

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Michael Gerstenmeyer

**Entwicklung und Analyse eines
mechanischen Oberflächenbehandlungs-
verfahrens unter Verwendung des
Zerspanungswerkzeuges**

Band 219



Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Michael Gerstenmeyer

**Entwicklung und Analyse eines mechanischen
Oberflächenbehandlungsverfahrens unter
Verwendung des Zerspanungswerkzeuges**

Band 219

Entwicklung und Analyse eines mechanischen Oberflächenbehandlungsverfahrens unter Verwendung des Zerspanungswerkzeuges

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

der Fakultät für Maschinenbau

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

angenommene

Dissertation

von

Michael Gerstenmeyer

aus Bietigheim-Bissingen

Tag der mündlichen Prüfung: 12. Oktober 2018
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze
Korreferent: Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Friedrich Bleicher

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.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, 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 978-3-8440-6312-7

ISSN 0724-4967

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

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, indem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund soll im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet werden. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von Fertigungsverfahren und zugehörigen Werkzeugmaschinen- und Handhabungstechnologien als auch mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung des gesamten Produktionssystems. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Großer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit und das mir entgegengebrachte Vertrauen sowie die Unterstützung bei meinem Promotionsvorhaben. Bei Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Friedrich Bleicher bedanke ich mich sehr für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats.

Den Kolleginnen und Kollegen der Abteilung „Fertigungs- und Werkstofftechnik“ am wbk danke ich für die freundschaftliche Atmosphäre am Institut. Besonderer Dank gilt Eric Segebade und Dr.-Ing. Frederik Zanger für die vertrauensvolle Zusammenarbeit, konstruktiven Diskussionen und ihre Bereitschaft zum Korrekturlesen.

Weiterhin gilt mein Dank den Mitarbeiter von Werkstatt und Technik. Besonders hervorheben möchte ich Ralf Dorsner, Thomas Hildenbrand und Klaus Simon für die stets unkomplizierte Unterstützung bei der Probenfertigung und Versuchsstandbetreuung.

Meinen studentischen Hilfskräften und Abschlussarbeitern Benjamin Ort und Göran Fedder danke ich für ihren Einsatz, die einen wichtigen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit geleistet haben.

Besonderer Dank gilt meiner Familie für die lebenslange Unterstützung und den Rückhalt, sowie Irene für die Unterstützung und das Verständnis, wenn es aufgrund der Verfassung der Arbeit abends manchmal etwas später wurde.

Karlsruhe, Oktober 2018

Michael Gerstenmeyer

Abstract

In the manufacturing of high-stressed metallic components mechanical surface treatment processes are used to influence surface layer states like the topography, the residual stresses, work hardening and/or the microstructure. The surface layer states need to be improved to achieve the requested service properties like fatigue resistance.

Mechanical surface treatment is an additional process step in the process chain of part manufacturing to enhance performance but it is increasing production time and costs. Hence, different hybrid processes have been developed including mechanical surface treatment into prior process steps. The process strategy Complementary Machining combines machining with a mechanical surface treatment process step using the cutting tool. Due to the inverse machining direction during the mechanical surface treatment process a high plastic deformation is induced in the surface layer which results in optimized roughness, work hardening, residual stresses and grain refinement.

The objective of the present work is the generation of process knowledge about the influence of the cutting edge microgeometry on the resulting process forces, temperatures and resulting surface layer states during Complementary Machining of Armco-Iron and AISI 4140. In a further step, an optimized cutting edge microgeometry is identified in order to reduce tool wear. Finally, the fatigue performances of machined and complementary machined specimens are analyzed.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungen und Formelzeichen	IV
1 Einleitung	1
2 Stand der Forschung und Technik	3
2.1 Mechanische Oberflächenbehandlung	3
2.1.1 Klassische Verfahren zur mechanischen Oberflächenbehandlung	4
2.1.2 In Zerspanung integrierte mechanische Oberflächenbehandlung	8
2.2 Bauteilzustände	11
2.2.1 Rauheit	11
2.2.2 Verfestigung	13
2.2.3 Mikrostruktur	14
2.2.4 Eigenspannung	15
2.3 Einfluss der Bauteilzustände auf die Schwingfestigkeit	17
2.4 FE-Prozesssimulation	18
2.4.1 Modellierung des Werkstoffverhaltens	19
2.4.2 Spanbildungssimulation	21
2.4.3 Simulation der mechanischen Oberflächenbehandlung	22
3 Zielsetzung und Vorgehensweise	25
3.1 Zielsetzung	25
3.2 Vorgehensweise	26
4 Versuchsdurchführung	28
4.1 Prozessstrategie	28
4.2 Versuchswerkstoffe und Probengeometrien	29
4.3 Versuchseinrichtungen	32
4.4 Analysetechnik	38
5 FEM-Simulation der mechanischen Oberflächenbehandlung	43
5.1 Werkstoffmodellierung	43

