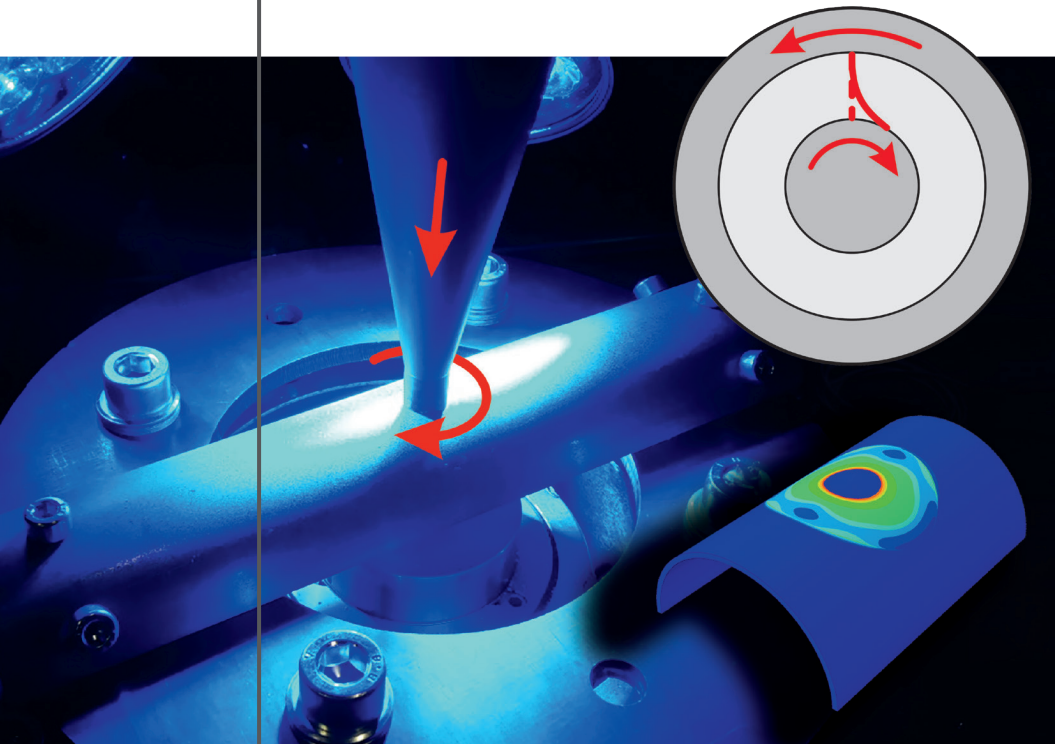


Heinrich Traphöner

Erweiterung der Anwendungsgrenzen des ebenen Torsionsversuchs



Erweiterung der Anwendungsgrenzen des ebenen Torsionsversuchs

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

von der Fakultät Maschinenbau
der Technischen Universität Dortmund
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Heinrich Traphöner M. Sc.

aus

Bielefeld

Dortmund, 2020

Vorsitzende der Prüfungskommission: Jun. Prof. Dr.-Ing. habil. Sandra Klinge
Berichter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. A. Erman Tekkaya
Prof. Dr.-Ing. Dirk Mohr
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Bernd Künne
Tag der mündlichen Prüfung: 08. Oktober 2020

Dortmunder Umformtechnik

Band 110

Heinrich Traphöner

**Erweiterung der Anwendungsgrenzen
des ebenen Torsionsversuchs**

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 978-3-8440-7737-7

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 entstammen dem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Projekt „Neuartige ebene Torsionsprobe zur Charakterisierung von Schädigung und Verfestigung“.

Mein besonderer Dank gilt meinem Institutsleiter Herrn Prof. A. Erman Tekkaya für die stete Förderung, die angeregten Diskussionen und das mir entgegengebrachte Vertrauen, das meine Promotion ermöglicht hat. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dirk Mohr vom Chair of Computational Modeling of Materials in Manufacturing der ETH Zürich für die Übernahme des Korreferats. Bedanken möchte ich mich zudem bei Herrn Prof. Bernd Künne und Frau Jun.-Prof. Sandra Klinge für die Mitwirkung in der Prüfungskommission als Mitberichter bzw. Vorsitzende.

