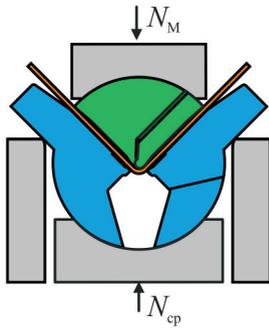


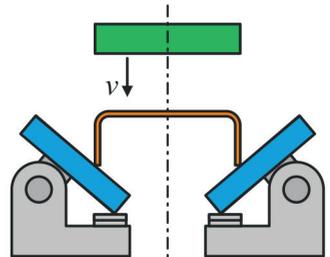
Rickmer Meya

Schädigungskontrolliertes Blechbiegen mittels Druckspannungsüberlagerung

Biegen mit radialer Spannungsüberlagerung

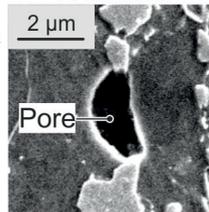


Verbesserte Leistungsfähigkeit



Einstellung der Triaxialität

Schädigungsreduktion



Analyse der Bauteileigenschaften

Schädigungskontrolliertes Blechbiegen mittels Druckspannungsüberlagerung

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

der Fakultät Maschinenbau
der Technischen Universität Dortmund
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Rickmer Meya M. Sc.

aus

Münster

Dortmund, 2020

Vorsitzender der Prüfungskommission: AR Priv.-Doz. Dr.-Ing. Jobst Bickendorf
Berichter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. A. Erman Tekkaya
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk
Prof. Dr.-Ing. Jörn Mosler
Tag der mündlichen Prüfung: 14. Mai 2020

Dortmunder Umformtechnik

Band 108

Rickmer Meya

**Schädigungskontrolliertes Blechbiegen
mittels Druckspannungsüberlagerung**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Düren 2020

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., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7510-6

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

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Umformtechnik und Leichtbau (IUL) der Technischen Universität Dortmund. Wesentliche Ergebnisse dieser Arbeit wurden im Rahmen des durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft geförderten Sonderforschungsbereiches TRR188, insbesondere im Teilprojekt A05, erzielt. An dieser Stelle möchte ich den zahlreichen Personen, die mich bei dieser Arbeit sowohl fachlich als auch menschlich unterstützt haben, herzlich danken.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. A. Erman Tekkaya, der mir diese Promotion ermöglicht hat. Sein umfassendes Wissen in der Umformtechnik, das kritische Hinterfragen und die stets konstruktiven Hinweise waren ein wichtiger Baustein für das Gelingen dieser Arbeit. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk von der TU München für die Übernahme des Koreferats. Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörn Mosler und Herrn AR Priv.-Doz. Dr.-Ing. Jobst Bickendorf danke ich für die Mitwirkung in der Prüfungskommission. Ferner möchte ich mich bei der gesamten Prüfungskommission bedanken, dass die Prüfung trotz der Corona-Pandemie stattfinden konnte.

Zudem bedanke ich mich bei allen Projektpartnerinnen und -partner innerhalb des TRR188 für die Unterstützung und die vielen hilfreichen Diskussionen rund um die Dissertation. Besonders erwähnen möchte ich an dieser Stelle Carl Kusche, Anthony Dunlap und Kerstin Möhring. Darüber hinaus bedanke ich mich bei Herrn Michael Breitwieser der Firma IMETER/MSB Breitwieser Messsysteme für die Unterstützung bei der hochpräzisen Dichtemessung.

Ferner danke ich allen derzeitigen und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am Institut für Umformtechnik und Leichtbau für die stets angenehme Atmosphäre und die abteilungsübergreifende Hilfsbereitschaft. Besonders bedanken möchte ich mich bei Dr.-Ing. Christian Löbbe und Oliver Hering für die konstruktiven Diskussionen und Kommentare zur Dissertation. Ferner gilt mein Dank Juri Martschin für die gewissenhafte Durchsicht der Arbeit. Weiterhin bin ich dankbar für das Verständnis der Abteilung Profil- und Blechumformung, die mir in der letzten Phase der Promotion den Rücken freigehalten hat. Weiterhin möchte ich mich beim gesamten technischen Personal für die stetige Unterstützung bedanken. Besonders hervorheben möchte ich Dirk Hoffmann und Werner Feurer für die Unterstützung im experimentellen Bereich. Weiterhin danke ich Jeanette Brandt und Nina Hänisch für ihre Unterstützung bei jeglichen organisatorischen Fragen innerhalb des Instituts. Bei Frau Beate Ulm-Brandt bedanke ich mich recht herzlich für die sprachliche Korrektur dieser Arbeit.