5.2	Modellierung in Abaqus/Standard	50
5.2.1	Zerspanung	50
5.2.2	Mechanische Oberflächenbehandlung	51
6	Ergebnisse beim orthogonalen Schnitt	53
6.1	Prozessstellgrößen bei der mechanischen Oberflächenbehandlung	53
6.1.1	Bearbeitungsgeschwindigkeit	53
6.1.2	Bearbeitungstiefe	58
6.1.3	Werkzeugorientierung	62
6.1.4	Werkzeugmikrogeometrie	64
6.2	Einfluss des Werkzeugs bei der Komplementärzerspanung	66
6.2.1	Simulationsgestützte Analyse	66
6.2.2	Identifizierung geeigneter Schneidkantenmikrogeometrien	74
6.3	Einfluss der Prozessstellgrößen auf die Randschichtzustände	83
6.3.1	Topographie	83
6.3.2	Mikrohärte	86
6.3.3	Mikrostruktur	88
6.3.4	Eigenspannungen	94
6.4	Diskussion	95
7	Ergebnisse beim Außenlängsdrehen	103
7.1	Komplementärzerspanung beim Außenlängsdrehen	103
7.2	Resultierende Bauteilzustände	106
7.2.1	Topographie	106
7.2.2	Mikrohärte	109
7.2.3	Mikrostruktur	110
7.2.4	Eigenspannungen	111
7.3	Einfluss der Komplementärzerspanung auf die Lebensdauer	114
7.4	Diskussion	122
8	Zusammenfassung und Ausblick	127
8.1	Zusammenfassung	127

8.2 Ausblick

128

9 Literaturverzeichnis

I

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

Kurzzeichen	Größe
Al	Aluminium
Armco	Armco-Eisen
C	Kohlenstoff
Ca	Kalzium
CM	Complementary Machining
Co	Kobalt
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
DIN	Deutsche Industrie Norm
DR	Deep Rolling
EN	Europäische Norm
Fe	Eisen
FE(M)	Finite Elemente (Methode)
FIB	Focussed-Ion Beam
Ga	Gallium
GG	Grundgefüge
HSK	Hohlschaftkegel
HV	Vickershärte
ISO	Internationale Organisation für Normung
K	Kalium
LPB	Low Plasticity Burnishing
MC	Mikrokristallin
Mg	Magnesium
MHP	Machine Hammer Peening

Mn	Mangan
Mo	Molybdän
MOB	Mechanische Oberflächenbehandlung
NC	Nanokristallin
Ni	Nickel
REM	Rasterelektronenmikroskop
S	Schwefel
Si	Silicium
SiC	Siliciumcarbid
Ti	Titan
WC	Wolframcarbid

Formelzeichen

Formelzeichen	Größe	Einheit
A	Johnson-Cook Parameter	MPa
a_p	Schnitt-/Bearbeitungstiefe	μm
$a_{p,c}$	Schnitttiefe	μm
$a_{p,st}$	Bearbeitungstiefe	μm
A_α	Freifläche	-
A_γ	Spanfläche	-
B	Johnson-Cook Parameter	MPa
C	Johnson-Cook Parameter	MPa
C_U	Verschleißmodellkonstante	mm^2/N
c_p	spezifische Wärmekapazität	J/kgK
d_t	Weg entlang der Schneidkante	μm
E	Elastizitätsmodul	GPa
e_1	Werkstoffparameter	MPa/K
e_2	Werkstoffparameter	MPa/K

