Ultrapräzise Diamantbearbeitung nitrocarburiertes Stähle für die Formeinsatzherstellung

**Vom Fachbereich Produktionstechnik
der
Universität Bremen**

**zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte**

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Jens Osmer

Gutachter: Professor Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. E. Brinksmeier
Professor Dr.-Ing. habil. F. Hoffmann

Tag der mündlichen Prüfung: 19.09.2014

Forschungsberichte aus der Stiftung Institut für Werkstofftechnik
Bremen

Band 66

Jens Osmer

**Ultrapräzise Diamantbearbeitung nitrocarburierter
Stähle für die Formeinsatzherstellung**

D 46 (Diss. Universität Bremen)

Shaker Verlag
Aachen 2015

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.: Bremen, Univ., Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2015

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3354-0

ISSN 1437-7659

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 des Herausgebers

Spanende und umformende Fertigungsverfahren sind unverzichtbare Bestandteile industrieller Prozessketten zur Herstellung hochwertiger Bauteile. In Abhängigkeit von der Bearbeitungsaufgabe und von den zu erreichenden Bauteileigenschaften sowie eingesetzten Werkzeugmaschinen und Zerspanwerkzeugen können diese Fertigungsverfahren in konventionelle sowie präzise und ultrapräzise Fertigungsverfahren untergliedert werden. Während die konventionellen Fertigungsverfahren zumeist als Bindeglied zwischen Vor- und Endbearbeitungsverfahren stehen, ist die spanende Präzisions- und Ultrapräzisionsbearbeitung dazu geeignet, als Endbearbeitungsverfahren komplexe Bauteilkomponenten mit Formgenauigkeiten im Submikrometerbereich und Oberflächenqualitäten im Nanometerbereich direkt herzustellen.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Berichte stellen die aktuellen Forschungsergebnisse der Hauptabteilung Fertigungstechnik in der Stiftung Institut für Werkstofftechnik (IWT) und des Labors für Mikrozerspanung (LFM) der Universität Bremen dar. Diese Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit den grundlegenden Wirkzusammenhängen bei trennenden und umformenden Bearbeitungsverfahren, der Entwicklung ökonomisch (effizient) und ökologisch (umweltbewusst, nachhaltig) optimierter Fertigungsprozesse und -prozessketten als auch den ultrapräzisen Endbearbeitungsverfahren für innovative hochgenaue Produkte der Optik und Mikrotechnik.

Die vorliegende Arbeit widmet sich der Herstellung von Abformwerkzeugen aus gehärtetem Stahl in optischer Oberflächenqualität. Hierfür wird die Randschicht der Stähle mittels Nitrocarburieren thermo-chemisch behandelt, um den bei der Diamantbearbeitung von unbehandelten Stählen üblicherweise auftretenden Verschleiß zu reduzieren. Die so entstehende Randschicht lässt sich mit Diamantdreh- und -fräsprozessen bearbeiten. Somit kann der Klasse der diamantbearbeitbaren Werkstoffe eine weitere Gruppe hinzugefügt werden.

Bremen im September 2014

Ekkard Brinksmeier

Danksagung

In erster Linie möchte ich mich bei den beiden Gutachtern dieser Arbeit bedanken. Meinem Doktorvater und Erstgutachter Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E. h. Ekkard Brinksmeier gilt mein besonderer Dank für die Unterstützung und seinen wissenschaftlichen Rat während der Erstellung dieser Dissertationsschrift. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Franz Hoffmann für die Übernahme des Koreferats und die Unterstützung hinsichtlich des Nitrocarburiens.

Außerdem danke ich den weiteren Mitgliedern der Prüfungskommission. Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhfuß danke ich für die Übernahme des Vorsitzes in meiner Prüfungskommission. Herrn Prof. Dr.-Ing. Ralf Gläbe, der durch seine gemeinsame Idee mit Frau Dr.-Ing. Juan Dong diese Arbeit erst möglich gemacht hat. Herrn Dr.-Ing. Oltmann Riemer danke ich für die Mitwirkung im Prüfungsausschuss sowie für seinen wissenschaftlichen Rat während meiner Zeit im LFM. Außerdem danke ich Herrn B. Sc. Andreas Bork für die Mitwirkung im Prüfungsausschuss.

Ein ganz besonderer Dank gilt noch meinen ehemaligen Institutskollegen. Besonders erwähnen möchte ich Herrn Dr.-Ing. Heiko Schulte und Herrn Dr.-Ing. Sven Twardy, die bei fachlichen Fragen immer ein offenes Ohr für mich hatten und darüber hinaus zu sehr guten Freunden geworden sind. Ein weiterer sehr großer Dank geht an meinen Bürokollegen und Freund Herrn Dr.-Ing. Yildirim Mutlugünes für all seine Ratschläge und das beste Büro in der Geschichte des LFM.

Meinen studentischen Hilfskräften, Diplom-, Bachelor- und Masterarbeitern danke ich ebenfalls sehr, da ich ohne ihre Hilfe das umfangreiche Versuchsprogramm dieser Arbeit nie hätte bewältigen können. In alphabetischer Reihenfolge sind dies Herr Andreas Barz, Herr Mitja Krause, Herr Robert Kuhfuß, Herr Markus Häveker, Herr Axel Meier, Herr Bernd Schwarz, Frau Hanna Selke, Herr Xugu Wang und Herr Igor Zahn.

Weiterhin danke ich der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung meiner Arbeit im Rahmen des SFB/TR4 und dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Förderung im Rahmen des zentralen Innovationsprogramm Mittelstand.

