



Friedrich Ostermann

Anwendungstechnologie Aluminium

3. Auflage

VDI

trímet

 Springer Vieweg

Anwendungstechnologie Aluminium

Friedrich Ostermann

Anwendungstechnologie Aluminium

3., neu bearbeitete Auflage

Friedrich Ostermann
Aluminium Technologie-Service
Meckenheim
Deutschland

Autor und Verlag danken der TRIMET Aluminium SE für die Unterstützung der Drucklegung dieses Buches.

ISBN 978-3-662-43806-0
DOI 10.1007/978-3-662-43807-7

ISBN 978-3-662-43807-7 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1998, 2007, 2014

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. Die Sachinformationen in diesem Buch wurden mit großer Sorgfalt und nach bestem Wissen zusammengestellt; trotzdem können Fehler nicht ausgeschlossen werden. Autor und Verlag können für fehlerhafte Angaben und deren Folgen weder juristische Verantwortung noch irgendeine Haftung übernehmen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
www.springer-vieweg.de

Vorwort zur 2. Auflage

Seit dem Erscheinen der 1. Auflage von ANWENDUNGSTECHNOLOGIE ALUMINIUM im Jahre 1998 haben sich zahlreiche Entwicklungen in der Aluminiumkunde und Anwendungsforschung, im Einsatz des Werkstoffs und im wirtschaftlichen Umfeld der Hersteller und Verarbeiter vollzogen, denen bei der Neuauflage des Buches Rechnung getragen werden soll. Gleichzeitig bietet der kritische Rückblick auf die damalige Themenauswahl die Möglichkeit, die Schwerpunkte an den sichtbar gewordenen Entwicklungstrends neu auszurichten.

Einerseits haben sich durch die Forderungen aus der Anwendungspraxis, aber auch durch die Weiterentwicklung von wissenschaftlichen Methoden und theoretischen Erkenntnissen in jüngster Zeit neue Einsichten und Perspektiven bei den Aushärtungsprozessen ergeben, die als wohl die wichtigste metallurgische Grundlage für Aluminiumkonstruktionswerkstoffe anzusehen sind, und deren Entdeckung vor genau 100 Jahren von *Alfred Wilm* patentiert wurde. In der Anwendungsforschung werden Konzepte für die Vorhersage des Verhaltens unter Crash-Bedingungen und Schwingbeanspruchung entwickelt, die zunehmend die metallphysikalischen Basisprozesse des plastischen Fließens und Bruchs einschließen. Daher wurde den metallkundlichen Prozessen ein breiterer Raum eingeräumt in der Absicht, durch verständliche Beschreibung die z. T. sehr komplexen Vorgänge im Werkstoff für den mit Anwendungsentwicklungen befaßten Werkstoffingenieur zugänglich zu machen. Im Vordergrund steht eine möglichst umfassende Dokumentation der beobachteten Phänomene des Werkstoffverhaltens und weniger dessen rechnerische Simulation, die anderen Werken¹ vorbehalten sein mögen. Berechnungskonzepte sind nur dann wirklich zuverlässig, wenn sie mit den metallphysikalischen Vorgängen in Einklang stehen.

Andererseits ist in den vergangenen Jahren die Akzeptanz des Aluminiums als Leichtbauwerkstoff für den Fahrzeugbau so weit gestiegen, daß jeder Automobilhersteller heute Teile, Baugruppen oder vollständige Karosserien aus diesem Werkstoff baut, ohne dessen generelle Tauglichkeit mehr in Frage zu stellen. Die gewonnenen Erfahrungen und das Interesse der Automobilindustrie sind deshalb auch die treibende Kraft für zahlreiche Entwicklungen und Innovationen in den Verarbeitungstechnologien, eine Rolle, die früher

¹⁾ z. B. Hirsch, J. (Hrg.): Virtual Fabrication of Aluminium Products. Microstructural Modeling in Industrial Aluminium Production. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2006

vor allem von der Luft- und Raumfahrtindustrie wahrgenommen wurde. Hinter all diesen Entwicklungen steht die Frage nach der Wirtschaftlichkeit solcher Anwendungen in einem wettbewerbsorientierten Markt, d. h. die Senkung der Verarbeitungskosten durch intelligente Vermeidung unnötiger Verarbeitungsschritte. Auch dieser Lösungsweg verlangt nach detaillierten Kenntnissen des Werkstoffverhaltens, das in der Beschreibung technologischer Verarbeitungsprozesse gegenüber der 1. Auflage des Buches stärker betont wird.

