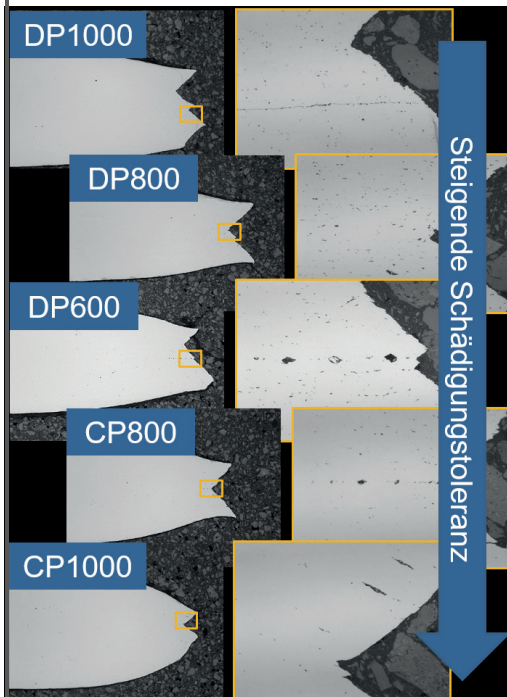


Sebastian Heibel

Schädigung und Versagensverhalten hochfester Mehrphasenstähle



Schädigung und Versagensverhalten hochfester Mehrphasenstähle

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

von der Fakultät Maschinenbau
der Technischen Universität Dortmund
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Sebastian Heibel, M.Sc.

aus

Dernbach

Dortmund, 2021

Vorsitzender der Prüfungskommission: Prof. Dr.-Ing. Moritz Schulze Darup
Berichter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. A. Erman Tekkaya
Prof. Dr.-Ing. Sebastian Münstermann
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Jörn Mosler
Tag der mündlichen Prüfung: 25. März 2021

Dortmunder Umformtechnik

Band 114

Sebastian Heibel

**Schädigung und Versagensverhalten
hochfester Mehrphasenstähle**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Düren 2021

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.: Dortmund, Technische Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8269-2

ISSN 1619-6317

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Industriedoktorand der Mercedes-Benz AG am Institut für Umformtechnik und Leichtbau der Technischen Universität Dortmund. Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. A. Erman Tekkaya sowie den Herren Dr. Winfried Nester und Dr. Daniel Wortberg für das mir entgegengebrachte Vertrauen, die stete Förderung, die sehr guten Diskussionen und die hervorragende Zusammenarbeit im Rahmen dieser Industriepromotion. Ebenso danke ich Prof. Dr.-Ing. Sebastian Münstermann vom Lehr- und Forschungsgebiet für Werkstoff- und Bauteilintegrität des Institutes für Eisenhüttenkunde der RWTH Aachen für die Übernahme des Korreferats. Daneben bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Moritz Schulze Darup und Prof. Dr.-Ing. Jörn Mosler für die Mitwirkung in der Prüfungskommission als Vorsitzender bzw. Mitberichter.

Weiterhin bedanke ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Umformtechnik und Leichtbau für die gute Zusammenarbeit, insbesondere Dr.-Ing. Till Clausmeyer und Dr.-Ing. Heinrich Traphöner für die wertvolle Unterstützung und gemeinsame Arbeit sowie Frau Jeanette Brandt und Frau Nina Hänisch für die hervorragende organisatorische Betreuung. Zudem bedanke ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen des Teams Werkstofftechnik Metalle der Mercedes-Benz AG für die gute und freundschaftliche Büroatmosphäre. Bei Carmen Schmidt und Jürgen Ehrenpfort bedanke ich mich herzlich für die Unterstützung im Labor und im Versuchsfeld. Ich danke nachdrücklich Gökce Aydin und den Herren Robin Gitschel, Eike Hoffmann, Martin Kieslich, Sergej Lisowski, Christian Möller, David Nieto und Fabian Stiebert für ihre Mitarbeit und Unterstützung im Rahmen ihrer studentischen Tätigkeiten.

