

Markus Zeis

Verformung dünnwandiger Graphitelektroden mit hohen Aspektverhältnissen beim funkenerosiven Senken



Verformung dünnwandiger Graphitelektroden mit hohen Aspektverhältnissen beim funkenerosiven Senken

Deformation of Thin-Walled Graphite Electrodes with High Aspect Ratios during Sinking EDM

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Markus Zeis

Berichter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. Fritz Klocke
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Joachim Mayer

Tag der mündlichen Prüfung: 14. Juni 2017

ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

Markus Zeis

Verformung dünnwandiger Graphitelektroden
mit hohen Aspektverhältnissen
beim funkenerosiven Senken

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. F. Klocke

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. G. Schuh

Prof. Dr.-Ing. C. Brecher

Prof. Dr.-Ing. R. H. Schmitt

Band 24/2017



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Markus Zeis:

Verformung dünnwandiger Graphitelektroden mit hohen Aspektverhältnissen
beim funkenerosiven Senken

1. Auflage, 2017

Gedruckt auf holz- und säurefreiem Papier, 100% chlorfrei gebleicht.

Apprimus Verlag, Aachen, 2017
Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien
an der RWTH Aachen
Steinbachstr. 25, 52074 Aachen
Internet: www.apprimus-verlag.de, E-Mail: info@apprimus-verlag.de

Printed in Germany

ISBN 978-3-86359-548-7

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2017)

Vorwort

Preamble

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als Postdoktorand am Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) und am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie (IPT) in Aachen.

Um eine zweite Promotion anzustreben, bedarf es neben einem gewissen Maß an Eigenantrieb sicherlich eines Förderers, Motivators und Mentors wie Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dr. h.c. Fritz Klocke, Inhaber des Lehrstuhls für Technologie der Fertigungsverfahren (TF) und Institutsleiter des Fraunhofer IPT. So danke ich allen voran Herrn Professor Klocke *erneut* für die ausgezeichnete Zusammenarbeit, seine stetige Diskussionsbereitschaft und die wohlwollende Förderung meiner Arbeit. Seine fachliche und persönliche Unterstützung hat wiederholt ein motivierendes Arbeitsfeld geschaffen, in dem ich sehr gerne gearbeitet habe.

Ebenso danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Joachim Mayer, Inhaber des Lehrstuhls für Mikrostrukturanalytik und Leiter des Gemeinschaftslabors für Elektronenmikroskopie (GFE) der RWTH Aachen, für die eingehende und konstruktive Durchsicht des Manuskripts dieser Arbeit sowie für die Übernahme des Korreferats. Besonders hervorheben möchte ich in der Zusammenarbeit mit Herrn Professor Mayer seine wertvollen Hinweise zur einschlägigen Fachliteratur sowie die fruchtbaren Diskussionen, welche mir die nötige Sicherheit verliehen haben, um mich auf dem Gebiet der Festkörperphysik zu bewegen.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schröder, Leiter des Lehrstuhls für Strömungslehre und des Aerodynamischen Instituts (AIA) der RWTH Aachen, spreche ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes meinen herzlichen Dank aus. Herr Professor Schröder war bereits Zweitprüfer in meinem ersten Promotionsverfahren und stellte somit gleichzeitig die notwendige inhaltliche Abgrenzung sicher. Daneben gab er mir auch im Zuge der vorliegenden Arbeit wichtige Orientierung in Fragen der Fluidmechanik, sodass ich ihm stets in tiefer Dankbarkeit verbunden bin.

Für weitere wertvolle Diskussionen gilt mein Dank allen Beteiligten des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten transregionalen Sonderforschungsbereiches SFB/TRR 136 „Funktionsorientierte Fertigung auf der Basis charakteristischer Prozesssignaturen“ für die fruchtbaren Diskussionen und Anregungen bezüglich der Werkstoffbeanspruchungen und -modifikationen bei Prozessen mit thermischer Hauptwirkung.

Darüber hinaus möchte ich mich bei den Herren Wolfgang Lenarz und Dr. Werner Hoffmann der SGL Carbon SE für die exzellente Unterstützung sowie Zusammenarbeit bedanken. Ohne deren wohlwollende Förderung meiner Arbeit in Form von zahlreichen Werkstoffprüfungen im Hochtemperaturbereich wären zentrale Inhalte dieses Manuskripts schlichtweg nicht gegeben gewesen. Für die Untersuchungen zur inneren Reibung und Dämpfung bedanke ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Sascha Fliegerer vom

Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik (IWM) in Freiburg. In gleicher Weise danke ich meinem geschätzten Kollegen Herrn Robert Seidner für die Durchführung der Hochgeschwindigkeitskameraaufnahmen.

