

Benjamin Lossen

Ein Beitrag zur Herstellung von hybriden Bauteilen mittels Reibdrücken

Ein Beitrag zur Herstellung von hybriden Bauteilen mittels Reibdrücken

zur Erlangung des akademischen Grades
DOKTOR DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von
Dipl.-Ing. Benjamin Lossen
aus Paderborn

Tag des Kolloquiums: 07.03.2019

Referent: Prof. Dr.-Ing. Werner Homberg

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Gerson Meschut

Paderborner Umformtechnik
hrsg. von Prof. Dr.-Ing. Werner Homberg

Benjamin Lossen

**Ein Beitrag zur Herstellung von hybriden Bauteilen
mittels Reibdrücken**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

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.: Paderborn, 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 978-3-8440-6729-3

ISSN 2196-8322

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

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Umformende und Spanende Fertigungstechnik (LUF) der Universität Paderborn.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Werner Homberg für die Betreuung und Ermöglichung dieser Arbeit. Vor allem aber für seine stets konstruktive sowie fachliche Unterstützung und sein großes Interesse an den Entwicklungen im Reibdrücken, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Des Weiteren möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerson Meschut (Übernahme des Koreferats), Herrn Prof. Dr.-Ing. Elmar Moritzer (Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission) und Herrn Prof. Dr. rer. nat. Thomas Tröster (Übernahme der Aufgabe des Beisitzers) danken. Darüber hinaus möchte ich mich bei allen für die sehr angenehme Zusammenarbeit im DFG Sonderforschungsbereich TRR30 sowie im NRW Fortschrittskollegs „Leicht-Effizient-Mobil“ bedanken.

Allen Kollegen/-innen am Lehrstuhl danke ich für die freundschaftliche und kollegiale Zusammenarbeit und Unterstützung. Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Wirt.-Ing. Tim Rostek für die zahlreichen intensiven und konstruktiven Diskussionen und Anregungen. Darüber hinaus möchte ich mich bei ihm sowie bei Herrn Dipl.-Ing. Eugen Wiens und Herrn Dipl.-Wirt.-Ing. Hans Christian Schmidt für die immer angenehme, freundschaftliche Atmosphäre und produktive wissenschaftliche Zusammenarbeit bedanken. Herrn Dipl.-Ing. Eugen Djakow gilt ebenfalls ein ganz besonderer Dank für seine unaufhörliche Fürsorglichkeit und für die stets allgemeine Erheiterung des Lehrstuhls.

Dem gesamten technischen Personal und vor allem Herrn Dipl.-Ing. Manuel Köhler, Herrn Jochen Tofall und Herrn Martin Bonefeld möchte ich für die Unterstützung und Fertigung einer Vielzahl an Werkzeugen und Proben danken. Mein Dank gilt weiter den von mir betreuten studentischen Hilfskräften und Studierenden, die mich bei der Weiterentwicklung des Reibdrückens durch die Konstruktion und Erprobung von Werkzeugkonzepten sowie die Durchführung einer Vielzahl an Untersuchungsreihen unterstützt haben.

Weiterhin gilt mein Dank der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG für die Förderung des Sonderforschungsbereiches TRR30 sowie dem Land NRW für die Förderung des Fortschrittskollegs „Leicht-Effizient-Mobil“, in dessen Rahmen zahlreiche technologische Untersuchungen dieser Arbeit durchgeführt wurden.

Mein ausdrücklicher Dank gilt meiner Lebensgefährtin Birthe Lömker für ihre unendliche Geduld und Unterstützung sowie den zeitweisen Verzicht auf die Erkundung vieler weiterer

Vorwort

schöner Orte auf der Welt. Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die mir diesen Werdegang erst ermöglicht und mich auf diesem fortwährend unterstützt haben.

