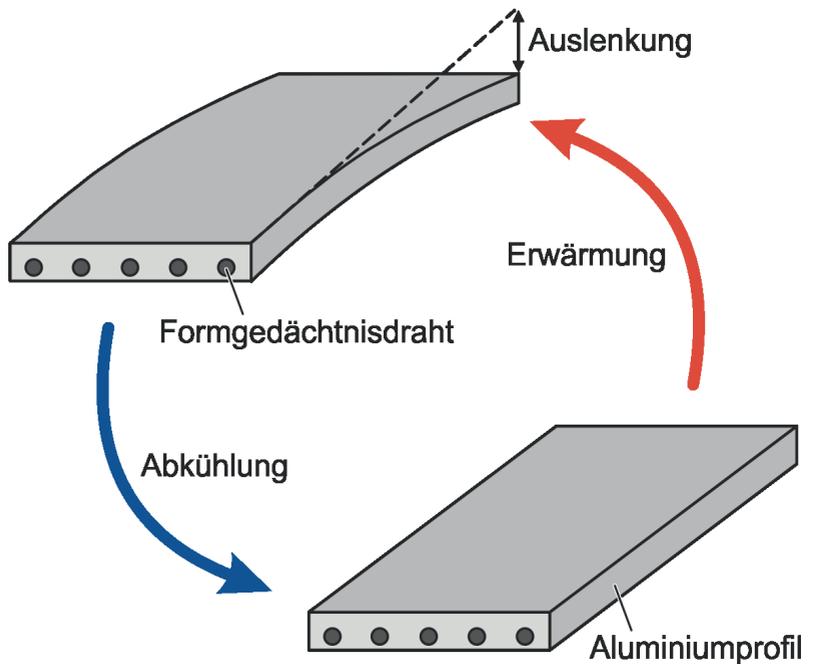


Christoph Dahnke

Verbundstrangpressen adaptiver Leichtbaukomponenten aus Aluminium und Formgedächtnislegierungen



Verbundstrangpressen adaptiver Leichtbaukomponenten aus Aluminium und Formgedächtnislegierungen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

von der Fakultät Maschinenbau
der Technischen Universität Dortmund
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Christoph Dahnke M.Sc.

aus

Hagen

Dortmund, 2019

Vorsitzender der Prüfungskommission: Priv.-Doz. Dr.-Ing. Jobst Bickendorf

Berichter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. A. Erman Tekkaya

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Gunther Eggeler

Prof. Dr.-Ing. Andreas Menzel

Tag der mündlichen Prüfung: 12. Februar 2019

Dortmunder Umformtechnik

Band 105

Christoph Dahnke

**Verbundstrangpressen adaptiver
Leichtbaukomponenten aus Aluminium
und Formgedächtnislegierungen**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Düren 2019

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., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6630-2

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 im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Umformtechnik und Leichtbau der Technischen Universität Dortmund. Für die Möglichkeit zur Promotion, das mir entgegengebrachte Vertrauen sowie die fortwährende Unterstützung gilt mein ganz besonderer Dank dem Institutsleiter, Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. A. Erman Tekkaya.

Darüber hinaus danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Eggeler vom Lehrstuhl Werkstoffwissenschaft der Ruhr-Universität Bochum für die Übernahme des Korreferats sowie Prof. Dr.-Ing. Andreas Menzel und Priv.-Doz. Dr.-Ing. Jobst Bickendorf für ihr Mitwirken in der Prüfungskommission. Der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) danke ich für die Förderung der Projekte TE 508/45-1 und TE 508/45-2, in deren Rahmen die zugrunde liegenden Forschungsarbeiten entstanden sind.

