

Hybridbearbeitung von SiC – Optimierung der spanenden Bearbeitung durch Ultraschall-Anregung

Friedrich Bleicher, Johannes Bernreiter

Technische Universität Wien

Inst. für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik

Karlplatz 13/311

1040 Wien

bleicher@ift.at, bernreiter@ift.at

Kurzfassung:

Keramische Werkstoffe finden aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften zusehends Anwendung als Konstruktionswerkstoff. Insbesondere SiC weist eine hohe Oxidationsbeständigkeit, gutes Wärmeleitvermögen und eine hohe Härte auf. In der Hybridbearbeitung des ultraschallunterstützten Schleifens erfolgt neben der rotatorischen Hauptschnittbewegung der Werkzeuge die Einleitung einer ein- oder mehrachsigen sekundären Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück. Durch die zusätzliche Relativbewegung eröffnen sich in der Zerspanung von SiC Möglichkeiten zur Optimierung der Werkzeugstandzeit.

1 Einleitung

Auf Basis der stofflichen Charakterisierung werden Hochleistungskeramiken in Oxid-, Nichtoxid- und Silikatkeramiken unterteilt. Bedingt durch die kovalenten Bindungsanteile und den engen Atomabstand zeichnen sich diese Materialien durch hohe

Festigkeit und Härte mit dadurch begrenzter Duktilität sowie durch eine hohe chemische und thermische Stabilität aus (siehe [1]). Diese Materialeigenschaften bestimmen aber in gleichem Maße die Bearbeitungseigenschaften. Die Bearbeitbarkeit ist durch die geringe Risszähigkeit als deutlich unterschiedlich zu den metallischen Werkstoffen einzustufen.

Gebräuchliche SiC-Keramiken werden aus SiC-Feinstpulver bei 2000°C bis 2200°C unter Schutzgas drucklos gesintert (SSiC) oder liegen als reaktionsgebundenes siliziuminfiltriertes Siliziumkarbid (SiSiC) vor. Letzteres besteht aus ca. 70% Silizium- und ca. 30% Kohlenstoff-Anteil und setzt sich aus ca. 85 bis 94% SiC und entsprechend aus 15 bis 6% metallischem Silizium zusammen. Der Porenraum wird mit metallischem Silizium gefüllt, wodurch die Restporosität von SiSiC vernachlässigbar ist.

2 Hybridbearbeitung

Hybridbearbeitungsverfahren kombinieren zwei oder mehr Wirkmechanismen in einem Prozess. Zur Bearbeitung von keramischen Werkstoffen sind Bearbeitungsverfahren bekannt, welche konventionellen Schleifverfahren mit Ultraschallschwingung am Werkzeug oder Werkstück entsprechen. Dazu sind Maschinensysteme mit vertikaler Spindelanordnung und ultraschallangeregtem Werkzeug verfügbar, z.B. von der Fa. Gildemeister (ULTRASONIC 75) und der Fa. DAMA (USSG 300). Die Ultraschallanregung des Werkzeuges erfolgt in bekannten Lösungen über eine Piezo-Aktuatorik, welche beispielsweise im Werkzeughalter untergebracht ist.

In der spanenden Bearbeitung von SiC-Keramiken kommen üblicherweise Diamant-Fräser (Schleifstifte) im Durchmesserbereich von 1mm bis 20mm zum Einsatz, mit Korngrößen zwischen D7 und D252 und einer Kornkonzentration zwischen C75 und C200. Die Werkzeuge sind zumeist als Hohlschaftwerkzeuge ausgeführt und werden entweder über eine Kegelaufnahme oder über herstellerspezifische Lösungen mit Plananlage in den Werkzeughalter bzw. direkt in die Spindel eingesetzt. Auf den Schaft wird der Schleifbelag aufgebracht und kann mehrfach wiederaufbereitet werden. Durch die Ultraschallanregung führen die Werkzeuge