Paderborn, 07. März 2019

Benjamin Lossen

Kurzfassung

Im Bereich der inkrementellen Umformung werden derzeit mehrere Ansätze verfolgt, um das Umformvermögen während der Herstellung zu steigern. Eine Möglichkeit dieses zu erreichen und die Prozessgrenzen zu erweitern, besteht z. B. durch die Erwärmung der Werkstücke, um den entstehenden Kaltverfestigungen entgegenzuwirken. Hierfür werden zumeist zusätzliche Systeme benötigt, die wiederum die Investitions- und Herstellungskosten erhöhen sowie die Prozesszeiten bei den konventionellen Verfahren verlängern. Das neue inkrementelle Umformverfahren des Reibdrückens ist ein innovativer Ansatz, der durch die gezielte Verwendung von Reibungsprozessen in Kombination mit Prozesselementen des Drückens, eine integrierte Erwärmung im Werkstück während der Umformung realisiert. Diese selbstinduzierte partielle Wärmeerzeugung führt zu einer signifikanten Erhöhung der Duktilität der Werkstoffe und ermöglicht eine lokale sowie definierte Einstellung der Werkstoffeigenschaften. Der Inhalt dieser Arbeit ist die Weiterentwicklung des Verfahrens in den Bereichen der Temperaturführung, der Werkzeugentwicklung, der Formgebung und der Eigenschaftseinstellung für eine effiziente und ressourcenschonende Bearbeitung von Monowerkstoffen bis hin zu Hybridwerkstoffsystemen.

Abstract

In the area of metal forming, innovative approaches are being continuously investigated in a bid to achieve more efficient manufacturing processes permitting more economic material usage or to realize forming operations with a higher degree of deformation. One potential way of avoiding this restricted formability e.g. due to the work hardening is the use of elevated temperatures during the process. Current approaches use additional heating systems, but this reduces efficiency in terms of energy consumption, manufacturing time, investment and maintenance costs. Based on these strategies with quit low efficiency and unused potential, the innovative friction spinning process was developed, taking in elements from both the metal spinning and the friction welding processes. Implementing specific process features from both processes opens up the possibility for a localized, incremental, warm-forming operation with an increased formability and locally defined adjustment of the material properties. This thesis focuses on the further development in the area of temperature control strategies, tool development, material shaping and adjustment of load-adapted material properties for the efficient and resource-saving processing of mono-materials up to hybrid material systems.

Liste der Vorveröffentlichungen

Einige Inhalte dieser Arbeit sind in folgenden Veröffentlichungen vertieft dargestellt:

2018

Lossen, B., Andreiev, A., Mykhailo, S., Homberg, W. & Schaper, M.: Friction-Spinning – Grain Structure Modification and the Impact on Stress/Strain Behaviour. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 261, S. 242-250, 2018.

Lossen, B. & Homberg, W.: Vorrichtung und Verfahren zum Reibdrücken zur Erzeugung von umgeformten Bereichen, insbesondere von Flanschstrukturen, an profillförmigen Werkstücken, Deutsche Patentanmeldung (DE10 2018 001 712.6), voraussichtliche Veröffentlichung August, 2019.

Lossen, B. & Homberg, W.: Ressourceneffizienz am Beispiel des Reibdrückens – Nicht nur aus technologischer Sicht eine Herausforderung. In: Riegraf, B. (Hrsg.), *Wissenschaft im Angesicht »großer gesellschaftlicher Herausforderungen«: Das Beispiel der Forschung an hybriden Leichtbaumaterialien*, transcript Verlag, Bielefeld, S. 159-178, 2018, ISBN: 978-3-8376-4099-1.

2017

Lossen, B., Andreiev, A., Homberg, W. & Schaper, M.: Friction-Spinning – Possibility of Grain Structure Adjustment. *Procedia Engineering of the 12th ICTP*, Vol. 207, S.1749-1754, Cambridge, England, 2017.

