

Mikrotribologische Konditionierung von Oberflächen für Umformwerkzeuge

Florian Böhmermann

BAND 90

Fertigungstechnik

Mikrotribologische Konditionierung von Oberflächen für Umformwerkzeuge

Dem Fachbereich Produktionstechnik
der
UNIVERSITÄT BREMEN

zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte

Dissertation

von
Dipl.-Ing. Florian Böhmermann

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h.c. Dr. h.c. Dr. h.c. B. Karpuschewski
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. A. Brosius

Tag der mündlichen Prüfung: 25. August 2021

Forschungsberichte aus dem Leibniz-Institut für
Werkstofforientierte Technologien

Band 90

Florian Böhmermann

**Mikrotribologische Konditionierung von Oberflächen
für Umformwerkzeuge**

D 46 (Diss. Universität Bremen)

Shaker Verlag
Düren 2022

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., 2021

Copyright Shaker Verlag 2022

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8390-3

ISSN 2626-658X

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 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 des Leibniz-Instituts für Werkstofforientierte Technologien (IWT) und des Labors für Mikrozerspanung (LFM) 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 Erzeugung und Anwendung mikrostrukturierter, reibungsreduzierender Oberflächen und verfolgt das Ziel, einen Beitrag zur Entwicklung innovativer, schmierstofffreier Umformprozesse zu leisten. In diesem Zusammenhang wird ein statistisches Mikrokontakt- und Reibmodell präsentiert. Dieses Modell erlaubt die Herausarbeitung mikrotopographischer Merkmale trockenreibungsminimierender Oberflächen mittels Simulationen. Die Erzeugung mikrostrukturierter Oberflächen gemäß der erarbeiteten Gestaltungsrichtlinien erfolgt durch Mikrofräsen, wofür dieses Verfahren experimentell qualifiziert wird. Ein anschließender Abgleich der Reibeigenschaften mikrogefräster Oberflächen mit den Simulationsergebnissen erlaubt die Verifikation des Vorgehens sowie die Erweiterung des Grundlagenwissens über die Ausbildung der trockenen Reibung auf mikroskopischer Ebene.

Bremen im November 2021

Bernhard Karpuschewski

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien (IWT) im Labor für Mikrozerspanung (LFM).

Zunächst gilt mein Dank meinen beiden Gutachtern. Meinem Doktorvater und Erstgutachter Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h.c. Dr. h.c. Dr. h.c. Bernhard Karpuschewski danke ich für seinen wissenschaftlichen Rat und die ordentliche Portion motivierender Worte zum Endspurt dieser Arbeit. Meinem Zweitgutachter Prof. Dr.-Ing. Alexander Brosius danke für die Übernahme des Koreferates.

Weiterhin danke ich allen Mitgliedern der Prüfungskommission für ihren Einsatz und ihr großes Interesse an meiner Arbeit; Dr.-Ing. Oltmann Riemer, M.Sc. Julian Heidhoff, Bastian Ohlendieck und ganz besonders Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhfuß, auch für seine Übernahme des Kommissionsvorsitzes.

Ein weiterer großer Dank gebührt meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am LFM respektive des IWT, mit denen ich über sechs Jahre einen fantastischen, kreativen Raum teilen und gestalten konnte. Stellvertretend hervorheben möchte ich hier Dr.-Ing. Oltmann Riemer, Dr.-Ing. Lars Schöнемann und den ehemaligen Direktor des IWT Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Ekkard Brinksmeier. Ihre kritische Durchsicht des Manuskripts und ihre vielen Tipps haben maßgeblich zum Erfolg meiner Arbeit beigetragen.

Das Entstehen einer ingenieurwissenschaftlichen Doktorarbeit ist ferner ohne die tatkräftige Unterstützung durch das technische und studentische Personal eines Instituts nur schwerlich vorstellbar. Stellvertretend für sie alle bedanke ich mich an dieser Stelle bei Christian Rösner und Juelie Winkelmann.

Darüber hinaus danke ich allen Kolleginnen und Kollegen vom Department of Mechanical Engineering an der University of Wisconsin-Madison, des Bremer Instituts für angewandte Strahltechnik (BIAS), des Bremer Instituts für Strukturmechanik und Produktionsanlagen (bime) und vom Zentrum für Technomathematik (ZeTeM) für die langjährige fruchtbare Zusammenarbeit.

Zum Schluss gilt mein Dank noch der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung meiner Arbeiten im Rahmen des Sonderforschungsbereich SFB 747 Mikrokaltumformen.