Ich bedanke mich herzlich bei allen Kolleginnen und Kollegen am IUL für die enge und kollegiale Zusammenarbeit. Insbesondere bedanke ich mich herzlich bei Dr. Till Clausmeyer und Sebastian Wernicke für die zahlreichen konstruktiven Diskussionen und die vielen hilfreichen Impulse zu meiner Arbeit. Mein Dank gebührt auch den früheren Kollegen Dr. Alper Güner für die gute Betreuung der ersten Jahre, sowie Dr. Qing Yin, der mich bereits zu meiner Zeit als studentische Hilfskraft für den ebenen Torsionsversuch begeisterte.

Bei unseren technischen Mitarbeitern Dirk Hoffmann, Werner Feurer und Steffen Strotzer bedanke ich mich herzlich für die tatkräftige Unterstützung im Versuchsfeld. Jeanette Brandt und Nina Hänisch danke ich für die hervorragende organisatorische Betreuung vor und während der Promotion. Frau Beate Ulm-Brandt danke ich für die sorgfältige sprachliche Korrektur dieser Arbeit. Ich danke herzlich den studentischen Hilfskräften Fabio Bürstner und Nils Cwickala sowie den studentischen Hilfskräften in der Materialcharakterisierung Fabian Stiebert, Dominik Windmann und Mike Nowak für ihre Mitarbeit und Unterstützung.

Für die langjährige Unterstützung und gemeinsame Projektarbeit in den Forschungsprojekten „Bauschinger-Koeffizienten“ und „Rückfederungsvorhersage“ der EFB bedanke ich mich herzlich bei Herrn Martin Rosenschon vom Lehrstuhl für Fertigungstechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Mein Dank gilt auch den Mitarbeitern der EFB sowie unseren Partnern aus der Industrie für die Unterstützung und Zusammenarbeit.

Abschließend danke ich meiner Familie und meinen Freunden für ihren Zuspruch und ihre Unterstützung. Der Dank gilt insbesondere meinen Eltern, Ulrich und Christa Traphöner, sowie meiner Großmutter, Irmgard Neuwöhner. Ihre uneingeschränkte

Förderung hat meinen wissenschaftlichen Werdegang erst ermöglicht. Gleichmaßen danke ich meinem Bruder Bernhard sowie Beatrice, die mich während all der Zeit insbesondere freundschaftlich unterstützt haben.

Dortmund, im Oktober 2020

HEINRICH TRAPHÖNER

Zusammenfassung

Aufgrund seiner vorteilhaften Eigenschaften wird der ebene Torsionsversuch zunehmend zur Charakterisierung von Blechwerkstoffen eingesetzt. Dies sind der ideale einfache Scherspannungszustand bis zum Bruch, die Materialcharakterisierung ohne Randzonen und Kerbwirkungen, die direkte Messbarkeit von Spannungen und Dehnungen und die daraus resultierende Bestimmung von Fließkurven bis zu sehr hohen Vergleichsformänderungen.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Anwendungsgrenzen des ebenen Torsionsversuchs zu erweitern. Zu diesem Zweck werden alle am Versuch beteiligten Komponenten und Einflüsse analysiert und bewertet. Dies sind die Dehnungsmesstechnik, die zur Messung sehr großer Scherdehnungen verwendet werden muss, die Form der Probe, die zusätzliche Möglichkeiten für die Prozessgestaltung bietet, und die Klemmung, die insbesondere die Prozessgrenzen beeinflusst. Zusätzlich werden die theoretischen Annahmen geprüft und die Auswertung des Versuchs kritisch analysiert. Der materialspezifische Einfluss auf den Versuch wird ebenfalls bewertet.