2016

Homberg, W. & Lossen, B.: Reib-Drücken – Neue Möglichkeiten im Bereich der inkrementellen Umformung. '23. Sächsische Fachtagung Umformtechnik SFU 2016 - Tagungsband', Hrsg. Brosius, A., S.82-90, Dresden, Deutschland, 2016.

Lossen, B. & Homberg, W.: Friction-Spinning – Twist Phenomena and the Capability of Influencing Them. *ESAFORM2016, AIP Conference Proceedings 1769, 070001*, Nantes, Frankreich, 2016.

2015

Homberg, W. & Lossen, B.: Friction-Spinning – Innovative Opportunity for Overcoming Process Limits in Spinning Processes. In: Tekkaya, A.E., Homberg, W. und Brosius, A. (Hg.), *60 Excellent Inventions in Metal Forming*, Springer Vieweg, Berlin, S. 149-154, 2015, ISBN: 978-3-662-46312-3.

Lossen, B. & Homberg, W.: Friction-Spinning – Influence of Tool and Machine Parameters on the Surface Texture. *ESAFORM2015, Key Engineering Materials Vol. 651-653, S.1109-1114*, Graz, Österreich, 2015.

2014

Hess, S., Lossen, B., Biermann, D., Homberg, W. & Wagner, T.: Analysis of the surface roughness obtained in a friction spinning process based on empirical models. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 74 (Issue 9 - 12), S.1655-1665, 2014.

Lossen, B. & Homberg, W.: Friction-Spinning – Interesting approach to the manufacture of complex sheet metal parts and tubes. In: Mori, T.I.A.K.i. (Hrsg.), *Procedia Engineering of the 11th ICTP*, Vol. 81, Elsevier, S.2379-2384, Nagoya, Japan, 2014.

Stein, T., Brueckner-Foit, A., Lossen, B. & Homberg, W.: Fatigue Crack Extension in an Incrementally Formed Tube. *Procedia Materials Science of 20th European Conference on Fracture* Vol. 3, S.1884-1889, 2014.

2013

Homberg, W., Lossen, B. & Struwe, A.: An Innovative Incremental Forming Process for the Manufacturing of Functional Graded Parts. *Key Engineering Materials* 554-557, S.1368-1374, Aveiro, Portugal, 2013.

Homberg, W. & Lossen, B.: Thermal assisted incremental forming of tubes and sheets with process-integrated heat generation. In: Heim, H.P. and Biermann, D. and Homberg, W. (Hg.), *Functionally Graded Materials in Industrial Mass Production | Volume 2*, Verlag Wissenschaftliche Scripten, Auerbach, S. 113-128, 2013, ISBN: 978-3-942267-91-5.

Homberg, W. & Lossen, B.: Thermal assisted incremental forming of tubes and sheets with process-integrated heat generation - Fundamentals. In: Homberg, W. and Biermann, D. and Heim, H.P. (Hg.), *Functionally Graded Materials in Industrial Mass Production | Fundamentals*, Verlag Wissenschaftliche Scripten, Auerbach, S. 43-76, 2013, ISBN: 978-3-942267-92-2.

2012

Homberg, W., Hornjak, D. & Lossen, B.: Friction-Spinning – A New Innovative Thermal Assisted Incremental Forming Process for the Manufacture of Complex Functionally Graded Workpieces. In: Heim, H.P. and Biermann, D. and Maier, H.J. (Hg.), *1st International Conference on Thermo-Mechanically Graded Materials*, S.115-120, Kassel, Deutschland, 2012.

Homberg, W., Hornjak, D., Lossen, B. & Struwe, A.: New Innovative Tool Systems for the Production of Workpieces with Tailor-made Properties by Friction Spinning. In: Kusiak, J (Hrsg.), *Metal Forming 2012 - 14th International Conference*, Wiley Verlag, S.619-622, Krakau, Polen, 2012.

