DISS. ETH Nr. 20833

ZERSPANUNG ULTRAHARTER KERAMIK AM BEISPIEL EINER DREIGLIEDRIGEN ZAHNBRÜCKE

ABHANDLUNG
zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER WISSENSCHAFTEN

der

ETH Zürich

vorgelegt von

NICOLAS JOCHUM

Dipl.-Ing., Technische Universität Darmstadt

geboren am 07.11.1978

von
Wiesbaden, Deutschland

Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr.-Ing. Konrad Wegener, Referent (ETH Zürich)
Prof. Dr. Eng. Rolf Bertrand Schroeter, Korreferent (UFSC)
Dr. sc. techn. Friedrich Kuster, Korreferent (ETH Zürich)

2013

Berichte aus der Fertigungstechnik

Nicolas Jochum

Zerspanung ultraharter Keramik am Beispiel einer dreigliedrigen Zahnbrücke

Shaker Verlag
Aachen 2016

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Zugl.: Zürich, ETH, Diss., 2013

Copyright Shaker Verlag 2016
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4280-1
ISSN 0945-0769

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

VORWORT

Ich danke Herrn Prof. Dr. Wegener, welcher die Dissertation ermöglicht und begleitet hat, durch zahlreiche Ideen und konstruktiver Kritik zum Gelingen beigetragen und immer wieder neue und andere Sichtweisen auf die Thematik und die Arbeit insgesamt eingebracht hat.

Herrn Prof. Dr. Rolf Schroeter möchte ich für seine grosse Hilfestellung bei der Ausarbeitung, der kritischen Durchsicht meiner Arbeit, die gemeinsamen Projekte und die vielen fachlichen Diskussionen danken. Ebenso gebührt Herrn Dr. Fredy Kuster mein Dank für die mannigfache Hilfe, die zahlreichen gemeinsamen Vorhaben und für die sowohl fachlichen, wie auch weitergehenden Diskussionen, welche allesamt sehr hilfreich waren.

Den Kollegen und Studenten (Studien- Bachelor und Masterarbeiten) für ihren Beitrag zu dieser Arbeit und sonstiger Unterstützung gilt ebenfalls mein Dank. Insbesondere denjenigen möchte ich danken, welche zu meiner Integration in das Institut und die Schweiz insgesamt beigetragen haben, sowie für die vielen gemeinsamen und teambildenden Aktivitäten, welche eine grosse Stärke, einen wichtigen Ausgleich und wesentliche Hilfestellung für den Einbezug in das gemeinsame Institutsleben darstellten.

Dank gilt ebenfalls der KTI und den Projektpartnern für die Unterstützung der Projekte und der darüber hinausgehenden Hilfestellungen hinsichtlich fachlicher und materieller Unterstützung. Insbesondere Herrn Dr. Stefan Köbel möchte ich für die fachlichen Diskussionen zum Thema Keramiken, ihre Zerspanung und die beobachteten Phänomene, sowie die immer unproblematische und unbürokratische Versorgung mit Versuchsmaterial danken.

Dank gebührt auch meinen Eltern und Schwiegereltern für die vielseitige Unterstützung. Besonderer Dank für die viele Geduld, sehr grosse Hilfe und Unterstützung parallel zur zweiten Schwangerschaft im alltäglichen Familienleben gebührt meiner Frau Angela. Ohne die vielen Entbehrungen, welche sie auf sich genommen hat, wäre die Arbeit nicht möglich gewesen. Meinen beiden Söhnen Benedikt und Lukas danke ich für die schönen abwechslungsreichen Stunden neben dem Verfassen meiner Dissertation.

