

Sebastian Schneider

Modellierung der Energiedissipation in der Funkenerosion



Modellierung der Energiedissipation in der Funkenerosion

Modelling of the Energy Dissipation in Electrical
Discharge Machining

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

vorgelegt von

Sebastian Schneider

Berichter/in:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bergs

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. Fritz Klocke

Tag der mündlichen Prüfung: 07. Juli 2021

ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

Sebastian Schneider

Modellierung der Energiedissipation in der
Funkenerosion

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. T. Bergs
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. G. Schuh
Prof. Dr.-Ing. C. Brecher
Prof. Dr.-Ing. R. H. Schmitt

Band 21/2021



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Sebastian Schneider:

Modellierung der Energiedissipation in der Funkenerosion

1. Auflage, 2021

Apprimus Verlag, Aachen, 2021

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

ISBN 978-3-86359-997-3

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2021)

Vorwort

Preamble

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

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bergs, Inhaber des Lehrstuhls für Technologie der Fertigungsverfahren, danke ich für die ausgezeichnete Zusammenarbeit, stetige Diskussionsbereitschaft und die wohlwollende Förderung der Arbeit. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. Fritz Klocke, ehemaliger Inhaber des Lehrstuhls für Technologie der Fertigungsverfahren, danke ich ebenfalls für die fachliche und persönliche Führung und Unterstützung in meinen ersten Jahren am WZL. Ich möchte mich herzlichst für die Übernahme des Koreferats, für die eingehende Durchsicht des Manuskripts sowie für die bereichernden Gespräche und Anmerkungen zu meiner Dissertation bedanken. Die fachliche und persönliche Unterstützung beider hat ein motivierendes Arbeitsumfeld geschaffen, in dem ich stets sehr gerne gearbeitet habe.

Ebenfalls möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Johannes Heinrich Schleifenbaum, Inhaber des Lehrstuhls für Digitale Additive Produktion, für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes herzlichst bedanken. Ebenso danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Achim Kampker, Inhaber des Lehrstuhls Production Engineering of E-Mobility Components, für die Übernahme des Prüfungsbeisitzes.

Für die wertvollen Diskussionen und die konstruktive Zusammenarbeit danke ich allen Beteiligten und Mitarbeitern des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten transregionalen Sonderforschungsbereichs SFB/TRR 136 „Funktionsorientierte Fertigung auf Basis charakteristischer Prozesssignaturen“. Stellvertretend möchte ich mich dabei beim Geschäftsführer des SFB Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Jens Sölter, den geistigen Vätern dieses SFB, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. Fritz Klocke und Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h. c. Dr.-Ing. E. h. Ekkard Brinksmeier sowie dem aktuellen Sprecher dieses SFB, Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h. c. Dr. h. c. Dr. h. c. Bernhard Karpuschewski, bedanken. In diesem Zusammenhang gilt mein Dank auch dem Herrn Oberingenieur Dr.-Ing. Andreas Klink für die inhaltliche Leitung meines Teilprojektes und seine fachliche Unterstützung, seine stetige Diskussionsbereitschaft und seine wohlwollende Förderung meiner Arbeit und Person in seiner Funktion als Chief Scientific Officer des WZL. Weiterhin möchte ich mich insbesondere bei Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Joachim Mayer und Frau Dr. rer. nat. Lisa Ehle vom Gemeinschaftslabor für Elektronenmikroskopie für die tiefgehenden Untersuchungen und Analysen der Werkstoffmodifikationen im Rahmen des SFB bedanken. In gleicher Weise gilt der Dank auch Dr.-Ing. Jeremy Epp und Heiner Meyer, M. Sc., vom Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologie für die umfangreichen Werkstoffanalysen, die im Rahmen des SFB durchgeführt wurden. Darüber hinaus möchte ich mich besonders

bei Herrn FH-Prof. Dr.-Ing. Kai Oßwald bedanken, der mich bei seinen wissenschaftlichen Gastaufenthalten in meinen Arbeiten mit seiner fachlichen Expertise unterstützt hat.

