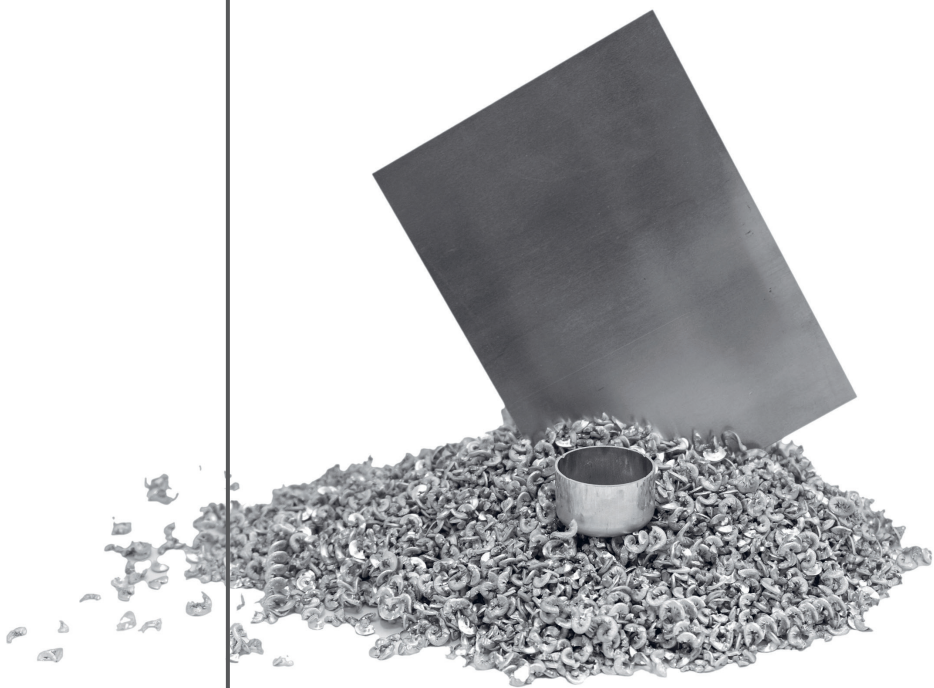


André Schulze

Bleche aus stranggepressten Aluminiumspänen

Herstellung, Charakterisierung und Umformbarkeit



Bleche aus stranggepressten Aluminiumspänen: Herstellung, Charakterisierung und Umformbarkeit

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

der Fakultät Maschinenbau
der Technischen Universität Dortmund
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

André Schulze, M. Sc.

aus

Dortmund

Dortmund, 2022

Vorsitzende der Prüfungskommission: Jun.-Prof. Dr.-Ing. Anne Meyer
Berichter: Prof. Dr.-Ing. A. Erman Tekkaya
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Hans Jürgen Maier
PD. Dr.-Ing. Andreas Zabel
Tag der mündlichen Prüfung: 22. November 2022

Dortmunder Umformtechnik

Band 118

André Schulze

Bleche aus stranggepressten Aluminiumspänen

Herstellung, Charakterisierung und Umformbarkeit

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Düren 2023

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., 2022

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8968-4

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. An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich sowohl fachlich als auch menschlich unterstützt und somit entscheidend zum Gelingen der vorliegenden Arbeit beigetragen haben.

Für die Möglichkeit zur Promotion und das mir entgegengebrachte Vertrauen möchte ich mich in besonderem Maße beim Institutsleiter und Betreuer meiner Dissertation Herrn Professor A. Erman Tekkaya bedanken. Die zahlreichen Gespräche und Diskussionen, im Rahmen von Vorträgen und Veröffentlichungen, trugen maßgeblich zu meiner persönlichen Entwicklung und zum erfolgreichen Abschluss meines Promotionsvorhabens bei. Herrn Professor Hans Jürgen Maier danke ich für die Übernahme des Korreferates und den fachlichen Austausch. Für die Mitwirkung als Mitberichter und für die Übernahme der Vorsitzenden der Prüfungskommission danke ich zudem Herrn Dr.-Ing. Andreas Zabel und Frau Juniorprofessorin Anne Meyer. Der Deutschen Forschungsgemeinschaft danke ich für die Förderung des Projektes (Projektnummer 437426733), in dessen Rahmen die zugrundeliegenden Forschungsarbeiten entstanden sind.

