

Einfluss des Werkstoffzustandes von Magnesium-Druckgusslegierungen auf das Schwingfestigkeitsverhalten

Dem Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Jochen Grimm

aus Mannheim

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. C. Berger

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. M. Vormwald

Tag der Einreichung: 27.01.2009

Tag der mündlichen Prüfung: 28.04.2009

Darmstadt 2009

D17

Berichte aus der Werkstofftechnik
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Christina Berger

Band 4/2009

Jochen Grimm

**Einfluss des Werkstoffzustandes von
Magnesium-Druckgusslegierungen auf das
Schwingfestigkeitsverhalten**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2009

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 978-3-8322-8679-8

ISSN 1617-3805

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 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet und Institut für Werkstoffkunde der Technischen Universität Darmstadt und der Staatlichen Materialprüfungsanstalt Darmstadt.

Der Leiterin des Instituts für Werkstoffkunde der TU Darmstadt und der Staatlichen Materialprüfungsanstalt Darmstadt, Frau Prof. Dr.-Ing. Christina Berger, danke ich für die Schaffung der Voraussetzungen zur Durchführung meiner Arbeit, die freundliche Übernahme des Hauptreferates und die Diskussion meiner Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Vormwald, Leiter des Fachgebietes Werkstoffmechanik am Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik der TU Darmstadt, sei für das Interesse an meiner Arbeit, die bereitwillige Übernahme des Koreferates und den damit verbundenen Mühen gedankt.

Mein besonderer Dank gebührt dem verstorbenen Leiter der Abteilung Oberflächentechnik und Korrosion, Herrn Dr.-Ing. Manfred Gugau. Durch seine Gabe, theoretisches Wissen mit praktischer Anschaulichkeit zu verbinden, hatte er meine Begeisterung zur Forschung geweckt und stets gefördert. Seine fachliche Kompetenz, seine Ermutigung, auch unkonventionelle Wege einzuschlagen, seine Spontaneität sowie seine verständnisvolle Art werden mir stets in Erinnerung bleiben.

Herrn Dr.-Ing. Torsten Troßmann danke ich für die enge, vertrauensvolle Zusammenarbeit und die kontinuierliche Betreuung während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter; in diesem Zusammenhang in besonderem Maße für die fruchtbaren Diskussionen, die wertvollen Anregungen, die Bereitstellung der nötigen Freiräume bei der finalen Erstellung meiner Arbeit sowie deren Durchsicht. Bei Herrn Dr.-Ing. Klaus Eppel möchte ich mich für seine fortwährende Hilfsbereitschaft, die stets konstruktiven Gespräche und die aufmerksame Durchsicht meiner Arbeit bedanken.

Allen weiteren Kollegen der Abteilung Oberflächentechnik danke ich für die angenehme Zusammenarbeit und freundschaftliche Arbeitsatmosphäre. Hierin eingeschlossen sind auch die Kollegen und Mitarbeiter des Fachgebietes und der Staatlichen Materialprüfungsanstalt Darmstadt, hier namentlich Herr Dr.-Ing. Ulrich Wuttke, die mit zum Gelingen dieser Arbeit beitrugen.

Nicht vergessen möchte ich die Studenten, die mich mit ihren Studien- und Diplomarbeiten sowie ihrer Tätigkeit als wissenschaftliche Hilfskräfte unterstützt haben (S. Groß, S. Michel, B. Sojka, E.M. Slomski, M. Klug).

Ein wesentlicher Teil der in dieser Arbeit dargestellten Forschungsergebnisse wurde im Rahmen eines öffentlich geförderten Forschungsvorhabens erarbeitet. Das Forschungsvorhaben 14150 B der Forschungsvereinigung „Forschungskuratorium Maschinenbau e.V. (FKM)“ wurden im Programm zur Förderung der „Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)“ vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie über die AiF finanziert. Dem Bundesministerium, der AiF sowie der FKM sei für die Förderung und die finanzielle Unterstützung gedankt.

Zudem bedanke ich mich bei den Mitgliedern des projektbegleitenden Arbeitskreises, hier stellvertretend bei Herrn Dr.-Ing. Paul Heuler als Obmann des Arbeitskreises, für die fachliche Diskussion und persönliche Unterstützung.