Besonderer Dank gilt meinen Oberingenieuren Dr.-Ing. Tim Herrig und Dr.-Ing. Andreas Klink, die mich in allen Phasen meiner Arbeit und zuletzt mit der eingehenden Durchsicht des Manuskripts unterstützten. Des Weiteren danke ich für viele wertvolle Diskussionen meinen aktiven und ehemaligen Kollegen aus der Abteilung Abtragende Fertigungsverfahren Dr.-Ing. Simon Harst, Dr.-Ing. Mehnoush Mohammadnejad, Dr.-Ing. Maximilian Holsten, Dr.-Ing. Lars Hensgen, Dr.-Ing. Dr. rer. nat. Markus Zeis, Dr.-Ing. David Welling, Lukas Welschhof, Gregor Smeets, Lukas Heidemanns, Lothar Chrubasik, Marcel Olivier, Ugur Küpper, Timm Petersen, Bob Rommes, Raphael Heß, Florian Sous und Elio Tchoupe Sambou.

Für die Unterstützung bei allen experimentellen und praktischen Arbeiten möchte ich mich bei Aron Salm, Marcel Bauer, Reinhold Krings sowie dem staatl. gepr. Techniker Jörg Meyer bedanken. Daneben gilt ein besonderer Dank auch der Abteilung Informationstechnik des WZL und insbesondere Hartmut Niederhagen, die die gesamte für die Simulation notwendige Infrastruktur zur Verfügung gestellt und gepflegt haben.

Die Entstehung des Manuskripts wäre in dieser Art und Weise ohne die Arbeit meiner studentischen Hilfskräfte sowie den Einsatz der Bachelor- und Masterarbeiter nicht möglich gewesen. Daher möchte ich mich im Einzelnen ganz herzlich bei Jan Verhohlen, Lars Gussen, Anna-Lea Schwarz, Bernd Frauenknecht, Andreas Konradi, Thomas Kubetschek, Timm Petersen, Marcel Olivier und Yanick Lührs für die tatkräftige Unterstützung bedanken.

Der größte Dank gilt jedoch meiner gesamten Familie, die mich auch außerhalb der Arbeit stets unterstützt hat. Insbesondere möchte ich meinen Eltern danken, dass sie mir die Ausbildung und meinen beruflichen Werdegang überhaupt erst möglich gemacht haben. Sie haben mir die notwendige Neugier sowie Hartnäckigkeit mitgegeben, die zur Entstehung einer solchen Arbeit erforderlich sind. Für die aufgebrachte Geduld, liebevolle Motivation und unentwegte Unterstützung möchte ich meiner Frau Christine und meiner Tochter Agnes danken. Beide haben für diese Arbeit auf einen nicht unerheblichen Teil gemeinsamer Zeit verzichten müssen und gaben mir trotzdem immer den notwendigen Rückhalt.

für Agnes

Kurzzusammenfassung

Jeder Fertigungsprozess hinterlässt seine Spuren auf dem fertigen Bauteil. Diese Spuren äußern sich in lokalen Veränderungen der Eigenschaften an den bearbeiteten Oberflächen. Einige dieser Veränderungen wirken sich im späteren Einsatz positiv und andere negativ auf das Bauteilverhalten aus. Sowohl die Auswirkungen als auch die Ursache der veränderten Eigenschaften generisch zu bestimmen und somit einen Ansatz zur Prognose des Einsatzverhaltens zu schaffen, ist die Grundidee der Prozesssignaturen. Diese beschreiben den mechanismenbasierten Zusammenhang zwischen den Werkstoffbeanspruchungen und den daraus resultierenden Modifikationen im Werkstoff. Zurückführen lassen sich die verantwortlichen Mechanismen auf drei Hauptwirkungen: Thermisch, mechanisch und chemisch, die jeweils oder in Kombination zu einem spezifischen Beanspruchungskollektiv im Werkstoff führen.