Zwei neue Methoden für die Dehnungsmessung werden vorgestellt, mit denen Fließkurven für den duktilen Tiefziehstahl DC04 mit wahren Vergleichsformänderungen bis zu 3,0 bestimmt werden. Dies sind eine Erweiterung der DIC und eine neue analytische Methode zur Bestimmung von Fließkurven aus Drehmoment und Drehwinkel unabhängig von der Form der Probe. Zudem wird der Einfluss der Dehnungslokalisierung in Scherversuchen auf den Messfehler bei der DIC-Messung experimentell und erstmals auch analytisch untersucht. Fließkurven mit den höchsten Vergleichsformänderungen können durch die Entwicklung von Proben mit umlaufender Nut bestimmt werden, welche keinen störenden Einfluss durch die innere Klemmung haben. Die Verwendung dieser Proben führt jedoch zu neuen wissenschaftlichen Fragen. In dieser Arbeit wurde ein signifikanter Einfluss der Nutfertigung auf die erreichbaren Bruchdehnungen festgestellt. Darüber hinaus hängt die Homogenität von Spannung und Dehnung stark von der Probenform ab. Drei neue Probenformen werden vorgestellt, um Fließkurven ohne Lokalisierung der Dehnung zu bestimmen, die kinematische Verfestigung bis zu sehr hohen Vordehnungen effektiv zu charakterisieren und die Eigenschaften unter Scherbelastung in anderen Ebenen des Bleches zu bestimmen. Eine analytische Analyse der inneren Klemmung zeigt auch, dass ringförmige Klemmungen mit radialen Riffeln ideal geeignet sind, um hohe Drehmomente ohne Durchrutschen der Probe zu übertragen. Zuletzt werden zwei neue Anwendungsbereiche beschrieben. Dies sind die Charakterisierung sehr dünner Bleche ohne Faltenbildung mittels mehrlagiger geklebter Probenstapel und die Charakterisierung von Rohren und gekrümmten Bauteilen.

Abstract

Due to its advantageous properties, the in-plane torsion test is increasingly used for the characterization of sheet metal materials. These advantages are the ideal simple shear stress state until fracture, the material characterization without edge and notch effects, the direct measurability of stresses and strains, and the resulting determination of flow curves up to very high equivalent strains.

The aim of the present work is to extend the application limits of the in-plane torsion test. For this purpose, all components and influences involved in the test and evaluation are analyzed. These are the strain measurement technology that has to be used for the measurement of very large shear strains, the shape of the specimen, which offers additional opportunities for the process design, and the clamping, which in particular influences the process limits. In addition, the theoretical assumptions are proved and the evaluation of the experiment is critically examined. The material-specific influence on the test is also assessed.

Two new strain measurement methods are presented, which are used to determine flow curves for the ductile deep-drawing steel DC04 with true equivalent strains up to 3.0. These methods are an extension of the DIC and a new analytical method to determine flow curves from torque and angle of rotation regardless of the shape of the sample. In addition, the influence of strain localization in shear tests on the measurement error in the DIC measurement is investigated experimentally and for the first time also analytically. Flow curves with the highest equivalent strains can be determined with the development of specimens with circumferential grooves, which do not have a disturbing influence of the internal clamping. However, the use of these specimens results in new scientific questions. In this work, a significant influence of the groove manufacturing on the achievable fracture strains was found. In addition, the homogeneity of stress and strain strongly depends on the specimen shape. Three new specimen shapes are presented to determine the flow curve without localization of the strain, to effectively characterize the kinematic hardening up to very high pre-strains, and to determine properties under shear load in other planes of the sheet. An analytical analysis of the internal clamping also shows that ring-shaped clampings with radial ripples are ideally suited to transfer high torques without slipping of the specimen. Finally, two new fields of application are described. These are the characterization of very thin sheets without the formation of wrinkles by means of multi-layered glued sheet stacks and the characterization of tubes and curved components.

Inhaltsverzeichnis

Vorveröffentlichung von Inhalten	i
Formelzeichen und Abkürzungen	iii
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Werkstoffverhalten und Grundbegriffe der Plastomechanik	3
2.1.1 Dehnungen.....	3
2.1.2 Spannungen	4
2.1.3 Spannungs-Dehnungskurven und Fließkurven	5
2.1.4 Anisotropie	8
2.2 Stoffgesetze der Plastizitätsrechnung	8
2.2.1 Fließbedingung.....	8
2.2.2 Fließregel.....	9
2.2.3 Verfestigungsgesetz	9
2.2.4 Schädigung und Versagen.....	11
2.3 Verfahren zur Charakterisierung von Blechwerkstoffen.....	13
2.3.1 Uniaxiale Zugversuche.....	13
2.3.2 Stauchversuche für Bleche	16
2.3.3 Biaxiale Zugversuche	17
2.3.4 Der hydraulische Tiefungsversuch.....	19
2.3.5 Scherversuche.....	19
2.3.6 Weitere Versuche zur Charakterisierung von Einschnürung, Schädigung und Versagen.....	24
2.3.7 Charakterisierung von Rohren und Bauteilen	25
2.4 Der ebene Torsionsversuch.....	25
2.4.1 Historie	25
2.4.2 Grundlagen	26
2.4.3 Ebene Torsionsproben mit umlaufender Nut	29
2.4.4 Messung der Dehnung im ebenen Torsionsversuch.....	31
2.5 Fazit zum Stand der Technik	34
3 Zielsetzung	37
4 Messung von Fließkurven mit sehr großer Formänderung	39
4.1 Grundlagen der Messung von Scherdehnungen mittels DIC	39
4.2 Dehnungsmessung durch mehrstufige DIC	43
4.3 Inkrementelle Dehnungsmessung aus Drehmoment und Drehwinkel	47
4.3.1 Prinzip für die konventionelle ebene Probe	47