Außerdem bedanke ich mich bei allen Projekt-, Bachelor- und Masterarbeitern sowie bei meinen studentischen Hilfskräften für die außerordentlich gute und erfolgreiche Zusammenarbeit. Dieser Dank geht insbesondere an Nicolas Triebert und Gerrit Bosse.

Ganz besonders möchte ich mich bei meinen Eltern Birgit und Hans bedanken, die mir meinen akademischen Werdegang ermöglicht haben und mich in allen Belangen des Lebens bedingungslos unterstützen. Insbesondere möchte ich meinem Vater für die fachliche Unterstützung und Diskussion rund um diese Arbeit danken. Außerdem möchte ich meinen Großeltern Cäcilia und Erich großen Dank aussprechen, die diesen Schritt der akademischen Laufbahn leider nicht mehr erleben können, aber die wesentlichen Grundsteine dafür gelegt haben. Darüber hinaus gilt mein besonderer Dank meiner Partnerin Marie, die mir jederzeit während der Erstellung der Arbeit verständnisvoll zur Seite stand und mich in vielfältiger Weise unterstützt hat.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Marie', written in a cursive style.

Werne, im Juni 2020

Abstract

In the current product design of bent sheet metal components, often only the properties of the virgin material are included. In some cases, the deformation-induced strain hardening and residual stresses are also taken into account. Damage induced by the forming process is not considered. The process of damage is defined as the nucleation, growth and coalescence of voids. As a result of the unknown influence of damage on the product performance, the manufactured components are often oversized. This uncertainty is compensated by enlarged safety factors that increase the primary and secondary energy used. Therefore, this work shows for the first time, which influence damage has on the performance of bent components.

It is shown, that in the case of air bending conventional process parameters are not influencing the load path while maintaining the equivalent plastic strain. To influence damage, the load path must be changed during plastic deformation. For this purpose, a stress superposition is necessary. Since the conventional processes with stress superposition, such as elastomer bending, are not able to apply predictable compressive stresses, a new bending process is developed. The so-called bending with radial stress superposition can apply adjustable stress superposition during the process. The new process is described with an analytical model and examined by the FEM. The stress superposition leads to up to 50 % reduced void area fractions while maintaining the geometry of the product. The density reduction, as a measure of the volumetric damage, is also significantly decreased by the counter pressure.

New test methods are being developed to test the bent components for the corresponding applications. The effects acting on the performance in addition to the damage are separated. By manufacturing geometrically identical components, strain hardening can be neglected as the cause of increased performance. The residual stresses and the roughness remain almost constant. The component damage is thus the cause of up to 19 % reduction in energy consumption in impact tests. Damage control can increase the energy consumption of safety-relevant components such as crash boxes. Furthermore, a component with less damage is stiffer, which is particularly relevant for the design of springs and carriers. The effect of damage is even increased at low temperatures because of notch effects. Due to the known influences of damage on the performance, it can already be included in the product design process as a product property.

Kurzzusammenfassung

Bei der derzeitigen Produktauslegung gebogener Bauteile werden häufig nur die Eigenschaften des Ausgangsmaterials einbezogen. In einigen Fällen werden zudem die umformtechnisch induzierten Verfestigungen und Eigenspannungen berücksichtigt. Die durch den Umformvorgang eingebrachte Schädigung wird nicht betrachtet. Der Prozess der Schädigung wird in dieser Arbeit als Porennukleation, -wachstum und -zusammenschluss definiert. Da der negative Einfluss der Schädigung auf die Leistungsfähigkeit unbekannt ist, werden Bauteile häufig überdimensioniert. Diese Unkenntnis wird über erhöhte Sicherheitsfaktoren kompensiert, die die genutzte Primär- und Sekundärenergie unnötig vergrößern. Daher wird in dieser Arbeit erstmals dargestellt, inwiefern die Schädigung beim Biegen eingestellt werden kann und welchen Einfluss die Schädigung auf die Leistungsfähigkeit gebogener Bauteile hat.