Die Funkenerosion, die den Abtrag durch elektrische Entladungen generiert, hat entsprechend eine rein thermische Hauptwirkung. Gegenstand dieser Arbeit ist die Bestimmung der Werkstoffbeanspruchung, die im Funkenerosionsprozess auftritt. Dazu musste zunächst der für die Werkstoffbeanspruchung im Werkstück verantwortliche Anteil an der Prozessenergie bestimmt werden. Mit der Kombination aus einer empirischen Analyse der energetischen Vorgänge im Arbeitsspalt und einem numerischen Modell des Wärmetransfers konnte der Energieanteil für die skizzierten Randbedingungen einer Einzelentladung ermittelt werden. Der Funkenerosionsprozess setzt sich aus der hochfrequenten, kontinuierlichen Aneinanderreihung von Einzelentladungen zusammen. Die Übertragung auf den kontinuierlichen Prozess erfolgte in zwei Schritten. Zunächst wurde die Wechselwirkung zweier aufeinanderfolgender Entladungen analysiert und im Anschluss das resultierende makroskopische Temperaturfeld infolge des kontinuierlichen Funkenerosionsprozesses bestimmt. Die Kombination der drei Modelle (Einzelentladung, Wechselwirkung konsekutiver Entladungen und makroskopisches Temperaturfeld) ermöglichte die Bestimmung der lokalen Werkstoffbeanspruchung im Funkenerosionsprozess. Exemplarisch wurde eine Prozesssignaturkomponente, welche die verbleibenden Eigenspannungen beschreibt, aufgestellt und auf ihre Invertierbarkeit überprüft. Somit konnte die Möglichkeit einer funktionsorientierten Prozessauslegung für den Funkenerosionsprozess aufgezeigt werden.

Abstract

Every manufacturing process leaves its traces on the finished component. These traces are expressed in local changes of the properties of the machined surfaces. Some of these changes have a positive effect on the behavior of the component in later use, while others have a negative effect. The basic idea of process signatures is to determine generically both the effects and the cause of the changed properties and thus to create an approach for predicting in-service behavior. The process signatures describe the mechanism-based relationship between the material loads and the resulting modifications in the material. The responsible mechanisms can be traced back to three active principles: Thermal, mechanical and chemical, each of which, or in combination, leads to a specific collective of loads in the material.

Electrical discharge machining (EDM), which generates the material removal by electrical discharges, accordingly has a main thermal active principal. The subject of this work is the determination of the material loads that occur in the EDM process. The first step was to determine the proportion of the process energy that is responsible for the material loads in the workpiece. With the combination of an empirical analysis of the energetic processes in the working gap and a numerical model of the heat transfer, it was possible to conclude the energy ratio for the outlined boundary conditions of a single discharge. The EDM process is composed of a high-frequency continuous series of individual discharges. The transfer to the continuous process was carried out in two steps. First, the interaction of two consecutive discharges was analyzed and then the resulting macroscopic temperature field due to the continuous process was determined. The combination of the three models (single discharge, interaction of consecutive discharges and macroscopic temperature field) allowed the determination of the local material loads in the EDM process. As an example, a process signature component describing the induced residual stresses was established and checked for its invertibility. Thus, the possibility of a function-oriented process design for the spark erosion process could be demonstrated.