Bei allen aktuellen und ehemaligen Kollegen des Institutes bedanke ich mich für die kollegiale Arbeitsatmosphäre, die konstruktive Zusammenarbeit und die große Hilfsbereitschaft. Mein besonderer Dank gilt dabei vor allem den Kollegen aus der Abteilung Massivumformung, welche mir bei der Anfertigung dieser Arbeit stets den Rücken freigehalten haben. Für die konstruktiven Diskussionen, guten Ratschläge und Kommentare möchte ich mich im Besonderen bei den Herren Dr.-Ing. Stefan Ossenkemper, Dipl.-Inform. Alessandro Selvaggio, Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Matthias Haase und Prof. Dr.-Ing. Noomane Ben Khalifa bedanken. Darüber hinaus gilt mein Dank den Herren Oliver Hering M. Sc. und Felix Kolpak M. Sc. für die gewissenhafte Durchsicht meiner Arbeit sowie Dr.-Ing. Burkhard Maaß und Dr.-Ing. Jan Frenzel für die fachlichen Diskussionen und hilfreichen Anmerkungen. Den Kollegen Dr.-Ing. Pascal Pinter, Dr.-Ing. Florentin Pottmeyer, Dr.-Ing. Andreas Reeb und Prof. Dr.-Ing. Kay A. Weidenmann vom IAMWK des KIT danke ich für die hervorragende Zusammenarbeit in den gemeinsamen Forschungsprojekten.

Weiterhin bedanke ich mich sehr herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. i. R. Peter Haupt für die intensiven und lehrreichen Diskussionen im Bereich der Analytik. Bei Frau Beate Ulm-Brandt bedanke ich mich außerdem für die sprachliche Korrektur dieser Arbeit. Des Weiteren danke ich allen Kolleginnen und Kollegen aus den administrativen und technischen Bereichen des Institutes für ihre stetige Unterstützung und Hilfsbereitschaft. Besonders hervorheben möchte ich dabei Frank Volk und Dirk Hoffmann, die mit ihrem unermüdlichen Einsatz und ihrer Unterstützung im experimentellen Bereich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ich bedanke mich außerdem bei allen Projekt-, Bachelor- und Masterarbeitern sowie bei meinen studentischen Mitarbeitern für die außerordentlich gute und erfolgreiche Zusammenarbeit. Dieser Dank geht insbesondere an Daniel Pajonk, Vishnu Ganesh und Venkata Vamshi Krishna Potluri.

Sehr herzlich und ganz persönlich möchte ich mich bei meinen Eltern, Annette und Wolfgang, bedanken, die mir meinen schulischen und beruflichen Werdegang ermöglicht haben und deren Unterstützung ich mir zu jeder Zeit sicher sein kann. Auch meinem Bruder Fabian und seiner Frau Anna-Lena danke ich für das Interesse und die motivierenden Worte. Ich bedanke mich außerdem bei allen Freunden und Familienmitgliedern, die mir während der Anfertigung dieser Arbeit zur Seite standen und die mich mit positivem Zuspruch ermutigt haben. Besonders bedanken möchte ich mich an dieser Stelle bei meinem guten Freund Sven Lempaszak für die intensiven und regelmäßigen Gespräche, insbesondere in den vergangenen Jahren.

Von ganzem Herzen gilt mein größter Dank nicht zuletzt meiner Frau Sarah, die stets hinter mir gestanden hat. Ihr mentaler Rückhalt, ihre Geduld und ihr Organisationstalent haben das Verfassen dieser Arbeit ermöglicht. Sie und unsere Kinder waren stets Antrieb und Motivation für mich.

Dortmund, im Februar 2019

CHRISTOPH DAHNKE

Für Charlotte und Emil.

Für Sarah.

Für meine Eltern.

Kurzzusammenfassung

Gegenüber konventionellen Metallen besitzen Formgedächtnislegierungen besondere Eigenschaften wie Formgedächtniseffekt, Superelastizität oder ein hohes Dämpfungsvermögen. Diese machen sie insbesondere für Anwendungen im Bereich Aktorik und Sensorik interessant. Auch im Verbund, insbesondere mit Leichtbauwerkstoffen wie Aluminium oder Magnesium, zeigen Formgedächtnislegierungen ein hohes Potenzial. Sogenannte Formgedächtnis-Metall-Matrix-Verbundwerkstoffe zeichnen sich insbesondere durch eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften aus. Hierzu gehört neben der Verbesserung der Festigkeit und Steifigkeit eine gezielte Beeinflussung der thermischen Ausdehnung sowie die Unterdrückung von Rissentstehung und Rissausbreitung. Aufgrund der schwierigen Herstellbarkeit infolge meist hoher Prozesstemperaturen wurde die Realisierung einer Aktuatorfunktion jedoch bislang kaum untersucht.