Ich bedanke mich bei allen derzeitigen und ehemaligen Kolleg*innen des IULs für die angenehme Arbeitsatmosphäre und die abteilungsübergreifende Hilfsbereitschaft. Insbesondere gilt mein Dank Johannes Gebhard, Patrick Kotzyba, Robin Gitschel, Florian Kneuper, Alessandro Selvaggio, Joshua Grodotzki und Rickmer Meya, für die konstruktiven Diskussionen und hilfreichen Kommentare während meiner Promotion. Ebenfalls danke ich Christoph Dahnke in seiner Funktion als Leiter der Abteilung Massivumformung, Stefan Ossenkemper und Martin Schwane, die mich in den frühen Phasen meiner Forschungsarbeiten am IUL unterstützt haben. Besonders hervorheben möchte ich Oliver Hering und Felix Kolpak mit denen ich mich täglich fachlich sowie freundschaftlich ausgetauscht habe. Darüber hinaus danke ich meiner Abteilung der Massivumformung für den Zusammenhalt und den harmonischen Umgang, auch außerhalb des IULs. Weiterhin möchte ich mich bei allen technischen und administrativen Kolleg*innen für die stetige Unterstützung und Hilfsbereitschaft bedanken. Hervorheben möchte ich Frank Volk und Dirk Hoffmann für ihren Einsatz im experimentellen Bereich.

Mein sehr herzlicher Dank gilt meiner Familie und meinen Freuden. Ich danke meinen Eltern Juliane und Bodo, die mir meinen Werdegang ermöglicht und mich bei allen Entscheidungen beraten haben und deren Unterstützung in allen Bereichen des Lebens ich mir jederzeit sicher sein kann. Mein besonderer Dank gilt meiner Partnerin Ricarda, die mir verständnisvoll zur Seite steht und deren Rückhalt mich stets getragen hat.

Abstract

The steady global economic growth has led to an increasing demand for aluminium and its products in various industrial sectors. The extraction of aluminium and its further processing into products is associated with high energy demand and greenhouse gas emissions. In addition, the consequences of climate change lead to increasing demands in energy efficiency, emission reduction and resource conservation. Thus, the setting of targets to reduce greenhouse gas emissions and becoming climate-neutral is an integral part of shaping the future of industry and politics.

To meet these targets, the direct recycling of aluminium without remelting has gained attention in recent years. This so called solid state recycling, can offer significant environmental benefits in terms of energy and materials savings. By direct hot extrusion, aluminium chips can be directly processed into semi-finished products or profiles requiring relatively low energy and avoiding material loss. Previous research shows that the process allows high quality output if an appropriate die design and process parameter control are employed. Nevertheless, the direct processing of aluminium chips into sheet metal products has not yet been investigated. This would expand the field of direct recycling since the majority of the produced aluminium is fabricated to rolled products and sheets.

A new process chain consisting of hot extrusion of aluminium chips to a cylindrical open profile, with subsequent flattening and rolling for the production of sheets based on AA6060 aluminium chips is presented. The physical processes during chip welding at the individual process steps are investigated and a prediction of the weld quality is calculated using an analytical model and numerical methods. The mechanical properties as well as the microstructure of the chip-based sheets are examined and the results are compared with those obtained from sheets based on conventional cast billets. Further processing of the sheets to bent components and deep drawn cups by bending and deep drawing is carried out to determine their capability for subsequent forming processes. The results regarding the properties of the chip-based sheets, show a difference of 2 – 10 % compared to the cast-based sheets. The analysis of the bent components or deep-drawn cups shows no significant differences between the ones made of chips and those from cast material. It can be stated that their capability for further plastic forming operations is equal which makes the new process route a resource-efficient alternative for the production of aluminium sheet products.