Inhaltsverzeichnis

Content

1	Einleitung	1
2	Stand der Erkenntnisse	5
2.1	Fertigungstechnische Grundlagen.....	5
2.2	Energetische Zusammenhänge und ihre Modellierung	9
2.3	Auswirkung der Funkenerosion auf die Mikrostruktur von Stahl.....	28
2.4	Prozesssignaturen für die funktionsorientierte Prozessauslegung	31
2.5	Zusammenfassung und Fazit zum Stand der Erkenntnisse	32
3	Zielsetzung und Vorgehensweise	33
4	Erklärungsmodell zur Energiedissipation bei der Einzelentladung	35
4.1	Energiedissipation in das Dielektrikum.....	36
4.2	Analyse der Energieeinträge in Anode und Kathode.....	58
4.3	FEM Simulation der Werkstoffbeanspruchung	67
4.4	Zusammenfassung und Zwischenfazit	88
5	Wechselseitige Beeinflussung zweier konsekutiver Entladungen	89
5.1	Beschreibungsmodell des räumlichen Abstands	90
5.2	Numerische Analyse des Temperaturfeldes.....	96
5.3	Zusammenfassung und Zwischenfazit	98
6	Simulation der Energiedissipation im kontinuierlichen Funkenerosionsprozess	99
6.1	Untersuchung des Energieeintrags im kontinuierlichen Erosionsprozess ..	99
6.2	Simulationsmodell der Energiedissipation.....	100
6.3	Rückkopplung auf das Temperaturfeld der Einzelentladung	106
6.4	Zusammenfassung und Zwischenfazit	110
7	Prozessauslegung auf Basis der Prozesssignatur	111
7.1	Prozesssignaturkomponente für die Eigenspannungen	111
7.2	Invertierung der Prozesssignaturkomponente zur Prozessauslegung.....	116
7.3	Zusammenfassung und Zwischenfazit	118
8	Zusammenfassung und Ausblick	119
9	Literaturverzeichnis	125

Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis

Formula symbols and abbreviations

Großbuchstaben

A	m^2	Fläche
A_{el}	mm^2	Elektrodenfläche
C_0	μm	Anfangsradius Plasmakanal
D	m	Durchmesser
E	V/m	Elektrische Feldstärke
E_D	J	Energieeintrag in das Dielektrikum
$E_{D,D}$	J	Energie der Druckwelle
$E_{D,P}$	J	Energie des Plasmas
E_e	J	Entladeenergie
E_{Kond}	J	Konduktive Energiedissipation
$E_{Konv,D}$	J	Konvektive Energiedissipation in das Dielektrikum
$E_{Konv,m}$	J	Konvektive Energiedissipation durch den Abtrag
E_{WS}	J	Energieeintrag in das Werkstück
E_{WZ}	J	Energieeintrag in das Werkzeug
$F_{D,G}$	$\%$	Anteiliger Energieeintrag in die Gasblase
$F_{D,P}$	$\%$	Anteiliger Energieeintrag in das Plasma
F_{WS}	$\%$	Anteiliger Energieeintrag in das Werkstück
F_{WZ}	$\%$	Anteiliger Energieeintrag in das Werkzeug
I	A	Maschineneinstellgröße Sollentladestrom
K	N/m^2	Kompressionsmodul
L	m	Charakteristische Länge
Ma	-	Mach-Zahl
Nu	-	Nusselt-Zahl
P	$\%$	Wahrscheinlichkeit
P	μs	Maschineneinstellgröße der Sollpausendauer

P_e	W	Entladeleistung
P_{Lampe}	W	Leistung der Beleuchtungseinheit
$Q_{D,S}$	J	Strahlungswärme des Plasmas
R_e	MPa	Streckgrenze
R_p	μm	Plasmakanalradius
Re	-	Reynolds-Zahl
S	N/m	Oberflächenspannung
T	K	Temperatur
T	μs	Maschineneinstellgröße Sollentladedauer
T_0	K	Anfangstemperatur
T_{Ac1}	K	Austenitisierungstemperatur inhomogen
T_{Ac1}	K	Austenitisierungstemperatur homogen
T_D	K	Temperatur des Dielektrikums
T_m	K	Schmelztemperatur
T_{Plasma}	K	Temperatur des Plasmakanals
T_S	K	Oberflächentemperatur
T_v	K	Verdampfungstemperatur
T_{WS}	K	Werkstücktemperatur
Th	-	Thoma-Zahl
V	m^3	Volumen
$V_{GB,max}$	m^3	Maximales Volumen der Gasblase
$W_{D,G}$	J	Arbeit der Gasblasenoszillation
We	-	Weber-Zahl

Kleinbuchstaben

a	mm^2/s	Temperaturleitfähigkeit
a	m	Funktionsparameter
b	-	Funktionsparameter
c	m/s	Schallgeschwindigkeit
c_p	J/(kg·K)	Spezifische Wärmekapazität