2$
9	korund	oxid hlinitý	Al_2O_3
10	diamant	uhlík	C

Tvrđost

Diamant je charakteristický absolutně nejvyšší tvrdostí. – stupeň 10 Mohsovy stupnice tvrdosti (viz. tab.1.2). Je 150x tvrdší než korund, který má stupeň tvrdosti 9. Z toho vyplývá, že diamantem by se nám mělo podařit zanechat na jakémkoliv jiném materiálu stopu po vrypu a naopak žádnou jinou látkou není možné rýpnout do diamantu. Samotný fakt, že diamant je nejtvrdší známý materiál, je proto obtížné změřit jeho tvrdost, protože jen další diamant může být použit jako indentor. To může vysvětlit celou řadu odlišných hodnot, které se pohybují v rozmezí tvrdosti od 5700 do více než $10.400 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-2}$. Knoopova zkouška tvrdosti je považována za nej přesnější na krystalické materiály. Tvrđost je také funkcí krystalové orientace diamantu v krystalových rovinách a směrech (obr.7), jak je uvedeno v tab. 1.4 jsou hodnoty tvrdosti v širokém intervalu hodnot. Tvrđosti diamantu může být také stanovena pomocí pružné deformace a vyhodnocení pomocí různých koeficientů. [30, 26]

Knoopova zkouška

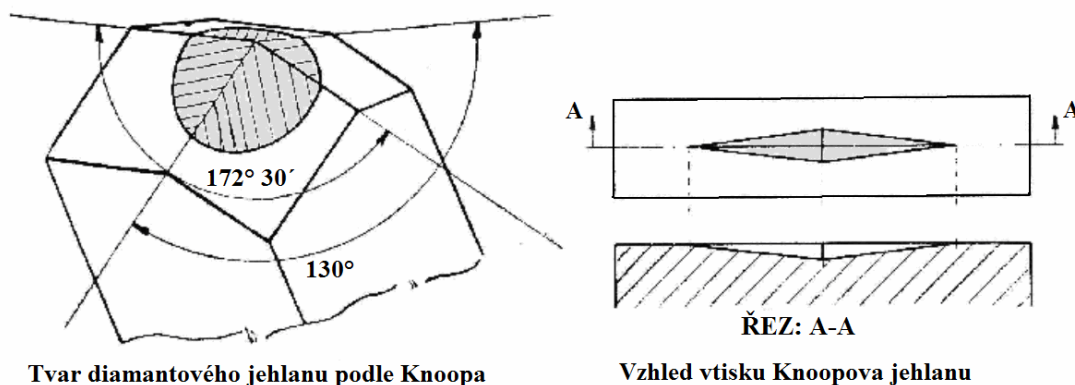
Zkouška tvrdosti obdobná Vickersově metodě, odlišuje se tvarem indentoru (obr.8). Zkušební indentor je rovněž diamantový jehlan, jehož základnou však není čtverec, ale velmi protáhlý kosočtverec. Vtisk má tvar kosočtverce s poměrem úhlopříček 1:7. Měřeným rozměrem je pouze delší rozměr úhlopříčky vtisku. Výhodou Knoopova indentoru je, že deformace jsou relativně největší u krátké úhlopříčky a v tomto směru je tedy největší odpružení při odlehčení. Ve směru dlouhé úhlopříčky je odpružení zanedbatelné. S ohledem na malou hloubku průniku indentoru, lze tuto metodu s výhodou použít i u materiálů se slabou povrchovou vrstvou. Dále lze tu to metodu požit pro měření mikrotvrđosti [27, 41].

Tvrđost se stanoví podle vztahu (1):

Vzorec pro stanovení Knoopovy tvrdosti [41]:

$$HK = 1,451 \cdot \frac{F}{l^2} \quad (1)$$

kde: F [N] – zátěžná síla,
l [mm] – hodnota delší úhlopříčky.



Tvar diamantového jehlanu podle Knoopa

Vzhled vtisku Knoopova jehlanu

Obr. 8 Indentor pro Knoopovu zkoušku [27].

Tepelná vodivost

Diamant má jednu z nejlepších tepelných vodivostí z pevných látek za pokojových teplot (tab.1.2). Má přibližně 6x lepší vodivost než jeden z nejlepších kovových vodičů měď. Vysoká tepelná vodivost materiálu je velmi důležitá vlastnost při obrábění, jelikož dokáže z materiálu odvádět vzniklé teplo z místa řezu. A tím chrání obrobek i nástroj před tepelným poškozením. Proto jsou diamantové nástroje vhodné pro obrábění materiálu s nízkou tepelnou vodivostí, jako jsou různé kompozity, plasty, titanové slitiny a nekovové materiály.

Tab. 1.3 Tepelné vodivosti daných druhů diamantů při teplotě 20 °C [30, 46].

Tepelná vodivost [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]			
Monokrystal		CVD	PCD
Typ Ia	600÷1000	750÷1500	500
Typ IIa	2000÷2100		

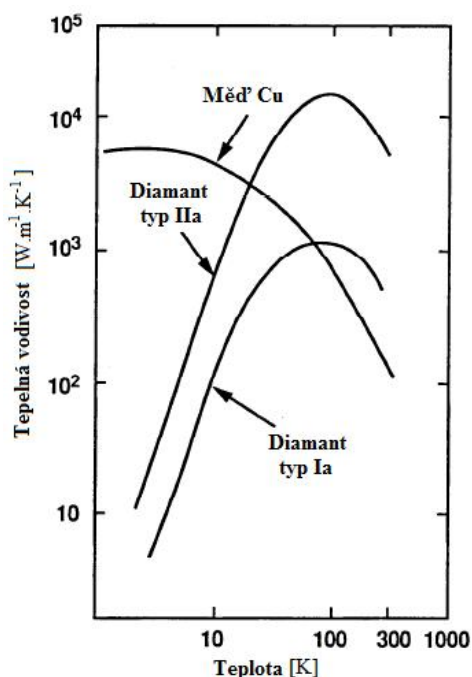
Tab. 1.4 Vlastnosti diamantu [17].

Vlastnosti	Diamant	
	monokrystalický	polykrystalický
Měrná hmotnost [g.cm ⁻³]	3,515 ÷ 3,520	3,42 ÷ 4,50
Délka strany kubické mřížky [nm]	0,3567	
Pevnost v tlaku [GPa]	6,90 ÷ 16,53	4,2 ÷ 8,0
Pevnost v ohybu [MPa]	1350	1200 ÷ 1700
Tvrdość [HV]	5700 ÷ 13000	5000 ÷ 8000
Modul pružnosti v tahu [GPa]	820 ÷ 1250	776 ÷ 925
Modul pružnosti ve smyku [GPa]	507	430
Lomová houževnatost K _{IC} [MPa.m ^{1/2}]	3,4 ÷ 4,2	6,0 ÷ 11,0
Poissonovo číslo [-]	0,10 ÷ 0,29	0,20
Součinitel délkové roztažnosti [10 ⁻⁶ .K ⁻¹]	0,8 ÷ 4,8	3,2 ÷ 4,6
Měrná tepelná vodivost [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	500 ÷ 2200	120 ÷ 550
Teplotní stálost [°C]	700	

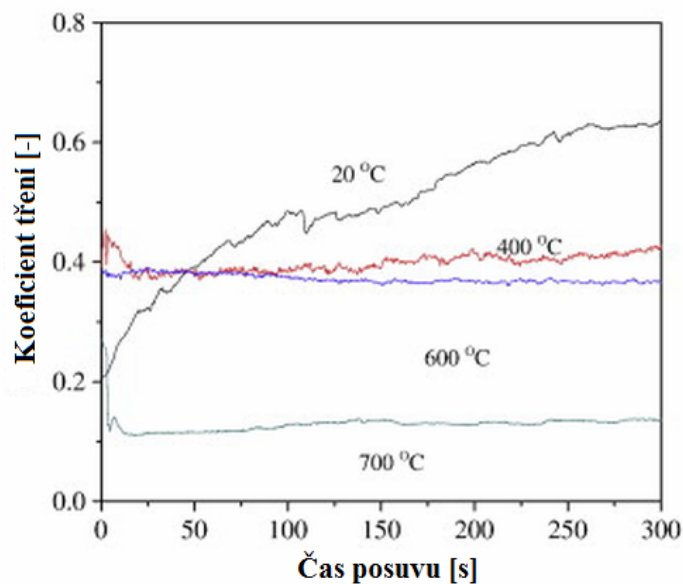
Koeficient tření PKD

Koeficient tření PKD se liší v závislosti na teplotě, a klesá s rostoucí teplotou. Obrázek 9 ukazuje kolísání koeficientu tření PKD v čase posuvu při různých teplotách při posuvné rychlosti 40 m.min⁻¹. Bylo prokázáno, že koeficient tření PKD se neustále zvyšuje až na 5. minutu při pohybu za pokojové teploty (20 °C) a maximální hodnota koeficientu tření je téměř 0,65. Zároveň polykrystalický diamant poskytuje nižší koeficient tření a to přibližně 0,16 po záběhu při

pohybu na 700 ° C. Koeficient tření při pohybu při 400 ° C a 600 ° C zůstává téměř konstantní po celou zkušební dobu [21].



Obr. 9 Tepelná vodivost diamantu v závislosti na teplotě [30].



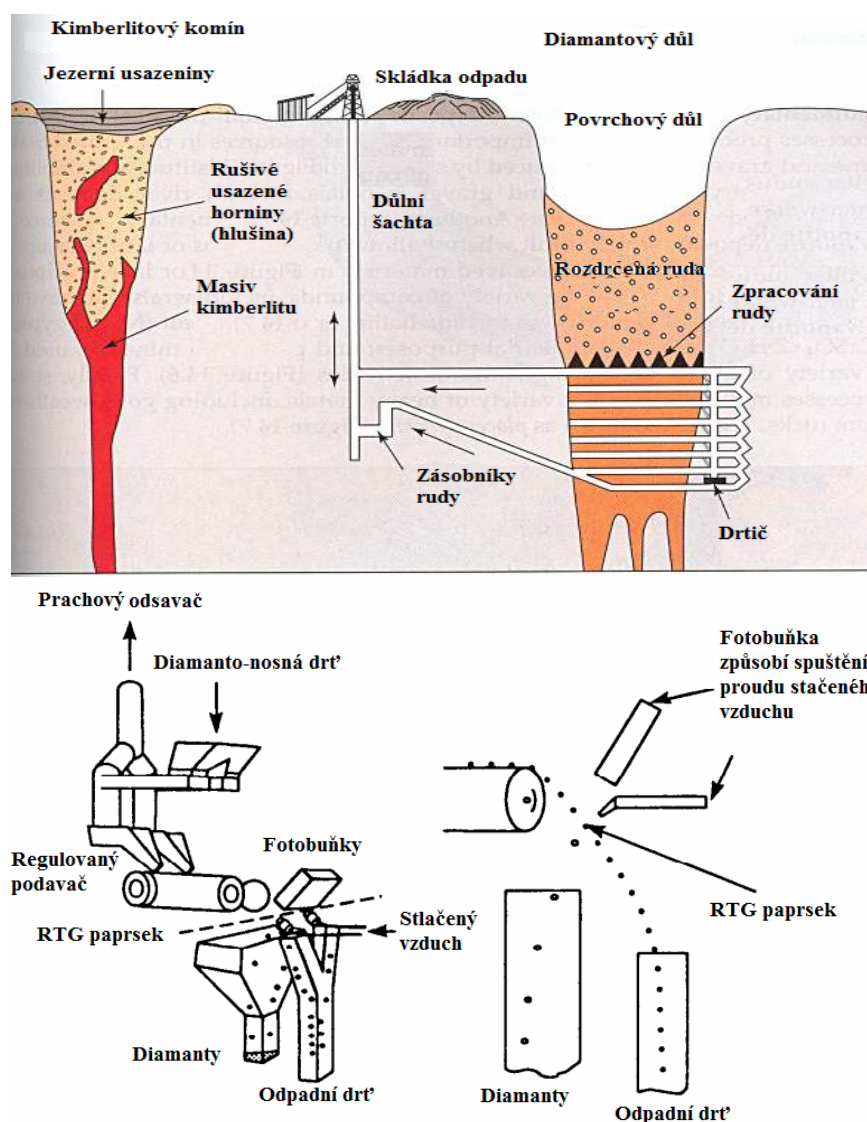
Obr. 10 Průběhy koeficientů tření při různých teplotách [21].

1.2.4 Vznik přírodního diamantu

Slovo diamant má původ v řeckém *adamas - nepřemožitelný*, diamant je nejtvrdším materiálem na světě. I když je tvořen uhlíkem C jedním s nejvíce zastoupeným prvkem na zemi, výskyt diamantu v přírodě je velice vzácný. Krystalizace diamantu z grafitu na diamant probíhala pod povrchem země za extrémních podmínek, kdy tlak přesahoval 7 GPa a teplota byla vyšší než 1300 °C, což odpovídá podmínkám v hloubkách cca 100-200 km pod povrchem země. Díky své tvrdosti byl diamant schopný cestovat zemskou kůrou na povrch, kam byl vytlačován vulkanickou horninou, v níž je usazen. Dva druhy této horniny se nazývají kimberlit a lamproit.

Místo kde se původně vyskytly diamanty jsou ložiska magmatického původu (tzv. *primární ložiska*), kdy jsou diamanty rozptýleny jako akcesorické (přídavné) minerály ve velmi tmavých horninách pocházejících ze svrchního zemského pláště. Tyto horniny se nazývají kimberlity (kimberlit neboli *modrá hornina* podle města Kimberley). K zemskému povrchu vystoupily ve formě mohutných sopouchů, těles komínovitého tvaru. V případě kimberlitových komínů však dochází k zužování směrem do hloubky, proto se často hovoří o „mrkvovitém“ tvaru kimberlitů (obr.11).

Zdaleka ne všechny kimberlity jsou diamantonosné. Některé neobsahují diamanty vůbec, jiné v koncentracích, jež neumožňují ekonomickou těžbu. V primárních ložiscích se vždy vyskytuje více míst bez diamantů, avšak diamanty mají krásný celistvý krystalový tvar, neboť unikly mechanicky namáhavému transportu do sekundárních depozitů. Uvolňování diamantů z kimberlitu dochází pomocí zemské eroze, díky přírodním živlům jako voda, vítr. Srážková voda potom horninu i s diamanty splachuje do vodních toků, kde se mohou za určitých podmínek koncentrovat v některých říčních meandrech a vnikají tzv.: *sekundární ložiska* [26].

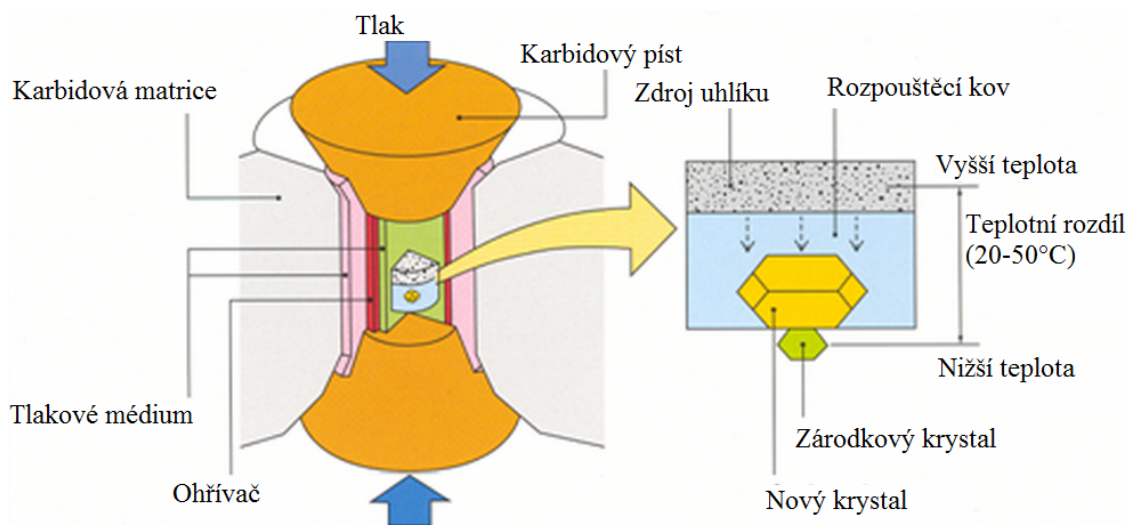


Obr. 11 Těžba a třídění diamantů [20, 30]

1.2.5 Výroba syntetického diamantu

Výroba syntetického diamantu spočívá v přeměně hexagonální mřížky grafitu na kubickou (obr.4) za pomoci vysokých teplot a tlaku pomocí metody (obr.12) High Pressure High Temperature – HPHT. Pro ulehčení procesu je za potřeby kovový katalyzátor na bázi přechodných kovů (Cr, Ta, Mn, Fe, Co, Ni, nebo jejich slitiny a sloučeniny) nebo i nekovové katalyzátory alkalických zemin (uhličitany, hydroxidy a sulfáty). Tyto katalyzátory rozpouštějí grafitický uhlík, který lépe krystalizuje na diamant za nižších teplot podle fázového diagramu (obr.5).

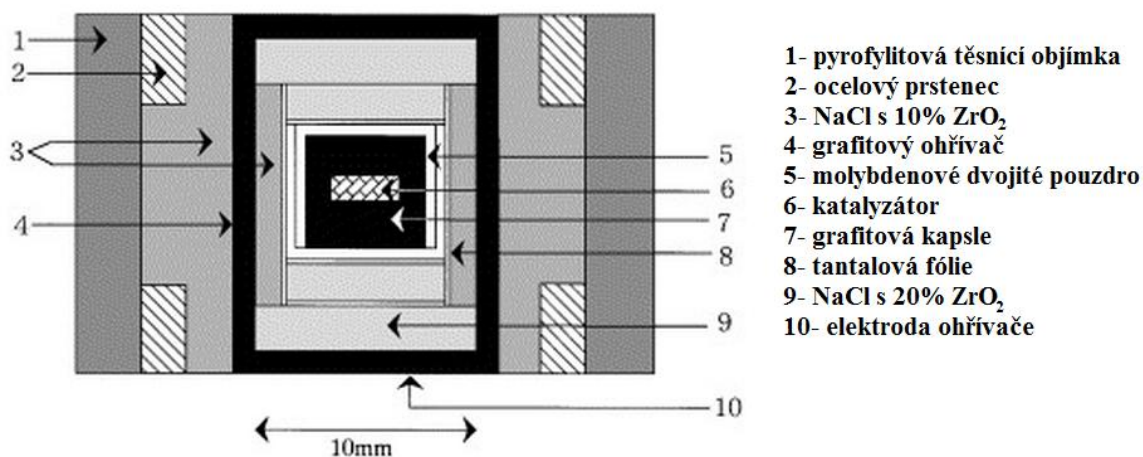
Při první úspěšné syntéze diamantu v roce 1955, kterou provedli F.P. Bundy, H.M.Hall a H.M. Strong v laboratoři v General Electric. Při které použili kovový katalyzátor na bázi slitiny Fe-Ni, které prokládali spolu s grafitovými deskami (čistota 99,9%). Syntéza probíhala při tlaku 5,5 GPa a teplotě přibližně 1297 °C a 15 minutové výdrži. Rozpuštěním kovového katalyzátoru pomocí kyselin HNO_3 , H_2SO_3 byl získán syntetický diamant [16].



Obr. 12 Schéma HPHT [47].

Při použití nekovových katalyzátorů pro syntézu je potřeba obvykle vyšších teplot a tlaků ($> 7.7\text{GPa}$, $> 2000\text{ }^\circ\text{C}$), než při použití kovových katalyzátorů. Některé tyto nekovové katalyzátory se dají též použít jako pojivo při slinování PKD. Mají lepší tepelnou odolnost a mechanické vlastnosti za vyšších teplot, než slinované konvenční metodou s kobaltovým pojivem. Jako úspěšné katalyzátory se osvědčili MgSO_4 , $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, MgCO_3 , CaCO_3 a i prášková síra. Jejich praktické využití pro výrobu je omezeno z důvodu vyšších požadavků na HPHT lisy.

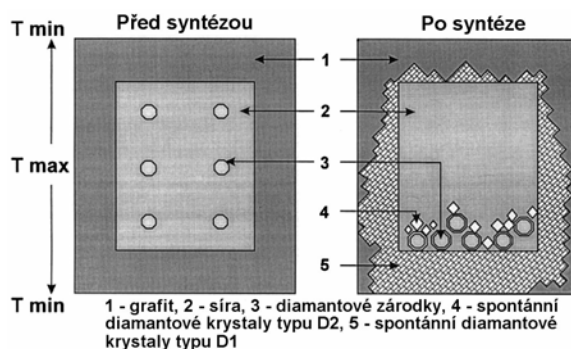
Syntéza se provádí (schéma dle obr.13) v uzavřené buňce složené konstrukce, která se vkládá do více kovádelinového lisu. Jako zdroj uhlíku pro vznik diamantu je použita grafitová kapsle (7), která je naplněna katalyzátorem (6). Tato kapsle je vložena do dvojitého molybdenového těsnícího pouzdra (5), které brání proniknutí tlakového média pro přenos tlaku (rozpuštěný NaCl s ZrO_2 na pozici č. 3, 9), které je kolem grafitové kapsle. Celá sestava je obalena v tantalové fólii (8), zpevněna ocelovým prstencem (2), teplo pro nutnou přeměnu zajišťuje grafitový ohřivač (4), nakonec je vše utěsněno pyrofilitovou objímkou (1), což je keramický těsnící materiál pro vysokotlaké lisy ($\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{14}(\text{OH})_2$) [16, 19].



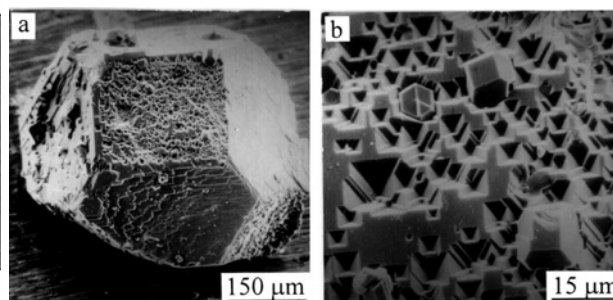
Obr. 13 Buňka pro syntézu diamantových krystalů [19].

Pro lepší růst diamantových krystalů při syntéze je vhodné do katalyzátoru umístit zárodeční krystaly (obr.14) o přibližné velikosti 0,5 mm. Katalyzátor (v tomto případě síra) při syntéze

rozpouští z povrchu krystalů uhlík, který vzápětí krystalizuje na diamant a vytváří mnoho nových zárodků pro vznik nových zrn. Původní zárodkové krystaly se tímto procesem mírně degradují, na jejich stěnách jsou po syntéze patrné důlky pyramidového tvaru a prohlubně. Na obrázku (15 a,b) důlky s patrnými spontánními krystaly vzniklých na stěně $\{100\}$ zárodečního krystalu.



Obr. 14 Grafitová kapsle se zárodečnými krystaly [17].



Obr. 15 Růst nových krystalů na zárodkovém [38].

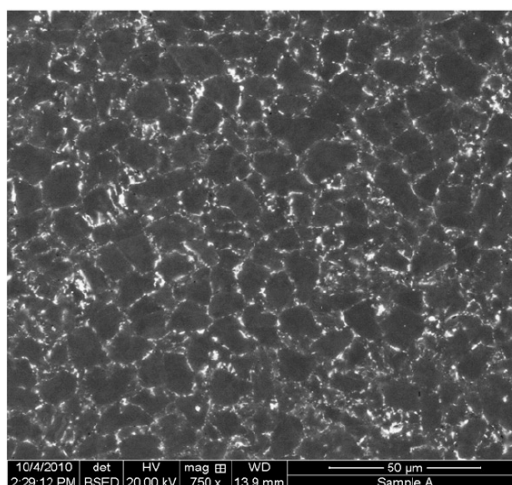
Následně vzniklé krystaly mikroskopických rozměrů se spojují dohromady do jednotného celku pomocí slinování za vysokých teplot a tlaků. Poloha a velikost krystalů je nahodilá a v žádném směru nevytváří místa, kde by se inicioval lomový mechanismus. Monokrystal diamantu vykazuje v různých krystalografických směrech a rovinách různé vlastnosti. Zatímco polykrystalická forma je izotropní a vykazuje vlastnosti ve všech směrech stejné.

PKD se vyrábí pomocí vysokotlakého tavného slinování, většinou na podkladové destičce ze slinutého karbidu, aby sloužil jako zdroj pojiva (nejčastěji kobalt Co) mezi jednotlivými zrny, pojiva mají schopnosti katalyzátoru a rozpouštědla uhlíku. Za extrémních tlaků a teplot, při kterém dochází k natavování pojiva. Kobalt ze slinutého karbidu se infiltuje přes vrstvy syntetického diamantového prášku a způsobuje, že rozpouští uhlík na povrchu diamantových zrn. Tavenina se nasycuje uhlíkem a vytváří se eutektikum (Co-C), které se infiltuje do pórů a do mezer mezi jednotlivými diamantovými zrny. Při chladnutí z přesycené taveniny uhlík krystalizuje na diamant, který se přímo spojuje s původními zrny. Zbytek pojiva vyplňuje zbylé mezery a spojuje nesrostlá zrna. Kobaltové pojivo také způsobuje, že materiál je elektricky vodivý [9, 16, 28, 36, 34, 35].

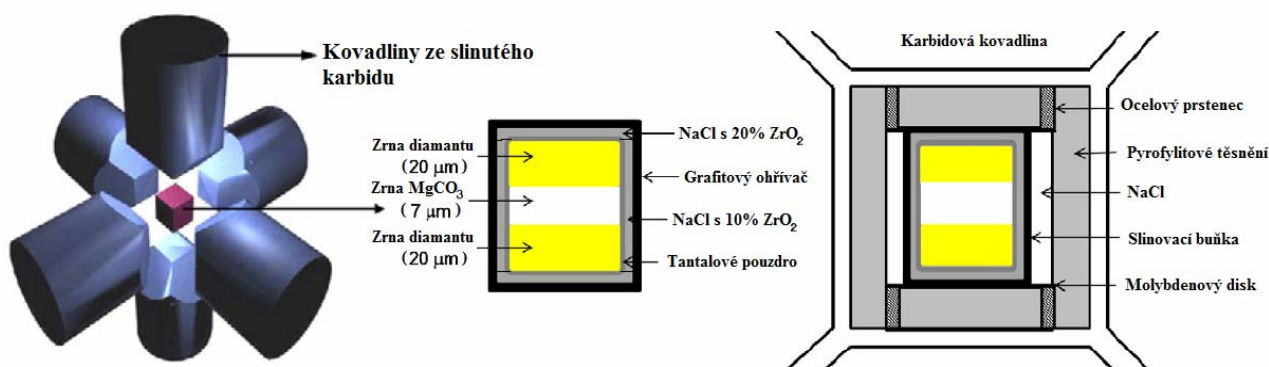
Při použití kovového katalyzátoru dochází k některým nežádoucím projevům. Jednou z nich je, že tepelná roztažnost kobaltu je mnohem vyšší než u diamantu, takže větší rozšíření kobaltu může poškodit přímé propojení mezi diamantovými zrny. Dalším projevem je že, katalytická role kobaltu působí za podmínky, pokud teplota stoupne nad cca 700 °C, kde ale už lze pozorovat oxidaci a grafitizaci na povrchu diamantu. Tím se zhorší propojení mezi zrny a pojivem. V důsledku této tepelné degradace se významně snižuje odolnost proti oděru a mechanickým silám. Proto se setkáváme s masivním opotřebením, praskáním, vyštipováním a delaminací za zvýšené teploty.

Odstraněním kovového katalyzátoru lze zajistit zlepšení tepelné stability PKD. Navíc je velmi časově náročné vyplňování pórů kobaltem, ale odstranění kobaltu nevyhnutelně snižuje pevnost PKD, protože působí tlakovým napětím na diamantová zrna. Alternativní přístup k odstranění kovového katalyzátoru je použití pojiv z materiálů, jako jsou křemík, titan, wolfram. I přes výrazné zlepšení tepelné stability, tyto kompozity nejsou příliš odolné proti mechanickému opotřebením jako u kobalt-slinutého PKD, protože nemají přímé spojení se zrny [16,34].

Poté, co se pozorovali nedostatky kovových pojiv, Akaishi zkoumal chování slinování diamantu s uhličitánem vápenatým (CaCO_3) a uhličitánem hořečnatým (MgCO_3) v systémů při 7,7 GPa a (1800÷2450) °C. MgCO_3 proniká do diamantového prášku, rozpouští povrch diamantových zrn na grafit až do limitu rozpustnosti, pak z přebytku grafitu vytváří diamantové propojení. Takto vyrobené PKD slinuté pomocí MgCO_3 nevykazují pokles tvrdosti podle Vickerse po tepelné únavě nad 1300 °C po dobu 30 min. Není ani detekovatelná grafitizace při teplotě (1400÷1500) °C po dobu 30 minut ve vakuu $(1,0\div 1,8)\cdot 10^{-3}$ Pa. Westraadt provedl slinutí PKD s CaCO_3 pojivem při $(8 \pm 0,5)$ GPa a teplotě (2000÷2200) °C ve více-kovadlinovém lisu Kawai (schéma lisu viz. obr.17). Našel přítomnost diamantových vměstků v CaCO_3 a vyvodil, že slinovací mechanismus byl podobný jako s kovovým pojivem. Rozklad uhličitánů může poskytovat další zdroj uhlíku pro tvorbu diamantů a jejich propojení (obr. 16). Takto slinutý PKD nevykazoval grafitizaci z rentgenové difrakce a žádný pokles odolnosti proti opotřebení z obrábění křemičité pryskyřice po tepelném zatížení 1200 °C ve vakuu ($5\cdot 10^{-3}$ Pa) v peci po dobu 30 minut. PKD slinutý s uhličitánovým katalyzátorem kombinuje vysokou tepelnou stabilitu s přímým propojením diamantových zrn [34].



Obr. 16 Struktura PKD s MgCO_3 pojivem [34].



Obr. 17 Slinování HPHT s MgCO_3 pojivem [17, 34].

1.2.6 Výroba CVD diamantových vrstev (povlaků)

CVD (Chemical Vapor Deposition) je nízkotlaková metoda výroby diamantu, je založena na dvou faktorech, které oba vyžadují vysokou energii:

- Uhlík musí být aktivován, protože při nízkém tlaku je uhlík termodynamicky stabilní a bez aktivace by se tvořil pouze grafit.

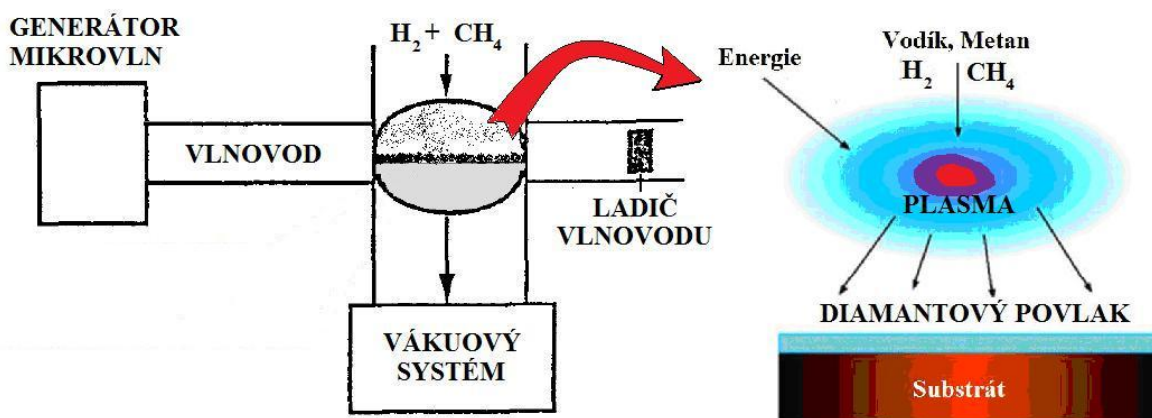
- Musí být produkován atomární vodík, který selektivně odstraňuje grafit, aktivuje a stabilizuje diamantovou strukturu.