Das kontinuierliche Verbundstrangpressen stellt eine für die Herstellung von Formgedächtnis-Metall-Matrix-Verbundwerkstoffen neue Fertigungstechnologie dar. Das Verfahren bietet eine flexible und wirtschaftliche Möglichkeit zur Herstellung von Verbundprofilen mit eingebetteten Formgedächtnis-Drähten. Durch eine gezielte Positionierung sowie eine umformtechnische Weiterverarbeitung der gepressten Profile ist das Ziel dieser Arbeit die Herstellung von adaptiven Leichtbauprofilen. Die Profile sollen dabei, in Abhängigkeit der gewählten Prozessroute sowie einer thermischen Aktivierung, in der Lage sein eine rein elastische Auslenkung zu vollziehen oder mit einer Änderung ihrer mechanischen Eigenschaften auf eine Erhöhung der Umgebungstemperatur zu reagieren. Die zu erzielenden Effekte basieren auf der gezielten Einbringung von Druckspannungen in die Aluminium-Matrix, welche durch die eingebetteten Formgedächtnis-Drähte hervorgerufen wird.

Zum Erreichen der genannten Ziele werden sowohl experimentelle als auch analytische und numerische Methoden eingesetzt. Die Ergebnisse zeigen, dass aufgrund des hohen Drucks bei gleichzeitig hoher Temperatur während der Fertigung eine stoffschlüssige Verbindung zwischen den Verbundpartnern erzeugt werden kann. Diese ist in der Lage, die durch die Drähte erzeugte Spannung auf die Matrix zu übertragen. Durch eine exzentrische Positionierung der Drähte kann dadurch innerhalb der vorgedehnten Verbundprofile ein Biegemoment erzeugt werden. Die Höhe des angreifenden Biegemoments wird insbesondere durch die Höhe der angreifenden Aktivierungsspannungen des Drahtes definiert. Diese wiederum unterliegt zahlreichen thermomechanischen Einflussfaktoren entlang der betrachteten Prozesskette. Unter Berücksichtigung dieser Einflüsse kann das Verhalten der gefertigten Biegeaktuatoren mithilfe der in dieser Arbeit entwickelten analytischen sowie numerischen Methoden hinreichend genau vorhergesagt werden. Die angewendeten Methoden sind damit auch für die Auslegung von adaptiven Verbundprofilen geeignet.

Abstract

Shape memory alloys possess extraordinary properties like the shape memory effect, superelasticity, and high damping capacity. Due to these properties they are particularly interesting for actuator or sensing applications. Furthermore, they also show a high potential when they are used in a composite material, especially in combination with aluminum or magnesium. Shape memory alloy metal matrix composites are mostly characterized by improved mechanical properties like increased strength or stiffness. They can also provide a targeted influence of the thermal expansion as well as crack propagation. However, an actuator functionality is only barely investigated, especially due to the difficult manufacturability.

In this regard, continuous composite extrusion offers a new possibility for the manufacturing of shape memory alloy metal matrix composites. Profiles with embedded shape memory alloy wires can be produced with a high flexibility regarding the profile geometry as well as position and number of the elements used. Due to a targeted positioning of the wires as well as a subsequent stretching process, the aim of this work is the manufacturing of adaptable lightweight profiles. In dependence of the way of processing, the profiles should provide a repeatable pure elastic deflection when they are thermally activated or should change their mechanical properties as a result of the increased temperature. In both cases, the principle mechanism behind these effects is the induction of compressive stresses into the matrix material, caused by the suppressed shape memory effect of the embedded wires.

To achieve the mentioned objectives, experimental, analytical as well as numerical methods are used. The results show that a metallurgical bond between both materials occurs due to the high pressure and temperature during the manufacturing process. The high bonding quality allows the transmission of the occurring stresses during the further processing as well as the thermal activation. In combination with an eccentric positioning of the wires, the occurring stresses lead to the generation of a bending moment within the prestrained composite profiles. Here, the amount of the applied bending moment depends especially on the amount of the activation stress of the embedded wires. This stress is influenced by various factors along the considered process chain. However, under consideration of these influencing factors, the behavior of the manufactured bending actuators can be predicted by the analytical and numerical methods developed in this work. Therefore, the applied methods are also suitable for the targeted design of adaptable composite profiles.