Mein besonderer Dank gilt weiterhin natürlich den aktiven und ehemaligen Kollegen der Abteilung Nichtkonventionelle Fertigungsverfahren und Technologieintegration am IPT sowie der Abteilung Abtragende Fertigungsverfahren am WZL. Stellvertretend für ihre tollen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter danke ich an dieser Stelle den Obergeringeneuren Dr.-Ing. Kristian Arntz und Dr.-Ing. Andreas Klink, von denen letztgenannter auch gleichzeitig die Durchsicht des Manuskripts übernommen hat. Weiter bedanke ich mich für die hervorragende Zusammenarbeit bei dem Geschäftsführer des IPT, Herrn Dr.-Ing. Thomas Bergs MBA und dem geschäftsführenden Obergeringeneur des Lehrstuhls TF, Herrn Dr.-Ing. Patrick Mattfeld MBA sowie bei seinem Vorgänger Herrn Dr.-Ing. Dražen Veselovac, welcher leider viel zu früh von uns gegangen ist und den ich stets in Ehren halten werde.

Ebenso möchte ich mich auch bei allen weiteren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des WZL und IPT bedanken, die durchweg für einen reibungslosen Ablauf sowie für ein gutes Arbeitsklima gesorgt haben. Neben der beispiellosen Unterstützung seitens der Industrie wäre ohne den hausübergreifenden „Laborgeist“ ein derartig schnelles Wiederaufstehen nach dem großen Hallenbrand am WZL im Februar 2016 sicherlich nicht möglich gewesen. Entsprechend hoffe ich, dass ich einen kleinen Beitrag dazu leisten konnte, die beiden Häuser nicht nur auf fachlicher, sondern auch auf menschlicher Ebene noch besser miteinander zu vernetzen.

Vor allem aber bin ich meinen studentischen Hilfskräften sowie Bachelor- und Masterarbeitern zu großer Dankbarkeit verpflichtet. In Verbindung mit der vorliegenden Promotionschrift bedanke ich mich daher ganz herzlich bei Frau M.Sc. Margarete Stöwer sowie bei den Herren M.Sc. Lukas Heidemanns, M.Sc. Nils Maassen, M.Sc. Florian Coppers, Paul Schwickert, Niklas Schilling und Andreas Pertzborn für deren Fleiß und Einsatzbereitschaft sowie für die durchweg hohe Qualität ihrer Ausführungen.

Der größte Dank gilt jedoch meiner gesamten Familie und zahlreichen Freunden, die mich auch außerhalb der Arbeit stets bestens unterstützt haben. Namentlich erwähnen möchte ich neben meinen Eltern Franz-Bernhard und Monika meine Brüder Andreas und Sebastian sowie die Herren Dr.-Ing. David Welling, M.Sc. Tim Herrig, Dr.-Ing. Sascha Gierlings, Dr.-Ing. Matthias Brockmann, Dipl.-Ing. Simon Rekers, Aron Salm, Andreas Schumacher und Patrick von Oppell, mit denen ich unvergessliche Stunden erleben durfte.

für Andreas und Sebastian

Ich kenne kein anderes Bestreben, als mich selbst,
nach meiner Weise, soviel als möglich auszubilden,
damit ich an dem Unendlichen, in das wir gesetzt sind,
immer reiner und froher Anteil nehmen möge.