4.3.2	Prinzip für ebene Torsionsproben mit Nut.....	55
4.4	Experimentelle Fließkurvenermittlung.....	59
4.4.1	Versuchswerkstoffe.....	60
4.4.2	Versuchsaufbau und Messmethoden.....	60
4.4.3	Ermittelte Fließkurven für ebene Proben.....	64
4.4.4	Ermittelte Fließkurven für die Probe mit Nut.....	65
4.5	Diskussion und Zwischenfazit.....	66
5	Lokalisierung der Dehnung in Scherversuchen	69
5.1	Experimentelle Analyse der Dehnungslokalisierung in Scherversuchen.....	69
5.2	Numerische Analyse des Einflusses von Festigkeit und Verfestigung auf die Dehnungslokalisierung.....	74
5.3	Analytische Abschätzung des Messfehlers aufgrund der Dehnungslokalisierung in Scherversuchen.....	76
5.4	Ansätze zur Vermeidung von Messfehlern aufgrund der Dehnungslokalisierung.....	82
5.5	Definition der Dehnungsreferenzlänge anhand des n -Wertes.....	83
5.6	Zwischenfazit.....	86
6	Analyse und Weiterentwicklung der Torsionsproben mit Nut	87
6.1	Einfluss des Verfahrens zur Herstellung der Nut.....	88
6.1.1	Verfahren zur Fertigung der Nut.....	88
6.1.2	Experimentelle Ergebnisse.....	92
6.1.3	Diskussion der Ergebnisse.....	98
6.2	Analyse der Torsionsprobe mit Rundnut.....	100
6.2.1	Position des Spannungsmaximums.....	101
6.2.2	Analytische Berechnung des elastischen Drehwinkels.....	103
6.2.3	Auslegung der Rundnut.....	105
6.2.4	Analyse des Spannungs- und Dehnungszustands.....	108
6.3	Nutprobe zur Charakterisierung von Fließkurven und Bruchdehnung.....	111
6.3.1	Lokale Anpassung der Nutradien.....	112
6.3.2	Spannungsangepasste Nutkontur.....	113
6.4	Nutprobe zur Charakterisierung der kinematischen Verfestigung.....	119
6.5	Nutprobe zur Charakterisierung der Scherung in θ - z -Ebene.....	123
6.6	Zwischenfazit.....	125
7	Analyse und Weiterentwicklung der Klemmungen	127
7.1	Analyse der Form der inneren Klemmung.....	127
7.2	Analyse unterschiedlicher Strukturen für die Kontaktfläche des inneren Stempels.....	131
7.3	Analytische Analyse der radialen linienförmigen Oberflächenstruktur.....	132

