

Einsatz von pulveradditiviertem Dielektrikum in der Drahterosion

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades einer
Doktorin der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Susanne Kamenzky

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. Dezember 2011

Berichte aus der Produktionstechnik

Susanne Kamenzky

Einsatz von pulveradditiviertem Dielektrikum in der Drahterosion

Herausgeber:

Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Dipl.-Wirt. Ing. W. Eversheim

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

Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Prof. h. c. mult. T. Pfeifer

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

Prof. em. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr.-Ing. E. h. M. Weck

Prof. Dr.-Ing. C. Brecher

Prof. Dr.-Ing. R. Schmitt

Band 2/2012
Shaker Verlag

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2011)

Copyright Shaker Verlag 2012

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0756-5

ISSN 0943-1756

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

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Angestellte am Werkzeugmaschinenlabor WZL der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dr. h.c. Fritz Klocke, Inhaber des Lehrstuhls für Technologie der Fertigungsverfahren, danke ich für die wohlwollende Förderung dieser Arbeit und die ausgezeichnete Zusammenarbeit. Seine fachliche und persönliche Unterstützung hat ein Arbeitsfeld geschaffen, in dem ich sehr gerne gearbeitet habe.

Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.rer.nat. Joachim Mayer, dem Leiter des Gemeinschaftslabors für Elektronenmikroskopie für die eingehende Durchsicht des Manuskripts und die Übernahme des Korreferats. Für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes spreche ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Feldhusen, Direktor des Lehrstuhls und Instituts für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus meinen Dank aus.

Für die engagierte Durchführung der metallografischen Untersuchungen und die technische Unterstützung bedanke ich mich bei Frau Brigitte Niederbach, Frau Meike Schröder, Herrn Reinhold Krings und Herrn Jörg Meyer.

Darüber hinaus danke ich den Mitgliedern des Arbeitskreises Elektroerosive Bearbeitung des Werkzeugmaschinenlabors für die großzügige Unterstützung dieser Arbeit und die Bereitstellung von Versuchsmaterialien.

Herzlich bedanke ich mich bei meinen ehemaligen Kollegen des Lehrstuhls Technologie der Fertigungsverfahren, die durch zahlreiche anregende Diskussionen und Ratschläge zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Für die kritische Durchsicht meines Manuskripts danke ich meinen Kollegen Herrn Dipl.-Ing. Jens Dieckmann, Herrn M.Sc. Miguel Garzón, Herrn Dr.-Ing. Andreas Klink, Herrn Dipl.-Ing. Dražen Veselovac und Herrn Dipl.-Ing. David Welling.

Ganz besonders dankbar bin ich meinen studentischen Mitarbeitern Herrn Aditya Bhedasgaonkar, Herrn Clemens Braun, Herrn Dipl.-Ing. Christoph Deiss, Herrn Dipl.-Ing. Moritz Lücke, Herrn Robin Neuen, Herrn Dipl.-Ing. Malte Poischbeg, Herrn Dipl.-Ing. David Welling und Herrn Dipl.-Ing. Markus Zeis, die mir durch ihre eigenständige und erfolgreiche Mitarbeit an dieser Arbeit eine große Hilfe waren.

Der größte Dank gilt meinen Eltern, die erst das Fundament für meine Ausbildung gelegt haben, stets an mich geglaubt haben und mich in jeder Hinsicht unterstützt haben. Bei meinen Freunden und allen anderen, die mich und meine Arbeit auf diesem Gebiet begleitet haben, bedanke ich mich für ihre motivierende Unterstützung und die zahllosen Aufmunterungen vor allem zum Ende der Manuskripterstellung und Prüfungsvorbereitung.

