

Entwicklung innovativer Zerspanungswerkzeuge aus nanokristalinem, binderfreiem Bornitrid (Bornitrid Nanocomposites – BNNC) zur Verbesserung der Oberflächenqualität und Erweiterung der Verfahrensgrenzen⁴

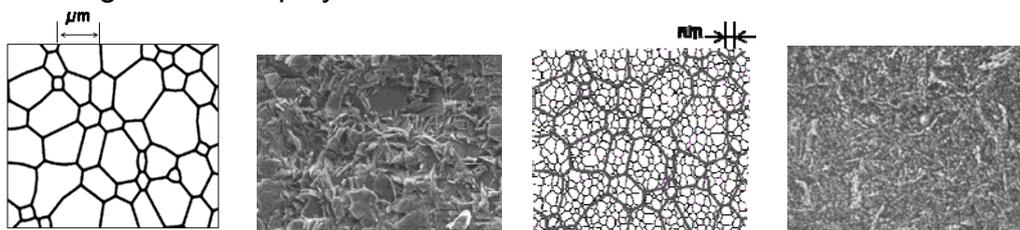
Dipl.-Ing. Albrecht Hänel

1 Einleitung

In der Fein- und Präzisionsbearbeitung von rotationssymmetrischen Bauteilen besteht ein fortlaufender Wettbewerb zwischen dem Schleifen und dem Hartdrehen. Während das Schleifen eine höhere Präzision verspricht, lockt das Hartdrehen mit einer besseren Wirtschaftlichkeit. Es ist daher ein wesentliches Forschungsanliegen Maschine, Werkzeuge und Technologie beim Hartdrehen weiterzuentwickeln, um die Präzision mit diesem Verfahren zu steigern. Dabei steht insbesondere die Weiterentwicklung von hochharten Schneidwerkstoffen im Fokus. Ein großes Potenzial wird derzeit dem superharten nanokristallinen und binderlosen Bornitrid (BNNC) zugeschrieben /OBE-12, FUJ-09, SUM-14, KRO-12/. Der maßgebliche Unterschied zu den derzeit genutzten CBN-Schneidwerkstoffen besteht darin, dass keine metallische Binderphase zwischen den CBN-Einzelkristallen vorhanden ist und dass die Einzelkristallite des BNNC um die Größenordnung von 100 kleiner sind. Durch den Einsatz von BNNC können beim Hartdrehen die Leistungsgrenzen hinsichtlich der Oberflächenqualität und der Werkzeugstandzeit erweitert werden und somit Kosten in der Produktion gespart und neue Anwendungen erschlossen werden. Diese Vorteile ergeben sich nur, wenn das Werkzeugsystem bestehend aus dem Schneidwerkstoff, der Wendeschneidplatte, dem Werkzeughalter und angepassten Einstellparametern auf die Eigenheiten des neuen BNNC-Schneidwerkstoffs angepasst ist. Hierfür sind Untersuchungen und Entwicklungen notwendig.

2 Herstellung und Materialeigenschaften von BNNC

BNNC besteht aus einem sehr feinen, homogenen Gefüge von CBN-Nanokristalliten die durch 'kristallographische Verzahnung' unmittelbar miteinander verbunden sind /RAF-08/. Da im Gegensatz zu CBN-Sinterwerkstoffen BNNC keinerlei Binderphase enthält, resultiert eine höhere Temperaturfestigkeit und Warmhärte. Abbildung 1 zeigt den Vergleich eines polykristallinen und eines nanokristallinen CBN Gefüges.



Polykristallines CBN Gefüge

Nanokristallines CBN Gefüge

Abbildung 1: Vergleiches eines polykristallinen Gefüges mit einem nanokristallinem Gefüge

⁴ Das Projekt wird über die AiF im Rahmen der Fördermaßnahme Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) des BMWi gefördert.

Seine Härte liegt zusätzlich über der von CBN Einkristallen /RAF-08/. Der Ausbruch einzelner CBN-Nanokörner hat deshalb einen geringeren Einfluss auf die Oberflächentopologie der Werkzeugschneide, wodurch höhere Oberflächengüten erzielt werden können.

