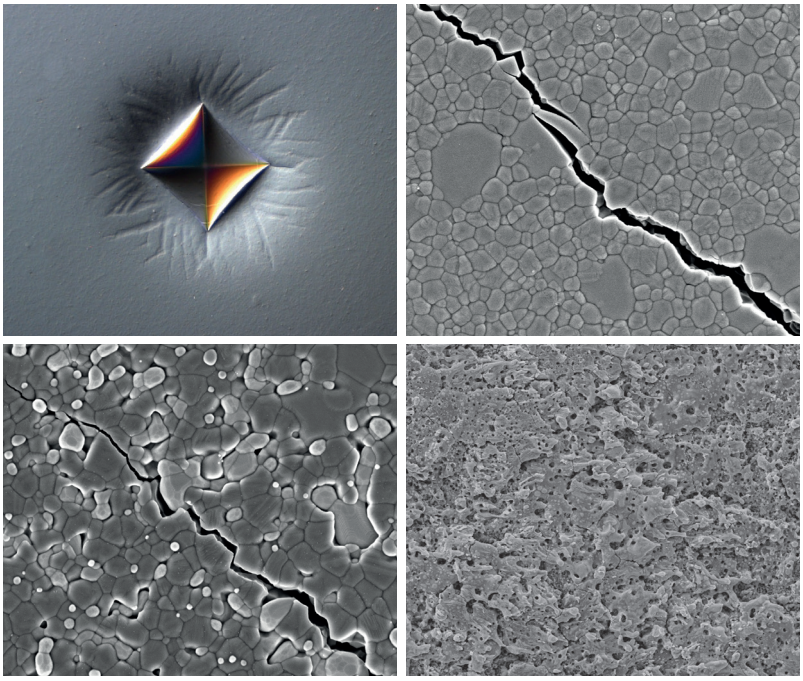
Forschungsberichte des

Institutes für Fertigungstechnologie keramischer Bauteile (IFKB)
Herausgeber: o. Prof. Dr. rer. nat. Dr. h.c. mult. Rainer Gadow

Andrea Gommeringer

Erodierbare Hochleistungskeramiken mit Zirkoniumdioxidmatrix



Universität Stuttgart

Erodierbare Hochleistungskeramiken mit Zirkoniumdioxidmatrix

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde einer Doktor-Ingenieurin (Dr.-Ing.) genehmigte
Abhandlung

Vorgelegt von

Andrea Gommeringer

aus Herrenberg

Hauptberichter: apl. Prof. Dr. Frank Kern
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. Dr. h. c. Siegfried Schmauder

Tag der mündlichen Prüfung: 19.03.2021

Institut für Fertigungstechnologie keramischer Bauteile (IFKB)
der Universität Stuttgart

2021

Forschungsberichte des Instituts für
Fertigungstechnologie keramischer Bauteile (IFKB)

Andrea Gommeringer

Erodierbare Hochleistungskeramiken mit Zirkoniumdioxidmatrix

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Düren 2021

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.: Stuttgart, Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8007-0
ISSN 1610-4803

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort und Danksagung

Die Entstehung dieser Arbeit war nur dank der Unterstützung Vieler möglich. Ich möchte daher gerne ein paar besonderen Menschen danken, die mich in dieser Zeit unterstützt haben.

Der größte Dank gilt meinem Doktorvater und Hauptberichter Herrn apl. Prof. Dr. Frank Kern, der diese Forschungsarbeit erst ermöglicht hat. Ihm möchte ich für die allgegenwärtige Unterstützung in jeder Lage und die vielen lehrreichen Fachdiskussionen im gemeinsamen Büro danken. Es war mir eine Freude an seiner Seite zu arbeiten.

Darüber hinaus danke ich Herrn Prof. Dr. rer. nat. Dr. h. c. Siegfried Schmauder für die Übernahme des Mitberichts und die damit verbundene angenehme Zusammenarbeit, und Herrn. Prof. Dr. Rainer Gadow für die Unterstützung im Rahmen meiner Anstellung am Institut für Fertigungstechnologie keramischer Bauteile.

Bei allen meinen Kolleginnen und Kollegen des IFKB's möchte ich mich für das angenehme Arbeitsklima und die sehr gute Zusammenarbeit bedanken. Meinen Kollegen Philipp Ninz, Matthias Blum, Christian Semmler und Dr. Ulrich Schmitt-Radloff, sowie meiner Kollegin Bettina Oßwald möchte ich für das freundschaftliche Verhältnis und die tatkräftige Unterstützung danken. Darüber hinaus möchte ich den vielen engagierten und fleißigen Studierenden und Hilfskräften meinen Dank aussprechen. Von diesen möchte ich in besonderem Maße Ella Walter, Moritz Kindelmann, Christopher Schweizer und Simon Keller danken, die durch ihre hervorragende Zuarbeit besonders hervorzuheben sind.

Für die zahlreichen exzellenten REM-Aufnahmen meiner viel zu feinkörnigen Keramiken gilt mein Dank Frau Felicitas Predel (Max Planck Institut für Festkörperforschung, Stuttgart) und Herrn Michael Haub (IFM, Uni Stuttgart). Ein mindestens genauso großer Dank geht an Herrn Gerd Maier (Max Planck Institut für intelligente Systeme), welcher mir immer mit Rat und Tat zur Seite stand, wenn das Röntgendiffraktometer intensiverer Betreuung bedurfte.

