

Besonderheiten des Verhaltens zellularer Metalle unter monotoner und zyklischer mechanischer Beanspruchung

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
DOKTOR-INGENIEUR

vorgelegt von
Dipl.-Wirt.-Ing. Srećko Nešić
aus Doboj, Bosnien und Herzegowina

eingereicht dem
Department Maschinenbau
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
der Universität Siegen

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Krupp
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Hans-Jürgen Christ

Tag der mündlichen Prüfung: 06.11.2015

Schriftenreihe – Materialdesign und Werkstoffzuverlässigkeit

Band 1

Srećko Nešić

**Besonderheiten des Verhaltens zellularer Metalle unter
monotoner und zyklischer mechanischer Beanspruchung**

Shaker Verlag
Aachen 2016

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.: Siegen, Univ., Diss., 2015

Gedruckt auf alterungsbeständigem holz- und säurefreiem Papier.

Copyright Shaker Verlag 2016

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4244-3

ISSN 2366-6900

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

Geleitwort des Herausgebers

Die Schriftenreihe Materialdesign und Werkstoffzuverlässigkeit umfasst Dissertationen, die im Rahmen von Forschungsarbeiten an der Hochschule Osnabrück entstanden und in Promotionsverfahren an der Universität Siegen eingebunden sind. Der Herausgeber ist der Universität Siegen als außerordentliches Mitglied des Departments Maschinenbau verbunden.

Im Fokus der Forschungsaktivitäten stehen Zusammenhänge zwischen der Mikrostruktur und dem Schädigungsverhalten moderner Konstruktionswerkstoffe, wie Nickelbasis-Superlegierungen, Aluminium-Gusswerkstoffe, zellulare Metalle, rostfreie Edelstähle, Kupferlegierungen und Vergütungsstähle. Der Laborbereich Materialdesign und Werkstoffzuverlässigkeit bildet dabei die Wertschöpfungskette vom computergestützten Werkstoffdesign über Gieß- und Fügetechnik, Werkstoffprüfverfahren bis hin zur hochaufgelösten Elektronenmikroskopie ab. Das Arbeitsgebiet versteht sich dabei als Bindeglied zwischen industrieller Werkstoffentwicklung und -anwendung sowie der grundlagenorientierten Materialforschung.

Osnabrück, Januar 2016

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Krupp

Sprecher des Laborbereichs Materialdesign und Werkstoffzuverlässigkeit

Hochschule Osnabrück

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Laborbereich Materialdesign und Werkstoffzuverlässigkeit der Hochschule Osnabrück im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekts „IntellZell – Leichtbau und Fahrsicherheit: Intelligentes Konstruieren mit zellularen Metallen“.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Krupp für die Möglichkeit der Promotion sowie die Übernahme des Referats. Insbesondere bedanke ich mich für sein stetes Interesse am Fortschritt der Arbeit, die vielen wertvollen Tipps sowie die Freiheiten bei der Durchführung der Untersuchungen. Ferner danke ich an dieser Stelle Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Hans-Jürgen Christ für die Übernahme des Korreferats.

Tatkräftige Unterstützung erhielt ich stets von meinen Kollegen des Laborbereichs Materialdesign und Werkstoffzuverlässigkeit, die durch ihre freundliche Art zudem ein angenehmes Arbeitsklima schufen. Überaus dankbar bin ich hierbei besonders Herrn M. Sc. Matthias Kantehm für die geduldige Einführung in das Arbeitsleben an der Hochschule Osnabrück sowie seine ständige Bereitschaft, fachliche Problemstellungen zu diskutieren. Daneben spreche ich an dieser Stelle auch einen Dank an M. Sc. Marcus Söker aus, der durch seine lockere Art für eine sehr angenehme Atmosphäre sorgte. Ebenso bedanke ich mich an dieser Stelle bei allen Mitarbeitern der Betriebswerkstatt. Lob und Dank gebührt außerdem den studentischen Hilfskräften, die durch ihr Engagement zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen haben. Überaus dankbar bin ich zudem allen hier namentlich nicht genannten Kollegen, die mich nicht nur fachlich unterstützten, sondern mir auch durch die vielen Stunden abseits der Arbeit eine angenehme Zeit in Osnabrück ermöglichten.