Nicolas Jochum

Zürich, den 22.10.2012

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort ..... **I**

Inhaltsverzeichnis ..... **II**

Formelzeichen und Abkürzungen ..... **VI**

Kleinbuchstaben VI

Großbuchstaben IX

Griechische Buchstaben XII

Abkürzungen und Begriffe XIII

Abstract ..... **XV**

Kurzfassung ..... **XVI**

1 Einleitung, Ausgangslage und Motivation **1**

1.1 Ausgangslage, Marktanalyse und Trend 1

1.1.1 Beispiele für keramische Anwendungen, technische Bauteile 2

1.1.2 Beispiele für keramische Anwendungen, Medizinalprodukte 6

1.1.3 Beispiele für keramische Anwendungen, Dentalprodukte 7

1.2 Motivation der Arbeit 8

2 Stand der Technik – werkstoffkundliche und technologische Grundlagen **10**

2.1 Einteilung und Herstellung der Keramik 10

2.1.1 Aspekte zur sintertechnologischen Herstellung von Keramik 11

2.1.2 Kristallographische Struktur und Modifikationen von ZrO_2 12

2.2 Systematik und Modelle des Materialabtrags 15

2.2.1 Festigkeit, Rissmodi und Rissbildung bei Keramik 15

2.2.2 Erhöhen der Zähigkeit von Keramik 18

2.2.3 Phasen, Zonen und Abtragsmechanismen beim Schleifen 20

2.2.4 Unterteilung der duktilen und spröden Werkstofftrennung 23

2.2.5 Duktile Werkstofftrennung sprödharter Werkstoffe 25

2.2.6 Spröde Werkstofftrennung, Abtragsmechanismen für spröde Werkstoffe 28

2.3 Möglichkeiten der Ultrahartbearbeitung – technologische Grundlagen 30

2.3.1 Stand der Technik in der Bearbeitung gesinterter und gehipter Keramiken 30

2.3.2 Stand der Technik im Bereich der Fertigung von 3-gl. Zahnbrücken 32

2.3.3 Herausforderung und gängige Lösungen für KS-Systeme 34

2.4 Ziel und Inhalt der Arbeit ... 36
3 Untersuchungen zum Materialabtrag ... 38
3.1 Einzelkornritzversuche ... 38
3.1.1 Versuchsstand und Durchführung ... 38
3.1.2 Einteilung der Körner ... 43
3.2 Versuchsauswertung der Einzelkornritzversuche ... 44
3.2.1 Verhalten und Verschleiss der Diamanten ... 44
3.2.2 Charakterisierung des Materialabtrages und des Spanbildes ... 50
3.2.3 Kritische Spanungsdicke nach Bifano für ZrO_2 ... 61
3.2.4 Berechnung der Spanungsdicke ... 63
3.3 Zerspanungsversuche ... 66
3.3.1 Aufbau des Prüfstandes ... 66
3.3.2 Versuchsdurchführung ... 69
3.4 Abtragsmechanismus und Schädigung durch den Schleifprozess ... 72
3.4.1 Sichtprüfung ... 74
3.4.2 4-Punkt-Biegeprüfung ... 90
3.4.3 Röntgendiffragtometrische Untersuchungen ... 92
4 Untersuchungen des Werkzeugverhaltens ... 95
4.1 Charakterisierung der Werkzeuge ... 95
4.1.1 Zusammensetzung und Charakterisierung des Abrasivbelages ... 95
4.1.2 Weitere Charakterisierungsmerkmale der Werkzeuge ... 100
4.1.3 Werkzeugvermessung von Durchmesser und Länge ... 104
4.2 Abrichten der Werkzeuge ... 105
4.3 Standzeit der Schleifwerkzeuge ... 107
4.3.1 Werkzeugeingriff im Standzeitversuch ... 107
4.3.2 Umgesetzte Leistung, Energie- und Wärmeeintrag ... 109
4.3.3 Analyse der Werkzeuge nach den Versuchen ... 114
4.3.4 Standzeitbetrachtungen, Kräfte und erreichte G-Werte ... 119
4.3.5 Empirische Modelle der Zerspankraft für duktilen Materialabtrag ... 125
4.3.6 Dimensionslose Betrachtung der Zerspanungskraft ... 126
4.3.7 Konzept der Schleifkraft für die sprödharte Zerspanung ... 128
4.3.8 Standzeitkonzept ... 130