Bornitrid-Nanocomposite (BNNC), bestehend aus nanoskaligen Domänen von kubischem (c-BN), wurzitischem (w-BN) und hexagonalem (h-BN) Bornitrid wird unter Hochdruck-/Hochtemperaturbedingungen (HP/HT) durch so genannte Direktsynthese – also die direkte Umwandlung in die diamantähnlichen Modifikationen ohne Verwendung einer Metallschmelze als Lösungsmittel und Katalysator, synthetisiert. Als Ausgangsstoffe können heißgepresstes Bornitrid (HDBN) und pyrolytisch abgeschiedenes Bornitrid (p-BN), beide bestehen aus graphitischem, hexagonalem Bornitrid (h-BN), verwendet werden. /RAF-08, RAF-12/ Die Bedingungen mit einem Druck von ca. 10 GPa und Temperaturen zwischen 1300 °C und 2400 °C werden mittels einer Multianvilpresse erzeugt (Abbildung 2). Durch den Kompositaufbau und die 'kristallographische Verzahnung' /RAF-08/ der 3 nanoskaligen Komponenten (c-BN/w-BN/h-BN) können höhere mechanische Festigkeiten erzielt werden als mit reinem c-BN /RAF-08, SUM-14/.

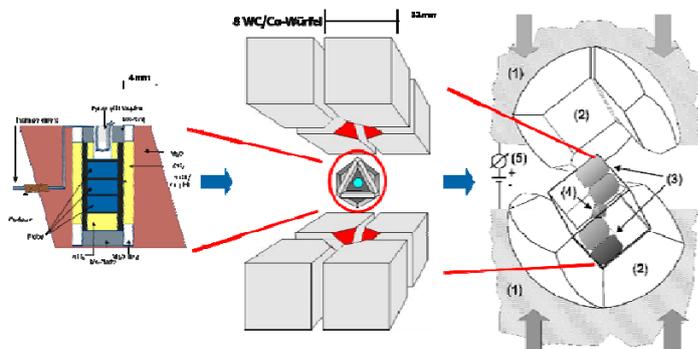


Abbildung 2: Schema eines Oktaeders (links), Pressenaufbau mit 8 inneren Stempeln (mitte) und 6 äußeren Stempeln (rechts) /KRO-12/

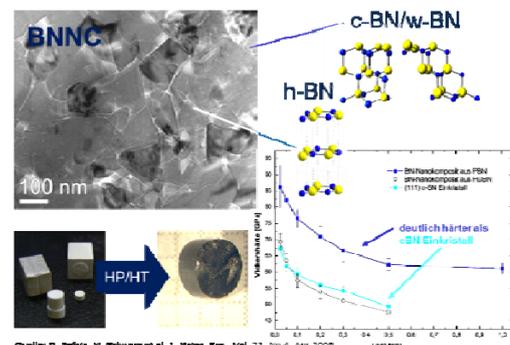


Abbildung 3: TEM-Aufnahme vom BNNC und Vergleich der Härte mit cBN Einkristall /RAF-08/

3 Anwendung von BNNC als Schneidwerkstoff

Die derzeitigen Grenzen von konventionellen polykristallinem-cBN (PCBN) Werkzeugen sind hinsichtlich der Oberflächenqualität (bis ca. $R_z = 1 \mu\text{m}$) /DEG-09/ durch das polykristalline Gefüge und den Kristallitgrößen im Größenbereich von $1 \mu\text{m}$ - $10 \mu\text{m}$ begründet (Abbildung 3).

Des Weiteren besitzt polykristallines-cBN (PCBN) eine Binderphase, die zwischen den Kristalliten angelagert ist und die einzelnen Kristallite miteinander verbindet. Bei starken Beanspruchungen und hohen Temperaturen, beispielsweise beim Hartdrehen, kommt es an der Schneidkante zur Erweichung und Abrasion des Binders und nachfolgend zum verstärkten Kornausbruch. Zudem besitzen die meist einkristallinen cBN Körner in diesen konventionellen cBN Sinterwerkstoffen eine vergleichsweise geringe intrinsische Zähigkeit von ca. $3 \text{ MPam}^{1/2}$ /TRO-04/ und brechen längs bevorzugter Spaltflächen. Zusammengenommen hat dies zur Folge, dass sich die Topologie der Schneidkante aufgrund von Kornausbrüchen, Absplitterungen und Abrasion verschlechtert und somit die Oberflächenqualität am bearbeiteten Werkstück mit steigender Einsatzdauer des Werkzeuges sukzessive herabgesetzt wird. Durch den Einsatz von superhartem nanokristallinem und binderlosem Bornitrid (BNNC) als Schneidwerkstoff können dieser Effekte deutlich

vermieden bzw. vermindert werden. Dadurch erhöht sich die Standzeit des Werkzeuges und verbessert sich die Oberflächenqualität am zu bearbeiteten Werkstück.