Diese Arbeit wäre jedoch niemals entstanden ohne die Unterstützung meiner Freunde und insbesondere meiner Familie. Ihre eigene Opferbereitschaft sowie ihre aufbauenden und ermutigenden Worte vor allem in schwierigen Zeiten haben mir die Kraft gegeben, die ich zum Erstellen dieser Arbeit brauchte. Daher gebührt ihnen mein größter Dank.

„Stärke entspringt nicht physischer Kraft, sondern einem unbeugsamen Willen.“
Mahatma Gandhi

*Mojim roditeljima,
Elmiri i Milanu Nešić*

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	VII
Kurzfassung	XI
Abstract	XIII
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	4
2.1 Übersicht Metallschäume und Metallschaum-Sandwichverbunde	4
2.1.1 Definition	6
2.1.2 Herstellung	12
2.1.3 Struktur	18
2.2 Mechanische Eigenschaften und Werkstoffprüfung	22
2.2.1 Vergleich mit Vollmaterialien	23
2.2.2 Mechanische Prüfung zellulärer Metalle	26
2.2.3 Elastische Verformung	31
2.2.4 Plastische Verformung	36
2.2.5 Verformungsverhalten bei einsinnigen Belastungen	38
2.2.6 Verformungsverhalten bei zyklischen Belastungen	47
2.3 Konstruieren mit zellulären Metallen	52
2.3.1 Wichtigste Konstruktionskennwerte	52
2.3.2 Fügen von zellulären Metallen	56
2.3.3 Umformung	59
2.3.4 Auslegung	60
2.3.5 Korrosion	62
2.3.6 Beschichtung	63
3 Experimentelles	65
3.1 Untersuchte Werkstoffe	65
3.2 Probengeometrie	71
3.3 Probeneinspannung	72
3.4 Mechanische Werkstoffprüfung	75

3.4.1	Quasistatische und dynamische Versuche	76
3.4.2	Zyklische Versuche	77
3.5	Optische Dehnfeldanalyse	80
3.6	Metallografische Analyse	87
3.6.1	Korngrößenuntersuchung	88
3.6.2	Partikelanalyse	89
4	Ergebnisse	91
4.1	Vergleich der Werkstoffeigenschaften bei quasistatischer und dynamischer Beanspruchung	91
4.1.1	Druckversuch	92
4.1.2	Zugversuch	102
4.1.3	Biegeversuch	109
4.1.4	Scherzugversuch	113
4.1.5	Kugeleindruckversuch	116
4.1.6	Dynamische Prüfung zellulärer Metalle	120
4.1.7	Dehnungsverteilung einzelner Poren	122
4.2	Besonderheiten bei zyklischer Beanspruchung	124
4.2.1	Druckschwellbereich	125
4.2.2	Wechselbereich	132
4.2.3	Zugschwellbereich	136
4.2.4	Umlaufbiegebelastung	141
5	Diskussion	144
5.1	Makroskopisches und mikroskopisches Schädigungsverhalten	144
5.1.1	Monotone Beanspruchung	144
5.1.2	Zyklische Beanspruchung	165
5.2	Metallschaum als Konstruktionsmaterial	172
5.2.1	Konstruktionskennwerte	173
5.2.2	Konstruktionsrichtlinien	174
5.2.3	Finite-Elemente-Methode und Materialmodelle	176
6	Zusammenfassung und Ausblick	181
7	Literatur	184

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzungen

AFS	Aluminium Foam Sandwich
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ASF	Audi Space Frame
ASTM	American Society for Testing and Materials
CCD	Charge Coupled Device
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
CIP	Cold Isostatic Pressing
COD	Crack Opening Displacement
CT	Compact Tension
CT	Computertomografie
DIC	Digital Image Correlation
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
EDS	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
EN	Europäische Norm
Gew.-%	Gewichtsprozent
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
HCF	High-Cycle Fatigue (Zeitfestigkeitsbereich)
ISO	International Organization for Standardization
LCF	Low-Cycle Fatigue (Kurzzeitfestigkeitsbereich)
MIG	Metallinertgasschweißen
MIM	Metal Powder Injection Moulding
OPS	Oxid Polier Suspension
REM	Rasterelektronenmikroskopie
RFDA	Resonanz-Frequenz-Dämpfungs-Analyse
SENB	Single-Edge-Notched Bend
WIG	Wolfram-Inertgasschweißen