Es wird gezeigt, dass beim Freibiegen über konventionelle Prozessparameter keine Beeinflussung des Lastpfades bei gleichem Umformgrad möglich ist. Zur Beeinflussung der Schädigung muss der Lastpfad während der plastischen Umformung verändert werden. Dazu ist zwingend eine Spannungsüberlagerung notwendig. Da die konventionellen Prozesse mit Spannungsüberlagerung, wie das Elastomerbiegen, nicht in der Lage sind, kontrolliert Druckspannungen aufzubringen, wird ein neues Biegeverfahren entwickelt. Das sogenannte Biegen mit radialer Spannungsüberlagerung kann während des Prozesses einstellbare Druckspannungen aufbringen. Der neue Prozess wird anhand eines analytischen Modells ausgelegt und mittels der FEM untersucht. Die zusätzliche Spannungsüberlagerung führt bei identischem Umformgrad zu bis zu 50 % reduzierten Porenflächen. Die Dichtereduktion, ein Maß für die volumetrische Schädigung, wird ebenfalls durch die niedrigere Triaxialität deutlich verringert.

Zur Prüfung bereits gebogener Bauteile werden neue Testverfahren für die entsprechenden Einsatzfälle von Biegeteilen entwickelt. Anhand dieser wird der Einfluss der Schädigung auf das Bauteilverhalten bewertet. Die neben der Schädigung auf die Leistungsfähigkeit wirkenden Effekte werden separiert. Durch die Fertigung geometrisch identischer Bauteile kann die Verfestigung als Ursache erhöhter Leistungsfähigkeiten ausgeschlossen werden. Die Eigenspannungen und die Rauheit bleiben nahezu konstant und sind daher vernachlässigbar. Die Bauteilschädigung ist somit die Ursache für eine bis zu 19 % verringerte Energieaufnahme im Schlagversuch. Durch die Schädigungskontrolle kann die Energieaufnahme von sicherheitsrelevanten Bauteilen, wie Crashboxen, erhöht werden. Ferner ist ein Bauteil mit geringerer Schädigung steifer, was insbesondere bei der Auslegung von Federn und Trägern relevant ist. Der Einfluss der Schädigung ist bei niedrigen Temperaturen aufgrund der Kerbwirkungen erhöht. Durch die bekannten Einflüsse auf die Leistungsfähigkeit kann die Schädigung bereits im Entwicklungsprozess als Produkteigenschaft miteinbezogen werden.