4 Entwicklung von Drehwerkzeugen mit BNNC als Schneidwerkstoff

Ein weiterer Schwerpunkt der Entwicklung von BNNC als Schneidwerkstoff ist die Realisierung einer Prozesskette zur Präparation des hochharten Werkstoffes. Konventionelle polykristalline-cBN sind, aufgrund der elektrischen Leitfähigkeit der metallischen Bindephase, funkenerosiv zuschneidbar. Außerdem werden polykristalline-cBN auf einem Hartmetallträger gesintert, wodurch der Schneideinsatz im Induktionslötverfahren mit dem Trägermaterial gefügt werden kann.

Superharte nanokristalline und binderlose Bornitrid (BNNC) sind nicht elektrisch leitfähig und somit auch nicht erodierbar. Außerdem können die BNNC (Abbildung 4) nicht auf einem Hartmetallträger gepresst werden, da in der HP/HT-Direktsynthese sich eine Phasenumwandlung von Hartmetall einstellen würde. Es müssen daher nach alternativen Fertigungsverfahren zur Formgebung und alternative Fertigungsverfahren zum Fügen von BNNC auf einem Hartmetallträger entwickelt werden.

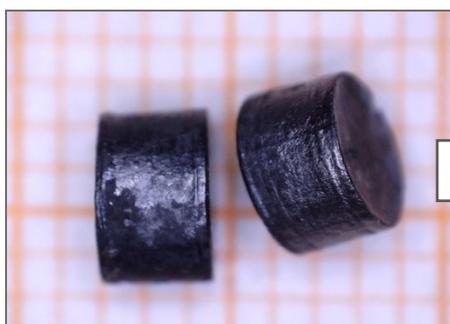


Abbildung 4: BNNC-Pellet nach der HP/HT-Direktsynthese



Abbildung 5: Ausgewählte Drehwerkzeug mit BNNC-Schneideinsätzen

Die aktuelle Entwicklung zeigt, dass für die Formgebung das Schleifen mit dem Einsatz von Diamantschleifscheiben die besten Ergebnisse hinsichtlich Maß- und Formgenauigkeit und Oberflächenqualität erzielen. Die derzeitigen Füge-Ergebnisse zeigen, dass das BNNC auf dem Hartmetallträger im Hochvakuum bei 850 °C mit einem Aktivlot gefügt werden muss, um die entsprechende Festigkeit der Fügeverbindung für den Einsatz als Zerspanungswerkzeug zu erreichen. Abbildung 5 zeigt gefertigte Drehwerkzeuge mit BNNC als Schneideinsatz.

Neue Herausforderungen bestehen auch bei der Finishbearbeitung der Schneideinsätze aus BNNC, gegenüber herkömmlichen PCBN. Aufgrund der deutlich höheren Härte des BNNC, lässt sich die Oberfläche mit herkömmlichen Lappsuspensionen nicht mehr finishen. Das Abrasivmedium, bzw. die Lappkörner, können sich nicht mehr in das superharte Material eindrücken, sodass kein Materialabtrag erfolgen kann. Dies hat zu Folge, dass auf der Oberfläche keine Spuren zu erkennen sind (Abbildung 6 und 7).

Dies hat einen wesentlichen Einfluss auf die Schartigkeit und die Schneidenstabilität der Werkzeuge und dementsprechend auch auf das Einsatzverhalten. Es muss daher nach geeigneten Finishing Verfahren geforscht werden.

