

Strangpressen partiell verstärkter Aluminiumprofile

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

von der Fakultät Maschinenbau

der Technischen Universität Dortmund

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Annika Friederike Foydl

aus

Salzkotten

Ostfildern, 2015

Vorsitzender der Prüfungskommission: Prof. Dr.-Ing. A. Menzel
Berichter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. A. E. Tekkaya
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. B.-A. Behrens
Priv.-Doz. Dr.-Ing. Dipl.-Inform. A. Zabel
Tag der mündlichen Prüfung: 15. Dezember 2014

Dortmunder Umformtechnik

Band 85

Annika Foydl

Strangpressen partiell verstärkter Aluminiumprofile

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Aachen 2015

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., 2014

Copyright Shaker Verlag 2015

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3875-0

ISSN 1619-6317

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Umformtechnik und Leichtbau der Technischen Universität Dortmund.

Ich bedanke mich bei Herrn Professor A. Erman Tekkaya und Herrn Professor Matthias Kleiner, den Institutsleitern des IUL, für das entgegen gebrachte Vertrauen und für die Möglichkeit diese Arbeit anzufertigen. Das Korreferat übernahmen dankeswerterweise Herr Professor Bernd-Arno Behrens, Inhaber des Instituts für Umformtechnik und Umformmaschinen der Leibniz Universität Hannover und Dr.-Ing. Andreas Zabel, Privatdozent am Institut für Spanende Fertigung der TU Dortmund. Zudem möchte ich mich bei den Herren der Prüfungskommission unter dem Vorsitz von Herrn Professor Andreas Menzel (TU Dortmund) für die angenehme Prüfung bedanken.

Weiterhin bedanke ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts, insbesondere bei der Abteilung Massivumformung, meinen Gruppenleitern, den technischen Mitarbeitern im Versuchsfeld, meinen studentischen Hilfskräften sowie meinen Diplomanden. Ohne die zahlreichen und wertvollen Diskussionen, die tatkräftige Unterstützung und die angenehme Arbeitsatmosphäre wäre das Erstellen dieser Arbeit sicherlich um einiges schwerer, wenn nicht unmöglich gewesen. Für die konstruktiven Rückmeldungen gilt mein besonderer Dank Herrn Dr.-Ing. Nooman Ben Khalifa. Ich bedanke mich herzlich für die gewissenhafte sprachliche Durchsicht und die organisatorische Hilfestellung bei den Damen des Sekretariats Nina Polak, Jeannette Brandt und Beate Ulm-Brandt.

Nicht zuletzt möchte ich Frau Dr.-Ing. Eva Beierle und Herrn Ulf Reinicke für die Durchsicht meiner Arbeit und den ein oder anderen kritischen Kommentar danken. Frau Professor Sabine Roller danke ich für die Hilfe bei der Fokussierung auf den Abschluss dieser Arbeit. Außerdem gilt mein Dank all meinen Freundinnen und Freunden für den Zuspruch, fürs Zuhören, Mutmachen und Ablenken während der frühen, mittleren und heißen Phase.

Ganz herzlich bedanke ich mich bei meiner Mutter Annette Foydl. Ohne ihre Unterstützung wäre mir dieser Bildungsweg nicht möglich gewesen. Mein besonderer Dank gilt meiner Mutter, meiner Schwester Theresa Foydl, ihrem Verlobten Lukas Lürwer und meiner Nichte Frieda für die tatkräftige und seelische Unterstützung sowie für die Kraft und den Rückhalt während der gesamten Zeit.

Abstract

Stricter environmental regulations, such as the EU emissions law, and the shortage of fossil fuels require lighter products with better technical characteristics in the transportation sector. Therefore, a conflict of objectives between cost savings, on the one hand, and maintaining safety standard, on the other hand, occurs in automotive engineering. One way to save weight is the application of lightweight materials. However, in order to design components with a better effective weight, the range of extrusion processes to produce lightweight materials will be extended by the novel discontinuously composite extrusion which is developed in the present work and investigated thoroughly. This process allows combining conventional aluminum billets with high strength materials by the usage of conventional, not specially treated extrusion dies. It offers the possibility of embedding discontinuous reinforcements in the extrudate to manufacture tailored profiles or products. For this, aluminum billets are drilled in order to create a hole for inserting the high-strength material and prepare the billet for co-extrusion.

Aim of this work is the characterization of the discontinuous composite extrusion process by identifying the process limits and determining rules in order to predict the position of the reinforcing elements in the extrudates. Accordingly, later it is possible to design the billets so that the reinforcing elements are arranged in the extrudate at defined places. In order to achieve these goals, experimental, analytical, and numerical methods are utilized.