Základní reakce zahrnuje rozklad uhlovodíku jako je metan takto [46]:



Atomární vodík je extrémně reaktivní, naleptává grafit rychlostí, která je 20 krát vyšší než za kterou se leptá diamant. Takže při ukládání diamantu na substrát je neaktivovaný grafit přednostně odstraněn, zatímco diamant zůstává. Tím se docílí vysoce čisté struktury povlaku. Vodík se odlučuje na atomární vodík při velmi vysokých teplotách ($> 2000\text{ }^\circ\text{C}$). Toto prostředí lze zajistit nejčastěji dvěma hlavními metodami:

Mikrovlnná plazma (obr.18) má dostatečnou hustotu elektronu a energie na oddělení (disociace) atomárního vodíku. Povlakované destičky jsou ohřívány interakcí s plazmou a mikrovlnné energie, ale mohou být také vyhřívány (nebo chlazeny) samostatně s odporovým ohřivačem, který umožňuje kontrolu teploty. Rychlosti depozice jsou nízké, obvykle $(1\div 10)\text{ }\mu\text{m}\cdot\text{hod}^{-1}$. Mikrovlnná depozice má tu výhodu, že je velmi stabilní a může běžet dlouhou dobu bez přerušení.

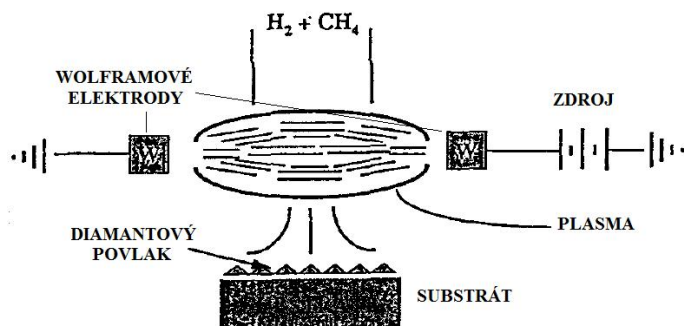


Obr. 18 Mikrovlnná depozice CVD [46, 47].

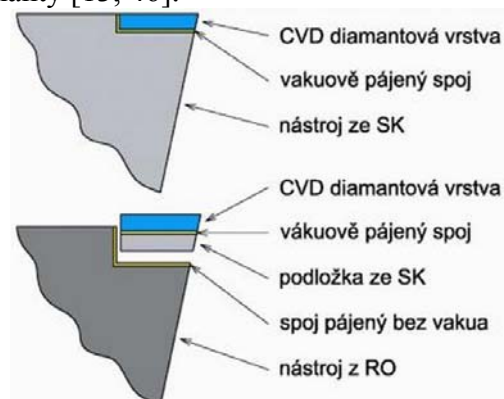
Depozice ve stejnosměrném oblouku plazmy má vysokou intenzitu oblouku, který je tvořen mezi dvěma elektrodami stejnosměrného proudu. V plazmovém výboji může teplota dosáhnout až k $5000\text{ }^\circ\text{C}$. Velmi vysoké teploty získané v obloukovém výboji umožňují téměř úplnou disociaci molekul vodíku. Dostupnost vodíku je klíčovým prvkem tvorby CVD diamantu. Obloukový výbojové systémy mají výhodu oproti jiným procesům, které produkují daleko menší množství atomů vodíku. Tato bohatá nabídka atomárního vodíku a vysoké rychlosti plynu na extrémně vysoké depoziční rychlosti více než $100\text{ }\mu\text{m}\cdot\text{hod}^{-1}$. Vzhledem k vysokému tempu růstu a velkému potenciálnímu růstu, je tato metoda vhodná pro růst tlustých vrstev:

- tenké vrstvy, tzv. CVD diamantové povlaky- jejich tloušťka je menší než $30\text{ }\mu\text{m}$,
- tlusté vrstvy, tzv. CVD diamantové vrstvy - jejich tloušťka dosahuje až $0,5\text{ mm}$, lze však vyrobit vrstvu tlustou až 1 mm . Tyto vrstvy se dále řezou na menší segmenty a ty se poté vkládají do nástrojů, druhy spojení je znázorněno na obrázku (20).

Syntéza pracuje s teplotami do 1000 °C a tlakem až 100 hPa v plynné atmosféře vodíku a metanu. Takto vzniklý diamantový povlak neobsahuje žádné pojivo a je tvořen 99,9% krystaly diamantu a jejich struktura je totožná s přírodními diamanty [13, 46].

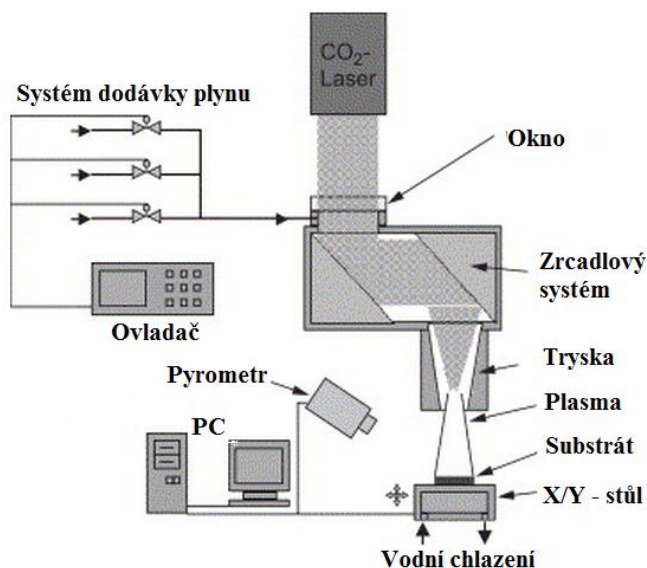


Obr. 19 Plazmová oblouková deposice [46].

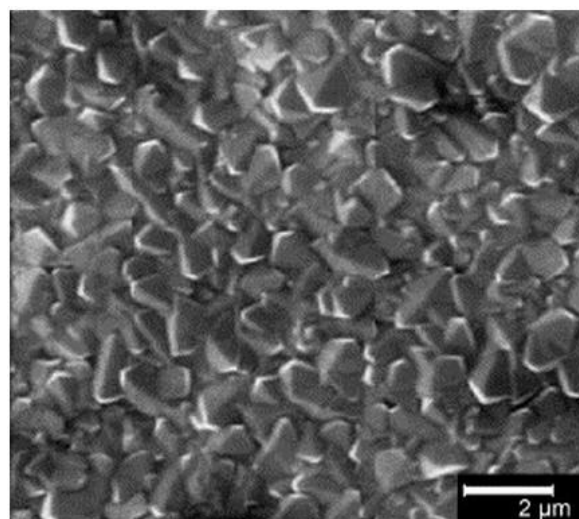


Obr. 20 Usazování tlustých CVD vrstev do VBD [13].

Fotonový plazmatron je modernější metoda povlakování, je prováděna v otevřeném prostoru při atmosférickém tlaku, při použití plazmových plynů je ve složení Ar, CH₄, H₂. Teplota plazmových plynů se pohybuje okolo (15000 ÷ 20000) °C. Atmosférická plazma je udržována v optické oblasti elektromagnetického pole pomocí CO₂ laserové záření. Depoziční rychlost ukládání povlaku je (12 ÷ 60) μm.hod⁻¹. Teplota na povrchu podkladu by měla být konstantní v oblasti 850 °C a neměla by přesáhnout 900 °C. Teplota je snímána pyrometry a vyhodnocována, v případě zvýšení teploty se spustí chladicí vodní okruh (obr.21). Pro lepší přilnavost diamantového povlaku je nutné pečlivě připravit podkladový substrát (nejčastěji WC-Co destičky, obr. 22), mezi nejčastější operace patří pískování, broušení, lapování. Další předúpravou je odstranění pojivového kobaltu z povrchu, pomocí leptání kyselinami HCl a HNO₃. Z důvodu možné katalytické reakce s diamantovými zrny a vznik grafitizaci na rozhraní diamant-substrát. Případná grafitizace zrn by mohla způsobit delaminaci a odlupování povlaku.



Obr. 21 Schéma fotonového plazmatronu [41].



Obr. 22 SEM snímek diamantového povlaku uloženého pomocí fotonového plazmatronu na předem upravený WC-Co substrát. [41].

1.2.7 Nanodiamanty (NPD)

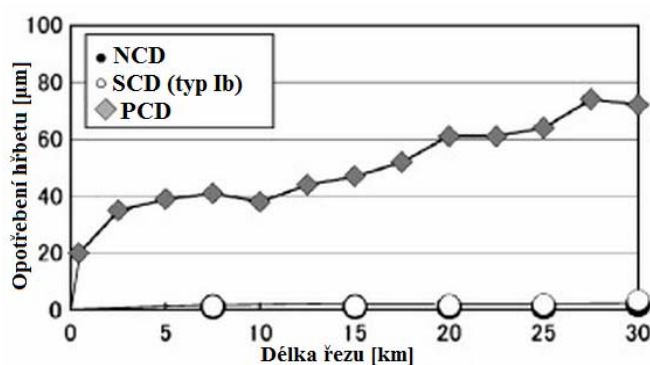
Tento druh materiálu patří mezi nové řezné materiály, které svými vlastnostmi výrazně předčí konvenční diamantové materiály. Tento materiál je převážně ve stadiu vývoje. Má však významný potenciál pro budoucí praktické použití. Výrazným omezením pro zavedení materiálu na trh, je jeho nákladná výroba a náročnost výrobního zařízení.

Výroba nanodiamantů

Výroba tohoto materiálu spočívá v přímé přeměně vysoce čistého grafitu přímou syntézou zcela na diamant pod vysokým tlakem a vysokou teplotou pomocí HPHT při tlaku (15÷18) GPa a teplotě (2100÷2300) °C. Takto vzniklý jednofázový nano-polykrystalický diamant (NPD), skládající se z jemných diamantových zrn velikostí (10÷50 nm) je spojen přímo s ostatními zrny bez jakéhokoliv pojiva a tvoří pevné a husté struktury, které se vyznačují vysokou tvrdostí, která překonává i monokrystal diamantu (SCD). Knoopova tvrdost NPD při pokojové teplotě je (120÷140) GPa, což odpovídá tvrdosti v rovinách {100} syntetického vysoce čistého SCD (typ IIa) a samozřejmě vyšší než u běžného typu I monokrystalu. Vzhledem k tvrdosti konvenčního polykrystalického diamantu (PCD), který obsahuje kovová pojiva je tvrdost pohybující se kolem 50 GPa, což je u NPD více než dvojnásobek. Tvrdost NPD není závislá na směru a orientaci krystalografických rovin. Kromě toho odolnost NPD vůči otěru je obzvláště vysoká, je stejná vysoká jako odolnost proti opotřebení SCD, a 10÷50 krát vyšší než u PCD při těžkém zatížení opotřebovacího testu. Abrazivní opotřebení PCD zhoršuje tepelné poškození, vyplývající z negativních vlivů kovových pojiv jako je Co. V případě SCD abrazivní opotřebení silně závisí na krystalografické orientaci a abrazivní opotřebení postupuje v důsledku hromadění mikro-konfliktních linií pod podmínkou dominantního mechanického opotřebením procesu. Na rozdíl od PCD a SCD, je odštipování a opotřebení vlivem tepelného poškození u NPD je zanedbatelné. Mnoho diamantových zrn ve struktuře NPD má tvrdé krystalografické roviny jako je {111}, které pokrývají celý povrch zrna, což vede k vysoké odolnosti proti opotřebení. Díky těmto vynikajícím vlastnostem, existují vysoká očekávání NPD jako nový superpevný materiál řezných nástrojů. Pro zjištění základních výhod tohoto materiálu byly provedeny následující zkoušky [39, 44]:

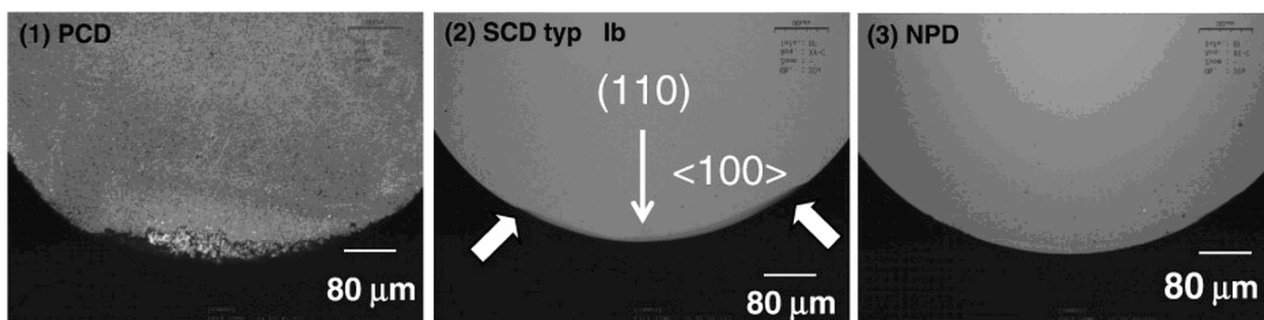
Obrábění Al. slitiny NCD nástrojem

Vysoce přesné NPD řezné nástroje, které mají poloměr zaoblení špičky 0,4 mm a byly připraveny pro hodnocení výkonu obrábění, při soustružení vysoce pevnostní Al-Si slitiny (A390, Al-17Si-5Cu) se čtyřmi drážkami ve tvaru U. Pro srovnání jsou PCD nástroje (průměrná velikost zrna 5 μm) a SCD nástroj typu Ib. Odolnost proti opotřebení nástroje NPD byla přibližně 10÷20 krát vyšší než u konvenčního jemnozrnného PCD nástroje, a skoro stejná jako u nástroje SCD. Průběh opotřebení daných nástrojů je znázorněn na (obr. 23).



Obr. 23 Průběh opotřebení při obrábění slitiny Al-17Si-5Cu [39].

Na (obr. 24) jsou patrné známky opotřebení různých nástrojů při stejných řezných podmínkách. Nástroj SCD byl nerovnoměrně opotřeben, jelikož má různé odolnosti proti opotřebení v různých směrech, dané anizotropním chováním. Zatímco nástroj NPD si udržel svůj tvar. Opotřebení nástroje z PCD vzniká především z tepelné poškozování ovlivněné kovovými pojivky. Díky tomu dochází vlivem různé délkové roztažnosti pojiva ke vzniku mikrotrhlin v zrnech a důsledkem zvýšených teplot při obrábění také ke grafitizaci, díky katalytické reakci s kovovými pojivky. Naopak NPD ukázal vynikající odolnost proti opotřebení, protože nemá žádné kovové pojivo, vynikající vysokou teplotní odolnost a vysokou pevnost slinovaných diamantových zrn. Řezné podmínky testu při přerušovaném řezání Al-Si slitiny byly následující: řezná rychlost $v_c = 800 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, hloubka řezu $a_p = 0,2 \text{ mm}$, a posuvu $f = 0,1 \text{ mm}$.

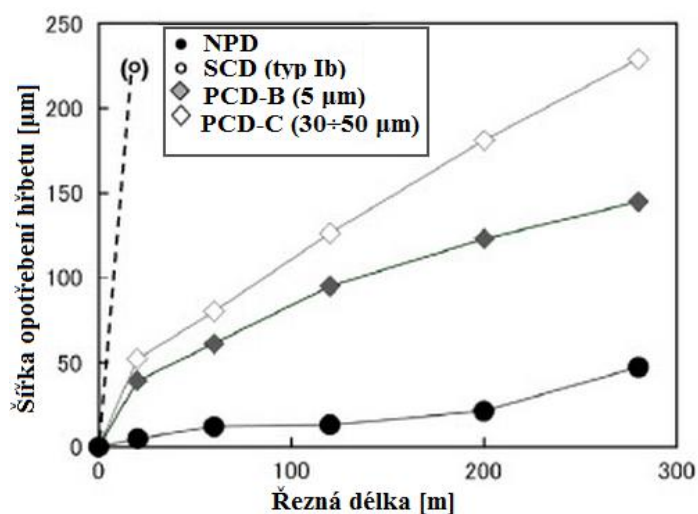


Obr. 24 Opotřebení špičky nástrojů při obrábění slitiny Al-17Si-5Cu [39].

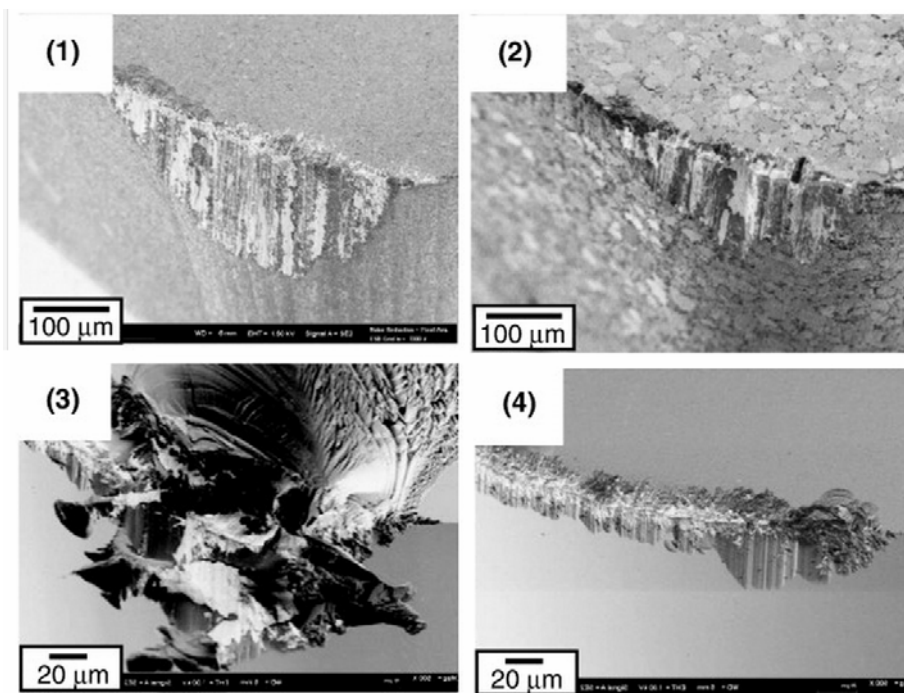
Soustružení slinutého karbidu nástrojem z NPD

S cílem potvrdit řezný výkon nástroje z NPD na slinutém karbidu (WC-Co 7%, velikost zrna $2 \mu\text{m}$) a vyhodnotit soustružení. Byla provedena zkouška při řezných podmínkách: $v_c = 20 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $a_p = 0,05 \text{ mm}$, $f = 0,1 \text{ mm}$, s poloměrem zaoblení špičky nástroje $0,4 \text{ mm}$. Výsledky byly porovnány s PCD a SCD nástroji. Výsledky opotřebení jsou uvedeny na obr.(25) a na obr.(26) je zobrazení břitů skenovacím elektronovým mikroskopem diamantových nástrojů po obrábění. Nástroj SCD utrpěl vážné popraskání a odštípnutí poškození po pouhých 20 m řezání, zatímco nástroj NPD nevykazoval žádné významné odštípnutí i po 280 m řezání. Bylo zjištěno, že odolnost proti otěru nástroje NPD byla více než pětkrát vyšší než u nástrojů PCD-B (průměrná velikost zrna: $5 \mu\text{m}$), a třikrát vyšší než u nástrojů PCD-C (průměrná velikost zrna: $30-50 \mu\text{m}$). Opotřebení nástroje PKD se zdá, že vzniká vzhledem k rozvíjejícímu se adhezivnímu, chemickému opotřebení. Které je ovlivňováno katalytickou reakcí Co, podněcující opětovný přechod diamantu na grafit. Naopak nástroj NPD neprokázal žádný významný zlom, jen stopy po postupném opotřebení, které jsou pozorovatelné na špičce nástroje [39].

Vyrobí nanodiamanty lze také novou metodou z oxidu uhličitého CO_2 , tímto se zabývali kanadští vědci. Výroba vzniká pomocí metody fyzikálně-studené detonace, jenž spočívá v prudkém stlačení plynu. To se docílí vytvoření směsi pevné fáze CO_2 (suchý led) s přísadami, které tvoří výbušnou směs. Výsledná výbušná směs o teplotě $-78,5 \text{ }^\circ\text{C}$ se poté prudce stlačí v ocelovém válci a dojde k jejímu výbuchu. Exploze vytvoří uvnitř válce na zlomky vteřiny obrovský tlak, který způsobí krystalizaci uhlíku ve formě diamantu. Vzniklý diamantový jemný prach lze využít pro výrobu nástrojů, brusných kotoučů a leštících past [27].



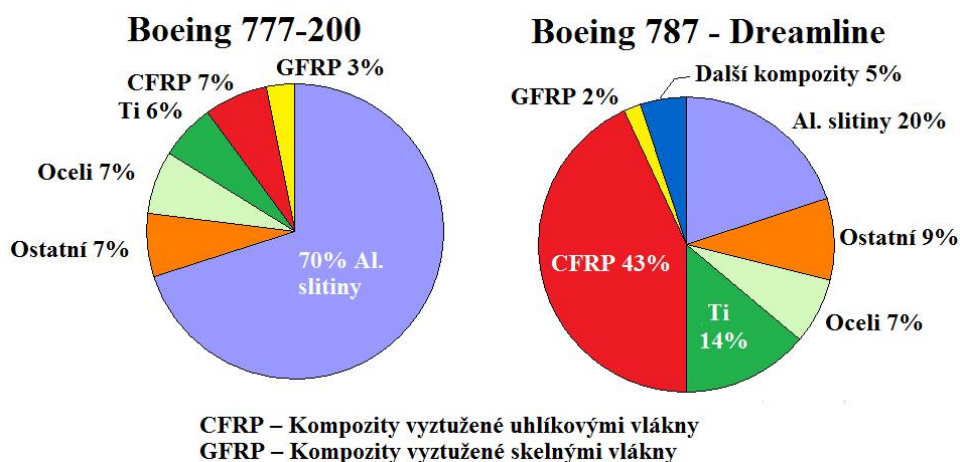
Obr. 25 Průběh opotřebení nástrojů při obrábění SK [39].



Obr. 26 Průběh opotřebení nástrojů při obrábění SK [25].

1.2.8 Efektivní využití PKD

S moderní dobou přicházejí stále nové požadavky na konstrukční materiály v oblasti automobilového, leteckého a kosmického průmyslu. Na obrázku (27) je znázorněn příklad hlavních druhů materiálu při výrobě letadel. Hlavním smyslem zavádění nových materiálu je snížení hmotnosti konstrukcí při udržení požadovaných mechanických vlastností konstrukcí. Snížení hmotnosti konstrukcí se výrazně projeví na snížení spotřeby energií při provozu daného zařízení, nebo daná konstrukce může být více užitečně zatížena. Zavádění těchto moderních materiálu jako jsou lehké hliníkové slitiny (duraly, siluminy), titanové slitiny, kompozity vyztužené vlákny, těžkoobrobitelné materiály jako slinuté karbidy, keramika, křemík, skla, různé plasty a další nekovové materiály, vyžaduje efektivní obrábění speciálními reznými materiály. Mezi tyto speciální materiály patří diamantové materiály (SCD, CVD, PKD) díky svým výjimečným vlastnostem.



Obr. 27 Přehled konstrukčních materiálu při výrobě letadel [31].

I přes své vynikající vlastnosti, jako jsou vysoká tvrdost, ořezuvzdornost, chemická odolnost a tepelná vodivost. Má tento materiál řadu omezení a doporučení [10]:

- teploty nesmí v oblasti řezu překročit 600 °C, jelikož dochází ke grafitizaci na povrchu zrn diamantu,
- díky své velké afinitě k železným materiálům dochází k velkému opotřebení nástroje,
- PKD není vhodný díky své křehkosti pro obrábění pevných a houževnatých materiálů,
- díky relativně vysoké křehkosti PKD je vyžadováno při obrábění dodržovat stabilní podmínky, tuhé nástroje. Při soustružení je tuhost nástroje docílena použitím držáků s co největším možným průřezem a minimálním vyložení. Pro případ frézování je stabilita docílena eliminací radiálního a axiálního házení,
- Díky vysoké chemické stabilitě diamantu, je PKD vhodný k obrábění materiálu se sklonem ke tvorbě nárůstku. Dále nedochází k otřepům na obrobku.

Přes svoje omezující podmínky při obrábění základních strojírenských materiálů (železné kovy), nachází své omezenější uplatnění při obrábění vysoce abrazivních neželezných a nekovových materiálů. A všeobecně řečeno těžko obrobitelných materiálů. V těchto případech za určitých podmínek z tohoto materiálu stává vynikající nástroj, který vytváří kvalitní a přesné plochy. Výborné obráběcí vlastnosti PCD prokázal při obrábění nekovových materiálů, převážně u vláknitých kompozitů. Které se stávají stále častějším materiálem v moderním strojírenském průmyslu.

Obrábění vláknitých kompozitů

Velmi nízká tepelná vodivost obráběného materiálu způsobuje, že vzniklé teplo přechází do obráběného materiálu a třísky pouze v zanedbaném rozsahu a musí tedy v maximální míře odvedeno nástrojem, případně procesní kapalinou. Nadměrné tepelné zatížení však výrazně snižuje odolnost vůči opotřebení. Odhadované jednotlivé podíly odvedeného tepla při obrábění plastů a kompozitů je znázorněn v tabulce (1.5). Dále je nutné odvést teplo z místa řezu z důvodu nízké tepelné odolnosti samotného kompozitu nebo plastu, tato degradace vzniká už za poměrně nízkých teplot (100÷300°C), kdy se materiál začíná pálit. Proto je nutné volit vhodné řezné podmínky, aby nebyla překročena kritická teplota. Pro případy kdy nelze použít procesní kapalinu na odvod tepla, kdy by došlo ke znehodnocení samotného materiálu (většinou na-

sákavost). Je nutné teplo odvést z místa řezu pomocí nástroje. Díky vysoké tepelné vodivosti diamantu, je tento materiál vhodný pro obrábění těchto materiálů.

Tab. 1.5 Tepelná bilance odvodu tepla při řezném procesu daných materiálů [31].

Odvod tepla [%]	Ocel	Termoplasty	Reaktoplasty	CFRP	GFRP
Třískou	75	50÷75	2÷3	5÷8	8÷10
Obrobkem	20÷22	15÷20	5÷8	5÷10	10÷15
Nástrojem	3÷5	20÷25	80÷90	70÷80	
Prostředím	3÷5% (při suchém obrábění)				
CFRP – Kompozity vyztužené uhlíkovými vlákny					
GFRP – Kompozity vyztužené skelnými vlákny					

Vysoká intenzita opotřebení při obrábění kompozitů je zapříčiněno především vyztuženými vlákny kompozitu, které mají vysokou úroveň mechanických vlastností. Převážným druhem opotřebení nástroje je abrazivní otěr. [31].

Obrábění Al. slitin

Dalším efektivním použitím PKD je obrábění hliníkových slitin, jako jsou duraly a vysoce abrazivní slitiny Al-Si (siluminy). Kde abrazivní chování materiálu zapříčiňuje obsažený křemík Si. Pro tento druh obráběných materiálů lze PKD aplikovat v sériové výrobě, pro zvýšení produktivity vysokorychlostní obrábění HSC. Při dodržení parametrů daných výrobcem nástrojů PKD lze dosáhnout velmi vysokých řezných rychlostí a velmi kvalitní obrobenu plochu. A tím vyřadit z procesu výroby další dokončovací operace.

Pro ověření kvality obráběného povrchu při obrábění PKD nástrojem byl proveden experiment. Který by zobrazil závislost kvality obráběného povrchu na velikosti posuvu při jemném soustružení. Veškeré provedení experimentu proběhlo v Technologické laboratoři na FSI v Brně.

Vyhodnocení struktury povrchu bylo provedeno na měřicím přístroji TAYLOR- HOBSON Form Talysurf Intra 5.1. Výsledky měření byly porovnány s teoretickými vypočtenými hodnotami (Ra_t , Rz_t) dle vztahů (3÷5) a zaneseny do grafů (obr. 34 a 35). Dalším hodnoceným výstupem je průběh drsnosti profilu (obr.37) a rozložení materiálového poměru po profilu (obr.38), dané parametry zhodnocují, zda se daný povrch součásti hodí pro daný chod součásti (nosnost profilu, kluzné vlastnosti, udržení maziva atd.)

Detailní výstupní data ze všech měření jsou obsaženy v příloze č.1.

Parametry obrábění:

Materiál vzorku: duralová slitina

Rozměry vzorku: $\phi 88 - 18$ mm

Nástrojový držák: SDJCR 2020 M11

VBD: DCMW 11T304 FN-PD1 (obr.33)

Poloměr zaoblení špičky ostří $r_c = 0,4$ mm

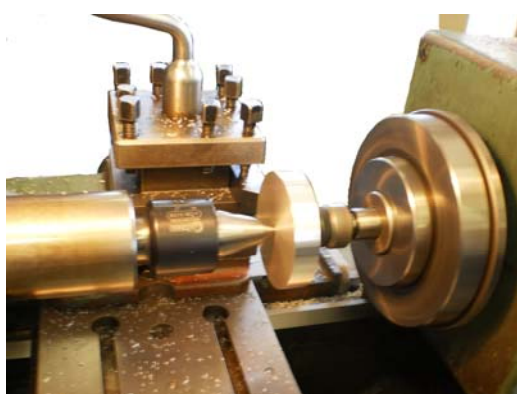
Obráběcí stroj: universální soustruh SV 18RD (obr. 32)

Řezné podmínky: $a_p = 0,25$ mm

$n = 2200$ min⁻¹

$v_c = 608$ m.min⁻¹

Měřicí přístroj: TAYLOR- HOBSON Form Talysurf Intra 5.1 (obr. 36)



Obr. 32 Upnutí vzorku mezi hroty.



Obr. 33 DCMW 11T304 [28].

Vztah pro výpočet teoretické nejvyšší výšky profilu Rz [32]:

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

Vztah pro výpočet teoretické aritmetické úchylce profilu Ra [32]:

$$Ra_t = \frac{10^3 \cdot r_\varepsilon^2 (2\alpha_A - \sin 2\alpha_A)}{f} \quad [\mu\text{m}] \quad (4)$$

Pomocný vztah pro výpočet teoretické aritmetické úchylce profilu Ra [32]:

$$\alpha_A = \arccos \left[\frac{r_\varepsilon}{f} \left(\arcsin \frac{f}{2r_\varepsilon} + \frac{f}{4r_\varepsilon^2} \sqrt{4r_\varepsilon^2 - f^2} \right) \right] \quad [\text{rad}] \quad (5)$$

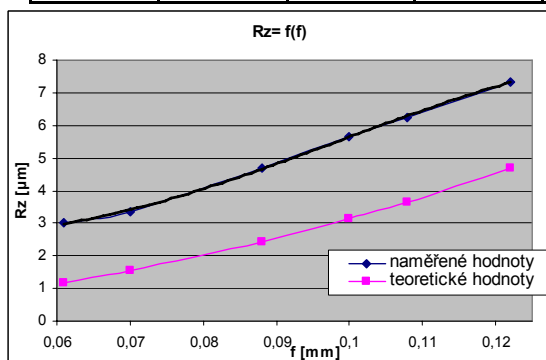
kde: r_ε [mm] – poloměr špičky nástroje

f [mm] – posuv

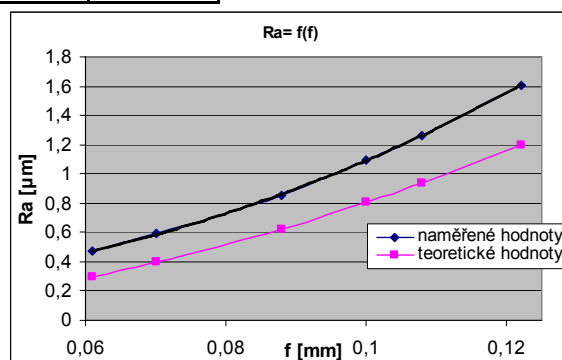
α_A [rad] – úhel bodu A, bod A je průsečík střední čáry profilu drsnosti s profilem

Tab. 1.6 Přehled drsnosti profilu v závislosti na změně posuvu.