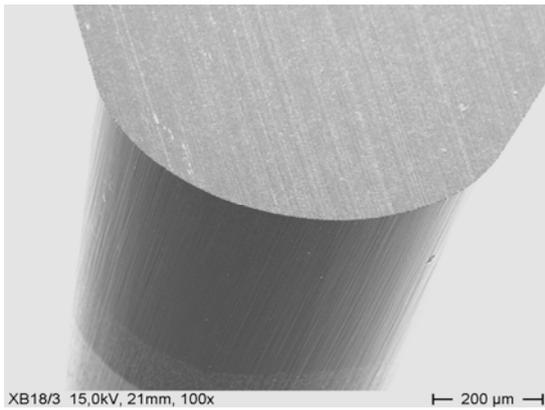


Abbildung 6: Schneidkante eines PCBN nach dem Läppen

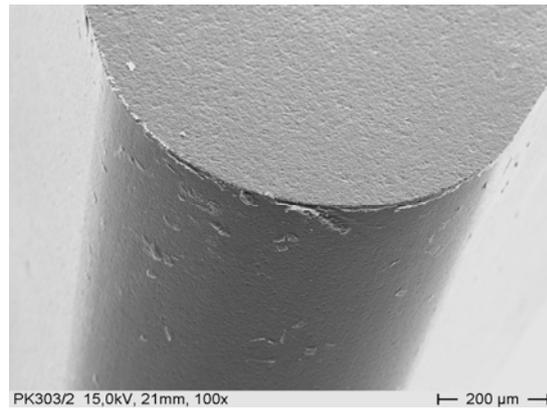


Abbildung 7: Schneidkante eines BNNC nach dem Läppen

5 Experimentelle Untersuchung

Ziel der experimentellen Untersuchung war es, das Verschleißverhalten von BNNC bei der spanenden Bearbeitung von gehärteten Stählen zu analysieren und zu beurteilen.

Die Untersuchungen wurden am Beispiel des Außen-Längsdrehen durchgeführt, in denen die Verschleißmarkenbreite VB und die erzeugte Oberflächenrauheit R_z bei den eingesetzten Versuchswerkzeugen analysiert wurden. Ausgewählte Werkzeuge wurden im Rasterelektronenmikroskop (REM) vor und nach dem Einsatz analysiert, um Erkenntnisse über die Verschleißmechanismen zu gewinnen.

Als Versuchsmaschine stand eine CNC-Drehmaschine DMG CTX 300 ALPHA zur Verfügung. Zur Bestimmung des Verschleißes wurde ein Digitalmikroskop KEYENCE VHX5000 verwendet.

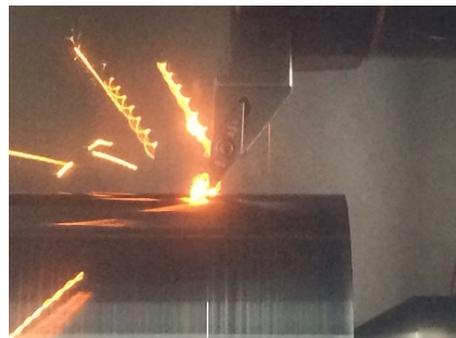


Abbildung 8: Hartdrehen von 100Cr6 mit BNNC als Schneidwerkstoff

Die Versuchswerkzeuge wurden beim Außen-Längsdrehen von gehärteten Stählen ($> 62 \pm 2$ HRC) eingesetzt, also beim Hartdrehen (Abbildung 8). Es wurden Vergleichswerkzeuge mit einem PCBN Schneidwerkstoff (Anteil: 90-95% cBN, 5-10% TiC) verwendet.

5.1 Auswertung der gemittelten Rautiefe R_z

Bei der Analyse der gemittelten Rautiefe R_z (Abbildung 9) zeigte sich, dass die BNNC Schneidwerkstoffe zwischen $R_z = 2,00 \mu\text{m}$ und $R_z = 2,46 \mu\text{m}$ (PK303/2 und PK300/2) schwanken, während die PCBN Schneidwerkstoff zwischen $R_z = 2,30 \mu\text{m}$ und $R_z = 2,37 \mu\text{m}$ (EV3 XB18 und EV4 XB18) liegen. Dies verdeutlicht, dass verbesserte Oberflächengüten mit dem BNNC Schneidwerkstoff gegenüber dem PCBN Schneidwerkstoff erzeugt werden können.

Es ist jedoch festzustellen, dass jedoch die Ergebnisse stark streuen. Diese Schwankungen können durch die HP/HT-Synthese verursacht werden und sich damit unterschiedliche Festigkeiten und Härten im BNNC ausbilden.