Inhaltsverzeichnis

Vorabveröffentlichung von Inhalten	iii
Formelzeichen und Abkürzungen	v
1 Einleitung	1
2 Stand der Kenntnisse	3
2.1 Blechbiegen.....	3
2.1.1 Grundlagen des Biegens.....	3
2.1.2 Elementare Biegetheorie.....	4
2.1.3 Mechanische Eigenschaften.....	9
2.1.4 Auslegung von Biegeteilen.....	11
2.1.5 Versagen von Biegeteilen.....	12
2.2 Duktile Schädigung.....	15
2.2.1 Schädigungsentstehung und –entwicklung.....	15
2.2.2 Spannungszustandsabhängige Schädigungsentwicklung.....	19
2.2.3 Schädigungscharakterisierung.....	24
2.2.4 Einfluss der Schädigung auf die Bauteileigenschaften.....	28
2.3 Blechbiegeverfahren mit Drucküberlagerung.....	28
2.3.1 Dreiwalzenrunden mit zusätzlicher Walze.....	29
2.3.2 Elastomerbiegen.....	29
2.3.3 Dreipunktbiegen.....	31
2.3.4 Biegen mit inkrementeller Spannungsüberlagerung.....	31
2.3.5 Hydromechanisches Tiefziehen.....	32
2.4 Fazit.....	33
3 Zielsetzung	35
4 Lastpfadbeeinflussung beim Biegen	37
4.1 Einfluss der Prozessparameter auf den Lastpfad.....	37
4.2 Spannungsüberlagerungen beim Blechbiegen.....	44
4.2.1 Reine hydrostatische Spannungsüberlagerung.....	44
4.2.2 Tangentiale Spannungsüberlagerung.....	45
4.2.3 Axiale Spannungsüberlagerung.....	49
4.2.4 Radiale Spannungsüberlagerung.....	51
4.3 Fazit.....	61
5 Biegetechnologie mit gezielter radialer Spannungsüberlagerung	63
5.1 Anforderungen an die Werkzeugtechnologie.....	63
5.2 Werkzeugkonzept.....	63
5.3 Prozesscharakteristika.....	67
5.4 Technologische Umsetzung.....	69
5.5 Ermittlung der wirkenden Kräfte und Momente.....	74
5.6 Verwendete Versuchs- und Messaufbauten.....	80

5.7	Fazit.....	84
6	Prozessanalyse des Biegens mit radialer Spannungsüberlagerung	85
6.1	Analytische Modellierung des Spannungszustandes	85
6.1.1	Annahmen.....	85
6.1.2	Analytisches Modell zur Spannungs- und Dehnungsvorhersage.....	86
6.2	Numerische Beschreibung der Lastpfade	90
6.2.1	Aufbau des Simulationsmodells.....	90
6.2.2	Vorhersage des Spannungszustandes in Abhängigkeit vom Gegendruck ..	93
6.2.3	Untersuchung der Dehn- und Lastpfade.....	96
6.3	Fazit.....	101
7	Lastpfadeinfluss auf die Schädigungsentwicklung	103
7.1	Methoden zur Schädigungscharakterisierung	103
7.1.1	Mikroskopische Untersuchungen	103
7.1.2	Dichtemessung	110
7.2	Schädigungsentwicklung bei Grundversuchen	114
7.2.1	Zugversuche	114
7.2.2	Torsionsversuche.....	117
7.3	Schädigungsentwicklung in gebogenen Bauteilen.....	118
7.3.1	Hoefnagels-Tasan-Methode	120
7.3.2	Rasterelektronenmikroskopie.....	121
7.3.3	Dichte	124
7.4	Fazit.....	126
8	Einfluss der Schädigung auf das Bauteilverhalten	127
8.1	Separation der Effekte.....	127
8.2	Steifigkeit von gebogenen Bauteilen	134
8.3	Ermüdungsfestigkeit	136
8.4	Statisches Weiterbiegen	137
8.5	Crashverhalten.....	138
8.6	Kerbschlagarbeit	141
8.7	Übertragbarkeit auf Aluminium.....	145
8.8	Fazit.....	147
9	Nutzen für die Industrie und Ausblick	149
	Literaturverzeichnis	159
	Anhang – Kapitel 4	171
	Anhang – Kapitel 5	172
	Anhang – Kapitel 7	176
	Anhang – Kapitel 8	177
	Lebenslauf	179

Vorabveröffentlichung von Inhalten

Nachfolgend sind die Veröffentlichungen aufgeführt, die im Rahmen dieser Dissertation entstanden sind. Die Vorabveröffentlichung der Forschungsergebnisse erfolgte mit Zustimmung des Promotionsausschusses.

