TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Emrah Turan

Simulative Vorhersage und Analyse der Oberflächenrauheit beim Formelementfräsen von dünnwandigen ultrafeinkörnigen (UFG) Spaltprofilen

Schriftenreihe des PTW: „Innovation Fertigungstechnik“

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele, Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich

Simulative Vorhersage und Analyse der Oberflächenrauheit beim Formelementfräsen von dünnwandigen ultrafeinkörnigen (UFG) Spaltprofilen

Dem Fachbereich Maschinenbau

an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs

(Dr.-Ing.)

eingereichte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Dipl.-Wirt.-Ing. Emrah Turan

aus Hamm (Westfalen)

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche
Tag der Einreichung:	04. April 2018
Tag der mündlichen Prüfung:	19. Juni 2018

Darmstadt 2018

D17

Schriftenreihe des PTW: "Innovation Fertigungstechnik"

Emrah Turan

Simulative Vorhersage und Analyse der Oberflächenrauheit beim Formelementfräsen von dünnwandigen ultrafeinkörnigen (UFG) Spaltprofilen

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2018

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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6208-3
ISSN 1864-2179

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

Gewidmet meiner Familie

Vorwort des Herausgebers

Die fräsende Bearbeitung von spaltprofilierten Bauteilen mit Gefüge- und Eigenschaftsgradienten stellt einen wesentlichen Bestandteil der Weiterverarbeitung von UFG Halbzeugen zur Erzielung weiterer Leichtbaupotenziale sowie der Generierung neuer Anwendungsfelder dar. Durch den Einsatz der Zerspanung können multifunktionale Module gefertigt werden, indem durch Materialabträge diskontinuierliche Form- und Funktionselemente in die spaltprofilierten UFG Flansche, wie z.B. Bohrung oder Nut, integriert werden. Darüber hinaus ermöglicht das sogenannte Formelementfräsen die Herstellung von neuartigen Modulverbindungsmöglichkeiten. Diese stellen jedoch hohe Anforderungen an die Form- und Maßgenauigkeit der gefertigten funktionalen Elemente.

Im Rahmen der Beurteilung der Bearbeitungsqualität beim Formelementfräsen wird der Oberflächenqualität der hergestellten Form- und Funktionselemente eine besondere Bedeutung beigemessen. Zur optimalen Prozessauslegung bedarf es jedoch der Kenntnis und Untersuchung qualitätsbeeinflussender Faktoren. Aufgrund der geringen Wandstärke der Spaltprofilflansche können im Zerspanprozess Werkstückschwingungen auftreten, die sich auf die Bearbeitungsqualität negativ auswirken können. Weiterhin ist die Kenntnis der mit dem Materialabtrag zusammenhängenden Werkzeugdynamik von Belang. Die resultierende Oberflächenstruktur wird jedoch von der Relativbewegung zwischen dem Fräswerkzeug und Werkstück gebildet, sodass diese eine ebenso wichtige Bedeutung für die Bearbeitungsqualität besitzt. Hinzu kommt, dass der UFG Gefügezustand im Spaltprofilflansch einen wesentlichen Einfluss auf die Kräfte und Prozessschwingungen ausübt.

Die vorliegende Arbeit setzt sich daher mit der experimentellen Analyse und Simulation der Oberflächenrauheit beim Formelementfräsen von UFG Spaltprofilen auseinander. Dabei wird zunächst ein ganzheitliches Prozessmodell, bestehend aus mehreren Teilmodellen, zur Vorhersage der Oberflächengüte entwickelt, wobei die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen als Eingangsgrößen sowie als Kalibrierung und Verifizierung der Teilmodelle dienen. Die Approximation der Oberflächenstruktur der Formelemente erfolgt basierend auf berechneten zeitvarianten und positionsabhängigen Prozessgrößen. Anhand dessen können für den vorliegenden Anwendungsfall optimale Werkzeug- und Technologieparameterkombinationen mit dem Ziel der Steigerung der Produktivität und der Bearbeitungsqualität ermittelt werden. Dies ermöglicht zudem die Ableitung von Empfehlungen zur Werkzeug- und Prozessgestaltung für das UFG Profilfräsen.

Darmstadt, im April 2018 Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele

Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der Technischen Universität Darmstadt.

Mein Dank gilt dem Institutsleiter Herrn Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele für die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit und die damit verbundenen konstruktiv kritischen Diskussionen.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche bedanke ich mich für die Übernahme der Mitberichterstattung sowie für die hervorragende Zusammenarbeit im Rahmen des Sonderforschungsbereiches SFB 666.

Meine Arbeit wurde innerhalb des SFB 666 „Integrale Blechbauweisen höherer Verzweigungsordnung“, Spanende Bearbeitung am Coilmaterial durch Hochgeschwindigkeitsbearbeitung, von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) unterstützt, wofür ich mich ebenfalls bedanke.

Meinen SFB Kolleginnen und Kollegen möchte ich für die zahlreichen Diskussionen und gute Zusammenarbeit danken. Hervorheben möchte ich hierbei insbesondere Frau Dr. Thea Göllner, Frau Dr. Daniela Bratzke, Frau Anna Walter, Herrn Benjamin Horn, Herrn Thiago Weber Martins, M.Sc., Herrn Pushkar Mahajan, M.Sc., Herrn Sebastian Schmidt, M.Sc., Herrn Alexander Hoßfeld, M.Sc. und Herrn Thomas Grosch, M.Sc., die mir bei theoretischen und experimentellen Fragestellungen jederzeit hilfreich zur Seite standen.