5 Untersuchungen und Umsetzung der Fertigung einer dreigliedrigen Zahnbrücke 133

5.1 Funktionsweise und Nomenklatur einer drei-gliedrigen Zahnbrücke..... 135

5.2 Aufbau des Prüfstandes..... 136

5.3 Prozesskette und Systembeschreibung CAD-CAM..... 137

5.4 Umsetzung der Fertigung 140

5.4.1 Kriterien der Programmierung..... 144

5.4.2 Herausforderungen der CAM-Programmierung 145

5.4.3 Beispiel für die Optimierung der CAM-Strategien 147

5.4.4 Untersuchung der Zahnbrücken nach Schädigung durch die Fertigung..... 150

5.5 Vergleich der Wirtschaftlichkeit zwischen der Herstellung einer 3-gl. Zahnbrücke aus ZrO_2 oder Titan..... 151

5.5.1 Annahmen und Titanreferenzprozess..... 151

5.5.2 Berechnung der Zerspanungszeiten und Zerspanungskosten..... 155

5.5.3 Berechnung der Fertigungskosten und Vergleich..... 157

5.5.4 Anmerkungen, Vor- und Nachteile der beiden Verfahren..... 158

6 Auslegung und Einsatz der Kühlschmierung für die 3D-Keramikbearbeitung.....162

6.1 Anforderungen und Aufgaben des KS-Systems..... 164

6.2 Auslegung des KS-Systems über den benötigten Volumenstrom 167

6.2.1 Bestimmung des KSM-Volumens in der Werkzeugoberfläche 167

6.2.2 Bestimmung des KSM-Volumens aufgrund der eingebrachten Energie 168

6.2.3 Auslegung der Kanäle in der Kühlschmiermitteldüse 171

6.2.4 Bestimmung des KSM-Volumenstroms über die Düsengeometrie 172

6.3 Umsetzung der Kühlschmierdüse..... 174

7 Schlussfolgerung 176

7.1 Zusammenfassung..... 176

7.2 Ausblick..... 178

8 Literaturverzeichnis 183

A Anhang 193

A.1 Bilder & Materialabtrag von Einzelkornritzversuchen 193

A.2 Messungen von Traglastkurven..... 201

A.3 Beispielmessungen zu Standzeitversuchen..... 202

A.4 ZrO_2-Datenblatt der Metoxit AG 203

A.5 Datenblatt Kühlschmiermittel Blaser Blasogrind HC 5 204
A.6 Preis für 3gl-Zahnbrücken 205
A.7 Publikationsliste 206

FORMELZEICHEN UND ABKÜRZUNGEN

Kleinbuchstaben

Variable	Einheit	Beschreibung
a	[-]	Anzahl benötigter Werkzeuge
a_e	[mm]	Zustellung, Arbeitseingriff
a_g	[µm]	Ritzkornzustellung
$a_{g,\,crit}$	[µm]	kritische Einzelkornspanungsdicke / Ritzkornzustellung
a_p	[mm]	Eingriffsbreite
a_R	[mm]	Risslänge
b_s	[mm]	Schneidenbreite
b_{Ritz}	[µm]	allgemeine Ritzbreite entsprechend zu b_s
$b_{Ritz\,R}$	[µm]	Breite der Rille innerhalb welcher es zur Volumenabnahme durch den Materialabtrag kommt
$b_{Ritz\,g}$	[µm]	gemessene Ritzbreite
c	[J/kgK]	spezifische Wärmekapazität
c_{WS}	[-]	Konstante für Werkstück, häufig mit c_{GW} (grinding wheel) bezeichnet
c_{WZ}	[-]	Konstante für Werkzeug, häufig mit c_{WP} (workpiece) bezeichnet
c_p	[J/kgK]	spezifische Wärmekapazität bei konst. Druck (isobar)
d	[-]	Geschwindigkeitsverhältnis
d_{eq}	[mm]	äquivalente Durchmesser entspricht der Summe der Kehrwerte von Werkzeug- und Werkstückdurchmesser
d_h	[mm]	hydraulische Durchmesser
d_{WS}	[mm]	Werkstückdurchmesser
d_{WZ}	[mm]	Werkzeugdurchmesser