Vorabveröffentlichung von Inhalten

Mit Zustimmung des Vorsitzenden des Promotionsausschusses wurden Ergebnisse der vorliegenden Arbeit bereits vorab in nachfolgend aufgeführter Form veröffentlicht:

- Dahnke, C., Lorch, Y., Haase, M., Ben Khalifa, N., Tekkaya, A. E., 2016. Manufacturing of Shape Memory Metal Matrix Composites (SM-MMCs) by Composite Extrusion. 11th International Aluminum Extrusion Technology Seminar and Exposition, 02.-06.05.2016, Chicago, USA, S. 571-581.
- Dahnke, C., Shapovalov, A., Tekkaya, A. E., 2017. Thermally activated lightweight actuator based on hot extruded shape memory metal matrix composites (SMA-MMC). In: Procedia Engineering 207: 12th International Conference on Technology of Plasticity, Cambridge, United Kingdom, S. 1511-1516. doi: 10.1016/j.pro-eng.2017.10.1083
- Dahnke, C., Tekkaya, A. E., 2018. Influence of the manufacturing process on hot extruded shape memory alloy metal matrix composites. Proceedings of the ASME 2018 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems (SMASIS2018), September 10-12, 2018, San Antonio, USA. doi: 10.1115/SMASIS2018-7934
- Dahnke, C., Reeb, A., Pottmeyer, F., Weidenmann, K. A., Tekkaya, A. E., 2019. Thermomechanical behavior of shape memory alloy metal matrix composite actuator manufactured by composite extrusion. Smart Materials and Structures. (akzeptiert am 03.01.2019)
- Reeb, A., Dahnke, C., Ben Khalifa, N., Tekkaya, A. E., Weidenmann, K. A., 2019. Influence of heat treatment and processing on the mechanical properties of a NiTi-Al matrix composite manufactured via composite extrusion. Production Engineering. (akzeptiert am 10.01.2019)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Kenntnisse	3
2.1	Kontinuierliches Verbundstrangpressen	3
2.1.1	Verfahrenscharakteristika des Verbundstrangpressens	3
2.1.2	Untersuchungen zur Prozessstabilität.....	6
2.1.3	Herstellbare Profilgeometrien und Prozessgrenzen	10
2.1.4	Eigenschaften stahlverstärkter Verbundprofile	13
2.2	Formgedächtnislegierungen	16
2.2.1	Grundlagen der Formgedächtniseigenschaften	16
2.2.2	Spannungs-Dehnungsverhalten	18
2.2.3	Nutzbare Effekte.....	21
2.2.4	Einflüsse auf die Formgedächtniseigenschaften	25
2.3	Formgedächtnis-Verbundwerkstoffe	33
2.3.1	Werkstoffpaarungen und Eigenschaften	34
2.3.2	Formgedächtnis-Metall-Matrix-Verbundwerkstoffe.....	36
2.4	Anwendungsmöglichkeiten von Formgedächtnislegierungen	43
2.4.1	Aktuelle Einsatzgebiete	43
2.4.2	Potenzial stranggepresster Verbundaktuatoren	45
2.5	Fazit.....	47
3	Zielsetzung und Vorgehensweise	49
4	Wirkungsweise und theoretische Betrachtungen	51
4.1	Nutzbarkeit FGL-induzierter Druckspannungen	51
4.2	Wirkprinzip verbundstranggepresster Biegeaktuatoren.....	54
4.3	Theoretische Betrachtungen.....	57
4.3.1	Auftretende Spannungen	57
4.3.2	Resultierende Krümmung bei exzentrischer Einbettung.....	62
4.4	Fazit.....	66
5	Herstellung von Biegeaktuatoren mittels Strangpressen	67
5.1	Verbundstrangpressen	67
5.1.1	Strangpresswerkzeug.....	67
5.1.2	Untersuchungen zur außermittigen Einbettung.....	69
5.2	Charakterisierung der verwendeten NiTi-Legierung	71
5.2.1	Temperaturabhängiges Spannungs-Dehnungs-Verhalten	72
5.2.2	Umwandlungstemperaturen in Abhängigkeit der Spannung	73
5.3	Einflüsse auf die thermomechanischen Eigenschaften der NiTi-Drähte	74
5.3.1	Prozesstemperatur und Wärmebehandlung	74