	Posuv		Naměřené hodnoty		Teoretické hodnoty	
	f [mm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz _t [μm]	Ra _t [μm]	
f_1	0,0610	3,0130	0,4701	1,1645	0,2987	
f_2	0,0700	3,3677	0,5916	1,5341	0,3953	
f_3	0,0880	4,6888	0,8530	2,4273	0,6221	
f_4	0,1000	5,6653	1,0984	3,1373	0,8059	
f_5	0,1080	6,2565	1,2650	3,6617	0,9379	
f_6	0,1220	7,3287	1,6096	4,6786	1,1984	



Obr. 34 Průběh drsnosti profilu Rz v závislosti na změně posuvu.



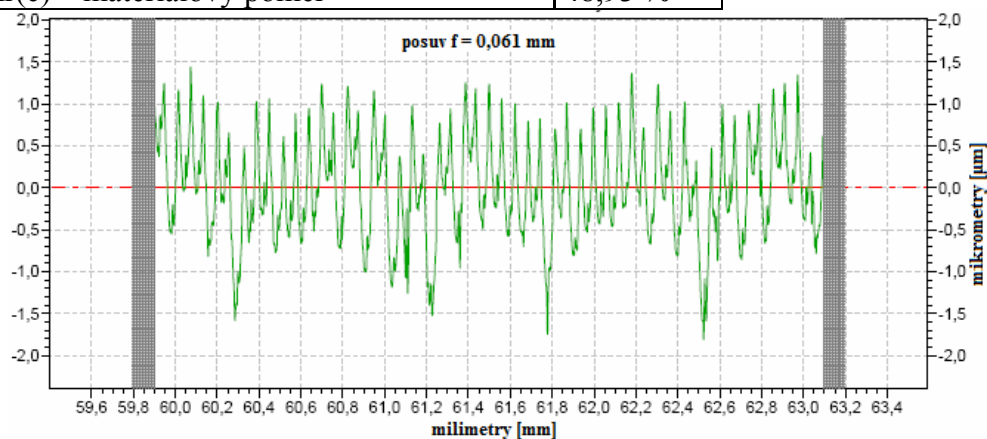
Obr. 35 Průběh drsnosti profilu Ra v závislosti na změně posuvu.



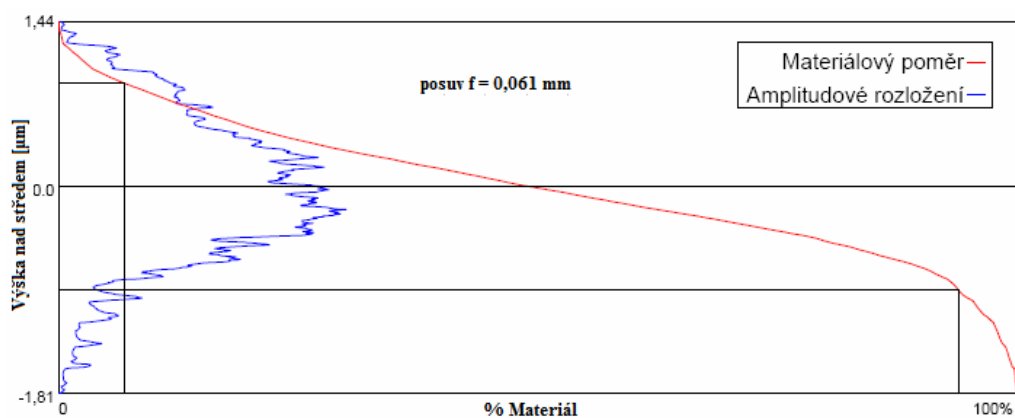
Obr. 36 TAYLOR- HOBSON Form Talysurf Intra 5.1 při měření vzorku

Tab. 1.7 Specifikace hodnocených parametrů pro vzorek s nejnižším posuvem.

Ra - průměrná aritmetická úchylka profilu	0,4701 μm
Rc - průměrná výška prvků profilu	1,6253 μm
Rv - nejvyšší hloubka profilu	1,6633 μm
Rz - největší výška profilu Rp+Rv	3,0130 μm
Rp - nejvyšší výška výstupků profilu	1,3498 μm
Rq - průměrná kvadratická odchylka profilu	0,5835 μm
Rmr(c) – materiálový poměr	48,93 %



Obr. 37 Průběh profilu drsnosti měřeného vzorku s nejnižším posuvem.



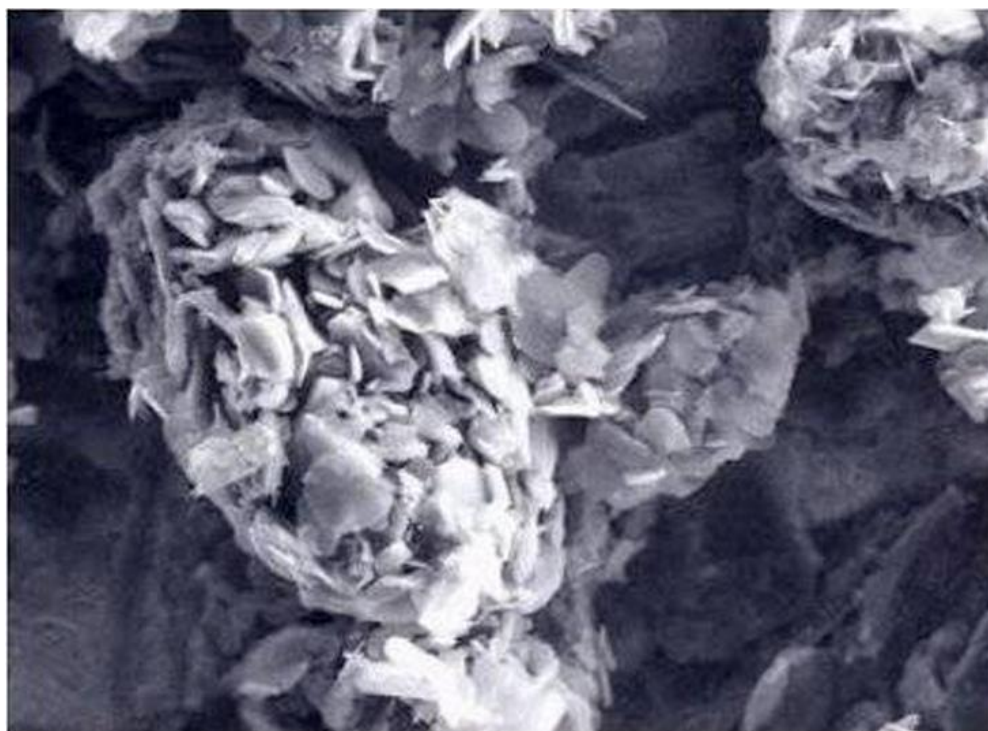
Obr. 38 Rozložení materiálového poměru pro vzorek s nejnižším posuvem.

Závěrné zhodnocení experimentu:

Z výsledků měření (tab. 1.6 a 1.7) bylo dokázáno, že lze získat velmi kvalitní strukturu povrchu, dané obráběné duralové součástky, zhotovené pomocí PKD nástroje. Hodnoty R_a byly v intervalu $(0,4701 \div 1,6096) \mu\text{m}$, pro dané hodnoty posuvů. Tyto nízké hodnoty drsností lze aplikovat pro většinu kluzných a funkčních ploch strojních součástí. Vyšší hodnoty R_a a R_z oproti vypočteným teoretickým hodnotám, lze odůvodnit jistým opotřebením nástroje a technickému stavu stroje, na němž byl pokus prováděn.

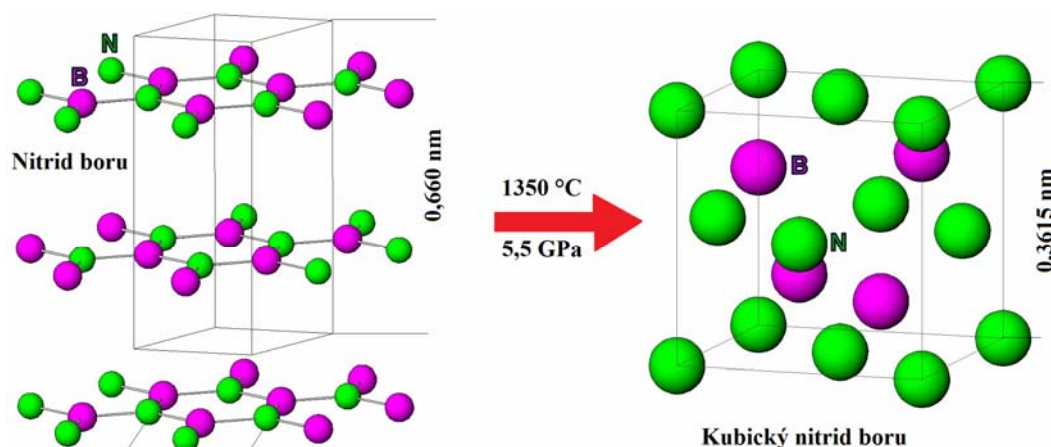
1.3 Kubický nitrid boru (CBN, KNB, c-BN)

KBN je zvláště tvrdý řezný materiál, jehož tvrdost překonává už jen diamant. Vykazuje se vynikající výkonnosti; má vysokou tvrdost za tepla i při extrémních teplotách (2000°C), dobrou chemickou stabilitu a velkou odolnost proti abrazivnímu opotřebením. KBN je relativně křehký, ale je houževnatější a tvrdší než řezná keramika, ale není zase tak teplotně a chemicky odolný.



Obr. 39 Lupínková struktura nitridu boru [33].

Hexagonální nitrid boru (h-BN) je bílý prášek, který krystalizuje v lupínkové struktuře (obr. 39) podobné grafitu. Je termicky stálý a chemicky málo reaktivní. Má dobrou tepelnou vodivost, ale oproti grafitu je elektricky nevodivý. Je měkký a užívá se jako přísada do různých maziv a olejů. A má i výbornou odolnost proti korozi tak se používá jako přísada do antikoročních nátěrů. Díky podobným vlastnostem s grafitem (též nazýván „bílý grafit“), byl poprvé úspěšně převeden na kubickou formu R. H. Wentorf roku 1957 v General Electric Company. Takřka za stejných podmínek jako při přeměně grafitu na diamant [3, 33].



Obr. 40 Změna hexagonální mřížky na kubickou [16, 17].

1.3.1 Základní fyzikálně mechanické vlastnosti KBN

Základní vlastnosti pro monokrystalický a polykrystalický kubický nitrid boru jsou uvedeny v tabulce 1.8.

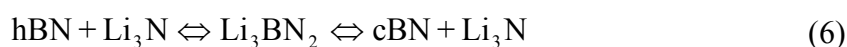
Tab. 1.8 Vlastnosti diamantu [17].

Vlastnosti	Kubický nitrid boru	
	monokrystalický	polykrystalický
Měrná hmotnost [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	3,43 ÷ 3,50	3,42 ÷ 4,40
Délka strany kubické mřížky [nm]	0,3615	
Pevnost v tlaku [GPa]	6,9	2,7 ÷ 3,5
Pevnost v ohybu [MPa]	700	500 ÷ 800
Tvrdost [HV]	4000 ÷ 7500	2700 ÷ 3500
Modul pružnosti v tahu [GPa]	650 ÷ 850	587 ÷ 800
Modul pružnosti ve smyku [GPa]		280
Lomová houževnatost K_{IC} [$\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$]		3,5 ÷ 6,7
Poissonovo číslo [-]		0,20 ÷ 0,22
Součinitel délkové roztažnosti [$10^{-6}\cdot\text{K}^{-1}$]	3,5 ÷ 5,8	4,6 ÷ 4,9
Měrná tepelná vodivost [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	13 ÷ 200	44 ÷ 200
Teplotní stálost [°C]	1200 ÷ 1400	

1.3.2 Výroba KBN

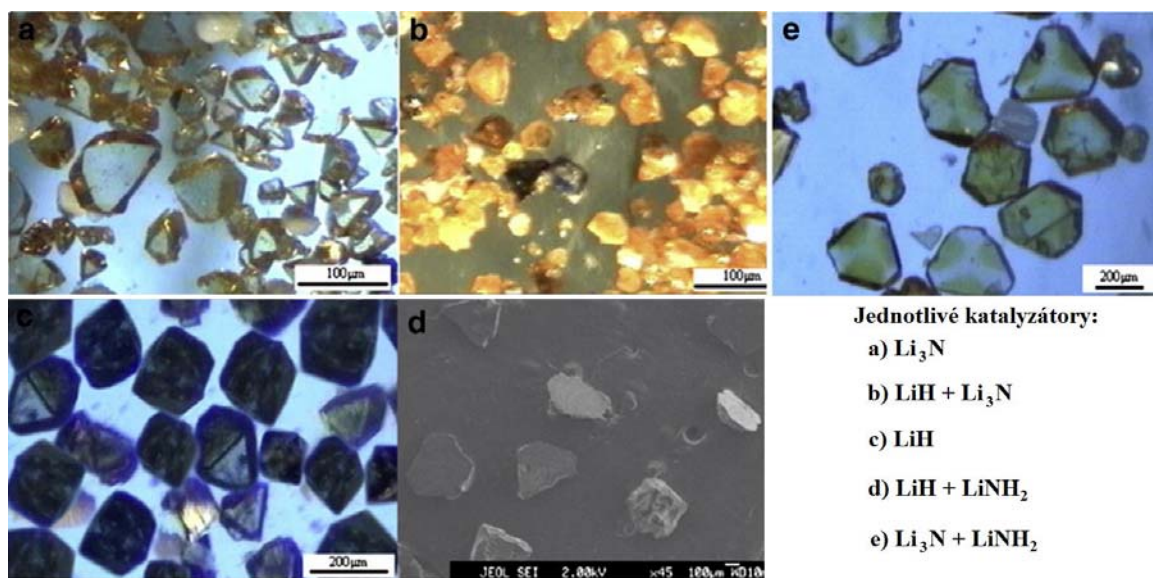
Kubický nitrid boru se vyrábí obdobným způsobem jako diamant pomocí HPHT (viz. kap.1.2.5), jen se liší použitím jiných katalyzátorů a syntézy za jiných teplot a tlaku. Syntéza spočívá v přeměně hexagonální mřížky na kubickou (obr.40) za určitých podmínek. Parametry syntézy jsou dané druhem katalyzátoru, tato oblast je vyznačena na fázovém diagramu nitridu boru (obr 1.38). Vhodnou volbou katalyzátoru, se dají teplotní a tlakové parametry snížit na přijatelnější hodnoty. Jako hlavní katalyzátory se používají alkalické kovy, nebo jejich sloučeniny ve formě nitridů, boridů (např. Li_3N , Li_3BN_2 , AlB_2 , AlN , kovy alkalických zemin, směsi Al-Mg). Katalytickou reakci lze popsat rovnicí (6).

Katalytická rovnice pro syntézu KBN [48]:

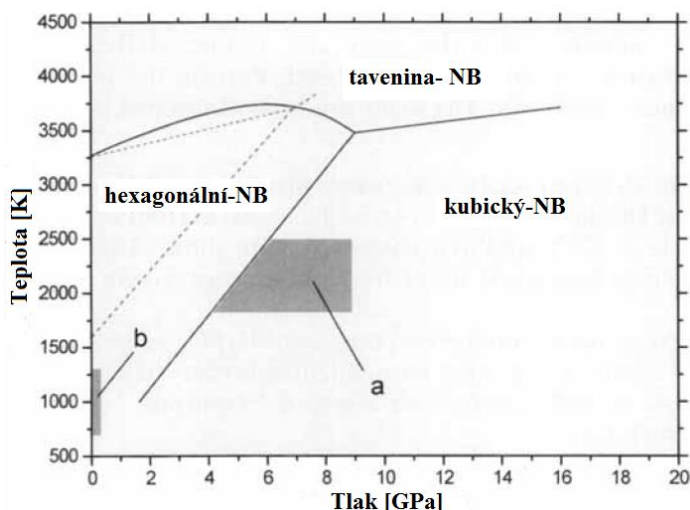


Na obrázku (41) jsou znázorněny snímky krystalů KBN, u nichž byla provedena syntéza pomocí různých katalyzátorů, při téměř stejných pracovních podmínkách: Teploty $< 1500\text{ °C}$ a tla-

ky v rozmezí (5÷5,2) GPa na výdrži po dobu 10 minut. Správnou volbou katalyzátoru jsou zaručeny nižší teplotní a tlakové podmínky, než jaká je oblast přeměny v P-T diagramu (obr.42). Důležitá je i kvalita a velikost vzrostlých krystalu. Pro většinu použitých katalyzátorů velikost krystalů přesahovala 100 μm . Největší růst krystalů byl u katalyzátorů na bázi LiH, LiH + LiNH₂, Li₃N + LiNH₂. Vzniklé zabarvení u většiny vzniklých krystalů je způsobeno volným bórem, který se uvolnil při syntéze [16,48].



Obr. 41 Snímky krystalů KBN při syntéze s různými katalyzátory [48].



- a) oblast katalytické přeměny hexagonální mřížky na kubickou mřížku
 b) metastabilní oblast pro vznik parní fáze KBN

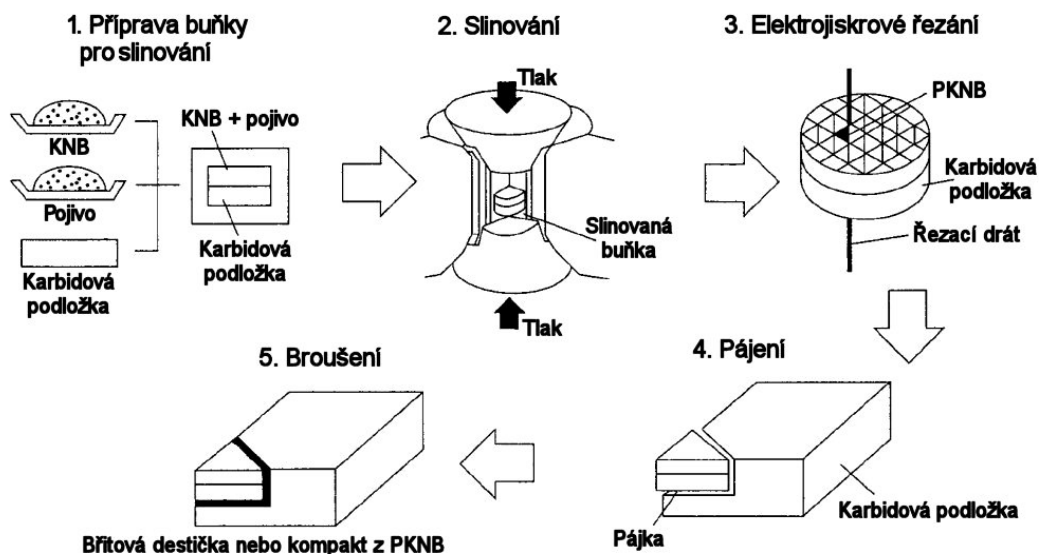
Obr. 42 P-T fázový diagram nitridu bóru [30].

1.3.3 Skladba PKBN

PKBN se vyrábí při vysokých teplotách a tlacích, při tomto působení se dosáhne spojení krystalů KBN s kovovým nebo keramickým pojivem. Tak vznikne polykrystalický kubický nitrid boru (PCBN, PKNB), vhodný pro obrábění. PKNB nástroje jsou obvykle rozděleny do dvou tříd: s vysokým obsahem KBN (kolem 90%) obvykle kobalt Co a s nízkým obsahem KBN (kolem 60%) s keramickou fází, obvykle z nitridu titanu TiN a karbidu titanu TiC. Nástroje s vysokým

obsahem KBN zajišťuje větší tuhost a houževnatost než ty s přidanou keramickou fází a je vhodný pro obrábění tvrdých druhů litin a žáruvzdorných slitin. Na druhou stranu, PCBN s keramickou fází je více odolný proti opotřebení a je chemicky stabilnější, což je velmi důležité zejména v nepřetržitém řezu obrábění kalených ocelových součástek [36].

Stejně jak u PKD je nutné vzniklá zrna slinout do nejčastěji do kruhového kompaktního tělesa, které se dále rozřezává na menší segmenty zvané roubíky. A posléze jsou uloženy a spojeny, pomocí pájeným spojem do nástrojové VBD dle obr.(43).

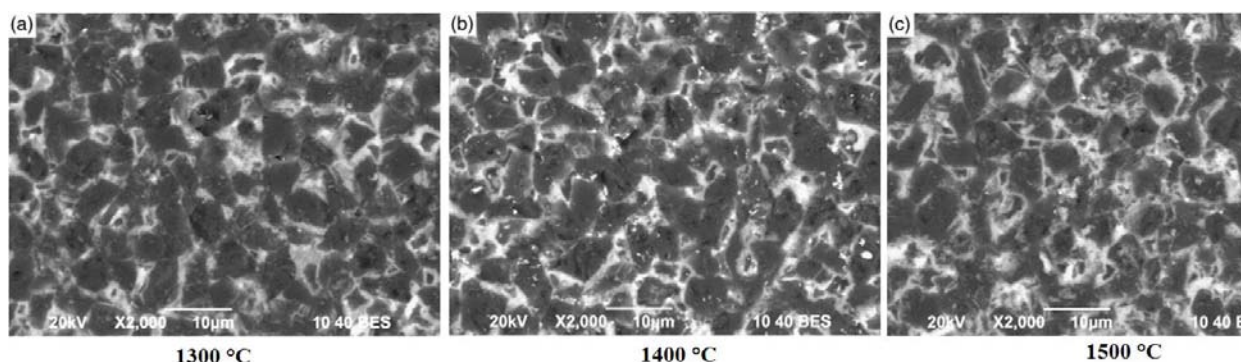


Obr. 43 Proces výroby [17].

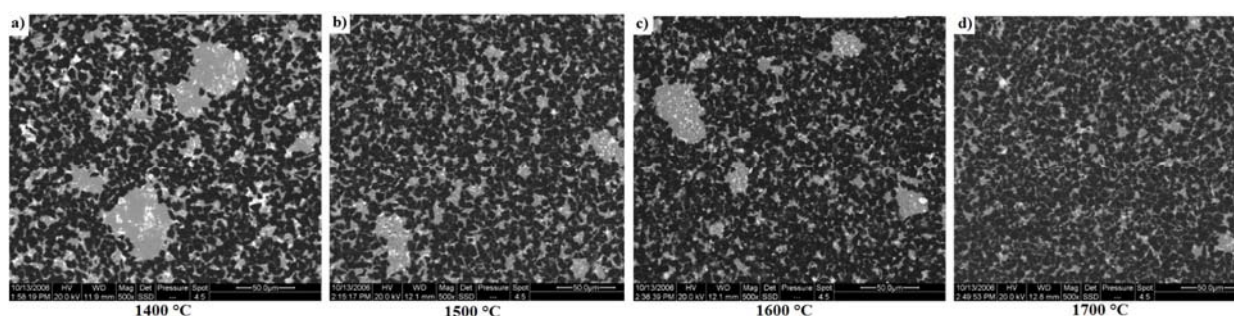
Pro slinování jsou též použita pojiva kovová nebo keramická. Různá pojiva dávají slinutému kompaktu dané vlastnosti pro obrábění různých materiálů a pro různé pracovní podmínky. Nejčastěji se vhodnost pojiva zkouší nejprve zda je dosažena homogenní struktura pomocí metalografických výbrusů (obr. 44, 45), a poté dále pomocí různých zkoušek opotřebení, kde se hodnotí velikost opotřebení na hřbetě V_b (obr.47).

Například pro zkoumané pojiva na bázi Al (obsah 15%) a AlN (obsah 20%), které byly slinovány se zrnky KBN s velikostí zrna (7÷12) μm a slinovacím tlaku 5 GPa s výdrží po dobu 20 minut. Lze jednoznačně porovnat homogenitu struktury u pojiva Al na (obr. 44) a u vzorky s pojivem AlN na (obr. 45) při různých teplotách slinování. Kde u pojiva s Al se ve všech slinovacích teplotách dosáhlo rovnoměrné homogenní struktury, zatímco u pojiva AlN se při nižších teplotách slinování objevují oblasti více bohaté na pojivo a vytváří se ve formě shluků. Takováto struktura bude mít zaručeně jiné mechanické vlastnosti. Z hodnot ze zkoušek opotřebení (obr.46) a zkoušek tvrdosti (obr.47) je jednoznačné, že se zvyšující slinovací teplotou u obou pojivových materiálů se zhoršují mechanické vlastnosti.

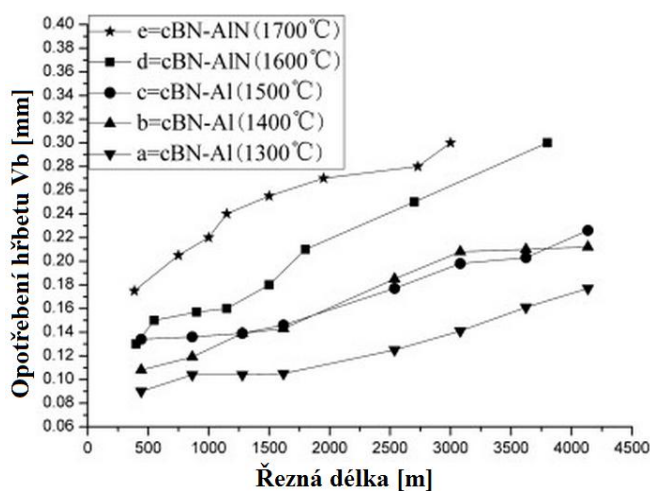
Z řezného testu také vyplývá, že PCBN kompakty CBN s 15 hm.% Al mají delší životnost nástroje, než s 20 hm.% ALN. Tyto experimenty ukazují, že CBN-Al systém je výhodnější pro průmyslovou výrobu PCBN [22].



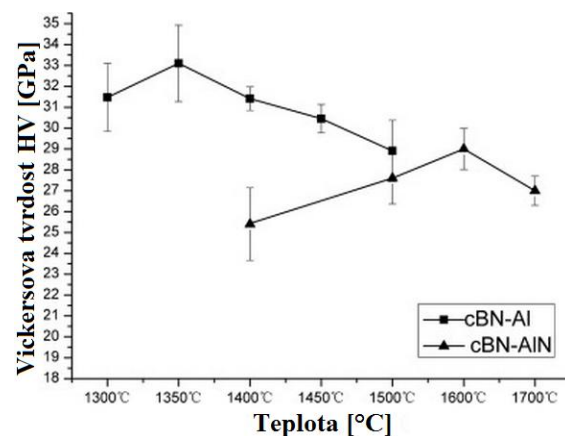
Obr. 44 Snímky PKBN s 15% Al při slinování za tlaku 5 GPa a různých teplot slinování [22].



Obr. 45 Snímky PKBN s 20% AlN při slinování za tlaku 5 GPa a různých teplot slinování [22].



Obr. 46 Průběh opořebení slinutých PKBN s pojivy na bázi Al, AlN s uvedenou teplotou slinování, při obrábění kalené oceli GCr15 s tvrdostí 60-62 HRC [22].



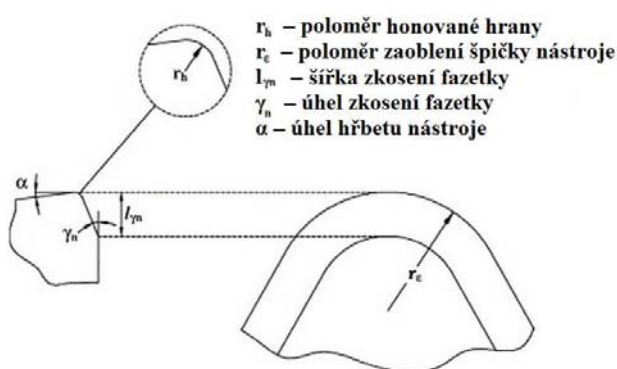
Obr. 47 Tvrdost PKNB různých pojiv v závislosti na slinovací teplotě [22].

1.3.4 Finální úpravy na VBD

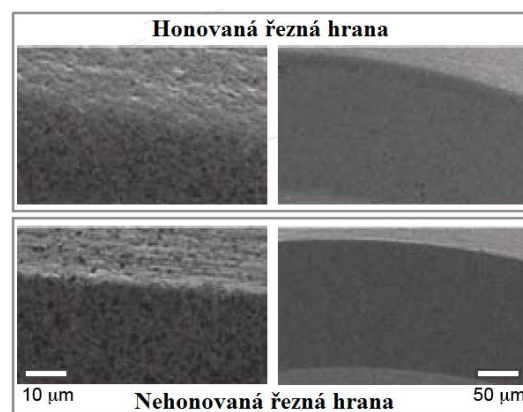
Na břity z KBN působí relativně vysoké řezné síly, z důvodů užití negativních geometrií břitu a vzhledem obrábění velmi tvrdých materiálů. Proto je důležitým předpokladem zohlednit: [11,21, 36]

- Tuhost stroj-nástroj- obrobek
- Při obrábění jsou velmi malé úběry materiálu, takže řezné síly působí převážně na malé části špičky nástroje. Proto je nutné břit opatřit fazetkami, která zabraňuje mikroskopickému vydrolování zrn KBN. Šířka této fazetky se pohybuje v desetinách milimetru a mají negativní geometrii (obr. 48). Dané parametry jsou dané druhem obrábění.

Další důležitou úpravou řezné hrany, pro nejdelší životnost nástroje je jemné dokončení povrchu řezné hrany. Pomocí jemného honování (obr.49) se odstraní jemné škrábance a rýhy, způsobené předchozím broušením. Na řezné hraně se pomocí honování vytvoří malý rádius, který lépe odolává mechanickému zatížení. A snižuje se riziko vyštipování řezné hrany. S takto kvalitním povrchem řezné hrany se docílí vyšší kvality obrobeneho povrchu.



Obr. 48 [21].

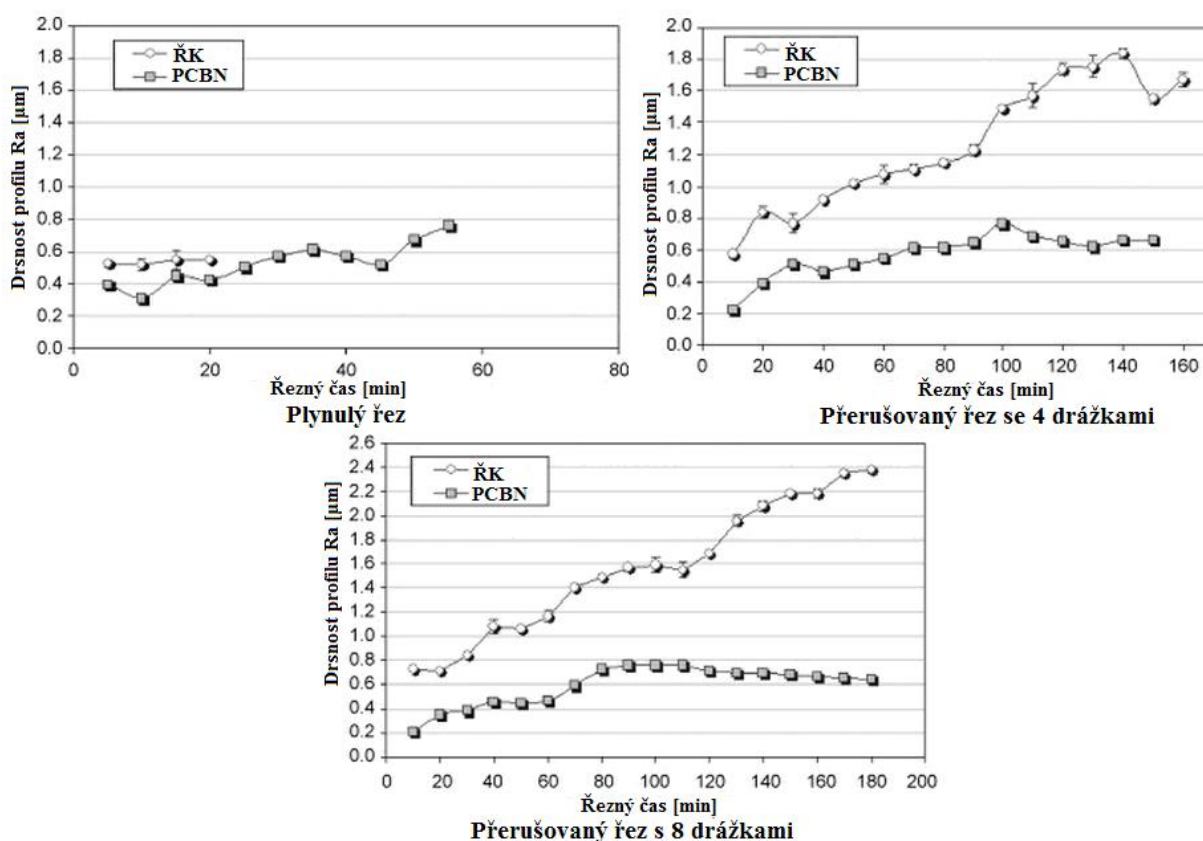


Obr. 49 Porovnání řezné hrany nástroje PKNB s honováním a bez [11].