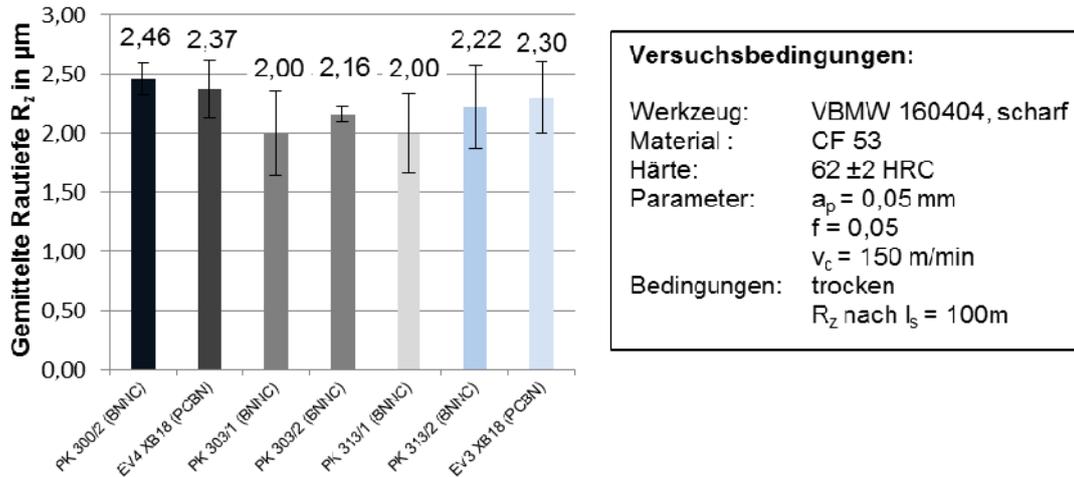


Abbildung 9: Gemittelte Rautiefe R_z nach $l_s = 100$ m von BNNC im Vergleich mit PCBN

Trotzdem verdeutlicht diese Auswertung das Potenzial der BNNC-Schneidwerkstoff gegenüber konventionellen PCBN.

5.2 Verschleißformen am BNNC Schneidwerkstoff

In Abbildung 10 ist eine REM-Aufnahme der Schneide aus BNNC nach dem Einsatz in der Versuchsumgebung und einem Schnittweg von $l_s = 4000$ m dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die dominierende Verschleißform der Freiflächen- und Kolkverschleiß ist. Diese markanten Verschleißformen werden primär durch Abrasion beeinflusst.

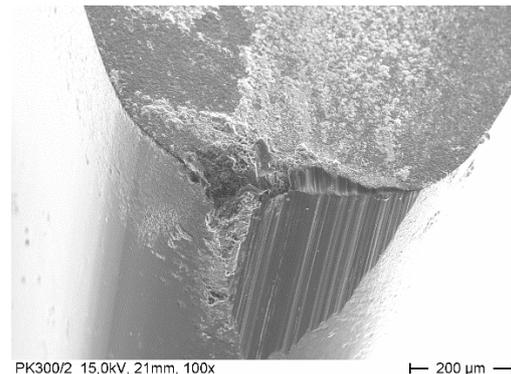


Abbildung 10: REM-Aufnahme der Schneide aus BNNC nach einem Schnittweg von $l_s = 4000$ m

Aus diesem Grund ist das Standzeitbestimmende Kriterium der Verschleiß an der Freifläche.

Das Verschleißbild am BNNC ist äquivalent zu dem Verschleißbild von PCBN beim Hartdrehen. Die Verschleißmechanismen und Ausprägung am Werkzeug sind demnach die gleichen.

5.3 Auswertung des Standweges

Zur Auswertung des Standweges wurde als Verschleißkriterium eine Verschleißmarkenbreite $VB = 0,2$ mm am Werkzeug festgelegt. Die Werkzeuge wurden so lange eingesetzt, bis dieses Kriterium erreicht wurde. Anschließend wurde der Standweg l_s ermittelt.

Abbildung 11 verdeutlicht, dass auch hier die Ergebnisse des BNNC-Schneidwerkstoffes schwanken. Während beim BNNC (PK313/1) ein größerer Standweg gegenüber dem PCBN (EV3 XB18) gemessen wurde, war beim zweiten BNNC (PK313/2) ein geringerer Standweg ermittelt wurden.

Dies deutet ebenfalls daraufhin, dass Unterschiede beim Synthesevorgang einen wesentlichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der BNNC-Schneidwerkstoff hat.

