

Thomas Borgert

Reibungsinduzierter Prozess zum
nutzerindividuellen und
energieeffizienten Recycling von
Aluminiumschrotten

Reibungsinduzierter Prozess zum nutzerindividuellen und energieeffizienten Recycling von Aluminiumschrotten

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

genehmigte
DISSERTATION

von
Thomas Borgert, M. Sc.
aus Coesfeld

Tag des Kolloquiums: 01. September 2023
Referent: Prof. Dr.-Ing. Werner Homberg
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Mirko Schaper

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

Thomas Borgert

**Reibungsinduzierter Prozess zum
nutzerindividuellen und energieeffizienten Recycling
von Aluminiumschrotten**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

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.: Paderborn, Univ., Diss., 2023

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 978-3-8440-9240-0

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

In erster Linie möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Werner Homberg für die Ermöglichung und Betreuung dieser Arbeit bedanken. Dies gilt in besonderem Maße für die stets konstruktive sowie fachlich sehr gute Unterstützung und seinem großen Interesse an der Erforschung innovativer Prozesse.

Des Weiteren möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Mirko Schaper (Übernahme des Korreferats), Herrn Prof. Dr. rer. nat. Thomas Tröster (Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission) und Herrn Prof. Dr.-Ing. Walter Sextro (Übernahme der Aufgabe des Beisitzers) danken.

Ich bedanke mich bei meinen Kollegen/-innen am Lehrstuhl für die freundschaftliche und kollegiale Zusammenarbeit und Unterstützung. Mein besonderer Dank gilt dabei Frederik Dahms, Eugen Wiens und Fabian Bader für die zahlreichen intensiven und konstruktiven Diskussionen und Anregungen.

Dem gesamten technischen Personal und vor allem Manuel Köhler möchte ich für die Unterstützung und Fertigung einer Vielzahl von Werkzeugen und Proben danken. Zudem bedanke ich mich bei den von mir betreuten studentischen Hilfskräften und Studierenden, die mich bei den unterschiedlichsten Herausforderungen unterstützt haben.

Mein Dank gilt dem Land NRW für die Förderung des Forschungskollegs „Leicht-Effizient-Mobil“, in dessen Rahmen zahlreiche Untersuchungen dieser Arbeit durchgeführt wurden.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Familie und insbesondere meiner Freundin Ina, die mich stets unterstützt und mir meinen Werdegang ermöglicht haben.

Paderborn, im September 2023

Thomas Borgert

Zusammenfassung

Die weltweit erzeugten Emissionen müssen in allen emittierenden Sektoren signifikant gesenkt werden, um die Auswirkungen des Klimawandels zu reduzieren. Dies ist unter anderem durch die energieeffiziente Wiederverwertung vorhandener Ressourcen und damit der Einstellung einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft möglich. Aufgrund der hohen erforderlichen Energiemenge in der primären Herstellung von Aluminium existieren hier im Vergleich zu anderen Konstruktionswerkstoffen große Einsparpotentiale. Mit dem in dieser Arbeit erforschten reibungsinduzierten Recyclingverfahren (RIR) wird eine alternative und energieeffiziente Prozessroute zum direkten Recycling von unterschiedlichen Aluminiumschrotten geschaffen. Zur Charakterisierung der Prozessroute werden u. a. die Erkenntnisse aus sich gegenseitig unterstützenden experimentellen und theoretischen Untersuchungen zu den Vorgängen der Verdichtung, Plastifizierung als auch Extrusion der recycelten Profile dargelegt. Die Einflüsse unterschiedlicher Eingangsgrößen wie z. B. der Werkzeuggestaltung oder der Verarbeitung unterschiedlicher Legierungen werden zudem zur zukünftigen Auslegung des Prozesses erläutert. Aus der abschließenden energetischen Bilanzierung kann geschlossen werden, dass aufgrund der geringeren Verarbeitungstemperatur signifikante Energieersparnisse bei Verwendung des RIR im Vergleich zu den konventionellen Produktionsstrategien erzielt werden können.

Summary

Emissions generated worldwide must be significantly reduced in all emitting sectors in order to reduce the impact of climate change. This is possible, among other things, through the energy-efficient recycling of existing resources and thus the implementation of a sustainable circular economy. Due to the high amount of energy required in the primary production of aluminium, there is a large potential for savings here compared to other construction materials. With the friction induced recycling (RIR) process researched in this work, an alternative and energy-efficient process route for the direct recycling of different aluminium scrap is created. To characterise the process route, the findings from complementary experimental and theoretical investigations on the processes of compaction, plasticisation and extrusion of the recycled profiles are presented. The influences of different input variables such as tool design or the processing of different alloys are also explained for the future design of the process. From the final energy balance, it can be concluded that significant energy savings can be achieved by using the RIR compared to conventional production strategies due to the lower processing temperature.