1.3.5 Efektivní využití PKNB

I přes vysokou cenu materiálu našel tento materiál uplatnění při soustružení kalených součástí, které se dříve dali jen brousit. Další uplatnění materiálu je při obrábění ocelových výkovků, kalená ocel a litina, slinované materiály na bázi kobaltu a železa, žáruvzdorné slitiny atd. Při volbě tohoto materiálu je nutné zvážit i možnost použití mnohem levnější ŘK, protože oblasti použití KBN a ŘK se do značné míry překrývají. Použití KBN by mělo být v zásadě pro obrábění materiálů s tvrdostí nad 48 HRC. Při obrábění příliš měkkých obrobků dochází k mimořádně velkému opotřebení břitu [36].

Destičky osazené břity z KBN lze dosáhnout vynikající kvality obrobeneho povrchu. To činí soustružení s břity z KBN výhodnou alternativou k nákladnějšímu broušení. Těžké obrábění má mnoho výhod, než broušení nebo leštění, jako jsou krátké doby cyklu, procesní flexibilitu, lepší povrchová úprava, vyšší úběr a menší dopad na životního prostředí, jelikož obrábění se provádí bez použití procesních kapalin. Na obr.50 je porovnání obrobeneho plochy na obrobku z materiálu AISI 4340 oceli s tvrdostí 56 HRC břitem z řezné keramiky Al_2O_3 vyztuženými whiskerovými vlákny SiC a PKNB s nízkým obsahem KBN (60%)[28, 36, 35].



Obr. 50 Drsnost povrchu R_a na zkoušených obrocích za stejných řezných podmínek, pomocí břitu z řezné keramiky a břitu z PKNB. $v_c = 150 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $f = 0,08 \text{ mm}$, $a_p = 0,15 \text{ mm}$ [28].

Pro ověření zda lze vytvořit pomocí nástroje z PKNB velmi kvalitní plochu, ekvivalentní broušené ploše při běžné technologii, byl proveden experiment, jenž by měl zhodnotit kvalitu obrobené plochy na zkušebních vzorcích. Metodika a postup vyhodnocování byl stejný jako při hodnocení z nástrojem z PKD (viz. kap. 1.2.8). Hlavním výstupem této zkoušky je závislost kvality obráběného povrchu na velikosti posuvu při jemném soustružení nástrojem z PKD.

Materiál vzorku: ocel 100CrMnSi6-4 (ČSN 14209.4) kalená na tvrdost 62 HRC

Rozměry vzorku: $6 \times \phi 45 - 15 \text{ mm}$

Nástrojový držák: CCMNM 2525 M09

VBD: CNJN 090304 FN-PB

Poloměr zaoblení špičky ostří $r_e = 0,4 \text{ mm}$

Obráběcí stroj: universální soustruh SV 18RA (obr.51)

Řezné podmínky:

$$a_p = 0,25 \text{ mm}$$

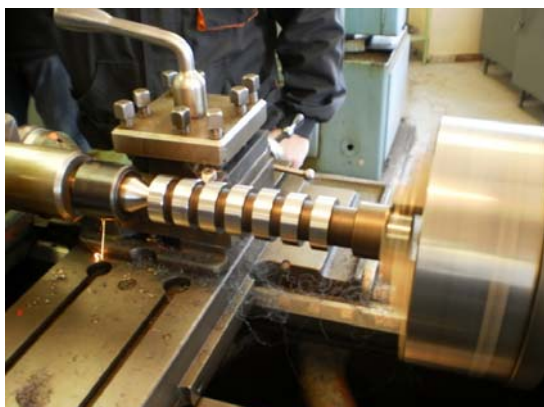
$$n = 1120 \text{ min}^{-1}$$

$$v_c = 158 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$$

Měřicí přístroj: TAYLOR- HOBSON Form Talysurf Intra 5.1 (obr.52)

Tab. 1.9 Přehled drsnosti profilu v závislosti na změně posuvu.

č. pos.	Posuv f [mm]	Naměřené hodnoty		Teoretické hodnoty	
		Rz [μm]	Ra [μm]	Rz _t [μm]	Ra _t [μm]
f ₁	0,054	2,6299	0,5434	0,91229	0,234344
f ₂	0,061	3,0459	0,5755	1,164508	0,29872
f ₃	0,067	3,1952	0,5776	1,405281	0,359046
f ₄	0,074	4,7405	1,0633	1,714926	0,44148
f ₅	0,088	5,586	1,0306	2,427365	0,622138
f ₆	0,100	6,5534	1,357	3,137303	0,805971

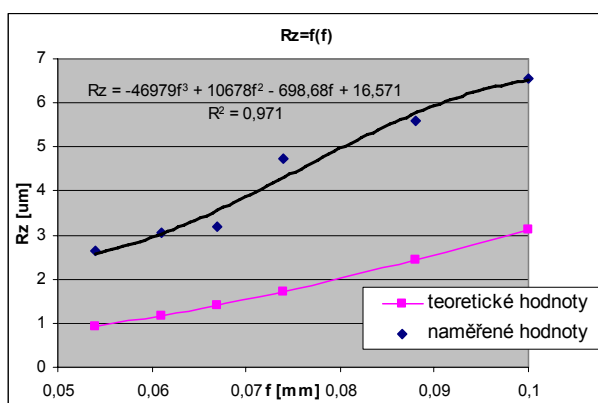


Obr. 51 Upnutí vzorku.

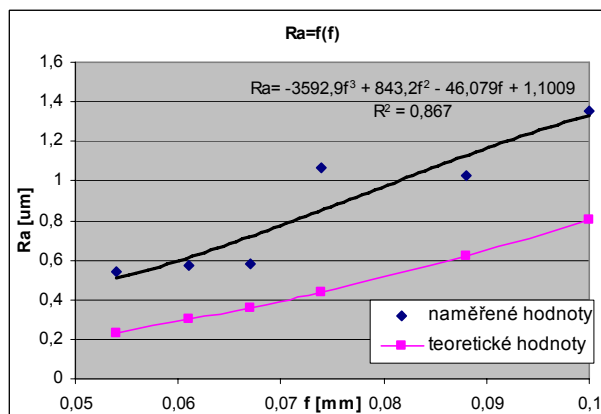


Obr. 52 T AYLOR- HOBSON Form Taly-surf Intra 5.1 při měření vzorku

Výsledné parametry měřeného profilu byly zpracovány v závislosti na pracovním posuvu. A porovnány s teoretickými dosažitelnými hodnotami. Naměřené hodnoty byli aproximovány proložením polygonem 3. stupně z důvodu vyhlazení funkce.



Obr. 53 Průběh drsnosti profilu Rz v závislosti na změně posuvu.



Obr. 53 Průběh drsnosti profilu Ra v závislosti na změně posuvu.

Přehled naměřených výsledků při nejnižším posuvu soustružení jsou uvedeny v tabulce (1.10). Tyto nejnižší dosažené výsledky profilu jsou důkazem efektivního využití PCBN nástrojů. Ostatní výstupy měření (materiálový model, průběh profilu) jsou uvedeny pro jednotlivé pracovní posuvy v příloze č. 2.

Tab. 1.10 Specifikace hodnocených parametrů pro vzorek s nejnižším posuvem.

Ra - průměrná aritmetická úchylka profilu	0,5434 μm
Rc - průměrná výška prvků profilu	1,6766 μm
Rv - nejvyšší hloubka profilu	1,3537 μm
Rz - největší výška profilu R_p+R_v	2,6299 μm
Rp - nejvyšší výška výstupků profilu	1,2762 μm
Rq - průměrná kvadratická odchylka profilu	0,6657 μm
Rmr(c) – materiálový poměr	48,13 %

Závěrné zhodnocení experimentu:

Z výsledků měření bylo dokázáno, že lze získat velmi kvalitní strukturu povrchu, dané obráběné ocelové kalené součástky, zhotovené pomocí PKNB nástroje. Hodnoty Ra byly v intervalu (0,5434÷1,357) μm , pro dané hodnoty posuvů (viz. tab. 1.10). Tyto nízké hodnoty drsností lze aplikovat pro většinu kluzných a funkčních ploch strojních součástí. Nejnižší hodnoty profilu, vzniklé při nejnižších posuvech, lze považovat za dost kvalitní a danou technologii vyhodnotit jako ekvivalentní k časově náročnějšímu broušení.

Vyšší hodnoty Ra a Rz oproti vypočteným teoretickým hodnotám, lze odůvodnit jistým opo-
třením nástroje a technickému stavu stroje, na němž byl pokus prováděn.

2 HODNOCENÍ ŘEZIVOSTI NÁSTROJE

Řezivost je souhrn komplexních vlastností nástroje, které umožňují nástroji efektivně vytvářet třísku z obráběného materiálu. A tím splnit fyzikální podstatu samotného řezání. Tato vlastnost závisí na řadě podmínek, mezi nejhlavnějšími patří fyzikální a mechanické vlastnosti řezného i obráběného materiálu, geometrie nástroje, řezné podmínky, druh řezného prostředí a metoda obrábění (soustružení, frézování atd.) [15].

Jednoduchým kritériem hodnocení řezivosti nástroje je T - v_c závislost (Taylorův vztah) a to i ve svém nejjednodušším tvaru (2.1):

Taylorův vztah[15]:

$$T = \frac{C_T}{v_c^m} \quad [\text{min}] \quad (7)$$

kde: C_T [-] - konstanta,
 v_c [m min^{-1}] - řezná rychlost,
 m [-] - exponent,

$$v_c = \frac{C_V}{T^{1/m}} \quad [\text{m.min}^{-1}] \quad (8)$$

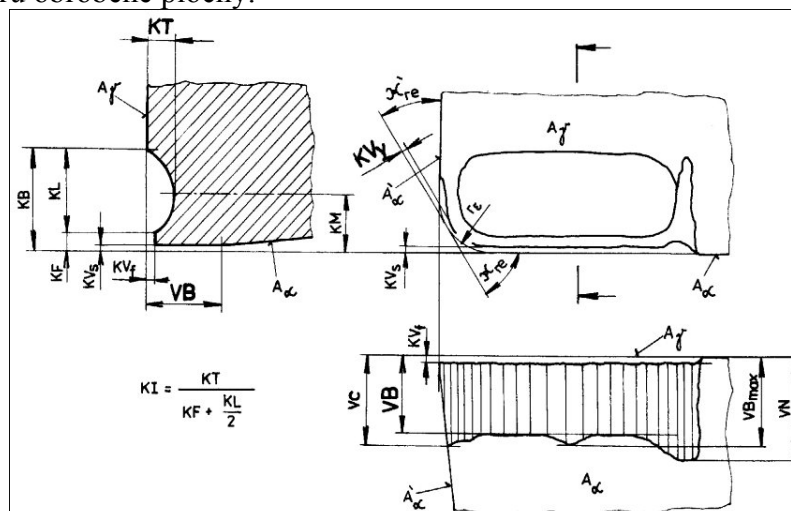
kde: C_V [-] - konstanta ($C_V = C_T^{1/m}$).

Kritéria opotřebení

Podle kterého je kvantifikováno velikost opotřebení jsou uvedena na obrázku (55) nejčastěji užívaná kritéria:

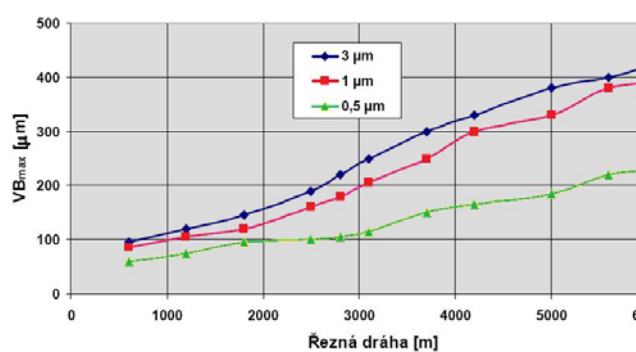
- VB - šířka fazetky opotřebení na hřbetě,
- KT - hloubka výmolu na čele,
- KV_y - radiální opotřebení špičky, jsou zvýrazněna většími písmeny).

Kritérium KV_y je významné zejména u dokončovacích operací, protože způsobuje změnu rozměru obrobene plochy.

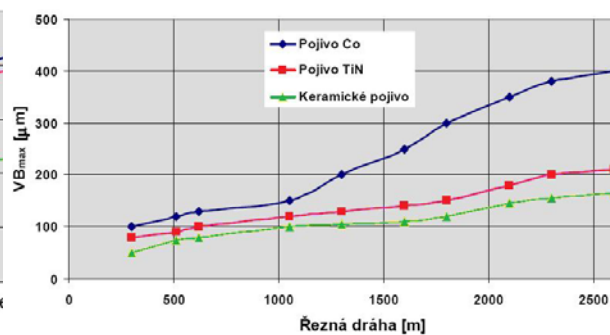


Obr. 55 Kritéria opotřebení[16].

Při různých zkouškách pro určování trvanlivosti nástroje je zásadním parametrem VB, který udává i mezní stav životnosti nástroje. Jeho parametr výrazně ovlivňuje výsledné rozměry obrobku. Míra opotřebení na hřbetě při provozu supertvrdých materiálu je závislá na struktuře řezného materiálu. Významnými činiteli opotřebovacího procesu je závislé například na velikosti zrna a druhem pojiva v řezném materiálu, jak potvrzují obr. (56 a 57)



Obr. 56 Průběh opotřebení VB v závislosti na velikosti zrna KBN dle [16].



Obr. 57 Průběh opotřebení VB v závislosti na druhu pojiva u KBN dle [16].

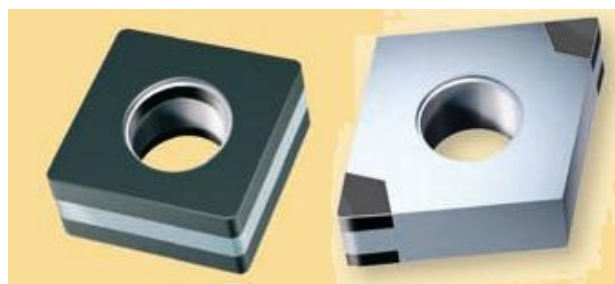
3 PKNB A PKD V SORTIMENTU VÝROBY NEJVÝZNAMĚJŠÍCH SVĚTOVÝCH PRODUCENTŮ NÁSTROJŮ A NÁSTROJOVÝCH MATERIÁLŮ

3.1 Becker Diamantwerkzeuge GmbH

Tato německá společnost sídlící v Puchheimu u Mnichova, se zabývá výrobou nástrojů pro různé obráběcí aplikace: soustružení, frézování, vyvrtávání a vystružování osazené supertvrdými materiály diamantové a z kubického nitridu boru. V sortimentu výrobků jsou standardní VBD, nebo jsou destičky opatřovány jak u diamantových nástrojů, tak i PKBN nástrojů lamačem třísek. Ten je vytvořen pomocí 3D laserové technologie. Výrobce u těchto destiček zaručuje několikanásobnou (3 až 5x u CVD) delší životnost oproti standardním destičkám. Dalším z nadstandardů jsou destičky vyráběné s hladicí geometrií WIPER (obr.58) u obou řezných materiálů. U nástrojů z PKNB jsou v sortimentu povlakované i nepovlakované úpravy. Mezi další sortiment, který je ekonomicky výhodný patří tzv. sandwich konstrukce (obr.59). Což jsou dvě vrstvy řezného materiálu, které se zároveň nanášejí na podkladový materiál (SK) z obou stran. Tyto konstrukce šetří materiál a dávají řezné destičce více využitelných řezných špiček (u čtvercové destičky až 8 použitelných špiček).



Obr. 58 Lamače třísek zhotovené 3D laserovou technologií [1].



Obr. 59 Průběh drsnosti profilu Ra v závislosti na změně posuvu [2].

3.1.1 Základní charakteristika diamantových nástrojů

Rozsáhlý sortiment od monokrystalického diamantu, přes vysoce výkonný CVD nástroj [2].

MDC DM - Masivní monokrystalický diamant bez struktury. Ostří velmi ostré a bez mikrotrhlin, které nevytváří žádné řezné tlaky (pasivní řezné síly), které umožňují dosažené výsledky s tolerancí blízké $0 \pm 0,001$ mm. Hřbet extrémně odolný proti opotřebení a s maximální tepelnou vodivostí vhodnou pro HSC a HPC. Monokrystal má nízkou houževnatost. Materiál vhodný pro superfinišování všech čistých neželezných kovů a nekovových materiálů bez abrazivní výztuže nebo křemíku.

TFC PD - Polykrystalický CVD diamant bez pojiva a bez karbidů, perfektní ostrost řezné hrany bez mikro poškození. Žádné řezné tlaky pro nejmenší tolerance. Nejvyšší odolnost proti opotřebení a velmi vysoká tepelná vodivost vhodná pro HSC a HPC. Materiál též disponuje vyšší houževnatostí. Použití je od superfinišování až po střední dokončování všech neželez-

ných kovů a kompozitů s vysokým obsahem abrazivní výztuže nebo křemíku. Velice dobrá trvanlivost při obrábění kompozitů GFRP (až 80% skleněných vláken) a CFRP.

PDC DP Compound (směsný řezný materiál) - Polykrystalický diamant vyztužený karbidem s jemnou velikostí zrna, dobrá ostrost řezné hrany a nízký řezný tlak umožňuje menší výrobní tolerance. Vyšší tuhost nástroje je na úkor nižší odolnosti proti opotřebení nástroje. Vhodný materiál pro dokončování všech neželezných kovů a nekovových materiálů s nízkým obsahem abrazivní výztuže nebo křemíku.

PDC-S DP Compound (směsný řezný materiál) - Polykrystalický diamant vyztužený karbidem s hrubou velikostí zrna, dobrá ostrost řezné hrany a nízký řezný tlak umožňuje menší tolerance. Ideální pro frézování, díky vyšší houževnatosti. Nízká odolnost proti opotřebení. Vhodný pro dokončování a frézování všech barevných kovů a nekovových materiálů se středním obsahem abrazivní výztuže nebo křemíku.

PDC-CU-S DP Compound (směs řezný materiál) - Polykrystalický masivní „Solid“ diamant bez karbidů, hrubé zrnitosti, dobrá břitová ostrost a nízký řezný tlak, který umožňuje malé tolerance. Vhodný pro frézovací nástroje s vysokou hloubkou řezu. Vysoká odolnost proti opotřebení při vyšší tuhosti vzhledem k velkému obsahu diamantu. Dokončování a frézování všech barevných kovů a nekovových materiálů s vysokým obsahem abrazivních částic. Ze sortimentu má nejvyšší úběrovou rychlost materiálu.

3.1.2 Doporučené řezné podmínky diamantových nástrojů

Doporučené řezné podmínky řezných materiálů jsou uvedeny v tab. 3.1, tab. 3.2, tab. 3.3 a tab. 3.4 a jsou zařazeny do materiálových skupin N dle ISO 513.

Tab. 3.1 Řezné podmínky materiálů zařazených do skupiny N [2].

N				
Označení	Materiál	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]
MDC DM	Plasty, Plexisklo, Akrylátové sklo	400÷1500	0,10÷0,80	0,005÷1,5
TFC PD	Thermo plasty, kompozity CFRP, GFRP, epoxidové pryskyřice	100÷1000	0,05÷0,2	0,01÷2,5
PDC DP				
PDC-S DP				
PDC-CU-S DP				

Tab. 3.2 Řezné podmínky materiálů zařazených do skupiny N [2].

N				
Označení	Materiál	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]
MDC DM	Al. slitiny do 2% Si	300÷4000	0,04÷0,10	0,005÷1,5
PDC DP	Al. slitiny pod 3% Si	200÷2500	0,05÷0,4	0,05÷3,5
PDC-S DP	Al. slitiny do 12% Si	150÷2000		0,08÷5
TFC PD	Al. slitiny až 21% Si	100÷1800		0,12÷5,5
PDC-CU-S DP				
MDC DM	Mosaz, Hořčíkové a zinkové slitiny	600÷2500	0,01÷0,40	0,005÷1,5
PDC DP		200÷2000	0,05÷0,4	0,05÷3,5
PDC-S DP				
PDC-CU-S DP				
MDC DM	Zlato, Stříbro	600÷2500	0,01÷0,40	0,005÷1,5
PDC DP	Slitiny mědi, olova, bronzů	200÷1500	0,05÷0,4	0,08÷5
PDC-S DP				
PDC-CU-S DP				

3.1.3 Základní charakteristika KBN nástrojů

Základní přehled nástrojů KBN a aplikací na dané materiály od firmy Becker je znázorněn v tabulce (tab. 3.3). V sortimentu výrobců jsou i povlakované KBN destičky.

Tab. 3.3 Přehled charakteristiky KBN nástrojů a jejich možná aplikace[1].

Ozn.	Skladba materiálu	Aplikace
PBC - 10S	Povlakované PCBN s velmi vysokým obsahem KBN 95% o jemné zrnitosti (1÷1,5) μm . Provedení v sendvičovém provedení i standardním.	Šedá litina (GG25), Spékané práškové oceli, Superslitiny,
PBC - 15S	Povlakované PCBN s velmi vysokým obsahem KBN 90% o super jemné zrnitosti 0,75 μm . Provedení v sendvičovém provedení i standardním.	Tvárná litina, Šedá litina, Spékané práškové oceli, Superslitiny,
PBC - 25S	Povlakované PCBN s nízkým obsahem KBN 65% o jemné zrnitosti (1÷2) μm . Provedení v sendvičovém provedení i standardním. Ideální pro plynulé tvrdé soustružení.	Materiály o tvrdosti (48÷62) HRC, *(52÷65) HRC, Ra = (0,2÷3,2) μm ,
PBC - 40S	Povlakované PCBN s nízkým obsahem KBN 55% o super jemné zrnitosti 0,75 μm . Provedení v sendvičovém provedení i standardním. Stupeň pro mírně až silně přerušované řezy.	Materiály o tvrdosti (48÷65) HRC, *(54÷65) HRC, Ra = (0,1÷3,2) μm , * Ra = (0,2÷3,2) μm
SBC - 25C	Povlakované PCBN s nízkým obsahem KBN 65% o zrnitosti 3 μm . Stupeň pro plynulé tvrdé soustružení s velkou hloubkou úběru třísky.	Materiály o tvrdosti (48÷65) HRC, *(56÷65) HRC, Ra = (0,2÷3,2) μm
SBC - 40C	Povlakované PCBN s nízkým obsahem KBN 65% o jemné zrnitosti 1 μm . Stupeň pro plynulé tvrdé soustružení s velkou hloubkou úběru třísky	Materiály o tvrdosti (48÷65) HRC, *(56÷65) HRC, Ra = (0,1÷3,2) μm , * Ra = (0,2÷3,2) μm

*- údaje označené hvězdičkou jsou pro nástroje nepovlakované

3.1.4 Doporučené řezné podmínky KNB nástrojů

Doporučené řezné podmínky řezných materiálů jsou uvedeny v tab. 3.1, tab. 3.2, tab. 3.3 a tab. 3.4 a jsou zařazeny do materiálových skupin H, K, S, dle ISO 513.

Tab. 3.4 Řezné podmínky materiálů zařazených do skupiny H [1].

H				povlakované	nepovlakované
Označení	Materiál	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]	a_p [mm]
PBC- 25S	Kalená ocel	100÷220	0,08÷0,20	0,02÷0,4	0,05÷0,4
PBC- 40S				0,05÷0,4	0,05÷0,4
SBC- 25C				0,04÷0,8	0,05÷6
SBC- 40C				0,05÷0,8	0,05÷6

Tab. 3.5 Řezné podmínky materiálů zařazených do skupiny K [1].

K				povlakované	nepovlakované
Označení	Materiál	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]	a_p [mm]
PBC- 10S	Litiny	300÷2500	0,02÷0,35	0,1÷0,7	0,1÷0,4
PBC- 15S				0,05÷0,7	0,05÷0,4

Tab. 3.6 Řezné podmínky materiálů zařazených do skupiny S [1].

S				povlakované	nepovlakované
Označení	Materiál	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]	a_p [mm]
PBC- 10S	Žáropevné slitiny	200÷500	0,08÷0,15	0,1÷0,7	0,1÷0,4
PBC- 15S				0,05÷0,7	0,05÷0,4

3.2 Element Six

Element Six je nezávisle řízená společnost na výrobu supertvrdých řezných materiálů, která je součástí skupiny De Beers a spoluvlastnictví firmy Umicore. Element Six je světová jednička v oblasti návrhu, vývoje a výroby supertvrdých materiálů a působí po celém světě se sídlem registrované v Lucembursku a základních výrobních závodech v Číně, Německu, Irsku, Švédsku, Jižní Africe a Velké Británii.

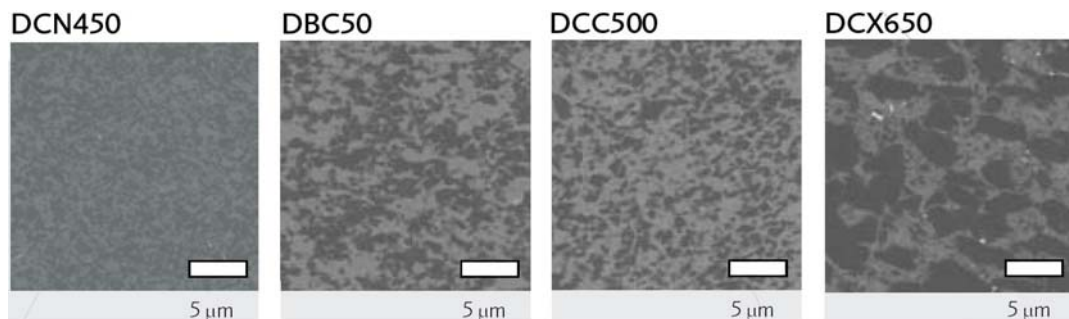
3.2.1 Základní charakteristika ze sortimentu CBN Material

Sortiment je rozdělen do dvou hlavních skupin s vysoko-obsahovou KBN strukturou (obr.61) a nízko-obsahovou strukturou (obr.60) [11].

DCN450 - Určeno pro středně těžké přerušované soustružení a dokončování a tvrdé frézování. Pro vysoce rychlé plynulé soustružení, za chlazení i za sucha, kde jeho odolnost vůči výmolu na čele jedno z nejvyšších na trhu. Materiál má přibližně 45% CBN, a velikost zrna pod 1 μm s pojivem TiCN. Má jednu z nejjemnějších struktur všech obchodních značek, a to může zajistit drsnost povrchu (Rz) pod 1 μm .

DBC50 - Určen pro silné výkonné kontinuální a lehce přerušované řezání. Vhodné pro většinu automobilových ocelí. Materiál také poskytuje vynikající otěruvzdornost, takže je ideální pro obrábění nástrojových ocelí a některé slitiny sedel ventilů. CBN velikost zrna 1,5 μm a pojivo je hlavně TIC. Materiál obsahuje přibližně 50 % CBN.

DCC500 - Byl vyvinut jako výkonný doplněk k DBC50. Zatímco obě třídy mají podobné složení, avšak má velmi rovnoměrnou strukturu, která v aplikacích poskytuje větší odolnost proti odštipování. DCC500 se doporučuje pro tytéž oblasti použití jako DBC50, zejména tam, kde je žádoucí vysoká životnost nebo vysoké řezné rychlosti



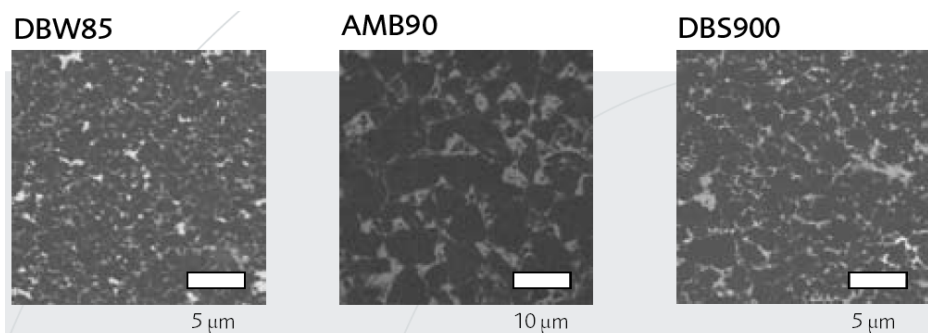
Obr. 60 Mikrostruktura nízko-obsahového KBN materiálu [11].

DCX650 - Posledním přírůstkem do třídy "Nízkoobsahové-CBN, od Element Six: DCX650 se doporučuje pro středně těžké až těžké přerušované soustružení všech běžných kalených ocelí. Struktura se skládá více velikostí zrn materiálu. Tento druh poskytuje optimální rovnováhu tuhosti a schopnost vysoké kvality povrchové úpravy. Pojivem je TiCN. Systém všech vlastností zaručuje, aby byla dobrá odolnost proti opotřebení boku hřbetu a čela proti výmolu. Obsah CBN je přibližně 65%.

DBW85 - Je jedním z nejvíce univerzální a úspěšný použitím vysoce-obsahové CBN třídy na trhu. Úspěšné použití materiálu v různorodých aplikacích, jako obrábění šedé litiny při jemném vyvrtávání sedel ventilů. Obrábění tímto materiálem lze přičíst vynikající pevnost a oteřuvzdornost. Také jeho extrémní odpor proti vyštipování. DBW85 je ideální pro silně přerušované řezání všech tvrdých a drsných materiály. Obsah CBN 85% s 1-2 µm velikostí zrna a AlWCoB pojivem.

AMB90 - Jako další z třídy vysoko-obsahových CBN na trhu je AMB90 je určen pro soustružení a frézování tvrdých odlitků šedé litiny. Stupeň je také používán pro těžké hrubovací soustružení z kalené nabízí hospodárnější řešení nástroje (s využitím břitů na obou stranách destičky). AMB90 obsahuje 90% CBN s 10 µm velikosti zrna. Pojivové fáze jsou na bázi nitridy hliníku a boridů.

DBS900 - Obsahuje zcela nový pojivový systém tak, aby poskytoval nejvyšší odolnost proti oděru a vyštipování. S hrubší zrnitostí (2÷4) µm a vyšší CBN Obsah 90% ve srovnání s DBW85, DBS900 je ideální volbou pro aplikace kde je nutná delší životnost. DBS900 vyniká v přerušovaném obrábění šedé a tvrdých odlitků litiny, kalených celi a vysoce legované sintrované železa a produkty práškové metalurgie.



Obr. 61 Mikrostruktura vysoko-obsahových KBN materiálu firmy Element Six [11].

