

"Untersuchungen zur konduktiven Erwärmung für Warmzugversuche an Blechen"

Von der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation

vorgelegt von **Dipl.-Ing.**

Kai Wolfgang Gerhardt

aus Essen

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hirt
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Bleck

Tag der mündlichen Prüfung: 21. September 2015

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek online verfügbar

Umformtechnische Schriften

Band 175

Kai W. Gerhardt

**Untersuchungen zur konduktiven Erwärmung
für Warmzugversuche an Blechen**

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2015)

Herausgeber:

Univ. Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hirt

Institut für Bildsame Formgebung der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

Professor Dr.-Ing. Dierk Raabe

Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH, Düsseldorf

Professor em. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Dr.-Ing. E.h. Reiner Kopp

Institut für Bildsame Formgebung der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

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 978-3-8440-4000-5

ISSN 1433-1551

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

Die Menschen stolpern nicht über Berge,
sondern Maulwurfshügel.

Konfuzius

Danksagung

Nachfolgend möchte ich namentlich diejenigen nennen, die unmittelbar zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben – ohne diejenigen zu vergessen, die mich indirekt geleitet und gestärkt haben, um diese Arbeit entstehen zu lassen.

Meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hirt danke ich für die Aufnahme am Institut für Bildsame Formgebung der RWTH Aachen und die Möglichkeit der Promotion. Während dieser Zeit habe ich ihn kennen und sehr schätzen gelernt. In mir fast aussichtslos erscheinenden Situationen konnte ich mich immer auf seinen Rat und Rückhalt verlassen. Seine ruhige, konstruktive und pragmatische Art der Wegweisung hat maßgeblich zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen.

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Bleck, Direktor des Instituts für Eisenhüttenkunde der RWTH Aachen und Dekan der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik danke ich für die Übernahme des Koreferats und das entgegengebrachte Interesse an dem Thema dieser Dissertation.

Dr.-Ing. Christoph Wiedner, damaliger wissenschaftlicher Mitarbeiter des IBF, der mich als junger Student von der Umformtechnik und der FEM begeistern konnte und meinen Ergebnissen immer Vertrauen geschenkt hat, verdanke ich viele richtige Entscheidungen in meinem Leben.

Ich danke Dr.-Ing. Alexander Meyer, der mir vorbildlich zeigte, dass es auch nett geht. Ein Freund, der immer an mich und meine Fähigkeiten geglaubt hat und mich immer bedingungslos unterstützt hat. Nur durch seine Unterstützung war meine Diplomarbeit möglich und damit auch diese Dissertation. Ich werde unsere FEM-Nachtschichten vermissen.

Ich danke Alexander Göttmann dafür, dass er seine Uhr bei Arbeitsbeginn ablegt und dann vergisst, wo er sie hingelegt hat. So spielte Zeit bei der Realisierung einer optischen Formänderungsanalyse bei Temperaturen bis 950 °C für uns keine Rolle. David Bailly, meinem Bürokollegen, danke ich für die stets pragmatischen Gespräche und seine Ideen zur Steuerung der konduktiven Erwärmung.

Ich danke Christoph Russig, der am PC wahre Wunder vollbringt und aus vielen Komponenten zur Steuerung der Erwärmungseinheit und der Temperaturregelung ein beherrschbares System gemacht hat.

Bei Anika Oenning bedanke ich mich, dass sie die Temperatur sichtbar gemacht hat und zwischenzeitlich nicht verzweifelt ist. Ihr danke ich auch für die Ausdauer bei der Variation der Probengeometrien und die unermüdliche Unterstützung.

Ich danke Thomas Meinerz, der eine Art der Probenbeschichtung entdeckt hat und diese überzeugen konnte, sich nicht bei sehr hohen Temperaturen in Rauch aufzulösen. Seine Beharrlichkeit war für diese Arbeit von großer Wichtigkeit.

Verena Ritz und Stephan Hojda danke ich für die zielführenden Gespräche und die Unterstützung in der Welt der FEM. In fremden Universen braucht man Menschen, die sich da auskennen.

Dr.-Ing. Holger Justinger danke ich für die Anmerkungen zur ersten Version und die vielen Abende der Diskussion nach der Arbeit. Er zeigte mir mit Erfahrung und immer ehrlichen Worten weitere Lösungswege auf.

Burkhard Wietbrock danke ich für die spannenden Gespräche zur Werkstofftechnik. Das manchmal seltsame Verhalten von Werkstoffen ergibt dann schlussendlich doch immer irgendwie einen Sinn.

Ich danke Thomas Henke, der mich bei der Vorbereitung auf die mündliche Prüfung zu dieser Arbeit unterstützt hat. Ihm danke ich auch für die Diskussionen zur Materialprüfung.