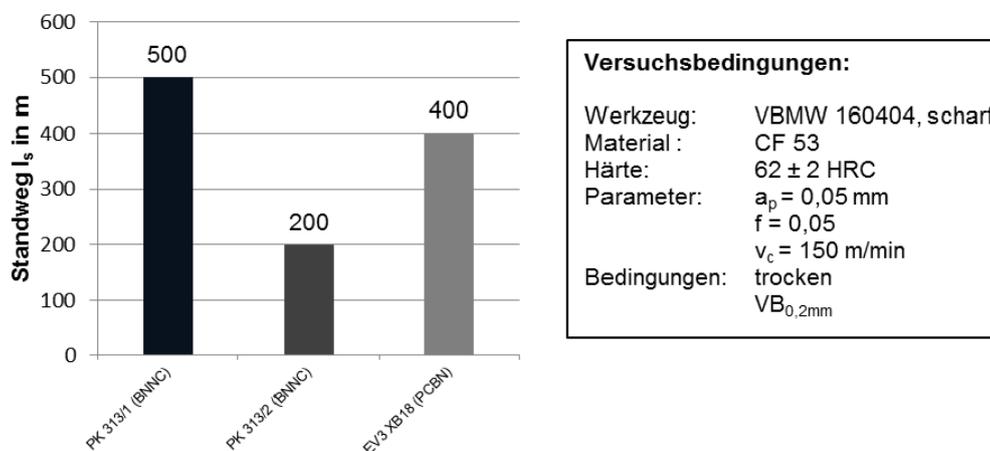


Abbildung 11: Standweg I_s von BNNC gegenüber PCBN

6 Zusammenfassung

BNNC bietet als Schneidwerkstoff neue Möglichkeiten bisherige Grenzen bei der spanenden Bearbeitung von harten Werkstoffen zu verschieben. Es konnte ein alternatives Fertigungsverfahren zur Herstellung von Werkzeugen entwickelt werden, sodass einsatzfähige Wendeschneidplatten hergestellt werden können. /TEI-16/

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung, also der gemittelten Rautiefe R_z und des Standweges I_s beim Hartdrehen, verdeutlichen das Potenzial von BNNC als Schneidwerkstoff, gleichwohl die Ergebnisse noch stark streuen und somit noch keine vollständig belastbare Aussage über das Leistungsvermögen getroffen werden kann. Die Auswertung der eintretenden Verschleißform zeigt, dass hauptsächlich abrasiver Verschleiß in Form von Freiflächen- und Kolkverschleiß auftritt.

Literatur

- /DEG-16/ Degner, W.; Lutze, H.; Smejkal, E.: Spanende Formung – Theorie-Berechnung – Richtwerte, Carl Hanser Verlag, 2009
- /FUJ-16/ Fujisaki, K.; Yokota, H.; Furushiro, N.; et al: Development of ultra-fine-grain binderless cBN tool for precision cutting of ferrous materials. Journal of Materials Processing Technology 209, 2009, 5646-5652, ISSN 09240136
- /KRO-12/ Schwarz, M.; Kroke, E.: Neue Hartstoffe und Hochdruckphasen. Freiburger Hochdruckforschungszentrum, 2012
- /OBE-16/ Oberschmidt, D.; Kurz, M.; Uhlmann, E.: Ultraprecision Turning with binderless CBN. 2012
- /POL-14/ Polte, J.; Polte, M.; Lorenz, D.; Oberschmidt, D.; Sturm, H.; Uhlmann, E.: Binderless-cBN as cutting material for ultra-precision machining of stainless steel, Advanced Materials Research, 2014, 1018, 107-114

- /RAF-08/ Rafaja, D.; Schwarz, M.; Barsukova, T.; Kroke, E.; Motylenko, M.; Klemm, V.; Frost, D.; Dubrovinsky, L.; Dubrovinskaia, N.: Synthesis, microstructure and hardness of bulk ultrahard BN nanocomposites. *J. Mater. Res.*, 2008, 23, 981-993
- /RAF-12/ Rafaja, D.; Wustefeld, C.; Motylenko, M.; Schimpf, C.; Barsukova, T.; Schwarz, M. & Kroke, E.: Interface phenomena in (super)hard nitride nanocomposites: from coatings to bulk materials. *Chemical Society reviews*, 2012, 41, 5081-5101
- /SUM-14/ Sumiya, H.; Ishida, Y.; Arimoto, K. & Harano, K.: Real indentation hardness of nano-polycrystalline cBN synthesized by direct conversion sintering under HPHT. *Diamond & Related Materials*, 2014, 48, 47-51
- /TEI-16/ Teicher, U.; Hänel, A.; Nestler, A., Borsius, A. (TU Dresden); Hasterok, M., Schwarz, M., Kroke, E. (TUB Freiberg): Superhartes nanoskaliges CBN - von der Synthese bis zur Anwendung in der Zerspanung. Vortragsband zum 19. Fachkolloquium Fräsen oder Schleifen - Möglichkeiten und Grenzen neuer Bearbeitungskonzepte am 30.09.2016, Dresden: Selbstverlag TU Dresden, ISBN 978-3-86780-500-1
- /TRO-04/ Tromans, D.; Meech, J.A.: Fracture toughness and surface energies of covalent minerals: theoretical estimates. *Minerals Engineering* 17 (2004) 1-15