Homberg, W. & Lossen, B.: Reib-Drücken – Ein innovativer Ansatz zur effizienten Herstellung von funktional gradierten Bauteilen aus Aluminium- und Stahlwerkstoffen. 1. Pforzheimer Werkstofftag, Pforzheim, Deutschland, 2012.

Homberg, W., Lossen, B. & Hornjak, D.: Wärmeeintrag durch Reibung (Reib-Drücken). In: Spur, G., Neugebauer, R. und Hoffmann, H. (Hrsg.), *Handbuch Umformen*, Hanser Fachbuchverlag, München, S. 648-649, 2012, ISBN: 978-3-446-42778-5.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theoretische Grundlagen – Stand der Technik	3
2.1	Reibdrücken	3
2.1.1	Einordnung des Reibdrückens - Inkrementelle Umformverfahren	5
2.1.2	Prozessvarianten /-parameter	6
2.1.3	Werkzeuge	11
2.1.4	Beeinflussungsmöglichkeiten von Materialeigenschaften	14
2.2	Grundlagen zur Beeinflussung der Eigenschaften von metallischen Werkstoffen ..	17
2.2.1	Verfestigungsmechanismen	17
2.2.2	Entfestigungsmechanismen	19
2.2.3	Thermische Verfahren	21
2.2.4	Mechanische Verfahren	25
2.2.5	Thermomechanische Verfahren	26
2.3	Tribologische Grundlagen	27
2.3.1	Reibung	28
2.3.2	Verschleiß	33
2.4	Herstellung von hybriden Bauteilen	36
3	Wissenschaftliche Zielsetzung	39
4	Versuchseinrichtung und -durchführung	41
4.1	Reibdrückmaschine	41
4.1.1	Steuerungssystem, Sensorik und Messwerterfassung	42
4.1.2	Werkzeuge und Werkzeugsysteme	43
4.1.3	Kühlsystem	45
4.2	Verfahrensvarianten und -prinzipien	45
4.2.1	Flanschumformung	45
4.2.2	Verschließen von Rohrenden	47
4.3	Werkstückwerkstoffe	48

4.4	Prüf- und Messvorrichtungen.....	49
4.4.1	Temperaturerfassung.....	49
4.4.2	Messung der Oberflächenqualität.....	50
4.4.3	Mechanische Kennwertermittlung	51
4.4.4	Reibkoeffizientermittlung	52
4.4.5	Gefügeanalysen	53
5	Temperaturführung beim Reibdrücken	55
5.1	Wärmeeintrag durch Reibung	56
5.1.1	Gleitreibungskraft F_{Reib}	57
5.1.2	Reibungsweg s	59
5.2	Wärmeübertragung.....	60
5.2.1	Konduktion.....	60
5.2.2	Konvektion	61
5.2.3	Wärmestrahlung	62
5.3	Steuergrößen am Beispiel der Flanschherstellung	63
5.3.1	Vorschub f	65
5.3.2	Drehzahl n	67
5.3.3	Werkzeug und Werkzeugsystem	68
5.4	Prozessführung.....	73
5.5	Zusammenfassende Betrachtung.....	76
6	Gestaltung von Werkzeugen für das Reibdrücken.....	77
6.1	Werkzeuganforderungen	77
6.2	Werkzeugfunktionen.....	78
6.2.1	Umformen	79
6.2.2	Abstützen und Gegenhalten.....	80
6.2.3	Erwärmen	80
6.2.4	Kühlen	81
6.2.5	Weitere Funktionen (Schweißen, Drehen, Walzen).....	82
6.3	Werkzeugparameter und -gestaltung	82

