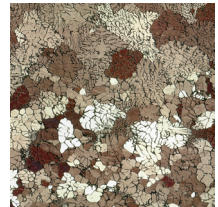
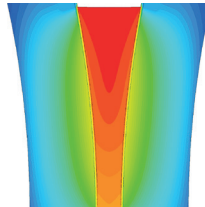
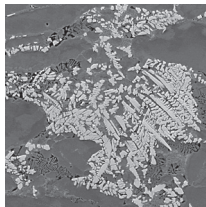
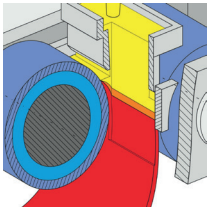


### Zwei-Rollen-Gießwalzen und thermomechanische Behandlung von dünnen Bändern aus der Aluminiumlegierung EN AW-6082

Mykhailo Stolbchenko

**Band  
2021/48**



*Zwei-Rollen-Gießwalzen und thermomechanische Behandlung  
von dünnen Bändern aus der Aluminiumlegierung EN AW-6082*

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

genehmigte  
DISSERTATION

von  
M.Sc. Mykhailo Stolbchenko  
aus Dnipropetrowsk

Tag des Kolloquiums: 18. Februar 2021  
Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Mirko Schaper  
Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Olaf Keßler



Schriftenreihe Institut für Leichtbau mit Hybridsystemen

Band 48/2021

**Mykhailo Stolbchenko**

**Zwei-Rollen-Gießwalzen und thermomechanische  
Behandlung von dünnen Bändern aus der  
Aluminiumlegierung EN AW-6082**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag  
Düren 2021

**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., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7971-5

ISSN 2196-2200

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](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

*Unserem Oliver, dem mutigen Hasen*



## **Kurzzusammenfassung**

Das Zwei-Rollen-Gießwalzen bietet eine wirtschaftlich attraktive Möglichkeit der Herstellung endabmessungsnaher Flachprodukte aus hochfesten Aluminiumlegierungen, welche als Strukturkomponenten im Leichtbau verwendet werden können. Die Methode kann einen großen Beitrag zur Reduzierung des Energieverbrauchs, der Herstellungskosten und der Umweltbelastung leisten.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Zwei-Rollen-Gießwalzen dünner Bänder aus der Aluminiumlegierung EN AW-6082 experimentell und numerisch untersucht. Es wurden Abhängigkeiten zwischen den Prozessbedingungen und den resultierenden Mikrostrukturen, dem Auftreten der für gießgewalztes Material charakteristischen Merkmale und den mechanischen Eigenschaften festgestellt. Anschließend wurden die Änderungen der mechanischen Eigenschaften und der Mikrostruktur, welche unter dem Einfluss der verschiedenen Schritte der thermomechanischen Behandlung auftraten, ermittelt und analysiert.

Durch Steuerung der Prozessbedingungen beim Zwei-Rollen-Gießwalzen sowie durch den Einsatz einer geeigneten thermomechanischen Behandlung wurde das gewünschte Eigenschaftsprofil der Bänder aus EN AW-6082 im ausgehärteten Zustand erreicht.

## **Abstract**

Twin-roll casting offers an economically attractive option for the production of near-net-shape flat products of high-strength aluminum alloys for the application as structural components for lightweight construction. This method can make a major contribution to reducing energy consumption, manufacturing costs, and environmental pollution.

In this work, the twin-roll casting of thin strips of aluminum alloy EN AW-6082 was investigated experimentally and numerically. Dependencies between the process conditions and the resulting microstructures, the occurrence of features characteristic of twin-roll cast material, and the mechanical properties were found determined. Subsequently, the changes in mechanical properties and microstructure that occurred under the influence of the various steps of the thermomechanical treatment were determined and analyzed.

By controlling the process conditions during twin-roll casting and by applying a suitable thermomechanical treatment, the desired property profile of the strips of EN AW-6082 in the age-hardened state was achieved.





## **Danksagung**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Werkstoffkunde (LWK) der Universität Paderborn.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Mirko Schaper, dem Leiter des LWK, für die Gelegenheit am Lehrstuhl zu promovieren und für wohlwollende Unterstützung sowohl bei der Vorbereitung der vorliegenden Arbeit als auch während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter. Deine nette Betreuung, kompetente Meinung und wertvollen Ratschläge waren mir immer besonders kostbar.

Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Olaf Kessler für die Übernahme des Zweitgutachtens bedanken. Herrn Prof. Dr.-Ing. Werner Homberg danke ich für die Übernahme des Beisitzes und Frau Prof. Dr. Ilona Horwath für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Ein großer herzlicher Dank gilt Herrn Dr. tech. nauk (NMetAU) Olexandr Grydin für die Übernahme des Beisitzes und für umfangreiche fachliche und private Unterstützung, wertvolle Diskussionen und Hinweise im Verlauf der Erstellung dieser Arbeit und während der langjährigen Zusammenarbeit am LWK. Vor allem mithilfe von Herrn Dr. Grydin habe ich das Thema Zwei-Rollen-Gießwalzen für mich entdeckt sowie meine wissenschaftliche Karriere in der Bundesrepublik Deutschland begonnen. Ein weiterer Dank an dieser Stelle gilt meinen Kollegen am Lehrstuhl für Umformtechnik der Nationalen Metallurgischen Akademie der Ukraine, Herrn Prof. Yaroslav Frolov, Herrn Prof. Oleksandr Golovko und Herrn Prof. Valentyn Danchenko, sowie Herrn Dr.-Ing. Florian Nürnberger vom Institut für Werkstoffkunde, die zu meinem Werdegang als Wissenschaftler ebenfalls beigetragen haben.

Weiterhin bedanke ich mich bei meinen Kolleginnen und Kollegen sowie den studentischen Hilfskräften des LWK. Ganz besonderer Dank gilt meinem guten Freund Anatolii Andreiev, der mir beim Meistern der wissenschaftlichen Herausforderungen mit Rat und Tat zur Seite stand, mich bei Zweifelsfällen motivierte, mir wertvolle Ratschläge gab und immer kraftvoll und hilfsbereit war. Vielen Dank, Anatolii für die tolle Zusammenarbeit. Herrn Dr.-Ing. Kay-Peter Hoyer und Herrn Lino Wilczewski danke ich für das fachkundige und pünktliche Korrekturlesen meiner Texte. Frau Anja Puda für die Vorbereitung der zahlreichen Mikroschliffe, Frau Kristina Duschik für die Motivation und vielfältige Hilfe bei meinen Lehrtätigkeiten und der Zentralwerkstatt für ihre Unterstützung bei der Durchführung der experimentellen Arbeiten.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Lothar Löchte, der mir den Freiraum gegeben hat, mich um die Fertigstellung der Arbeit und die Ausarbeitung des Vortrags kümmern zu können.

Ganz besonderer Dank gilt meiner Frau, Mariia Kachaikina, für ihre Toleranz und ihren Glauben an mich, ihre ständige Motivation, ihre Unterstützung und ihr Kümmern um unser Privatleben. Nicht zuletzt gilt mein ganz besonderer Dank meinen Eltern Olga und Andrii Stolbchenko, meinem Bruder Andrii und meiner Tante Alexandra, die mich in meinem Werden und in meinen Entscheidungen stets unterstützt haben und mir diesen Weg ermöglicht haben. Schließlich danke ich meiner großen ukrainischen Familie, auch denen, die schon nicht mehr hier sind, für die fortwährende und unbegrenzte Unterstützung in meinem Werdegang.

Wuppertal im März 2021

## Liste der Veröffentlichungen

Grydin, O., Stolbchenko, M.; Nürnberger, F.; Schaper, M.: Influence of the twin-roll casting parameters on the microsegregation in thin strips of the aluminium alloy EN AW-6082. In (John Grandfield Hrsg.): Light Metals 2014. John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, NJ, USA, 2014; S. 411–414.

Grydin, O.; Stolbchenko, M.; Nürnberger, F.; Schaper, M.: Influence of hot deformation on the mechanical properties and microstructure of a twin-roll cast aluminium alloy EN AW-6082, In Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(3); S. 937–943.

Stolbchenko, M.; Grydin, O.; Samsonenko, A.; Khvist, V.; Schaper, M.: Numerical analysis of the twin-roll casting of thin aluminium-steel clad strips. In Forschung im Ingenieurwesen/Engineering Research, 2014, 78(3-4); S. 121–130.

Stolbchenko, M.; Grydin, O.; Schaper, M.: Twin-roll Casting and Finishing Treatment of Thin Strips of the Hardening Aluminum Alloy EN AW-6082. In Materials Today: Proceedings, 2015, 2; S. 32–38.

