

Scripts Precision and Microproduction Engineering - Band 10

Matthias Hackert-Oschätzchen

Gestaltung von elektrochemischen Abtragprozessen durch Multiphysiksimulation gezeigt
an der Endformgebung von Mikrobohrungen



Impressum

Gestaltung von elektrochemischen
Abtragprozessen durch
Multiphysiksimulation gezeigt an
der Endformgebung von
Mikrobohrungen

Autor:

Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Matthias Hackert-Oschätzchen

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Andreas Schubert

Wichtiger Hinweis:

Das Werk, einschließlich aller seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Autors unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

© 2015

Professur Mikrofertigungstechnik
Technische Universität Chemnitz

Verlag Wissenschaftliche Scripten
www.verlag-wiss-scripten.de

ISBN: 978-3-95735-028-2

Vorwort des Herausgebers

In der Schriftenreihe Präzisions- und Mikrofertigungstechnik werden in loser Folge Forschungsergebnisse und Veranstaltungsbeiträge zu aktuellen Entwicklungen auf den Gebieten der Präzisionsfertigung und der Herstellung mikrostrukturierter Bauteile und Oberflächen *aus der Professur Mikrofertigungstechnik der Technischen Universität Chemnitz und dem Fraunhofer Institut Werkzeugmaschinen und Umformtechnik – Abteilung Präzisions- und Mikrofertigungstechnik sowie dem durch beide Einrichtungen getragenen Kompetenzzentrum Mikrofertigungs- und Oberflächentechnologien KoMOT-* veröffentlicht.

Der Trend zu immer höherer Präzision in der Fertigung von Bauteilen bei gleichzeitig steigenden Anforderungen an die Ressourceneffizienz stellt besonders vor dem Hintergrund der zunehmenden Komplexität und Funktionalität von Bauteilen in verschiedensten Anwendungen eine Herausforderung an die Fertigungstechnik dar.

Der zehnte Band der Schriftenreihe ist der Untersuchung und Bewertung der Nutzung von Simulationen zur Auslegung elektrochemischer Abtragprozesse zur Herstellung von Präzisionsbauteilen gewidmet.

Durch Forderungen nach intensiverer Materialausnutzung, geringerer Baugröße und geringerem Gewicht nimmt die Leistungsdichte technischer Systeme zu. Diese Entwicklung wird begleitet von höheren Anforderungen an die Präzision von Bauteilen und an die Prozesssicherheit bei deren Herstellung. Da mit zunehmender Leistungsdichte bei mechanisch und thermisch belasteten Bauteilen in der Regel auch hochfeste und thermisch stabile Werkstoffe bearbeitet werden müssen, gewinnen abtragende Verfahren wie die Elektrochemische Bearbeitung an Bedeutung. Vor dem Hintergrund des Funktionsprinzips der Elektrochemischen Bearbeitung und der Vielfalt und Komplexität der Einflussgrößen stellt die Auslegung von Prozess und Werkzeugen eine besondere Herausforderung dar, deren bisher unzureichende Beherrschung zu einer Einschränkung der Nutzbarkeit des Verfahrens beiträgt.

Mit der von Dr. Hackert-Oschätzchen gewählten Thematik und der daraus abgeleiteten Aufgabenstellung, Simulationen des Elektrochemischen Abtragprozesses zu analysieren, zu verifizieren und hinsichtlich einer ingenieurtechnischen Anwendbarkeit zu bewerten, hat er ein aktuelles Thema aufgegriffen. Der Autor stellt dabei die Problematik an einem einfachen Modellsystem „Mikrobohrung“ dar und zeigt die Wirkung verschiedener Modellkomplexitäten auf die Simulationsergebnisse.

Im Ergebnis experimenteller Untersuchungen am gewählten Modellsystem und dem Vergleich zwischen Simulation und Experiment wird die Eignung der verschiedenen Modellansätze zur Vorhersage des Abtragverhaltens gegenübergestellt und bewertet. Damit leistet Herr Dr. Hackert-Oschätzchen einen wesentlichen Beitrag zur begründeten Auswahl von Modellansätzen und –komplexitäten bei der Multiphysik-Simulation des elektrochemischen Abtragprozesses.