eine Longitudinalschwingung vorzugsweise in einer Resonanzfrequenz aus. Die Formgebung des Werkzeugschafts ist für das Frequenzübertragungsverhalten von bestimmender Bedeutung. Für die effiziente Keramikbearbeitung einsetzbare Schnittparameter können auf die Korngröße des Werkzeuges zurückgeführt werden. Für die Eingriffsbreite von Diamantwerkzeugen empfiehlt sich eine Größenordnung von $a_{p,max} \approx 1/3 \dots 1/2 \cdot D_{Korn}$ in μm und für den Vorschub $f_{max} \approx 1/2 \dots 2/3 \cdot D_{Korn}$ in μm pro Umdrehung. Bei dem hier betrachteten Bearbeitungsverfahren handelt es sich um ein Plan-Umfangsquerschleifverfahren. Dabei wird das Werkzeug orthogonal zur Vorschubbewegung mit Schwingungen angeregt.

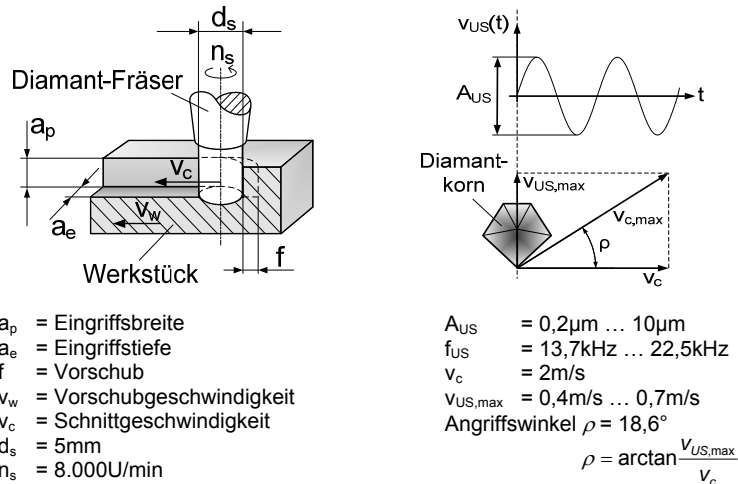


Abbildung 1: Kinematik und Prozesskenngrößen beim ultraschallunterstützten Schleifen

Diese Ultraschallschwingbewegung wird bei der Werkzeuganregung vorzugsweise durch Piezo-Aktuatoren in der Werkzeugaufnahme erzeugt. Das schwingfähige System besteht neben dem Piezo-Aktuator aus der eigentlichen Werkzeugaufnahme, welche als Sonotrode fungiert, sowie einer Verbindung der Sonotrode zum Gehäuse. Diese Verbindung ist konstruktiv mit geringer Steifigkeit ausgeführt, um eine Entkoppelung zwischen Werkzeugaufnahme bzw. Grundmaschine sowie dem Schwingssystem zu

erreichen. Wird die Frequenz im Bereich einer Resonanzstelle gewählt, stellt sich eine Amplitudenüberhöhung in der erzwungenen Longitudinalschwingung ein. In [2] wird die Kinematik des Schleifprozesses untersucht und eine Beziehung für die Eingriffsbahn einer Einzelschneide auf Basis der Polarkoordinaten abgeleitet. Für die ultraschallunterstützte Bearbeitung kann nun folgende Erweiterung angegeben werden.

$$s(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_w \cdot t - (r_s \cdot \sin(\omega_s \cdot t)) \\ r_s \cdot \cos(\omega_s \cdot t) \\ A_{US} \cdot \sin(2\pi \cdot f_{US} \cdot t + \varphi_0) \end{bmatrix} \quad (1)$$

v_w ... Werkstückvorschubgeschwindigkeit
 r_s ... Schleifstiftradius
 ω_s ... Winkelgeschwindigkeit der Schleifscheibe
 A_{US} ... Amplitude der Ultraschallschwingung
 f_{US} ... Frequenz der Ultraschallschwingung
 φ_0 ... Phasenverschiebung der Ultraschallschwingung

Die Bewegungskurve eines Schleifkorns bewirkt einen zeitlich veränderlichen Korneingriff. Dabei kommt es zu einer Überlagerung der einzelnen Schleifkornbahnen, d.h. eine von einem Korn geführte wellenförmige Bahn wird von einem Folgekorn phasenversetzt nachgezogen. Die Phasenverschiebung lässt sich über die Periodendauer der Schwingung und den mittleren Kornabstand ermitteln.