7.3.1 Geometrie und Auslegung radialer Riffel.....	133
7.3.2 Berechnung der Eindringtiefe radialer Riffel mittels Gleitlinientheorie.....	134
7.3.3 Berechnung der Belastungsgrenze fürs Durchrutschen	136
7.3.4 Numerische Verifizierung der Analytik für radiale Riffel.....	139
7.3.5 Belastungsgrenze der Riffel.....	142
7.3.6 Diskussion der Ergebnisse	143
7.4 Sonderformen der Klemmung	144
7.4.1 Reduzierung der inneren Einspannung – Verzicht auf den Lastrahmen	144
7.4.2 Formschlüssige Kraftübertragung der äußeren Klemmung	146
7.5 Zwischenfazit.....	147
8 Neue Anwendungsfelder	149
8.1 Charakterisierung von Feinstblechen	149
8.1.1 Ebene Torsion mehrlagiger Bleche.....	150
8.1.2 Experimentelle Ergebnisse.....	150
8.1.3 Ebene Torsion mehrlagiger Bleche mit Nut.....	156
8.2 Charakterisierung von Festigkeit und Verfestigung an nicht ebenen Blechbauteilen	157
8.2.1 Prüfung rotationssymmetrischer Proben mit gekrümmten Klemmungen	157
8.2.2 Prüfung rohrförmiger Proben mit gekrümmten Klemmungen	163
8.2.3 Prüfung gekrümmter Proben mit umlaufender Nut	167
8.2.4 Prüfung der Anisotropie von Rohren mit dem Doppelsteg- Torsionsversuch	169
8.3 Zwischenfazit.....	174
9 Zusammenfassung und Ausblick	177
Literaturverzeichnis	179
Anhang A – Fehleranalyse	189
A.1 Fehler durch Annahmen der Theorie	189
A.2 Messfehler.....	190
A.2.1 Fehler der Drehmomentmessung	190
A.2.2 Fehler der Probenvermessung	192
A.2.3 Fehler durch Abweichungen der Position auf der Probe	193
A.2.4 Fehler der lokalen Dehnungsmessung mittels DIC.....	193
A.3 Einfluss des Versuchsaufbaus.....	195
A.4 Fazit	196
Lebenslauf	197

Vorveröffentlichung von Inhalten

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

- Hijazi, D., Traphöner, H., Staupendahl, D., Clausmeyer, T., Tekkaya, A.E., 2017. Characterization of planar anisotropy, hardening and fracture of tubular materials by a modified in-plane torsion test. Proceedings of 5th International Conference on Steels in Cars and Trucks (SCT), (digital).
- Traphöner, H., Clausmeyer, T., Tekkaya, A.E., 2017. Material characterization for plane and curved sheets using the in-plane torsion test – An overview. Procedia Engineering 207, S. 1934–1939. doi:10.1016/j.proeng.2017.10.964
- Traphöner, H., Clausmeyer, T., Tekkaya, A.E., 2018. Material characterization for plane and curved sheets using the in-plane torsion test – An overview. Journal of Materials Processing Technology 257, S. 278–287. doi:10.1016/j.jmatprotec.2018.02.030
- Traphöner, H., Heibel, S., Clausmeyer, T., Tekkaya, A.E., 2018. Influence of manufacturing processes on material characterization with the grooved in-plane torsion test. International Journal of Mechanical Sciences 146-147, S. 544–555. doi:10.1016/j.ijmecsci.2017.12.052
- Traphöner, H., Clausmeyer, T., Tekkaya, A.E., 2021. Methods for measuring large shear strains in in-plane torsion tests. Journal of Materials Processing Technology 287, Art. Nr. 116516. doi:10.1016/j.jmatprotec.2019.116516
- Traphöner, H., Clausmeyer, T., Tekkaya, A.E., 2021. Estimation and prevention of strain localization in shear tests. Proceedings of the ICTP 2021, Ohio, USA, (akzeptiert).

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Beschreibung
A	mm ²	Fläche; Aktuelle Querschnittsfläche im Zugversuch
a	mm	Lokaler Abstand der Riffelspitzen
a_0	-	Parameter der Approximation durch überlagerte Exponentialfunktionen
A_1 bis A_5	-	Parameter der Partialbruchzerlegung
a_k	-	Parameter der Approximation durch überlagerte Exponentialfunktionen
a_s	mm	Nomineller Abstand der Riffelspitzen
B	MPa	Parameter des Yoshida-Uemori-Modells
b_s	mm	Breite der Riffelspitzen
C	MPa	Parameter zur Fließkurvenextrapolation nach Ludwik, Ludwik-Hollomon, Swift sowie für lineare Verfestigung
\mathbf{C}	MPa	Matrix mit elastischen Konstanten für das verallgemeinerte hookesche Gesetz
C_k	-	Parameter der Approximation durch überlagerte Exponentialfunktionen
d_0	mm	Ursprünglicher Durchmesser einer Schichtstauchprobe
d_1	mm	Enddurchmesser einer Schichtstauchprobe
D_K	mm	Durchmesser der Klemmung
dl	mm	Längenänderung
D_R	mm	Durchmesser des Rohres
E	MPa	Elastizitätsmodul
F	N	Kraft
\mathbf{F}	-	Deformationsgradiententensor
f	m/min	Vorschub beim Drehen und Fräsen
F_1, F_2	N	Prüfkräfte im Kreuzzugversuch
F_K	N	Stempelkraft / Klemmkraft
F_n	N	Axialkraft für einen einzelnen radialen Riffel

