

Methoden und Strategien zur Simulation der Wärmebehandlung komplexer Bauteile aus 20 MnCr 5

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
Dr.-Ing.

von der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Karlsruhe (TH)
genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Nicolas Trapp
aus Bühl/Baden

Tag der mündlichen Prüfung: 22.11.2010

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Korreferent: Prof. i. R. Dr. mont. habil. Hermann Müller

Schriftenreihe Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnik

Band 73/2011

Nicolas Trapp

**Methoden und Strategien zur Simulation der Wärme-
behandlung komplexer Bauteile aus 20 MnCr 5**

Shaker Verlag
Aachen 2011

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.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2010

Copyright Shaker Verlag 2011

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0107-5

ISSN 1439-4790

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

Für Christin und meine Eltern.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
2	Kenntnisstand	13
2.1	Grundlagen der Wärmebehandlung	13
2.2	Die Finite Elemente Methode	16
2.3	Wärmebehandlungssimulation	19
2.3.1	Temperaturfeldberechnung	20
2.3.2	Aufkohlung	22
2.3.3	Phasenumwandlungen	24
2.3.4	Kontinuumsmechanik	27
2.4	Maß- und Formänderungen	32
2.4.1	Auswertalgorithmen	35
3	Werkstoff, Probengeometrien und Versuchsaufbau	37
3.1	Werkstoff	37
3.2	Probengeometrien	39
3.2.1	Warmzugversuche	39
3.2.2	Dilatometrie	39
3.2.3	Umwandlungsplastizität	40
3.2.4	Wärmeübergangskoeffizient	40
3.2.5	Spezifische Wärmekapazität	41
3.2.6	Temperaturleitfähigkeit	42
3.2.7	Dichte	42
3.3	Untersuchte Bauteile	42
3.4	Versuchsaufbau und Versuchsprogramm	46
3.4.1	Warmzugversuche	46
3.4.2	Dilatometrie	53
3.4.3	Umwandlungsplastizität	53
3.4.4	Wärmeleitfähigkeit	56
3.4.5	Dichte	58
3.4.6	Härtmessung	58
3.5	Eigen Spannungsmessungen	59
3.5.1	Röntgenografische Spannungsanalyse	59

3.5.2	Eigenspannungsmessungen mit der Bohrlochmethode . . .	59
3.5.3	Restaustenitbestimmung	60
3.6	Wärmeübergangskoeffizient	61
3.6.1	Wärmeübergangsbestimmung mittels Zylinderproben . . .	61
3.6.2	Temperaturmessungen an realen Bauteilen	62
3.7	Auswertung von Maß- und Formänderungen in der Simulation .	67
3.7.1	Datenextraktion	68
3.7.2	Ausgleichsebene	68
3.7.3	Projektion auf die Ausgleichsebene	69
3.7.4	Koordinatentransformation	69
3.7.5	Ausgleichskreis	69
3.7.6	Optimierung mit dem Tschebyscheff-Ansatz	70
4	Versuchsergebnisse, Werkstoffkennwerte und Prozessparameter	72
4.1	Mechanische Kennwerte	72
4.1.1	Austenit	72
4.1.2	Ferrit/Perlit, Bainit, Martensit	74
4.1.3	Anpassung der Spannungs-Dehnungs-Kurven nach Ludwik	84
4.1.4	Härtemessungen	85
4.1.5	Lichtmikroskopische Untersuchungen	85
4.1.6	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	86
4.2	Umwandlungskennwerte	87
4.2.1	Diffusionskontrollierte Phasenumwandlungen	87
4.2.2	Diffusionslose Phasenumwandlungen	91
4.2.3	Umwandlungsplastizität	92
4.3	Thermo-physikalische Werkstoffkennwerte	96
4.3.1	Wärmekapazität	96
4.3.2	Dichte	97
4.3.3	Temperaturleitfähigkeit	99
4.3.4	Wärmeleitfähigkeit	99
4.3.5	Diffusionskoeffizient	100
4.3.6	Emissionskoeffizient	100
4.3.7	Stoffübergangskoeffizient	102
4.4	Prozesskenngrößen	102
4.4.1	Wärmebehandlungsprozess	102
4.4.2	Aufkohlung	105
4.4.3	Aufheizen	105
4.4.4	Abschrecken	108