Jena im November 2021

Florian Böhmermann

Kurzfassung

Die Weiterentwicklung von Umformverfahren hin zu einer schmierstofffreien Prozessführung verspricht wirtschaftliche und ökologische Vorteile. Dieses gilt insbesondere für die Mikroumformtechnik, bei der die Beseitigung von Schmierstoffrückständen auf umformtechnisch hergestellten Kleinstbauteilen eine besondere Herausforderung darstellt. Die sichere Auslegung trockener Umformprozesse erfordert jedoch die Beherrschung veränderter tribologischer Randbedingungen, welche sich aus dem Entfall des Zwischenmediums ergeben. Mikrotribologisch konditionierte, mikrostrukturierte Werkzeugoberflächen können eine Schlüsselrolle beim Erreichen dieses Zieles spielen.

In dieser Arbeit wurden reibungsminimierende mikrostrukturierte Oberflächen für den Einsatz beim trockenen Mikrotiefziehen herausgearbeitet. Das Vorgehen umfasste zunächst das Erstellen eines anwendungsgerechten, statistischen Mikrokontakt- und Reibmodells, wobei die Feingestalten und die mechanischen Werkstoffeigenschaften von Oberflächen berücksichtigt wurden. Die wissenschaftliche Neuerung stellt die erstmalige Verwendung von Merkmalparametern aus der flächenhaften Rauheitsmesstechnik gemäß der Normenreihe ISO 25178 zur Einbindung realer technischer Oberflächen in ein solches Modell dar. Die Bestimmung bestgeeigneter Oberflächenmodifikationen erfolgte anhand der Ergebnisse von Reibungssimulationen für Modelloberflächen mit systematisch variierten Parametern. Die Verifikation der Ergebnisse gelang in mikrotribologischen Untersuchungen; die Fertigung der verwendeten mikrostrukturierten Probenkörper erfolgte dabei durch Mikrofräsen.

Im direkten Vergleich mit polierten und feingeschliffenen Referenzflächen wurden für mikrostrukturierte Oberflächen aus gehärtetem Werkzeugstahl im tribologischen Kontakt mit Aluminium eine um bis zu 68 % geringere Trockenreibung nachgewiesen. Diese Beobachtung ließ sich auf eine deutliche Reduktion des adhäsiven Anteils der Reibung zurückführen. Ferner konnte die Standardabweichung der Spitzenhöhen als der wesentliche, die Reibeigenschaften mikrostrukturierter Oberflächen bestimmende Parameter identifiziert werden. Die Ergebnisse abschließender trockener Mikrotiefziehversuche unterstrichen das Potenzial mikrotribologisch konditionierter Umformwerkzeuge für die Entwicklung trockener Umformprozesse. So konnte eine erkennbare Reduzierung der Stempelkraft bei der Verwendung von Tiefziehwerkzeugen mit mikrostrukturierten Oberflächen gezeigt werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik und Forschung	4
2.1	Kontaktmodellierung rauher Oberflächen.....	4
2.2	Trockene Reibung	8
2.2.1	Mechanismen der trockenen Reibung	9
2.2.2	Mathematische Modellierung der trockenen Reibung.....	11
2.3	Oberflächencharakterisierung	15
2.4	Mikroumformtechnik	17
2.5	Werkzeug- und Formenbau für die Mikroumformtechnik	20
2.5.1	Werkzeugwerkstoffe	20
2.5.2	Erzeugung von Werkzeuggeometrie und -oberfläche	22
2.5.3	Tribologische Konditionierung von Umformwerkzeugen	26
2.6	Zusammenfassende Bewertung.....	28
3	Zielsetzung und Vorgehensweise	30
4	Versuchsumfeld	34
4.1	Fertigungsmittel.....	34
4.1.1	Fünf-Achs-Bearbeitungszentrum.....	34
4.1.2	Versuchsstand zum Mikropolieren	35
4.2	Versuchswerkstoffe	37
4.2.1	Pulvermetallurgischer Kaltarbeitsstahl 1.2379	37
4.2.2	Aluminium 3.0385 und 3.0255.....	38
4.2.3	Austenitischer Edelstahl 1.4301	39
4.3	Messmittel und -methoden	40
4.3.1	Charakterisierung der Oberflächenfeingestalt.....	40
4.3.2	Qualitative Beurteilung des Werkzeugverschleißes	41
4.3.3	Mikrotribologische Charakterisierung	42
4.3.4	Mikrotiefziehen	44