5.3.2	Vordehnung und Aktivierungstemperatur.....	75
5.4	Herstellung und experimentelle Erprobung eines Biegeaktuators.....	78
5.4.1	Herstellung und Weiterverarbeitung der Verbundprofile	78
5.4.2	Thermische Aktivierung.....	80
5.5	Fazit.....	86
6	Eigenschaften verbundstranggepresster Biegeaktuatoren	87
6.1	Ermittlung und Analyse von Einflussfaktoren.....	87
6.1.1	Einflüsse durch Weiterverarbeitung und Aktivierung	87
6.1.2	Einflüsse durch konstruktive Gestaltung und Fertigung.....	89
6.1.3	Erkenntnisse aus den Untersuchungen der Einflussfaktoren	97
6.2	Analytische Beschreibung der resultierenden Krümmung	98
6.2.1	Ermittlung der Eigenspannungen nach dem Recken.....	99
6.2.2	Ermittlung der temperaturabhängigen Aktivierungskraft	100
6.2.3	Analytische Vorhersage der elastischen Krümmung	102
6.3	Untersuchung der Grenzschichteigenschaften	105
6.4	Fazit.....	114
7	Numerische Analyse und Aktuatordesign	115
7.1	Modellierung der Formgedächtniseigenschaften	115
7.1.1	Werkstoffmodell.....	115
7.1.2	Verhalten im einachsigen Zugversuch	119
7.2	Numerische Analyse der Verbundaktuatoren	120
7.2.1	Aufbau des FE-Modells.....	120
7.2.2	Simulation der Auslenkung.....	123
7.2.3	Analyse der auftretenden Spannungen	127
7.3	Übertragbarkeit der Parameter	135
7.4	Auslegung eines Demonstrators.....	139
7.5	Fazit.....	145
8	Mechanische Eigenschaften bei erhöhter Temperatur	147
8.1	Zugversuch	147
8.2	3-Punkt-Biegeversuch.....	152
8.3	Kerbschlagbiegeversuch	155
8.4	Fazit.....	158
9	Zusammenfassung und Ausblick	159
	Literaturverzeichnis	163
	Anhang A	177

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Beschreibung
A	-	Reziproker Dehnratenfaktor
\bar{A}	mm ²	Ideelle Querschnittsfläche
A_0	mm ²	Querschnittsfläche des Blocks
a_{AT}	mm	Auslenkung des Biegeaktuators bei Aktivierungstemperatur
a_{el}	mm	Reversible, elastische Auslenkung des Biegeaktuators
a_{el+pl}	mm	Elastisch-plastische Auslenkung des Biegeaktuators
A_f	°C	Austenit-Finish-Temperatur
A_{FGL}	mm ²	Querschnittsfläche des Formgedächtniselementes
A_{Matrix}	mm ²	Querschnittsfläche der Matrix
A_{neg}	mm ²	Auf das Biegemoment negativ wirkende Fläche
A_P	mm ²	Querschnittsfläche des Profils
A_p	°C	Temperatur am Punkt des höchsten Wärmeflusses bei der Rückwärtstransformation
a_{pl}	mm	Irreversible, plastische Auslenkung des Biegeaktuators
A_{pos}	mm ²	Auf das Biegemoment positiv wirkende Fläche
a_{RT}	mm	Auslenkung des Biegeaktuators nach Abkühlung auf Raumtemperatur
A_s	°C	Austenit-Start-Temperatur
A_t	%	Dehnung bei Bruch
A_{VE}	mm ²	Querschnittsfläche des Verstärkungselementes
b	mm	Probenbreite
d_{VE}	mm	Durchmesser der Drahtverstärkung
e	mm	Exzentrizität des Drahtes

