

**Neue Verfahrensansätze auf dem Gebiet der
Einsatzhärtung von Stählen und deren Auswirkungen auf
Bauteileigenschaften**

Vom Fachbereich Produktionstechnik der
Universität Bremen
zur Erlangung der
venia legendi
für das Fachgebiet Werkstofftechnik
genehmigte

Habilitationsschrift

von
Dr.-Ing. Brigitte Clausen
aus Flensburg

Gutachter:
Prof.-Dr.-Ing. habil. P. Mayr
Prof. Dr. mont habil. H. Müller
Prof. Dr.-Ing. H.-W. Zoch

Habitationskolloquium

03.03.2008

Forschungsberichte aus der Stiftung Institut für Werkstofftechnik
Bremen

Band 43

Brigitte Clausen

**Neue Verfahrensansätze auf dem Gebiet
der Einsatzhärtung von Stählen und deren
Auswirkungen auf Bauteileigenschaften**

D 46 (Habil.-Schr. Universität Bremen)

Shaker Verlag
Aachen 2009

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., Habil.-Schr., 2008

Copyright Shaker Verlag 2009

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7878-6

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

Vorwort

Mit der Einsatzhärtung von Stählen befassen sich viele Fachbücher und andere Veröffentlichungen. Grundlegende Untersuchungen behandeln bisher meist die Gasaufkohlung, Niederdruckaufkohlungsverfahren werden nur am Rande betrachtet. Die umfanglichsten Informationen zu den Niederdruckaufkohlungsverfahren erhält man durch Berichte aus dem Industrieofenbau, welche naturgemäß sehr positiv ausfallen.

In dieser Arbeit werden neben dem Stand der Technik zur Einsatzhärtung insbesondere solche Arbeiten zusammengefasst, die Ergebnisse aus Gas- und Niederdruckaufkohlungsverfahren direkt gegenüberstellen. Ein Schwerpunkt liegt hierbei auf den Arbeiten, die in den letzten 10 Jahren in der Stiftung Institut für Werkstofftechnik (IWT) in Bremen zu diesem Thema bearbeitet wurden.

Die Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Assistentin und Leiterin der Arbeitsgruppe „Einsatzhärten“ an der Stiftung Institut für Werkstofftechnik (IWT) in Bremen, Hauptabteilung Werkstofftechnik bzw. Fachgebiet Werkstoffwissenschaften, Fachbereich Produktionstechnik der Universität Bremen.

Mein besonderer Dank für seinen Beitrag zu dieser Arbeit und für die Übernahme des Gutachteramtes gilt dem ehemaligen geschäftsführenden Direktor des IWT Bremen, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. P. Mayr, der mir als Mentor Freiraum zum Arbeiten ließ und bei Notwendigkeit interessante Denkanstöße bot.

Für die Erhaltung dieses Freiraumes danke ich dem amtierenden geschäftsführenden Direktor des IWT Bremen Herrn Prof. Dr.-Ing. H.-W. Zoch. Weiteren Dank möchte ich dem Leiter der Abteilung Wärmebehandlung des IWT Bremen, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. F. Hoffmann, für die freundliche Unterstützung und die vielen fruchtbaren Diskussionen aussprechen.

Den Mitarbeitern der Stiftung Institut für Werkstofftechnik, die mich als phantastische Kolleginnen und Kollegen über die vielen Jahre meiner Tätigkeit im Institut begleitet haben, sei an dieser Stelle herzlich gedankt, wobei hier die Kolleginnen und Kollegen der Abteilung Wärmebehandlung natürlich besonders hervorzuheben sind. Meiner Arbeitsgruppe, die mich fleißig, unermüdlich und mit vielen neuen interessanten Ideen bei der Arbeit hält, möchte ich hier ebenfalls noch mal meinen Dank aussprechen.

Bremen, im Dezember 2006

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Einsatzhärten	2
2.1	Aufkohlen	3
2.1.1	Gasaufkohlen	5
2.1.1.1	Verfahren	5
2.1.1.2	Reaktionsmechanismen	5
2.1.1.3	Einfluss der Prozessparameter	16
2.1.1.4	Vor- und Nachteile	21
2.1.2	Niederdruckaufkohlen	22
2.1.2.1	Verfahren	23
2.1.2.2	Reaktionsmechanismen	25
2.1.2.3	Einfluss der Prozessparameter	27
2.1.2.4	Vor- und Nachteile	33
2.1.3	Plasmaaufkohlen	33
2.1.3.1	Verfahren	34
2.1.3.2	Reaktionsmechanismen	39
2.1.3.3	Einfluss der Prozessparameter	42
2.1.3.4	Vor- und Nachteile	62
2.2	Zusammenfassende Gegenüberstellung der Aufkohlungsverfahren	64
2.3	Härten	69
3	Hochtemperaturaufkohlen	77
3.1	Werkstoffseitige Problemstellung	77
3.1.1	Einsatz herkömmlicher Feinkornstähle	79
3.1.2	Einsatz mikrolegierter Feinkornstähle	82
3.1.3	Härtung nach isothermischer Umwandlung	83