- Meya, R., Tekkaya, A.E., 2016. Vorrichtung und Verfahren zum ebenen oder räumlichen Biegen von Profilen durch einen Walzvorgang. DE 10 2016 013 672.3, Patent.
- Meya, R., Löbbe, C., Hering, O., Tekkaya, A.E., 2017a. New bending process with superposition of radial stresses for damage control, in: Proceedings of the Forming Technology Forum. Enschede.
- Meya, R., Löbbe, C., Tekkaya, A.E., 2017c. Vorrichtung zum Blechbiegen mittels gezielter Druckspannungsüberlagerung. DE 10 2017 006 218.8, Patent.
- Meya, R., Löbbe, C., Tekkaya, A.E., 2018. Stress State Control by a Novel Bending Process and its Effect on Damage Evolution, in: Volume 2: Materials; Joint MSEC-NAMRC-Manufacturing USA. American Society of Mechanical Engineers, College Station, Texas.
- Meya, R., Kusche, C., Löbbe, C., Al-Samman, T., Korte-Kerzel, S., Tekkaya, A.E., 2019a. Global and high-resolution damage quantification in dual-phase steel bending samples with varying stress states. *Metals* 9 (3), S. 319.
- Meya, R., Löbbe, C., Tekkaya, A.E., 2019b. Stress state analysis of radial stress superposed bending. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 20 (1), S. 53–66.
- Meya, R., Löbbe, C., Tekkaya, A.E., 2019c. Stress state control by a novel bending process and its effect on damage evolution and product performance. *International Journal of Manufacturing Science and Engineering* 141 (10)
- Münstermann, S., Sparrer, Y., Yao, Y., Lian, J., Meya, R., Clausmeyer, T., Tekkaya, A.E., 2019. Effect of plastic strain and ductile damage on elastic modulus of multiphase steel and its impact on springback prediction, in: Proceedings of 22nd Edition of the International ESAFORM Conference on Material Forming, Vitoria-Gasteiz, Spanien.
- Sprave, L., Schowtjak, A., Meya, R., Clausmeyer, T., Tekkaya, A.E., Menzel, A., 2020. On mesh dependencies in finite-element-based damage prediction: Application to sheet metal bending. *Production Engineering in Druck*.
- Tekkaya, A.E., Ben Khalifa, N., Hering, O., Meya, R., Myslicki, S., Walther, F., 2017. Forming-induced damage and its effects on product properties. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 66 (1), S. 281–284.

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Beschreibung
α	°	Biegewinkel
α_{ax}	°	Durch einachsigen Spannungszustand entstehender Winkel am Rand des Biegeteils
β	°	Hilfswinkel zur Berechnung des idealen Biegewinkels
γ	°	Kontaktwinkel der Kräfte zwischen Lagerschalen und rotierenden Werkzeugen
ε	-	Dehnung
$\dot{\varepsilon}_p^*$	s ⁻¹	Kriechnrate des geschädigten Materials
$\dot{\varepsilon}_p$	s ⁻¹	Kriechnrate des ungeschädigten Materials
ζ	-	Dritte normierte Invariante
λ	-	Nicht-negative reelle Zahl in der Fließregel
κ	mm ⁻¹	Krümmung
η	-	Spannungsmehrsachsigkeit / Triaxialität
μ	-	Reibzahl
σ	MPa	Spannung
σ'_{ij}	MPa	Deviatorischer Spannungsanteil
σ_b	MPa	Tangentiale Biegespannung
σ_h	MPa	Hydrostatische Spannung
σ_{ij}^h	MPa	Hydrostatischer Spannungsanteil
σ_M	MPa	Mittlere Spannung
σ_r	MPa	Radialspannung beim RSS-Biegen
σ_{vM}	MPa	Vergleichsspannung nach von Mises
σ_{zyk}	MPa	Zyklische Spannungsamplitude des ungeschädigten Materials

Zeichen	Einheit	Beschreibung
σ_{zyk}^*	MPa	Zyklische Spannungsamplitude des geschädigten Materials
τ	MPa	Scherspannung
ν	-	Querkontraktionszahl
θ_L	°	Lode-Winkel
$\bar{\theta}$	-	Lode-Winkel-Parameter
φ	-	Umformgrad
φ_m	-	Umformgrad bei der Einschnürung im Zugversuch
φ_{ra}	-	Umformgrad in Biegerichtung am Außenbogen im Zeitpunkt der maximalen Spannungsüberlagerung beim RSS-Biegen
$\dot{\varphi}$	s ⁻¹	Logarithmische Dehnrate
φ_v	-	Vergleichsumformgrad
ρ	g · cm ⁻³	Ausgangsdichte
$\tilde{\rho}$	g · cm ⁻³	Dichte des geschädigten Materials
ρ_v	m/m ³	Versetzungsdichte
ψ	-	Biegeverhältnis
A_p	mm ²	Fläche einer einzelnen Pore
b	mm	Blechbreite
b_h	mm	Nuttiefe
C_{ij}	MPa	Werkstoffparameter des Elastomers
C_g	GPa	Extrapolationsparameter nach Gosh
D	-	Schädigungsvariable
D_A	μm ²	Durchschnittliche Porenfläche
D_M	-	Martensitbruchanteil
D_{MF}	-	Martensit-Ferrit-Ablösungs-Anteil