Sorge bereitet die Kontinuität innovationsträchtiger Forschungs- und Entwicklungsarbeit. In jüngster Zeit hat sich ein struktureller Wandel in der deutschen Aluminiumindustrie eingestellt mit problematischen Folgen für Forschung und Innovation und damit letztlich für die Zukunft der Aluminiumindustrie in Deutschland. Mengenmäßig ist der deutsche Aluminiummarkt der größte in Europa und erreicht technologisch die größte Verarbeitungstiefe. Um so besorgniserregender ist der Umstand, daß die Industrie- und Wirtschaftspolitik der vergangenen Jahre bis in die Gegenwart zu einem Ausverkauf der Aluminiumhüttenindustrie geführt hat, die Initiator und wichtigster Förderer der Aluminiumforschung und Anwendungsentwicklung in diesem Lande war. Die Wertschöpfung in der Primärerzeugung war immer die wichtigste finanzielle Grundlage für die Aluminiumforschung. Mit der Übernahme der nationalen Aluminiumkonzerne durch ausländische Konzerne wandert die industriedominierte Aluminiumforschung als Quelle von Innovationen ab oder wird durch ausländische Forschungszentralen fremdgesteuert. Die notwendige Nähe des Forschers zum Anwender schwindet. Die für diesen Industriestandort fatale Energiepolitik in Vergangenheit und Gegenwart hat das Schließen zahlreicher Aluminiumhütten zu verantworten. Um so beachtenswerter ist die jüngste Initiative eines Privatunternehmers, eine bereits geschlossene Aluminiumhütte zu übernehmen und weiter zu betreiben.

Die Rolle der Primärhütten kann durch die Sekundärhüttenindustrie nicht aufgefangen werden, die Wertschöpfung ist geringer und die Versorgungsbasis zu volatil. Ob ohne direkte und kontinuierliche Industriebeteiligung die Aluminiumforschung an den Hochschulen und anderen Forschungseinrichtungen aufgefangen werden kann, ist zweifelhaft, da die Kontinuität von Wissen und Erfahrung dort nicht gewährleistet werden kann. Ein Ausweg wäre ein ausschließlich der Aluminiumforschung und -lehre gewidmeter Lehrstuhl. Zu denken gibt weiterhin, daß schon heute die aktive Beteiligung von Aluminiumfachleuten an der Steuerung der nationalen Industriellen Gemeinschaftsforschung und der internationalen Normungsarbeit alles andere als lebhaft ist, und dadurch weder die eigenen Erfahrungen eingebracht noch die eigenen Interessen vertreten werden können. Es ist zu hoffen, daß die mittelständische Aluminiumindustrie diese Rolle als gemeinschaftliche Aufgabe zur Zukunftssicherung übernimmt.

Ich hoffe, daß das Buch dazu beiträgt, über den fachlichen Diskurs hinaus die Faszination der Beschäftigung mit diesem Werkstoff auf Lehrende, Lernende und im Beruf stehende Ingenieure auszustrahlen. Das Potential des Werkstoffs ist keineswegs ausgeschöpft, und phantasievolle Kreativität, Nutzung und Fortentwicklung der Aluminium-Anwendungstechnologien werden den Erfolg bei heutigen und künftigen Produkten gewährleisten.

Mein herzlicher Dank gilt allen Kolleginnen und Kollegen, die durch Informationen, Diskussionen und Bildmaterial zu diesem Buch beigetragen haben, Herrn Gerd Bulian für das fachkritische Lesen des Manuskriptes sowie meiner Frau für ihre Geduld, Ermutigung und liebevolle Unterstützung.