Zeichen	Einheit	Beschreibung
E_{FGL}	MPa	Elastizitätsmodul der FGL
$\overline{E I}$	Nmm ²	Ideelle Biegesteifigkeit
EI	Nmm ²	Biegesteifigkeit eines Balkens
E_{Matrix}	MPa	Elastizitätsmodul der Matrix
e_{ZB}	mm	Exzentrizität der Zuführbohrung
F_{Draht}	N	Vereinfachte, punktförmig angreifende Kraft des FGL-Drahtes
F_{DZ}	N	Durchzugskraft
F_{FGL}	N	Resultierende Kraft im Formgedächtniselement
F_{G}	N	Gewichtskraft
f_{G}	-	Gewichtungsfaktor für die Aktivierungskraft F_{Draht}
F_{Matrix}	N	Resultierende Kraft in der Matrix
F_{Verbund}	N	Resultierende Kraft im Verbund
$F_{\text{VF;init}}$	N	Für die Verbundfestigkeit maßgebliche Push-Out-Kraft
F_{Zug}	N	Zugkraft
h	mm	Probenhöhe
\bar{I}	mm ⁴	Ideelles Flächenträgheitsmoment
I_{FGL}	mm ⁴	Flächenträgheitsmoment des FGL-Drahtes
I_{Matrix}	mm ⁴	Flächenträgheitsmoment der Matrix
I_y	mm ⁴	Flächenträgheitsmoment in Bezug auf die y-Achse
k	MPa	Schubfließgrenze
k_{f}	MPa	Fließspannung
$k_{\text{f, FGL}}$	MPa	Fließspannung der FGL
$k_{\text{f, Matrix}}$	MPa	Fließspannung der Matrix

Zeichen	Einheit	Beschreibung
k_y	MPa	Schubfließspannung
l_{Mess}	mm	Messlänge
l_{Probe}	mm	Probenlänge
l_{VZ}	mm	Länge der Verbundentstehungszone
m	-	Reibkoeffizient des Tresca-Reibmodells
M	kg	Masse
M_B	Nmm	Biegemoment
M_d	°C	Grenztemperatur zur spannungsinduzierten Martensitbildung
M_f	°C	Martensit-Finish-Temperatur
M_p	°C	Temperatur am Punkt des höchsten Wärmeflusses bei der Vorwärtstransformation
M_s	°C	Martensit-Start-Temperatur
n	-	Verfestigungsexponent
p_{LPN}	MPa	Kontaktdruck innerhalb der Schweißkammer
Q	J·mol ⁻¹	Aktivierungsenergie
R	J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹	Universelle Gaskonstante
r	mm	Radius
r_{AT}	mm	Krümmungsradius des Biegeaktuators bei Aktivierungstemperatur
R_f	°C	Finish-Temperatur der R-Phase
R_m	MPa	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	MPa	0,2 %-Dehngrenze
r_{pl}	mm	Irreversibler plastischer Krümmungsradius des Biegeaktuators
R_s	°C	Start-Temperatur der R-Phase

Zeichen	Einheit	Beschreibung
r_{VE}	mm	Radius des Verstärkungselementes
S	-	Geometrischer Schwerpunkt des Verbundquerschnittes
S_{FGL}	-	Schwerpunkt des FGL-Drahtes
S_{id}	-	Ideeller Schwerpunkt des Verbundquerschnittes
S_{Matrix}	-	Schwerpunkt der Matrix
T	°C	Temperatur
T_{AT}	°C	Aktivierungstemperatur
T_H	°C	Thermische Hysterese
U_{VE}	mm	Umfang des Verstärkungselementes
V	-	Pressverhältnis
v_{Al}	mm/s	Fließgeschwindigkeit des Aluminiums
VE_{Vol}	-	Verstärkungsanteil
V_p	-	Bezogene Profildicke
v_P	m/min	Profilgeschwindigkeit
v_{Puller}	mm/s	Verfahrensgeschwindigkeit des Pullers
v_{St}	mm/s	Stempelgeschwindigkeit
v_{VE}	m/min	Geschwindigkeit des Verstärkungselementes
z_e	mm	Abstand zwischen ideellem Flächenschwerpunkt und geometrischem Flächenschwerpunkt
z_{max}	mm	Maximaler Abstand der Randfaser von der neutralen Faser
\bar{z}_{Matrix}	mm	Abstand zwischen ideellem Flächenschwerpunkt des Verbundes und Flächenschwerpunkt der Matrix
\bar{z}_{FGL}	mm	Abstand zwischen ideellem Flächenschwerpunkt des Verbundes und Flächenschwerpunkt des FGL-Drahtes
α	K ⁻¹	Längenausdehnungskoeffizient