Insbesondere meinen Eltern, Bärbel und Jürgen Heibel, meinen Großeltern, Maria und Hubert Heibel, Irmgard und Hermann Bröder, danke ich für ihre Erziehung, ihren Zuspruch und ihre uneingeschränkte Förderung, die meinen persönlichen und wissenschaftlichen Werdegang ermöglicht hat. Abschließend bedanke ich mich bei meiner Frau Alexandra für ihre motivierenden Worte, den Verzicht auf gemeinsame Zeit und ihre liebevolle Unterstützung, ohne die die Fertigstellung dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Abstract

High-strength multiphase steels are essential in modern car-body manufacture for light-weight design as well as improved crash performance. The higher strength is accompanied by a lower ductility. In particular, the heterogeneous microstructure of dual-phase steels tends to damage evolution and influences the plastic deformation capacity. The aim of this thesis is to improve the understanding of the damage and failure behavior of high-strength multiphase steels for material optimization and safe handling of these materials in forming processes and forming simulation.

The material portfolio of dual- and complex-phase steels allows the decided analysis of damage evolution by light and scanning electron microscopy. In a ferritic matrix with embedded martensite islands, larger ferrite grains and with a small difference in hardness, ferrite-martensite decohesion occurs predominantly. Higher martensite hardness, martensite rows and a heterogeneous martensite distribution favor damage evolution and reduce the bearable strains. The complex-phase steels show that a homogeneous microstructure leads to a high damage tolerance and high locally bearable strains. Damage evolution in the investigated multiphase steels results in porosities in the low percentage range.

It is shown with the help of the extended Lemaitre model that a consideration of the microstructural damage effects in the sense of a reduction of the load bearing cross-section is thus not necessary in sheet metal forming simulation on a macroscopic scale. To improve failure assessment, the application of model fracture curves of inversely calibrated damage models or fracture criteria is suitable. The example of FFL/SFFL calibrated with the direct method shows that the application of material fracture curves without consideration of mesh dependency is not useful for sheet metal forming simulation. However, materials can be differentiated from each other on the basis of these fracture curves.

The true thickness strain at fracture derived from FFL/SFFL is therefore qualified as a suitable measure for the determination of the plastic deformation capacity and thus the damage tolerance. In addition, edge crack sensitivity and bendability of high-strength multiphase steels can be estimated. Together with the true uniform strain as a measure, the assessment of the ductility and the ductile damage and failure behavior is possible. Both measures represent together the relevant microstructural characteristics on a macroscopic scale and can be used for testing during production, targeted development of new materials and for product- and process-oriented material selection in the development process.

Zusammenfassung

Hochfeste Mehrphasenstähle sind im modernen Karosseriebau unabdingbar für Stoffleichtbau und Verbesserung der Crashperformance. Die höheren Festigkeiten gehen mit einer reduzierten Duktilität einher. Insbesondere die heterogene Mikrostruktur von Dualphasenstählen neigt zur Schädigungsevolution und beeinflusst das Formänderungsvermögen. Ziel dieser Dissertation ist eine Verbesserung des Verständnisses des Schädigungs- und Versagensverhaltens hochfester Mehrphasenstähle zur Werkstoffoptimierung und zur sicheren Handhabung dieser Werkstoffe im Umformprozess und der Umformsimulation.

Das Werkstoffportfolio aus Dual- und Complexphasenstähle erlaubt die dezidierte Analyse der Schädigungsevolution mittels Licht- und Rasterelektronenmikroskopie. So findet in einer ferritischen Matrix mit eingelagerten Martensitinseln und größeren Ferritkörnern bei geringer Härtedifferenz zwischen den Phasen bevorzugt eine Ferrit-Martensitdekohäsion statt. Eine höhere Martensithärte, Martensitzeilen und eine heterogene Martensitverteilung begünstigen die Schädigungsevolution und reduzieren die ertragbaren Dehnungen. Die Complexphasenstähle zeigen, dass eine homogenere Mikrostruktur zu einer hohen Schädigungstoleranz und hohen lokal ertragbaren Dehnungen führt. Die Schädigungsevolution in den untersuchten Mehrphasenstählen führt zu Porositäten im niedrigen Prozentbereich.