Von der Zusammenarbeit mit meiner Projektpartnerin am IFKM der TU Dresden, Frau Katrin Fuhrmann, sowie meinem Projektpartner am IMAB der TU Clausthal, Herrn Patrick David, durfte ich nachhaltig profitieren – fachlich, menschlich, freundschaftlich. Auf dass die freundschaftlichen Bande lange bestehen mögen. Darüber hinaus bin ich auch Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus-Georg Eulitz für das Einbringen seines Erfahrungsschatzes, die zahlreichen fachlichen Diskussionen sowie die vielfältigen Anregungen zu Dank verpflichtet.

In besonderem Maße danke ich zudem meinen Eltern, die mich stets unterstützt, gefördert und mir meine Ausbildung in jedweder Form ermöglicht haben. Sie erst legten den Grundstein für meinen Werdegang.

Meiner Frau Jessika schulde ich jedoch die größte Dankbarkeit. Nur durch ihr Verständnis, ihre Geduld und Nachsicht sowie ihre Unterstützung habe ich in Phasen des Zweifels und der Unzufriedenheit wieder die Kraft gefunden durchzuhalten. Ohne sie wäre meine Arbeit in dieser Form nicht möglich gewesen.

Erklärung:

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbständig verfasst und nur die angegebenen Hilfen verwendet habe.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'J. J. J.', written in a cursive style.

Griesheim, Januar 2009

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	IV
1 Einleitung, Motivation und Zielsetzung der Arbeit	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Ausgangssituation und Motivation	1
1.3 Zielsetzung	3
2 Stand der Technik.....	6
2.1 Konstitution von Magnesium-Aluminium-Legierungen – Erstarrungsverhalten und Gefügeausbildung im Druckguss	6
2.2 Zum Begriff der Porosität und deren Ursachen im Druckguss.....	11
2.3 Methoden zur Porositätsbestimmung	13
2.4 Gefügeinhomogenitäten und mechanische Eigenschaften – Ansätze, Hypothesen und physikalische Beschreibungen	16
2.4.1 Einflüsse auf das Werkstoffverformungsverhalten.....	16
2.4.2 Einflüsse auf das Ermüdungsverhalten	20
2.5 Verhalten von Magnesiumlegierungen unter mechanisch-korrosiver Beanspruchung	26
2.6 Grundlagen zum Werkstoffverformungs- und Ermüdungsverhalten	31
2.7 Zusammenfassung zum Stand der Technik	33
3 Experimentelle Untersuchungen und Durchführung	35
3.1 Probenherstellung.....	35
3.1.1 Probenmaterial zum Einfluss von Gefügeinhomogenitäten	35
3.1.2 Probenmaterial zum Einfluss korrosiver Einwirkung.....	38
3.2 Werkstoffzusammensetzung - Chemisch-physikalische Analyse	39
3.3 Porositätsbestimmung	39
3.3.1 Angewandte Methoden zur Porenanalyse.....	39
3.3.2 Vertiefende Betrachtungen der metallkundlichen Untersuchungen	40
3.3.2.1 Bildanalytische Porositätsauswertung metallographischer Schiffe	41
3.3.2.2 Begleitende Untersuchungen zur Gefügecharakterisierung	43
3.4 Gefüge und mechanische Eigenschaften	44
3.4.1 Quasi-statische Zugversuche	44
3.4.2 Schwingfestigkeitsuntersuchungen – Zum Einfluss gefügeimmanenter Porosität	44