5	Experimentelle Untersuchung der Bauteile	112
5.1	Maß- und Formänderungen	112
5.2	Gefüge	112
5.3	Eigenspannungen	116
6	Simulationskonzept Abstraktion	120
6.1	Konzept	120
6.2	Simulationsergebnisse	122
6.2.1	Kohlenstoffgradient	122
6.2.2	Temperaturverläufe	123
6.2.3	Gefüge	126
6.2.4	Eigenspannungen	131
6.2.5	Maß- und Formänderungen	135
6.3	Diskussion	141
7	Simulationskonzept Submodellierung	148
7.1	Konzept	148
7.2	Umsetzung	149
7.2.1	Umsetzung über Beaufschlagung mit Randbedingungen .	149
7.2.2	Umsetzung über eine <i>usersubroutine</i>	151
7.3	Simulationsergebnisse	154
7.4	Diskussion	160
8	Zusammenfassung	163
	Literaturverzeichnis	166
	Tabellenverzeichnis	186
	Abbildungsverzeichnis	187

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkstoffkunde I der Universität Karlsruhe (TH).

Bei Prof. Dr.-Ing. D. Löhe, Prof. mont. habil. H. Müller und Prof. Dr.-Ing. habil. V. Schulze möchte ich mich für die Möglichkeit der Durchführung dieser Arbeit bedanken. Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. habil. V. Schulze und Prof. mont. habil. H. Müller für die Übernahme des Haupt- bzw. Korreferates und die kritische Durchsicht des Manuskriptes. Ich bedanke mich für das entgegengebrachte Vertrauen und die vielen anregenden Diskussionen und Hinweise.

Weiterhin danke ich allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Besonders erwähnen möchte ich Herrn R. Rössler, der eine große Hilfe beim Aufbau und der Inbetriebnahme des Warmzugversuchsstandes war. Den Herren R. Welker und D. Mügge danke ich für die Unterstützung bei der Durchführung der Wärmebehandlungen und Warmzugversuche, Dr.-Ing. T. Erbacher und Herrn W. Frosch für die Hilfe bei den Eigenspannungsmessungen, allen Mitarbeiterinnen der Metallografie Dipl.-Ing. L. Echte, C. Lindemann, A. Ohl, A. Reif und E. Stahl, stellvertretend für die mechanische Werkstatt den Herren W. Reich, T. Unger und G. Eberle und schließlich Dipl.-Ing. N. Lunz. Ganz besonderen Dank gilt meinen Kollegen aus dem Dachgeschoss für die Unterstützung in kleinen und großen Dingen: Dr.-Ing. F. Biesinger, Dr.-Ing. B. Kasanická, Dr.-Ing. T. Mioković, Dr.-Ing. J. Schwarzer, Dr.-Ing. M. Zimmermann und ganz besonders Herrn Dr.-Ing. J. Hoffmeister.

Allen studentischen Hilfskräften, Studien- und Diplomarbeitern möchte ich meinen Dank aussprechen. Insbesondere den Studenten V. Aul, H. Authenrieth, A. Brey, M. Brosch, J. zum Gahr, M. Gauweiler, F. Jarmolowitz, V. Kostov, X. Mei, S. Merckens, J. Rögner, J. Rudolf, H. Schwaab, C. Sünkenberg, A. Werber, A. Winter, C. Wissner.

Besonderen Dank gebührt Urle für die sehr gute Betreuung unseres UNIX-Pools.

Schließlich möchte ich noch allen Projektpartnern des Verbundprojektes des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) „Rechnergestützte

Vorhersage von Werkstück- und Werkstoffzuständen nach Wärmebehandlung,, (engl. „**C**omputer **A**ided **S**imulation of **H**eat **T**reatment“ (CASH)) für die gute Zusammenarbeit danken. Besonderen Dank gilt dabei Dr.-Ing. M. Hunkel, Dr.-Ing. J. Lütjens, Dr.-Ing. T. Lübben (Stiftung Institut für Werkstofftechnik (IWT)), Dr.-Ing. M. Ehlers, Dr.-Ing. J. Schwarzer (Robert Bosch GmbH), Dipl.-Ing. König (Schwäbische Härtetechnik Ulm GmbH (SHU)), Dr.-Ing. V. Heuer (ALD Vacuum Technologies AG) und ganz besonderen Dank Herrn Dipl.-Ing. M. Fiderer von der Kistler-Igel GmbH für die Vernetzung der Bauteile und der einzigartigen Hilfsbereitschaft beim Umgang mit DEFORM.