

Untersuchung des Einflusses von Geometrie und Prozess-
parametern auf den Verzug einsatzgehärteter Scheiben aus
20MnCr5 durch Experiment und Simulation

Vom Fachbereich Produktionstechnik

der

UNIVERSITÄT BREMEN

zur Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Carmen Acht

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. H.-W. Zoch

Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Bleck; RWTH Aachen

Tag der mündlichen Prüfung: 23.08.2007

Forschungsberichte aus der Stiftung Institut für Werkstofftechnik
Bremen

Band 39

Carmen Acht

**Untersuchung des Einflusses von Geometrie
und Prozessparametern auf den Verzug
einsatzgehärteter Scheiben aus 20MnCr5
durch Experiment und Simulation**

D 46 (Diss. Universität Bremen)

Shaker Verlag
Aachen 2007

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.: Bremen, Univ., Diss., 2007

Copyright Shaker Verlag 2007

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-6671-4

ISSN 1437-7659

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 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Werkstofftechnik in Bremen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Werner Zoch, der es mir ermöglicht hat, meine Dissertation auf dem Gebiet der Werkstofftechnik erstellen zu können. Ich danke für das Interesse an meiner Arbeit, für die sorgfältige Durchsicht und die fruchtbare Diskussion. Ich möchte mich bei Herrn Prof. Zoch auch für das Vertrauen in meine übrigen Tätigkeiten am Institut für Werkstofftechnik bedanken.

Herrn Univ. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Bleck möchte ich für die Übernahme des Korreferates und das Interesse an meiner Arbeit sehr herzlich danken. Er war es auch, der mir im Studium die Grundlagen der Werkstoffwissenschaften Stahl mit auf den Weg gegeben hat.

Ein großer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Franz Hoffmann für die vielen fachlichen Diskussionen und die freundliche Unterstützung während der Jahre, die ich am Institut für Werkstofftechnik gearbeitet habe. Ihm gilt außerdem mein Dank für die Übernahme des Prüfungsamtes.

Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Thoben für die Übernahme des Prüfungsamtes.

Weiterhin gilt mein besonderer Dank Herrn Dr.-Ing. Thomas Lübben für die immer offen stehende Tür und die faire und konstruktive Kritik.

Ich möchte allen Mitarbeitern des Institutes herzlich für die hervorragende Arbeitsatmosphäre danken. Mein besonderer Dank gilt dabei Herrn Dr.-Ing. Martin Hunkel für die Behebung kleinerer und größerer SYSWELD-spezifischer Probleme, Herrn Dipl.-Ing. Holger Surm und Herrn Marcus Kirchner für die Durchführung und Hilfe bei der Auswertung der Koordinatenmessungen und Herrn Ingo Bunjes für die Durchführung der Wärmebehandlung.

Ebenso danke ich Herrn Lars Vinke für die über die Jahre unterstützende Tätigkeit als studentische Hilfskraft.

Ich möchte mich bei meinen Eltern Renate und Gregor Acht für viel mehr als „nur“ für die finanzielle Unterstützung während des Studiums bedanken.

Meinem Mann Andreas danke ich ganz besonders dafür, dass er mir die nötige Ruhe und innere Sicherheit gegeben hat. Durch ihn habe ich keine Sekunde an dem Gelingen dieser Arbeit gezweifelt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen/Stand der Technik	3
2.1	Einsatzhärtung	3
2.1.1	Aufkohlen.....	3
2.1.2	Abschrecken	7
2.1.3	Fachbegriffe und Kennwerte	11
2.2	Maß- und Formänderungen durch den Einsatzhärteprozess	12
2.3	Simulation des Einsatzhärteprozesses mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode ...	21
2.3.1	Finite-Elemente-Methode	21
2.3.2	Grundsätze der Wärmebehandlungssimulation	23
2.3.3	Simulation des Aufkohlprozesses	25
2.3.4	Simulation des Abschreckprozesses (thermisch).....	26
2.3.5	Simulation des entstandenen Verzuges (mechanisch)	29
2.4	Statistische Versuchsplanung.....	31
2.4.1	Anwendungsgebiete und Begriffsbestimmung.....	31
2.4.2	Vollfaktorieller Versuchsplan.....	32
2.4.3	Signifikanzanalyse mit Hilfe der Varianzanalyse.....	34
2.4.4	Signifikanzanalyse mit Hilfe eines Wahrscheinlichkeitsnetzes	36
3	Zielsetzung	38
4	Werkstoffe.....	39
4.1	Chemische Zusammensetzung	39
4.2	Härtbarkeit.....	39
4.3	Ausgangsgefüge.....	40
5	Experimentelle Untersuchungen	42