3.4.2.1	Dehnungsgeregelte Einstufenversuche an Raumluft.....	45
3.4.2.2	Kraftgeregelte Betriebslastenversuche am Bauteil.....	45
3.4.3	Schwingfestigkeitsuntersuchungen – Zum Einfluss korrosiver Einwirkung.....	47
4	Ergebnisse der Untersuchungen und deren Bewertung.....	49
4.1	Werkstoffzusammensetzung	49
4.2	Porositätsauswertung	50
4.2.1	Ergebnisse der Dichtemessungen nach Archimedes	50
4.2.2	Ergebnisse der Bruchflächenanalyse (Fraktographie).....	52
4.2.3	Ergebnisse der computertomographischen Untersuchungen der Rippenstruktur	53
4.2.4	Ergebnisse der metallographischen Untersuchungen	54
4.3	Ergänzende, mikrostrukturelle Untersuchungen.....	63
4.4	Quasi-statisches Werkstoffverformungsverhalten	66
4.5	Ergebnisse der Schwingfestigkeitsuntersuchungen an separat gegossenen Rundproben.....	68
4.5.1	Zum Einfluss gefügeimmanenter Porosität.....	68
4.5.2	Zum Einfluss korrosiver Einwirkung.....	78
5	Analytische Behandlung der Porosität im Örtlichen Konzept.....	91
5.1	Vorgehensweise – Vereinfachungen, Annahmen, Definitionen	93
5.2	Korrelation zwischen Porosität und Ermüdungseigenschaften - porositätsabhängige Beschreibung.....	100
5.3	Evaluation der porositätsabhängigen Beschreibung - Lebensdauerabschätzung nach dem Örtlichen Konzept	107
5.3.1	Abschätzung des zyklischen Bauteilwerkstoffverhaltens im dehnungsgeregelten Einstufenversuch – einachsige Zug-Druck-Wechselbeanspruchung	107
5.3.2	Kraftgeregelte Versuche am Demonstratorbauteil unter Vier-Punkt-Biegung... 110	
5.3.2.1	Einstufenversuche	112
5.3.2.2	Betriebslastenversuche	114
6	Diskussion und kritische Betrachtung der Ergebnisse	121
7	Zusammenfassung	126
8	Anhang	130
8.1	Bildanalytische Auswertung metallographischer Schlitze	130
8.1.1	Definierte Rahmenparameter und Prinzip der quantitativen Bildanalyse.....	130

8.1.2 Einflussgrößen auf das Analyseergebnis: Sensitivitätsbetrachtung.....	132
8.1.3 Vorgehensweise und Annahmen zur Auswertung des vorliegenden Probenmaterials	137
9 Literaturverzeichnis.....	140

Formelzeichen und Abkürzungen

Lateinische Symbole

$A, A_L/A_Q$	(Mantel-)Fläche, Fläche im Längsschliff/-querschliff
A_0	Nennquerschnitt
$A_{10\text{ mm}}$	Bruchdehnung einer nicht normgerechten Zugprobe mit Messbasis 10 mm
$A_{90\%,\text{ ges}}$	90 %-Oberfläche aller Poren
$A_{\text{äqu}}$	Flächeninhalt eines porenflächengleichen Kreises
$A_{0\ 90\%}$	90 %-Oberfläche der Probe
A_{Pore}	Flächeninhalt einer Einzelpore
$area$	Fläche der versagensauslösenden Defektstelle nach Murakami [1]
A_{reell}	um den Porenanteil verminderter Restquerschnitt
A_{ref}	Referenzoberfläche der Bezugsprobe
A_{vergl}	Flächeninhalt eines porenumschreibenden Kreises mit Durchmesser d_{vergl}
a_w	werkstoffabhängige Größe
b	zyklischer Schwingfestigkeitsexponent
c	zyklischer Dehnungsexponent, Duktilitätsexponent
D	Schädigungssumme
D	Abstand zweier benachbarter Poren
$d_{\text{äqu}}$	äquivalenter Kreisdurchmesser, Durchmesser eines porenflächengleichen Kreises
d_p	Durchmesser einer idealisiert als Kugel angenommenen Pore
d_{vergl}	Vergleichdurchmesser einer Pore, maximaler Feret-Durchmesser
E	Elastizitätsmodul
E'	zyklischer Elastizitätsmodul
$E_{P>0}$	Elastizitätsmodul einer porenbehafteten Probe
F	Kraft
f_s	Festphasenanteil
k	Neigung der Wöhlerlinie, Wöhlerlinienexponent
K'	zyklischer Verfestigungskoeffizient
K_{cr}	kritischer Spannungsintensitätsfaktor
K_f	Kerbwirkungszahl
K_t	Kerbformzahl
$K_{t,PO}$	Kerbformzahl einer kugelförmigen Pore weit unter der Oberfläche
K_{th}	Schwellwert des Spannungsintensitätsfaktors
l_1, l_2	„Schlitzbreite“ der Graphitlamellen
L_{max}	maximale Porenlänge, maximaler Feret-Durchmesser senkrecht zur Beanspruchungsrichtung
N	Schwing-, Lastspielzahl
n'	zyklischer Verfestigungsexponent
NA	Porendichte (Anzahl Poren/Flächeneinheit)
N_A	Anrisslastwechselzahl
n_i	Stufenhäufigkeit
N_k	Abknickpunkt der Wöhlerlinie
n_{stat}	statistischer Größeneinflussfaktor