Zeichen	Einheit	Beschreibung
F_{NH}	N	Niederhalterkraft
G	MPa	Schubmodul
h	mm	Höhe
h_0	mm	Ursprüngliche Stapelhöhe im Schichtstauchversuch
h_1	mm	Stapelhöhe am Ende des Schichtstauchversuchs
i	-	Übersetzung des Getriebes am ebenen Torsionsversuch; Nummer des Inkrementes bei der inkrementellen Auswertung der Dehnung
i	mm	Eindringtiefe der Riffel
\mathbf{I}	-	Einheitsmatrix
J_1	MPa	Erste Invariante des deviatorischen Spannungstensors
J_2	MPa ²	Zweite Invariante des deviatorischen Spannungstensors
J_3	MPa ³	Dritte Invariante des deviatorischen Spannungstensors
k	MPa	Schubfließgrenze
k_{f}	MPa	Fließspannung
$k_{\text{f},0}$	MPa	Anfangsfließspannung
$k_{\text{f},\infty}$	MPa	Parameter der Fließkurvenextrapolation nach Voce und Hockett-Sherby
l	mm	Aktuelle Länge; Länge der schmalen Seite einer gescherten Facette
L	-	Lode-Winkelparameter
L	mm	Lokale Länge in der Scherzone bei Scherversuchen
l_0	mm	Anfangslänge im Zugversuch; Dehnungsreferenzlänge
l_1	mm	Aktuelle Länge im Zugversuch
\mathbf{L}^{-1}	MPa ⁻¹	Matrix mit elastischen Konstanten für das verallgemeinerte hookesche Gesetz bei isotroper Elastizität
l_{E}	mm	Elementkantenlänge
L_{s}	mm	Länge der Scherzone in Scherversuchen
m	-	Parameter der Fließkurvenextrapolation nach Voce sowie Hockett-Sherby; Parameter des Yoshida-Uemori-Modells
M	Nm	Drehmoment
M_{nom}	Nm	Nominelles Drehmoment

Zeichen	Einheit	Beschreibung
M_{Ring}	Nm	Drehmoment für eine ringförmige Klemmfläche
M_{Voll}	Nm	Drehmoment für eine volle Klemmfläche
n	-	Verfestigungsexponent der Fließkurvenextrapolation nach Ludwik, Ludwik-Hollomon, Swift und Hockett-Sherby; Anzahl der radialen Riffel eines Klemmwerkzeugs
n	min^{-1}	Drehzahl
\mathbf{n}	-	Normalenvektor
N	-	Anzahl der Versuche für die statistische Auswertung
N_{qua}	-	Anzahl der Fertigungsqualitäten
n_s	-	Anzahl der Lagen für mehrlagige Torsionsproben
N_{wied}	-	Anzahl der Wiederholversuche
p	-	Anzahl der Terme für die Approximation durch überlagerte Exponentialfunktionen
p	MPa	Wirkmediendruck im hydraulischen Tiefungsversuch
\mathbf{P}	mm	Ortsvektor eines Punktes
$p_{\text{I,II}}, p_{\text{I,IV}}$	MPa	Flächenpressung auf die Oberfläche der Riffel aus der Gleitlinientheorie
\mathbf{P}_d	mm	Ortsvektor eines Punktes im deformierten Zustand
p_K	MPa	Klemmdruck
\mathbf{P}_u	mm	Ortsvektor eines Punktes im undeformierten Zustand
r	-	Anisotropie-Koeffizient
r	mm	Radius
R	MPa	Parameter des Yoshida-Uemori-Modells
\mathbf{R}	-	Orthogonaler Rotationstensor
R	mm	Radius der kugelförmigen Probe
r^*	mm	Kritischer Radius nach Tekkaya et al. (1982b)
$r_{\tau,\text{max}}^*$	mm	Radius maximaler Scherspannung für eine quadratisch approximierten Nutform
r, θ, z	-	Richtungen des Zylinderkoordinatensystems
r_0	mm	Radius am Fließbeginn im ebenen Torsionsversuch
r_0, r_{45}, r_{90}	-	Anisotropie-Koeffizient in 0° , 45° und 90° zur Walzrichtung
R_1 bis R_5	mm	Radialen in unterschiedlichen Bereichen der Nut
r_A	mm	Radius der äußeren Klemmung