6.3.1	Werkzeuggeometrie sowie -ausrichtung	83
6.3.2	Werkzeugwerkstoff	85
6.3.3	Werkzeugdrehgeschwindigkeit ω_{WZ}	86
6.4	Kombinationsmöglichkeiten von Werkzeugfunktionen	87
6.5	Werkzeugarten und -kategorien	88
6.6	Werkzeugverschleiß	89
6.6.1	Abrasiver Werkzeugverschleiß	90
6.6.2	Adhäsiver Werkzeugverschleiß	91
6.6.3	Strategien zur Reduzierung des Verschleißes	92
6.7	Zusammenfassende Betrachtung	93
7	Formgebung und mechanische Eigenschaften	95
7.1	Umformbare Werkstoffe	95
7.2	Formgebung	96
7.2.1	Formgebungssystematik	96
7.2.2	Einstellung von definierten Wanddickenverläufen	98
7.2.3	Prozessgrenzen	102
7.2.4	Strategien zur Steigerung der erreichbaren Formgenauigkeiten	103
7.2.5	Herstellung von lokal definierten Wanddickenverläufen /-verteilungen	105
7.3	Oberflächen	111
7.3.1	Ausbildung von Oberflächeneigenschaften beim Reibdrücken	111
7.3.2	Oberflächenfehler	116
7.4	Einstellung der mechanischen Werkstoffeigenschaften	117
7.4.1	Härteeinstellung und -verteilung	118
7.4.2	Gefügeeinstellung und -ausrichtung	124
7.4.3	Zugfestigkeit R_m und Bruchdehnung A_t	131
7.5	Zusammenfassende Betrachtung	135
8	Energieeffiziente Herstellung von hybriden Bauteilen	139
8.1	Formschluss - Fügen durch Umformen	141
8.2	Stoffschluss - Fügen durch Schweißen	143

Inhaltsverzeichnis

8.2.1	Verschweißung durch Oberflächenvergrößerung - Prinzip des Kaltpressschweißens	144
8.2.2	Integration von Reibschweißvorgängen.....	150
8.3	Geometricoptimierung zur Herstellung von kraftschlüssigen und formschlüssigen Fügstellen.....	151
8.4	Energetische Betrachtung des Reibdrückens	152
8.5	Zusammenfassende Betrachtung.....	154
9	Zusammenfassung.....	157
	Literaturverzeichnis.....	161
	Anhang	171
	Abbildungsverzeichnis	175

Formelverzeichnis

μ	Reibungskoeffizient	
μ_0	Reibwert	
μ_G	Gleitreibungskoeffizient	
A/A_x	Querschnittsfläche / Fläche	mm ²
A_0	Oberfläche des Körpers	mm ²
$A_{\text{außen}}$	Flächenvergrößerung des Außenrohres	%
A_{Br}	Brennerfläche	cm ²
A_{e3}	Austenitisierungstemperatur	°C
A_D	Durchgangsfläche	mm ²
A_{innen}	Flächenvergrößerung des Innenrohres	%
A_K	Kontaktfläche Werkzeug	mm ²
A_k	Kontaktfläche	mm ²
A_{kv}	Kontaktfläche verschweißt	mm ²
$A_{Q,Fl}$	Querschnittsfläche im Flanscbereich	mm ²
A_R	Reibfläche	mm ²
A_t	Bruchdehnung	%
A_z	Oberflächenvergrößerung	%
$A_{z,\text{min}}$	erforderliche Oberflächenvergrößerung	%
b_B	Blechbreite	mm
b_x	Kavitätsbreite	mm
c	spezifische Wärmekapazität	J/kg*K
d	Durchmesser	mm
d_0	Rohr-/Rondendurchmesser	mm
D_0	Ausgangsdurchmesser (Bauteil)	mm
D_1	Durchmesser (nach Umformung)	mm
d_b	Bodendurchmesser	mm
d_f	Flanschdurchmesser	mm
d_i	Innendurchmesser	mm
d_t	Werkzeugdurchmesser	mm
d_x	Kavitätsdurchmesser	mm
F	Kraft	N
f	Vorschub	mm/s
F_a	Axialkraft	N
f_A	Vorschub Anreibphase	mm/s
f_{Auf}	Vorschub der Aufheiz- bzw. Anreibphase	mm/s
f_{Hx}	Vorschub der Halte- bzw. Umformphase	mm/s
F_{max}	maximale Prozesskräfte	N
F_N	Normalkraft	N