f_c	Vorschub in Schnittrichtung	mm/U
F_p	Passivkraft	N
F_{st}	Bearbeitungskraft	N
f_{st}	Vorschub in Bearbeitungsrichtung	mm/U
G	Schubmodul	GPa
h	Spannungsdicke	μm
IB	Integralbreite	$^\circ$
K	Form-Faktor	-
k_B	Boltzmann Konstante	J/K
k_p	Spezifische Passivkraft	N/mm ²
k_{st}	Spezifische Bearbeitungskraft	N/mm ²
m	Werkstoffparameter	-
n	Werkstoffparameter	-
n^*	Werkstoffparameter	-
R_a	Mittlere Rauheit	μm
R_t	Rautiefe	μm
R_z	Gemittelte Rautiefe	μm
r_β	Schneidkantenverrundung	μm
s	Hub	mm
s_{gr}	Dicke der nanokristallinen Randschicht	μm
s_m	Rillenabstand	μm
s_{tr}	Dicke Übergangsschicht	μm
S_α	Schneidkantensegment an der Freifläche	μm
S_γ	Schneidkantensegment an der Spanfläche	μm
\bar{S}	Mittlere Schneidkantenverrundung	μm
T	Temperatur	$^\circ\text{C} / \text{K}$
t	Zeit	s
T_m	Schmelztemperatur	$^\circ\text{C} / \text{K}$

T_{RT}	Raumtemperatur	°C / K
T_s	Schmelztemperatur	°C / K
T_{tr}	Übergangstemperatur	°C / K
U_p	Verschiebung in Passivrichtung	µm
U_{st}	Verschiebung in Bearbeitungsrichtung	µm
U_z	Verschiebung in z-Richtung	µm
v	Querkontraktionszahl	-
v_c	Schnittgeschwindigkeit	m/min
v_s	Kontaktgeschwindigkeit	m/min
v_{st}	Bearbeitungsgeschwindigkeit	m/min
w	Probenbreite	mm
W	Verschleißvolumen	mm ³
z	Abstand zur Oberfläche	µm
α	Freiwinkel	°
α	Wärmeausdehnungskoeffizient	1/K
β	Keilwinkel	°
γ	Spanwinkel	°
γ_{st}	Spanwinkel mech. Oberflächenbehandlung	°
$\Delta\bar{S}$	Änderung der mittl. Schneidkantenverrundung	µm
ΔG_0	Freie Aktivierungsenthalpie	J
ΔK	Änderung des Form-Faktors	-
Δs_{gr}	Änderung der Dicke der NC-Randschicht	µm
Δv	Werkstoffparameter	-
$\Delta\vartheta$	Werkstoffparameter	°C / K
ε	Dehnung	-
ε_{pl}	Plastische Dehnung	-
$\dot{\varepsilon}_n$	Dehnrate Referenz	1/s
$\bar{\varepsilon}_p$	Akkumulierte plastische Dehnung	-

$\dot{\epsilon}$	Dehnrage	1/s
$\dot{\epsilon}_{pl}$	Plastische Dehnrage	1/s
ζ	Werkstoffparameter	-
θ_0	Werkstoffparameter	MPa
θ_1	Werkstoffparameter	MPa
κ_s	Neigungswinkel	°
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(mK)
λ_U	Verschleißmodellkonstante	K
ξ	Werkstoffparameter	-
ρ	Dichte	g/m ³
σ	Spannung	MPa
σ^*	athermischer Anteil der Fließspannung	MPa
σ^{ES}	Eigenspannung	MPa
σ_G	thermischer Anteil der Fließspannung	MPa
σ_n	Kontaktspannung	MPa
σ_y	Fließspannung	MPa
μ	Reibkoeffizient	-
φ	Verdrehwinkel	°
ω	Winkelgeschwindigkeit	1/s
ω_c	Winkelgeschwindigkeit Zerspanung	1/s
ω_{st}	Winkelgeschwindigkeit mech. Oberfl.-behandl.	1/s
ϑ	Werkstoffparameter	°C / K
