

„Thermische Randwerte für die numerische Simulation von Umformprozessen“

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.**

Ralf Volles

aus Geilenkirchen

Berichter: Univ.-Prof. (em.) Dr.-Ing. Dr.h.c.mult. Dr.-Ing.E.h. Reiner Kopp
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hirt
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Bleck

Tag der mündlichen Prüfung: 12. Oktober 2015

Umformtechnische Schriften

Band 177

Ralf Volles

**Thermische Randwerte
für die numerische Simulation
von Umformprozessen**

Shaker Verlag
Aachen 2016

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 2016

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4310-5

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

Vorwort des Herausgebers

Trotz erheblicher Verbesserungen und Weiterentwicklungen der Simulationssoftware und der Rechnerleistung spielen die Randbedingungen bei der Simulation von Umformprozessen nach wie vor eine zentrale Rolle. Dies umso mehr, da der Simulation bei der Prozessentwicklung und Prozessüberwachung sowie bei der Ermittlung der Produkteigenschaften eine immense Bedeutung zukommt. Innerhalb der aktuellen Entwicklung von Industrie 4.0 übernimmt die Simulation und Optimierung der Prozesse eine der wichtigsten Aufgaben, da heute immer stärker nicht nur qualitative Vorhersagen, sondern auch quantitative Aussagen getroffen werden sollen.

In der Warmumformung spielen die thermischen Randbedingungen neben der Warmfließkurve und dem Reibwert eine dominierende Rolle bei der Simulation. In der vorliegenden Arbeit wurden genau diese Randbedingungen systematisch erforscht. Insbesondere die Strahlungszahl und der Wärmeübergangskoeffizient waren Gegenstand der Untersuchungen. Ziel war, die Genauigkeit dieser Werte durch Weiterentwicklung der experimentellen Ermittlungsverfahren und durch eine genauere Berücksichtigung der Einflussgrößen auf diese Randbedingungen zu erhöhen.

Diese Arbeit hat für die weitere Zukunft der Simulation einen großen Wert. Sie zeigt, welche Randbedingungen bei genauen Simulationen umformtechnischer Prozesse möglichst exakt ermittelt werden müssen und welche Fehler entstehen können, wenn dies nicht gemacht wird.

Aachen, den 03.02.2016

Prof. em. Dr.-Ing. Reiner Kopp

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand zum Teil während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Bildsame Formgebung der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

Herrn Prof. em. Kopp gilt mein besonderer Dank für die ausdauernde Betreuung dieser Arbeit auch nach seiner Zeit als Direktor des Institutes für Bildsame Formgebung.

Herrn Prof. Hirth, dem Direktor des Institutes für Bildsame Formgebung und Herrn Prof. Bleck, dem Direktor des Institutes für Eisenhüttenkunde der RWTH-Aachen, danke ich für das Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme des Korreferates.

Der Stiftung Industrieforschung sowie den folgenden Firmen BÖHLER Edelstahl GmbH & Co KG, BÖHLER Schmiedetechnik GmbH & Co KG, Gustav Grimm Edelstahl-Werk GmbH, Kind & Co. Edelstahlwerke KG, SONA BLW Präzisionsschmiede GmbH, Otto Fuchs Metallwerke KG, Plansee Aktiengesellschaft und VDM Metals GmbH gilt mein Dank für die finanzielle Unterstützung der Forschungsarbeit und die Bereitstellung von Versuchsmaterialien.

Ich danke Herrn Dr.-Ing. Baldner, dem damaligen Oberingenieur des IBF, der mir durch sein Vertrauen und seine konstruktive Kritik viele wichtige Erfahrungen vermittelt hat und mich in seiner Funktion als Studienberater ans IBF holte.

Allen Mitarbeitern des Institutes für Bildsame Formgebung die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, danke ich für ihre Unterstützung. Im Besondern gilt mein Dank den ehemaligen Kollegen der Gruppe Materialdaten, meinen Diplom- und Studienarbeitern und den vielen studentischen Hilfskräften, ohne deren Hilfe diese Arbeit nicht entstanden wäre. Vor allem danke ich dabei an Mohammed Al Baouni, Bernd Leisten, Gottfried Bernrath, Ralf Luce, Torsten Rehrmann, Markus Wolske, Michael Tschirmisch, Luc Neumann, Stefan Schmitz, Housein Deli, Christoph Heering, Tong Wen, Josephine Dirtrich, Viola Goldbach, Johann Stach, Omar Bouradouia und Ismail Maatouki.