Formelverzeichnis

F_r	Radialkraft	N
F_R	Reibungskraft	N
F_{Reib}	Gleitreibungskraft	N
f_{rel}	bezogener Vorschub	mm/U
F_{Res}	resultierende Prozesskräfte	N
F_s	Kraft (Support)	N
F_t	Tangentialkraft	N
f_U	Vorschub Umformphase	mm/s
F_x	Kraft der X-Achse	N
F_y	Kraft der Y-Achse	N
F_z	Zugkraft	N
G	Genauigkeit des Maschinensystems	
h_R	Rillenhöhe	μm
h_x	Kavitätshöhe	mm
k	Schubfließspannung	N/mm ²
k_f	Fließspannung	N/mm ²
l	Abwicklungslänge	mm
l_0	Ausgangslänge Probe	mm
l_1	Umformlänge	mm
l_B	Blechlänge	mm
L_c	Grenzwellenlänge	mm
l_R	Rillenabstand	mm
L_t	Tast- / Messstrecke	mm
l_x	Kavitätslänge	mm
m	Reibfaktor	
M_B	Bremsmoment	Nm
M_R	Reibmoment	Nm
M_s	Martensitstarttemperatur	°C
M_x	Messtrecke /-punkte	
m_x	Masse des Stoffes	kg
n	Drehzahl	U/min
P	Probenanzahl	
P_{FL}	Primärflammenleistung des Brenners	kJ/cm ² *s
P_K	Kühlleistung	W
P_{ver}	verbrauchte Energie	kJ
P_W	Antriebsmoment	Nm
$P_{W_{1,le}}$	Wirkleistung der Leerfahrt	kJ
$P_{W_{1,Um}}$	Wirkleistung der Umformung	kJ
Q	Wärme	kJ
\dot{Q}/\dot{q}	Wärmestrom	W
\dot{Q}_{BA}	Wärmestrom in die Spannbacken/Gegenhalter	W

Q_{Br}	Wärmeenergie des Brenners	kJ
\dot{Q}_{WZ}	Wärmestrom in den Werkzeughalter	W
R	Rauheit	μm
r_0	Probenradius	mm
R_a	Mittenrauwerte	μm
r_b	Bauteilradius	mm
r_f	Flanschradius	mm
r_k	Kantenradius der Kavität	mm
R_m	Zugfestigkeit	MPa
R_{max}	Maximale Rautiefe	μm
r_p	Position der Kavität	mm
r_s	Werkzeugspitzenradius / Werkzeugkopfradius	mm
r_v	Beginn des Kontaktbereich zum Verschweißen (Radius)	mm
R_z	Mittlere Rautiefe	μm
s	Gleitreibungsweg	m
s_0	Rohr- / Blechausgangswanddicke	mm
s_1	Wanddicke (nach Umformung)	mm
s_B	Blechdicke	mm
s_f	Flanschdicke	mm
s_r	res. Wanddickenreduktion (freie Flanschumformung)	mm
β_0	Reibdruckverhältnis	
β_0°	Tordierungswinkel 0°	Grad
β_{WZ}	Werkzeugverdrehwinkel	Grad
β_{Xr}	Tordierungswinkel bei Flanschradius r	Grad
s_{Tx}	Werkzeugzustellung	mm
s_x	Spalt zwischen Werkzeugen / Wanddickenreduktion	mm
$s_{x,zul}$	zulässige Wanddickenreduktion	mm
t	Zeit	s
t_0	Prozesszeit am Prozessstart	s
t_{1-3}	Prozesszeitpunkt 1 - 3	s
t_A	Auslagerungszeit	Std.
t_{Ab}	Abkühlzeit	s
t_{Auf}	Aufheizzeit	s
T/T_x	Temperatur	$^\circ\text{C}$
T_B	Blechtemperatur	$^\circ\text{C}$
$t_{Br,Auf}$	Aufheizzeit des Werkstückes mittels Brenner	s
t_{end}	Prozesszeit bis Prozessende	s
t_{Hx}	Haltezeit in der Umformphase	s
t_k	Kontaktzeit	s
T_{max}	maximale Prozesstemperaturen	$^\circ\text{C}$
T_{min}	minimale Temperatur	$^\circ\text{C}$