3.2.3 Doporučené řezné podmínky KNB nástrojů

Doporučené řezné podmínky řezných materiálů jsou uvedeny v tab. 3.7, tab. 3.8, tab. 3.9 a tab. 3.10 a jsou zařazeny do materiálových skupin K, S, H, P dle ISO 513.

Tab. 3.7 Řezné podmínky materiálů zařazených do skupiny K [11].

K				
Označení	Materiál	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]
DBW85	Šedá litina	750÷1300	0,5÷2,0	2,0÷5,0
AMB90		725÷1200		
DBS900		700÷1000		
DBW85	Tvrzená litina	60÷100	0,1÷0,2	0,2÷0,5
AMB90				
DBS900				

Tab. 3.8 Řezné podmínky materiálů zařazených do skupiny S [11].

S				
Označení	Materiál	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]
DCC500	Žáropevné slitiny, Niklové superslitiny	220÷480	0,1÷0,3	0,3÷2,0
DCX650		220÷450		
DBW85		210÷440		
DBS900		200÷450		

Tab. 3.9 Řezné podmínky materiálů zařazených do skupiny H [11].

H				
Označení	Materiál	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]
DBC50	Kalená ocel	130÷300	0,025÷0,500	0,05÷0,30
DCC500		120÷300		
DCN450		110÷290		
DCX650		90÷220		
DBW85		130÷300		
DBS 900		130÷300		

Tab. 3.10 Řezné podmínky materiálů zařazených do skupiny P [11].

P				
Označení	Materiál	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]
DBC50	Spékané železa, Práškové kovy	70÷210	0,025÷0,200	0,05÷0,20
DCC500		70÷210		
DCX650		180÷450		
DBW85		60÷150		
DBS900		60÷150		

3.3.4 Základní charakteristika diamantových materiálů

CMX850 je ideální pro frézování a hrubování hliníkové slitiny, kde je nutná extrémní odolnost proti odštipování. Na rozdíl od většiny jemnozrnných tříd PCD, je vhodný pro obrábě-

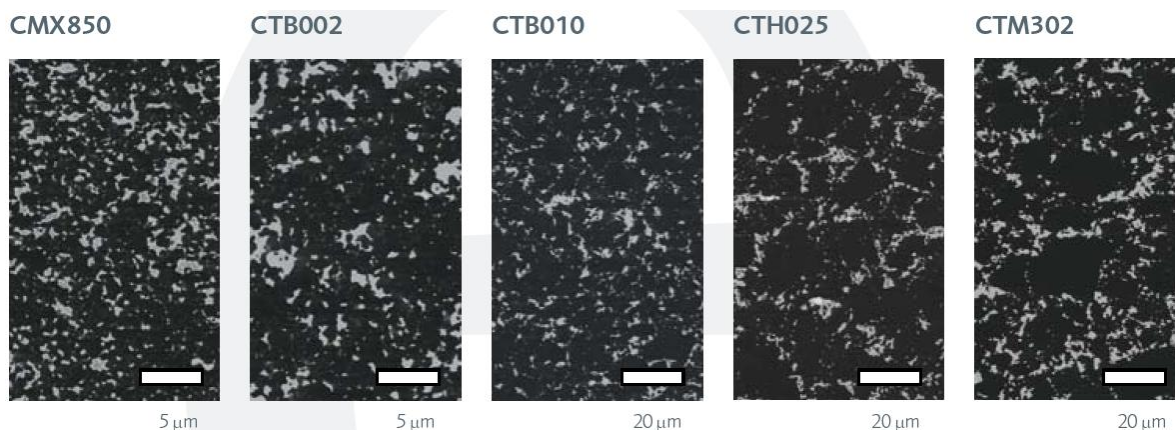
ní hliníkové slitiny s vysokým obsahem křemíku, kde je nutná vysoká odolnost proti otěru. Vzhledem k jeho velmi jemnozrné struktuře je vhodný pro dokončovací aplikace. Další úspěšná aplikace pro tento materiál je při obrábění titanu a kompozitů.

CTB002 je jedním z nejtvrdších stupňů PCD k dispozici od Element Six. Materiál má v průměru 2 μm velikost zrna, a proto je vhodný pro výrobu přesných nástrojů pro aplikace, kde povrchová úprava je velmi důležitá. Materiál je vysoce doporučen pro komplexní výrobu nástrojů a má vynikající odolnost proti vyštipování a je vhodný pro obrábění hliníkové slitiny s nízkým obsahem křemíku.

CTB010 je nejvíce úspěšný stupeň na trhu, patří mezi hlavní nástrojové stupně, kde je dobré zajistit dobrou bilanci mezi houževnatostí a odolnost proti opotřebení. Materiál je vhodný, kde hrubovací a dokončovací práce jsou prováděny s jediným nástrojem, nebo tam kde není znám charakter uplatnění. Tento stupeň má dobrou elektroerozivní obrobiteľnosť. CTB010 se doporučuje pro obrábění hliníkových slitin s nízkým a středním obsahem křemíku.

CTH025 má 25 μm průměrnou velikost zrna. Tento stupeň byl vyvinut pro optimální odolnost proti opotřebení, uplatnění je především v abrazivních obráběcích aplikacích. Je úspěšný v obrábění hliníkových slitin s vysokým obsahem křemíku, kompozitů s kovovou maticí (MMC), slinutých karbidů wolframu a keramiky.

CTM302 má jedinečnou kombinaci odolnosti proti opotřebení a pevnosti řezné hrany. Obsahuje pečlivě vybranou směs diamantových zrn o velikosti (mezi 2÷30) μm . Kombinace těchto velikostí zrn a speciálně vyvinutý vysoký tlak při slinovacím procesu vytváří konstrukce s extrémní odolností proti otěru a dobrou tepelnou stabilitou. Aplikační oblasti zahrnují obrábění abrazivních obrobků jako je: MMC, slitiny hliníku s vysokým obsahem křemíku, obrábění vysoce pevných litiny a bimetalové aplikace.



Obr. 62 Mikrostruktura diamantových materiálů firmy Element Six [10].

3.3.5 Doporučené řezné podmínky diamantových nástrojů

Doporučené řezné podmínky řezných materiálů jsou uvedeny v tab. 3.11, tab. 3.12, tab. 3.13 a tab. 3.14 a jsou zařazeny do materiálových skupin K, S, N, P dle ISO 513. U materiálové skupiny K je zajímavé, že lze obrábět litiny diamantovým nástrojem. Aniž by docházelo k extrémnímu opotřebení. Základním předpokladem je nepřekročení teploty v místě řezu nad 600 $^{\circ}\text{C}$. To je docíleno nižšími řeznými rychlostmi. Dalším podmínkou je speciální keramické pojivo mezi jednotlivými zrny, které nepodporuje katalytickou grafitizaci zrn diamantu [10].

Tab. 3.11 Řezné podmínky materiálů zařazených do skupiny K [10].

K				
Označení	Materiál	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]
CTM302	Šedá litina	40÷500	0,08÷0,2	0,25÷1
CD M		40÷350		
CD E		40÷350		

Tab. 3.12 Řezné podmínky materiálů zařazených do skupiny S [10].

S				
Označení	Materiál	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]
CMX850	Titanové slitiny	40÷300	0,1÷0,2	0,2÷0,5
CTB002				

Tab. 3.13 Řezné podmínky materiálů zařazených do skupiny N [10].

N				
Označení	Materiál	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]
CMX850	Al. slitiny (Si<12%)	500÷5000	0,1÷0,4	0,1÷4
CTB002		500÷4500		
CTB010		550÷4500		
CMX850	Al. slitiny (Si>12%), MMC s 25% vlákny SiC	200÷1100	0,1÷0,5	0,1÷4
CTB010		200÷980		
CTM302		200÷950		
CDM		200÷900		
CDE		200÷900		
CMX850	Měď a její slitiny, Hořčík a jeho slitiny	400÷1500	0,03÷0,3	0,05÷2
CTB002				
CMX850	Slinuté karbidy a řezná keramika	30÷140	400÷1500	400÷1500
CTH025		25÷130		
CTM302		20÷140		

Tab. 3.14 Řezné podmínky materiálů zařazených do skupiny N [10].

Ostatní materiály				
Označení	Materiál	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]
CTB010	Bimetal (Al. slitina / Šedá litina)	200÷500	0,08÷0,2	0,25÷1
CTM025				
CTM302				
CMX850	Plasty a vystužené kompo- zity	200÷1000	0,1÷0,2	0,2÷3
CTM320				
CDM				
CDE				

3.3 Mitsubishi Materials Corporation

Podskupina Mitsubishi Carbide je japonská firma s mnoha pobočkami po celém světě, známá jako přední světový výrobce a dodavatel řezných nástrojů v oblasti frézování a soustružení. Výrobce inovativních materiálů pro kovozpracující průmysl, mezi ně patří například metoda slinování aktivovaných částic, která se používá při výrobě PKBN. Firma nabízí široký sorti-

ment VBD, většina destiček je vyráběna s hladicí geometrií typu WIPER, nebo ve standardním provedení.

3.3.1 Základní charakteristika ze sortimentu Mitsubishi Carbide

Většina sortimentu je vyrobena právě z miňovanou metodou slinování aktivovaných částic kubického nitridu boru (Particle-activated sintering). Při této metodě jsou zcela eliminovány všechny nečistoty, příměsi a na povrchu zrn PKNB se vytváří rovnoměrná reaktivní vrstva ve formě povlaku, který kompletně obalí každé zrno. K výhodám této metody patří [17,24]:

- zlepšená adheze mezi zrny tvrdé fáze (KNB) a pojivem,
- rovnoměrné rozptýlení zrn KNB v pojivu,
- vysoká houževnatost konečného produktu,
- vysoká odolnost konečného produktu proti opotřebení a lomu.

MBC 010 – polykrystalický kubický nitrid bóru s jemnozrnnou strukturou (pojivo TiN + Al₂O₃) s povlakem TiN, pro obrábění kalených ocelí plynulým řezem, jeho jemná struktura vytváří kvalitní obrobené plochy. Materiál s vysokou odolností vůči opotřebení zaručuje vysoké řezné rychlosti až 300 m.min⁻¹.

MBC020 – je univerzální povlakovaný KNB stupeň vhodný pro obrábění kalené oceli. Pokrývá široké spektrum aplikací od plynulého až po přerušované obrábění. Podklad KNB s vysokou tuhostí břitu a povlak na bázi technologie MIRACLE (na bázi TiAlN), zvyšuje odolnost proti opotřebení a umožňuje pokrýt širší rozsah aplikací než konvenční obráběcí stupně KNB.

MB8025 – nepovlakovaný polykrystalický kubický nitrid bóru (pojivo TiN + Al₂O₃), vyrobený metodou slinování aktivovaných částic. Vhodný pro obrábění kalených ocelí plynulým a lehce přerušovaným řezem, při středních a vyšších řezných rychlostí.

MB835 – vylepšená struktura PKBN (pojivo TiN + Al₂O₃), vyrobený metodou slinování aktivovaných částic. Výborná odolnost proti lomu v těžkých přerušovaných řezech.

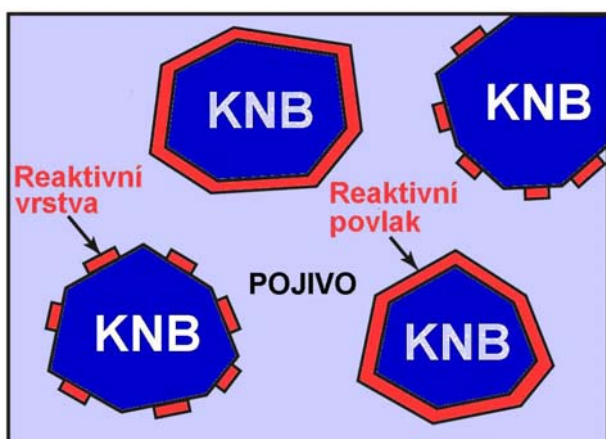
MB710 – nepovlakovaná destička s pojivem TiC + Al₂O₃, vyrobená metodou slinování aktivovaných částic. Pro všeobecné řezání s dobře vyváženou odolností proti opotřebení a odložením.

MB730 – větší obsah KNB (pojivo Co slitiny), vyrobený metodou slinování aktivovaných částic. Díky vysoké tepelné vodivosti materiálu je vhodný pro HSC, jelikož dokáže dobře odvádět generované teplo z místa řezu při HSC.

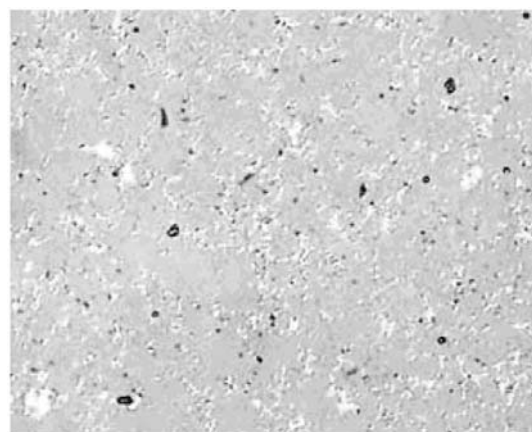
MBS140 – největší obsah KNB s pojivem AlN (masivní provedení), vyrobený metodou slinování aktivovaných částic. Vhodný pro HSC obrábění a pro hrubovací řezy litin. Materiál má vysokou tepelnou vodivost.

MB4020 – nový materiál pro univerzální použití s vysokým obsahem KBN se speciálním pojivem. Tento materiál poskytuje vysokou trvanlivost nástroje během obrábění spékáných slitin. Univerzální účel této třídy materiálu je obrábění různých spékáných slitin s odlišnou tvrdostí, strukturou a různou geometrií obrobku.

MD220 – řezný materiál ve formě PKD, určený převážně pro hliníkové slitiny, neželezné kovy a vláknem vyztužené kompozity. Pro velmi vysoké rychlosti v dokončovacích operacích.



Obr. 63 Aktivovaná zrna a zrna s povlakem [17]



Obr. 64 Mikrostruktura PKD materiálu MD220 firmy Mitsubishi Materials [24].

Doporučené řezné podmínky ze sortimentu Mitsubishi Carbide

Doporučené řezné podmínky řezných materiálů jsou uvedeny v tab. 3.15, tab. 3.16, tab. 3.17, tab. 3.18, tab. 3.19 a tab. 3.20 a jsou zařazeny do materiálových skupin K, S, N, P dle ISO 513.

Tab. 3.15 Řezné podmínky materiálů zařazených do skupiny H [24].

H					
Materiál	Označení	Druh řezu	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]
Kalená ocel (tvrdość 35÷65 HRC)	MBC010	HSC dokončování	150÷400	max. 0,2	max. 0,2
	MBC020	Plynulý řez	80÷250	max. 0,3	max. 0,5
		Přerušovaný řez	60÷200	max. 0,2	max. 0,3
	MBC8025	Plynulý řez	80÷250	max. 0,3	max. 0,5
		Přerušovaný řez	60÷150	max. 0,2	max. 0,3
		Plynulý až lehce přerušovaný řez	70÷150	max. 0,3	max. 0,5
MB835	Těžký přerušovaný řez	50÷120	max. 0,3	max. 0,5	
HSS ocel	MB730	Plynulý řez	20÷70	0,1÷0,4	0,1÷3,0

Tab. 3.16 Řezné podmínky materiálů zařazených do skupiny K [24].

K					
Materiál	Struktura	Označení	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]
Šedá litina (GG25, GG30)	Ferit + Perlit	MBS140	500÷1500	max. 0,5	max. 1
	Perlit	MB710	500÷950		max. 5
	Perlit	MB730	900÷1450		
Tvárná litina (GGG40, GGG70)	Ferit	MB710	75÷500	max. 0,4	max. 0,5
	Ferit + Perlit	MB730	30÷350		

Tab. 3.17 Řezné podmínky materiálů zařazených do skupiny S [24].

S				
Označení	Materiál	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]
MB730	Ni. žaropevné slitiny (Inconel)	100÷150	max. 0,2	max. 0,5
MB730	Co. Žaropevné slitiny	50÷100		

Tab. 3.18 Řezné podmínky materiálů zařazených do skupiny N [24].

N				
Označení	Materiál	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]
MB730	Slinuté karbidy	100÷150	max. 0,2	max. 0,2
MBS130		10÷30		

Tab. 3.19 Řezné podmínky materiálů zařazených do skupiny P [24].

P				
Označení	Materiál	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]
MB8025	Ocel na odlitky	30÷130	0,1÷0,5	0,2÷3,0
MB8025	Vysoko legované oceli	30÷130	0,1÷0,5	0,2÷3,0

Tab. 3.20 Řezné podmínky materiálů zařazených do skupiny N [25].

N				
Označení	Materiál	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]
MD220	Hliník Al	200÷1500	max. 0,2	max. 3,0
	Al. slitiny (Si<16%)	200÷1200	max. 0,2	max. 2,0
	Al. slitiny (Si>16%)	200÷1000	max. 0,2	max. 2,0
	Měděné slitiny	200÷1200	max. 0,2	max. 2,0
	Slinuté karbidy	5÷20	max. 0,2	max. 0,5

Tab. 3.21 Řezné podmínky materiálů zařazených do skupiny N [25].

Ostatní materiály				
Označení	Materiál	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]
MD220	Zpevněné plasty	100÷1000	max. 0,40	max. 2,0
	GFRP	100÷800	max. 0,25	max. 2,0
	Uhlík	100÷600	max. 0,30	max. 2,0
	Keramika	30÷80	max. 0,10	max. 2,0
	Tvrzená guma	300÷800	max. 0,15	max. 1,0
	Dřevěné materiály	300÷4000	max. 0,40	-

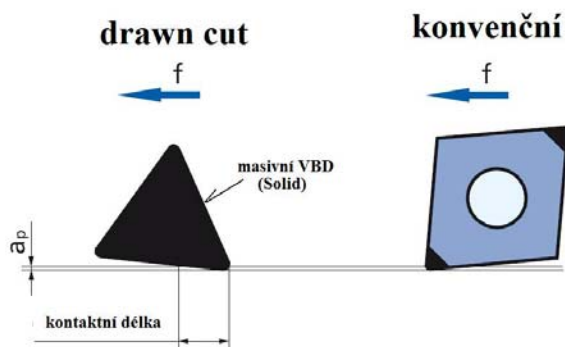
3.4 CeramTec GmbH

Mateřská společnost sídlící v německém Ebersbachu, poddivize SPK Cutting Tools Division zabývající se výrobou řezných materiálů převážně z řezné keramiky a různých materiálů. V oblasti supertvrдых materiálu se zabývá PCBN, převážně pro obrábění kalené oceli a výrobků z šedé a tvrzené litiny. V sortimentu VBD (obr.65) se u této firmy setkáme s pojmy „multi-tipped“ VBD jež se jedná o destičku, která má více řezných špiček nástroje (roubíků) z PCBN, důvod tohoto použití je převážně z ekonomického hlediska, kdy je výsledná cena destičky výhodnější než jednobřitá. Dalším pojmem je „laminated“ VBD, tomto případě je jedná o silnou vrstvu PCBN na čelní ploše VBD.

U masivní VBD neboli „Solid“ je celá destička vyrobena z řezného materiálu PCBN. Pro tento typ destičky je využíván zvláštní způsob řezu pro dokončovací operace „drawn cut“ (obr.66) neboli tažené řezání. Jedná se o opačný způsob nastavení řezné hrany vůči obrobku s použitím malého úhlu. U masivních destiček je tak použitelná pro řez až 2/3 délky řezné hrany. Takto je docíleno výborné kvality obrobeneho povrchu, při nastavení vyšších posuvových rychlostí.

Symbol	Zobrazení	Popis
B		„multi-tipped“ PCBN jednostranná, vícebřitá 2x šp.
C		„multi-tipped“ PCBN jednostranná, vícebřitá 3x šp.
D		„multi-tipped“ PCBN jednostranná, vícebřitá 4x šp.
F		PCBN „laminated“ jednostrané vrstvená
L		„multi-tipped“ PCBN dvoustranná, vícebřitá 4x šp.
M		„multi-tipped“ PCBN dvoustranná, vícebřitá 6x šp.
N		„multi-tipped“ PCBN dvoustranná, vícebřitá 8x šp.
S		PCBN „Solid“ masivní varianta 8x šp.

Obr. 65 Sortiment provedení VBD firmy CeramTec[3].



Obr. 66 Způsobu řezu draw cut [3].

3.4.1 Základní charakteristika nástrojů z KBN

Firma nabízí velký sortiment pro obrábění kalené oceli a ložiskové oceli [3,4]:

WXM 155 - Vysoká tepelná stabilita a dobrá tvrdost za tepla z něj dělá vysoce odolný materiál proti opotřebení. Materiály s tvrdostí až 62 HRC mohou být snadno obráběny s rychlostí až $v_c = 180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ v plynulém řezu. Masivní provedení podporuje flexibilitu použití při tvrdém soustružení. Použití těchto procesů tímto způsobem může snížit obráběcích časů o 50% a někdy více, ve srovnání s vícebřitými PCBN destičkami.

WXM 255 - Díky vysoce tepelně stabilnímu pojivu a nízké chemické afinitě ke chromu je tento stupeň vhodný zejména pro obrábění kalené ložiskové oceli. Extrémně vysokou trvanlivost nástrojů lze dosáhnout spolehlivě při kontinuální řezu. Vynikající odolnost proti tvoření kráteru na čele, snižuje riziko vylomení řezné hrany a zvyšuje spolehlivost procesu.

WXM 355 - Bilance houževnatosti a odolnosti proti opotřebení tohoto stupně je ideální pro případ kalených ocelí, trvanlivost nástroje je rozšířena až o 50%. Masivní provedení destiček umožňuje spolehlivé předhrubování stejně jako „drawn cut“.

WXM 455 - je nejlepší volba pro obrábění s velice těžkými přerušovanými řezy. Pro tyto aplikace je houževnatost a odolnost proti oděru řezného materiálu nesmírně důležitá. Tento stupeň nabízí vysoký stupeň tuhosti a díky své optimální odolnosti proti opotřebení může být realizováno pro obrábění s řeznými rychlostmi až $v_c = 220 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ při silně přerušovaném řezu.

WBN 115 - Vysoce výkonný stupeň v obrábění. Vynikající tepelná stabilita v kombinaci s optimálním vyvážením houževnatosti. Výjimečná odolnost proti opotřebení vhodná pro obrábění HPC. Tento stupeň dosahuje výjimečných výsledků díky jeho vysoké stabilitě řezné hrany a vynikající odpor proti opotřebení, zvláště při hrubování.

WBN 105 - S optimalizovanou houževnatostí a výbornou odolnost proti opotřebení, je tento stupeň určen pro univerzální obrábění litinových materiálů.

WBN 100 a WBN 120 - Tyto dvě třídy v PCBN masivním provedení (Solid) jsou vhodné pro hrubování šedé litiny se středními řeznými podmínkami.

WBN 750 - Destičky s více řeznými špičkami (multi-tipped) nebo vrstvené PCBN stupně (laminated) jsou určeny pro dokončovací operace materiálů ze šedé litiny.

3.4.2 Doporučené řezné podmínky pro nástroje z KBN

Doporučené řezné podmínky řezných materiálů jsou uvedeny v tab. 3.22, tab. 3.23, a jsou zařazeny do materiálových skupin K, H dle ISO 513.

Tab. 3.22 Řezné podmínky materiálů zařazených do skupiny K [4].

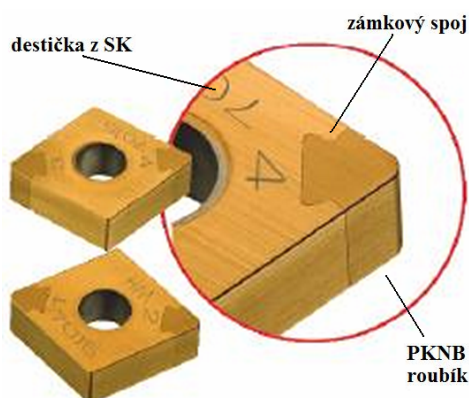
K				
Označení	Materiál	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]
WBN115	Šedá litina	60÷1800	0,1÷0,7	0,25÷4,00
WBN105		1000÷1400	0,3÷0,5	1,50÷3,00
WBN100		1000÷1200		
WBN120		1000÷1200		
WBN750		800÷1200	0,1÷0,7	
WBN115	Tvrzená litina	100÷250	0,1÷0,4	
WBN100		100÷200	0,1÷0,3	1,00÷2,50
WBN120				

Tab. 3.23 Řezné podmínky materiálů zařazených do skupiny H [3].

H					
Označení	Materiál	v_c [m.min ⁻¹]	Provedení VBD	f [mm]	a_p [mm]
WXM155	Kalená ocel (48÷64 HRC)	140÷180	Solid	0,10÷0,20	0,1÷0,5
WXM255		160÷220	Solid	0,15÷0,30	
			Multi-tipped	0,15÷0,25	
WXM355		140÷200	Solid	0,20÷0,35	
			Multi-tipped	0,10÷0,25	
WXM455	120÷180	Multi-tipped	0,20÷0,35		

3.5 Sandvik Coromant

Společnost Sandvik Coromant sídlící ve Švédsku patří mezi největší výrobce nástrojů pro frézování, soustružení a vrtání na světě. Firma přispěla jinou konstrukcí při usazování řezného roubíku při výrobě VBD. Roubík z PCBN má stejnou tloušťku jak destička, takže destička je tím pádem oboustranná a má dvojnásobný počet řezných špiček. Dalším vylepšením firma přispěla při pájení roubíku s podkladovou destičkou, jenž pájený spoj pojistila „zámkovou“ konstrukcí (obr.67). Tím vznikne tuhý spoj mezi roubíkem a destičkou.



Obr. 67 Zámkové spojení roubíku s destičkou firmy Sandvik Coromant [-].

3.5.1 Základní charakteristika ze sortimentu Sandvik Coromant

Sortiment jak PCD nástrojů pro obrábění lehkých a barevných kovů, dále jsou nabízeny firmou nástroje KNB pro obrábění kalené oceli a tvrzené litiny [37]:

CD10 - Třída s břity osazenými polykrystalickým diamantem určená pro dokončování a polo-dokončování neželezných a nekovových materiálů. Nabízí dlouhou trvanlivost břitu, čistý řez a dobrou kvalitu obrobeného povrchu.

CD1810 - Třída s diamantovým povlakem pro dokončování až hrubování hliníku, hořčíku, mědi, mosazi, plastů atd. Diamantový povlak zajišťuje skvělou odolnost proti opotřebení a snížení tvorby nárustku na břitech, což se projevuje vysokou kvalitou obrobeného povrchu.

CB7925 - Monolitní CBN třída s velkou houževnatostí břitu a dobrou odolností proti otěru. Třída CB7925 je vhodná pro obrábění šedé i tvrzené litiny se spojitým i přerušovaným řezem.

CB7525 - Extrémně tvrdá třída na bázi kubického nitridu bóru. Vysoká houževnatost břitu a dobrá odolnost proti otěru činí tuto třídu optimální pro vysokorychlostní dokončovací obrábění součástí z šedé litiny se spojitým i přerušovaným řezem.

CB7015 - Vysoký výkon, třída s nízkým obsahem kubického nitridu bóru. První volba pro spojitě a lehké přerušované řezy v tvrzených ocelích při vysokých řezných rychlostech.

CB20 - Třída kubického nitridu bóru s vysokou výkonností. První volba pro spojitě a lehké přerušované řezy v tvrzených ocelích.

CB7025 - Vysoce výkonná třída se středním obsahem kubického nitridu bóru. První volba pro obrábění tvrzených ocelí při středních řezných rychlostech v případech, kdy nedílnou součástí jinak spojitých řezů představují náročná přerušování.

CB7035 - Vysoce výkonná třída se středním obsahem kubického nitridu bóru. První volba pro těžké přerušované řezy v cementovaných ocelích s využitím středních řezných rychlostí. Kromě toho se vyznačuje také dobrou odolností proti opotřebení umožňující provádění časově relativně dlouhých řezů.

CB50 - Extrémně tvrdý kubický nitrid bóru. Vysoká houževnatost břitu a dobrá odolnost proti opotřebení - první volba pro přerušované řezy v tvrzených ocelích.

CB7525 - Extrémně tvrdá třída na bázi kubického nitridu bóru. Vysoká houževnatost bříty z ní činí dobrou alternativní třídu vhodnou pro přerušované řezy v tvrzených ocelích. Zaručuje čistý řez a dobrou kvalitu obrobeného povrchu

3.5.2 Doporučené řezné podmínky nástrojů firmy Sandvik

Doporučené řezné podmínky řezných materiálů jsou uvedeny v tab. 3.24, tab. 3.25, tab. 3.26 a jsou zařazeny do materiálových skupin N, H, K dle ISO 513.

Tab. 3.24 Řezné podmínky materiálů zařazených do skupiny N [37].

N			
Označení	Materiál	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]
CD10	Al. slitiny, tvářené, odlévané nevystárlé	250÷2500	0,05÷0,40
CD1810			0,15÷0,80
CD10	Al. slitiny, Si =(13÷15) %	195÷1950	0,05÷0,40
CD1810			0,15÷0,80
CD10	Al. slitiny, Si =(16÷22) %	95÷960	0,05÷0,40
CD1810			0,15÷0,80
Měď a její slitiny			
CD10	Snadno obrobitelné slitiny, ≥1% Pb	65÷630	0,05÷0,40
CD1810			0,15÷0,80
CD10	Mosaz, olověné bronzy, ≤1% Pb		0,05÷0,40
CD1810			0,15÷0,80
CD10	Bronz a bezolovnatá měď, včetně elektrolytické mědi	38÷375	0,05÷0,40
CD1810			0,15÷0,80

Tab. 3.25 Řezné podmínky materiálů zařazených do skupiny H [37].

H				
Materiál	Tvrlost	Označení	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]
Kalená ocel	50÷55 HRC	CB7015	185÷350	0,05÷0,25
		CB7025	155÷250	
		CB20	170÷260	
		CB7035	130÷215	0,1÷0,4
		CB7525	110÷205	
		CB50		
	60÷65 HRC	CB7015	135÷250	0,05÷0,25
		CB7025	115÷180	
		CB20	125÷185	
		CB7035	95÷155	0,1÷0,4
		CB7525	80÷145	
		CB50		

Tab. 3.26 Řezné podmínky materiálů zařazených do skupiny K [37].

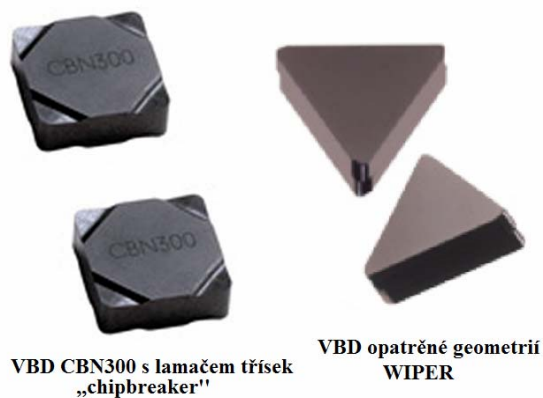
K				
Materiál	Tvrдость	Označení	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]
Šedá litina	180÷220 HB	CB50	1050÷1700	0,1÷0,4
		CB7525	1050÷1700	
		CB7925	890÷1450	
Tvrzená litina	400 HB	CB7925	120÷180	0,1÷0,4
		CB7525		
		CB50		

3.6 Seco Tools AB

Švédská společnost Seco Tools AB je předním světovým výrobcem v oblasti výroby a vývoje řezných nástrojů pro obrábění. Firma má rozsáhlé zastoupení po světě i v ČR.

Mezi úspěšné výrobky firmy patří vybroušené lamače třísek (obr.68) osazené na destičkách CBN300. Tato destičky má osm pozitivních ostrých špiček, to vede ke snížení řezných sil a nižší úrovně přenesené energie. Výsledkem je nižší teplotní hladina v řezné zóně. Zlepšení životnosti nástrojů bylo dosaženo snížením výmolu na čele, vzhledem k nižší teplotě a zatížení. Snížení teploty v místě řezu a řezných sil vede ke snížení možného chemického opotřebení na špičce, čímž se zvyšuje životnost nástroje. Zkoušky prováděné s CBN300 s utvařečem ukázaly zvýšení životnosti nástroje o 50% ve srovnání s ekvivalentním nástrojem o negativním sklonu geometrie čela.