Kurzzusammenfassung

Das stetige globale Wirtschaftswachstum hat zu einer steigenden Nachfrage nach Aluminium und seinen Produkten in verschiedenen Industriezweigen geführt. Die Gewinnung von Aluminium und seine Weiterverarbeitung zu Produkten ist dabei mit einem hohen Energiebedarf und Treibhausgasemissionen verbunden. Andererseits führen die Folgen des Klimawandels zu verstärkten Anstrengungen in den Bereichen Energieeffizienz, Emissionsminderung und Ressourcenschonung. Die Festlegung von Zielen zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen und zur Klimaneutralität ist daher ein wesentlicher Bestandteil der Zukunftsgestaltung von Industrie und Politik.

Um diese Ziele zu erreichen, hat das direkte Recycling von Aluminium ohne Wiedereinschmelzen in den letzten Jahren stetig an Aufmerksamkeit gewonnen. Diese allgemein als „*Solid State Recycling*“ bezeichneten Verfahren können erhebliche Umweltvorteile in Form von Energie-, Treibhausgas- und Materialeinsparungen bieten. Durch das Spänestrangpressen können Aluminiumspäne mit geringem Energieaufwand und unter Vermeidung von Materialverlusten direkt zu Halbzeugen oder Profilen verarbeitet werden. Forschungsarbeiten zeigen, dass das Verfahren eine hohe Produktqualität ermöglicht, unter Beachtung einer geeigneten Werkzeugkonstruktion und der Kontrolle der Prozessparameter. Die direkte Verarbeitung von Spänen zu Aluminiumblechen ist jedoch noch nicht untersucht worden. Dies würde den Bereich des direkten Recyclings erweitern, da der Großteil des produzierten Aluminiums zu Blechen und Walzprodukten verarbeitet wird.

Eine neue Prozesskette, bestehend aus dem Strangpressen von Aluminiumspänen zu einem zylindrischen offenen Profil und dem anschließendem Aufweiten und Walzen, zur Herstellung von Blechen aus EN AW-6060 Aluminiumspänen, wird vorgestellt. Die physikalischen Vorgänge bei der Verschweißung der Späne in den einzelnen Prozessschritten werden untersucht und eine Vorhersage der Verschweißqualität mit Hilfe eines analytischen Modells und numerischer Methoden berechnet. Die mechanischen Eigenschaften sowie die Mikrostruktur der spänebasierten Bleche werden untersucht und die Ergebnisse mit denen von Blechen auf Basis von konventionellen Gussblöcken verglichen. Die Bleche werden durch Biegen und Tiefziehen zu Biegeteilen und Näpfen weiterverarbeitet, um ihre Umformbarkeit zu ermitteln. Die Ergebnisse zeigen leichte Unterschiede in den Eigenschaften der spänebasierten Bleche, die eine Differenz von 2 – 10 % zu den gussbasierten Blechen haben. Die Analyse der Biegeteile bzw. der tiefgezogenen Näpfe zeigt keine signifikanten Unterschiede zwischen denen aus Spänen und denen aus Gussmaterial. Es kann festgestellt werden, dass ihr Potential zur weiteren plastischen Umformung gleich ist, was die neue Prozessroute zu einer ressourcenschonenden Alternative für die Herstellung von Produkten aus Aluminiumblechen macht.