3 Wirkung der Ultraschallschwingung

Aus der Überlagerung der einzelnen Korneingriffe ergibt sich ein veränderlicher Spannungsquerschnitt. Die Vorgänge bei einer duktilen Zerspannung von spröd-harten Werkstoffen werden durch die kritische Spannungsdicke $h_{cu,krit}$ eingegrenzt [1]. In [3] wird ein Berechnungsmodell für den kontinuierlichen Schnitt unter Berücksichtigung eines Oberflächenschädigungsfaktors ψ , der Bruchzähigkeit K_c , der Vickershärte H und des E-Moduls E beschrieben.

$$h_{cu,krit} = \psi \cdot \left(\frac{E}{H}\right) \cdot \left(\frac{K_c}{H}\right)^2 \quad (2)$$

In [4] wird für die Zerspanung von spröd-harten Materialien $\psi = 0,15$ eingesetzt. Für SiSiC ermittelt sich so die kritische Spannungsdicke $h_{cu,krit}$ mit ca. 35nm. Bedingt durch die Eigenschaften von Siliziumkarbid mit hoher Härte und geringer Bruchzähigkeit K_{Ic} neigt das Material beim Materialabtrag verstärkt zu Sprödbruch. Um Ritzversuche (vgl. [5]) mit Ultraschallanregung in SiSiC durchführen zu können, wurde eine Vorrichtung zur Ultraschallanregung unter Einsatz von Piezo-Aktuatorik entwickelt.

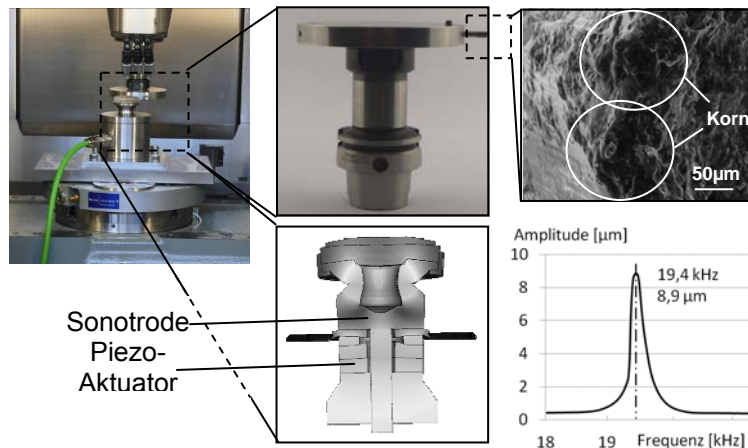


Abbildung 2: Vorrichtung zur Schwingungsanregung von Werkstückproben

Im Gegensatz zum Einkornritzversuch kommt in dieser Versuchsanordnung ein angespitztes Diamant-Werkzeug zum Einsatz, wodurch ein Schneidensegment - hier mit zwei Diamantkörnern - in den Eingriff tritt. Die Wechselwirkung zwischen mehreren Einzelkörnern führt zu einem realitätsnahen Eingriffsverhalten. Mit Beginn der Berührung zwischen Korn und Werkstückwerkstoff kommt es zu einer elastischen Verformung, welche bei

einem weiteren Anstieg der Spannungsdicke zu einer plastischen Verdrängung führt.