Zeichen	Einheit	Beschreibung
D_S	-	Porenflächenanteil
d_r	mm	Pressbreite in der Kontaktzone der radialen Spannungsüberlagerung
E	GPa	Elastizitätsmodul des Halbzeuges
E_{kin}	J	Kinetische Energie
E_m	GPa	Mittlerer Elastizitätsmodul der Kontaktpartner
\tilde{E}	GPa	Elastizitätsmodul des geschädigten Bauteils
E_L	-	Grad der Erfüllung bei der Lösungsbewertung
F	N	Kraft
F_i	N	Gewichtskräfte bei der Dichtemessung
F_w	N	Eine durch Werkzeuge aufgebrachte Kraft zur Erreichung einer Funktion in der Funktionsstruktur
F_U	N	Aufgebrachte Kraft beim Anbiegen zur Steifigkeitsbestimmung
f	Hz	Frequenz
f_i	mm	Elastische Durchbiegung im Punkt i
G_L	-	Gewichtsfaktor zur Lösungsbewertung
H	HV	Härte des ungeschädigten Materials
H^*	HV	Härte des geschädigten Materials
h	mm	Stempelweg
h_f	mm	Fallhöhe im Fallturm
h_{HV}	mm	Gesamtbreite bei der Härtemessung
h_p	mm	Probenhöhe
I	mm ⁴	Flächenträgheitsmoment
I_i	-	Spannungsinvarianten
k_f	MPa	Fließspannung

Zeichen	Einheit	Beschreibung
L	-	Lode-Parameter
l	mm	Länge
M_b	Nm	Biegemoment
m	kg	Masse
N	N	Normalkraft
N_b	N	Schematische Normalkraft, die das Biegemoment erzeugt
$N_{b,1}$	N	Normalkraft, die einen Teil des Biegemomentes beim RSS-Biegen auslöst
$N_{b,2}$	N	Normalkraft, die einen Teil des Biegemomentes beim RSS-Biegen auslöst
N_{bs}	N	Kontaktkraft zwischen unterer Lagerschale und rotierendem Werkzeug
N_{cp}	N	Hydraulikkraft, die an der unteren Lagerschale aufgebracht wird
N_d	N	Am Gesenk wirkende Kraft beim RSS-Biegen
N_i	N	Normalkräfte beim RSS-Biegen
N_l	N	Kontaktkraft zwischen oberem Werkzeug und Blech beim RSS-Biegen zur Blechführung
N_M	N	Kraft, die von der Biegemaschine beim RSS-Biegen bereitgestellt wird
N_p	N	Kontakt zwischen oberem Werkzeug und Innenbogen des Biegeteils beim RSS-Biegen
N_r	N	Radialkraft, die auf die Biegezone am Außenbogen beim RSS-Biegen wirkt
N_z	-	Zykluszahl
n	-	Anzahl durchgeführter Versuche
n_g	-	Extrapolationsparameter nach Gosh
p	MPa	Druck