Meckenheim, im Januar 2007

Friedrich Ostermann

Vorwort zur 3. Auflage

Der Ursprung des Buches „Anwendungstechnologie Aluminium“ geht zurück auf die beruflichen Erfahrungen des Autors in der technischen Begleitung von neuen Entwicklungen bei der industriellen Anwendungen des Aluminiums und auf die dabei gewonnene Erkenntnis, dass die werkstoffliche Ausbildung im Maschinenbaustudium zu sehr von den historisch gewachsenen Stahltechnologien geprägt war und diese keine ausreichende Grundlage für die werkstoffgerechte Aluminiumanwendung darstellte. Auf seine Initiative als technischer Vorstand der Aluminium-Zentrale e. V. hin entstand 1992 das EU-Projekt „TALAT“ (Training in Aluminium Application Technologies), unterstützt durch europäische Partner der nationalen Aluminium-Verbände und entwickelt durch zahlreiche engagierte Dozenten verschiedener EU-Universitäten. Die Fakultät Maschinenbau der Universität Paderborn bot dem Autor 1993 die Chance, eine mehrsemestrige Vorlesung auf der TALAT-Grundlage zu entwickeln und zu praktizieren. Dafür gilt ein besonderer Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Ortwin Hahn.

Aus dem ursprünglichen Vorlesungsskript entstand 1998 die erste Auflage des Fachbuchs. Seither haben die fast dramatisch zu nennenden Entwicklungen der Aluminiumanwendung, vor allem durch den Einsatz im Automobilbau, die Anwendungstechnologie in Forschung und Entwicklung herausgefordert und die Kenntnisgrundlage laufend erweitert, was eine Aktualisierung für die 2. und 3. Auflage notwendig machte.

Innovationen auf diesem anwendungstechnologisch interessanten Werkstoffgebiet des Automobilbaus – sowie auf anderen verwandten Gebieten – benötigen ein breites Grundwissen der komplexen metallkundlichen und anwendungsorientierten Zusammenhänge, bei denen es immer noch zahlreiche „weiße“ Felder gibt. Dazu zählen immer noch Phänomene der Aushärtung, des Verformungs-, Bruch- und Korrosionsverhaltens.

Der Schwerpunkt der Überarbeitung zur 3. Auflage liegt dementsprechend auf den Kap. **3** (*Legierungsaufbau, Gefüge, Wärmebehandlung*), **5** (*Korrosionsverhalten*), und **6** (*Mechanische Eigenschaften*). Das letztere Kapitel wurde neu strukturiert und erweitert durch das Thema „Bruchmechanik“, die mit Blick auf die künftigen Herausforderungen hinsichtlich Leichtbauqualität und Sicherheit vor allem bei Schweißkonstruktionen an Bedeutung gewinnen wird. Aber auch die Darstellung einiger Füge-technologien (Kap. **17** und **18**) wurde mit Blick auf aktuelle Forschungs- und Anwendungsentwicklungen auf den neuesten Stand gebracht.

Hervorzuheben ist, dass für die gründliche Überarbeitung des **Kap. 6** die Mitarbeit eines anerkannten Experten auf dem Gebiet der Werkstoffmechanik, speziell der Bruchmechanik, und wegen der Aktualität der Entwicklungen auf dem Gebiet des Widerstandspunktschweißens – **Kap. 17** – ein wissenschaftlicher Industriekollege gewonnen wurde. Ich danke den Herren Dr.-Ing. Johann Georg Blauel und Dr.-Ing. Sebastian Kunze für die hervorragende, geduldige und zuverlässige Zusammenarbeit.

Mein herzlicher Dank gilt auch vielen weiteren Kolleginnen und Kollegen, die durch Informationen, Diskussionen und Bildmaterial zu dieser Überarbeitung beigetragen haben, besonders aber auch meiner lieben Frau für ihre Geduld und viele Entsa- gungen.