An experimental and numerical analysis of the material flow shows that the reinforcing elements are carried by adhesion between the reinforcing element and the aluminum matrix. The reinforcing elements, which are face to face in the billet initially, are separated by the occurring gradient of velocity in the aluminum. Subsequently, the aluminum flows between the reinforcing elements and closes the gap. During the steady-state process the reinforcing elements are distributed regularly in the extrudates. This distance in the direction of extrusion between the elements can be calculated with the effective extrusion ratio R_{eff} , which complies with 77 % of the common extrusion ratio. This applies to both centrally and eccentrically positioned reinforcing elements. The radial location of the reinforcing elements is depended on the ratio of the cross-section area, the initial position in the billet, and the presence of one or more eccentric holes in the billet and can be calculated by the analytical model. In addition to well embedded reinforcing elements, three characteristic failure cases – cavitation, local plastification, and rotation – are identified in terms of the embedding. Using the example of cylindrical reinforcing elements, two process windows can be determined for centrally and eccentrically positioned reinforcing elements. At the end it is shown that further processing of the partially reinforced profiles is possible by hybrid forging. In this case, a connecting rod is utilized as a demonstrator.

Kurzzusammenfassung

Die Verknappung fossiler Energieträger und neue Umweltbestimmungen im Bereich des Emissionsschutzes erfordern gerade im Transportsektor leichtere Produkte mit zugleich besserem technischen Eigenschaften. Zudem ist auch das Einhalten der Sicherheitsstandards maßgebend, sodass es zu einem Zielkonflikt kommt. Um Komponenten mit besserem effektiven Gewicht zu designen, wird das Portfolio an Strangpressprozessen durch das neuartige partielle Verbundstrangpressen, welches innerhalb dieser Arbeit entwickelt und gründlich untersucht wird, erweitert. Durch diesen Prozess können Aluminiumstrangpressblöcke mit hoch festen Werkstoffen unter Verwendung von konventionellen Matrizen kombiniert werden. Es bietet die Möglichkeit Verstärkungselemente diskontinuierlich in den Strang einzubringen. Hierfür werden die Blöcke mit Bohrlöchern versehen und hoch feste Werkstoffe in Form von z. B. Zylinder eingesetzt.

Ziel der Arbeit ist die Charakterisierung des partiellen Verbundstrangpressens indem Prozessfenster identifiziert und Regeln aufgestellt werden, die es ermöglichen die Position der Verstärkungselemente im Strang vorhersagen zu können. Es kommen dazu experimentelle, analytische und numerische Methoden zum Einsatz.

Die experimentelle und numerische Analyse des Werkstoffflusses zeigen, dass die Verstärkungselemente durch die Haftung zwischen Verstärkungselement und Aluminiummatrix mitgezogen werden. Die Verstärkungselemente, welche zunächst Stirnfläche an Stirnfläche im Block liegen, trennen sich durch den auftretenden Geschwindigkeitsgradienten im Aluminium. Anschließend fließt das Aluminium zwischen die Verstärkungselemente, wodurch die entstandenen Lücken geschlossen werden. Während des quasistationären Prozesses verteilen sich die Verstärkungselemente regelmäßig im Strang. Der Abstand in Pressrichtung zwischen den Verstärkungselementen kann mit einem effektiven Pressverhältnis R_{eff} berechnet werden. Dies entspricht 77 % des nominellen Pressverhältnisses. Diese Berechnung ist für zentrisch und exzentrisch positionierte Verstärkungselemente gültig. Die radiale Lage der Verstärkungselemente lässt sich in Abhängigkeit vom Querschnittsflächenverhältnis, einer paarweisen oder einzelnen Anordnung der Verstärkungselemente und der Lage im Block mit einer analytischen Betrachtung gut vorausberechnen. Darüber hinaus konnten neben vollständig im Profil eingebetteten Verstärkungselementen drei charakteristische Versagensfälle – Hohlrumbildung, lokale Plastifizierung und Rotation – in Bezug auf die Einbettung identifiziert werden. Am Beispiel von zylinderförmigen Verstärkungselementen sind zwei Prozessfenster für zentrisch und exzentrisch positionierte Verstärkungselemente entstanden. Am Schluss der Arbeit konnte gezeigt werden, dass eine Weiterverarbeitung der partiell verstärkten Profile durch das Hybridschmieden möglich ist. Als Demonstrator diente in diesem Fall eine Pleuelstange.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	xi
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Aluminiumstrangpressen.....	3
2.1.1 Direkte Strangpressverfahren und Presskraftentwicklung	3
2.1.2 Werkstofffluss beim direkten Aluminiumstrangpressen.....	6
2.1.3 Beschreibung des Strangpressens mit der Finite-Elemente-Methode.....	11
2.1.4 Analytische Beschreibung des Werkstoffflusses	14
2.2 Strangpressen von Verbundprofilen.....	17
2.2.1 Verbunderzeugung innerhalb des Strangpressprozesses.....	18
2.2.2 Verbunderzeugung durch Pressblockpräparation.....	22
2.3 Hybridschmieden	27
2.4 Zusammenfassung des Stands der Technik	29
3 Zielsetzung und Vorgehensweise	31
4 Charakterisierung des partiellen Verbundstrangpressens	33
4.1 Verfahrensbeschreibung.....	33
4.2 Aufbau des Simulationsmodells.....	36
4.3 Werkstofffluss im Rezipienten.....	38
4.4 Werkstofffluss im Profil.....	43
4.5 Fazit zur Verfahrenscharakterisierung	46
5 Axiale Verstärkungselementlage bei zentrischer Verstärkung	47
5.1 Untersuchungen zur axialen Verstärkungselementlage	47
5.2 Analytische Vorhersage der Verstärkungselementabstände	58
5.3 Validierung der analytischen Abstandsberechnung.....	61
5.4 Fazit zur zentrischen Verstärkungselementlage.....	68
6 Verstärkungselementlage bei exzentrischer Verstärkung	71
6.1 Analytische Betrachtung der Verstärkungselementposition.....	71
6.2 Experimentelle Untersuchungen zur radialen Lage.....	76
6.2.1 Kugelverstärkte Rundstangen.....	76
6.2.2 Zylinderverstärkte Rundstangen.....	81
6.3 Einfluss der Exzentrizität auf die axiale VE-Position.....	87
6.4 Fazit zur exzentrischen Verstärkungselementlage.....	91
7 Einbettung und Ausrichtung der Verstärkungselemente	93
7.1 Fehlerfreie Einbettung.....	93