Zeichen	Einheit	Beschreibung
R_a	μm	Mittenrauheit
R_a	mm	Radius in der äußeren Nut für radial versetzte Nuten
r_a	mm	Äußerer Radius des Scherbereichs für die Nutform aus Kapitel 6.5
r_c	mm	Schneidkantenradius beim Drehen
r_{eff}	mm	Effektiver Radius für die Spannungsberechnung an gekrümmten Proben
r_1	mm	Radius der inneren Klemmung
R_i	mm	Radius in der inneren Nut für radial versetzte Nuten
r_i	mm	Innerer Radius des Scherbereichs für die Nutform aus Kapitel 6.5
R_m	MPa	Zugfestigkeit
r_m	mm	Mittlerer Radius der Scherzone im Doppelsteg-Torsionsversuch; Mittlerer Radius eines linearisierten Abschnitts der Radiallinie für die inkrementelle Auswertung; Radius des Messtasters für die Nutvermessung
r_{min}	mm	Innerer Radius für ringförmige innere Klemmungen
r_{mitte}	mm	Mittlere radiale Position der Nut
r_n	-	Senkrechte Anisotropie
r_n	mm	Radius an der Kante der Nut
r_{Nut}	mm	Nutradius bei Rundnuten
r_{Nutbahn}	mm	Nutbahnradius bei Rundnuten
$R_{p0,2}$	MPa	0,2%-Dehngrenze
R_s	mm	Radius an der Scherzone in Scherversuchen
$r_{\tau,\text{max}}$	mm	Radius maximaler Scherspannung im ebenen Torsionsversuch
s	-	Standardabweichung
s_r	mm	Breite des Scherbereichs für die Nutform aus Kapitel 6.5
T	-	Spannungstriaxialität
t	mm	Blechdicke
t^*	mm	Durch eine quadratische Funktion approximierte Blechdicke in der Nut
t_0	mm	Anfängliche Blechdicke

Zeichen	Einheit	Beschreibung
t_a	mm	Blechdicke am Grund der äußeren Nut für radial versetzte Nuten
t_i	mm	Blechdicke am Grund der inneren Nut für radial versetzte Nuten
t_{mitte}	mm	Blechdicke an der mittleren radialen Position der Nut
t_{Nut}	mm	Blechdicke am Nutboden bei Rundnuten
t_s	mm	Gesamt-Stapelhöhe für mehrlagige Torsionsproben
u	-	Starrkörperverschiebungstensor
U	-	Rechter Verzerrungstensor
ν	-	Querkontraktionszahl
v_c	m/min	Schnittgeschwindigkeit beim Drehen und Fräsen
x	mm	Verschiebung im kartesischen Koordinatensystem
Y	MPa	Parameter des Yoshida-Uemori-Modells
α	-	Parameter des Gerlach-Kessler-Modells;
α	rad	Drehwinkel; Neigungswinkel der Flanken von radialen Riffeln
α_D	-	Krümmungsverhältnis zwischen Klemmung und Rohr
β	rad	Neigungswinkel einer schräg auslaufenden Nutkante; Zustellungswinkel des Fräswerkzeugs bei der Riffelfertigung; Neigungswinkel einer kegelförmigen Probe
γ	-	Scherdehnung
γ_{dis}	-	Diskrete Scherdehnung
γ_{vor}	-	Scherdehnung vor Lastumkehr
Δr	-	Ebene Anisotropie
Δr_{konst}	mm	Radialer Bereich der Nut mit konstanter Spannung
$\Delta \alpha$	rad	Winkel zwischen zwei radialen Riffeln
$\dot{\epsilon}$	-	Technische Dehnrate
ϵ	-	Tensor der technischen Dehnung
ϵ_G	-	Technische Gleichmaßdehnung
ζ	-	Diskretisierungsfehler
η	rad	Winkeländerung bei der Scherung / Scherwinkel
θ	rad	Lode-Winkel