Johann Wolfgang von Goethe

Inhaltsverzeichnis

Content

1	Einleitung	1
2	Stand der Erkenntnisse	5
2.1	Grundlagen des funkenerosiven Senkens.....	5
2.2	Beanspruchungen bei der funkenerosiven Senkbearbeitung	11
2.3	Modellierung thermischer Beanspruchungen	16
2.4	Modellierung fluidmechanischer Beanspruchungen	22
2.5	Graphit als Elektrodenwerkstoff	26
2.6	Fazit zum Stand der Erkenntnisse	35
3	Zielsetzung und Aufgabenstellung	37
4	Temperaturabhängiges Materialmodell von Funkenerosionsgraphit	39
4.1	Thermische Eigenschaften.....	39
4.2	Mechanische Eigenschaften	47
4.3	Elektrische Eigenschaften	75
4.4	Fazit zum Materialverhalten von Funkenerosionsgraphit	76
5	Simulation der Verformung dünnwandiger Graphitelektroden	79
5.1	Aufbau, Kopplung und Simulationsabfolge.....	80
5.2	Wärmetransfer	81
5.3	Fluidmechanik	87
5.4	Fluid-Struktur-Wechselwirkung (FSI)	94
5.5	Fazit zur Simulation der Verformung.....	102
6	Modellreduktion und Deduktion stabiler Prozessfenster	103
6.1	Modellreduktion.....	103
6.2	Kennlinienfelder für Funkenerosionsgraphit.....	112
6.3	Fazit zur Deduktion stabiler Prozessfenster.....	118
7	Zusammenfassung und Ausblick	119
8	Literaturverzeichnis	125
	Lebenslauf	135

Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis

Formula symbols and abbreviations

Großbuchstaben

A	m^2	Fläche
C ₄₄	Pa	Schubmodul
D	m^2/s	Permeationskoeffizient
D _{th}	m^2/s	Thermische Diffusivität
E	Pa	Elastizitätsmodul
E′	Pa	Speichermodul
E′′	Pa	Verlustmodul
E ₀	Pa	Elastizitätsmodul bei Raumtemperatur
E _b	Pa	Elastizitätsmodul im Biegeversuch ermittelt
E _c	N·m	Energie der Versetzungs-Hinderniswechselwirkung
E _{dyn}	Pa	Dynamischer E-Modul
E _r	Pa	Relaxierter Modul bei niedrigen Frequenzen
E _T	Pa	Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Temperatur
E _u	Pa	Unrelaxierter Modul bei hohen Frequenzen
F	-	Deformationsgradient
F _s	$(\text{kg}\cdot\text{m})/\text{s}^2$	Elektrostatische Kraft
F _v	N/m	Oberflächenspannung
G	J	Aktivierungsenthalpie
H	-	Häufigkeit
H	-	Konstante zur Beschreibung der Spannungs-Dehnungskurve
H _K	$(\text{kg}\cdot\text{m}^2)/\text{s}^2$	Aktivierungsenthalpie zur Erzeugung einer einzelnen Kinke
H _K ^M	$(\text{kg}\cdot\text{m}^2)/\text{s}^2$	Aktivierungsenthalpie für die Kinkenausbreitung entlang der Versetzung
I	A	Elektrische Stromstärke

I	-	Einheitsmatrix
K_a	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit orthogonal zur c-Achse
K_c	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit parallel zur c-Achse
$K(\phi)$	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Winkel ϕ
L	m	Versetzungslänge zwischen zwei Ankerpunkten
L_a	Å, μm	Basale Kristallgröße
L_c	Å, μm	Kristallitgröße in Richtung der c-Achse
N	-	Anzahl der Oszillatoren
Q^{-1}	Pa·s	Dämpfung, Verlustfaktor oder innere Reibung
Q_E	W/m ²	Homogene Wärmedichte
Q_e	J	Entladeenergie
Q_e	J	Energieeintrag pro Entladung
Q_a	J	Aufsummierte Entladeenergie zwischen zwei Abhebewebungen
R	Ω	Elektrischer Widerstand
R^2	-	Bestimmtheitsmaß
Re	-	Reynoldszahl
Re_h	-	Reynoldszahl bezogen auf die Arbeitsspalthöhe
$Re_{krit.}$	-	Kritische Reynoldszahl
Re_l	-	Reynoldszahl bezogen auf die Strömungslänge
R_m	MPa	Zugfestigkeit
R_p	MPa	Streckgrenze
T	°C, K	Temperatur
T_m	°C	Mittlere Temperatur
T_m	°C	Temperatur des Peakmaximums
T_{melt}	°C	Schmelztemperatur
U	V	Elektrische Spannung
V	m ³	Volumen des Kristalls
X_K	μm	Kinkenabstände

