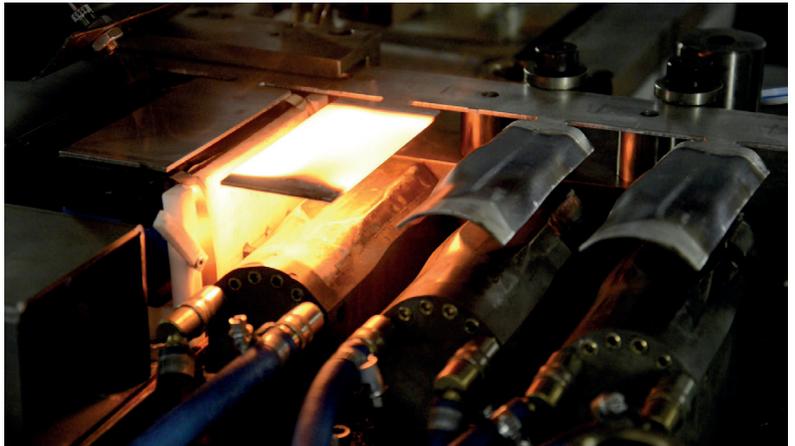


Christian Löbbe

**Temperaturunterstütztes Biegen
und Wärmebehandeln
in mehrstufigen Werkzeugen**



Temperaturunterstütztes Biegen und Wärmebehandeln in mehrstufigen Werkzeugen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

von der Fakultät Maschinenbau
der Technischen Universität Dortmund
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Christian Heinrich Löbbe gen. Brüggemann M.Sc.

aus

Hamm

Dortmund, 2018

Vorsitzender der Prüfungskommission: Dr. Phil. Tobias Härtel

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

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Markus Bambach

Prof. Dr.-Ing. Jörn Mosler

Tag der mündlichen Prüfung: 9. November 2018

Dortmunder Umformtechnik

Band 103

Christian Heinrich Löbbe gen. Brüggemann

**Temperaturunterstütztes Biegen und Wärme-
behandeln in mehrstufigen Werkzeugen**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Aachen 2019

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., 2018

Copyright Shaker Verlag 2019

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6485-8

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 Arbeit entstand während der Tätigkeit am Institut für Umformtechnik und Leichtbau der Technischen Universität Dortmund. In dieser Zeit wurde ich durch viele Personen unterstützt, denen ich herzlich danken möchte.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. A. Erman Tekkaya, der die Erstellung der Arbeit ermöglicht hat. Seine kritischen Fragen und Hingabe für Innovationen in der Umformtechnik haben mich stets motiviert, das Thema tiefgründig zu erforschen. Danken möchte ich Prof. Dr.-Ing. habil. Markus Bambach für das Koreferat. Prof. Dr.-Ing. Jörn Mosler und Dr. Phil. Tobias Härtel danke ich für die Mitwirkung in der Prüfungskommission.

Weiterhin danke ich den Kollegen Prof. Matthias Hermes und Dr. Christoph Becker sowie Detlef Putschkat der Fa. KODA Stanz- und Umformtechnik GmbH, die den Wärmeeinsatz zur Reduktion der Rückfederung als Lösungskonzept erkannt und deren Erforschung initiiert haben. Vor diesem Hintergrund wurden wichtige Aspekte der Arbeit durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages in den Projekten KF2198118LK2 und KF2198138LP4 sowie durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft im Projekt TE 508/59-1 gefördert. Die Realisierung der Technologie wurde tatkräftig durch die Konstrukteure Bernhard Schminghoff und Michael Böhmer sowie dem Geschäftsführer Benedikt Kummer der Fa. KODA Stanz- und Umformtechnik GmbH unterstützt.

Für die kollegiale Zusammenarbeit möchte ich mich bei den derzeitigen und ehemaligen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts bedanken. Für die Bewältigung der täglichen Aufgaben möchte ich mich bei Daniel Staupendahl, Rickmer Meya, Tobias Ortel, Oliver Hering, Mike Kamaliev, Prof. Nooman Ben Khalifa, Dr. Soeren Gies, Dr. Goran Grzanic, Nina Polak, Jeanette Brandt und Kerstin Lenschen bedanken. Ferner spreche ich mein Dank den Kollegen Werner Feurer, Dirk Hoffmann, Andreas Herdt, Frank Volk, Steffen Strotzer, Ilias Dermizidis und Ulrike Wolf für ihre Hilfe bei praktischen Problemen aus. Darüber hinaus gilt mein Dank den Studentinnen und Studenten, die ihre Projekt- und Abschlussarbeiten sowie Aushilfstätigkeiten den Themen der temperaturunterstützten Blechumformung gewidmet haben.

Mein außerordentlicher Dank gilt meiner Familie. Meine Eltern haben meinen beruflichen Werdegang stets gefördert. Schade finde ich, dass meine Mutter den letzten Teil meiner akademischen Ausbildung nicht miterleben durfte. Mein Dank gilt meinen Schwiegereltern für ihre Unterstützung, die Bereitschaft zur Diskussion der Arbeit und die Korrektur. Schließlich bedanke ich mich bei meiner Frau Ines, die mir während der gesamten Zeit die notwendigen Freiräume und das Verständnis geschenkt hat.

Dortmund, im November 2018

Christian Löbbe

Abstract

The key for manufacturing resource-saving sheet metal components is the simultaneous forming and heat treatment. The combination facilitates the production of complex geometries and customized product properties. While hot stamping is an established technology based on this principle, the transferability to further applications is limited due to the high investment costs, the low flexibility and the limited productivity.

