

Glattwalzen beschichteter Oberflächen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

von der Fakultät Maschinenbau

der Technischen Universität Dortmund

genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Lars Hiegemann M. Sc.

aus

Ahlen

Dortmund, 2017

Vorsitzender der Prüfungskommission: Prof. Dr. Michael Henke

Berichter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. A. Erman Tekkaya

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

Prof. Dr.-Ing. Andreas Menzel

Tag der mündlichen Prüfung: 26. Juni 2017

Dortmunder Umformtechnik

Band 92

Lars Hiegemann

Glattwalzen beschichteter Oberflächen

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Aachen 2017

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.: Dortmund, Technische Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5419-4

ISSN 1619-6317

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

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Umformtechnik und Leichtbau (IUL) der Technischen Universität Dortmund. Die entsprechenden Arbeiten wurden im Rahmen des durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Sonderforschungsbereichs 708 (SFB 708) im Teilprojekt A3 durchgeführt.

Dabei haben viele Personen zum Gelingen meiner Forschungstätigkeit beigetragen, weshalb ich mich hiermit bei allen bedanken möchte, die meine Arbeit unterstützt und deren Umsetzung ermöglicht haben.

Mein besonderer Dank gilt dabei Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. A. Erman Tekkaya, für seinen Einsatz und die Förderung meiner Arbeit am Institut sowie die Betreuung meiner Promotion. Weiterhin möchte ich mich bei der gesamten Prüfungskommission bedanken. Dieses beinhaltet Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dr. h.c. Fritz Klocke, dem ich ebenfalls für die Übernahme des Korreferats danken möchte, sowie Prof. Dr. Michael Henke und Prof. Dr.-Ing. Andreas Menzel.

Außerdem gilt mein Dank allen aktuellen und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen des IULs und insbesondere meiner Abteilung sowie den Projektpartnern innerhalb des SFB 708 für die vielen hilfreichen Diskussionen rund um meine Dissertation. Hervorheben möchte ich weiterhin meine ehemaligen Bürokollegen, Dipl.-Ing. Thai Dang sowie Dipl.-Ing. Peter Sieczkarek für die vielen fachlichen Dialoge, aber darüber hinaus auch für die interessante gemeinsame Zeit am Institut. Weiterhin danke ich Dr.-Ing. Nooman Ben Khalifa für die Durchsicht und die nützlichen Kommentare zu meiner Arbeit. Zusätzlich gilt mein Dank allen technischen Angestellten des IULs und speziell Dirk Hoffmann für die Unterstützung bei den experimentellen Arbeiten. Darüber hinaus bedanke ich mich bei meinen studentischen Hilfskräften, welche mich sehr bei meiner Arbeit unterstützt haben. Dies betrifft besonders Luka Rutenhofer B. Sc., der mir über die gesamte Dauer der Anfertigung meiner Dissertation zur Seite stand.

Nicht zuletzt gilt mein außerordentlicher Dank meiner Familie und meinen Freunden. Dabei kann ich rückblickend sagen, dass mein Interesse an technischen Zusammenhängen bereits in frühen Jahren begann und somit meine berufliche Laufbahn prägte. Aus diesem Grund möchte ich mich zunächst bei meinen Eltern Bärbel und Hermann Hiegemann sowie meiner Schwester Ines Hiegemann M. A. bedanken, die mich auf diesen Weg gebracht und dauerhaft unterstützt haben. Ganz besonders möchte ich mich auch bei meiner Frau Wanja Hiegemann und meiner Tochter Maja Hiegemann für ihre Motivation und das Interesse an meiner Forschung bedanken. Diese Arbeit wäre ohne die durchgängige Unterstützung und ihren Rückhalt nicht möglich gewesen!