Mit Hilfe der Anwendung des erweiterten Lemaitre-Modells wird für Dual- und Complexphasenstähle gezeigt, dass dementsprechend eine Berücksichtigung der mikrostrukturellen Schädigung durch Poren im Sinne einer Reduktion des tragenden Querschnitts auf makroskopischer Skala in der Blechumformsimulation nicht notwendig ist. Zur Verbesserung der Versagensprognose eignen sich Modellbruchkurven invers kalibrierter Schädigungsmodelle oder Bruchkriterien. Am Beispiel der FFL/SFFL wird ersichtlich, dass eine Anwendung von Werkstoffbruchkurven ohne Berücksichtigung der Netzabhängigkeit für die Blechumformsimulation nicht sinnvoll ist. Werkstoffe können anhand dieser Bruchkurven jedoch voneinander differenziert werden.

Aus der FFL/SFFL abgeleitet wird die wahre Dickendehnung bei Bruch folglich als Maß zur Charakterisierung des Formänderungsvermögens und damit einhergehend der Schädigungstoleranz qualifiziert. Hiermit können zudem Kantenrissempfindlichkeit, Bruchzähigkeit und Biegebarkeit hochfester Mehrphasenstähle abgeschätzt werden. Zusammen mit der wahren Gleichmaßdehnung wird die Bewertung des duktilen Schädigungs- und Versagensverhaltens ermöglicht. Beide Maße zusammen bilden die relevanten mikrostrukturellen Charakteristika hochfester Mehrphasenstähle auf makroskopischer Skala ab und können als sinnvolle Größen für die produktionsbegleitende Prüfung, zielgerichtete Entwicklung neuer Werkstoffe sowie für die produkt- und prozessgerechte Werkstoffauswahl im Entwicklungsprozess genutzt werden.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	iii
Abstract	v
Zusammenfassung	vi
Inhaltsverzeichnis	vii
Formelzeichen und Abkürzungen	ix
1 Einleitung	15
2 Stand der Technik	17
2.1 Werkstofftechnische Grundlagen plastischer Deformation von Stahlwerkstoffen	17
2.2 Mechanische Eigenschaften, Schädigung und Versagensverhalten hochfester Mehrphasenstähle.....	21
2.2.1 Hochfeste Mehrphasenstähle.....	25
2.2.2 Schädigung und Versagen	31
2.3 Versagensprognose in der Blechumformsimulation	42
2.3.1 Werkstoffmodellierung und klassische Versagensbewertung in der Blechumformsimulation	42
2.3.2 Schädigungsmodelle und Bruchkriterien	43
2.3.3 Versuchsbasis zur Parameteridentifikation	48
2.4 Klassifizierung und Eigenschaftsprofil.....	50
3 Zielsetzung	55
4 Werkstoffe und Untersuchungsmethodik	57
4.1 Untersuchungswerkstoffe.....	57
4.2 Experimentelle und numerische Vorgehensweise	63
4.2.1 Mechanische Prüfung	63
4.2.2 Mikroskopie.....	66
4.2.3 Simulation.....	68
5 Schädigungs- und Versagenscharakterisierung	71
5.1 Schädigungsevolution	71
5.2 Schädigungs- und Versagensmechanismen	75
5.3 Diskussion	81
6 Versagensprognose in der Blechumformsimulation	85
6.1 Experimentelle Basis.....	85
6.2 Modellkalibrierung und Validierung	89
6.2.1 Plastizität	89