Kleinbuchstaben

a	mm	Abstand zweier konsekutiver Entladungen
a	m/s^2	Elektrodenbeschleunigung
a_{max}	m/s^2	Maximale Elektrodenbeschleunigung
b	μm	Abstand zweier Peierlstäler
b_E	mm	Elektrodenbreite
b_K	mm	Kavitätsbreite
d	mm	Elektrodendurchmesser
c	μm	Dimension zwischen Basisebenen
c	m/s	Schallgeschwindigkeit
c_p	J/(kg·K)	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
c_v	J/(kg·K)	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen
d	μm	Dominierende Korngröße im Polykristall
d_1	mm	Durchmesser Schruppelektrode
d_2	mm	Durchmesser Schlichtelektrode (konventionell)
d_3	mm	Durchmesser Schlichtelektrode (planetär)
d_{50}	μm	Mittlere Korngröße
d_a	mm	Durchmesser der Kavität
d_e	mm	Durchmesser der Elektrode
d_E	mm	Elektrodendicke
d_H	mm	Hydraulischer Durchmesser eines Seitenspalts
d_K	mm	Kavitätsdicke
d_n	mm	Abstand nachfolgender Entladung
d_{n-1}	mm	Abstand zur vorherigen Entladung
f	Hz	Frequenz
f_0	Hz	Peak-Frequenz
f_{0cr}	N	Kritische Kraft
f_R	Hz	Resonanzfrequenz
h	m	Elektrodenhöhe
h	m	Stationäre Einsenktiefe

\hat{n}	-	Wahrscheinlichkeitsdichte
\hbar	J·s	Reduziertes Plancksches Wirkungsquantum
h_E	mm	Elektrodenhöhe
h_K	mm	Kavitätshöhe
\hat{i}_e	A	Maximaler Entladestrom
\bar{I}_e	A	Mittlerer Entladestrom
j	m/s ³	Elektrodenruck
j_{\max}	m/s ³	Maximaler Ruck
k_B	J/K	Boltzmann-Konstante
\bar{l}	m	Mittlere Segmentlänge zwischen n Hindernissen entlang einer Versetzungslinie
l	mm	Abstand zwischen Hindernissen entlang einer Versetzungslinie
n	-	Anzahl an Hindernissen
\mathbf{n}	-	Normalenvektor
n	J/m	Peierlsenergie
p	Pa	Druck
q	W/m ²	Wärmestromdichte
\dot{q}''	W	Wärmefluss pro Fläche
q_i	J	Wärmesenke oder -quelle
r	mm	Radius
r_e	μm	Entladeradius
s	mm	Spaltweite
s	m	Strecke
s_1	μm	Schruppspalt
s_2	μm	Schlichtspalt
s_f	μm	Frontaler Arbeitsspalt
s_l	μm	Lateraler Arbeitsspalt
s_{\max}	mm	Maximale Strecke
s_{soll}	mm	Geforderter Elektrodenweg
$s_{x,0}$	mm	Seitenspalt in der Ausgangsposition
s_y	mm	Seitenspalt in y-Richtung

s_z	mm	Frontaler Spalt
t	s	Zeit
t_0	μs	Pausendauer
t_d	μs	Zündverzögerungszeit
t_e	μs	Entladedauer
t_{eros}	μs	Erosionszeit
t_i	μs	Impulsdauer
t_p	μs	Periodendauer
u	m/s	Partikelgeschwindigkeit
\hat{u}_i	V	Leerlaufspannung
\bar{u}_e	V	Mittlere Entladespannung
u_s	-	Verschiebungsfaktor
u_r	m^2/s^2	Schubspannungsgeschwindigkeit
v	m/s	Elektroden­geschwindigkeit
v_0	Hz	Anlauffrequenz
v_D	m/s	Schallgeschwindigkeit
v_{max}	m/s	Maximale Elektroden­geschwindigkeit
v_{PIV}	m/s	Geschwindigkeiten in der PIV-Messung
v_{Sim}	m/s	Strömungsgeschwindigkeiten in der Simulation
x	μm	Auslenkung der Elektrode
y^+	-	Grenzschicht in Wandnähe
y_e	m	y-Koordinate des Mittelpunktes einer Entladung
z	m	Elektroden­höhe
Z	mm	Abhebestrecke
z_e	m	z-Koordinate des Mittelpunktes einer Entladung

Griechische Buchstaben

Ω	-	Kristallorientierung
α	$\mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{K})$	Wärmeausdehnungskoeffizient
α	°	Winkel