Variable	Einheit	Beschreibung
d_k	[mm]	nomineller Durchmesser eines Korns (Abrasiv)
e_1	[-]	Exponent 1, Kraftmodell nach Tönshoff
e_2	[-]	Exponent 2, Kraftmodell nach Tönshoff
e_3	[-]	Exponent 3, Kraftmodell nach Tönshoff
f	[Hz]	Frequenz
h_{eq}	[µm]	äquivalente Spanungsdicke
h_{cu}	[µm]	mittlere Spanungsdicke (Eindring-/Eingriffstiefe der Schneide)
$h_{cu\ crit}$	[µm]	kritische Spanungsdicke (Eindringtiefe / Schnitttiefe)
$h_{cu\ eff}$	[µm]	effektive Spanungsdicke
$h_{cu\ max}$	[µm]	maximale Spanungsdicke
h_{KWZ}	[mm]	Höhe der Radiusmessung beim Kugelwerkzeug
k_0	[mm^{-3}]	Steigung der Schneidendichte C(z), differenzielle Schneidendichte
l	[mm]	Profillänge (Aliconasoftware)
l_g	[mm]	geometrische Kontaktlänge
l_e	[mm]	effektive Kontaktlänge
l_{SK}	[mm]	Länge des Strömungskanals
n	[-]	Standmenge
n_{WZ}	[1/min]	Drehzahl Werkzeug
n_{SB}	[1/min]	Drehzahl Schleifscheibe
n_{AB}	[1/min]	Drehzahl der Abrichtscheibe
p	[Pa]	Druck
q	[-]	Geschwindigkeitsverhältnis, Schleifen = v_s/v_{ws}
q_d	[-]	Geschwindigkeitsverhältnis Abrichten = $v_{s,abr}/v_s$
$q_{Q'W}$	[-]	bezogenes Zeitspanungsverhältnis $Q'_{W,\ Ti}/Q_{W,\ ZrO2}$

Variable	Einheit	Beschreibung
r_{HS}	[mm]	Radius (radial) des Hartmetallschaftes der Werkzeuge
r_{min}	[mm]	minimaler Bahnradius der Verfahrbahn des Werkzeuges
r_{WZ}	[mm]	Werkzeugradius, radial von Werkzeugachse aus und ist bei Kugelwerkzeugen eine Funktion der Höhe
$r_{WZ\,EK}$	[mm]	Werkzeugradius bei Diamant bei Einzelkornritzversuch
r_{KWZ}	[mm]	Kugelradius für den Nenndurchmesser der Kugelwerkzeuge
s_{EK}	[mm]	Sehnenlänge bei Einzelkornritzversuch
t_h	[hh:mm:ss]	Hauptzeit
t_k	[s]	Kontaktzeit
t_n	[hh:mm:ss]	Nebenzeit
t_{Zer}	[hh:mm:ss]	Zerspanungszeit
$t_{Zer/P}$	[hh:mm:ss]	Zerspanungszeit pro Prozessschritt
u_{KSM}	[m/s]	Kühlschmiermittelgeschwindigkeit
u	[m/s]	Strömungsgeschwindigkeit
$\bar{u}$	[m/s]	mittlere Strömungsgeschwindigkeit
v_{abr}	[m/s]	Abrichtgeschwindigkeit
v_c	[m/s]	Schnittgeschwindigkeit
v_f	[mm/min]	Vorschubgeschwindigkeit
v_{KSM}	[m/s]	Geschwindigkeit des Kühlschmiermittelstrahls bei Düsenaustritt
v_s	[m/s]	Schleifgeschwindigkeit, Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit
v_w	[m/s]	Wirkgeschwindigkeit, Vektoraddition v_s bzw. v_c und v_f
z	[mm]	Schneidenraumtiefe
z_{max}	[mm]	maximale Schneidenraumtiefe

Großbuchstaben

Variable	Einheit	Beschreibung
A_{AP}	[mm^3]	Kontaktfläche der Abrasivpartikel mit Werkstück
A_G	[mm^3]	geometrische Kontaktfläche
A_K	[mm^3]	geometrische Kontaktfläche
C_{max}	[mm^{-2}]	maximale Schneidendichte, wird für $C(z=z_{max})$ erreicht, entspricht auch der in der Literatur mit N_A bezeichnet Schneidendichte
C_{stat_1}	[mm^{-2}]	statische Schneidendichte bezogen auf die Schneidenraumtiefe z_S = 1 mm
$C(z)$	[mm^{-2}]	Korn-/ Schneidendichte als Funktion der Schneidenraumtiefe
E	[N/mm^2]	E-Modul
E''_c	[J/mm^2]	kontaktflächenbezogene Energie
F	[N]	Kraft
$F_{i,a}$	[N]	Einzelkorn, Nr. i: Schneidenaxialkraft (nach CIRP: f_a)
$F_{i,n}$	[N]	Einzelkorn, Nr. i: Schneidennormalkraft (nach CIRP: f_n)
$F_{i,t}$	[N]	Einzelkorn, Nr. i: Schneidentangentialkraft (nach CIRP: f_t)
F_k	[N]	Kraft an einem einzelnen Korn (nach CIRP: f_k)
F_{sd}	[N]	Zerspankraft für sprödharte Materialtrennung (duktil und spröde)
F_n	[N]	Normalkraft
F'_n	[N/mm]	bezogene Normalkraft
F_t	[N]	Tangentialkraft
F'_t	[N/mm]	bezogene Tangentialkraft
F_{vf}	[N]	Kraft in Vorschubrichtung, Vorschubkraft
F'_{vf}	[N/mm]	bezogene Vorschubkraft
F_c	[N]	Schnittkraft