Dem Team der mechanischen Werkstatt des IBF danke ich für die Unterstützung. Die offene Art und Hilfsbereitschaft war unersetzbar für diese Arbeit.

Elisabeth Hirt danke ich, dass sie mich stets ermutigt hat und mir vor Augen geführt hat, dass das Ziel doch eigentlich ganz nah ist. Ich freue mich auf die nächste IBF-Skifreizeit.

Tina Filikowski, meiner Partnerin, danke ich für ihre Liebe, ihr Verständnis, die Geduld und, dass sie mir fortwährend den Rücken freihält.

Abschließend danke ich meiner Familie, allen voran meinem Vater Wolfgang und meiner Schwester Daniela.

Zu tiefem Dank bin ich zudem meinem Laptop verpflichtet. Ohne mich einmal im Stich zu lassen hat es diese Arbeit treu begleitet – Qualität zahlt sich am Ende doch aus.

Kurzfassung

Bei der Umsetzung innovativer Leichtbaukonzepte im Kraftfahrzeugbau rückte in den letzten Jahren die Formgebung von Stahlwerkstoffen in den Fokus der Ingenieure, die nach erfolgter Umformung höchste Festigkeiten aufweisen. Die Forderungen, Blechformteile mit komplexer Geometrie und höchster Festigkeit, gepaart mit einem möglichst geringen Bauteilgewicht herzustellen, können durch die Anwendung eines innovativen Verfahrens, genannt Presshärten, erfüllt werden. Höchste Vergütungsstähle, wie bspw. der 22MnB5, eignen sich zur Anwendung in diesem Verfahren und auch für die spätere Nutzung in Automobilen. Eine Prozesssimulation zur effizienten Optimierung der Formgebungsprozesse benötigt exakte Materialdaten im Temperaturbereich der Formgebung. Die Möglichkeiten zur Ermittlung dieser Materialdaten sind sehr begrenzt und entsprechende Versuchseinrichtungen sind nur mit hohem Kostenaufwand zu beschaffen. Ziel ist es zu prüfen, inwiefern es möglich ist, mit geringem finanziellem Aufwand durch eine Erweiterung einer mechanischen Universalprüfmaschine, Warmzugversuche unter den Prozessbedingungen des Presshärtens durchzuführen.

In der vorliegenden Arbeit werden zunächst systematisch elementare Kenntnisse über die Warmumformung von Blechen und die Ermittlung von Fließkurven an Blechzuschnitten erarbeitet. Zur Erweiterung der Universalprüfmaschine wird eine Erwärmungseinheit ausgelegt. Die Messung der Formänderung und der Proben-temperatur im Zugversuch erfolgt mit vorhandenen Messsystemen. Durch die Verwendung einer Thermokamera wird die großflächige Messung auf der Probenoberfläche und damit die Analyse der Temperaturverteilung möglich. Mit den gewonnenen Erkenntnissen werden für den konduktiv erwärmten Zugversuch geeignete Probengeometrien identifiziert. Auf diese Probengeometrien werden elementare Auswertemethoden zur Fließkurvenbestimmung angewendet. Mit dieser Arbeit wird gezeigt, dass die kostengünstige Erweiterung einer Universalprüfmaschine zur Durchführung von Zugversuchen unter den Prozessbedingungen des Presshärtens möglich ist.

Abschließend wurden die Voraussetzungen für einen Einsatz der FEM zur inversen Simulation des Warmzugversuchs mit konduktiver Erwärmung geprüft. Das erstellte Simulationsmodell bildet die Probenerwärmung und den anschließenden Zugversuch gut ab, wodurch die grundlegenden Voraussetzungen für eine Nutzung der FEM zur inversen Simulation hierfür nun gegeben sind.

Abstract

In implementation of innovative lightweight construction concepts in automotive engineering, the design of steel materials moved into the focus of the engineers which have high strength after forming. The requirements, producing sheet metal parts with complex geometry and high strength, combined with a minimum part weight, can be met by using an innovative forming process called press hardening. High-strength heat treatable steels, such as the 22MnB5, are suitable for use in this process and also for the subsequent use in automobiles. A process simulation for efficient optimization of forming processes requires precise material data in the temperature range of the used process. The possibilities to determine these material data are very limited and appropriate test facilities are cost-intensive. The aim is, to examine how it is possible to perform hot tensile tests under the process conditions of press hardening with a low cost extension of a mechanical universal testing machine.