Nicht vergessen möchte ich die Kollegen der mechanischen und elektrischen Werkstatt, in deren Kreis ich mich immer herzlich willkommen und tatkräftig unterstützt fühlte und die mit ihrer konstruktiven Kritik und der gelungenen Umsetzung meiner Konstruktionen einen großen Anteil am Gelingen dieser Arbeit hatten. Die Durchführung der praktischen Seite dieser Arbeit war nur mit der tatkräftigen Unterstützung der Mitarbeiter des Materialprüflabors und dessen Umfeld möglich. Mein besonderer Dank gilt hier Joachim Sieprath, Manuel Poelmeyer, Holger Breitbach, Holger Willems und Achim Deserno.

Bei Renate Steiner von Haldenstedt, Melanie Hensen und meinem Bruder Jörg bedanke ich mich für die bereitwillige Hilfestellung in orthographischen Fragen.

Schließlich danke ich meiner Frau Annelie, die mir während meines Studiums und der Anfertigung dieser Arbeit stets den Rücken frei gehalten hat und mit ihrem Verständnis und stetem Zuspruch großen Anteil am Gelingen dieser Arbeit hat.

Mülheim an der Ruhr, im Februar 2016

Ralf Volles

Inhaltsübersicht

In der vorliegenden Arbeit wurden sowohl die Versuchstechniken als auch die Ermittlungsmethodik zur Ermittlung der zwei wichtigsten thermischen Randgrößen der FEM-Simulation von Umformprozessen, Strahlungszahl und Wärmeübergangskoeffizient verbessert. Dabei konnten Prozesssicherheit und die Reproduzierbarkeit einerseits und die Genauigkeit der ermittelten Werte andererseits erhöht werden.

In den exemplarisch durchgeführten Reihenuntersuchungen konnten einige Abhängigkeiten der Strahlungszahl und des Wärmeübergangskoeffizienten von wichtigen Einflussparametern deutlich gezeigt werden. Für die Strahlungszahl waren dies der Einfluss der Starttemperatur, der Rauheit und Verzunderung der Oberfläche sowie der Einfluss des Atmosphärendrucks. Auch für das Vorliegen von ausgewählten Schmierstoffen auf der Probenoberfläche konnten Strahlungszahlen ermittelt werden. Beim Wärmeübergangskoeffizienten wurden die folgenden Einflussgrößen näher untersucht: Starttemperatur, Rauheit und Verzunderung der Oberfläche, Kontaktdruck zwischen Werkstück und Werkzeug sowie der Einfluss ausgewählter Schmierstoffe in der Kontaktzone.

Zwei Schmiedeprozesse im halb-industriellen Maßstab und ein industrieller Reckschmiedeprozess dienen der Validierung der ermittelten Werte an realen Umformprozessen. Die insgesamt gute Übereinstimmung der an den Schmiedestücken ermittelten Werte für Temperatur und Endgeometrie mit den Ergebnissen der FEM-Simulationen der Prozesse belegen die Verlässlichkeit der im Rahmen der Arbeit entwickelten Versuchsmethoden. Die verbleibenden Unterschiede zeigen aber auch die Genauigkeitsgrenzen der Ermittlungsmethoden.

Abstract

The main goal of this thesis is to improve both the testing equipment and the determination methods for the two most important thermal boundary conditions used in FEM-simulation of forming processes, the radiation coefficient and the heat transfer coefficient. By this means the process stability and reproducibility on the one side and the precision of the determined values on the other side were improved.

Exemplary serial measurements show how the radiation coefficient and the heat transfer coefficient relate to some of the important influencing factors. For the radiation coefficient these were the influence of the temperature at the beginning of the test, surface roughness including the presence of scale, and atmospheric pressure. The dependence of the heat transfer coefficient on the following parameters was shown: temperature at the beginning of the test, surface roughness and scale, pressure applied to the contact area, as well as the influence of lubricating agents on the contact area.

For validation of the test rig results two semi industrialized forging processes and one fully industrialized elongation forging process were investigated. The FEM-simulation matched measured work piece temperature as well as finished form so the test results were shown to be reliable and valid, although remaining differences also show up the limits of the applied methods.