Výrobce také nabízí hladící geometrii WIPER, kterým jsou opatřeny řady CBN010, CBN100, CBN050C, CBN160C, CBN300 a CBN400C.

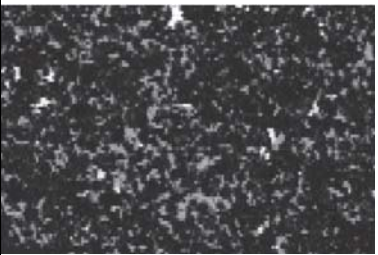
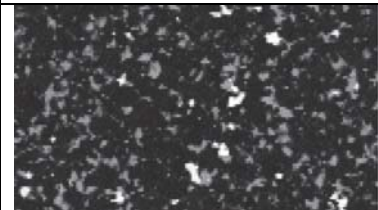
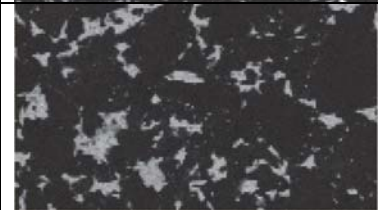
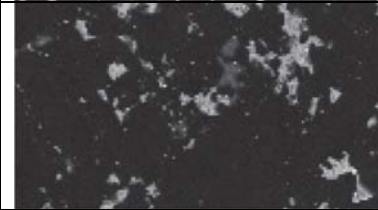



Obr. 68 VBD destičky opatřené lamačem třísek a hladící geometrií WIPER [40].

3.6.1 Základní charakteristika Secomax PCD ze sortimentu Seco Tools

Vysoce výkonné nástrojové materiály pro obrábění lehkých slitin a vláknových kompozitů, přehled materiálů s charakteristikou a mikrostrukturou je sezařen v tab. 3.27.

Tab. 3.27 Přehled charakteristiky PCD nástrojů a jejich možná aplikace[40].

Stupeň	Mikrostruktura	Charakteristika materiálu
PCD05		Tato třída s průměrnou velikostí zrna 1 μm je dobře slinutá v homogenní strukturu. Vhodné pro frézování a hrubování pro Al slitiny se středním až vysokým obsahem Si, vysoké požadavky na povrchové úpravy jsou zajištěny při obrábění titanové slitiny.
PCD10		Stupeň s velikostí zrna 2 μm , je vhodný pro jemné vrtání a vyskružovací aplikace. Vylepšená kvalita řezných hran tohoto stupně plní kvalitní výsledky při obrábění kompozitů s uhlíkovými vlákny.
PCD20		Stupeň je výbornou volbou pro univerzální účely. Má strukturu s velikostí zrna 10 μm .
PCD30		Hrubý stupeň s velikostí zrna 25 μm umožňuje obrábění velmi abrazivní obrobků, Doporučuje se také pro přerušované řezy.
PCD30 M		Tento univerzální druh stupně s unikátní kombinací zrn o velikostech 2 a 30 μm nabízí dobrou tepelnou stabilitu. Vhodnost pro obrábění bimetalů na bázi hliníkových slitin a šedé litiny.

3.6.2 Doporučené řezné podmínky Secomax PCD

Doporučené řezné podmínky řezných materiálů jsou uvedeny v tab. 3.28, tab. 3.29, tab. 3.30 a jsou zařazeny do materiálových skupin N, S, dle ISO 513.

Tab. 3.28 Řezné podmínky materiálů zařazených do skupiny N [40].

N				
Označení	Materiál	v_c [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	f [mm]	a_p [mm]
PCD05	MMC s 15÷30 % SiC (Al. matrice)	200÷800	0,1÷0,5	0,2÷3,0
PCD30				
PCD20	Al. slitiny s < 8 % Si	60÷3500	0,1÷0,4	0,2÷5,0
PCD20	Al. slitiny s 8÷15 % Si	450÷2500		
PCD30	Al. slitiny s >15 % Si	300÷1000		
PCD05				
PCD20	Měď, mosazy, bronzy	600÷1200	0,1÷0,5	0,2÷3,0
PCD20	Bimetal (Al / Šedá litina)	100÷500	0,08÷0,20	0,5÷1,0
PCD30M	Bimetal (Al / Slinutý kov)	100÷300		

Označení	Materiál	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]
PCD30 PCD30M	Slinutý karbid	10÷40	0,02÷0,20	0,1÷0,5

Tab. 3.29 Řezné podmínky materiálů zařazených do skupiny N [40].

S				
Označení	Materiál	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]
PCD05	Titanové slitiny	50÷300	0,1÷0,2	0,2÷0,5
PCD20				

Tab. 3.30 Řezné podmínky materiálů zařazených do skupiny N [40].

Ostatní materiály				
Označení	Materiál	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]
PCD20	Měkké plasty	100÷1500	0,10÷0,40	0,2÷3,0
PCD20 PCD05	GFRP	100÷800	0,05÷0,20	0,2÷2,0
PCD20	CFRP	400÷800	0,10÷0,20	0,2÷3,0
PCD20	Keramika	100÷600	0,10÷0,20	0,10÷2,0
PCD20	Uhlík	100÷1500	0,10÷0,20	0,2÷3,0

3.6.3 Základní charakteristika Secomax PCBN

Velmi široký sortiment pro obrábění kalených ocelí, tvrzených a šedých litin, spékaných kovů. Destičky jsou ve variantách s pájeným roubíkem KBN, vrstvené celistvé vrstvy KBN a i ve variantě z masivního KBN [40].

CBN050C - Monolitní, připájený roubík nebo laminovaná celistvá vrstva. Pro lehký nepřerušovaný až středně přerušovaný řez v kalených ocelích ($a_p < 0,5$ mm). Nový PVD povlak (Ti,Si)N pro vysokorychlostní obrábění.

CBN060K - Monolitní, připájený roubík nebo laminovaná celistvá vrstva. Pro lehký nepřerušovaný až středně přerušovaný řez v kalených ocelích ($a_p < 0,5$ mm). Nový PVD povlak (Ti,Si,Al)N pro vysokorychlostní obrábění. Nové výjimečné pojivo ze superslitiny.

CBN10 - Připájený roubík i nebo laminovaná celistvá vrstva (jednostranná). Pro lehký nepřerušovaný až středně přerušovaný řez v kalených ocelích ($a_p < 0,5$ mm).

CBN100 - Monolitní břitová destička Pro lehký nepřerušovaný až středně přerušovaný řez v kalených ocelích ($a_p < 0,5$ mm).

CBN150 - Připájený roubík nebo jednostranná laminovaná celistvá vrstva. Ideální volba pro dosažení vysoké jakosti povrchu. Alternativa k CBN10 a CBN100, houževnatější, ale s vyšší odolností vůči opotřebení. Pro přerušovaný řez v kalené oceli ($a_p < 0,5$ mm).

CBN160C - Připájený roubík nebo laminovaná jednostranná celistvá vrstva. Pro silně přerušovaný řez v kalené oceli ($a_p < 0,5$ mm). Nový PVD povlak (TiN, SiN) pro HSC obrábění.

CBN170 - Monolitní nebo připájené roubíky na oboustranné destičce. Pro nepřerušovaný řez s vysokou rychlostí v legovaných slitinách na bázi niklu. ($a_p < 0,5$ mm).

CBN200 - Monolitní, připájený roubík nebo laminovaná celistvá vrstva. Pro středně hrubé obrábění kalených ocelí ($a_p = 0,5-1,0$ mm). Pro dokončování a hrubování perlitické, tvrzené a bílé litiny. Vhodné pro obrábění spékaných materiálů načisto. Pro hrubování a dokončování práškových materiálů.

CBN300(P) - Monolitní břitová destička pro hrubování kalených ocelí, dokončování a hrubování manganových ocelí. Pro dokončování a hrubování perlitické, tvrzené a bílé litiny. Je možná i povlakovaná varianta (PVD) na bázi (TiN, AlN) + TiN. U povlakovaných destiček je zaručena vyšší trvanlivost, snazší posouzení opotřebení břitu.

CBN350 - Monolitní břitová destička. Třída s vyšší houževnatostí než CBN300 - menší míra vylamování a odlupování řezné hrany v agresivních materiálech. Vhodná pro hrubování kalených ocelí, dokončování a hrubování manganových ocelí. Pro dokončování a hrubování tvrzené a bílé litiny.

CBN400C - Monolitní břitová destička s jemnozrnnou strukturou a vysokým podílem CBN, pro obrábění perlitické šedé litiny. Nový PVD povlak na bázi (TiN, SiN).

3.6.4 Doporučené řezné podmínky Secomax PCBN

Doporučené řezné podmínky řezných materiálů jsou uvedeny v tab. 3.24, tab. 3.25, tab. 3.26 a jsou zařazeny do materiálových skupin N, H, K dle ISO 513.

Tab. 3.31 Řezné podmínky materiálů zařazených do skupiny K [40].

K				
Pelitická šedá litina				
Označení	Druh operace	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]
CBN100	Dokončování	50÷200	0,1÷0,4	až 0,5
CBN200		300÷1000	0,1÷0,5	
CBN300		500÷2000	0,1÷0,6	
CBN400C				
CBN200	Hrubování	400÷1000	0,2÷0,8	0,5÷3,0
CBN300		500÷1500		
Bílá (tvrzená) litina (tvrdość 570÷900 HV)				
CBN200	Dokončování	50÷85	0,05÷0,40	až 0,5
CBN300		50÷125		
CBN350		35÷125		
CBN200	Hrubování	50÷85	0,20÷1,00	0,2÷3,0
CBN300		50÷125		
CBN350		35÷125		

Tab. 3.32 Řezné podmínky materiálů zařazených do skupiny H [40].

H				
Povrchově kalená ocel (tvrdość 55÷62 HRC)				
Označení	Druh operace	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]
CBN10	Dokončování	110÷200	0,00÷0,20	až 0,5
CBN100				
CBN050C		140÷200	0,01÷0,24	
CBN060K		100÷200	0,04÷0,25	
CBN150		60÷200	0,00÷0,25	
CBN160C		110÷200	0,00÷0,25	

Kalené oceli (tvrdość 45÷65 HRC)				
CBN100	Dokončování	100÷180	0,00÷0,15	až 0,5
CBN050C		140÷250	0,00÷0,20	
CBN150		60÷150		
CBN160C		130÷180		
CBN200	Hrubování	50÷130	0,05÷0,22	0,5÷3,0
CBN300			0,10÷0,30	

Tab. 3.33 Řezné podmínky materiálů zařazených do skupiny P [40].

P				
Manganové oceli (12÷20% Mn)				
Označení	Druh operace	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]
CBN300	Dokončování	120÷130	0,1÷0,6	až 0,5
CBN350		70÷200		
CBN300	hrubování	110÷190	0,2÷0,6	0,5÷3,0
CBN350		80÷180		
Sintrované oceli (např. sedla ventilů)				
CBN10	Dokončování	100÷300	0,08÷0,17	až 0,5
CBN100			0,04÷0,18	
CBN200				
Vysoce legované oceli na bázi niklu (např. Inconel 718)				
CBN10	Dokončování	290÷400	0,10÷0,25	až 0,5
CBN100			0,12÷0,27	
CBN170				

4 DOPORUČENÉ PRACOVNÍ PODMÍNKY PRO EFEKTIVNÍ VYUŽITÍ SUPERTVRDÝCH ŘEZNÝCH MATERIÁLŮ

4.1 Vzájemné porovnání vybraných výrobců materiálů podle druhu obráběného materiálu

Řezné podmínky jsou porovnávány v jednotlivých materiálových skupinách N, H, K, S. Porovnání je v tabulkách 4.1, tab. 4.2, tab. 4.3, tab. 4.4 je u nich uvedeno značení daných řezných materiálů.

Tab. 4.1 Porovnání řezných podmínek jednotlivých výrobců pro materiálovou skupinu N.

CFRP, GFRP, Plasty		Rozsahy pracovních řezných podmínek		
Výrobce	Označení	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]
Becker Diamantwerkzeuge GmbH	TFC PD, PDC DP, PDC-SP, PDC-CU-SDP	100÷1000	0,05÷0,20	0,01÷2,50
Element Six	CMX850, CTM320, CDM, CDE	200÷1000	0,1÷0,2	0,2÷3,0
Mitsubishi C.	MD220	100÷1000	max. 0,4	max. 2,0
Seco Tools AB	PCD20, PCD05	100÷1500	0,1÷0,2	0,2÷3,0

Tab. 4.2 Porovnání řezných podmínek jednotlivých výrobců pro materiálovou skupinu H.

Kalená ocel		Rozsahy pracovních řezných podmínek		
Výrobce	Označení	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]
Becker Diaman- twrkzeuge GmbH	PBC-255, PBC-405, SBC-25C, SBC-40C	100÷220	0,08÷0,20	0,02÷0,40
Element Six	DBC50, DCC500, DCN450, DCX650, DBW85, DBS900	90÷300	0,025÷0,500	0,05÷0,3
Mitsubishi C.	MBC010, MBC020, MBC8025, MB835	50÷400	max. 0,3	max. 0,5
CeramTec	WXM155, WXM255, WXM355, WXM455,	120÷220	0,1÷0,35	0,1÷0,5
Sandvik	CB7015, CB7025, CB20, CB7035, CB7525, CB50	80÷350	0,05÷0,40	-
Seco Tools AB	CBN10, CBN100, CBN050C, CBN150, CBN060K, CBN200, CBN160C, CBN300	50÷200	0,01÷0,3	až 0,5

Tab. 4.3 Porovnání řezných podmínek jednotlivých výrobců pro materiálovou skupinu N.

Hliníkové slitiny		Rozsahy pracovních řezných podmínek		
Výrobce	Označení	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]
Becker Diaman- twrkzeuge GmbH	TFC PD, PDC DP, PDC-SDP, PDC- CU-SDP	100÷2500	0,05÷0,40	0,05÷5,50
Element Six	CMX850, CTB010, CTB 010, CTM320, CDM, CDE	200÷5000	0,1÷0,5	0,1÷4,0
Mitsubishi C.	MD220	200÷1500	max. 0,2	max. 3,0
Sandvik	CD10, CD1810	95÷2500	0,05÷0,80	-
Seco Tools AB	PCD30, PCD20 PCD05,	60÷3500	0,1÷0,5	0,2÷5,0

Tab. 4.4 Porovnání řezných podmínek jednotlivých výrobců pro materiálovou skupinu K.

Tvrzená litina		Rozsahy pracovních řezných podmínek		
Výrobce	Označení	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]
Element Six	DBW85, DBS900, AMB90	60÷100	0,1÷0,2	0,2÷0,5
CeramTec	WBN115, WBN100, WBN120,	100÷250	0,1÷0,4	1÷3
Sandvik	CB7925, CB7525, CB50	120÷180	0,1÷0,4	-
Seco Tools AB	CBN200, CBN300, CBN350	35÷125	0,05÷1,00	0,2÷3,0

Tab. 4.5 Porovnání řezných podmínek jednotlivých výrobců pro materiálovou skupinu K.

Šedá litina		Rozsahy pracovních řezných podmínek		
Výrobce	Označení	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]
Becker Diaman- twrkzeuge GmbH	PBC-10S, PBC-15S	300÷2500	0,02÷0,35	0,05÷0,70
Element Six	DBW85, DBS900, AMB90	700÷1300	0,5÷2,0	2÷5
Mitsubishi C.	MBC140, MB710, MB730	500÷1500	max. 0,5	max. 5
CeramTec	WBN115, WBN105, WBN100, WBN120, WBN750	60÷1800	0,1÷0,7	0,25÷4,00
Sandvik	CB7925, CB7525, CB50	890÷1700	0,1÷0,4	-
Seco Tools AB	CBN100, CBN200, CBN300, CBN400C	50÷2000	0,1÷0,8	0,5÷3,0

Tab. 4.6 Porovnání řezných podmínek jednotlivých výrobců pro materiálovou skupinu S.

Žáropevné slitiny, Niklové slitiny		Rozsahy pracovních řezných podmínek		
Výrobce	Označení	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]
Becker Diaman- twrkzeuge GmbH	PDC-10S, PDC-15S	200÷500	0,08÷0,25	0,05÷0,7
Element Six	DCC500, DCX650, DBW85, DBS900	200÷480	0,1÷0,3	0,3÷2,0
Mitsubishi C.	MB730	100÷150	max. 0,2	max. 0,5
Seco Tools AB	CBN10, CBN100, CBN170	290÷420	0,1÷0,27	max. 0,5

4.2 Shrnutí zjištěných poznatků supertvrdých materiálů

Pro dané materiály se provedlo shrnutí řezných podmínek daným výrobců nástrojů:

Pro materiálovou skupinu **K**, lze obrábět materiál s řeznými podmínkami uváděné producenty řezných materiálů v tomto rozsahu:

Šedá litina

- řezná rychlost $v_c = 50 \div 2500$ m.min⁻¹,
- posuv na otáčku $f = 0,02 \div 2,00$ mm,
- šířka záběru ostří $a_p = 0,05 \div 5,00$ mm,

Tvrzená litina

- řezná rychlost $v_c = 35 \div 250$ m.min⁻¹,
- posuv na otáčku $f = 0,05 \div 1,00$ mm,
- šířka záběru ostří $a_p = 0,2 \div 3,0$ mm.

Pro materiálovou skupinu **H**, lze obrábět materiál s řeznými podmínkami uváděné producenty řezných materiálů v tomto rozsahu:

Kalená ocel max. tvrdost 65 HRC

- řezná rychlost $v_c = 50 \div 400$ m.min⁻¹,
- posuv na otáčku $f = 0,01 \div 0,50$ mm,
- šířka záběru ostří $a_p = 0,02 \div 0,5$ mm,

Pro materiálovou skupinu N, lze obrábět materiál s řeznými podmínkami uváděné producenty řezných materiálů v tomto rozsahu:

Hliníkové slitiny

- řezná rychlost $v_c = 60 \div 5000 \text{ m.min}^{-1}$,
- posuv na otáčku $f = 0,05 \div 0,80 \text{ mm}$,
- šířka záběru ostří $a_p = 0,05 \div 5,5 \text{ mm}$,

Plasty, CFRP, GFRP

- řezná rychlost $v_c = 100 \div 1500 \text{ m.min}^{-1}$,
- posuv na otáčku $f = 0,05 \div 0,40 \text{ mm}$,
- šířka záběru ostří $a_p = 0,01 \div 3,0 \text{ mm}$,

Pro materiálovou skupinu S, lze obrábět materiál s řeznými podmínkami uváděné producenty řezných materiálů v tomto rozsahu:

Žáropevné slitiny, Niklové slitiny

- řezná rychlost $v_c = 100 \div 500 \text{ m.min}^{-1}$,
- posuv na otáčku $f = 0,08 \div 0,30 \text{ mm}$,
- šířka záběru ostří $a_p = 0,05 \div 2,0 \text{ mm}$.

Ze zjištěných řezných podmínek a použitelnosti pro dané materiály. Nachází supertvrde materiály široké uplatnění v operacích jako například ve vysoko produktivním HSC obrábění. Nízkou rozšířenost těchto nástrojů asi kolem 4 % světové produkce [8], je zapříčiněno převážně jejich výrazně vysokou cenou, oproti konvenčním nástrojům (RO,ŘK, SK).

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá supertvrdými řeznými materiály, mezi něž patří materiály na bázi syntetického diamantu a kubického nitridu boru. O těchto materiálech pojednává z hlediska jejich mechanických vlastností, výroby a efektivního využití v oblasti obrábění těžko obrábitelných materiálů. Supetvrde řezné materiály se používají pro vysoce produktivní obrábění tvrdých a vysoce abrazivních materiálu jako: kalené oceli, litiny, hliníkové slitiny s abrazivním křemíkem, vláknové vyztužené kompozity, plasty, sklo a těžko obrábitelné niklové a titanové slitiny. Kvůli stále větší míře používání těchto technických materiálů, se stává řezný materiál vysoce efektivní a nachází uplatnění v oblasti leteckého a automobilového průmyslu.

V praktické části této práce je zhodnocen současný sortiment světových výrobců supertvrdých řezných nástrojů (Becker, Element 6, Mitshubishi, CeramTec, Sandvik Coromant a Seco Tools). Dále jsou porovnány jejich řezné podmínky pro dané materiálové skupiny dle ISO 513, pomocí uspořádání daných doporučených řezných parametrů do tabulek. Tímto systémem se vytvořil přehled efektivního použití supertvrdých materiálů pro dané technické materiály. Hodnoty řezných podmínek (v_c , f , a_p) se u jednotlivých výrobců mezi sebou příliš neliší. Některé rozdílné výkyvy jsou dány dalšími pracovními podmínkami (zda je jedná o dokončovací, hrubovací operace, plynulý nebo přerušovaný řez), které někteří výrobci ve svých materiálech nezohledňují. Zpracované řezné podmínky potvrzují (v porovnání s konvenčními materiály SK, RO, ŘK), že se tyto materiály dají efektivně použít pro vysoce produktivní metody obrábění.

Tyto řezné materiály jsou v neustálém vývoji a výrobci nástrojů neustále nástroje zdokonalují. Svým novými přínosy tak přispívají například k ekonomičtější výrobě řezných destiček. Mezi tyto přínosy patří např: sandwich konstrukce, výroba CVD celistvých vrstev, povlakování destiček ze slinutých karbidů. Tento sortiment se stává pro zákazníky cenově přijatelnější, a lépe se tak sortiment rozšiřuje mezi zákazníky.

Hlavním vývojem ve vylepšování řezných nástrojů je zkvalitnění samotného řezného procesu, to je docíleno úpravami geometrií řezných destiček. Mezi ně patří především hladící geometrie WIPER, Drawn cut, a různé 3D lamače třísek, které vytváří velmi kvalitní obrobené plochy, které nepotřebují žádné další dokončovací operace. Další vývoje se představují v samotné struktuře řezných materiálů (např. nekovová pojiva pro PKD, nanodiamanty), kdy správným vyvážením struktury se dá dosáhnout lepší trvanlivosti nástrojů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. BECKER DIAMANTWERKZEUGE GmbH, Germany. *PBN - Katalog*. [online]. [vid. 2012-04-24]. Dostupné z: http://www.beckerdiamant.de/files/cbn-katalog_web_dt.pdf.
2. BECKER DIAMANTWERKZEUGE GmbH, Germany. *PKD - Katalog*. [online]. [vid. 2012-04-24]. Dostupné z: http://www.beckerdiamant.de/files/pkd-katalog_web_dt.pdf.
3. CERAMTEC GmbH, Ebersbach, Germany. *SPK HD-LINE*. [online]. [vid. 2012-04-13]. Dostupné z: <http://www.ceramtec.com/spk-cutting-materials/hd-line/>.
4. CERAMTEC GmbH, Ebersbach, Germany. *PCBN for Cast Iron Machining*. [online]. [vid. 2012-04-13]. Dostupné z: <http://www.ceramtec.com/spk-cutting-materials/hd-line/>.
5. CONVERTER- *Převody jednotek*. [online]. [vid. 2012-02-02]. Dostupné z: www.converter.cz/tabulky/tvrdost-mohs.htm.
6. DENKA – ELEKTRONIC MATERIALS DIVISION. [online]. [vid. 2012-04-25]. Dostupné z: <http://www.denka.co.jp/eng/denzai/product/17.html>.
7. DIAMONDS INTERNATIONAL CORPORATION. *Vznik diamantů*. [online]. [vid. 2012-02-02]. Dostupné z: <http://dicholding.com/cz/diamant/obecne-informace>
8. DILLINGER, Josef a kol.. *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. 1. vyd. Praha: Europa - Sobotáles, 2007. 608 s. ISBN 978-80-86706-19-1.
9. ELEMENT SIX - *Materials & products* [online]. [vid. 2012-02-10]. Dostupné z: http://www.e6.com/wps/wcm/connect/E6_Content_EN/Home/Materials+and+products/PCD/.
10. ELEMENT SIX Ltd., Shannon Airport, Co. Clare, Ireland. *Diamond tool materials for metalworking*. [online]. [vid. 2012-04-24]. Dostupné z: <http://www.e6.com/wps/wcm/connect/8a5fd172-7cf9-4666-90bc525bfeba1803/Diamond+metalworking.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=8a5fd172-7cf9-4666-90bc-525bfeba1803>.
11. ELEMENT SIX Ltd., Shannon Airport, Co. Clare, Ireland. *PCD for metalworking*. [online]. [vid. 2012-04-13]. Dostupné z: <http://www.e6.com/wps/wcm/connect/d49add5-6bcc-4bda-bac5-2baeec148546/PCD+metalworking+MSDS.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=d49add5-6bcc-4bda-bac5-2baeec148546>.
12. FOREJT, M. PÍŠKA, M. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.2.
13. FIALA, S., KOUŘIL, K., *Nová generace průmyslového diamantu*. MM – Průmyslové spektrum. 9/2010. s. 106. ISSN 0920-2572.
14. HAHN-KOLB – Katalog ATORN, [online]. [vid. 2012-04-25]. Dostupné z: <http://www.hahn-kolb.cz>. HAHN-KOLB – Katalog ATORN, [online]. [vid. 2012-04-25]. Dostupné z: <http://www.hahn-kolb.cz>.
15. HUMÁR, A. *Technologie I – Technologie obrábění -1. část* [online]. [vid. 2012-01-05]. Studijní opory. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003, 138s. Dostupné z: http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/technologie_obrabeni_1.pdf.

16. HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM Publishing, s.r.o., 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
17. HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje* [online]. Interaktivní multimediální text pro všechny studijní programy FSI. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2006 [vid. 2012-02-02], 192 s. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory_save/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf.
18. HU, M., JIA, X., YAN, B., LI, Y., ZHU, C., MA, H., Understanding of the shape-controlled synthesis of strip shape diamond under high pressure and high temperature conditions, [online]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, r. 30, č. 1, (2012), s. 85-90, [vid. 2012-03-24]. ISSN 0263-4368, Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263436811001247>.
19. JIANXIN, D., HUI, Z., ZE, W., Friction and wear behavior of polycrystalline diamond at temperatures up to 700 °C, [online]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Volume 29, Issue 5, (2011), Pages 631-638, [vid. 2012-05-14]. ISSN 0263-4368, Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263436811000837>.
20. KURZ GEOLOGIE. *Kapitola 6: Činnost člověka ve vztahu k životnímu prostředí*. [online]. [vid. 2012-04-13]. Dostupné z: <http://kurz.geologie.sci.muni.cz/kapitola6.htm>.
21. KURT, A., ŠEKER, U., The effect of chamfer angle of polycrystalline cubic boron nitride cutting tool on the cutting forces and the tool stresses in finishing hard turning of AISI 52100 steel, [online]. *Materials & Design*, r. 26, č. 4, (2005), s. 351-356, [vid. 2012-05-01]. ISSN 0261-3069. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306904001621>.
22. Lv, R., Liu, J., Li, Y., Li, S., Kou, Z., He, D., High pressure sintering of cubic boron nitride compacts with Al and AlN, [online]. *Diamond and Related Materials*, r. 17, č. 12, (2008), s. 2062-2066, [vid. 2012-04-24]. ISSN 0925-9635. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092596350800383X>.
23. LIU, X.B., MA, H.-A., ZHANG, Z.-F., Effects of zinc additive on the HPHT synthesis of diamond in Fe–Ni–C and Fe–C systems, [online]. *Diamond and Related Materials*, r. 20, č. 4, (2011), s. 468-474, [vid. 2012-04-24]. ISSN 0925-9635. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925963511000252>.
24. MITSUBISHI CARBIDE, Japonsko. *CBN Turning Inserts*. [online]. [vid. 2012-04-13]. Dostupné z: http://www.mitsubishicarbide.com/EU/West/product/pdf/c_n_other/c004e-b_cbn_pcd_turning_inserts.pdf.
25. MITSUBISHI CARBIDE, Japonsko. *PCD Turning Inserts*. [online]. [vid. 2012-04-13]. Dostupné z: http://www.mitsubishicarbide.com/EU/West/product/pdf/c_n_other/c004e-b_cbn_pcd_turning_inserts.pdf.
26. MITROWSKI DIAMONDS.CZ- *Gemologie* [online]. [vid. 2012-02-02]. Dostupné z: <http://www.diamonds.cz/Gemologie.html>.
27. MINERALOGICAL SOCIETY AMERICA – The Knoop microhardness tester as a mineralogical tool. [online]. [vid. 2012-02-02]. Dostupné z: http://www.minsocam.org/MSA/collectors_corner/arc/knoop.htm.

28. OLIVEIRA, A., DINIZ, E., URSOLINO, D. Hard turning in continuous and interrupted cut with PCBN and whisker-reinforced cutting tools. [online]. *Materials & Design*, (2009), č. 209, s. 5262-5270 [vid. 2012-05-13]. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013609001022>.
29. PALYANOV, Y., BORZDOV, Y., High-pressure synthesis and characterization of diamond from a sulfur-carbon system, [online]. *Diamond and Related Materials*, r. 10, č. 12, (2001) s. 2145-2152, [vid. 2012-04-24]. ISSN 0925-9635, Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925963501004940>.
30. PIERSON, H.-O., *Handbook of Carbon, Graphite, Diamond and Fullerenes - Properties, Processing and Applications*. William Andrew Publishing/Noyes. 1993. 399 s. ISSN 978-0-8155-1339-1.
31. PÍŠKA, M. et al. *Speciální technologie obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
32. PROKOP, J. Přednáška z předmětu: *Vybrané statě z obrábění*. Téma: *Integrita povrchu*. FSI VUT Brno, 2012.
33. Přírodovědecká fakulta Masarykova univerzita, Brno. *Multimediální studijní texty z mineralogie pro bakalářské studium* [online]. [vid. 2012-02-04]. Dostupné z: http://mineralogie.sci.muni.cz/kap_7_2_prvky/obrazek72_39.htm.
34. QIAN, J., McMURRAY, C.-E., MUKHOPADHYAY, D.-K., WIGGINS, J.-K., Polycrystalline diamond cutters sintered with magnesium carbonate in cubic anvil press, [online]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, č. 31, (2012), s. 71-75, [vid. 2012-05-04]. ISSN 0263-4368. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026343681100165X>.
35. QIAN L., HOSSAN, M.-R., Effect on cutting force in turning hardened tool steels with cubic boron nitride inserts, [online]. *Journal of Materials Processing Technology*, č. 191, (2007), s. 274-278 [vid. 2012-05-15]. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013607002452>.
36. SANDVIK COROMANT AB - SANDVIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění - Kniha pro praxi*. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha. Scientia, s. r. o., 1997. ISBN 91-97 22 99-4-6. Překlad z: *Modern Metal Cutting - A Practical Handbook*.
37. SANDVIK COROMANT AB, Sandviken, Sweden. *Main catalogue 2008 Czech*.
38. SATO, K., Drastic effect of Mo on diamond nucleation in the system of MgCO₃-CaCO₃-graphite at 7.7 GPa, [online]. *Journal of Crystal Growth*, r. 210, č. 4, (2000), s. 623-628, [vid. 2012-05-04]. ISSN 0022-0248. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022024899007642.24>.
39. SATOH, T., HARANO, K., SUMIYA, H. Cutting performance of nano-polycrystalline diamond, [online] *Diamond and Related Materials*, r. 24, (2012), s. 78-82, [vid. 2012-04-24]. ISSN 0925-9635, Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925963511003608>.
40. SECO TOOLS AB, Fagersta, Sweden. Update 2010 [online]. [vid. 12. května 2011]. Dostupné z: http://www.secotools.com/CorpWeb/Service_Support/machining_navigator/2010/update_2010/Update_2010_Complete_CZ.pdf.