Meiner Mutter möchte ich für die fortwährende Unterstützung während meiner gesamten Ausbildungszeit danken. Sie hat mich immer gefördert und mir die Freiheit gelassen, meine eigenen Entscheidungen zu treffen, die für den erfolgreichen Abschluss meiner Ausbildung notwendig waren.

Meiner Frau Annika danke ich für die sagenhafte Unterstützung bei der Fertigstellung meiner Arbeit. Ohne ihren Ansporn und ihre Motivation hätte ich diese Arbeit vermutlich nicht fertig gestellt.

Kurzfassung

Hochgenaue Glas- und Kunststoffoptiken werden heutzutage in großen Stückzahlen durch Replikationsverfahren, wie bspw. dem Kunststoffspritzguss und dem Blankpressen von Gläsern, hergestellt. Für die Replikation dieser Optiken werden Formeinsätze aus temperatur- und verschleißbeständigen Werkstoffen benötigt. Neben Keramiken kommen hier vor allem Formeinsatzstähle zur Anwendung. Letztere lassen sich bisher nur durch eine aufwendige Prozesskette aus mehreren iterativen Schleif- und Polieroperationen in optischer Qualität herstellen, da eine Bearbeitung mit Diamantwerkzeugen in einem Schritt auf Grund des hohen Verschleißes nicht möglich ist. Ebenfalls Stand der Technik ist die Beschichtung von Stahlformeinsätzen mit einer stromlos abgeschiedenen Nickel-Phosphor-Schicht, die sich ohne nennenswerten Verschleiß am Diamantwerkzeug bearbeiten lässt. Allerdings verfügen die Beschichtungen über eine geringe thermische Stabilität, was sich negativ auf das Einsatzverhalten während der Replikation auswirkt. Trotz der genannten Nachteile und einer Vielzahl von Forschungsarbeiten zur Diamantbearbeitung von Stählen, konnte bislang kein Durchbruch auf diesem Gebiet erzielt werden.

Diese Arbeit widmet sich einem neuartigen Ansatz zur Realisierung einer Diamantbearbeitung von Stählen. Hierbei handelt es sich um die thermo-chemische Modifikation des Werkstücks mittels eines Nitrocarburierprozesses. Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die durch die Behandlung entstehende Verbindungsschicht innerhalb der Werkstückrandzone mit Diamantwerkzeugen ohne erheblichen Verschleiß bearbeitet werden kann und optische Oberflächenqualitäten erreicht werden. Anwendungsbeispiele zur Glas- und Kunststoffreplikation sowie zur Fertigung von mechanischen Präzisionskomponenten runden die Arbeit ab.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	11
1 Einleitung	15
2 Stand der Kenntnisse	18
2.1 Stand der Technik.....	19
2.1.1 Monokristalliner Diamant als Schneidstoff.....	25
2.1.2 Herstellung von Formeinsätzen	35
2.1.3 Werkstoffkundliche Grundlagen zum Nitrieren und Nitrocarburieren	36
2.2 Stand der Forschung	39
2.2.1 Grundlagen zum Verschleiß von Werkstoffen	39
2.2.2 Verschleißmechanismen bei der Diamantbearbeitung.....	41
2.2.3 Diamantbearbeitung von Stahl	49
2.3 Fazit und Bewertung des Kenntnisstands	53
3 Motivation und Zielsetzung	55
4 Versuchsumfeld und experimentelle Untersuchungen	59
4.1 Werkzeugmaschinen	59
4.2 Prozesse und Versuchsaufbau zur Bestimmung der Zerspanbarkeit nitrocarburierter Stähle	60
4.3 Prozesse und Versuchsaufbau zur Herstellung von Formeinsätzen.....	63
4.3.1 Querplandrehen.....	63
4.3.2 Umfangsplanfräsen.....	65
4.4 Diamantwerkzeuge	66
4.5 Werkstücke	67
4.5.1 Stähle.....	67
4.5.2 Versuchsumfeld zum Nitrieren und Nitrocarburieren.....	69

4.5.3	Eigenschaften der Verbindungsschichten	70
4.5.4	Aufbau und Zusammensetzung der Verbindungsschicht	71
4.6	Messtechnik	72
4.7	Messung des Diamantwerkzeugverschleißes	78
5	Zerspanbarkeit nitrocarburierter Stähle	81
5.1	Versuchsplan zur Charakterisierung der Zerspanbarkeit	81
5.2	Oberflächentopographie	82
5.3	Spanformen	85
5.4	Einfluss der Verbindungsschichteigenschaften auf die Zerspanbarkeit	91
5.5	Fazit zur Zerspanbarkeit nitrocarburierter Stähle	93
6	Diamantdrehen nitrocarburierter Stähle	95
6.1	Versuchsplan	95
6.2	Prozessgrößen	96
6.3	Oberflächenqualität	97
6.4	Diamantwerkzeugverschleiß	100
6.5	Zusammenfassung und Fazit der Zerspanuntersuchungen	102
7	Verschleißmechanismen bei der Diamantbearbeitung	104
7.1	Verschleißformen und -mechanismen	104
7.2	Einfluss der Werkstoffeigenschaften auf das Verschleißverhalten	109
7.3	Zusammenfassung und Fazit zu den Verschleißmechanismen	115
8	Beispielhafte Prozessketten	117
8.1	Formeinsätze für die Glas- und Kunststoffabformung	117
8.2	Mechanische Präzisionskomponenten für den Einsatz in messtechnischen Geräten	120
9	Bedeutung für die Praxis und weiterer Forschungsbedarf	127

10	Zusammenfassung	130
11	Literatur	132
12	Liste der eigene Veröffentlichungen	142
13	Liste der studentischen Arbeiten.....	144