Meckenheim, im April 2014

Friedrich Ostermann

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	1
1.1 Der Wettbewerb der Werkstoffe in den Märkten	1
1.2 Innovationsgrundlagen	3
Literatur	7
2 Märkte und Anwendungen	9
2.1 Automobilbau	10
2.2 Nutzfahrzeugbau	34
2.3 Schienenfahrzeugbau	39
2.4 Schiffbau	48
2.5 Flugzeugbau	52
2.6 Architektur und Ingenieurbau	57
2.7 Sonstige Anwendungsmärkte	61
Literatur	66
3 Legierungsaufbau, Wärmebehandlung, Normen	69
3.1 Gefügebausteine der Aluminiumwerkstoffe	71
3.1.1 Gefügematrix	71
3.1.2 Gitterfehler	73
3.1.3 Korngrenzen	80
3.1.4 Mischkristallbildung, Löslichkeit der Elemente	82
3.1.5 Primärphasen (Gussphasen)	88
3.1.6 Sekundärphasen	88
3.1.7 Warmverformungs-, Erholungs- und Rekristallisationsgefüge	96
3.1.8 Poren	97
3.1.9 Oxideinschlüsse	98
3.2 Konstitution und Wärmebehandlung der Knetwerkstoffe	98
3.2.1 Unlegiertes Aluminium	99
3.2.2 AlMn-Legierungen	100
3.2.3 AlMg(Mn)-Legierungen	102

3.2.4	AlCu(Mg, Si)-Legierungen	117
3.2.5	AlMgSi-Legierungen	124
3.2.6	AlZnMg(Cu)-Legierungen	142
3.2.7	Sonstige Knetlegierungen	152
3.2.8	Durchführung von Wärmebehandlungen	154
3.3	Gefügebau und Wärmebehandlung von Gusswerkstoffen	167
3.3.1	Schmelze und Schmelzereinigung	168
3.3.2	Erstarrungsvorgang (Kristallisation)	171
3.3.3	Erstarrungsfehler	177
3.3.4	Fließ- und Formfüllungsvermögen	181
3.3.5	Aluminium-Gusslegierungen	182
3.3.6	Verarbeitungs- und Anwendungshinweise	187
3.3.7	Gießgerechte Gestaltung	188
3.4	Einführung in die Normen über Aluminiumlegierungen	189
3.4.1	Einführung in die Bezeichnungssysteme der Aluminiumwerkstoffe	189
3.4.2	Bezeichnungssystem für Knetlegierungen und deren Werkstoffzustände	191
3.4.3	Bezeichnungssystem für Formgusslegierungen, Gießverfahren und für die Werkstoffzustände von Formgussteilen	194
3.4.4	Halbzeugnormen	197
3.4.5	Garantierte und typische Eigenschaften	197
3.4.6	Legierungsauswahl – frei oder eingeschränkt?	198
	Literatur	199
4	Physikalische Eigenschaften	211
4.1	Physikalischen Eigenschaften des Aluminiums	211
4.1.1	Dichte	213
4.1.2	Elektrische Leitfähigkeit	213
4.1.3	Magnetische Eigenschaften	214
4.1.4	Wärmeleitfähigkeit	214
4.1.5	Reflexions- und Emissionseigenschaften	215
4.2	Physikalische Eigenschaften von Aluminiumoxid	215
	Literatur	216
5	Korrosion	217
5.1	Maßnahmen zur Vermeidung von Korrosionsschäden	218
5.2	Langzeiterfahrungen in Freibewitterung und Meerwasser	221
5.3	Oxidschicht und Korrosionsmechanismus des Aluminiums	222
5.3.1	Aufbau und Bedeutung der Oxidschicht	222
5.3.2	Verstärkung der natürlichen Oxidschicht	224