41. SCHWARZ, J., METEVA, K., GRIGAT, A., Synthesis of diamond coatings on tungsten carbide with photon plasmatron, [online]. *Diamond and Related Materials*, r. 14, č. 3–7,(2005), s. 302-307, [vid. 2012-04-25]. ISSN 0925-9635. Dostupné z:<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925963504003656>.
42. SPŠ strojnická Olomouc- *Zkoušky tvrdosti*. [online]. [vid. 2012-02-02]. Dostupné z: http://www.spssol.cz/~vyuka/TRIDY/4.C/SPS/Zkousky_tvrdosti.pdf
43. SUMIYA, H., SATOH, S., Synthesis of polycrystalline diamond with new non-metallic catalyst under high pressure and high temperature, [online]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, r. 17, č. 5, (1999), s. 345-350, [vid. 2012-03-24]. ISSN 0263-4368. Dostupné z: (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263436899000190>)
44. SUMIYA, H., HARANO, K., Distinctive mechanical properties of nano-polycrystalline diamond synthesized by direct conversion sintering under HPHT, [online]. *Diamond and Related Materials*, r. 24, (2012). s. 44-48, [vid. 2012-04-24]. ISSN 0925-9635, Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925963511003323>.
45. TECHNET.CZ - Vesmír a věda - Ten "ošklivý" oxid uhličitý může být užitečný, vyrábí z něj diamanty, [online]. [vid. 2012-04-24]. Dostupné z: http://technet.idnes.cz/ten-osklivy-oxid-uhlicity-muze-byt-uzitecny-vyrabi-z-nej-diamanty-10u /veda.aspx?c=A110520_140149_veda_mbo.
46. WHITNEY, E.-D., *Ceramic Cutting Tools*. William Andrew Publishing/Noyes. 1994. 357 s. ISSN 978-0-8155-1355-1.
47. WTOCD - *Fundamenteel Onderzoek* [online]. [vid. 2012-02-02]. Dostupné z: http://www.hrdresearch.be/nl/Fundamental/fundamental_research.html.
48. Yang, D., Ji, X., Liu, H., Li, Y., Zhang, T., Zhu, P., The influence of Li-based catalysts/additives on cBN crystal morphologies synthesized under HPHT, [online]. *Diamond and Related Materials*, r. 20, č. 2,(2011), s. 174-177, [vid. 2012-04-24]. ISSN 0925-9635. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925963510003341>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
SK	[-]	slinutý karbid
cBN, CBN, KNB	[-]	Kubický nitrid boru
CVD	[-]	Chemical vapor deposition
HRA	[-]	tvrdost dle Rockwella
HSC	[-]	High speed cutting
HRC	[-]	tvrdost dle Rockwella
HK	[-]	tvrdost dle Knoop
PVD	[-]	Physical Vapour Deposition
PCD, PKD	[-]	Polykrystalický diamant
SEM	[-]	Scan elektron microscope
VBD	[-]	Vyměnitelná břitová destička
WC	[-]	Karbid wolframu

Symbol	Jednotka	Popis
a_p	[mm]	Šířka záběru ostří
f	[mm]	posuv
R_a	[μm]	střední aritmetická hodnota drsnosti
R_q	[μm]	střední kvadratická hodnota drsnosti
v_c	[m.min ⁻¹]	řezná rychlost

SEZNAM PŘÍLOH

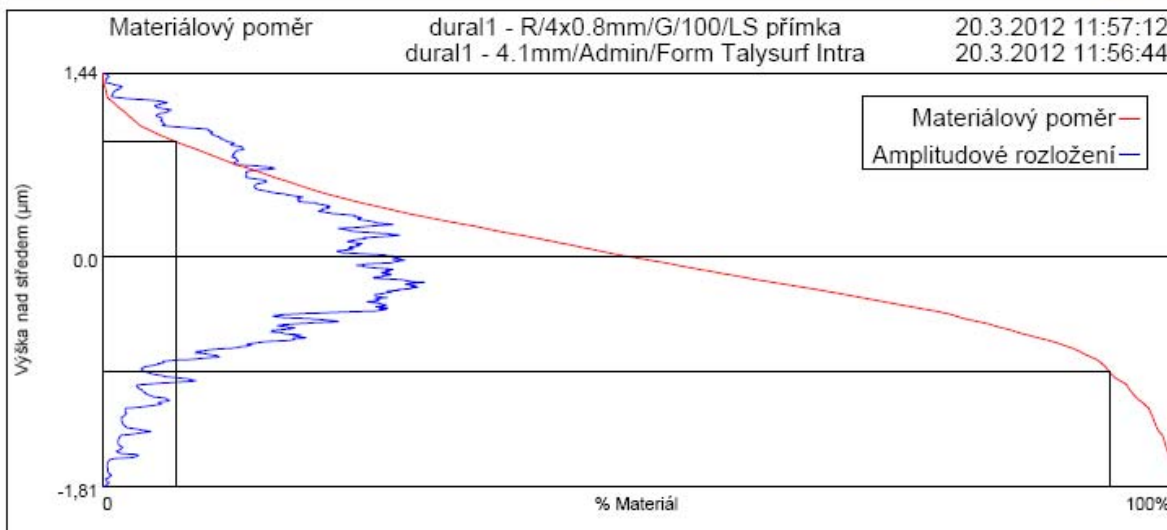
Příloha 1 Výstupy z měřicího zařízení TAYLOR-HOBSON Talysurf Intra, pro určování profilu povrchu zkušebního vzorku z duralové slitiny.

Příloha 2 Výstupy z měřicího zařízení TAYLOR-HOBSON Talysurf Intra, pro určování profilu povrchu zkušebního vzorku z kalené oceli.

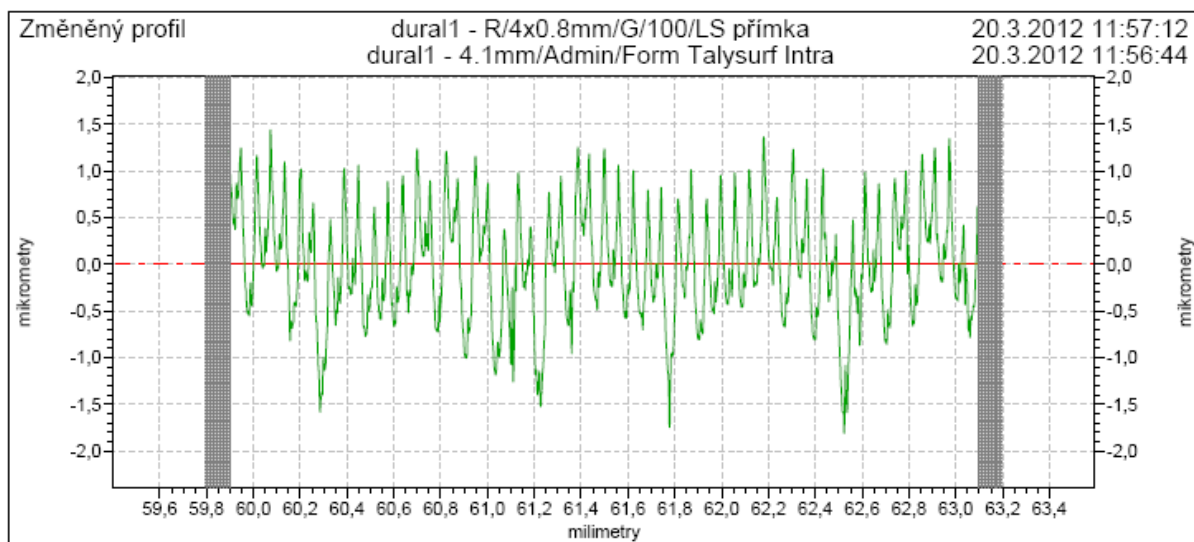
PŘÍLOHA 1 (1/6)

Výstupy z měřicího zařízení TAYLOR-HOBSON Talysurf Intra, pro určování profilu povrchu zkušební vzorku z duralové slitiny, obráběného při posuvu $f_1 = 0,0610$ mm.

5.12.8.29



Upper Cursor		Band		Lower Cursor	
Uroveň	0,90 μm	Pásmo/Htp	1,81 μm	Uroveň	-0,91 μm
mr 1%	6,8 %	Delta mr%	87,0 %	mr 2%	93,9 %
HSC	26 výstupků	Počet výstupků	22 výst/cm	HSC	8 výstupků

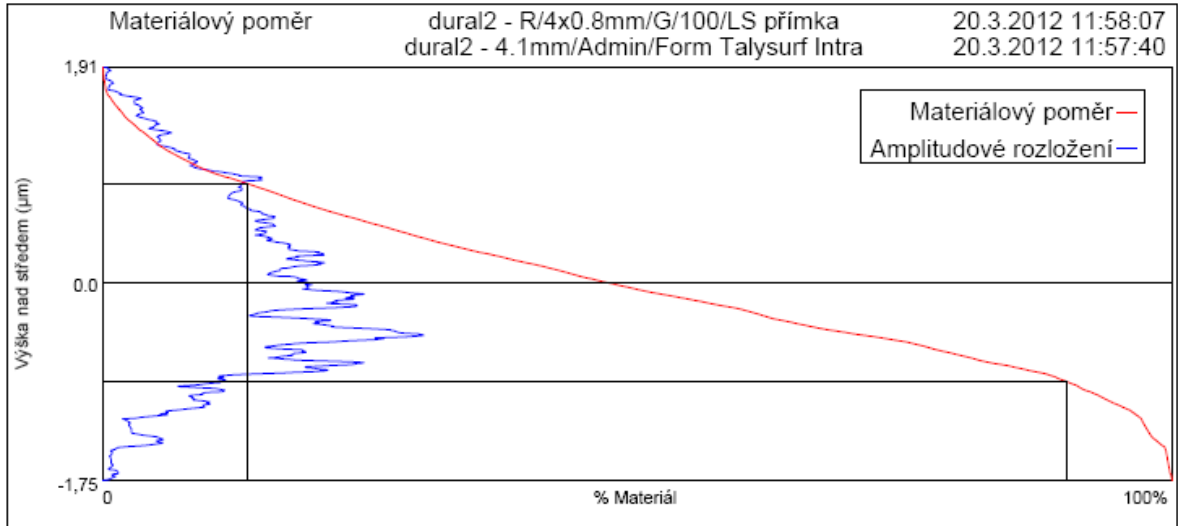


Ra	0.4701 μm	Rq	0.5835 μm		
Rsk	-0.1141 μm	Rv	1.6633 μm		
Rp	1.3498 μm	Rt	3.2457 μm	Rmr(c)	48,93 %
				Výška (str. hod.)	0.000 μm
		Rz	3.0130 μm		
		Rc	1.6253 μm		

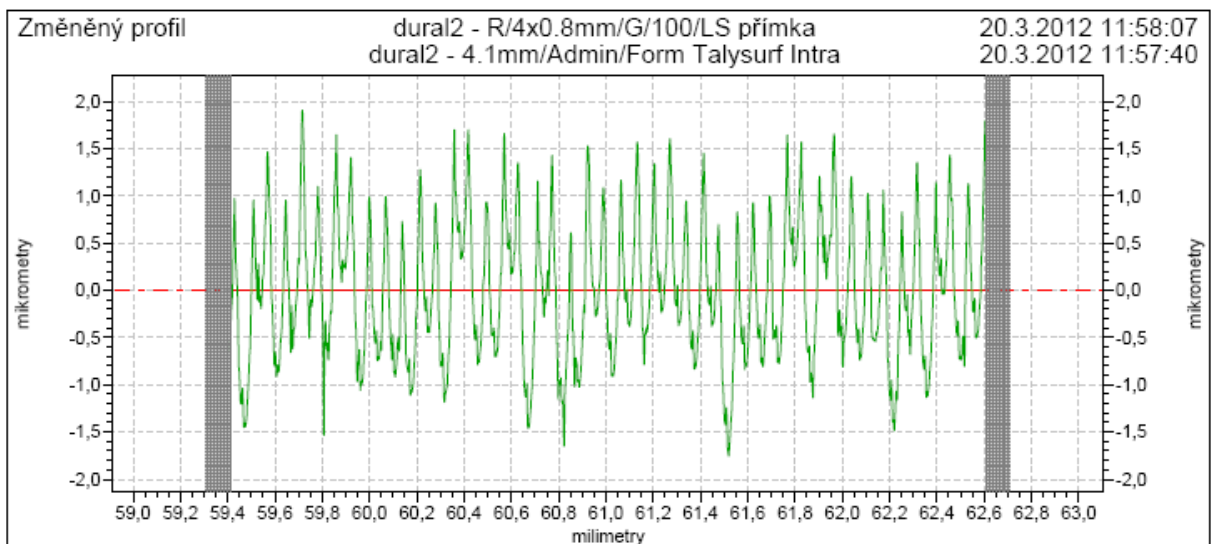
PŘÍLOHA 1 (2/6)

Výstupy z měřicího zařízení TAYLOR-HOBSON Talysurf Intra, pro určování profilu povrchu zkušební vzorku z duralové slitiny, obráběného při posuvu $f_2 = 0,0700$ mm.

5.12.6.29



Upper Cursor		Band		Lower Cursor	
Uroveň	0,87 µm	Pásmo/Htp	1,75 µm	Uroveň	-0,88 µm
mr 1%	13,5 %	Delta mr%	76,6 %	mr 2%	90,1 %
HSC	34 výstupků	Počet výstupků	41 výst/cm	HSC	14 výstupků

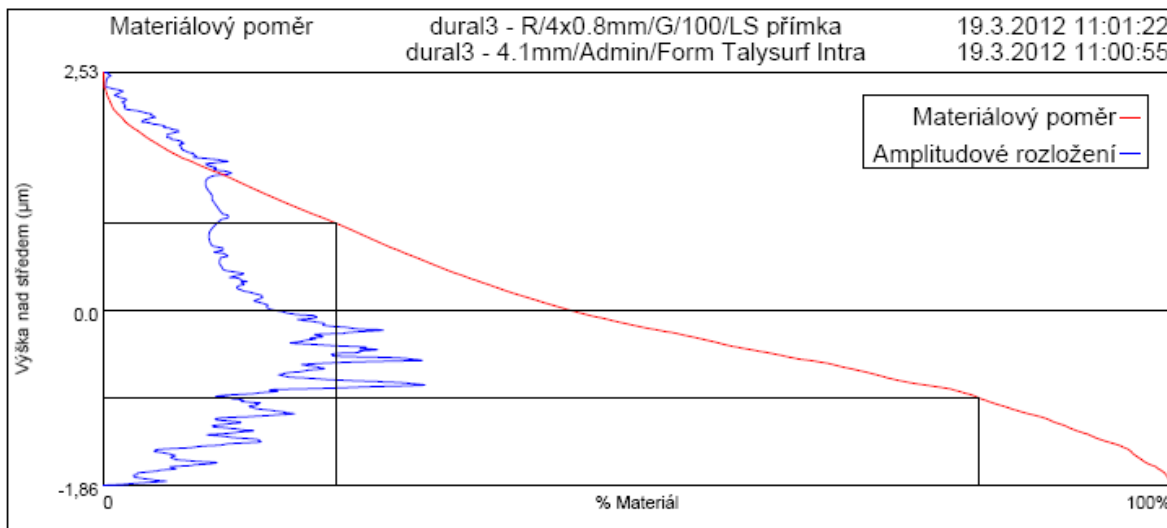


Ra	0,5916 µm	Rq	0,7144 µm		
Rsk	0,2004 µm				
Rp	1,7819 µm	Rv	1,6058 µm	Rm(c)	47,03 %
		Rt	3,6814 µm	Výška (stř. hod.)	0,000 µm
		Rz	3,3677 µm		
		Rc	2,0435 µm		

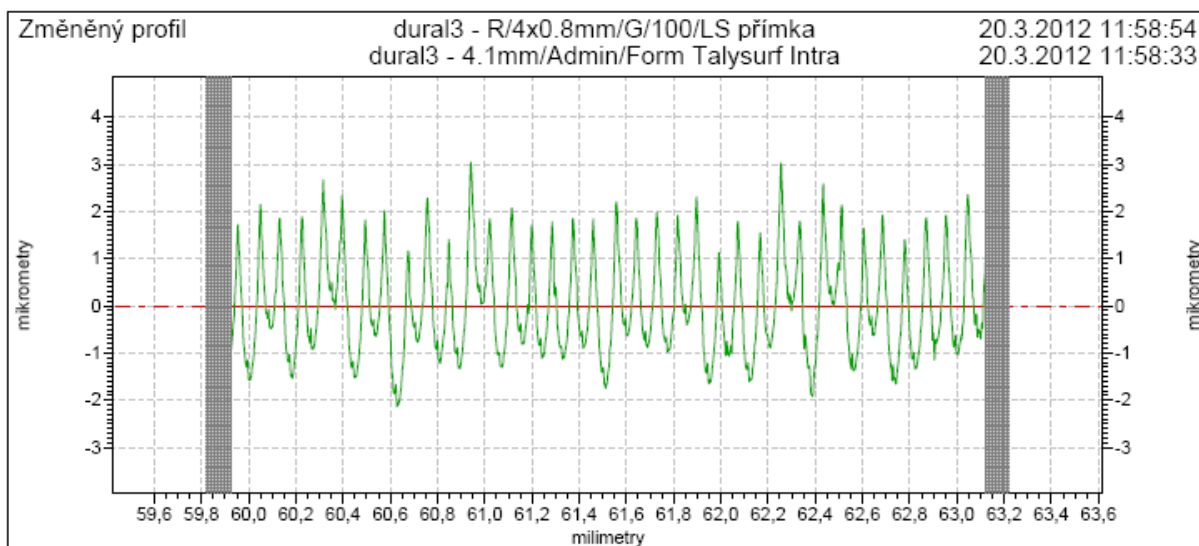
PŘÍLOHA 1 (3/6)

Výstupy z měřicího zařízení TAYLOR-HOBSON Talysurf Intra, pro určování profilu povrchu zkušební vzorku z duralové slitiny, obráběného při posuvu $f_3 = 0,0880$ mm.

5.12.8.29



Upper Cursor		Band		Lower Cursor	
Uroveň	0,92 µm	Pásmo/Htp	1,85 µm	Uroveň	-0,93 µm
mr 1%	21,7 %	Delta mr%	59,9 %	mr 2%	81,7 %
HSC	36 výstupků	Počet výstupků	59 výst/cm	HSC	17 výstupků

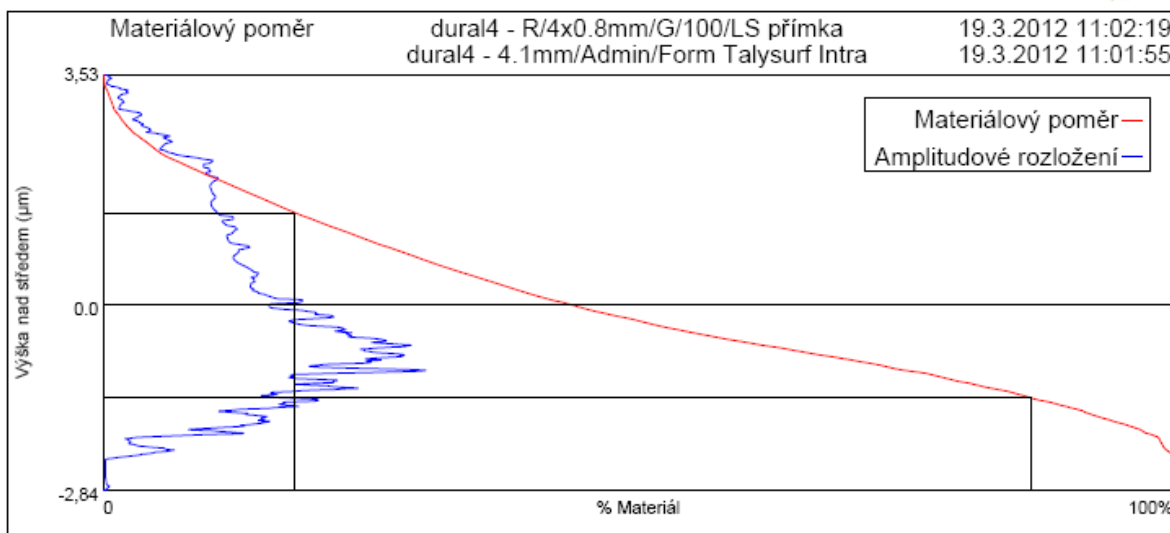


Ra	0,8530 µm	Rq	1,0253 µm		
Rsk	0,4314 µm				
Rp	2,8284 µm	Rv	1,8604 µm	Rmr(c)	45,51 %
		Rt	5,1729 µm	Výška (str. hod.)	0,000 µm
		Rz	4,6858 µm		
		Rc	3,1138 µm		

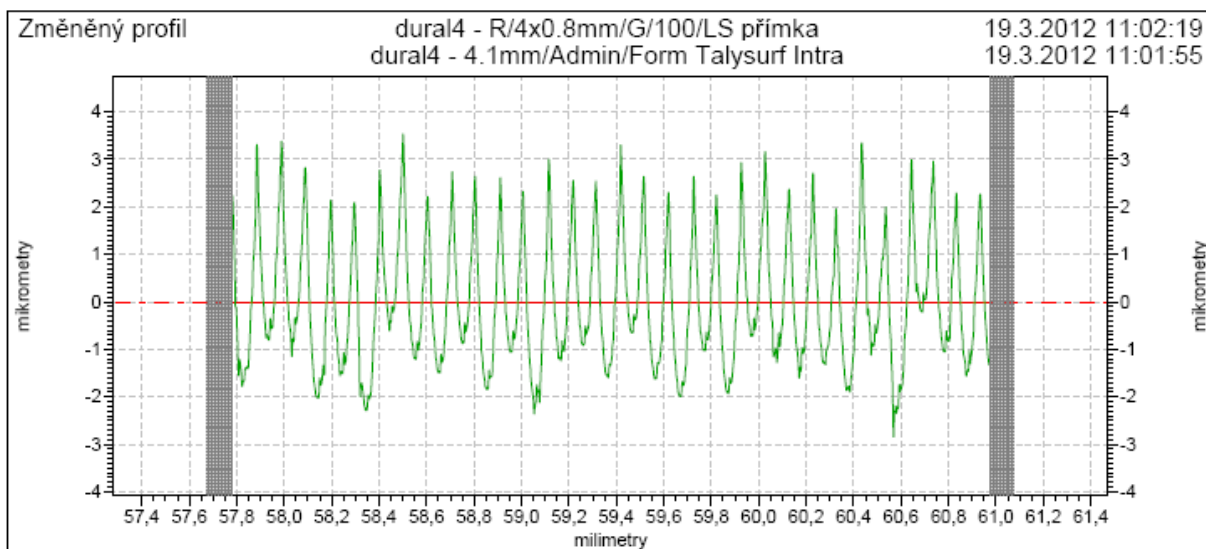
PŘÍLOHA 1 (4/6)

Výstupy z měřicího zařízení TAYLOR-HOBSON Talysurf Intra, pro určování profilu povrchu zkušební vzorku z duralové slitiny, obráběného při posuvu $f_4 = 0,1000$ mm.

5.12.6.29



Upper Cursor		Band		Lower Cursor	
Úroveň	1,41 µm	Pásmo/Htp	2,84 µm	Úroveň	-1,42 µm
mr 1%	17,8 %	Delta mr%	68,5 %	mr 2%	86,3 %
HSC	31 výstupků	Počet výstupků	47 výst/cm	HSC	12 výstupků

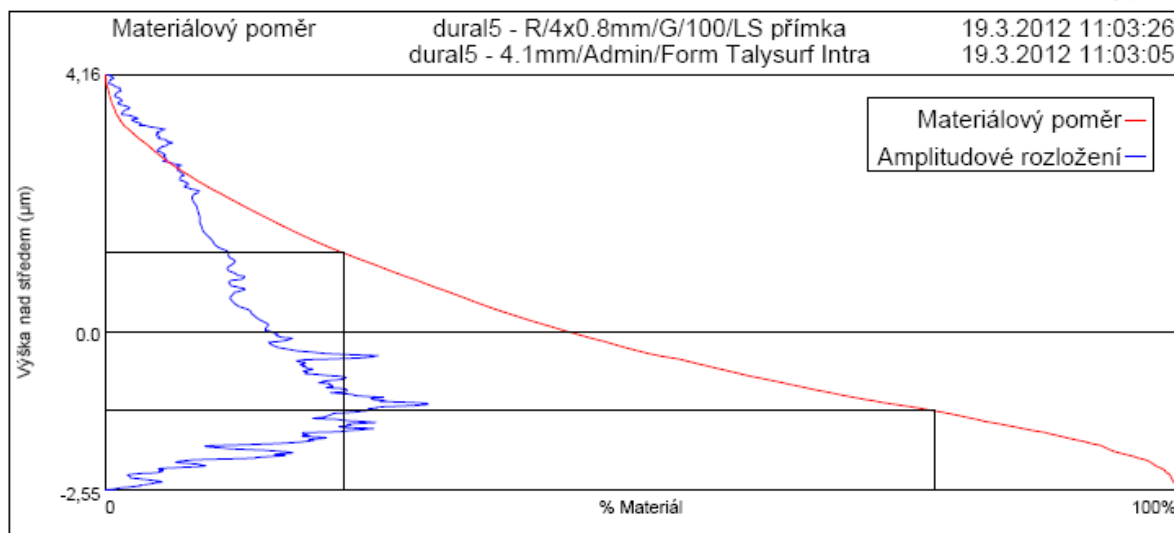


Ra	1,0994 µm	Rq	1,3134 µm		
Rsk	0,4688 µm	Rv	2,3700 µm		
Rp	3,2952 µm	Rt	6,3754 µm	Rmr(c)	43,59 %
		Rz	5,6653 µm	Výška (stř. hod.)	0,000 µm
		Rc	4,0900 µm		

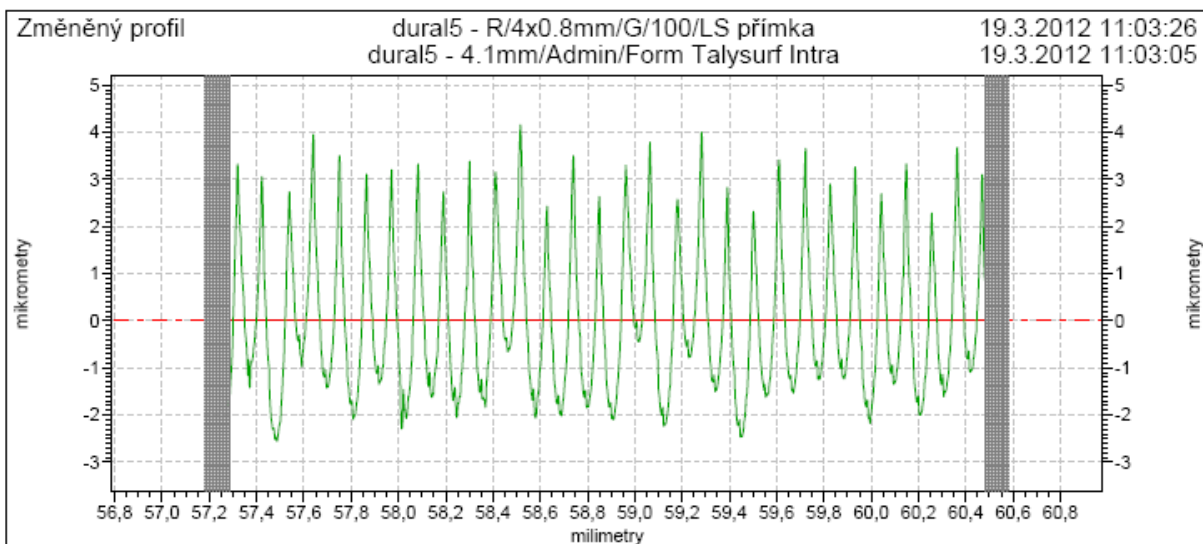
PŘÍLOHA 1 (5/6)

Výstupy z měřicího zařízení TAYLOR-HOBSON Talysurf Intra, pro určování profilu povrchu zkušební vzorku z duralové slitiny, obráběného při posuvu $f_s = 0,1080$ mm.

5.12.6.29



Upper Cursor	Band	Lower Cursor
Uroveň 1,27 μm	Pásmo/Htp 2,55 μm	Uroveň -1,28 μm
mr 1% 22,2 %	Delta mr% 54,9 %	mr 2% 77,1 %
HSC 29 výstupků	Počet výstupků 69 výst/cm	HSC 18 výstupků

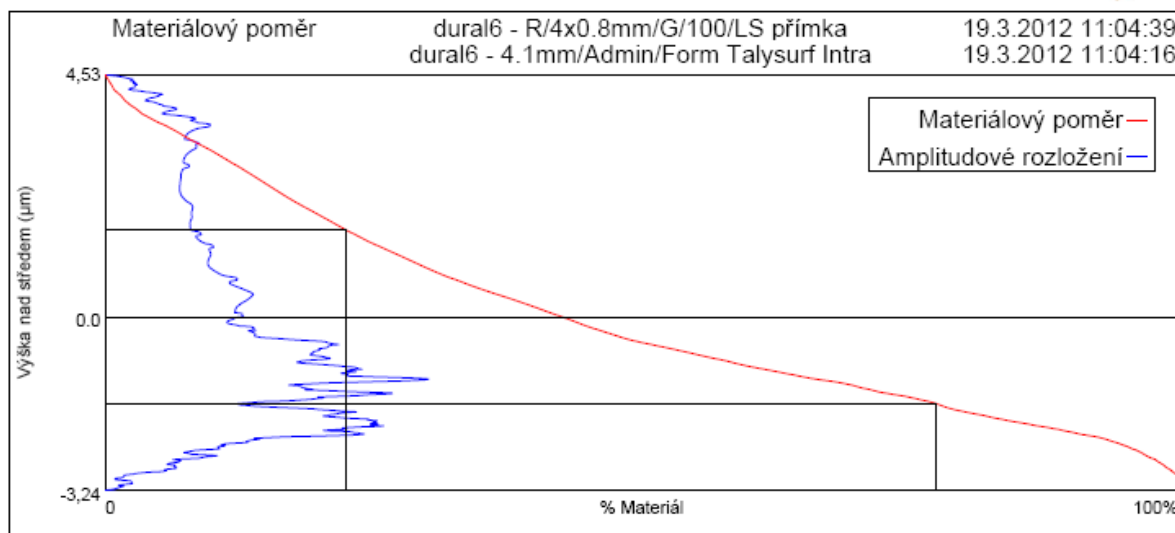


Ra	1,2650 μm	Rq	1,5103 μm		
Rsk	0,5739				
Rp	3,9452 μm	Rv	2,3113 μm		
		Rt	6,7072 μm	Rmr(c)	43,03 %
		Rz	6,2565 μm	Výška (str. hod.)	0,000 μm
		Rc	4,8165 μm		

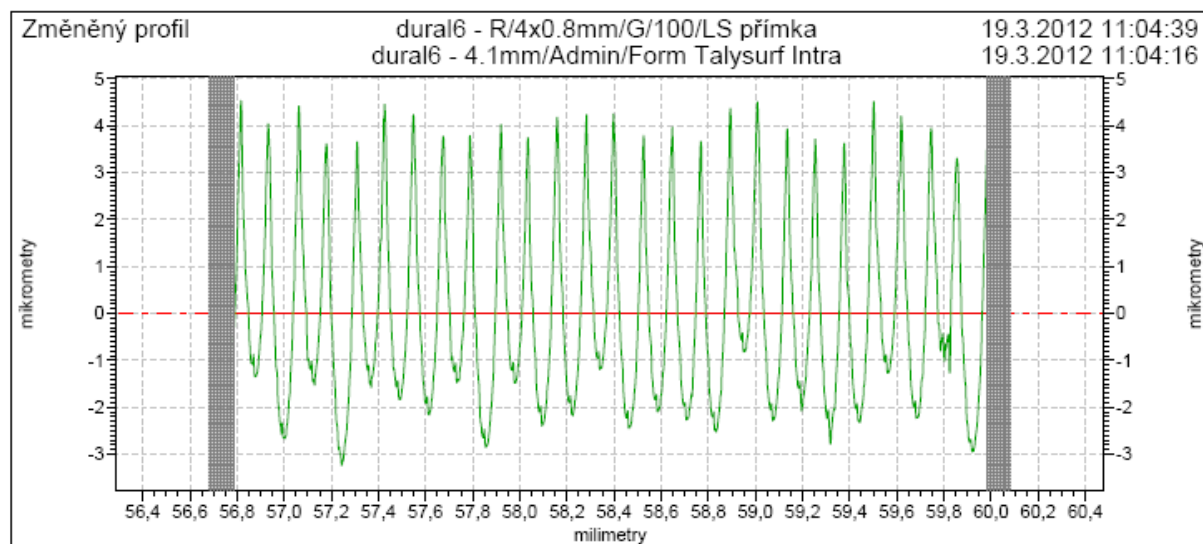
PŘÍLOHA 1 (6/6)

Výstupy z měřicího zařízení TAYLOR-HOBSON Talysurf Intra, pro určování profilu povrchu zkušební vzorku z duralové slitiny, obráběného při posuvu $f_6 = 0,1220$ mm.

