

**Zusammenhang zwischen Mikrostruktur, Schädigungsverlauf und
mechanischen Eigenschaften bei TRIP-Stählen**

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

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation

von Diplom-Ingenieur

Julia Carolin Imlau

aus Erlangen

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Bleck
Prof. Dr.-Ing. habil. Dierk Raabe

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Dezember 2008

**Berichte aus dem
Institut für Eisenhüttenkunde**



IEHK
RWTH Aachen

Julia Carolin Imlau

**Zusammenhang zwischen Mikrostruktur,
Schädigungsverlauf und mechanischen
Eigenschaften bei TRIP-Stählen**

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. W. Bleck
Prof. Dr.rer.nat. Dr.-Ing.e.h. W. Dahl
Prof. Dr.-Ing. T. El Gammal
Prof. Dr.-Ing. H.W. Gudenau
Prof. Dr.-Ing. D. Senk

Band 1/2009

Shaker Verlag

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, 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 978-3-8322-7952-3

ISSN 0943-4631

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

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Eisenhüttenkunde der RWTH Aachen. Die wissenschaftliche Betreuung erfolgte durch Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Bleck, dem ich dafür und für die wertvollen Anregungen und Diskussionen danke. Weiterhin gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Dierk Raabe für die Übernahme des Korreferats und die Diskussion meiner Dissertation.

Meinen Projektpartnern am Max-Planck-Institut für Eisenforschung danke ich für die hervorragende Zusammenarbeit bei den EBSD-Messungen und die wissenschaftlichen Diskussionen. Namentlich seien hier Herr Dr.-Ing. Stefan Zaefferer, Frau Monika Nellessen, Frau Dr.-Ing. Patricia Romano und Herr Dr.-Ing. Richard Thiessen genannt.

Bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Eisenhüttenkunde möchte ich mich für die stets reibungslose Zusammenarbeit bedanken. Ohne die Unterstützung der technischen Angestellten aus Werkstatt, Werkstoffprüfung und Metallographie wäre diese Arbeit nicht zustande gekommen. Herrn Dr.-Ing. Sebastian Münstermann danke ich für die Unterstützung bei der Analyse der Bruchflächen. Herrn YiHui Wu danke ich für die Hilfe bei den FEM-Simulationen.

Hervorheben möchte ich auch den Beitrag, den meine Studien- und Diplomarbeiter geleistet haben. Vielen Dank an Eva-Maria Nick, Nahid Nora Elhami, Eva Hemmerich, Matthias Schuck, Kirsten Schneider, Sebastian Siebold und Jenny Rudnizki. Herrn Jens Nellessen danke ich für die vielen Stunden, die er in die Zeichnungen dieser Arbeit investiert hat. Meinen Bürokolleginnen aus Raum 110, Xiaofei Guo, Kirsten Schneider und Eva-Maria Nick, danke ich für die gute Arbeitsatmosphäre.

Besonders bedanke ich mich bei meinen Eltern, Kerstin und Klaus-Peter, sowie bei meinen Geschwistern, Christoph und Anna-Maria mit Annika und Maximilian, für die Unterstützung und die Abwechslung, die ihr mir immer geboten habt. Dir, lieber Florian, danke ich für deine unendliche Geduld und Unterstützung.

Aachen, Dezember 2008

Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die kritischen Gefügekomponenten für Porenbildung und Rissinitiierung in TRIP-Stählen herauszuarbeiten. Die Auswertung der EBSD-Untersuchungen bei unterschiedlichen Dehnungswerten ergibt eine starke Abhängigkeit der Wahl des Porenbildungsortes von der Austenitstabilität. Wandelt der Austenit bei geringer Dehnung in Martensit um, so nukleieren die Poren bevorzugt an den neu entstandenen hochfesten Bereichen. Erfolgt die Phasenumwandlung in Martensit erst bei höheren Dehnungen, bilden sich die Poren bevorzugt an den Korngrenzen Ferrit-Ferrit oder an Einschlüssen. Somit ist die Austenitstabilität die Schlüsselgröße zur Beschreibung der Schädigungsmechanismen bei TRIP-Stählen. Die Quantifizierung des Gefügeeinflusses auf den Bruchmechanismus gelingt mit dem hier eingeführten Schädigungstoleranzwert ΔS . Dieser Wert gibt an, wie schnell sich ein einmal entstandener Mikroriss, nach Änderung des Spannungszustandes von einachsigen Zug in einen mehrachsigen Spannungszustand, im Gefüge ausbreitet und zum Versagen der Probe führt.

Summary

The aim of the present work was to scrutinize the critical microstructure components of pore forming and crack initiation in TRIP steels. The analysis of the EBSD measurements in dependence of the local strain shows a strong dependence of the void nucleation on the austenite stability. If the austenite transforms into martensite after low straining has been applied, the voids nucleate preferably in the newly developed high strength areas. If the phase transformation into martensite occurs only at higher strain and still a majority of the austenite is present at uniform elongation, the pores form preferably at the grain boundaries ferrite-ferrite or at inclusions. The austenite stability is therefore the key variable for the description of damage mechanisms of TRIP steels. A quantification of the microstructural influence on the fracture mechanism is carried out using the newly introduced damage tolerance value ΔS . This value states how fast a once developed microcrack propagates in the microstructure.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	1
2	Theoretische Grundlagen von TRIP-Stählen	5
2.1	Herstellung	6
2.2	Legierungskonzept	9
2.3	Gefüge	14
2.3.1	Gefügeeinstellung durch Phasenumwandlung	15
2.3.2	Bestimmung der Austenitstabilität	18
2.4	Schädigungsmechanismen	25
2.4.1	Spaltbruch	26
2.4.2	Gleitbruch	27
2.4.3	Schädigung in mehrphasigen Werkstoffen	30
2.4.4	Schädigung in TRIP-Stählen	32
3	Mikrostrukturanalyse	37
3.1	Lichtoptische Metallographie	37
3.2	Rasterelektronenmikroskopie	41
3.2.1	Elektronenrückstreu-Diffraktometrie – EBSD	44
3.3	Röntgendiffraktometrie – XRD	47
4	Werkstoffe und methodische Vorgehensweise	49
4.1	Material	49
4.1.1	Gefügeeinstellung	52
4.2	Bestimmung der mechanischen Eigenschaften	56
4.2.1	Quasistatischer Zugversuch – Auswertung	59

4.3	Mikrostrukturanalyse	60
4.3.1	Elektronen-Rückstreu-Diffraktometrie – EBSD	61
4.3.2	Röntgendiffraktometrie – XRD	62
5	Mechanische Eigenschaften	63
6	EBSD-Analyse	75
6.1	Ferritischer Tiefziehstahl – Interstitial Free (IF) - Stahl	78
6.2	Dualphasenstahl – DP500	82
6.3	Austenitischer Cr-Ni-Stahl: X5CrNi18-8	85
6.4	TRIP-Stähle	88
6.4.1	Gefüge nach der Glühbehandlung	88
6.4.2	Gefügeveränderung während der Umformung	108
6.4.3	Beginn der Schädigung: Porennukleation	111
6.4.4	Porenkoaleszenz - Rissinitiierung	124
7	Numerisches Experiment	127
8	Fraktografie	133
9	Diskussion	141
9.1	Kritische Gefügemerkmale für die Porennukleation	142
9.2	Schädigungstoleranz der untersuchten Werkstoffe	148
9.3	Einfluss der Wärmebehandlungsparameter auf die Schädigungstoleranz	155
9.4	Ausblick	157
10	Zusammenfassung	159
	Literaturverzeichnis	163