Stolbchenko, M.; Grydin, O.; Danchenko, V.: Patent of Ukraine UA108789C2 Device for the twin-roll casting of metal, 2015.

Grydin, O.; Stolbchenko, M.; Schaper, M.: Deformation zone length and plastic strain in twin-roll casting of strips of Al-Mg-Si alloy. In JOM, 2017, 69(12); S. 2648-2652.



---

**Inhaltsverzeichnis**

1	Einleitung .....	1
2	Stand der Technik .....	5
2.1	Aluminiumlegierungen im Leichtbau .....	5
2.1.1	Al-Mg-Si-Legierungen .....	7
2.1.2	Legierungsaufbau .....	8
2.2	Thermomechanische Behandlung von Bändern aus aushärtbaren Aluminiumlegierungen .....	10
2.2.1	Wärmebehandlung .....	11
2.2.2	Umformung .....	16
2.3	Zwei-Rollen-Gießwalzen .....	19
2.3.1	Theoretische Grundlagen des Zwei-Rollen-Gießwalzens .....	20
2.3.2	Einflussgrößen des Zwei-Rollen-Gießwalzens .....	24
2.3.3	Anlagentechnik .....	25
2.3.4	Gießwalzen von hochlegierten Aluminiumlegierungen .....	28
2.3.5	Plastische Umformung beim Zwei-Rollen-Gießwalzen .....	36
2.3.6	Prozesssimulation .....	41
2.3.7	Thermomechanische Behandlung von gießgewalzten Bändern .....	42
3	Problemstellung und Zielsetzung .....	46
3.1	Problemstellung .....	46
3.2	Zielsetzung .....	48
4	Experimentelle Analyse des Gießwalzprozesses und der thermomechanischen Behandlung .....	50
4.1	Versuchsprogramm .....	50
4.2	Versuchswerkstoff, Anlagen und Versuchsvorrichtungen .....	52
4.2.1	Versuchswerkstoff .....	52
4.2.2	Anlagentechnik .....	54
4.3	Vorbereitung und Durchführung der Gießwalzversuche .....	58
4.3.1	Zwei-Rollen-Gießwalzen bei Basisbedingungen .....	60
4.3.2	Variation der Gießgeschwindigkeit .....	61
4.3.3	Variation der Walzkraft .....	64
4.3.4	Probenentnahme .....	64
4.4	Nachbehandlung von gießgewalzten Bändern .....	65
4.4.1	Homogenisierungsglügen .....	65
4.4.2	Aushärtung .....	66
4.4.3	Thermomechanische Behandlung .....	67

---

4.5	Werkstoffcharakterisierung .....	71
4.6	Ermittlung des plastischen Umformgrads beim Gießwalzen .....	72
5	Numerische Simulation des Zwei-Rollen-Gießwalzprozesses .....	73
5.1	Modellaufbau und Einflussgrößen .....	73
5.2	Verifizierung des Modells .....	77
5.3	Berechnungsergebnisse.....	78
5.4	Regressionsanalyse .....	80
6	Ergebnisse der experimentellen und der numerischen Untersuchungen.....	82
6.1	Mikrostruktur des gießgewalzten Materials .....	82
6.2	Einfluss der Bedingungen des Gießwalzens auf Mikrostruktur und Eigenschaften der Bänder.....	90
6.2.1	Einfluss der Gießgeschwindigkeit .....	90
6.2.2	Einfluss der Walzkraft.....	92
6.3	Plastischer Umformgrad beim Gießwalzen .....	98
6.4	Simulationsergebnisse .....	104
6.5	Einfluss der Nachbehandlung auf Mikrostruktur und Eigenschaften der gießgewalzten Bänder.....	106
6.5.1	Homogenisierungsglügen.....	106
6.5.2	Warmauslagerung .....	115
6.5.3	Glühen.....	118
6.5.4	Kaltwalzen.....	125
6.5.5	Warmwalzen .....	133
6.5.6	Thermomechanische Behandlung .....	140
7	Diskussion .....	146
7.1	Zwei-Rollen-Gießwalzen von dünnen Bändern aus EN AW-6082 .....	146
7.2	Thermomechanische Behandlung gießgewalzter Bänder aus EN AW-6082.....	153
8	Zusammenfassung.....	161
9	Literaturverzeichnis .....	164
	Erklärung zur Zitation von Inhalten aus studentischen Arbeiten .....	189
	Lebenslauf.....	190