Aachen, im Januar 2012

Susanne Kamenzky

I Inhaltsverzeichnis

Table of contents

I	Inhaltsverzeichnis	I
II	Formelzeichen und Abkürzungen	III
1	Einleitung	1
2	Stand der Erkenntnisse	5
2.1	Elektrische Entladungen bei der Funkerosion	5
2.2	Energieverteilung	10
2.3	Einfluss des Dielektrikums auf den funkerosiven Prozess	12
2.4	Prozesskräfte in der Drahterosion	20
2.5	Fazit	25
3	Zielsetzung und Vorgehensweise	27
4	Randbedingungen für die experimentelle Analyse	29
5	Ermittlung der Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus der Senkerosion	39
6	Beeinflussung des Abtragmechanismus bei der Drahterosion	47
6.1	Einfluss der Pulveradditivierung auf die Schnittspurbreite	47
6.2	Einfluss der Pulveradditivierung auf die Ausprägung der Einzelentladekrater	54
6.3	Einfluss der Pulveradditivierung auf die Abtragpartikel	63
6.4	Einfluss der Pulveradditivierung auf Folgeentladungen	67
6.5	Einfluss der Pulveradditivierung auf die auftretenden Prozesskräfte	73
6.6	Zusammenfassung	78
7	Auswirkungen der Pulveradditivierung in der Drahterosion	81
7.1	Erzielbare Schnitt- und Abtragraten	81
7.2	Erzielbare Oberflächenqualitäten	84
7.3	Zusammenfassung	99
8	Anwendungspotential des pulveradditivierten Dielektrikums in der Drahterosion	101
8.1	Gesamtbearbeitungsdauer	101

8.2	Werkzeugkosten	105
8.3	Bearbeitungsgenauigkeit	106
8.4	Zusammenfassung	107
9	Zusammenfassung und Ausblick	109
10	Literatur	117

// Formelzeichen und Abkürzungen

Symbols and abbreviations

Lateinische Formelzeichen

a	μm	a-Achse einer Elementarzelle
b	μm	b-Achse einer Elementarzelle
b	mm	Schnittspurbreite
b_r	μm	Dicke der wiedererstarteten Schicht
c	μm	c-Achse einer Elementarzelle
c	J/kgK	Spezifische Wärmekapazität
d	μm	Abstand
d_i	μm	Durchmesser der Pulverpartikel i
d_k	μm	Kraterdurchmesser
d_{kaA}	μm	äußerer Kraterdurchmesser an Anode
d_{kiA}	μm	innerer Kraterdurchmesser an Anode
d_{kaK}	μm	äußerer Kraterdurchmesser an Kathode
d_{kiK}	μm	innerer Kraterdurchmesser an Kathode
d_{Partikel}	μm	Dicke des durchschnittlichen Partikeldurchmessers
\bar{d}_k	μm	mittlerer Kraterdurchmesser
eU_a	eV	Austrittsarbeit
f_p	Hz	Impulsfrequenz
$f_{p\text{-maxP}}$	Hz	Impulsfrequenz bei maximal verlängerter Pausendauer
h	μm	Messhöhe
h_k	μm	Kraterrandhöhe
h_{kA}	μm	Kraterrandhöhe an Anode
h_{kK}	μm	Kraterrandhöhe an Kathode
$h_{\text{Plasmakanal}}$	μm	Höhe des Plasmakanals
i_e	mA	Entladestrom

IV

l	μm	Messlänge
$m_{x\text{-Graphit}}$	g	Masse des Graphits verschiedener Konzentrationen x
r	mm	Partikelradius
r_a	μm	Plasmakanalfusspunktradius an der Anode
r_{Draht}	μm	Radius des Drahtes
r_k	μm	Plasmakanalfusspunktradius an der Kathode
$r_{\text{Plasmakanal}}$	μm	Radius des Plasmakanals
s	μm	Spaltweite
t	s	Gesamtbearbeitungsdauer
t	s	Zeit
t_0	μs	Pausendauer
$t_{0\text{max}}$	μs	maximal verlängerte Pausendauer
t_d	μs	Zündverzögerungszeit
t_d^*	μs	Hilfsgröße = $t_0 + t_d$
\bar{t}_d^*	μs	mittlere Hilfsgröße = $t_0 + t_d$
t_e	μs	Entladedauer
\bar{t}_e	μs	mittlere Entladedauer
t_i	μs	Impulsdauer
t_k	μm	Kratertiefe
t_{kA}	μm	Kratertiefe an Anode
t_{kK}	μm	Kratertiefe an Kathode
t_p	μs	Periodendauer
\bar{t}_p	μs	mittlere Periodendauer
t_x	μs	Dauer von Spannungsmaximum bis Spannungsnullpunkt
\bar{t}_x	μs	mittlere Dauer von Spannungsmaximum bis Spannungsnullpunkt
\hat{u}_i	V	Leerlaufspannung
\bar{u}_i	V	mittlere Impulsspannung