Variable	Einheit	Beschreibung
G	[J]	Enthalpie
H	[HV]	Vickershärte
K_{Ic}	[MN/m$^{3/2}$]	Risszähigkeit
K_F	[CHF]	Fertigungskosten
$K_{F/n}$	[CHF]	Fertigungskosten pro Werkstück
K_{lauf}	[CHF/h]	Kostensatz der laufende Kosten
K_{Masch}	[CHF/h]	Maschinenkostensatz, gesamte Maschinenkosten, Summe aus laufenden und Anschaffungskosten der Werkzeugmaschine
K_{WZ}	[CHF]	Werkzeugkosten
K_{WZ}	[CHF]	Werkzeugkosten pro Werkstück
K_{WZM}	[CHF/h]	Anschaffungskosten der Werkzeugmaschine
K_{Zer}	[CHF]	Zerspanungskosten
$K_{Zer/n}$	[CHF]	Zerspanungskosten pro Werkstück
$K_{Zer/P}$	[CHF]	Zerspanungskosten pro Prozessschritt
L_c	[µm]	LambdaC: Grenzwellenlänge (Aliconasoftware)
P	[-]	Index für Prozessnummer (-schritte)
P_c	[W]	Schnittleistung
P'_c	[W/mm]	bezogene Schnittleistung
P''_c	[W/mm^2]	bezogene Schnittleistung pro Kontaktfläche
P_{tot}	[-]	Anzahl der Prozesse (Index) für Werkstücknummer
Q	[m³/s]	Volumenstrom
Q_W	[mm³/s]	Zeitspanungsvolumen
Q'_W	[mm³/(mm s)]	bezogenes Zeitspanungsvolumen (auf 1 mm Scheiben-Breite bezogen)
$Q'_{W,Ti}$	[mm³/(mm s)]	bezogenes Zeitspanungsvolumen der Titanzerspanung

Variable	Einheit	Beschreibung
$Q'_{W,ZrO2}$	[mm³/(mm s)]	bezogenes Zeitspanungsvolumen der ZrO_2-zerspanung
R_k	[µm]	Kernrautiefe
R_{mr1}	[%]	Materialanteil der Spitzen über Kernbereich
R_{mr2}	[%]	Materialanteil der die Last trägt
R_{pk}	[µm]	reduzierte Spitzenhöhe
R_{vk}	[µm]	reduzierte Riefentiefe
S	[-]	Schärfemass, Quotient aus h_{cu} und ρ_s
T_μ	[µm]	Schnitteinsatztiefe
V_W	[mm³]	Zerspanungsvolumen
V'_W	[mm³/mm]	bezogenes Zerspanungsvolumen
$\dot{V}_C$	[l/min]	Kühlschmiermittelvolumenstrom, welcher aufgrund der eingebrachten Schnittleistung P_C notwendig ist
$\dot{V}_{KSM}$	[l/min]	gesamte Kühlschmiermittelvolumenstrom, welcher in der WZM am WZ zur Verfügung steht
$\dot{V}_{WZ}$	[l/min]	Kühlschmiermittelvolumenstrom, welcher aufgrund der WZ-Oberfläche / Poren mitgenommen werden kann
W	[-]	Verteilungsfunktion (Weibull)
X_s	[%]	prozentualer Anteil an Körnern/Schneiden, welche aufgrund ihres Kornüberstandes zu $h_{cu} > h_{cu\ crit}$, also zu spröden Zerspanverhalten führen
X_d	[%]	prozentualer Anteil an Körnern/Schneiden, welche aufgrund ihres Kornüberstandes zu $h_{cu} < h_{cu\ crit}$, also zu duktilem Zerspanverhalten führen