6.2.2	Versagensbewertung mit Schädigungsmodellen und Bruchkriterien	91
6.2.3	Einfluss des Fließortes auf die Versagensbewertung	101
6.3	Diskussion	106
7	Mechanisches Eigenschaftsprofil und Klassifizierung	111
7.1	Theorie	111
7.1.1	Globale Duktilität und Umformbarkeit	112
7.1.2	Lokale Duktilität und Umformbarkeit	113
7.2	Charakterisierung der globalen Duktilität und Umformbarkeit	115
7.3	Charakterisierung der lokalen Duktilität und Umformbarkeit	117
7.4	Schematik zur Bewertung des mechanischen Eigenschaftsprofils und Klassifizierung	119
7.5	Diskussion	121
8	Zusammenfassung und Ausblick	129
8.1	Zusammenfassung	129
8.2	Ausblick	130
	Literaturverzeichnis	133
	Anhang A. Lode-Parameter und Lode-Winkel-Parameter	147
	Anhang B. Detaillierung der Untersuchungswerkstoffe	148
	Anhang C. Schädigungsevolution und duktiles Versagen	155
	Anhang D. Versagensmodellierung	161
	Anhang E. Globale und lokale Duktilität	169
	Eigene Veröffentlichungen	173
	Studienarbeiten	174
	Lebenslauf	175

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Beschreibung
A_G	%	Gleichmaßdehnung im Zugversuch
$A_{80\text{ mm}}$	%	Bruchdehnung im Zugversuch
A_0	mm ²	Initiale Querschnittsfläche
A_f	mm ²	Querschnittsfläche bei Bruch
D	-	Schädigungsvariable
D_{crit}	-	Kritische Schädigungsvariable
D_{ins}	-	Schädigung bei Erreichen der Instabilitätskurve (GISSMO)
E	MPa	Elastizitätsmodul
F	-	Instabilitätsvariable
F_f	N	Kraft bei Bruch im Zugversuch
F_{NH}	N	Niederhalterkraft
F_{max}	N	Maximale Kraft im Zugversuch
h	-	Parameter zur Berücksichtigung des Effektes der Porenschließung (Erweitertes Lemaitre-Modell)
ΔHV	HV	Härte­differenz aus Nanohärtemessung
J_3	MPa ³	Dritte Invariante des Spannungsdeviators
k_f	MPa	Fließgrenze
$k_{f,0}$	MPa	Peierls-Spannung
$\Delta k_{f,A}$	MPa	Steigerung der Fließgrenze durch Ausscheidungen
$\Delta k_{f,KG}$	MPa	Steigerung der Fließgrenze durch Kornfeinung
$\Delta k_{f,MK}$	MPa	Steigerung der Fließgrenze durch Mischkristalle

Zeichen	Einheit	Beschreibung
$\Delta k_{f,V}$	MPa	Steigerung der Fließgrenze durch Anstieg Versetzungsdichte
L	-	Lode-Parameter
LAV	%	Lochaufweitverhältnis
m	-	Reduktionsparameter (GISSMO)
n	-	Schädigungsparameter (GISSMO)
n_{2-A_G}	-	Verfestigungsexponent zwischen 2 % und A_G im Zugversuch
R_m	MPa	Zugfestigkeit im Zugversuch
$R_{p0,2}$	MPa	0,2%-Dehngrenze im Zugversuch
r_0, r_{45}, r_{90}	-	Lankford-Koeffizient in 0°, 45° und 90° zur Walzrichtung
r_{2-A_G}	-	Senkrechte Anisotropie Verfestigungsexponent zwischen 2 % und A_G im Zugversuch
t	mm	Blechdicke
t_0	mm	Initiale Blechdicke
t_f	mm	Blechdicke bei Bruch
TFS	-	True Fracture Strain (Hance und Davenport, 2016)
s	-	Exponent der elastischen Energiedichte (Erweitertes Lemaitre-Modell)
S	MPa	Skalierungsfaktor der elastischen Energiedichte (Erweitertes Lemaitre-Modell)
Y	MPa	Modifizierte elastische Energiedichte (Erweitertes Lemaitre-Modell)
Y_0	MPa	Elastische Energiedichte (Erweitertes Lemaitre-Modell)
w_e	kJ/m ²	Wesentliche Brucharbeit