\bar{u}_s	V	mittlere Spaltspannung
v_f	mm/min	Vorschubgeschwindigkeit
x_G	g/l	Graphitkonzentration
Ag		Silber
AFM		Atomic Force Microscopy
Al		Aluminium
Al_2O_3		Aluminiumoxid
\vec{B}	T	Magnetische Flussdichte
C		Kohlenstoff
CH		Kohlenwasserstoff
Co		Kobalt
Cr		Chrom
Cu		Kupfer
E	eV	Energie
E	V/m	elektrische Feldstärke
EDM		Funkenerosion (Electro-Discharge-Machining)
EDX		Energiedispersive Röntgenspektroskopie
ESMA		Elektronenstrahlmikroanalyse
\vec{F}	N	Lorentzkraft
F_D	N	Drahtvorspannkraft
F_D^*	N	Drahthaltekraft
$F_{D\dot{a}}$	N	Dämpfungskräfte
Fe		Eisen
F_e	N	Entladekraft
F_E	N	Kraft aufgrund des elektrischen Feldes
F_{eg}	N	gemessene Entladekraft
F_{em}	N	elektromagnetische Kraft

VI

F_{es}	N	elektrostatische Kraft
FIB		Focus Ion Beam
F_p	°C	Flammpunkt
F_{sp}	N	spülungsbedingte Kraft
F_w	N	Widerstandskraft nach Stokes
HRC		Härte Rockwell C
HS		Hauptschnitt
I	A	Strom
I	A	Stromstärke
LED		Leuchtdiode
Mo		Molybdän
Ni		Nickel
NS		Nachschnitt
N_{x-1l}		Anzahl Partikel pro Liter bei Konzentration x
$N_{x-gesamt}$		Anzahl Partikel im Arbeitsspalt bei Konzentration x
$N_{x-gesamt-simuliert}$		Anzahl simulierter Partikel im Spalt bei Konzentration x
N_{x-i}		Anzahl Partikel mit Korngröße d_i bei Konzentration x
$N_{x-Plasmakanal}$		Gesamtanzahl Partikel im Plasmakanal bei Konzentration x
Ra	μm	Oberflächengüte
REM		Rasterelektronenmikroskop
R_m	N/mm^2	Zugfestigkeit
Rz	μm	gemittelte Rautiefe
Si		Silizium
SiC		Siliziumkarbid
T_b	K	Siedetemperatur
Ti		Titan
TiC		Titankarbid
T_{kr}	K	Kritische Temperatur

Θ_S	$^{\circ}\text{C}$	Schmelztemperatur
T_S	K	Schmelztemperatur
T_{sied}	$^{\circ}\text{C}$	Siedetemperatur
T_z	$^{\circ}\text{C}$	Zündtemperatur
U	V	Spannung
U_{AF}	V	Spannung am Anodenfall
U_B	V	Bogenspannung
U_{KF}	V	Spannung am Kathodenfall
U_S	V	Säulenspannung
V		Vanadium
V_A	μm^3	Ablagerungsvolumen
$V_{\text{Dielektrikum}}$	mm^3	Volumen des Dielektrikums
V_i	μm^3	Volumen des Partikels i
V_{KM}	μm^3	Kratermuldenvolumen
$V_{\text{Plasmakanal}}$	mm^3	Volumen des Plasmakanals
V_W	mm^2/min	Schnitttrate
V_W	mm^3/min	Abtragate
$V_{x\text{-Graphit-i}}$	mm^3	Volumen des Graphits verschiedener Konzentrationen x im Spalt mit der Korngröße i
W		Wolfram
WC		Wolframkarbid
W_e	J	Entladeenergie
Z	cps	Zählrate
Zn		Zink
ZrB_2		Zirkondiborid

Griechische Formelzeichen

α	1/K	Temperaturkoeffizient
----------	-----	-----------------------

ΔV	%	mittlere prozentuale Volumenveränderung
ϵ_r	As/Vm	Permittivität
η	kg/ms	dynamische Viskosität
λ	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
ν	mm ² /s	kinematische Viskosität
ρ	$\mu\Omega\text{cm}$	Spezifischer elektrischer Widerstand
ρ	g/cm ³	Dichte
σ	m/ Ωmm^2	Spezifische elektrische Leitfähigkeit
τ	%	Tastverhältnis
Ω	%	prozentualer Massenanteil