Griechische Buchstaben

Variable	Einheit	Beschreibung
α	[°]	Freiwinkel
β	[°]	Keilwinkel
γ	[°]	Spanwinkel
ε	[°]	Voreilwinkel
η	[-]	Verhältnis von Kontaktflächen A_{AP} zu A_g
θ	[°]	Schneidenwinkel, orthogonal zur Schnittrichtung
κ	[-]	Rohrreibungszahl
λ	[W/(mK)]	Wärmeleitfähigkeit
μ	[-]	Schnittkraftverhältnis
ν	[-]	Schneidenformfaktor
ρ	[kg/m^3]	Dichte
ρ_S	[]	Schneiden(-rundungs)radius
τ	[°]	Winkel zwischen KSM-Strahl und Werkzeugachse
φ	[°]	Kippwinkel / (Seiten-)Neigungswinkel / Seitwärtswinkel
ψ	[]	Oberflächenschädigungsfaktor

Abkürzungen und Begriffe

Zeichen	Beschreibung
3-gl.	dreigliedrig
Al_2O_3	Aluminiumoxid
Al_2TiO_5	Aluminiumtitanat, kurz ATi
bez.	bezogenes
CaO	Calziumoxid
CBN	kubisch kristallines Bornitrid
CeO_2	Cer(IV)-oxid, weitere Oxide sind Ce_2O_3 und Ce_3O_4
CIP	cold isostatic pressing
CoCr	Kobalt-Chrom
CT	röntgen Computertomographie
DCM	Direct Ceramic Machining
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
G-Wert	Abtragsverhältnis des Zerspanungsvolumens von Werkstück zu Abtragsvolumen am Werkzeug
HIP	hot-isostatic-postcompaction / heiss-isostatisch-nachverdichtet
IWF	Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung der ETHZ
IPW	In Process Workpiece
KS-	Kühlschmier-
KSM	Kühlschmiermittel
Mikron GF AC	Firmenbezeichnung für Produktbereich Mikron im Verbund GF AgieCharmilles
MgO	Magnesiumoxid
PKD	Polykristalliner Diamant
plast.	plastisch

Zeichen	**Beschreibung**
REM	Rasterelektronenmikroskop
SiC	Siliciumcarbid
SiSiC	Reaktionsgebundenes siliciuminfiltriertes Siliciumcarbid
TZP	Tetragonal Zirconia Polycrystals
US	Ultraschallunterstützt
USD	US-Dollar
vs.	versus, gegen
WS	Werkstück
WZ	Werkzeug
WZM	Werkzeugmaschine
XRD	Röntgendiffraktometrie
Y_2O_3	Yttriumoxid
ZrO_2	Zirconiumdioxid, Trivialname Zirkonoxid
Braunling	Der Ausdruck ist das Pendant zum Weissling für metallische Pulver und wird beim Pulverspritzguss verwendet.
Grünling oder Grünkörper	Pressling ohne Wärmebehandlung aus Keramikpulver und Bindemittel. Objekt ist kreideweich, linearer Schwund von mehr als 25 %.
Weissling oder Weisskörper	Vorgesinterter Rohling, die organischen Presshilfsmittel haben sich verflüchtigt, der Schwund beträgt beim Vorsintern ~5 %, beim Nachsintern ist mit ~20 % Schwund zu rechnen.

ABSTRACT

The main objective of this work is the better understanding of the removal mechanisms involved in machining ultra-hard ceramics and the proof of the process capability with the example of the machining of ZrO_2-Ceramics for medical applications under both technological and medical aspects.

The process boundaries, for high material removal rates and low tool wear and the transition from brittle to ductile failure in chip generation were identified in grinding tests using diamond grinding wheels. For the validation and verification of the obtained results, especially regarding the ductile removal behavior at sufficiently small chip thickness, single grain scratch tests were performed. These tests offer the advantage of the possibility to analyze the material removal mechanisms and process variables like the forces, chip thickness and the groove topography during and after the interaction of single grains with the workpiece. The transferability of the identified variablesand the proof of the process capability of jig grinding to manufacture complex workpiece geometries and the functionality of the digital process chain for this grinding method were verified based on the manufacture of a ceramic dental bridge. Investigations of workpiece damage and the type of the removal mechanism were carried out by means of optical analysis (optical and scanning electron microscopy), four point bending test and X-ray diffraction.