Zeichen	Einheit	Beschreibung
α_{\sinh}	-	Koeffizient der sinushyperbolischen Materialbeschreibung
ε	-	Technische Dehnung
ε_0	-	Verbleibende Dehnung nach Entlastung im Verbund
$\varepsilon_0, \text{FGL}$	-	Verbleibende Dehnung nach Entlastung im Formgedächtniselement
$\varepsilon_0, \text{Matrix}$	-	Verbleibende Dehnung nach Entlastung in der Matrix
$\varepsilon_{\text{pseudoel.}}$	-	Pseudoelastische Dehnung
$\varepsilon_{\text{pseudopl.}}$	-	Pseudoplastische Dehnung
ε_{Vor}	-	Vordehnung
ϑ	°C	Temperatur
κ	mm ⁻¹	Krümmung
κ_{AT}	mm ⁻¹	Krümmung des Biegeaktuators bei Aktivierungstemperatur
κ_{pl}	mm ⁻¹	Irreversible plastische Krümmung des Biegeaktuators
$\dot{\varphi}$	s ⁻¹	Umformgeschwindigkeit
σ	MPa	Technische Spannung
$\bar{\sigma}$	MPa	Ideelle Spannung
σ_{f}	MPa	Grenzspannung – Vollständige Entzwilligung des Martensits einer FGL
σ_{FGL}	MPa	Resultierende Spannung im Formgedächtniselement
σ_{Matrix}	MPa	Resultierende Spannung in der Matrix
σ_{max}	MPa	Maximale Spannung innerhalb der Verbundprobe
σ_{mech}	MPa	FGL - mechanisch induzierte Spannung
σ^{Ms}	MPa	Grenzspannung – Start der mechanisch induzierten Phasenumwandlung

Zeichen	Einheit	Beschreibung
σ_s	MPa	Grenzspannung – Start der Martensit Entzwillung einer FGL
σ_{therm}	MPa	FGL - thermisch induzierte Spannung
σ_{Vor}	MPa	Spannung bei ε_{Vor}
$\sigma_{\text{zz,VE}}$	MPa	Zugspannung im Verstärkungselement
τ_{R}	MPa	Reibschubspannung
τ_{VF}	MPa	Verbundfestigkeit

Indizes

Index	Beschreibung
0	Initialwert
Al	Aluminium
AT	Aktivierungstemperatur
B	Biegung
e	Exzentrizität
el	Elastischer Anteil
f	Finish
FGL	Formgedächtnislegierung
G	Gewicht
G	Gewichtet
H	Hysterese
id	Ideell
Matrix	Matrix
max	Maximal
mech	Mechanisch
Ms	Martensit-Start
neg	Negativ
P	Profil
p	Peak
pl	Plastischer Anteil
pos	Positiv
pseudopl	Pseudoplastisch
R	Reib
RT	Raumtemperatur
s	Start

St	Stempel
therm	Thermisch
VE	Verstärkungselement
VF	Verbundfestigkeit
Vor	Vordehnung
VZ	Verbundentstehungszone
ZB	Zuführbohrung
zz	Richtung im Koordinatensystem

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
At.-%	Atomprozent
AZ31	Magnesiumlegierung
DSC	Differential scanning calorimetry
EDX	Energy dispersive X-ray spectroscopy
EN AW-6060	Aluminiumlegierung
EN AW-6082	Aluminiumlegierung
FEM	Finite-Elemente-Methode
FG	Formgedächtnis
FGL	Formgedächtnislegierung
Gew.-%	Gewichtsprozent
KOS	Koordinatensystem
LPN	Längspressnaht
REM	Rasterelektronenmikroskopie
TEM	Transmissionselektronenmikroskopie
VE	Verstärkungselement
X10CrNi18-8	Stahllegierung