5.3.3	Beständigkeit der Oxidschicht	225
5.3.4	Elektrochemischer Korrosionsmechanismus	227
5.3.5	Freie und kritische Korrosionspotentiale	230
5.3.6	Stromdichte-Potentialkurven	231
5.3.7	Elektrochemische Wirkung intermetallischer Phasen	232
5.4	Korrosionsarten von Aluminium und seinen Legierungen	233
5.4.1	Lochkorrosion (LK)	233
5.4.2	Interkristalline Korrosion (IK)	236
5.4.3	Schichtkorrosion	244
5.4.4	Spannungsrissskorrosion (SpRK)	245
5.4.5	Interkristalline Korrosion unter Spannung	248
5.4.6	Spaltkorrosion	249
5.4.7	Kontaktkorrosion	251
5.4.8	Korrosionsermüdung	256
5.4.9	Reibkorrosion	261
5.4.10	Filiformkorrosion	262
5.5	Beispiele für korrosionsgerechtes Konstruieren	262
	Literatur	267
6	Mechanische Eigenschaften	271
6.1	Mechanisch-technologische Werkstoffeigenschaften	272
6.1.1	Charakteristische Werte des Zugversuchs	273
6.1.2	Werkstoffgesetze für die Umformtechnik	275
6.1.3	Einflüsse auf Fließverhalten und Duktilität	283
6.1.4	Werkstoffverhalten bei hohen Beanspruchungsgeschwindigkeiten	290
6.1.5	Werkstoffverhalten bei unterschiedlichen Temperaturen	297
6.2	Schwingfestigkeitsverhalten	308
6.2.1	Werkstoffliche Grundlagen der Ermüdungsschädigung bis zum Anriss	310
6.2.2	Schwingfestigkeit von Proben und Bauteilen	322
6.3	Werkstoff- und Bauteilversagen	344
6.3.1	Makroskopische und mikroskopische Bruchphänomene	345
6.3.2	Werkstoffmodelle für Schädigung und Versagen	358
6.3.3	Bruchmechanische Werkstoffeigenschaften bei quasi-statischer Beanspruchung	362
6.3.4	Bruchmechanische Werkstoffeigenschaften bei zyklischer Beanspruchung	372
6.4	Bruchmechanischer Festigkeitsnachweis	378
6.4.1	Bruchmechanik-Konzept	379
6.4.2	Bruchmechanischer Fehlerzustand	383

6.4.3	Bruchmechanischer Beanspruchungszustand	384
6.4.4	Bruchmechanischer Werkstoffzustand	390
6.4.5	Bewertung der Bauteilsicherheit bei quasi-statischer Beanspruchung	392
6.4.6	Bewertung der Bauteillebensdauer bei zyklischer Beanspruchung	394
6.4.7	Besondere Aspekte	396
6.4.8	Beispiel geschweißte Aluminium-Purifierkolonne	400
	Literatur	406
7	Gießverfahren	419
7.1	Stranggießverfahren	419
7.2	Formgießverfahren	423
7.3	Vergleich der Formgießverfahren	437
	Literatur	440
8	Walzen	441
8.1	Walzprozesse	441
8.2	Qualitätsmerkmale von Warm- und Kaltwalzblechen	443
8.3	Oberflächenbeschichtete Walzfabrikate	447
8.4	Verbundhalbzeuge	449
	Literatur	450
9	Strangpressen	451
9.1	Strangpressverfahren	452
9.2	Grundformen von Profilen und Werkzeugen	455
9.3	Strangpressbarkeit von Aluminiumlegierungen	456
9.4	Prozesskette im Strangpresswerk	460
9.5	Strangpressgerechte Profil- und Werkzeuggestaltung	462
9.6	Gestalten von Strangpressprofilen	465
9.6.1	Funktionalitätsgruppen	465
9.6.2	Konstruktionen mittels Profilverbindungen	465
9.7	Sonderverfahren des Strangpressens von Aluminium	470
9.7.1	Strangpressen nach dem „Conform“-Verfahren	470
9.7.2	Hydrostatisches Strangpressen	470
9.7.3	Verbundstrangpressen	471
9.7.4	Warmbiegen von Profilen beim Pressvorgang	471
	Literatur	472
10	Schmieden von Aluminium	473
10.1	Prozess des Gesenkschmiedens	474
10.2	Schmiedegesenke	476