Inhaltsübersicht / Abstract	IV
Inhalt	VI
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik.....	3
2.1 Theoretische Grundlagen zur Berechnung des Wärmehaushalts bei Umformprozessen.....	3
2.1.1 Speicherung von Wärmeenergie in Festkörpern	3
2.1.2 Dissipation von Umformenergie und plastische Formänderung.....	5
2.1.3 Reibungswärme.....	18
2.1.4 Mechanismen der Wärmeübertragung	19
2.1.5 Beschreibung der thermischen Randbedingungen in der numerischen Simulation von Umformprozessen	32
2.2 Ermittlung der Materialdaten und Randwerte für die numerische Simulation von Umformprozessen.....	33
2.2.1 Thermo-physikalische Stoffdaten.....	35
2.2.2 Kennzahlen für den Wärmeverlust an der freien Oberfläche.....	43
2.2.3 Wärmeübergangskoeffizient bei Festkörperkontakt.....	48
2.2.4 Fließspannung	51
2.2.5 Reibungskoeffizient.....	57
3 Aufgabenstellung.....	62
4 Aufbau und Anwendung einer neuen Messvorrichtung für den Wärmeverlust an der freien Oberfläche.....	64
4.1 Schaffung einer definierten Probenumgebung	68
4.2 Induktionsanlage zur Probenerwärmung.....	69
4.3 FEM-Simulation des Versuchs zur Ermittlung der Strahlungszahl	69
4.4 Temperaturfeld in der Probe nach der induktiven Erwärmung.....	71

4.5	Einfluss der Induktionsspule auf die Abkühlung bei der Bestimmung der Strahlungszahl	72
4.6	Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Einzelparameter auf den Wärmeverlust an der freien Oberfläche	74
4.6.1	Einfluss der Temperatur auf die Strahlungszahl	74
4.6.2	Aufspaltung der Messung nach Strahlung und Konvektion.....	76
4.6.3	Einfluss der Rauheit der Oberfläche auf die Strahlungszahl.....	79
4.6.4	Einfluss von Schmierstoffen auf der Probenoberfläche auf die Strahlungszahl ..	83
4.6.5	Einfluss von Zunderschichten auf die Strahlungszahl	87
5	Aufbau und Anwendung einer neuen Messvorrichtung für die Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten.....	96
5.1	Induktionsanlagen zur Probenerwärmung.....	99
5.2	Servohydraulische Prüfmaschine	101
5.3	Untersuchung des Temperaturfeldes in der Probe vor Beginn der Abkühlung.....	103
5.4	Auswertung von Abkühlkurven aus dem Druckversuch zur Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten.....	105
5.5	Reproduzierbarkeit der Ermittlung.....	107
5.6	Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Einzelparameter auf den Wärmeübergangskoeffizienten.....	108
5.6.1	Einfluss der Temperatur auf den Wärmeübergangskoeffizienten	108
5.6.2	Einfluss von Zunderschichten auf der Kontaktfläche	113
5.6.3	Einfluss der Rauheit der Probenoberfläche	120
5.6.4	Einfluss des Kontaktdrucks auf den Wärmeübergangskoeffizienten.....	129
5.6.5	Wärmeübergangskoeffizienten beim Vorliegen von Schmierstoffen an der Kontaktfläche	133
5.6.6	Möglichkeit der Verwendung kleiner Proben bei der Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten.....	139
6	Übertragbarkeit der Ergebnisse auf den Realprozess.....	142

6.1	Reckschmiedeprozess im halbindustriellen Maßstab	143
6.2	Gesenkschmiedeprozess	148
6.3	Industrieller Reckschmiedeprozess	156
7	Schlussfolgerungen.....	3
8	Verzeichnisse / Indices	168
8.1	Liste der verwendeten Formelzeichen / List of Symbols	168
8.2	Abbildungsverzeichnis / Index of Figures.....	182
8.3	Tabellenverzeichnis / Index of Tabela.....	191
9	Literaturverzeichnis	194
10	Anhang: Charakterisierung der Versuchswerkstoffe.....	212
10.1	Warmarbeitsstahl 1.2367	212
10.2	Warmarbeitsstahl 1.2714	213
10.3	Nichtmagnetisierbarer Stahl 1.3974	214
10.4	Rost- und säurebeständiger Stahl 1.4462	215
10.5	Rost- und säurebeständiger Stahl 1.4571	216
10.6	Nickelbasislegierung 2.4668	217
10.7	Werkstoffe, die von industriellen Partnern ohne genauere Spezifizierung zur Verfügung gestellt wurden	218