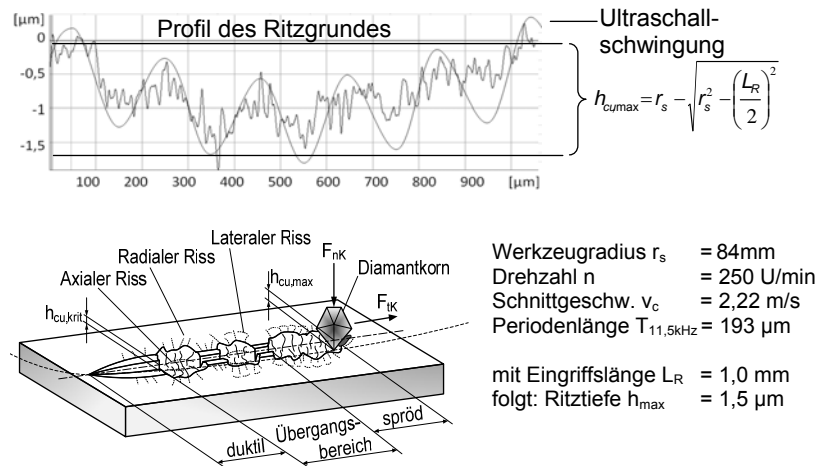


Abbildung 3: Ergebnisse eines Ritzversuches mit Ultraschallanregung in SiSiC

Vor dem im Eingriff stehenden Korn wird Werkstoff bei zunehmender Druckspannung aufgestaut, was letztlich zu einem Abplatzen von Materialpartikeln führt. Durch sprödhartes Materialverhalten kommt es zusätzlich zu einem Materialabtrag neben und auch hinter dem Korn. Die hohe Pressung führt im Werkstoffmaterial zu Rissbildung. Bei entsprechender Größe und Häufigkeit brechen Materialpartikel spröde aus. Das unter dem Korn plastisch verformte Material kann sich nach dem Korneingriff durch den Wechsel von Druck- auf Zugbelastung ablösen. Es bildet sich beim Ritzversuch in SiSiC sowohl mit als auch ohne Ultraschallschwingung kein scharf begrenzter Materialabtrag aus. Bis zu einer Eingriffslänge von ca. 100µm verläuft der Korneingriff duktil. Es kommt zu geringen Ausbrüchen. In weiterer Folge sind Abplatzungen und spröde Ausbrüche deutlich zu erkennen, welche auch in der Breitenausdehnung über die Breite der Ritzspur deutlich hinausgehen.

Die Einwirkung der Ultraschallschwingung ist durch lokale flächige Ausbröckelungen und veränderlicher Ritztiefe in der Periodenlänge erkennbar. Die Wirkung der Schwingung liegt in der Unterstützung des Materialabtrags durch eine periodische Pressungserhöhung mit lokaler Mikrorissbildung und Mikroermüdung.

4 Bearbeitungsversuche in SiSiC

Der Ritzversuch zeigt, dass die hochfrequente Schwingung durch die nahezu punktförmige Einleitung zu einer deutlichen Beeinflussung des Materialabtragsverhaltens führt. Bei der Nutbearbeitung mit Diamant-Fräsern mit voller Überdeckung resultiert eine größere Kontaktfläche zwischen Werkstück und Werkzeug. Um nun den Effekt der Ultraschallanregung im realen Zerspanungsumfeld näher zu beleuchten, wurden Bearbeitungsversuche an einer Gildemeister ULTRASONIC 75 durchgeführt. Tritt das Werkzeug in den Eingriff, kommt es zu einer mechanischen Ankoppelung an das Werkstück.

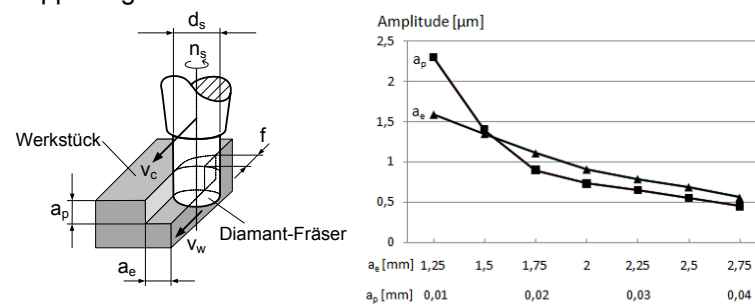


Abbildung 4: Bedämpfung der Amplitudenüberhöhung in Abhängigkeit der Eingriffsgrößen

Dieses Verhalten lässt sich über die Steifigkeit des Kontaktes K_E und die resultierende Dämpfung D_E beschreiben, d.h. $D_E = f(Q_W)$ kann als eine Funktion der Eingriffsgrößen angesehen werden. Die Kontaktdämpfung kann bis zu einer Tilgung der Resonanzeffekte am Werkzeug führen. Die Amplitude der Ultraschallschwingung reduziert sich in etwa auf den Hub des Piezo-Aktuators, wobei in

dieser Betrachtung die konstruktionsbedingt nicht direkt gegebene Wegkoppelung zu berücksichtigen ist.