Liste der Vorveröffentlichungen

Einige Inhalte dieser Arbeit sind in folgenden Veröffentlichungen vertieft dargestellt:

Borgert, T. & Homberg, W. (2021). Friction-Induced Recycling Process for User-Specific Semi-Finished Product Production. *Metals*, 11(4), 663. <https://doi.org/10.3390/met11040663>

Borgert, T. & Homberg, W. (2022). Energy saving potentials of an efficient recycling process of different aluminum rejects. *Energy Reports*, 8, 399–404. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.01.027>

Vieth, P., Borgert, T., Homberg, W. & Grundmeier, G. (2022). Assessment of Mechanical and Optical Properties of Al 6060 Alloy Particles by Removal of Contaminants. *Advanced Engineering Materials*, 2201081. <https://doi.org/10.1002/adem.202201081>

Borgert, T. & Homberg, W. (2023). Analysis of temperature effect on strength and microstructure in friction induced recycling process (FIRP). In *Materials Research Proceedings, ESAFORM 2023* (S. 1957–1966). Materials Research Forum LLC. <https://doi.org/10.21741/9781644902479-211>

Borgert, T. & Homberg, W. (2023). Friction-Induced Recycled Aluminium Semi-finished Products in Thermo-mechanical Joining Technology. In K. Mocellin, P.-O. Bouchard, R. Bigot & T. Balan (Hrsg.), *Lecture Notes in Mechanical Engineering. Proceedings of the 14th International Conference on the Technology of Plasticity - Current Trends in the Technology of Plasticity* (S. 3–10). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-41341-4_1

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theoretische Grundlagen – Stand der Technik.....	3
2.1	Herstellung von Aluminiumrohformen	3
2.1.1	Primärer Herstellungsprozess.....	4
2.1.2	Sekundärer Herstellungsprozess	7
2.2	Herstellung von Aluminiumhalbzeugen	8
2.2.1	Strangpressen	8
2.2.2	Festkörperrecyclingverfahren	10
2.2.3	Kontinuierlicher Extrusionsprozess	20
2.3	Einstellen der mechanischen Eigenschaften von Aluminiumlegierungen	27
2.3.1	Ausscheidungshärtung	27
2.3.2	Wärmebehandlungen zur Entfestigung	30
2.4	Kontaktbedingungen technischer Oberflächen.....	34
2.4.1	Aufbau technischer Oberflächen.....	34
2.4.2	Aktivierung technischer Oberflächen	35
2.4.3	Tribologie	36
3	Wissenschaftliche Zielsetzung.....	39
4	Prozessprinzip und Versuchseinrichtung.....	41
4.1	Versuchsstand zum reibungsinduzierten Recycling von Aluminiumspänen	41
4.1.1	Funktionsprinzip und Anlagenbestandteile.....	41
4.1.2	Zufuhr des Versuchswerkstoffs.....	44
4.2	Werkzeugkonzepte	46
4.3	Versuchswerkstoffe sowie Spanformen	48
4.4	Prüf- und Messvorrichtungen	50
4.4.1	Temperaturmessung	51
4.4.2	Messwerterfassung Drehmoment.....	52
4.4.3	Mechanische Kennwertermittlung	53

4.4.4	Mikroskopie	54
4.4.5	Gefügeanalysen	55
5	Untersuchungen zu den Einflüssen des reibungsinduzierten Recyclingprozesses	57
5.1	Veränderung der Prozessgrößen	59
5.1.1	Drehmomentenverlauf	60
5.1.2	Temperaturentwicklung	61
5.1.3	Wechselwirkung von Temperatur und mechanischer Festigkeit	63
5.1.4	Wechselwirkung von Mikrostruktur und mechanischer Festigkeit	66
5.1.5	Charakterisierung und Vergleich zu einem Referenzzustand	70
5.2	Prozessmodellierung	73
5.2.1	Prozesskräfte und Momente	74
5.2.2	Werkstoffverhalten im Presskanal	79
5.2.3	Phänomenologische Prozessmodellierung	87
5.2.4	Finite- und Diskrete-Elemente-Modellierung	94
5.3	Einfluss des Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnisses und der Füllrate	96
5.4	Einfluss einer externen Wärmezufuhr	101
5.5	Einfluss der Werkzeuggestaltung	104
5.6	Einfluss der Drehzahl	118
5.7	Einfluss der Legierung	121
5.8	Einfluss von Fremdstoffen	127
5.9	Einfluss einer Wärmebehandlung	133
5.10	Einfluss der Durchlaufanzahl	140
6	Anwendungspotentiale im Kontext des Aluminiumrecyclings	145
6.1	Recycling unterschiedlicher, metallischer Ausschüsse	145
6.2	Gleichzeitige Verarbeitung unterschiedlicher Aluminiumlegierungen	151
7	Energetische Einordnung des reibungsinduzierten Recyclingverfahrens	155
8	Zusammenfassung und Ausblick	161
	Literaturverzeichnis	165
	Abbildungsverzeichnis	179