Darüber hinaus gilt mein besonderer Dank denjenigen am PTW, die ich als meine Kollegen bezeichnen darf. In diesem Zusammenhang möchte ich mich insbesondere bei Herrn Dipl. Ing. Kaveh Haddadian und Herrn Vitali Dejkun, M.Sc., für die fachlichen Diskussionen, die wertvollen Anregungen und die jederzeitige Unterstützung bedanken.

An dieser Stelle danke ich auch meinen ehemaligen Studenten Cigdem Belgeli, Ehsan Tamuzkhah, Florian Falk, Sebastian Binder, Makrem Gares, Ertugrul Pürnek und Shahrokh Khodabakhshi für die tatkräftige Unterstützung. Euer überdurchschnittliches Engagement zu jeder Tageszeit sowie die tolle Zusammenarbeit werde ich stets in guter Erinnerung behalten.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern, die mir diesen beruflichen Werdegang ermöglichten und die mich liebevoll gefördert und jederzeit uneingeschränkt unterstützt haben. An dieser Stelle möchte ich mich auch ganz herzlich bei meiner Schwester bedanken, die mich jederzeit motiviert und in besonderer Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Ohne euch wäre der erfolgreiche Abschluss dieser Arbeit nicht möglich gewesen.

Darmstadt, im April 2018 Emrah Turan

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis ..... **I**
Abkürzungsverzeichnis ..... **III**
Formelverzeichnis ..... **V**
1 Einleitung **1**
2 Grundlagen und Stand der Forschung **3**
2.1 Ultrafeinkörnige (UFG) Werkstoffe 3
2.1.1 Definition ultrafeinkörniger und nanokristalliner Werkstoffe 3
2.1.2 Verfahren zur Erzeugung von UFG Gefügen 4
2.1.3 Eigenschaften von UFG Werkstoffen 4
2.1.4 Industrielle Anwendung von UFG Werkstoffen 7
2.2 Spaltprofilieren und Spaltbiegen 9
2.2.1 Grundlagen des Spaltprofilierens und -biegens 9
2.2.2 Materialeigenschaften von Spaltprofilen 11
2.3 Zerspanung von ultrafeinkörnigen Werkstoffen 15
2.3.1 Einfluss auf die Prozesskräfte 15
2.3.2 Einfluss auf die Oberflächenintegrität und -topographie 17
2.4 Modellierung der Prozessdynamik beim Fräsen dünnwandiger Bauteile 21
2.4.1 Zerspankraftmodelle 21
2.4.2 Simulative Abbildung des dynamischen Werkzeugverhaltens 24
2.4.3 Modellierung der Werkstückdynamik 27
2.4.4 Vorhersage der Bauteilqualität mittels der Werkzeug-Werkstück-Simulation 33
3 Problemstellung, Zielsetzung und Vorgehensweise **40**
4 Versuchs- und Messtechnik **42**
4.1 Experimentelle Randbedingungen 42
4.1.1 Versuchsmaschine 42
4.1.2 Versuchswerkstoff/-werkstück 43
4.1.3 Werkstückspannung 43
4.1.4 Versuchswerkzeuge 45
4.2 Messequipment und -aufbau 46
4.2.1 Messung der Zerspankräfte 46
4.2.2 Ermittlung der Werkstückdynamik 48
4.2.3 Ermittlung der Werkzeugschwingungen 49

4.2.4 Oberflächenrauheitsmessung von gefrästen Features ... 52
5 Simulationsansatz zur Modellierung des Formelementfräsprozesses ... 53
5.1 Aufbau der Prozesssimulation zur Vorhersage der Bauteilqualität ... 53
5.2 Mechanistisches Zerspankraftmodell ... 54
5.2.1 Vorgehensweise beim Aufbau des mechanistischen Zerspankraftmodells ... 55
5.2.2 Durchführung von experimentellen Versuchen zur Kalibrierung des Zerspankraftmodells ... 63
5.3 Modellierung des dynamischen Werkzeugverhaltens ... 66
5.3.1 Analytischer Ansatz zur Berechnung der Werkzeugschwingungen ... 66
5.3.2 Messtechnische Ermittlung der statischen und dynamischen Eigenschaften des Werkzeugsystems ... 72
5.4 Werkstückmodellierung ... 75
5.4.1 Grundidee der FE-basierten Werkstücksimulation ... 76
5.4.2 Experimentelle Ermittlung der modalen Parameter des Werkstücksystems ... 78
5.4.3 Berechnung der zeit- und positionsabhängigen Werkstückverschiebungen ... 84
5.4.4 Vorhersagegenauigkeit des Werkstückmodells ... 85
5.5 Materialabtragssimulation ... 88
5.6 Experimentelle Verifizierung des ganzheitlichen Prozessmodells ... 92
6 Modellbasierte Vorhersage und Analyse der Bearbeitungsqualität beim Profilfräsen ... 94
6.1 Berücksichtigung werkzeugseitiger Einflüsse auf die Bearbeitungsqualität ... 94
6.2 Einflussnahme des Gefügezustands des Werkstücks auf die Oberflächenstruktur der Formelemente ... 101
6.3 Auswirkung der Variation der Technologieparameter auf die Oberflächenstruktur ... 103
6.4 Bewertung der Qualitätsergebnisse des Formelementfräsens ... 112
6.5 Fazit zur ganzheitlichen Prozesssimulation ... 116
7 Folgerungen für die Praxis ... 118
8 Zusammenfassung und Ausblick ... 121
9 Literaturverzeichnis ... 124