7.2	Versagensfälle bei zylinderförmigen Verstärkungselementen	95
7.2.1	Hohlraumbildung vor den Verstärkungselementen.....	95
7.2.2	Lokale Plastifizierung der Verstärkungselemente.....	101
7.2.3	Rotation der Verstärkungselemente	103
7.3	Prozessfenster für zylinderförmige Verstärkungselemente	107
7.4	Zusammenfassung zur Verstärkungselementeinbettung.....	111
8	Weiterverarbeitung durch das Verbundschmieden	113
8.1	Rotationssymmetrisches Hybridbauteil	113
8.2	Hybridpleuel.....	116
8.2.1	Auslegung und Analyse des Halbzeugs	116
8.2.2	Schmieden des Halbzeugs	119
8.3	Zusammenfassung.....	120
9	Zusammenfassung und Ausblick	123
9.1	Zusammenfassung der vorliegenden Arbeit	123
9.2	Ausblick auf zukünftige Forschungsfelder	124
	Literaturverzeichnis	127
	Anhang A	137
	Anhang B	141
	Lebenslauf	153

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Beschreibung
a	mm	Axialer Abstand der Verstärkungselemente im Strang
a_V	mm	Axialer Abstand zweier quasi parallel austretender Verstärkungselemente
A	mm ²	Fläche
A_0	mm ²	Rezipientenquerschnittsfläche
A_S	mm ²	Strangquerschnittsfläche
A_{sinh}		Materialkonstante Fließspannungsbeschreibung
A_{VE}	mm ²	Verstärkungselementfläche
b	mm	Axialer Abstand der Verstärkungselemente im Block
b_M	mm	Matrizenbreite
c	mm	Versatz der Mittelpunkte
c_{max}	mm	Maximale Kuppenhöhe der Zylinderstifte nach DIN 7
C	mm ³ /s	Hilfswert im Modell nach Avitzur (1968)
d_0	mm	Blockdurchmesser
d_{DS}	mm	Durchmesser der Dornstange
d_I	mm	Stangendurchmesser, innen
d_M	mm	Matrizendiagonale
d_S	mm	Strangdurchmesser, außen
d_{VE}	mm	Verstärkungselementdurchmesser
F_{ST}	N	Presskraft
F^{id}	N	Ideelle Umformkraft
F^{ReibR}	N	Reibkraft am Rezipienten
F^{ReibU}	N	Reibkraft an der toten Zone