10.3	Stofffluss und Faserverlauf	478
10.4	Schmiedelegerungen, Vormaterial, Gefüge und Arbeitsablauf	481
10.5	Gestalten von Schmiedeteilen	486
	Literatur	487
11	Kaltfließpressen von Aluminium	489
11.1	Charakteristische Merkmale von Kaltfließpressteilen	489
11.2	Aluminium für technische Fließpressteile	492
11.2.1	Vormaterial: Butzen	492
11.2.2	Aluminiumlegierungen für das Kaltfließpressen	493
11.2.3	Alternative Ausgangszustände für das Kaltfließpressen	495
11.3	Fließpressverfahren	497
11.3.1	Grundverfahren des Fließpressens	497
11.3.2	Werkzeuge für das Kaltfließpressen	500
11.3.3	Kraftbedarf beim Kaltfließpressen	501
	Literatur	502
12	Blechumformung	505
12.1	Werkstoffeigenschaften für die Blechumformung	506
12.1.1	Werkstoffeigenschaften aus Zugversuchen	506
12.1.2	Werkstoffeigenschaften aus technologischen Prüfungen	507
12.1.3	Biegefähigkeit	515
12.1.4	Rückfederung	521
12.1.5	Aluminiumlegierungen für Karosserieanwendungen	522
12.2	Tribologisches Verhalten	527
12.2.1	Reibungsmechanismus	527
12.2.2	Das Tribosystem Blech-Werkzeug-Schmierstoff	528
12.3	Scherschneiden	534
12.3.1	Trennvorgang beim Normalschneiden	535
12.3.2	Genauscheiden	539
12.3.3	Feinschneiden	541
	Literatur	543
13	Sondergebiete der Umformtechnik	547
13.1	Weiterverarbeitung von Profilen und Rohren	547
13.2	Halbwarmumformen	558
13.3	Superplastische Umformung	560
	Literatur	564
14	Spanende Formgebung von Aluminium	567
14.1	Spanbildung	569
14.2	Spanformen bei Aluminiumwerkstoffen	571

14.3	Aluminiumwerkstoffe für Zerspanungszwecke	573
14.4	Zerspanbarkeit	575
14.5	Werkzeugverschleiß	577
14.6	Schneidwerkstoffe für die Aluminiumzerspanung	579
14.7	Kühlschmierstoffe	581
14.8	Oberflächen spanend bearbeiteter Al-Werkstoffe	582
14.9	Funkenerosive Bearbeitung	583
	Literatur	584
15	Oberflächenbehandlungen	587
15.1	Reinigungsprozess	589
15.2	Vorbehandlung	591
15.3	Beschichtungen	592
	Literatur	598
16	Schmelzschweißen	599
16.1	Schweißbeignung der Aluminiumwerkstoffe	600
16.2	Eigenschaften von Aluminiumschweißverbindungen	609
16.3	Schmelzschweißverfahren für Aluminium	615
16.3.1	Schutzgas-Lichtbogenschweißen	615
16.3.2	Strahlschweißverfahren	623
16.4	Schweißimperfektionen	628
	Literatur	629
17	Widerstandsschweißen	631
17.1	Widerstandspunktschweißen (WPS)	632
17.2	Buckelschweißen	642
17.3	Punktschweißkleben	643
	Literatur	644
18	Mechanisches Fügen	647
18.1	Merkmale mechanischer Fügetechniken	647
18.2	Durchsetzfügen	650
18.3	Nieten	654
18.3.1	Vollniete	654
18.3.2	Blindniete	655
18.3.3	Schließringbolzen	656
18.3.4	Stanzniet	657
18.4	Schraubverbindungen	659
18.5	Neuere Verfahrensentwicklungen	662
18.6	Festigkeitseigenschaften mechanisch gefügter Verbindungen	663
	Literatur	665