

Maßgeschneiderte thermische Spritzschichten  
im System  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Cr}_2\text{O}_3$   
unter besonderer Berücksichtigung der elektrischen Eigenschaften

Von der Fakultät Maschinenwesen

der

Technischen Universität Dresden

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

angenommene Dissertation

Dipl.-Ing. Carl Christoph Stahr

geb. am: 21.07.1975 in: Freiburg i. Br.

Tag der Einreichung: 31.12.2013

Tag der Verteidigung: 26.01.2015

Gutachter

Prof. Dr.-Ing. Christoph Leyens  
Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Eckhard Beyer

Vorsitzender der Promotionskommission

Prof. Dr.-Ing. habil. Antonio Hurtado



Berichte aus der Fertigungstechnik

**Carl Christoph Stahr**

**Maßgeschneiderte thermische Spritzschichten  
im System  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Cr}_2\text{O}_3$  unter besonderer  
Berücksichtigung der elektrischen Eigenschaften**

Shaker Verlag  
Aachen 2015

### **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.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4082-1

ISSN 0945-0769

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Inhalt

Inhalt	ii
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	iv
1 Motivation, Zielsetzung und Lösungsweg	1
2 Technologische und werkstoffliche Ausgangsbasis	3
2.1 Das thermische Spritzen	3
2.1.1 Plasmaspritzverfahren	5
2.1.2 Hochgeschwindigkeitsflammspritzen	6
2.1.3 Herstellung keramischer Spritzpulver	7
2.2 Elektrotechnische Grundlagen, elektrische Eigenschaften von Oxidkeramiken und ihre messtechnische Bestimmung	11
2.2.1 Begriffsdefinitionen	11
2.2.2 Einteilung der Werkstoffe nach ihrer elektrischen Leitfähigkeit	13
2.3 Die oxidkeramischen Schichtwerkstoffe $\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\text{TiO}_x$ und $\text{Cr}_2\text{O}_3$ : Einsatzbereiche und werkstoffliche Besonderheiten beim thermisches Spritzen	15
2.3.1 $\text{Al}_2\text{O}_3$	16
2.3.2 $\text{TiO}_2$	26
2.3.3 $\text{Cr}_2\text{O}_3$	34
2.3.4 Das System $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{Cr}_2\text{O}_3$	36
2.3.5 Das System $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$	40
2.3.6 Das System $\text{TiO}_2$ - $\text{Cr}_2\text{O}_3$	46
3 Versuchsdurchführung	51
3.1 Versuchsplanung	51
3.2 Probenherstellung	52
3.2.1 Ausrüstung zum thermischen Spritzen	52
3.2.2 Ermittlung geeigneter Prozessparameter	54
3.3 Charakterisierung	55
3.3.1 Mikroskopie	55
3.3.2 Phasenanalyse	56
3.3.3 Härte	56
3.3.4 Elektrische Eigenschaften	57
3.3.4.1 Versuchsaufbau und Durchführung der elektrischen Messungen	57
3.3.4.2 Theoretische Überlegungen und Vorversuche zur Auswertung der Impedanzmessungen	61

---

4	Ergebnisse und Auswertung	65
4.1	Charakterisierung der Spritzwerkstoffe	65
4.1.1	Mikroskopie	65
4.1.2	Phasenanalyse	66
4.2	Charakterisierung der Schichten	75
4.2.1	Mikroskopie	75
4.2.2	Phasenanalyse	83
4.2.3	Härte	90
4.2.4	Elektrische Eigenschaften	94
4.2.4.1	Untersuchungen an Umgebungsatmosphäre	94
4.2.4.2	Einfluss der Luftfeuchtigkeit	99
5	Diskussion	105
5.1	$\text{Al}_2\text{O}_3$	105
5.1.1	Mikrostruktur, Phasenzusammensetzung und Härte	105
5.1.2	Elektrische Eigenschaften	105
5.2	$\text{TiO}_2$	106
5.2.1	Mikroskopie, Röntgenografie und Härte	106
5.2.2	Elektrische Eigenschaften	107
5.3	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	108
5.3.1	Mikroskopie, Röntgenografie und Härte	108
5.3.2	Elektrische Eigenschaften	108
5.4	$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$	109
5.4.1	Mikroskopie, Röntgenografie und Härte	109
5.4.2	Elektrische Eigenschaften	109
5.5	$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$	110
5.5.1	Mikroskopie, Röntgenografie und Härte	110
5.5.2	Elektrische Eigenschaften	111
5.6	$\text{TiO}_2\text{-Cr}_2\text{O}_3$	112
5.6.1	Mikroskopie, Röntgenografie und Härte	112
5.6.2	Elektrische Eigenschaften	113
6	Anwendungsbeispiele	114
6.1.1	Keramisches Heizelement	114
6.1.2	Laserschutzwand	115
7	Zusammenfassung	117
8	Literatur	121
	Abbildungsverzeichnis	137
	Tabellenverzeichnis	140

## Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

$\epsilon$	Dielektrizitätskonstante
$\phi$	Phasenwinkel zwischen Spannung und Strom
$\sigma$	spezifische Leitfähigkeit
AC	Wechselstrom
DC	Gleichstrom
BSE	Materialkontrastbild am REM
REM	Rasterelektronenmikroskop
SE	Topografieuntersuchung am REM
s/w	schwarz/weiß
a&s	agglomerated & sintered; Herstellmethode für Spritzpulver
f&c	fused & crushed; Herstellmethode für Spritzpulver
APS	Atmosphärisches Plasmaspritzen
CAPS	Plasmaspritzen in kontrollierter Atmosphäre
CGS	Kaltgasspritzen
DS	Detonationsspritzen
FS	Flammspritzen
HF	Hochfrequenz Plasmaspritzen
HPPS	High Power Plasma Spray oder High Pressure Plasma Spray (Bedeutung im Kontext erwähnt)
HVOF	Hochgeschwindigkeitsflammspritzen
ICP	Induktives Plasmaspritzen
LB	Lichtbogen-Draht-Spritzen
LPPS	Niederdruck Plasmaspritzen
VPS	Vakuumplasmaspritzen
WSP	Wasserstabilisiertes Plasmaspritzen
IKTS	Fraunhofer-Institut für keramische Technologien und Systeme, Dresden
IWS	Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahlkunde, Dresden