Lateinische Symbole

a	Risslänge
a_0	Anfangsrisslänge
A_{gt}	Gesamtdehnung bei Zugfestigkeit
A_{plt-E}	Stauchung bei Plateauende
b	Breite einer Sandwichstruktur
B	Probenbreite
B_y	Biegesteifigkeit
d	taillierter Durchmesser einer Umlaufbiegeprobe
$d\varepsilon/dN$	Stauchungszunahme pro Zyklus
e_d	Stauchung
e_f	Stauchung der Kernschicht einer Sandwichstruktur
e_s	Stauchung einer Sandwichstruktur
E_{eff}	spezifische Energieabsorptionseffizienz
E_H	Elastizitätsmodul der Deckbleche
E_s	Elastizitätsmodul des Zellwandmaterials
E_V	spezifische Energieabsorption
E^*	Elastizitätsmodul des Schaums
f	Frequenz
f	Durchbiegung
F	Kraft
h	Länge zwischen den Deckblechmitten einer Sandwichstruktur
J	J -Integral
J_C	kritisches J-Integral
K_{IC}	Risszähigkeit
l	Kantenlänge des kubischen Zellmodells
l	Steglänge in einem Tetraikaidekaeder
m	Steigung der Sekante durch die Hystereseschleife
M	Biegemoment
n	spezifischer Exponent

N	Zyklenzahl
N_B	Bruchzyklenzahl
N_T	Zyklenzahl bei Erreichen von ε_T
p	Porosität
P_s	Eigenschaft des Massivwerkstoffes
P^*	Eigenschaft des Schaums
q_{xz}	Querkraft
r	Übergangsradius einer Umlaufbiegeprobe
R	Spannungsverhältnis
R	charakteristischer Radius der Krümmung in einem Tetraikaidekaeder
R_{cH}	obere Quetschgrenze
R_m	Zugfestigkeit
R_{max}	maximale Spannung
R_{p1}	Stauchgrenze
R_{plt}	Plateauspannung
R_{20}	20% der Plateauspannung
R_{20}	20% der Zugfestigkeit
R_{70}	70% der Plateauspannung
R_{95}	95% der Zugfestigkeit
s^p	Standardabweichung der Dichte
t_d	Dicke des Deckblechs einer Sandwichstruktur
t_e	Dicke des Stegs
t_f	Dicke der Zellwand
t_f	Dicke der Kernschicht einer Sandwichstruktur
t_s	Dicke der Sandwichstruktur
W	Probenbreite
W	Widerstandsmoment

Griechische Symbole

α	Winkel zwischen zwei Kameras
α	Konstante
γ	Schiebung
Δa	Rissverlängerung
ΔK	Schwingbreite des Spannungsintensitätsfaktors
$\Delta\sigma$	Spannungsschwingbreite
$\Delta\sigma/2$	Spannungsamplitude
ε	Dehnung
ε_{\max}	maximale Dehnung
ε_{\min}	minimale Dehnung
ε_T	Übergangsdehnung
η_{Verl}^*	Verlustfaktor des Schaums
η_{Verl_s}	Verlustfaktor des Vollmaterials
ρ^*	Dichte des Schaums
ρ_r	relative Dichte
ρ_s	Dichte des Zellwandmaterials
σ	Spannung
σ_H	Spannung im Deckblech einer Sandwichstruktur
σ_K	Spannung im Kern einer Sandwichstruktur
σ_m	Mittelspannung
σ_o	Oberspannung
σ_u	Unterspannung
σ_Y	Fließgrenze
σ_{Ys}	Fließgrenze des Zellwandmaterials
τ	Schubspannung
$\tau_{\text{Übergang}}$	Schubspannung zwischen Deckblech und Schaumkern
Φ	Materialverteilungsparameter

Kurzfassung

Infolge des immer wichtiger werdenden Leichtbaus wurden in den vergangenen Jahren verstärkt Metallschäume und Metallschaum-Sandwichverbunde auf ihre Eignung zum Einsatz in unterschiedlichen Anwendungen untersucht. Hierfür wurden nicht nur die Herstellungsverfahren von zellularen Metallen optimiert bzw. neu entwickelt, sondern auch deren mechanische Eigenschaften untersucht. Nichtsdestotrotz ist das Werkstoffverhalten bis heute nicht gänzlich verstanden, sodass der Bekanntheitsgrad und die Akzeptanz von Metallschäumen bei Konstrukteuren gering geblieben sind. Sowohl diese Umstände als auch die teilweise mangelnde Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Schäume waren neben dem finanziellen Aspekt die treibenden Gründe für die bisherige schlechte Marktdurchdringung dieser vielversprechenden Werkstoffgruppe. So war es bisher nur in einigen wenigen Fällen möglich, Metallschaumbauteile in Großserie zu produzieren.