Darüber hinaus möchte ich unseren langjährigen Projektpartnern am Werk-

zeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH-Aachen danken. Die beiden gemeinsamen DFG-Forschungsprojekte haben maßgeblich zum Entstehen dieser Dissertation beigetragen. In diesem Rahmen möchte ich mich vor allem bei Dr. Andreas Klink und Marcel Olivier für die hervorragende Zusammenarbeit bedanken.

Meiner Familie möchte ich für die Rücksichtnahme und die stete Unterstützung während meines gesamten Studiums und der Promotion danken. Für die Hilfe bei der Erstellung des Manuskripts möchte ich mich bei meiner guten Freundin Tina Hirte bedanken. Bei meinem langjährigen Partner Christian Köpf möchte ich mich für seine liebevolle Unterstützung, Rückendeckung und Geduld bedanken.

Stuttgart, im März 2021
Andrea Gommeringer

Inhaltsverzeichnis

Vorwort und Danksagung **iii**

Formelzeichen und Abkürzungen **ix**

Kurzzusammenfassung **xiii**

Extended Abstract **xv**

Materials development of the TZP matrix xvi
Materials development of the composite material xvii
Results of the materials development xvii
Results of the EDM experiments xxii
Conclusion xxvi

1 Einleitung und Motivation **1**

1.1 Aufgabenstellung 1

2 Stand der Technik **3**

2.1 Fertigungstechnik keramischer Bauteile 3
2.1.1 Allgemeine Fertigungskette für keramische Bauteile 3
2.1.2 Rohstoffsynthese und Pulveraufbereitung 4
2.1.3 Sintern 12
2.2 Zirkonoxid als Strukturkeramik 16
2.2.1 Zähigkeitssteigerung durch Umwandlungsverstärkung . . . 18
2.2.2 Kationen als Stabilisator 20
2.2.3 Einflüsse auf die Stabilisierung 22
2.2.4 Weitere zähigkeitssteigernde Mechanismen 26
2.3 Funkenerosion als Formgebungsverfahren 27
2.3.1 Der Prozess 28
2.3.2 Funkenerosive Bearbeitung von keramischen Werkstoffen . . 31

2.4 Materialcharakterisierung 36
2.4.1 Bestimmung der Festigkeit 36
2.4.2 Bestimmung der Bruchzähigkeit 37
2.4.3 Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit 41
2.4.4 Rasterelektronenmikroskopie zur Gefügeanalyse 42
2.4.5 Röntgendiffraktometrie zur Phasenanalyse 43
2.4.6 Lasergranulometrie zur Bestimmung der Pulverpartikelgröße 48

3 Experiment 51
3.1 Arbeitsplan 51
3.1.1 Materialentwicklung der Matrix 51
3.1.2 Materialentwicklung der Dispersionskeramik 54
3.1.3 Erodierversuche an der Dispersionskeramik 54
3.2 Pulverkonditionierung und Aufbereitung 57
3.2.1 Beschichtung von Zirkonoxid 57
3.2.2 TZP-WC (coated) im Attritor 58
3.2.3 Pulveraufbereitung mittels intensivem Co-Vermahlen 59
3.3 Sintern mittels Heißpressen 59
3.4 Probenpräparation und Charakterisierung 61

4 Ergebnisse der Materialentwicklung 63
4.1 Optimierung der Zirkonoxid-Matrix 63
4.1.1 Variation der Pulveraufbereitung 63
4.1.2 Optimierung der Stabilisatorrezeptur 66
4.1.3 Zugabe von Aluminiumoxid 75
4.2 Entwicklung der Dispersionskeramik 79
4.2.1 3Y-TZP mit WC unterschiedlicher Korngröße 80
4.2.2 Y,Nd-TZP-WC 83
4.2.3 Zugabe von Aluminiumoxid zu TZP-WC 96
4.2.4 Yb,Sm-TZP-WC mit Aluminiumoxid 99

5 Funkenerosives Drahtschneiden der Dispersionskeramik 105
5.1 Versuche an 3Y-TZP-WC unterschiedlicher Korngrößen 105
5.1.1 Schnittgeschwindigkeit und Rauheit 105
5.1.2 Oberflächenbeschaffenheit 106

5.2 Erodieren von co-stabilisiertem TZP-WC 108
5.2.1 Biegefestigkeit von erodiertem co-TZP-WC 118
5.3 Erodieren von ATZ-WC 120
5.3.1 Biegefestigkeit von erodiertem co-ATZ-WC 126

6 Diskussion der Ergebnisse 129
6.1 Stabilisierung der Zirkonoxid-Matrix 129
6.2 Eigenschaften der Dispersionskeramik TZP-WC 132
6.2.1 Elektrische Eigenschaften 136
6.3 Einfluss der Eigenschaften auf die Funkenerosion 137
6.3.1 Zugabe von Aluminiumoxid 139
6.4 Einfluss der Prozessbedingungen auf die Festigkeit erodierter Bauteile 141

7 Zusammenfassung 143
7.1 Schwerpunkte der Experimente 144
7.2 Materialentwicklung Matrix-Material 144
7.3 Untersuchungen am erodierbaren Komposit 145
7.4 Ergebnisse der Materialentwicklung 146
7.5 Ergebnisse der Funkenerosion 147

Literatur 153

Anhang 173

Lebenslauf 177