Formelverzeichnis

T_P	Prozesstemperatur	°C
t_P	Prozesszeit	s
t_R	Rüstzeit	s
T_{RB}	Reibbackentemperatur	°C
T_{WS}	Werkstücktemperatur	°C
T_{WZ}	Werkzeugtemperatur	°C
$T_{WZ, Ein}$	Werkzeugtemperatur an der Einspannung	°C
$T_{WZ, Start}$	Werkzeugtemperatur zu Beginn des Umformprozesses	°C
U	Innere Energie	kJ
v_a	Abkühlgeschwindigkeit	K/s
V_{Form}	Form- / Konturvolumen	mm ³
v_R	Relativgeschwindigkeit	m/s
v_U	Umfangsgeschwindigkeit	m/s
v_Z	Ziehgeschwindigkeit	mm/min
$V_{\Delta s_x}$	Volumen der Wanddickenreduktion	mm ³
w	Umformweg / Werkzeugbahn	mm
W	Arbeit	kJ
W_{ad}	Adhäsionsarbeit	kJ
W_{Bruch}	Brucharbeit	kJ
W_{def}	Deformationsarbeit	kJ
W_R	Reibungsarbeit	kJ
x_{1-3}	Prozessstrategie 1 - 3	
x_s	Wanddickenabweichung	mm
Z	Achsenanzahl Maschinensystem	
α	Kontaktfläche (Reibmodell nach Wanheim/Bay)	mm ²
α_{th}	Wärmeausdehnungskoeffizient	10 ⁻⁶ /K
α_u	Wärmeübergangskoeffizient	W/m ² *K
α_{WU}	Werkzeugumlenkungswinkel	Grad
α_{WZ}	Werkzeugwinkel	Grad
Δs_x	resultierende Wanddickenreduktion in Bezug zu s_r und s_f	mm
ε	Emissionsgrad	
ϑ_A	Auslagerungstemperatur	°C
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(m*K)
π	Kreiszahl	
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante	W/m ² *K ⁴
σ_a	axiale Druckspannungen	N/mm ²
σ_N	Kontaktnormalspannung	N/mm ²
σ_r	radiale Zugspannungen	N/mm ²
τ_a	Scherspannung in Abhängigkeit von A_k	MPa
τ_{aB}	zulässige Scherfestigkeit	MPa
τ_{av}	Scherspannung in Abhängigkeit von A_{kv}	MPa

τ_R	Reibschubspannung	N/mm ²
$\dot{\varphi}$	Umformgeschwindigkeit	s ⁻¹
φ_s	Umformgrad (Blechdicke)	
ω_{WS}	Drehgeschwindigkeit Werkstück	rad/s
ω_{WZ}	Drehgeschwindigkeit Werkzeug	rad/s