P	Porengehalt in % bzw. Porositätsgrad
P_A	flächenbezogener Porengehalt, Porenflächenanteil
P_m	Porenmorphologieparameter nach Schindelbacher [43]
P_{SWT}	Schädigungsparameter nach SMITH-WATSON-TOPPER
$P_{SWT, 50\%}$	Schädigungsparameter auf der 50 %-Wöhlerlinie
$P_{SWT,i}$	Schädigungsparameter auf einem Horizont i
PT	Probentyp
P_v	volumenbezogener Porengehalt, Porenvolumenanteil
P_{VV}	Vertrauenswahrscheinlichkeit
r	Kerbradius
R	Spannungsverhältnis
R	Rundheit
R_m	Zugfestigkeit (eines porenbehafteten Gefüges)
R_{m0}	Zugfestigkeit eines porenfreien Gefüges
$R_{p0,2}$	0,2 %-Dehngrenze
R_ε	Dehnungsverhältnis
s	Rundheitsfaktor eines Elementes (Pore oder Graphitteilchen)
s_1, s_2	Verformung/Öffnung der Graphitlamellen unter Last
S_a	Nennspannungsamplitude
S_{max}	maximale Porenausdehnung nach Schindelbacher [43]
t	Kerbtiefe, Fehlergröße
$T6$	Wärmebehandlung: Lösungsgeglüht und warmausgelagert
T_D	Streuspanne der Schädigungssumme
U	Umfang eines Elementes
V	Volumen
V_{ref}	Referenzvolumen der Bezugsprobe

Griechische Symbole

$\Delta T_{f_s = 80\%}$	Temperaturintervall bei einem Festphasenanteil von 80 %
δ_j	Relativwerte
$\varepsilon_{a,el}$	elastische Dehnungsamplitude
$\varepsilon_{a,pl}$	plastische Dehnungsamplitude
$\varepsilon_{a,t}$	Gesamtdehnungsamplitude
ε_f'	zyklischer Dehnungskoeffizient, Duktilitätskoeffizient
κ	WEIBULL-Exponent
μ	WEIBULL-Parameter
ρ	Proben- bzw. Bauteildichte
ρ_0	theoretische Dichte eines Werkstoffs
$\sigma_{a,P=0}$	Spannungsamplitude des porenfreien Materials
$\sigma_{a,P\neq 0}$	Spannungsamplitude des porenbehafteten Materials
σ_{ak0}	Spannungsamplitude am Abknickpunkt der WL (Probenoberfläche A_0)
σ_f'	zyklischer Schwingfestigkeitskoeffizient
σ_{max}	Maximalspannung
$\sigma_{max, 90\%}$	Spannungswert, der 90 % der Maximalspannung entspricht

Abkürzungen

ASTM	American Society for Testing and Materials
BLV	Betriebslastenversuch
CA-CCA	Computer-Aided Cooling Curve Analysis
CT	Computertomographie
DTA	Differential Thermal Analysis
DWL	Dehnungswöhlerlinie
ESV	Einstufenversuch
FEM	Finite-Elemente-Methode
FESA	Funken-Emissions-Spektral-Analyse
LEBM	linear elastische Bruchmechanik
MK	Mischkristall
n.v.	nicht vorhanden
SpRK	Spannungsrisskorrosion
SwRK	Schwingungsrisskorrosion
UML	Uniform Material Law
V	Vergrößerung
WL	Wöhlerlinie
ZSD-Kurve	zyklische Spannungs-Dehnungskurve

Legierungsbezeichnungen, chemische Elemente und Verbindungen

AE42	Legierungsbezeichnung nach ASTM: Mg-Legierung mit 4 % Al, 2 % Seltenen Erden
Al	Aluminium
AM50	Legierungsbezeichnung nach ASTM: Mg-Legierung mit 5 % Al, >0,1 % Mn
AZ91	Legierungsbezeichnung nach ASTM: Mg-Legierung mit 9 % Al, 1 % Zn
Cu	Kupfer
Fe	Eisen
Mg	Magnesium
Mg(OH) ₂	Magnesiumhydroxid
Mg ₁₇ Al ₁₂	intermetallische Phase des Magnesiums mit Aluminium
MRI153M / MRI230D	vom Magnesium Research Institute entwickelte Legierungen für den Einsatzbereich bis 153°C bzw. 230°C
NH ₄ Cl	Ammoniumchlorid
Ni	Nickel
ZK60	Legierungsbezeichnung nach ASTM: Mg-Legierung mit 6 % Zn, >0,45 % Zr
Mn	Mangan
Zr	Zirkonium
Zn	Zink