Dortmund, den 07.07.2017

Lars Hiegemann

Kurzfassung

Glattwalzen dient dem Nachbearbeiten von Oberflächen, indem diese durch ein Umformen der Rauheitsspitzen eingeebnet werden. In dieser Arbeit wird der Walzprozess genutzt, um die Oberfläche von thermisch gespritzten Hartmetall-Beschichtungen zu glätten. Dieses erfolgt vor dem Hintergrund, das tribologische Verhalten der Oberflächen zu verbessern bzw. an deren Einsatzzweck anzupassen. Hierzu werden zunächst die mikroskopischen Umformvorgänge an einzelnen Rauheitsspitzen und anschließend die makroskopischen Vorgänge zwischen Walzkugel und beschichteter Oberfläche betrachtet. Dieses mündet letztendlich in einem mathematischen Modell, welches es ermöglicht, die Rauheit nach einem Glattwalzprozess vorauszusagen und damit den Walzprozess auszulegen. Somit wird die Voraussetzung geschaffen, zukünftig auf umfangreiche experimentelle Vorversuche des Glattwalzprozesses verzichten zu können. Das Modell weist eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit experimentellen Untersuchungen sowohl für veränderte Prozessparameter als auch für zu bearbeitende Materialien auf. Weiterhin werden die einzelnen Walzparameter und deren Einfluss auf das Walzergebnis näher betrachtet. Um auch die Auswirkungen erhöhter Walzgeschwindigkeiten auf das Walzergebnis untersuchen zu können sowie die Bearbeitungszeit zu verkürzen, wird ein neu entwickeltes Walzwerkzeug vorgestellt, welches die Rotation einer Frässpindel mit deren Vorschub überlagert. Im Hinblick auf das Reibverhalten der Beschichtungen führt die walztechnische Nachbearbeitung zu einer starken Verringerung des Reibungskoeffizienten. Das zusätzliche Einwalzen von Texturen ermöglicht außerdem eine lokale Beeinflussung der Reibung. Ein mögliches Anwendungsfeld einer solchen glattgewalzten, thermisch gespritzten Beschichtung stellen die Oberflächen von Tiefziehwerkzeugen dar. Vor diesem Hintergrund wird gezeigt, dass das Glattwalzen sowohl das Prozessfenster für den Tiefziehprozess vergrößert und die Prozesskräfte verringert als auch die Oberflächenqualität der produzierten Bauteile verbessert.

Abstract

Ball burnishing is used to smooth surfaces by forming of the roughness peaks. Within this work, a rolling process is used as a post treatment process for thermally sprayed surfaces. Thereby, the tribological behavior shall be improved and adapted to its particular application. For this purpose, initially the microscopic forming processes of the roughness peaks is considered. This is followed by a macroscopic examination of the processes between rolling ball and coated surface. The investigations lead to a mathematical model, which is able to predict the surface roughness after a ball burnishing process. This enables a process design without extensive experimental preliminary tests. The model provides good agreement with experimental measurements for different process parameters as well as different materials. Furthermore, the influence of each rolling parameter on the result of the rolling process is considered in detail. To investigate the effects of increased rolling velocities and to decrease the processing time, a new developed rolling tool is presented, which superposes the rotation of a milling spindle with the feed motion. With regards to the friction behavior, a ball burnishing process can reduce the friction coefficient of the coated surface significantly. The additional rolling of textures also enables a local influence of the friction behavior. A possible field of application of such a thermally sprayed and ball burnished coatings are the surfaces of deep drawing tools. It is shown that ball burnishing is able to increase the process window, reduce the process forces and improve the surface quality of the deep drawn parts.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	iii
Kurzfassung	v
Abstract	vii
Inhaltsverzeichnis	ix
Formelzeichen und Abkürzungen	xiii
1 Einleitung	1
2 Stand der Kenntnisse	3
2.1 Glattwalzen	3
2.1.1 Grundlagen des Walzprozesses	3
2.1.2 Auslegung des Walzprozesses.....	10
2.2 Oberflächenbeschaffenheit.....	22
2.2.1 Thermisches Spritzen	23
2.2.2 Oberflächenrauheit	25
2.2.3 Mechanische Eigenschaften / Härte	28
2.3 Tribologie und deren Anwendung auf das Tiefziehen.....	31
2.3.1 Reibung und Verschleiß	31
2.3.2 Tiefziehen	35
2.4 Fazit zum erfassten Kenntnisstand.....	39
3 Zielsetzung	41
4 Prozessanalyse des Glattwalzens von Beschichtungen	43
4.1 Analytischer Ansatz	43
4.1.1 Mikroskopische Betrachtung.....	44
4.1.2 Makroskopische Betrachtung.....	52
4.1.3 Vorgehensweise zur Berechnung der Rauheit nach einem Walzprozess....	60
4.2 Durchführung Walzversuche	62
4.2.1 Versuchsaufbau zur Überprüfung der Annahmen zur Flächenpressung.....	62
4.2.2 Versuchsdurchführung zur Überprüfung des analytischen Modells	63
4.3 Überprüfung der getroffenen Annahmen	68
4.3.1 Kontrolle der Annahmen zur Flächenpressung	68
4.3.2 Numerische Untersuchung zum Stauchen von Pyramiden	70
4.4 Experimentelle Überprüfung des Modells	73
4.4.1 Parameteridentifikation	73
4.4.2 Spurbreite	75
4.4.3 Flächenpressung unter Walzkugel.....	77
4.4.4 Rauheit nach dem Walzprozess.....	79