Abkürzungsverzeichnis

<i>°C</i>	<i>Grad Celsius</i>
<i>µm</i>	<i>Mikrometer</i>
<i>µs</i>	<i>Mikrosekunde</i>
<i>Al</i>	<i>Aluminium</i>
<i>ASME</i>	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
<i>AW</i>	<i>Aluminium wrought (Aluminium - Knetlegierung)</i>
<i>CEC</i>	<i>Cyclic Extrusion Compression</i>
<i>CNC</i>	<i>Computerized Numerical Control</i>
<i>cRIO</i>	<i>CompactRIO</i>
<i>Cu</i>	<i>Kupfer</i>
<i>DIN</i>	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
<i>DMU</i>	<i>Druckmessumformer</i>
<i>EBSD</i>	<i>Electron backscatter diffraction / Elektronenrückstreubeugung</i>
<i>ECAP</i>	<i>Equal channel angular pressing</i>
<i>EN</i>	<i>Europäische Norm</i>
<i>FEM</i>	<i>Finite-Element-Methode</i>
<i>GFK</i>	<i>Glasfaserverstärkter Kunststoff</i>
<i>GOS</i>	<i>Grain Orientation Spread Analysis</i>
<i>GS</i>	<i>Rück- bzw. Gegenhalterseite</i>
<i>HTP</i>	<i>High Pressure Torsion</i>
<i>HV</i>	<i>Härte Vickers</i>
<i>I/O</i>	<i>Input/Output</i>
<i>ISO</i>	<i>International Organization for Standardization</i>
<i>JIS</i>	<i>Japan Industrial Standard</i>
<i>K</i>	<i>Kelvin</i>
<i>kfz</i>	<i>kubisch-flächenzentriert</i>
<i>kJ</i>	<i>Kilojoule</i>
<i>kN</i>	<i>Kilonewton</i>
<i>krit.</i>	<i>kritische</i>
<i>krz</i>	<i>kubisch-raumzentriert</i>
<i>KS</i>	<i>Kühl-/Schmierstoffversorgungssystem</i>
<i>kS/s</i>	<i>Kilosamples pro Sekunde</i>
<i>KTP</i>	<i>Kunststofftechnik Paderborn</i>
<i>kW</i>	<i>Kilowatt</i>
<i>Leg.</i>	<i>Legierung</i>
<i>LUF</i>	<i>Lehrstuhl für Umformende und Spanende Fertigungstechnik</i>
<i>LWK</i>	<i>Lehrstuhl für Werkstoffkunde</i>
<i>LWT</i>	<i>Lehrstuhl für Werkstofftechnologie</i>

Abkürzungsverzeichnis

<i>m</i>	<i>Meter</i>
<i>mA</i>	<i>Milliampere</i>
<i>mech.</i>	<i>mechanisch</i>
<i>min</i>	<i>Minute</i>
<i>min⁻¹</i>	<i>Umdrehungen pro Minute</i>
<i>ml</i>	<i>Milliliter</i>
<i>mm</i>	<i>Millimeter</i>
<i>MPa</i>	<i>Megapascal</i>
<i>ms</i>	<i>Millisekunde</i>
<i>mV</i>	<i>Millivolt</i>
<i>N</i>	<i>Newton</i>
<i>NE</i>	<i>Nicht-Eisenmetall</i>
<i>NI</i>	<i>National Instruments</i>
<i>NRW</i>	<i>Nordrhein-Westfalen</i>
<i>PS</i>	<i>Positionssensor</i>
<i>PVD</i>	<i>Physical Vapour Deposition</i>
<i>res.</i>	<i>resultierende</i>
<i>RS</i>	<i>Reibseite</i>
<i>RTU</i>	<i>Remote Terminal Unit</i>
<i>s</i>	<i>Sekunde</i>
<i>S/s</i>	<i>Samples pro Sekunde</i>
<i>SPD</i>	<i>Severe Plastic Deformation</i>
<i>SV</i>	<i>Steuerventil</i>
<i>TE</i>	<i>Twist Extrusion</i>
<i>TS</i>	<i>Thermisch-gespritzt</i>
<i>U</i>	<i>Umdrehungen</i>
<i>UFG</i>	<i>Ultrafeingefüge</i>
<i>V</i>	<i>Volt</i>
<i>W</i>	<i>Watt</i>
<i>WZ</i>	<i>Werkzeug</i>
<i>ZTU</i>	<i>Zeit-Temperatur-Umwandlung</i>