3.2	Anlagenseitige Problemstellung.....	85
3.3	Fazit.....	86
4	Randschichtbeeinflussungen.....	87
4.1	Randoxidation.....	87
4.1.1	Mechanismen der Randoxidation.....	87
4.1.2	Messung der Randoxidationstiefe.....	92
4.1.3	Beeinflussung über die Werkstoffauswahl.....	94
4.1.4	Beeinflussung über das Aufkohlungsverfahren.....	96
4.2	Randschichtschädigung infolge Niederdruckaufkohlung.....	98
4.2.1	Manganeffusion.....	99
4.2.2	Chromdiffusion (Werkstoff- und Temperatureinfluss).....	103
4.2.3	Thermische Ätzeffekte.....	104
4.3	Fazit.....	110
5	Mechanische Eigenschaften.....	111
5.1	Allgemein.....	111
5.1.1	Einfluss der Randoxidation.....	111
5.1.2	Einfluss einer Entkohlung.....	116
5.1.3	Einfluss von Carbiden in der Randschicht.....	117
5.1.4	Einfluss des Restaustenitgehalts.....	117
5.1.5	Einfluss der Korngröße.....	122
5.1.6	Einfluss der Einsatzhärtungstiefe.....	122
5.1.7	Einfluss der Kernhärte.....	123
5.1.8	Einfluss des Temperaturverlaufs.....	123
5.2	Anrissspannung , Biegefestigkeit.....	124
5.2.1	Einfluss der Randoxidation.....	125
5.2.2	Einfluss von Carbiden in der Randschicht.....	127
5.2.3	Einfluss des Restaustenitgehalts.....	128

5.2.4	Einfluss der Korngröße	130
5.2.5	Einfluss der Einsatzhärtungstiefe	133
5.2.6	Einfluss der Kernhärte	134
5.2.7	Einfluss des Temperaturverlaufs	140
5.3	Umlaufbiegefestigkeit, Biegeschwelfestigkeit.....	152
5.3.1	Einfluss des Eigenspannungszustandes.....	152
5.3.2	Einfluss der Randschichtzustandes	152
5.3.3	Einfluss von Carbiden in der Randschicht	167
5.3.4	Einfluss des Restaustenitgehalts	170
5.3.5	Einfluss der Korngröße	172
5.3.6	Einfluss der Einsatzhärtungstiefe.....	173
5.3.7	Einfluss der Kernhärte	174
5.3.8	Einfluss des Temperaturverlaufs	177
5.4	Verschleißfestigkeit.....	183
5.4.1	Einfluss des Randschichtzustandes.....	183
5.4.2	Einfluss von Carbiden in der Randschicht	185
5.4.3	Einfluss einer Entkohlung	186
5.4.4	Einfluss des Restaustenitgehalts	187
5.4.5	Einfluss der Einsatzhärtungstiefe.....	188
5.5	Fazit.....	189
6	Maß- und Formänderungen	191
6.1	Allgemeine Bemerkungen.....	191
6.2	Maß- und Formänderungen infolge Einsatzhärtung.....	197
6.3	Fazit.....	207
7	Zusammenfassung	209
8	Ausblick	211

Verzeichnis der Abkürzungen

Symbol	Einheit	Bedeutung
a_c	Pa	Kohlenstoffaktivität, definiert als „Kohlenstoffpartialdruck“ in einer koexistierenden idealen Gasphase, multipliziert mit einem Faktor, der das Gleichgewicht mit festem Graphit als Standardzustand $a_c = 1$ festlegt.
A_{C1}	°C	Haltepunkt in der Erwärmkurve von Eisen; Beginn der $\alpha \rightarrow \gamma$ -Umwandlung ($A_C = \text{arr\^et chauffage} = \text{Haltepunkt Erw\^armung}$)
A_{C3}	°C	Knickpunkt in der Erwärmkurve von Eisen; Ende der $\alpha \rightarrow \gamma$ -Umwandlung
At	mm	Aufkohlungstiefe
C_G	Masse-%	Grenzkohlenstoffgehalt zur Festlegung der Aufkohlungstiefe
C_K	Masse-%	Kernkohlenstoffgehalt
C_L	Masse-%	Gleichgewichtskohlenstoffgehalt, den ein legierter Stahl in einer Aufkohlungsatmosphäre mit einem C-Pegel = C_P annimmt
C_P	Masse-%	Gleichgewichtskohlenstoffgehalt, den eine Reineisenfolie in einer Aufkohlungsatmosphäre annimmt, C-Pegel
C_R	Masse-%	Randkohlenstoffgehalt
C_S	Masse-%	Sättigungswert des Austenits für Kohlenstoff
D	m ² /s	Diffusionskoeffizient für Kohlenstoff in Eisen
D_O	m ² /s	Diffusionskoeffizient für Sauerstoff in Eisen
Eht	mm	Einsatzhärtungstiefe
erf		Gauß'sches Fehlerintegral
f_C^{Fe-C}		Aktivitätskoeffizient, Proportionalitätsfaktor zwischen Kohlenstoffgehalt im Stahl und Kohlenstoffaktivität.
H_K	---	Kernhärte
H_R	---	Randhärte

HV	HV	Härte nach Vickers
K_i	---	temperaturabhängige Gleichgewichtskonstanten zur Definition des Zusammenhangs zwischen Partialdruckverhältnissen in den Aufkohlungsreaktionen und der Kohlenstoffaktivität a_C
k_L	---	Legierungsfaktor, Gleichgewichtskohlenstoffgehalt, den ein legierter Stahl in einer Aufkohlungsatmosphäre mit $C_p = 1,00\%$ annimmt.
\dot{m}	$g/(m^2 h)$	Massenstrom
m_n	---	Modul, Verzahnungsgröße, Teilkreisdurchmesser/Zähnezahl
M_s	$^{\circ}C$	Martensitstarttemperatur
N		Anzahl der Lastspiele im Schwingversuch
p_{XX}	Pa	Partialdruck von XX
t	s	Zeit
T	K, $^{\circ}C$	Temperatur
α -Fe		Ferrit, kubisch-raumzentriertes Eisengitter, in reinem Eisen beständig bis $911^{\circ}C$
β	m/s	Kohlenstoffübergangszahl
γ -Fe		Austenit, kubisch-flächenzentriertes Eisengitter, in reinem Eisen beständig von 911 bis $1392^{\circ}C$
σ	MPa	Spannung