Zur Untersuchung des Einflusses des Ultraschalls auf die Standzeit der Diamant-Fräser wurden Schnittversuche durchgeführt. Testwerkstücke wurden dabei über Vakuumspanntechnik fixiert. Es wurden Werkzeuge mit Durchmesser 2mm, 2,5mm, 4mm und 5,5mm nach [6] eingesetzt, welche eine Korngröße von D91 und D107 bei einer Konzentration von C200 aufweisen. Die Schnittgeschwindigkeit ist durch die maschinenspezifisch maximal mögliche Drehzahl mit Ultraschalleinsatz limitiert, woraus für den Durchmesser 5,5mm eine Schnittgeschwindigkeit $v_c = 138\text{m/min}$ resultiert. Gemäß der Schnittdatenempfehlung für Diamant-Fräser wird eine Werkstückgeschwindigkeit von $v_w = 0,4\text{m/min}$ gewählt. Dies entspricht einem Geschwindigkeitsverhältnis von $q = 345$. Bei einem Arbeitseingriff $a_e = 5,5\text{mm}$, d.h. voller Überdeckung, ergibt sich die mittlere Spanungsdicke mit

$$h_m = \frac{\lambda_{Ke}}{q} \cdot \sqrt{\frac{a_e}{D_s}} \quad (3)$$

zu $h_m = 0,49\mu\text{m}$. Die Eingriffsbreite wurde mit $a_p = 0,02\text{mm}$ gewählt. Die Bearbeitung erfolgte unter Einsatz eines nicht wasser-mischbaren Bearbeitungsöls mit einer Viskosität $\nu = 7,9\text{mm}^2/\text{s}$. Abbildung 5 zeigt den Werkzeugverschleiß eines Werkzeuges mit Durchmesser 2mm und 4mm jeweils zu vier Zeitpunkten. Mit der Reduktion der Werkzeuglänge erfolgt auch eine Abflachung. Als Standzeitkriterium wurde der Anstieg der Vorschubkraft herangezogen. Die Grafik zeigt den Werkzeugverschleiß in Abhängigkeit des zerspannten Volumens (G-Faktor). In den Versuchen zeigt sich, dass der Einsatz der Ultraschallschwingung zu einer signifikanten Steigerung der Standzeit führt. Ohne Ultraschallanregung kommt es zu einem Erreichen des Standzeitendes nach ca. 1 - 2 Stunden. Es tritt bei kleinen Werkzeugdurchmessern auch der Effekt des Zusetzens der Kühlschmierstoffbohrung im Werkzeug-schaft durch Späne zu Tage. Zum Vergleich kann das Werkzeug mit Durchmesser 4mm mit Ultraschallanregung bis zu 9 Stunden eingesetzt werden. Vordergründig sind die günstigere Spülwirkung und damit auch der Späne- und Wärmeabtransport für eine

höhere Standleistung verantwortlich. Die hochfrequente Anregung des Werkzeuges zeichnet sich dabei auf der Werkstückoberfläche ab, führt jedoch nicht zu einer Verschlechterung der Rauheitskennwerte.