Hence, for the general application of heat-assisted sheet metal forming the process fundamentals of a recently introduced technology are investigated. The development is dedicated to the broad usage of conventional multi-stage forming processes such as progressive- and transfer-tool-technologies, which are enhanced by a targeted heat supply. For enabling the thermal processing inside the forming process, the technology is initially extended in terms of the rapid inductive heating and multi-stage heat removal.

Furthermore, the mechanisms of heat assisted bending are investigated, which is selected as a representative forming process. In air-bending process, overbending is an additional parameter beside springback, to control the bending result, which depends on temperature, punch speed and geometric parameters. In die-bending, thermal contraction is a mechanism that facilitates a stress superposition and calibration of the bent angle similar to stretch bending. For the process analysis, the complex mechanisms are each covered by a semi-analytical and an analytical approach, which simplifies the application in a closed loop process control.

Moreover, to conduct a rapid heat treatment of low alloy steels, the relevant process steps were analyzed and modeled by semi-analytical relationships. For controlling the tensile strength or hardness, in addition to the grain size, the carbon content is an actuating variable. These parameters are adjustable by means of austenitization, homogenization and annealing, as well as quenching. The modeling finally facilitates the determination of process parameters for the martensitic transformation, as well as estimation of the resulting properties.

Finally, case studies show the application of the investigated technology either for manufacturing dimensionally accurate components in a warm bending process or for producing components with a defined hardness in a hot forming process. The work reveals a development based on the conventional technologies for multi-stage sheet metal forming through a targeted heat assistance. Hence, the solution enables the development of emerging markets by producing complex shaped sheet metal parts with tailored properties.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	X
1 Einleitung	1
2 Stand der Kenntnisse	3
2.1 Verfahrenstechnik zur Warmblechumformung	3
2.1.1 Erwärmung	3
2.1.2 Umformung	9
2.1.3 Wärmeabfuhr.....	15
2.1.4 Transport.....	17
2.2 Einstellung der Umform- und Produkteigenschaften	19
2.2.1 Stahlwerkstoffe.....	20
2.2.2 Leichtmetalle	25
2.3 Methoden zur Prozessmodellierung und -kontrolle	26
2.3.1 Numerische Modellierung der Teilprobleme	26
2.3.2 Analytische und halbanalytische Prozessmodelle	32
2.3.3 Modellbasierte Prozesskontrolle	35
2.4 Zwischenfazit	36
3 Zielsetzung	39
4 Mehrstufige Werkzeugtechnologie	41
4.1 Anforderungen an die Werkzeugtechnologie	41
4.2 Werkzeugkonzept zur Temperaturunterstützung	42
4.2.1 Funktionsstruktur.....	42
4.2.2 Lösungskonzepte zur Veranschaulichung	43
4.2.3 Temperatur-Zeit-Verlauf	46
4.3 Aufwärmung der Umformzone	47
4.3.1 Erhitzung mittels Joule'scher Verluste.....	47
4.3.2 Wärmeausgleich	54
4.3.3 Spulengestaltung für mehrstufige Werkzeuge	63
4.4 Umformung, Umformgeschwindigkeit	69
4.4.1 Maschinenparameter.....	69
4.5 Wärmeabfuhr im mehrstufigen Werkzeug.....	73
4.5.1 Zyklische Abkühlung	75
4.5.2 Abkühlung im Transport	82
4.5.3 Abkühlung bei Werkzeugkontakt	84
4.5.4 Effektive Abkühlrate	89
4.6 Zwischenfazit	93
5 Werkstoffcharakterisierung und Methoden	95

5.1	Methoden.....	95
5.1.1	Zugversuch bei erhöhten Temperaturen.....	95
5.1.2	Aufheiz- und Abschreckversuch	97
5.1.3	Biegeversuche.....	98
5.1.4	Charakterisierung der Mikrostruktur und mechanischer Kennwerte	99
5.2	Ergebnisse der mechanischen Werkstoffcharakterisierung	100
5.2.1	Elastizitätsmodul	101
5.2.2	Fließspannung.....	105
6	Analyse des temperaturunterstützten Biegens	111
6.1	Einflüsse des Biegeprozesses.....	111
6.2	Freibiegen.....	114
6.2.1	Biegewinkel.....	116
6.2.2	Krümmung.....	122
6.2.3	Eigenstressungen.....	125
6.2.4	Biegekraft	128
6.2.5	Grenze des isothermen Prozesses.....	129
6.2.6	Halbanalytische Modellierung des isothermen Prozesses.....	131
6.3	Gesenkbiegen	146
6.3.1	Krümmung.....	148
6.3.2	Prozessmodell.....	152
6.4	Zwischenfazit	159
7	Wärmebehandlung niedriglegierter Stähle	161
7.1	Ausgangswerkstoffe.....	162
7.2	Versuchsdefinition	163
7.3	Austenitisierung	164
7.4	Homogenisierung	167
7.5	Kornwachstum	171
7.6	Abschreckung.....	174
7.6.1	Zugfestigkeit.....	174
7.6.2	Gleichmaßdehnung.....	178
7.7	Korrelierende Eigenschaften.....	180
7.8	Zwischenfazit	181
8	Anwendungsbeispiele	183
8.1	Geschlossene Regelung der Produkteigenschaften.....	183
8.2	Temperaturunterstütztes Biegen	186
8.3	Wärmebehandlung	194
8.4	Zwischenfazit	203
9	Zusammenfassung und Ausblick	205

Literaturverzeichnis	209
Anhang	225
Anhang – Kapitel 4	225
Anhang – Kapitel 5	229
Anhang – Kapitel 6	230
Anhang – Kapitel 7	231
Anhang – Kapitel 8	235
Lebenslauf	238