Inhaltsverzeichnis

Vorabveröffentlichung von Inhalten	iii
Formelzeichen und Abkürzungen	v
1 Einleitung	1
2 Stand der Kenntnisse	3
2.1 Strangpressen	3
2.1.1 Verfahrensprinzip	3
2.1.2 Prozesssimulation	5
2.2 Spänestrangpressen	7
2.2.1 Einfluss der Prozessparameter.....	10
2.2.2 Eigenschaften der Profile	17
2.2.3 Grundlagen der Festkörperverschweißung.....	20
2.2.4 Weitere Verfahren zum direkten Aluminiumrecycling.....	24
2.3 Aluminiumblechherstellung.....	27
2.3.1 Walzen.....	27
2.3.2 Weiterverarbeitung und Produkte	29
2.4 Strangpressen und Walzen	32
2.5 Energieverbrauch und Emissionen.....	34
2.6 Fazit.....	36
3 Zielsetzung	37
4 Blechherstellung durch Strangpressen, Aufweiten und Walzen	39
4.1 Direktes Walzen von Aluminiumspänen	39
4.2 Neue Prozesskette zur Herstellung spänebasierter Bleche	40
4.3 Strangpressen von Aluminiumspänen.....	41
4.3.1 Späneherstellung und -charakterisierung	41
4.3.2 Blockherstellung und -charakterisierung.....	43
4.3.3 Homogenisierung der Blöcke	46
4.3.4 Werkzeugdesign	48
4.3.5 Prozessparameter	56
4.3.6 Ergebnisse der Strangpressversuche	57
4.4 Aufweiten.....	60
4.5 Walzen.....	64
4.6 Wärmebehandlung	65
4.7 Fazit.....	67
5 Analytische und numerische Vorhersage der Späneverschweißung	69
5.1 Berechnung der notwendigen Oberflächenaufweitung.....	69
5.2 Verschweißmodell.....	75

5.3	Berechnung und Analyse der Verschweißqualität	81
5.3.1	Verschweißqualität beim Strangpressprozess	81
5.3.2	Verschweißqualität beim Walzen	89
5.4	Validierung des Verschweißmodells	92
5.5	Fazit	96
6	Einfluss der Prozessschritte auf die Blecheigenschaften	97
6.1	Einfluss des Strangpressens	99
6.1.1	Mechanische Eigenschaften der Profile	99
6.1.2	Mikrostruktur der Profile	106
6.2	Einfluss des Aufweitens und Walzens	112
6.2.1	Mechanische Eigenschaften der Bleche	112
6.2.2	Mikrostruktur der Bleche	118
6.3	Einfluss der Wärmebehandlung	122
6.3.1	Mechanische Eigenschaften der Bleche	123
6.3.2	Mikrostruktur der Bleche	127
6.4	Fazit	131
7	Umformbarkeit spänebasierter Bleche	133
7.1	Herstellung von Bauteilen durch Freibiegen	133
7.2	Analyse der Anisotropie	139
7.3	Herstellung von Bauteilen durch Tiefziehen	142
7.4	Fazit	147
8	Zusammenfassung und Ausblick	149
8.1	Zusammenfassung	149
8.2	Ausblick	150
	Literaturverzeichnis	153
	Anhang A: Simulation der Spänekompaktierung	167
	Anhang B: Simulation des Strangpressprozesses	169
	Anhang C: Bestimmung des Grenzwerts der Verschweißqualität	171

Vorabveröffentlichung von Inhalten

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

- Schulze, A., Kolpak, F., Hering, O., Tekkaya, A. E., 2019. Weld Quality Determination in Aluminium Chip Extrusion. In: Proceedings of the European Aluminium Congress. Düsseldorf.
- Schulze, A., Hering, O., Tekkaya, A. E., 2021. Production and Subsequent Forming of Chip-Based Aluminium Sheets Without Remelting. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology 9, S. 1035–1048.
- Schulze, A., Hering, O., Tekkaya, A. E., 2021. Welding of Aluminium in Chip Extrusion. In: Daehn, G., Cao, J., Kinsey, B., Tekkaya, A. E., Vivek, A., Yoshida, Y., Forming the Future 17. Springer International Publishing, S. 139–147.
- Schulze, A., Dahnke, C., Tekkaya, A. E., 2022. Production of Sheets by Hot Extrusion of Aluminum Chips. In: Proceedings of the International Aluminum Extrusion Technology Seminar. Orlando.
- Kolpak, F., Schulze, A., Dahnke, C., Tekkaya, A. E., 2019. Predicting weld-quality in direct hot extrusion of aluminium chips. Journal of Materials Processing Technology 274, S. 116–294.