Zeichen	Einheit	Beschreibung
Z	%	Brucheinschnürung
α	°	Biegewinkel nach VDA 238-100
β	-	Schädigungsexponent (Erweitertes Lemaitre-Modell)
γ_f	-	Verzerrung bei Bruch (SFFL)
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$	-	Erste, Zweite, Dritte Hauptdehnung
$\varepsilon_{1f}, \varepsilon_{2f}, \varepsilon_{3f}$	-	Erste, Zweite, Dritte Hauptdehnung bei Bruch
$ \varepsilon_{3f} $	-	Wahre Dickendehnung bei Bruch
ε_u	-	Wahre Gleichmaßdehnung
$\bar{\varepsilon}^p$	-	Plastische Vergleichsdehnung
$\bar{\varepsilon}_f^p$	-	Plastische Vergleichsdehnung bei Bruch
$\bar{\varepsilon}_{ins}^p$	-	Plastische Vergleichsdehnung bei Erreichen Instabilitätskurve (GISSMO)
η	-	Triaxialität bzw. Spannungsmehrachsigkeit
θ	°	Lode-Winkel
$\bar{\theta}$	-	Lode-Winkel-Parameter
μ	-	Reibbeiwert
ϑ	-	Querkontraktionszahl
ξ	-	Normierte dritte Invariante des Spannungsdeviators
$\Delta\rho_{Geo}$	-	Anstieg Versetzungsdichte durch geometrisch notwendige Versetzungen
$\Delta\rho_F$	-	Anstieg Versetzungsdichte durch Kaltverfestigung im Ferrit
$\Delta\rho_{Mart}$	-	Anstieg Versetzungsdichte durch Bildung deformationsinduzierten Martensits
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	MPa	Erste, Zweite, Dritte Hauptspannung

Zeichen	Einheit	Beschreibung
σ_m	MPa	Mittelspannung
σ_n	MPa	Normalspannung
$\bar{\sigma}$	MPa	Vergleichsspannung
$d\sigma/d\varepsilon$	-	Kaltverfestigung
τ	MPa	Schubspannung
τ_{max}	MPa	Maximale Schubspannung

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
A_{c1} , A_{c3}	Austenitiserungstemperaturen beim Aufheizen
Al	Aluminium
B	Bor
C	Kohlenstoff
CH	Complexphasenstahl “High Ductility” - Complexphasenstahl mit verbesserter Duktilität
Cr	Chrom
CP	Complexphasenstahl
DP	Dualphasenstahl
DIC	Digital Image Correlation – Digitale Bildkorrelation
DH	Dualphasenstahl “High Ductility” – Dualphasenstahl mit verbesserter Duktilität
EBSD	Electron backscatter diffraction - Elektronenrückstreubeugung
ETV	Ebener Torsionsversuch
FFL	Fracture Forming Limit – Grenzbruchkurve nach Martins et. al (2014)
GBK	Grenzbruchkurve
GFK	Grenzformänderungskurve
GISSMO	Generalized Incremental Stress State Dependent Damage Model
LD	Longitudinal Direction – Längs zur Walzrichtung
LM	Lichtmikroskopie
M_f	Martensitfinishtemperatur
M_s	Martensitstarttemperatur
MS	Martensitischer Stahl

Mn	Mangan
Mo	Molybdän
Nb	Niob
ND	Normal Direction – Senkrecht zur Blechebene
P	Phosphor
PHS	Press Hardened Steel – Pressgehärteter Stahl
Q&P	Quench and Partitioning – Abschrecken und Partitionieren
REM	Rasterelektronenmikroskopie
S	Schwefel
SFFL	Shear Fracture Forming Limit – Schergrenzbruchkurve
Si	Silizium
TBF	TRIP aided Bainitic Ferrite
TD	Transversal Direction – Quer zur Walzrichtung
Ti	Titan
TRIP	Transformation Induced Plasticity – Umwandlungsinduzierte Plastizität
TWIP	Twinning Induced Plasticity – Durch Zwillingsbildung induzierte Plastizität