In the present work, initially a systematically elementary knowledge of hot forming of sheet metal and the determination of flow curves of sheet metal blanks is acquired. To extend the universal testing machine a heating unit is designed. The measurement of deformations and the sample temperature in the testing procedure is carried out with existing measurement systems. The usage of a thermographic camera enables a large-scale measurement on the sample surface and thus the analysis of the temperature distribution. With the knowledge gained, suitable sample geometries for the usage in conductively heated tensile test are identified. Elemental analysis methods are applied to these sample geometries for flow curve determination. This work shows that a low cost extension of a universal testing machine is feasible to realize tensile tests under the process conditions of press hardening.

Finally, the conditions for an application of FEM for inverse simulation of conductively heated tensile test were tested. The simulation model created represents the sample heating and the subsequent tensile test as well. For this case, the basic conditions for a use of the FEM for inverse simulation are now given.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Kenntnisse	5
2.1	Presshärten von Blechen.....	5
2.1.1	Prozessrouten	5
2.1.2	Industriell eingesetzte presshärtbare Werkstoffe	7
2.1.3	Beschichtungen presshärterbarer Stähle	9
2.1.4	Prozessparameter beim industriellen Presshärten.....	12
2.2	Verfahren zur Ermittlung von Fließkurven an Blechen	16
2.2.1	Übersicht	16
2.2.1.1	Zugversuch	17
2.2.1.2	Zugversuch nach Vorverfestigung	19
2.2.1.3	Stauchversuch	19
2.2.1.4	Schichtstauchversuch	21
2.2.1.5	Hydraulischer Tiefungsversuch / Bulgeversuch.....	22
2.2.1.6	Torsionsversuch/ Verdrehversuch	24
2.2.1.7	Ebener Torsionsversuch	26
2.2.2	Zugversuche an Blechen unter homogener Formänderung.....	28
2.2.2.1	Fließspannung, Umformgrad und Anisotropie	28
2.2.3	Zugversuche an Blechen unter inhomogener Formänderung..	30
2.2.3.1	Auswertung von Standardproben über die Gleichmaßdehnung hinaus	30
2.2.3.2	Versuche mit besonderen Probengeometrien	32
2.2.3.3	Versuche zur Prüfung bei hoher Temperatur.....	40
2.2.3.3.1	Temperatur- und Dehnungsverteilung in der Zugprobe...	45
2.2.3.3.2	Steuerung der Abzugsgeschwindigkeit im Warmzugversuch	49
2.2.3.4	Fließkurvenermittlung mittels inverser Simulation	50
2.3	Zusammenfassung des Standes der Kenntnisse	53

3	Zielsetzung	58
4	Versuchseinrichtungen, Werkstoffe und Methoden	59
4.1	Universalprüfmaschine	59
4.2	Messung der Formänderung (optische Formänderungsanalyse).....	59
4.3	Temperaturmessung.....	61
4.4	Werkstoffauswahl und Werkstoffeigenschaften.....	65
4.5	FEM-System	67
5	Auslegung, Aufbau und Erprobung der Erwärmungseinheit	69
5.1	Auslegung	69
5.1.1	Grundlegende Überlegungen	69
5.1.2	Abschätzung der benötigten elektrischen Leistung	70
5.2	Technische Realisierung der konduktiven Probenerwärmung	74
5.2.1	Steuerung der Versuchseinrichtungen	74
5.2.2	Temperaturregelung	75
5.2.3	Elektrische Probenkontaktierung	77
5.2.4	Messung von Strom und Spannung	79
5.3	Erprobung der Erwärmungseinrichtung	79
5.3.1	Temperaturmessung mit Zweifarbenpyrometer und Thermoelement	79
5.3.2	Ermittlung des Emissionskoeffizienten für die Thermografie ...	81
5.3.3	Totzeit in der Regelung aus der Datenverarbeitung im Gleichrichter	83
6	Untersuchungen zur Formänderungsmessung bei erhöhter Temperatur	84
6.1	Identifizierung einer temperaturbeständigen Probenbeschichtung für die Formänderungsmessung.....	84
6.2	Formänderungsmessung an Standardproben.....	87
7	Untersuchungen zur Temperaturverteilung in der Probe.....	92
8	Auswirkung der Probengeometrie auf die örtliche Verteilung der Formänderung	100

9	Exemplarische Auswertung von Warmzugversuchen mit elementaren Methoden.....	106
10	Umsetzung der gekoppelten Simulation von Warmzugversuchen mit konduktiver Erwärmung	113
10.1	Anforderungen an das Modell.....	113
10.2	Modellbeschreibung.....	113
10.3	Ergebnis der Simulation.....	116
11	Zusammenfassung und Ausblick	119
12	Abkürzungen und Formelzeichen	123
13	Abbildungsverzeichnis	126
14	Tabellenverzeichnis.....	130
15	Literatur	131