5.1	Probengeometrien	42
5.2	Prozesscharakterisierung Gasaufkohlung mit Ölabschreckung	43
5.3	Versuchsplan Ölabschreckung	46
5.4	Prozesscharakterisierung Niederdruckaufkohlung mit Gasabschreckung	46
5.5	Geometrievermessung mit dem Koordinatenmessgerät	48
5.6	Eigenspannungsmessungen	51
6	Experimentelle Ergebnisse	53
6.1	Ergebnisse der Verzugsauswertungen nach der Ölabschreckung	53
6.1.1	Einfluss der Prozessparameter auf Maß- und Formänderungen	55
6.1.1.1	Einfluss der Chargierung	58
6.1.1.2	Einfluss der Aufkohlungstiefe	59
6.1.1.3	Einfluss des Randkohlenstoffgehaltes	59
6.1.1.4	Zusammenfassung der Einflussgrößen	60
6.1.2	Geometrievariation	60
6.1.3	Ableitung genauerer Verzugsbeschreibungen	63
6.2	Ergebnisse der Verzugsauswertungen nach der Gasabschreckung	68
6.2.1	Geometrievariationen	69
6.2.2	Ableitung genauerer Verzugsbeschreibungen	70
6.3	Vergleich der Ergebnisse von Niederdruckaufkohlung und Gasabschreckung mit Gasaufkohlung und Ölabschreckung	72
7	Diskussion der experimentellen Ergebnisse	77
8	Simulationsrechnungen	81
8.1	Rechenprogramm und Eingabedaten	81
8.1.1	Rechenprogramm	81
8.1.2	Diffusionsrechnung	83
8.1.3	Thermische Rechnung	84
8.1.4	Mechanische Rechnung	86
8.2	Validierung des Datensatzes	87

8.2.1	Validierung des Datensatzes mittels Berechnung einer Scheibe aus 20MnCr5	87
8.2.1.1	Randbedingungen	87
8.2.1.2	Vergleich des Härteverlaufes zwischen Simulation und Experiment	92
8.2.1.3	Vergleich des Eigenspannungs- und Restaustenitverlaufes zwischen Simulation und Experiment.....	92
8.2.1.4	Vergleich der Verzugswerte zwischen Simulation und Experiment..	95
8.2.2	Validierung des Datensatzes mittels Ultraschallmessungen	96
8.2.2.1	Messaufbau der Ultraschalltechnik	97
8.2.2.2	Berechnung des Versuches zur Ultraschallmessung.....	98
8.2.2.3	Vergleich des Simulationsergebnisses mit der experimentellen Messung	101
8.2.3	Bewertung der Qualität des Datensatzes	102
8.3	Berechnung eines statistischen Versuchsplans mit FEM	103
8.3.1	Untersuchung des Versuchsplanes auf Linearität.....	104
8.3.2	Eingangsdaten	107
8.3.2.1	Eingangsdaten für die Auswertung mit dem Wahrscheinlichkeitsnetz	107
8.3.2.2	Eingangsdaten für die Auswertung mit Hilfe der Varianzanalyse ...	108
8.3.3	Auswertung mit Hilfe eines Wahrscheinlichkeitsnetzes.....	111
8.3.4	Auswertung mit Hilfe der Varianzanalyse	113
8.3.5	Vergleich der Simulationsergebnisse mit den experimentellen Ergebnissen	115
8.4	Erklärungsansätze für verschiedene Verzugsformen mit Hilfe der Simulation..	116
8.4.1	Scheibenkipfung nach Ölabschreckung.....	116
8.4.2	Kissenform der Scheiben nach Ölabschreckung	119
8.4.3	Unterschiede zwischen Gas- und Ölabschreckung	121
9	Diskussion und Bewertung der Ergebnisse aus der Simulation	125
10	Zusammenfassung und Ausblick	128
11	Literatur.....	131

12	Formelverzeichnis	137
13	Anhang	139
13.1	Berechnete Effekte und die zugehörigen Konfidenzintervalle für den experimentellen Versuchsplan	139
13.2	Eingabedatensatz für die Simulationsrechnungen	141