Using the developed optimized process parameters and correct application of the cutting, no significant workpiece damage is evident and high G-ratios are achieved (i.e. low grinding wheel wear). Furthermore the analysis showed up to 98% of the material removal occurs in the ductile regime, which means that models can be used for the prediction of the process forces, the material removal behavior and the chip thickness according to Bifano for ductile removal. As part of this investigation, a mock-up ceramic dental bridge was machined within only 60 minutes from ultra-hard material.

In summary, it can be stated that, jig grinding is a process capable to machine ultra-hard ceramics from the economic, technological and medical point of view. The correct cutting fluid application is essential in this context. Among the major findings are the absence of significant process-related workpiece damages, predominantely ductile regime of material removal in grinding of zircone oxide; and the suitability proposed machining process is suitable to manufacture complex workpiece geometries as for example ceramic dental implant bridges.

KURZFASSUNG

Ziel der Arbeit ist ein besseres Verständnis für den Abtragsmechanismus der Ultrahartbearbeitung von Keramiken im gesinterten und nachverdichteten Zustand sowie das Aufzeigen der Prozessfähigkeit an einem praxisnahen Beispiel aus einer ZrO_2-Strukturkeramik zur Beurteilung einer wirtschaftlichen Fertigung unter technologischen und medizinischen Aspekten.

Zur Identifizierung der Prozessgrenzen unter den Gesichtspunkten möglichst hoher Abtragsraten und Werkzeugstandzeiten sowie der duktilen und spröden Abtragsarten wurden Standzeitversuche mit Diamantwerkzeugen durchgeführt. Zur Validierung und Verifizierung dieser Ergebnisse, insbesondere hinsichtlich des duktilen Abtragsverhaltens der ZrO_2-Strukturkeramik bei genügend kleinen Spanungsdicken, wurden die Zerspanungsmechanismen mit Einzelkornritzversuchen untersucht. Diese bieten eine vielversprechende Methode, die Abtragsmechanismen und vorliegenden Prozessgrössen (z.B. Prozesskraft, Spanungsdicken, Ritztopographie etc.) während der Interaktion einzelner Körner mit dem Material zu untersuchen, da der Schleifspalt messtechnisch kaum zugänglich ist. Die Übertragbarkeit der ermittelten Grössen sowie die Funktionsfähigkeit der digitalen Prozesskette für das Koordinatenschleifen und somit der Nachweis der Prozessfähigkeit für die 3D-Bearbeitung mit bis zu fünf simultanen Achsen erfolgt anhand der Fertigung einer dreigliedrigen Zahnbrücke. Die Untersuchung der Bauteilschädigung und des Materialabtrags wurden mittels Optischem- und Rasterelektronenmikroskop, 4-Punkt-Biegeprüfung sowie röntgendiffraktometrischen Analysen umgesetzt.

Für die vorliegenden Prozessgrössen und die gefundenen Prozessfenster liegt bei ausreichenden Kühlschmierbedingungen keine signifikante Schädigung der Bauteile vor und es können sehr hohe G-Werte erreicht werden. Des Weiteren zeigen die Untersuchungen, dass der Materialabtrag mit einem Anteil von bis zu 98 % im duktilen Bereich stattfindet, sodass Modelle, wie z.B. zur Beschreibung der Prozesskräfte, des Abtragsverhaltens für duktile Zerspanung sowie der kritischen Spanungsdicke nach Bifano angewendet werden können. Im Rahmen dieser durchgeführten Untersuchungen konnte eine dreigliedrige Dummybrücke im harten Zustand in einer Zeit von 60 min gefertigt werden.

Zusammenfassend zeigt sich, dass eine Bearbeitung im gesinterten und nachverdichteten Zustand unter technischen, medizinischen und wirtschaftlichen Aspekten möglich ist, wobei die Kühlschmierbedingungen eine essentielle Rolle spielen. Wesentliche Erkenntnisse sind weiterhin, dass keine prozessbedingte Schädigung der Oberfläche vorliegt, die Abtragsmechanismen für die ZrO_2-Struturkeramik überwiegend duktil verläuft und die Wirtschaftlichkeit für komplexe Bauteile, wie direkt implantierbare Zahnbrücken, gegeben ist.