5	Modellierung der trockenen Reibung	45
5.1	Analyse der Kontaktbedingungen beim Mikrotiefziehen	45
5.2	Kontaktzustandsmodellierung mithilfe von Merkmalparametern.....	46
5.3	Reibmodell für das trockene Mikrotiefziehen	49
5.4	Berechnung des Reibungskoeffizienten für Modelloberflächen	53
5.5	Zwischenfazit: Reibungsmodellierung und -simulation	68
6	Mikrostrukturierung von Oberflächen.....	70
6.1	Vorüberlegungen zur Mikrostrukturierung von Oberflächen	70
6.2	Eingangsgroßen der Mikrofräsbearbeitung	74
6.2.1	Werkzeugdurchmesser und Bearbeitungsstrategie	75
6.2.2	Schnitttiefe.....	79
6.2.3	Vorschub pro Schneide und Zeilenabstand	80
6.3	Werkzeugverschleiß	90
6.4	Zwischenfazit: Erzeugung mikrostrukturierter Oberflächen	93
7	Anwendungsprüfung mikrostrukturierter Oberflächen	96
7.1	Kugel-Platte-Mikrotribometrie	96
7.2	Kugel-Platte-Mikrotribometrie – Erweiterter Versuchsumfang	107
7.3	Mikrotiefziehen mit konditionierten Werkzeugen.....	120
7.3.1	Trocknes Tiefziehen von Aluminiumwerkstücken	123
7.3.2	Trockenes Tiefziehen von Stahlwerkstücken.....	124
8	Fazit: Mikrotribologische Konditionierung von Oberflächen.....	129
9	Zukünftige Bedeutung konditionierter Oberflächen.....	135
10	Literatur	138
11	Liste studentischer Arbeiten	156

Abkürzungen

Al	Aluminium
BIAS	Bremer Institut für angewandte Strahltechnik
BSE	Rückstreuелеktronenbild (engl.: backscattered electrons)
CPS	cyber-physikalische Systeme
CVD	chemische Gasphasenabscheidung
DIN	Deutsche Industrienorm
DLC	amorphe Kohlenstoffschicht (engl.: diamond like carbon)
EN	Europäische Norm
ESt	austenitischer Edelstahl
FOS	faseroptischer Sensor
HRC	Härte nach Rockwell (Diamantkegel)
HV	Vickershärte
ISO	Internationale Organisation für Normung
MET	Micro Engineering Technologies
Nd:YAG	Neodym-Ionen dotierter Yttrium-Aluminium-Granat
NDH	Niederhalter
PM	Pulvermetallurgie
PVD	physikalische Gasphasenabscheidung
REM	Rasterelektronenmikroskop
SE	Sekundärelektronenbild (engl.: secondary electrons)
SM	Schmelzmetallurgie
SPK	Sprühkompaktieren
St	gehärteter Werkzeugstahl
WST	Werkstück
WZG	Werkzeug

Formelzeichen

A	mm ²	wahre Kontaktfläche
A _b	mm ²	bearbeitete Oberfläche
a _e	mm	Zeilenabstand (Eingriffsbreite)
a _e [']	-	bezogener Zeilenabstand
A _f	mm ²	Oberfläche der Gleichgewichtsfacette
a _m	µm	mittlerer Kontaktradius der Asperiten
A _n	mm ²	nominelle Kontaktfläche
a _p	mm	Schnitttiefe (Eingriffstiefe)
a _p [']	-	bezogene Schnitttiefe
d	mm	Abstand zwischen Oberflächen
D	-	Tal (engl.: dale)
D _A	mm	Napf Außendurchmesser
d _K	µm	Korndurchmesser
D _L	µm	Laserfleckdurchmesser
d _m	µm	mittlere Einsinktiefte der Asperiten
D _m	µm	mittlerer Grundkreisdurchmesser (Pferchkreis)
d _R	mm	Rondendurchmesser
d _S	mm	Kugeldurchmesser
D _S	mm	Stempeldurchmesser
d _{WZG}	mm	Werkzeughdurchmesser
d _z	µm	Grundkreisdurchmesser (Pferchkreis)
D _z	mm	Durchmesser Ziehkavität
E	N/mm ²	Elastizitätsmodul
E*	N/mm ²	kombinierter Elastizitätsmodul
F _i	N	auf einen Asperiten wirkende Kraft
F _m	N	mittlere Kraft pro Asperit