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Beschreibung
a_c	mm	Spanlänge
a_p	mm	Schnitttiefe
A	%	Bruchdehnung
A_B	mm ²	Blechquerschnitt
A_G	%	Gleichmaßdehnung
A_R	mm ²	Querschnittsfläche des Rezipienten
A_{sinh}	-	Reziproker Dehnratenfaktor
A_{Span}	mm ²	Spanoberfläche
b	mm	Blechbreite
b_c	mm	Spanbreite
b_{Korn}	µm	Kornbreite
$b_{Profilöffnung}$	mm	Breite der Profilöffnung
b_{ss}	mm	Breite der Spänescheibe
b_{Walzen}	mm	Walzenbreite
d	mm	Durchmesser
d_0	mm	Rondendurchmesser
$d_{0,max}$	mm	Maximaler Rondendurchmesser
d_a	mm	Außendurchmesser
d_{Block}	mm	Blockdurchmesser
d_i	mm	Innendurchmesser
d_{Korn}	µm	Korndurchmesser
$d_{Pressenöffnung}$	mm	Durchmesser der Pressenöffnung
$d_{Rezipient}$	mm	Rezipientendurchmesser

Zeichen	Einheit	Beschreibung
d_{Stempel}	mm	Tiefziehstempeldurchmesser
d_{Walzen}	mm	Walzendurchmesser
e	nm	Rissbreite zwischen aufgebrochenen Oxiden
e_1	mm	Länge der 1. Ellipsenhalbachse
e_2	mm	Länge der 2. Ellipsenhalbachse
f	mm	Vorschub
F	MN	Presskraft
$F_{\text{Niederhalter}}$	kN	Niederhalterkraft
h_{Stempel}	mm	Stempelzustellung
h	mm	Napfhöhe
k_f	MPa	Fließspannung
l_{Block}	mm	Blocklänge
l_c	mm	Spanlänge
l_{CW}	mm	Spanlänge Würfel
l_e	mm	Elementkantenlänge
$l_{\text{Führungsfläche}}$	mm	Länge der Führungsfläche
l_{Korn}	μm	Kornlänge
l_{nf}	mm	Länge der neutralen Profidfaser
l_{ss}	mm	Länge der Spänescheibe
n	-	Verfestigungsexponent
$n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$	mol	Stoffmenge Aluminiumoxid
n_{O_2}	mol	Stoffmenge Sauerstoff
$n_{\text{Späne}}$	-	Anzahl der Späne
m	-	Scherreibwert
$M_{\text{Al}_2\text{O}_3}$	kg/mol	Molare Masse Aluminiumoxid

Zeichen	Einheit	Beschreibung
M_{O_2}	kg/mol	Molare Masse Sauerstoff
p	MPa	Kontaktdruck
p_{ex}	MPa	Mikroextrusionsdruck
Q	J/mol	Aktivierungsenergie
R	-	Pressverhältnis
r_c	mm	Spanradius Kugel
r_G	mm	Gesenkkantenradius
R_G	J/mol·K	Universelle Gaskonstante
r_m	mm	Mittlerer Biegeradius
R_m	MPa	Zugfestigkeit
r_{min}	mm	Minimaler Biegeradius
$R_{p0,2}$	MPa	Dehngrenze
r_{nf}	mm	Radius der neutralen Profilfaser
r_{St}	mm	Stempelradius
R_{1C}	mm	Spankreisausschnitt
s	mm	Blechdicke
s_c	mm	Spandicke
s_{Profil}	mm	Wanddicke des Profils
s_{ss}	mm	Dicke der Spänescheibe
t_{Ox}	nm	Oxidschichtdicke
T	°C	Temperatur
T_{Block}	°C	Blockeinsatztemperatur
T_{KA}	°C	Kaltauslagerungstemperatur
T_{LG}	°C	Lösungsglühtemperatur
$T_{Rezipient}$	°C	Rezipiententemperatur
$T_{Werkzeug}$	°C	Werkzeugtemperatur