Zeichen	Einheit	Beschreibung
F^{SchiebU}	N	Umlenkkraft in der Umformzone
h_1	mm	Höhe der ersten Matrizenverengung
h_{FF}	mm	Führungsflächenlänge
h_{M}	mm	Matrizenhöhe
H_0	mm	Radiale Verstärkungselementposition im Rezipienten
H_1	mm	Radiale Verstärkungselementposition im Strang
H_{B}	mm	Radiale Verstärkungselementposition im Block
H_{R}	mm	Überdeckung der Verstärkungselemente im Strang
H_{VE}	mm	Radialer Verstärkungselementabstand
k		Begrenzende Dehnrate
k_{f}	N/mm ²	Fließspannung
l_0	mm	Blockeinlegelänge
l_1	mm	Startposition des ersten Verstärkungselements
l_{DIN}	mm	Maximale Gesamtlänge eines Zylinderstifts nach DIN 7
$l_{\text{gestaucht}}$	mm	Länge des angestauchten Blocks
l_{PR}	mm	Länge des Pressrests
l_{S}	mm	Stranglänge
l_{VE}	mm	Verstärkungselementlänge
l_{Zw}	mm	Zwischenstücklänge
m		Reibkoeffizient Trescamodell
n		Verfestigungsexponent
P_{i}	W	Innere Umformleistung
P_{a}	W	Leistung an Flächen mit Geschwindigkeitsdiskontinuitäten
Q	J/mol	Aktivierungsenergie

Zeichen	Einheit	Beschreibung
r	mm	Kegelhöhe im Modell nach Avitzur (1968)
r_0	mm	Blockradius
r_1	mm	Länge der Umformzone im Modell nach Avitzur (1968)
r_A	mm	Länge des Kegels im Modell nach Avitzur (1968)
r_f	mm	Länge der Kegelspitze im Modell nach Avitzur (1968)
r_S	mm	Strangradius
r_{VE}	mm ²	Verstärkungselementkantenradius
R		Pressverhältnis
R_0	mm	Rezipientenradius
R_{eff}		Effektives Pressverhältnis
R_G	J/mol/K	Ideale Gaskonstante
s	mm	Weg
s_A	mm	Hilfsstrecke zur Erstellung des Prop.-faktormodells (Strang)
s_B	mm	Hilfsstrecke zur Erstellung des Prop.-faktormodells (Strang)
s_C	mm	Hilfsstrecke zur Erstellung des Prop.-faktormodells (Strang)
s_{ST}	mm	Stempelweg
s_{FE}	mm	Finite-Element-Kantenlänge
s_{Stauch}	mm	Stauchweg
S_A	mm	Hilfsstrecke zur Erstellung des Prop.-faktormodells (Block)
S_B	mm	Hilfsstrecke zur Erstellung des Prop.-faktormodells (Block)
S_C	mm	Hilfsstrecke zur Erstellung des Prop.-faktormodells (Block)
t	s	Zeit
t_f	s	Zeit, die ein Punkt in der Umformzone verbleibt
T	°C	Temperatur

Zeichen	Einheit	Beschreibung
T_0	°C	Ofen- und initiale Blocktemperatur
T_{Presse}	°C	Matrizen- und Rezipiententemperatur
u	mm	Verschiebung des Werkstoffs in der Umformzone
\dot{u}	mm/s	Geschwindigkeit des Werkstoffs in der Umformzone
\dot{u}_r	mm/s	Geschwindigkeit des Werkstoffs in der Umformzone nach Avitzur (1968)
v	mm/s	Geschwindigkeit
v_0	mm/s	Stempelgeschwindigkeit
v_s	mm/s	Stranggeschwindigkeit
x_B	mm	Laufvariable der axialen Verstärkungselementlage im Block
x_S	mm	Laufvariable der axialen Verstärkungselementlage im Strang
\bar{x}_B		Spezifische Verstärkungselementposition im Block
\bar{x}_S		Spezifische Verstärkungselementposition im Strang
α	°	Schwerwinkel
α_{sinh}		Materialkonstante Fließspannungsbeschreibung
β	°	Rotationswinkel der Verstärkungselemente
φ_{max}		Mittlerer Umformgrad
$\dot{\varphi}$		Dehnrate
γ	°	Matrizensteigungswinkel
θ	°	Radiale Laufvariabel im Modell nach Avitzur (1968)
μ		Reibkoeffizient Coulombmodell
Γ	mm ²	Flächen mit Geschwindigkeitsdiskontinuitäten

Indizes

Index	Beschreibung
0	Anfänglich / Initial
B	Block
S	Strang
ST	Stempel
VE	Verstärkungselement

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
AZ	Magnesiumlegierung
DC	Tiefziehstahl
DIN	Deutsches Institut für Normung
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
EN AW	Euronorm Aluminium-Knetlegierung
FEM	Finite-Elemente-Methode
FE	Finite Elemente
HRC	Härteprüfung nach Rockwell
ISO	International Organization for Standardization
LOM	Auflichtmikroskop
NE	Nichteisen
REM	Raster-Elektronen-Mikroskop
SiC	Siliciumcarbid
Gr	Titan-Grad
v	Variante

VE Verstärkungselement