F_N	N	Normalkraft (Symbol gemäß der Tribologie)
F_{NDH}	N	Niederhalterkraft
f_P	kHz	Pulsfrequenz
F_R	N	Reibkraft
F_S	N	Stempelkraft
f_s	-	Adhäsionsfaktor
F_t	N	Tangentialkraft
f_z	mm	Vorschub pro Schneide
f_z'	-	bezogener Vorschub pro Schneide
G	N/mm ²	Schubmodul
H	-	Hügel (engl.: hill)
h_c	μm	Spanndicke
h_{cu}	μm	Spanungsdicke
$h_{cu,min}$	μm	Mindestspanungsdicke
H_p	N/mm ²	physikalische Härte
h_z	μm	Spitzenhöhe
k_1	-	Korrekturfaktor
k_f	N/mm ²	Fließspannung
l	mm	Hub
l_f	m	Vorschubweg
l_x	mm	Kantenlänge bearbeitete Fläche (Zustellrichtung)
l_y	mm	Kantenlänge bearbeitete Fläche (Vorschubrichtung)
m	-	Reibfaktor
m_i	-	spektrales Moment
n	1/min	Werkzeugdrehzahl
N	-	Anzahl Rauheitsspitzen im Kontakt
N_0	1/mm ²	Spitzendichte

N_A	-	Anzahl der Asperiten einer Oberfläche
n_H	-	Anzahl Hübe
n_U	-	Anzahl Umschmelzvorgänge
o_v	%	Überlappung (beim Lasermikropolieren)
P	-	Spitze (engl.: peak)
P_D	-	Packungsdichte
P_g	μm	Positioniergenauigkeit
p_G	Torr	Gasdruck
P_L	W	Laserleistung
p_N	N/mm^2	Flächenpressung / Niederhalterdruck
PS	μm	Wiederholgenauigkeit
p_s	Pa	Sauerstoffdruck
Q_w	mm^3/min	Zeitspanvolumen
R	-	Kammlinie (engl.: ridge line)
R^2	%	Bestimmtheitsmaß
R_a	μm	arithmetischer Mittenrauwert
R_{kin}	mm	kinematische Rauheit
R_q	nm	quadratischer Mittenrauwert
r_s	mm	Stempelkantenradius
r_z	mm	Ziehkantenradius
r_β	μm	Schneidkantenradius
s	mm	Stempelweg
S_a	nm	mittlere arithmetische Höhe (flächenhaft)
S_{ku}	-	Wölbung
s_m	mm	Materialstärke
s_P	nm	Passivierungsschichtdicke
S_{pc}	nm	Mittelwert der Spitzenkrümmung (siehe auch β_z)

Spd	1/mm ²	Spitzendichte (siehe auch N ₀)
Sq	nm	mittlere quadratische Höhe (flächenhaft)
Ssk	-	Schiefte
Sz	nm	maximale Höhe einer Oberfläche
T	°C	Temperatur
T _A	°C	Austenitisierungstemperatur
t _A	min	Austenitisierungsdauer
T _{AL}	°C	Anlasstemperatur
T _L	%	Tastgrad (Lasermikropolieren)
t _P	µs	Pulsdauer
u _z	mm	Ziehspalt
V	-	Senke (engl.: pit)
v _c	m/min	Schnittgeschwindigkeit
v _f	mm/min	Vorschubgeschwindigkeit
v _{lin}	mm/s	Geschwindigkeit (lineare Bewegung)
v _z	mm/s	Ziehgeschwindigkeit
x	µm	Koordinate (lateral)
y	µm	Koordinate (lateral)
z	µm	Koordinate (vertikal)
z _{WZG}	-	Anzahl Schneiden des Fräswerkzeuges
α	°	mittlerer Steigungswinkel der Asperiten
α _{wn}	-	Verhältnis wahre zu nomineller Kontaktfläche
α _{WZG}	°	Anstellwinkel des Fräswerkzeuges
β*	mm	Korrelationslänge
β ₀	-	Ziehverhältnis
β _z	µm	mittlerer Spitzenradius
γ	°	Spanwinkel

λ_c	mm	Grenzwellenlänge (L-Filter)
λ_s	μm	Grenzwellenlänge (S-Filter)
μ	-	Reibungskoeffizient
μ_{ad}	-	Reibungskoeffizient (Adhäsionskomponente)
μ_{de}	-	Reibungskoeffizient (Deformationskomponente)
μ_z	μm	mittlere Spitzenhöhe
ν	-	Querkontraktionszahl
σ_N	N/mm^2	Kontaktnormalspannung
σ_z	μm	Standardabweichung der Spitzenhöhe
τ_{aB}	N/mm^2	Scherfestigkeit
τ_R	N/mm^2	Reibschubspannung
$\Phi(z)$	-	Verteilungsdichtefunktion
ψ	-	Plastizitätsindex