Eines der übergeordneten Ziele dieser Arbeit war es daher, das Verständnis des Materialverhaltens bei verschiedenen mechanischen Belastungen zu verbessern und dadurch die Akzeptanz dieser Werkstoffgruppe bei Konstrukteuren zu steigern. Hierfür fand zunächst eine systematische Auswahl verschiedener Metallschäume und Metallschaum-Sandwichverbunde statt, welche aufgrund ihrer Herstellungsart und Homogenität das größte Potenzial für Einsätze als Bauteil aufweisen. Diese Materialien wurden daraufhin verschiedenen quasistatischen, dynamischen und zyklischen mechanischen Prüfungen unterzogen, um sie mikro-, meso- und makroskopisch zu untersuchen sowie auf Gemeinsamkeiten bzw. Unterschiede hin zu bewerten. Hierfür wurde eine gänzlich neue Prüfmethode (Umlaufbiegeprüfung) entwickelt, mit deren Hilfe eine vergleichsweise schnelle und kostengünstige Erstellung von Wöhlerlinien möglich ist. Zudem wurden verschiedene Aspekte beschrieben, die bei einer Konstruktion aus zellularen Metallen berücksichtigt werden sollen.

Aufgrund der Tatsache, dass im heutigen Konstruktionsprozess in der Regel Simulationen bereits sehr früh durchgeführt werden, wurden die hier gewonnenen Ergebnisse verwendet, um die Eignung von Metallschäumen als Crashenergie-Absorptionselemente in unterschiedlichen Autositzstrukturen zu simulieren. Die Ergebnisse zeigen, dass Metallschäume durchaus in der Lage sind, bestehende Konstruktionen, z.B. bei Crashbelastung, zu verbessern.

Da im Rahmen dieser Arbeit zudem die Erarbeitung eines Konzepts für eine quasistatische Zugversuchsnorm angestoßen wurde, wurde dieses hier in Ansätzen vorgestellt.

Letztlich wird mit dieser Arbeit eine systematische Herangehensweise zur Untersuchung von Metallschäumen aufgezeigt.

Abstract

Due to the increasing importance of lightweight constructions, metal foams and metal foam sandwich composites have been increasingly examined in recent years for their suitability for various applications. To this end, not only were the manufacturing processes optimized or newly developed, but their mechanical properties were also investigated. Nevertheless, the material behaviour is still not entirely understood, so that the level of awareness and acceptance of metal foams by engineers has remained low. These circumstances as well as the partial lack of reproducibility and comparability, in addition to the financial aspect, were the driving reasons for the current low market penetration of this promising material group. Thus, only in a few cases has it been possible to produce metal foam components on a large scale.

One of the overall goals of this study is therefore to improve our understanding of the material behaviour of metal foams under various mechanical loads and thereby to increase acceptance of this material group among engineers. For this purpose, a systematic selection of various metal foams and metal foam sandwich composites with the greatest potential for use as a component due to their production method and homogeneity was carried out in a first step. These materials were then subjected to various quasi-static, dynamic and cyclic mechanical tests in order to investigate them on a micro-, meso- and macroscopic scale and evaluate the similarities and differences. In this context a new test method (the rotating bending test) was developed, which allows for the relatively quick and cost-effective generation of S-N curves. Moreover, different aspects were described, which should be considered in a construction of cellular metals.

Since in today's construction process simulations are usually performed very early on, the results obtained here were used to simulate the suitability of metal foams as crash energy absorption elements in various car seat structures. The results reveal that metal foams are quite capable of improving existing constructions, e.g. during crash impact.

In the context of this thesis, the development of a concept of a quasi-static tensile test standard was initiated, so it is presented here in rudimentary way. Ultimately, this work demonstrates a systematic approach to the study of metal foams.