Zeichen	Einheit	Beschreibung
ϑ	rad	Winkelausschnitt eines Steges im Doppelsteg-Torsionsversuch
λ	-	Linearer Parameter der Fließregel
μ	-	Reibungskoeffizient
ζ	-	Abweichung zwischen minimaler und maximaler plastischer Vergleichsdehnung
ζ_M	-	Fehler durch die Drehmomentmessung
ζ_γ	-	Fehler durch die Messung der Scherdehnung
ζ_η	-	Fehler durch die Messung des Scherwinkels
ζ_τ	-	Fehler durch die Messung der Scherspannung
ρ	mm ⁻¹	Krümmung am Pol im hydraulischen Tiefungsversuch
σ	MPa	Spannung
$\boldsymbol{\sigma}$	MPa	Spannungstensor
$\boldsymbol{\sigma}'$	MPa	Deviatorischer Spannungstensor
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	MPa	Hauptspannungen
σ_n	MPa	Hydrostatische Spannung
$\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$	MPa	Normalkomponenten des Spannungstensors in Zylinderkoordinaten
σ_t	MPa	Technische Spannung
$\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$	MPa	Normalkomponenten des Spannungstensors in kartesischen Koordinaten
τ	MPa	Scherspannung
τ_0	MPa	Schubfließgrenze
$\tau_{r\theta}, \tau_{\theta z}, \tau_{zr}$	MPa	Schubspannungskomponenten des Spannungstensors in Zylinderkoordinaten
$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$	MPa	Schubspannungskomponenten des Spannungstensors in kartesischen Koordinaten
$\dot{\varphi}$	-	Wahre Dehnrate / Formänderungsgeschwindigkeit
φ	-	Wahre Dehnung
$\boldsymbol{\varphi}$	-	Formänderungstensor
$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$	-	Hauptformänderungen
φ_b	-	Formänderung in Breitenrichtung
φ_B	-	Bruchdehnung
φ_{el}	-	Elastische Formänderung

Zeichen	Einheit	Beschreibung
φ_k	-	Diskrete Dehnung
φ_{pl}	-	Plastische Formänderung
φ_t	-	Formänderung in Dickenrichtung
φ_v	-	Vergleichsformänderung
$\varphi_{v.M.}$	-	Vergleichsformänderung nach von Mises
$\varphi_{xx}, \varphi_{yy}, \varphi_{zz}$	-	Normalkomponenten des Formänderungstensors mit kartesischen Koordinaten

Indizes

Index	Beschreibung
0	Initialwert
1	Wert der ersten Stufe; Endwert
1-seitig	Für eine einseitige Nut
2-seitig	Für eine beidseitige Nut
A	Außen
el	Elastisch
i	Nummer des Inkrementes für die inkrementelle Auswertung
I	Innen
max	Maximal
min	Minimal
n	Nummer des linearisierten Abschnitts für die inkrementelle Auswertung
neu	Neuer Punkt für die inkrementelle Auswertung
Nut	Im Bereich der Nut
pl	Plastisch
Riffel	Für den Riffel
z	In axiale Richtung für Zylinderkoordinaten
θ	In tangentialer Richtung für Zylinderkoordinaten

Abkürzungen

AHSS	Advanced High Strength Steel (Weiterentwickelter hochfester Stahl)
CNC	Computerized Numerical Control
CP	Komplexphasenstahl
D	Diagonal zur Walzrichtung
DC	Weicher kaltgewalzter Stahl
DIC	Digital Image Correlation (Optische Dehnungsmessung)
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DP	Dualphasenstahl
DS	Doppelsteg-Torsionsversuch
EDM	Electrical Discharge Machining (Senkerodieren)
E-Modul	Elastizitätsmodul
EN	Europäische Norm
ETV	Ebener Torsionsversuch
FEM	Finite-Elemente-Methode
FFL	Fracture Forming Limit Line
FIB	Focused Ion Beam
FLC	Forming Limit Curve (Grenzformänderungskurve)
HS	Hockett-Sherby
ISO	International Organization for Standardization
L	Längs zur Walzrichtung
<i>M</i> - α -Kurve	Drehmoment-Drehwinkelkurve
PECM	Pulsed Electrochemical Machining (Elektrochemisches Abtragen)
PLC	Portevin-Le-Chatelier-Effekt (Dynamische Reckalterung)
Q	Quer zur Walzrichtung
RMSE	Root Mean Square Error (Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme)
SFFL	Shear Fracture Forming Limit Line
WR	Walzrichtung
ZV	Zugversuch
τ - γ_{pl} -Kurve	Plastische Scherspannungs-Scherdehnungskurve