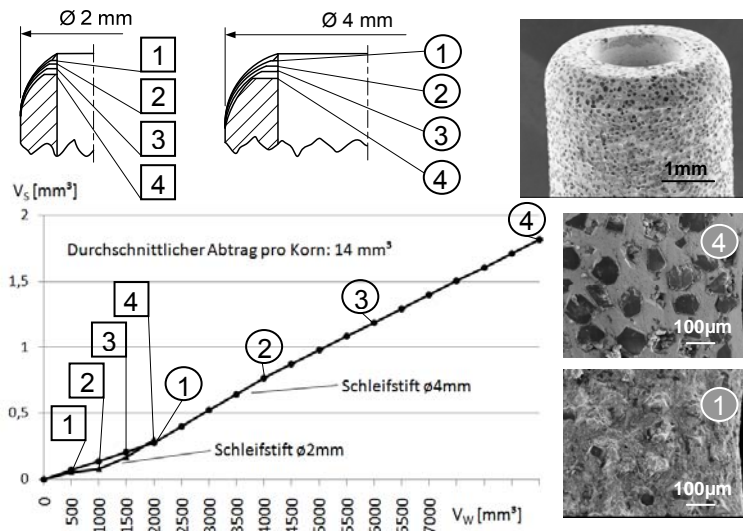


Abbildung 5: SiSiC-Bearbeitungsversuche unter Einsatz von Diamant-Fräsern mit Ultraschallanregung, Durchmesser 2 mm und 4 mm, Körnung D107/C200, $n = 8.000 \text{ U/min}$, $v_w = 400 \text{ mm/min}$, $a_p = 0,02 \text{ mm}$

Durch die Materialeigenschaften von infiltriertem Siliziumkarbid kommt es zu deutlichen Kantenausbrüchen im Gegenlaufbereich. Diese können durch den Einsatz der Ultraschallschwingungen nicht signifikant reduziert werden. Hier empfiehlt sich die Anpassung der Bearbeitungsstrategie.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In der Optimierung von Fertigungsverfahren eröffnet die Hybridbearbeitung eine Reihe von Möglichkeiten der prozesstechnischen Einflussnahme. Das Einleiten einer Ultraschallschwingung

in die Schleifbearbeitung bewirkt zum einen ein hochfrequentes Auftreten von Spannungsspitzen am Schneidkorn und damit kurzzeitige Erhöhungen der Druckspannungen im Werkstückmaterial. Daraus resultieren spröde Materialausbrüche und Mikrorisse. Zum anderen führt die Ultraschallbewegung auch zu einer Begünstigung der Kornkühlung und der Spänespülung.

Für die Schnittdaten im Bearbeitungsversuch resultieren Bröckelspäne in der Größenordnung von $1\mu\text{m}$ bis $25\mu\text{m}$. Zu empfehlen ist die innere Kühlschmierstoffzufuhr. Für die Bearbeitung von infiltriertem Siliziumkarbid (SiSiC) konnte gezeigt werden, dass die Einkoppelung der Ultraschallbewegung in Abhängigkeit des Zeitspannvolumens zwar zu einer Bedämpfung der Ultraschallbewegung führt, jedoch signifikante Steigerungen in der Standzeit der Werkzeuge erreicht werden. Die Ultraschallanregung erfolgt hierbei in vertikaler Richtung (Z-Achse) zur Vorschubbewegung.

Weiterführende Ansätze lassen den Einsatz von zumindest zweiachsigen Relativbewegungen zielführend erscheinen. Die aus der Trochoiden-Bearbeitung oder helikalen Bohrbearbeitung bekannten Effekte könnten derart bei hoher Frequenz umgesetzt werden.

Literatur

- [1] Wenda, A.: Schleifen von Mikrostrukturen in sprödharten Werkstoffen, Dissertation TU Braunschweig, Vulkan Verlag, Essen, 2002, ISBN 3-8027-8668-8
- [2] Osterhaus, G.: Verfahrensübergreifende Simulation und Auslegung von Schleifprozessen. Dissertation, RWTH Aachen, 1994
- [3] Bifano, T. G., Dow, T. A.; Scattergood, R. O.: Ductile-Regime Grinding: a New Technology for Machining Brittle Materials, Journal of Engineering for Industry, Vol. 113, no. 2, S. 184-189, 1991
- [4] Klocke, F., König, W.: Fertigungsverfahren 2, Schleifen, Hohen, Läppen, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2005
- [5] Zapp, M.: Ultraschallunterstütztes Schleifen von Hochleistungskeramiken, Produktionstechnischer Bericht Universität Kaiserslautern, Band 30, 1998, ISSN 0937-9061
- [6] Katalog Fa. EFFGEN, <http://www.effgen.de>, 06.07.2010