5.12.6.29



Upper Cursor	Band	Lower Cursor
Úroveň 1,61 µm	Pásmo/Htp 3,24 µm	Úroveň -1,63 µm
mr 1% 22,4 %	Delta mr% 54,8 %	mr 2% 77,2 %
HSC 26 výstupků	Počet výstupků 53 výst/cm	HSC 17 výstupků

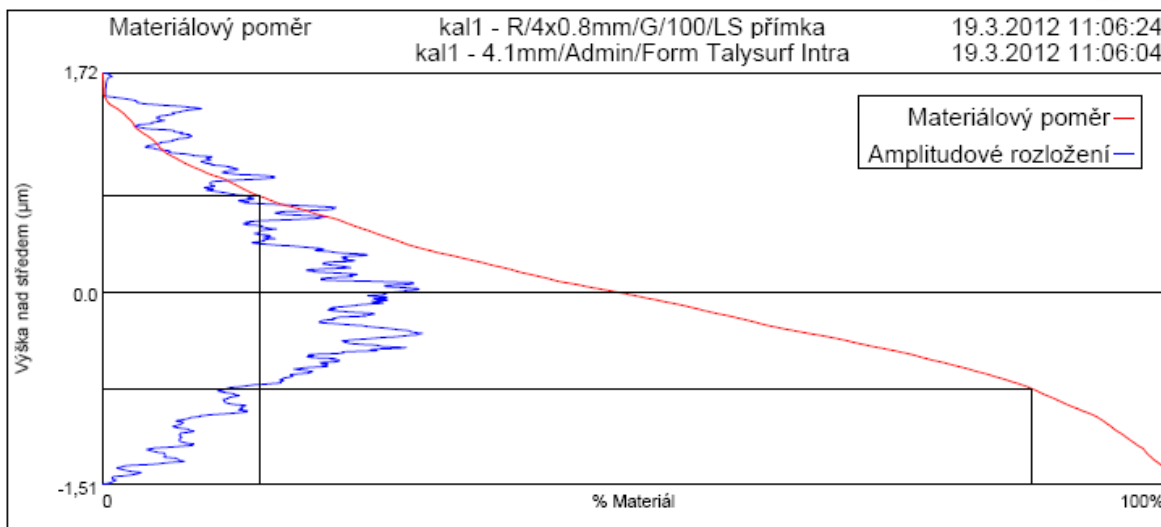


Ra	1,6096 µm	Rq	1,9123 µm		
Rsk	0,5785 µm				
Rp	4,4401 µm	Rv	2,8888 µm		
		Rt	7,7621 µm	Rmr(c)	42,38 %
		Rz	7,3287 µm	Výška (str. hod.)	0,000 µm
		Rc	6,0606 µm		

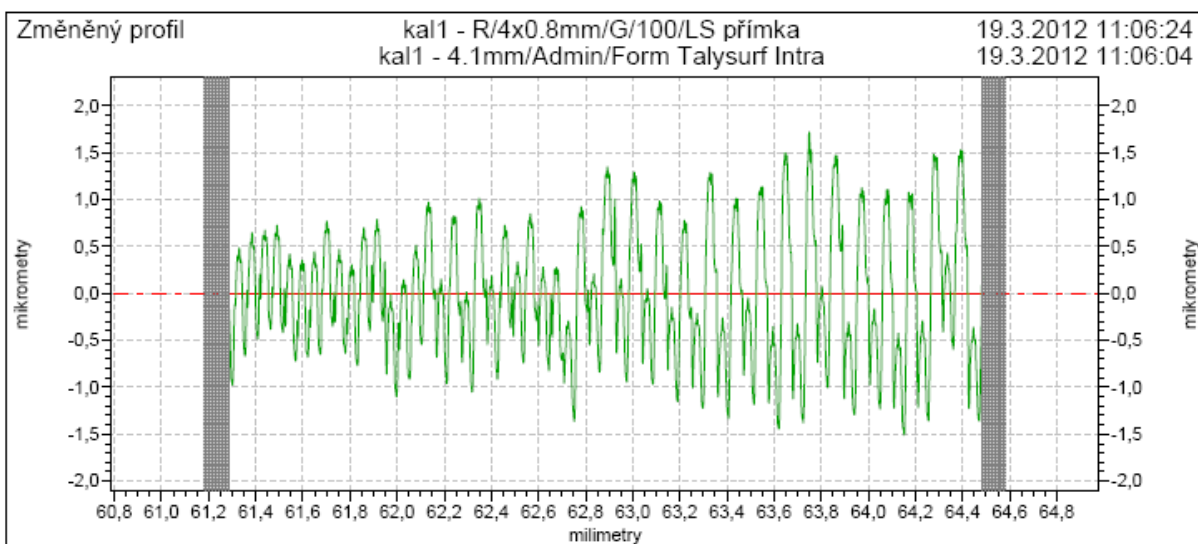
PŘÍLOHA 2 (1/6)

Výstupy z měřicího zařízení TAYLOR-HOBSON Talysurf Intra, pro určování profilu povrchu zkušební vzorku z kalené oceli, obráběného při posuvu $f_1 = 0,054$ mm.

5.12.6.29



Upper Cursor		Band		Lower Cursor	
Úroveň	0,75 µm	Pásmo/Htp	1,51 µm	Úroveň	-0,76 µm
mr 1%	14,7 %	Delta mr%	72,4 %	mr 2%	87,1 %
HSC	19 výstupků	Počet výstupků	63 výst/cm	HSC	35 výstupků

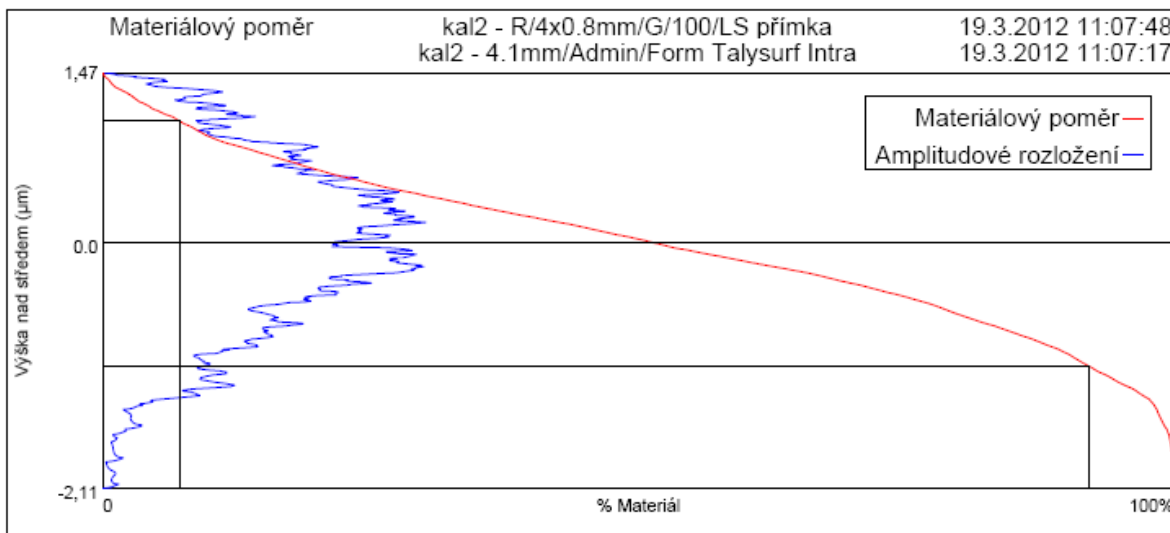


Ra	0,5434 µm	Rq	0,6657 µm		
Rsk	0,1528 µm	Rv	1,3537 µm		
Rlp	1,2762 µm	Rt	3,2265 µm	Rmr(c)	48,13 %
				Výška (str. hod.)	0,000 µm
		Rz	2,6299 µm		
		Rc	1,6766 µm		

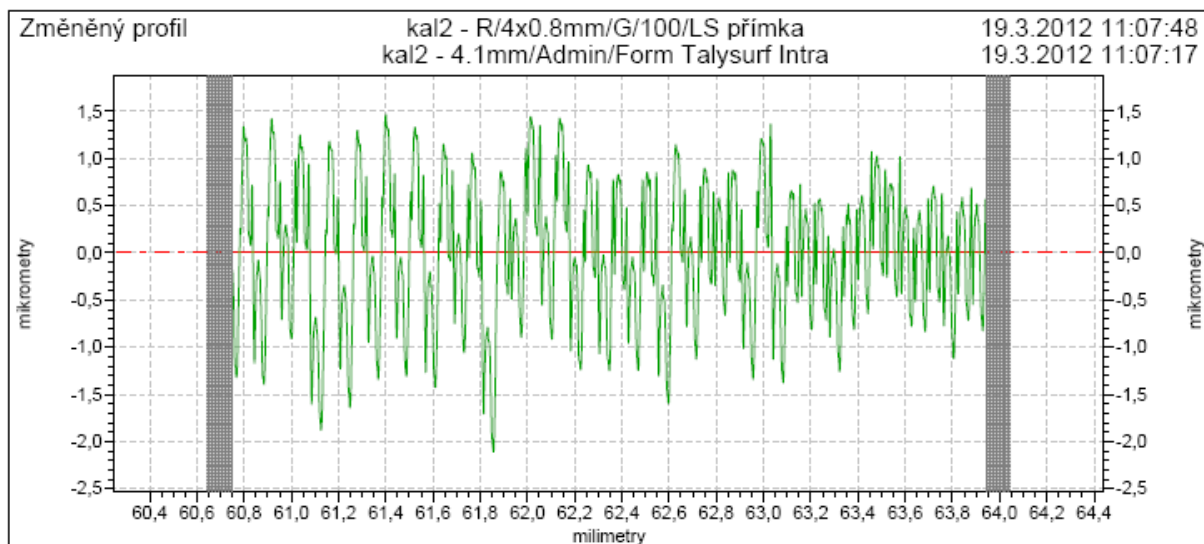
PŘÍLOHA 2 (2/6)

Výstupy z měřicího zařízení TAYLOR-HOBSON Talysurf Intra, pro určování profilu povrchu zkušební vzorku z kalené oceli, obráběného při posuvu $f_2 = 0,061$ mm.

5.12.8.29



Upper Cursor	Band	Lower Cursor
Uroveň 1,05 μm	Pásmo/Htp 2,11 μm	Uroveň -1,06 μm
mr 1% 7,1 %	Delta mr% 84,5 %	mr 2% 91,7 %
HSC 13 výstupků	Počet výstupků 34 výst/cm	HSC 21 výstupků

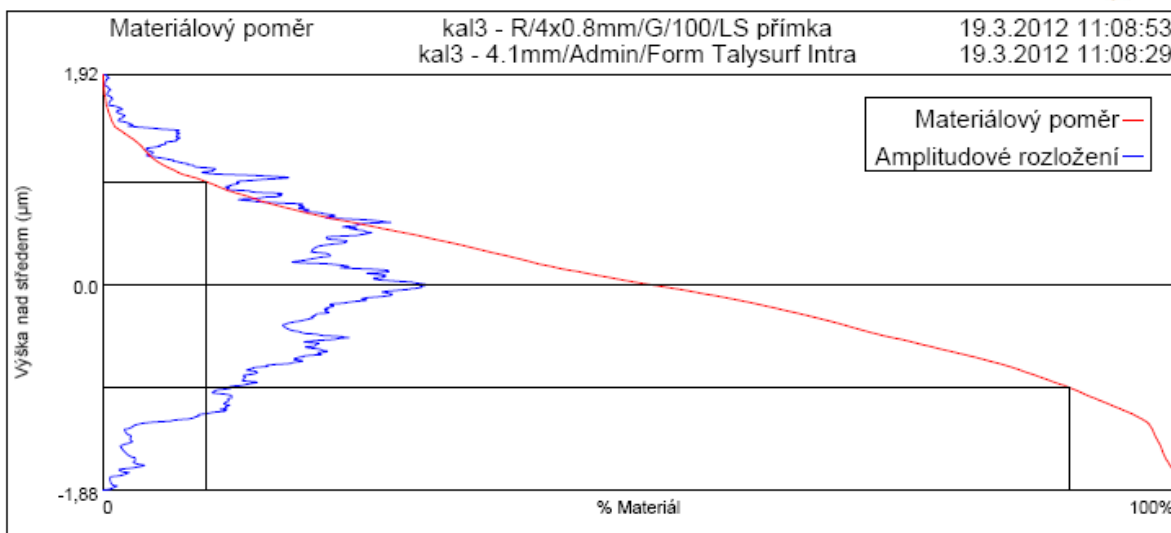


Ra	0,5755 μm	Rq	0,7083 μm		
Rsk	-0,2177 μm				
Rp	1,3384 μm	Rv	1,7085 μm		
		Rt	3,5743 μm	Rmr(c)	51,28 %
		Rz	3,0459 μm	Vyska (str. hod.)	0,000 μm
		Rc	1,5689 μm		

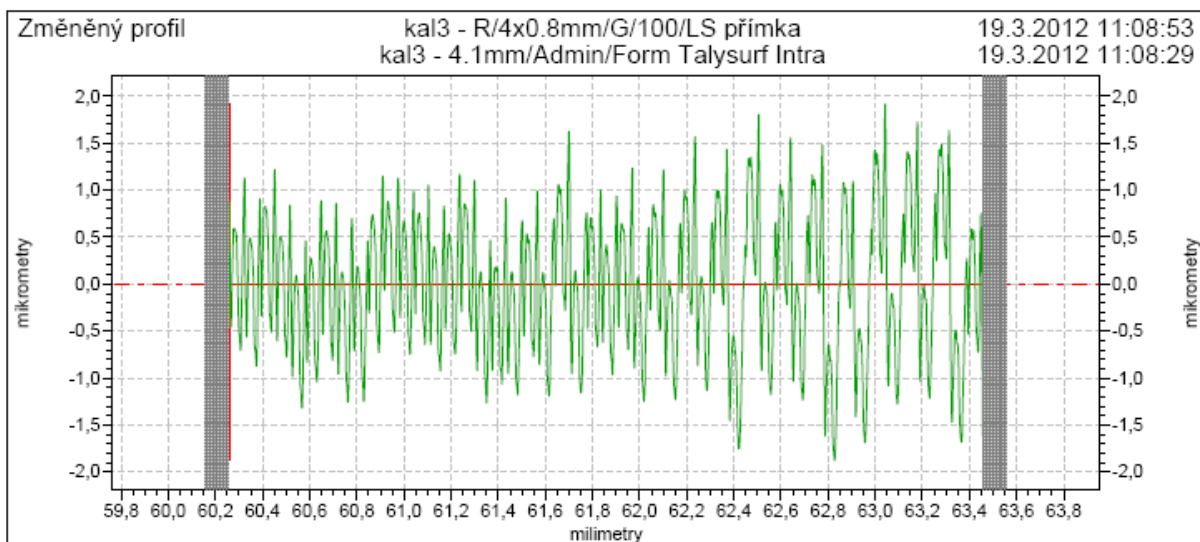
PŘÍLOHA 2 (3/6)

Výstupy z měřicího zařízení TAYLOR-HOBSON Talysurf Intra, pro určování profilu povrchu zkušební vzorku z kalené oceli, obráběného při posuvu $f_3 = 0,067$ mm.

5.12.6.29



Upper Cursor		Band		Lower Cursor	
Úroveň	0,93 µm	Pásmo/Htp	1,88 µm	Úroveň	-0,94 µm
mr 1%	9,6 %	Delta mr%	80,2 %	mr 2%	89,8 %
HSC	26 výstupků	Počet výstupků	47 výst/cm	HSC	27 výstupků

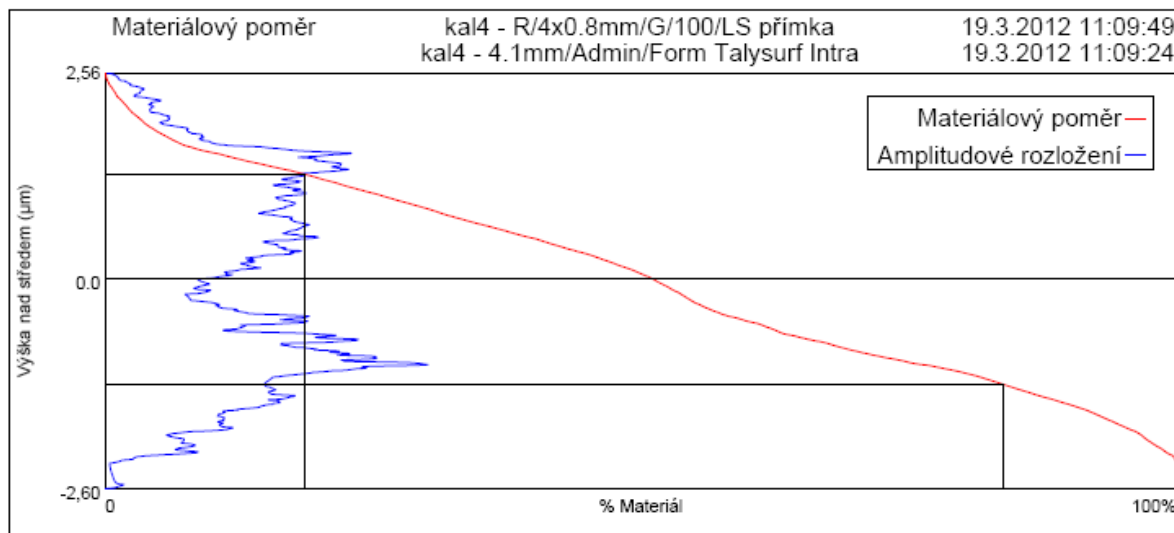


Ra	0,5776 µm	Rq	0,7059 µm		
Rsk	-0,0717 µm				
Rp	1,6415 µm	Rv	1,5637 µm		
		Rt	3,7950 µm	Rmr(c)	50,60 %
				Výška (str. hod.)	0,000 µm
		Rz	3,1952 µm		
		Rc	1,7463 µm		

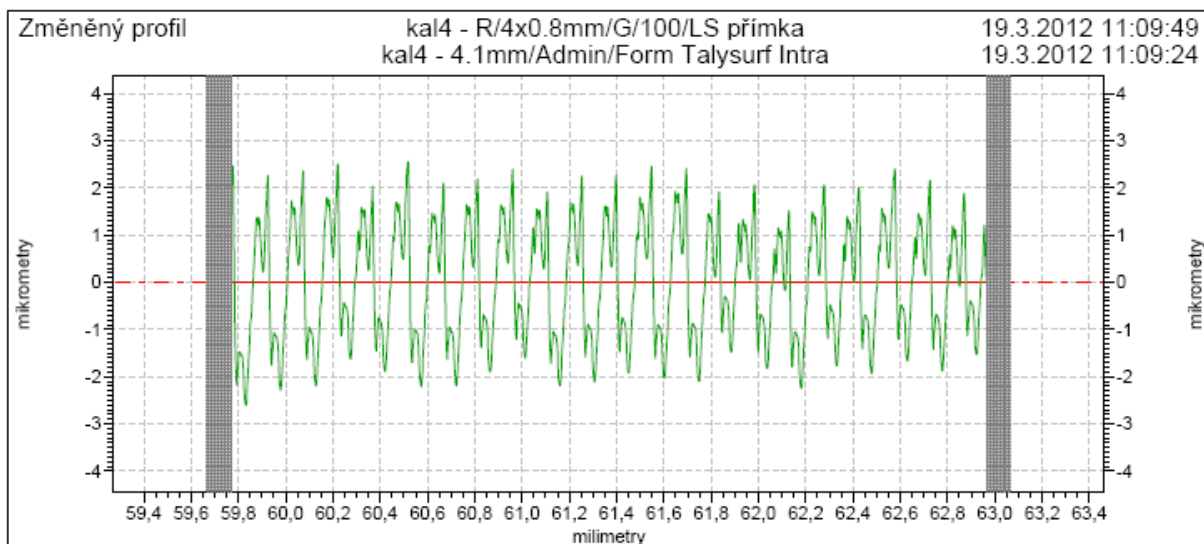
PŘÍLOHA 2 (4/6)

Výstupy z měřicího zařízení TAYLOR-HOBSON Talysurf Intra, pro určování profilu povrchu zkušební vzorku z kalené oceli, obráběného při posuvu $f_4 = 0,074$ mm.

5.12.6.29



	Upper Cursor		Band		Lower Cursor
Úroveň	1,30	µm	Pásmo/Htp	2,61	µm
mr 1%	18,5	%	Delta mr%	64,9	%
HSC	37	výstupků	Počet výstupků	66	výst/cm
					HSC 34 výstupků

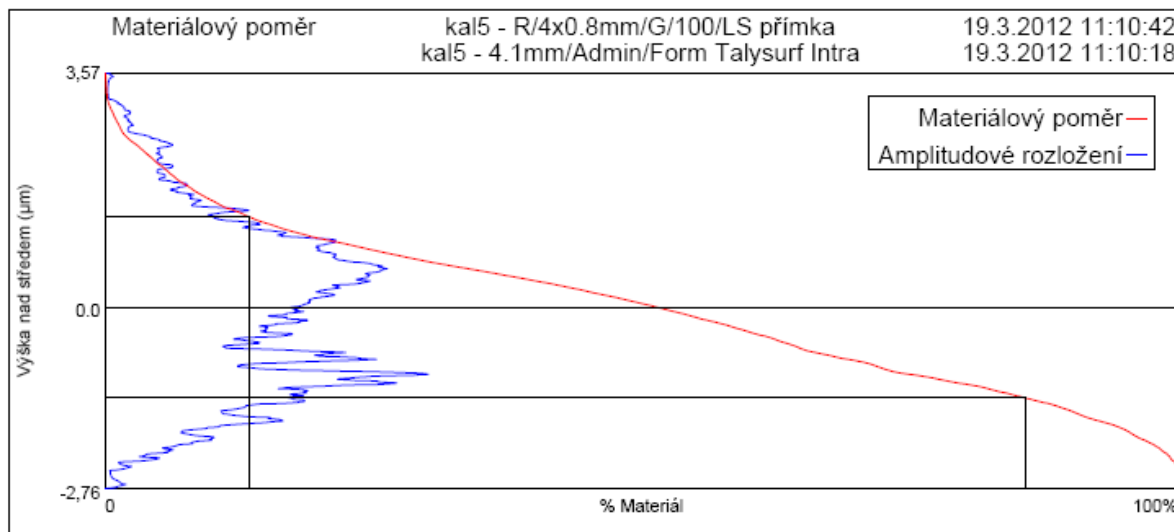


Ra	1,0633	µm	Ra	1,2078	µm		
Rsk	0,0113						
Rp	2,4545	µm	Rv	2,2881	µm		
			Rt	5,1630	µm	Rmr(c)	50,87 %
						Výška (str. hod.)	0,000 µm
			Rz	4,7405	µm		
			Rc	4,1492	µm		

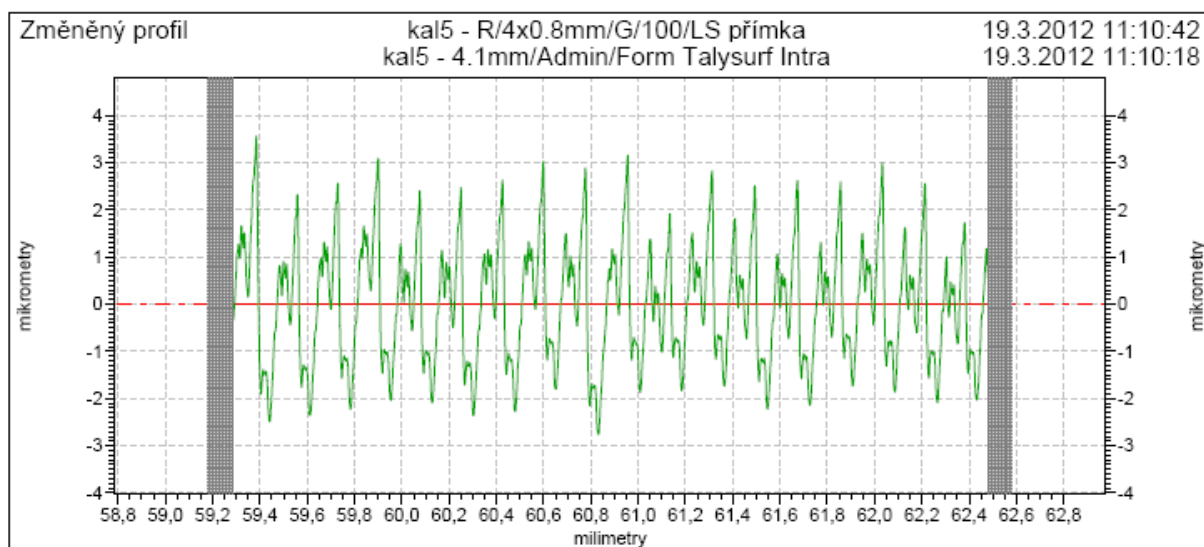
PŘÍLOHA 2 (5/6)

Výstupy z měřicího zařízení TAYLOR-HOBSON Talysurf Intra, pro určování profilu povrchu zkušební vzorku z kalené oceli, obráběného při posuvu $f_s = 0,088$ mm.

5.12.6.29



Upper Cursor		Band		Lower Cursor	
Uroveň	1,37 μm	Pásmo/Htp	2,76 μm	Uroveň	-1,39 μm
mr 1%	13,3 %	Delta mr%	72,1 %	mr 2%	85,4 %
HSC	21 výstupků	Počet výstupků	53 výst/cm	HSC	23 výstupků

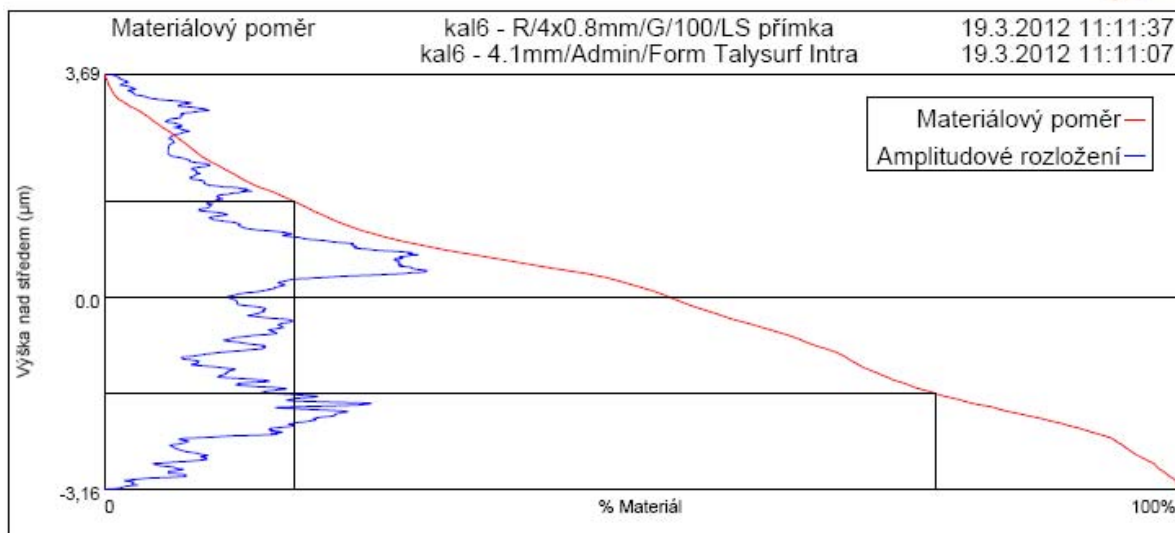


Ra	1,0306 μm	Rq	1,2360 μm		
Rsk	0,1875 μm				
Rp	3,1855 μm	Rv	2,4005 μm	Rmr(c)	51,11 %
		Rt	6,3275 μm	Výška (str. hod.)	0,000 μm
		Rz	5,5880 μm		
		Rc	3,6455 μm		

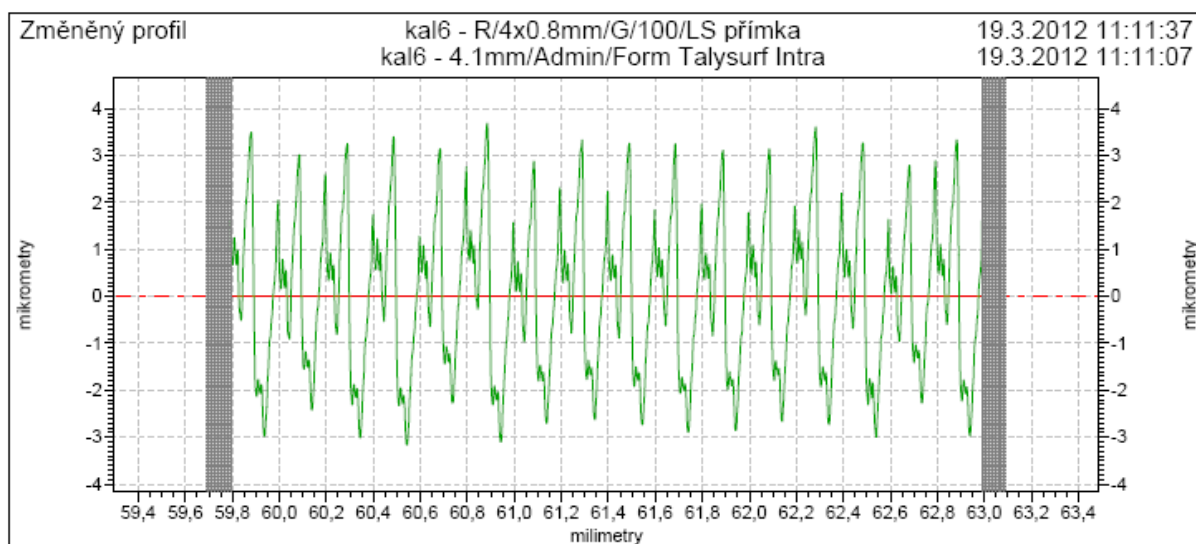
PŘÍLOHA 2 (6/6)

Výstupy z měřicího zařízení TAYLOR-HOBSON Talysurf Intra, pro určování profilu povrchu zkušební vzorku z kalené oceli, obráběného při posuvu $f_6 = 0,100$ mm.

5.12.6.29



Upper Cursor		Band		Lower Cursor	
Uroveň	1,58 μm	Pásmo/Htp	3,17 μm	Uroveň	-1,59 μm
mr 1%	17,7 %	Delta mr%	59,6 %	mr 2%	77,3 %
HSC	26 výstupků	Počet výstupků	50 výst/cm	HSC	18 výstupků



Ra	1,3570 μm	Rq	1,6182 μm			
PRsk	0,1100					
Rp	3,5148 μm	Hv	3,0387 μm	Rmr(c)	52,57 %	Vyska (str. hod.) 0,000 μm
		Rt	6,8470 μm			
		Rz	6,5534 μm			
		Rc	4,4111 μm			