Zeichen	Einheit	Beschreibung
T_{WG}	°C	Weichglühtemperatur
t	-	Zeit
U	Volt	Elektrische Spannung
U_E	mm	Ellipsenumfang
U_{Walzen}	min ⁻¹	Drehzahl
v_c	m/min	Schnittgeschwindigkeit
v_P	mm/s	Profilgeschwindigkeit
$v_{Stempel}$	mm/s	Stempelgeschwindigkeit
v_{Ziehen}	mm/s	Ziehstempelgeschwindigkeit
$V_{Al_2O_3}$	mm ³	Volumen Aluminiumoxid
V_{O_2}	mm ³	Volumen Sauerstoff
V_{Span}	mm ³	Spanvolumen
w	mm	Gesenkbreite
y	mm	Neutrale Faser
Y	-	Anteil der freigelegten Oberfläche
Y'	-	Grenzwert zur Freilegung der Oberfläche
z	mm	Zipfelhöhe
α	W/m ² ·K	Wärmeübergangskoeffizient
α_{sinh}	-	Materialkonstante
β	-	Ziehverhältnis
β_{max}	-	Grenzziehverhältnis
ε	%	Technische Dehnung
$\dot{\varepsilon}$	s ⁻¹	Dehnrate
ε_W	-	Wahre Dehnung

Zeichen	Einheit	Beschreibung
ε_h	-	Bezogene Stichabnahme
η	-	Oberflächenaufweitung
$\bar{\eta}$	-	Korrigierte Oberflächenaufweitung
θ	K	Temperatur
λ	nm	Breite der Oxidfragmente
μ	-	Reibkoeffizient
ν	-	Grenzdehnung
ζ	-	Oberflächenanteil zur Umwandlung des vorhandenen Sauerstoffs in Oxid
ρ	g/cm ³	Dichte
$\rho_{\text{Al}_2\text{O}_3}$	g/cm ³	Dichte Aluminiumoxid
ρ_B	-	Blockdichte
ρ_{O_2}	g/cm ³	Dichte Sauerstoff
ρ_{rel}	-	Relative Blockdichte
σ	MPa	Technische Spannung
σ_b	MPa	Verschweißfestigkeit
σ_n	MPa	Normalspannung
σ_w	MPa	Wahre Spannung
τ	MPa	Scherspannung
φ	-	Umformgrad
φ_b	-	Breitenumformgrad
φ_l	-	Längenumformgrad
φ_s	-	Dickenumformgrad
φ_v	-	Vergleichsumformgrad
φ_G	-	Umformgrad der Gleichmaßdehnung
ψ	-	Mit Oxid bedeckter Anteil der Oberfläche

Indizes

Index	Beschreibung
0	Initialwert
1	Endwert

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
CEC	Cyclic Extrusion Compression
CTP	Compressive Torsion Process
DSR	Differential Speed Rolling
ECAP	Equal Channel Angular Pressing
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
EU	Europäische Union
FEM	Finite Elemente Methode
FSW	Friction Stir Welding
GTN	Gurson-Tvergaard-Needleman-Modell
GHG	Greenhouse Gas
iECAP	Integrated Equal Channel Angular Pressing
REM	Rasterelektronenmikroskop
SPS	Spark Plasma Sintering
WQI	Weld Quality Index