## Formelzeichen und Abkürzungen

### Lateinische Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
$\%Si[Mg_2Si]$	Ma%	Siliziumgehalt für die Bildung der $\beta$ - $Mg_2Si$ -Phase
$\%Fe$	Ma%	Eisengehalt
$\%Mn$	Ma%	Mangangehalt
$\%Si$	Ma%	Siliziumgehalt
$A$	%	Bruchdehnung
$A^N$	%	Bruchdehnung nach DIN-Norm
$a_i$	-	Regressionskoeffizient
$b_0$	mm	Breite vor der Umformung
$b_1$	mm	Breite nach der Umformung
$b_B$	mm	Bandbreite
$c_p$	J/(kg·K)	Wärmekapazität
$d_{BS}$	mm	Dicke der Bandschale
$F$	kN	Walzkraft
$f$	kN/mm	spezifische Walzkraft
$h_0$	mm	Dicke vor der Umformung
$h_1$	mm	Breite nach der Umformung
$h_B$	mm	Banddicke
$h_B'$	mm	spezifische Banddicke
$h_{fus}$	J/kg	spezifische Schmelzenthalpie
$k$	-	Erstarrungskoeffizient
$l_{BFZ}$	mm	Länge der Bandformungszone
$l_{BFZ}'$	mm	spezifische Länge der Bandformungszone
$l_d$	mm	Länge der Umformzone
$l_d'$	mm	spezifische Länge der Umformzone
$l_s$	mm	Länge der Urformzone
$l_k$	mm	Länge des Kontaktbogens
$L_{KG}$	$\mu m$	Länge der Messlinie
$l_0$	mm	Länge vor der Umformung
$l_1$	mm	Länge nach der Umformung
$K$	$\mu m$	Korngröße
$N$	-	Anzahl der Schnittpunkte der Korngrenzen



---

$n$	-	Anzahl der Messlinien
$P_i$	$\mu\text{m}$	Mittelwert der Anzahl Korngrenzen
$Q$	J	Wärme
$Q_U$	J	Umform- und Reibungswärme
$R$	mm	Walzenradius
$R^2$	-	Bestimmtheitsmaß
$R_m$	MPa	Zugfestigkeit
$R_m^N$	MPa	Zugfestigkeit nach DIN-Norm
$R_{p0,2}$	MPa	Dehngrenze
$R_{p0,2}^N$	MPa	Dehngrenze nach DIN-Norm
$T_B$	K	Bandaustrittstemperatur
$T_S$	K	Temperatur der Schmelze (Gießtemperatur)
$t$	s	Zeit
$t_0$	s	Dauer des Überhitzungsabbaus
$t_k$	s	Erstarrungszeit
$V$	$\text{m}^3$	Volumen des umformenden Körpers
$v$	m/s	Gießgeschwindigkeit

### **Griechische Formelzeichen**

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bezeichnung</b>
$\alpha$	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	Wärmeübergangskoeffizient
$\beta$	-	Erstarrungskoeffizient
$\gamma$	°	neutraler Winkel
$\Delta h$	mm	Dickenänderung
$\varepsilon$	%	Dickenreduktion
$\zeta$	%	Breitung
$\theta$	%	Verlängerung
$\rho$	$\text{kg}/\text{m}^3$	Dichte
$\varphi$	-	Umformgrad

**Abkürzungen**

APDL	Ansys Parametric Design Language
AZ	Ausgangszustand
BFZ	Bandformungszone
CFD	Strömungsdynamik
EBSD	Elektronenrückstreuung
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
ESMA	Elektronenstrahlmikroanalyse
GG	Gießgeschwindigkeit
GOS	Kornorientierungsstreuungswinkel
GP	Guinier-Preston-Zone
H	Homogenisierungsglühen
HBW	Brinell-Härte
IPF	inverse Polfigur
KW	Kaltwalzen
L	Lösungsglühen
Ma%	Massenprozent
MK	Mischkristall
NR	Normalrichtung
PSN	ausscheidungsinduzierte Keimbildung
QR	Querrichtung
REM	Rasterelektronenmikroskop
S	Schmelze
SE	Sekundärelektronen
TM	thermomechanisch
WK	Walzkraft
WR	Walzrichtung
WW	Warmwalzen
ZRGW	Zwei-Rollen-Gießwalzen