4.5	Einfluss der Parameter beim Glattwalzen	85
4.5.1	Walzdruck.....	85
4.5.2	Ausgangsrauheit	86
4.5.3	Bahnabstand	87
4.5.4	Härte	87
4.5.5	Fließspannung	90
4.6	Fazit zur Prozessanalyse des Glattwalzens	92
5	Walzen unter erhöhter Geschwindigkeit	95
5.1	Entwicklung eines rotierenden Walzwerkzeugs	95
5.2	Versuche zum Walzen unter erhöhter Geschwindigkeit.....	100
5.2.1	Versuchsaufbau zum Experiment „Bearbeitungszeit“	101
5.2.2	Versuchsaufbau zum Experiment „rotierende Bewegung“	102
5.2.3	Versuchsaufbau zum Experiment „Walzgeschwindigkeit“	103
5.3	Einfluss der Werkzeugbewegung und Geschwindigkeit	104
5.3.1	Bearbeitungszeit	104
5.3.2	Einfluss der rotierenden Werkzeugbewegung auf das Walzergebnis	105
5.3.3	Einfluss der Walzgeschwindigkeit auf die Einebnung.....	107
5.4	Fazit zum Walzen unter erhöhter Geschwindigkeit.....	111
6	Reibverhalten gewalzter Beschichtungen	113
6.1	Versuche zur Reibwertermittlung	113
6.1.1	Versuchsaufbau zum Einfluss des Glattwalzens auf die Reibung	115
6.1.2	Versuchsaufbau zum Einfluss von gewalzten Texturen auf die Reibung.	116
6.2	Einfluss der Nachbearbeitung auf die Reibung.....	117
6.2.1	Beeinflussung der Reibung durch Glattwalzen	117
6.2.2	Einfluss gewalzter Texturen auf die Reibung	120
6.3	Fazit zum Reibverhalten gewalzter Beschichtungen	122
7	Einsatz glattgewalzter Beschichtungen beim Tiefziehen	123
7.1	Versuche zum Tiefziehen.....	123
7.1.1	Napftiefziehversuche.....	123
7.1.2	Versuchsaufbau und Glattwalzen des Tiefziehdemonstrators	127
7.2	Tiefziehen von Napfbauteilen	128
7.2.1	Einfluss des Glattwalzens auf das Prozessfenster	129
7.2.2	Einfluss des Glattwalzens auf die Umformkraft	130
7.2.3	Lokal angepasste Reibwerte	132
7.3	Verschleißuntersuchungen	134
7.4	Tiefziehdemonstrator	137
7.5	Fazit zum Einsatz beim Tiefziehen	138
8	Gesamtfazit und Ausblick	141

8.1	Fazit zum Glattwalzen beschichteter Oberflächen.....	141
8.2	Ausblick	143
8.2.1	Glattwalzen von laserauftragsgeschweißten Bauteilen	143
8.2.2	Glattwalzen von Lamellenbauteilen.....	144
Literaturverzeichnis		147
Lebenslauf		159