Gestaltung von elektrochemischen Abtragprozessen durch Multiphysiksimulation gezeigt an der Endformgebung von Mikrobohrungen

Von der Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Chemnitz

genehmigte

Habilitationsschrift

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur habilitatus

Dr.-Ing. habil.

vorgelegt

von Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Matthias Hackert-Oschätzchen
geboren am 11.10.1979 in Großenhain
eingereicht am 19. Januar 2015

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Andreas Schubert

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

Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre

Chemnitz, den 8. Dezember 2015

Inhaltsverzeichnis

Bibliografische Beschreibung	2
Nomenklatur	7
1 Einleitung	16
1.1 Zielstellung	16
1.2 Aufbau der Arbeit	17
2 Stand der Wissenschaft und Technik	19
2.1 Grundlagen des elektrochemischen Abtragens	19
2.1.1 Vorgänge im Arbeitsspalt	19
2.1.2 Stromtransport und Spannungsabfall	20
2.1.3 Vorgänge an den Elektroden	21
2.1.4 Prinzip der anodischen Metallaufösung	24
2.1.5 Funktion des Elektrolyten	28
2.1.6 Thermodynamik der EC-Bearbeitung	30
2.1.7 Systematisierung der Prozesskenngrößen	30
2.2 EC-Abtragen als Fertigungsverfahren	31
2.2.1 Einordnung und Klassifizierung	31
2.2.2 EC-Kammer- und Konturbearbeitung	34
2.2.3 EC-Senken	36
2.2.4 EC-Bohren	39
2.2.5 Pulsed Electrochemical Machining (PECM)	45
2.2.6 Ultrashort Pulsed Electrochemical Machining (UPECM)	53
2.2.7 Jet Electrochemical Machining (Jet-ECM)	59
2.2.8 Laser Assisted Jet Electrochemical Machining (LAJECM)	63
2.2.9 Plasma-elektrolytisches Polieren (PEP)	66
2.3 Simulation des EC-Abtragens	70
3 Handlungsbedarf und Planung der Vorgehensweise	83
4 Modellsystem Endformgebung von Mikrobohrungen	86
4.1 Erzeugung von Mikrobohrungen mittels EDM	89
4.2 Fluiddynamische Funktion von Mikrobohrungen	92

5	Prozessgestaltung durch Multiphysiksimulation	94
5.1	Modellerstellung	95
5.1.1	Modellgeometrie	96
5.1.2	Modellvernetzung	98
5.1.3	Elektrodynamik	99
5.1.4	Geometriedeformation	102
5.1.5	Fluiddynamik	105
5.1.6	Thermodynamik	108
5.2	Simulationsergebnisse	110
5.2.1	Isotherme Elektrodynamik	111
5.2.2	Abtragsimulation	115
5.2.3	Nicht-isotherme Elektrolytfluidik	122
5.2.3.1	Fluiddynamik	122
5.2.3.2	Thermodynamik	127
5.2.3.3	Nicht-isotherme Elektrodynamik	131
6	Systematisierung der Simulationsergebnisse	136
7	Experimentelle Realisierung	141
7.1	Konstruktive Ausführung	142
7.1.1	Werkstückgeometrie	142
7.1.2	Basis mit Spannsystem	142
7.1.3	Druckkammer mit Isolationsblende	144
7.1.4	Elektrode und Elektrodenhalterung	145
7.2	Hydraulischer Aufbau der Vorrichtung	146
7.3	Anlagenperipherie	149
7.3.1	Positioniersystem	150
7.3.2	Elektrolytsystem	150
7.3.3	Generatorsystem	151
7.3.4	Prozesssteuerung	151
8	Experimentelle Untersuchung und Auswertung	155
8.1	Verwendete Messmethoden und Planung der Experimente	155
8.2	Experimentelle Durchführung und Validierung der Simulationsergebnisse	159
8.2.1	Untersuchungen zum Einfluss der Durchflussrichtung	159
8.2.1.1	Kammerseitige Durchflussrichtung	160
8.2.1.2	Basisseitige Durchflussrichtung	170
8.2.1.3	Vergleich von kammerseitiger und basisseitiger Durchflussrichtung	178
8.2.2	Untersuchungen zum Einfluss des Anfangsarbeitsabstandes	183
8.2.3	Untersuchungen zum Einfluss der Bearbeitungszeit	188

9	Bewertung der Prozessgestaltung durch Multiphysiksimulation	197
10	Zusammenfassung	201
	Literatur	204
	Abbildungsverzeichnis	224
	Tabellenverzeichnis	232
	Tabellarischer Lebenslauf	234
	Danksagung	237