Zeichen	Einheit	Beschreibung
p_g	-	Extrapolationsparameter nach Gosh
p_r	-	Flächenpressung beim RSS-Biegen
R	-	Spannungsverhältnis
R_z	μm	Gemittelte Rautiefe
r	mm	Radius
r_c	mm	Werkzeugradius des unteren rotierenden Werkzeuges im Kontakt mit der Umformzone
r_m	mm	Radius der mittleren Faser
r_{rt}	mm	Radius der unteren Lagerschale
r_{so}	mm	Kontaktradius des oberen Werkzeuges am Innenbogen des zu biegenden Bleches
r_{up}	mm	Radius der oberen Lagerschale
S	mm^2	Untersuchte Fläche im REM
S_F	μm	Ferritkorngröße
s	mm	Blechdicke
s_f	-	Informationsfluss in der Funktionsstruktur
s_i	mm	Durch Biegewerkzeuge vorgegebene Abstände
T_k	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur beim Kerbschlagversuch
$T_{b,1}$	N	Reibkraft, die einen Teil des Biegemomentes beim RSS-Biegen auslöst
$T_{b,2}$	N	Reibkraft, die einen Teil des Biegemomentes beim RSS-Biegen auslöst
T_{bs}	N	Reibkraft zwischen unterer Lagerschale und rotierendem Werkzeug
T_d	N	Am Gesenk wirkende Reibkraft beim RSS-Biegen
T_i	N	Tangentialkräfte beim RSS-Biegen

Zeichen	Einheit	Beschreibung
T_r	N	Reibkraft, die in der Biegezone am Außenbogen beim RSS-Biegen wirkt
T_{ps}	N	Reibkraft zwischen oberem Werkzeug und oberer Lagerschale
t	s	Zeit
V	Ω	Elektrischer Widerstand des ungeschädigten Materials
V_M	%	Martensitanteil
\tilde{V}	Ω	Elektrischer Widerstand des geschädigten Materials
V_L	mm/s	Ultraschallgeschwindigkeit im Halbzeug
\tilde{V}_L	mm/s	Ultraschallgeschwindigkeit im geschädigten Bauteil
v	mm/s	Auftreffgeschwindigkeit des Gewichtes im Falltest
W	J	Kerbschlagarbeit
W_i	g	Wägewert
w	mm	Gesenkweite
w_f	-	Energiefluss in der Funktionsstruktur
y	mm	Position auf der Blechdicke

Indizes

Index	Beschreibung
0	Initialwert
a	Außen
ave	Durchschnittswert
ax	Axial wirkend
B	Bruch
b	Aus der Biegung resultierend
crit	Kritisch
D	Geschädigt

DW	Drückwalzen
fl	Flüssigkeit
fk	Festkörper
fb	Beim Freibiegen wirkend
g	Am Gesenk wirkend
HZ	Halbzeug
i	Innen
L	Luft
max	Maximal
min	Minimal
N	Aus der Normalkraft resultierend
o	Obere Grenze
r	Aus Reibung resultierend
RS	Unter Radialspannung wirkend
st	Stempel
u	Untere Grenze
zyk	Zyklisch
θ	In Tangentialrichtung

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
AZ	Ausgangszustand
bez	bezogen
C	Drehpunkt der rotierenden Werkzeuge beim RSS-Biegen
CP-Stahl	Komplexphasen-Stahl (C omplex p hase-Steel)
CPE4R	4-Knoten-Element, ebener Formänderungszustand, reduzierte Integration

CT	C omputer- T omograph
DP-Stahl	D ualphasen-Stahl
EBT	Equi-Biaxialer-Zug (E qui- b iaxial- t ension)
EBSD	E lectron B ackscatter D iffraction
ECAP	E qual C hannel A ngular P ressing
EFÄZ	E bener F ormänderungszustand
F	F errit
FKG	F errit- F errit- K orngrenzenablösung
FEM	F inite- E lemente- M ethode
H	H orizontal
E	E inschluss
M	M artensit
MB	M artensitbruch
MF	M artensit- F errit- A blösung
PST	Ebener Formänderungszustand und Zugbelastung (P lane s train t ension)
REM	R asterelektronen m ikroskopie
RSS	R adial S tress S uperposed
SH	S cherung
TRIP-Stahl	T ransformation I nduced P lasticity Stahl
UT	Einachsiger Zug (U niaxial t ension)
WR	W alzrichtung
V	V ertikal
QR	Belastung 90° zur Walzrichtung (Q uerrichtung)