

INHALTSVERZEICHNIS

I. Einleitung	17
1. <i>Geschichtlicher Überblick über die anodische Oxydation</i>	17
2. <i>Zweck der anodischen Oxydation</i>	20
A. Ersatz für die galvanischen Plattierungsverfahren	25
B. Schutz der Oberfläche gegenüber chemischen und elektrochemischen Angriffsmitteln	26
C. Erhöhung der Oberflächenhärte bzw. Schutz vor einer zu raschen Veränderung des Aussehens	27
D. Dekorative Effekte	28
E. Sonstige Zwecke	28
II. Der Werkstoff	30
1. <i>Unlegiertes und legiertes Aluminium</i>	30
Metallographie	35
Eigenschaften der Metalle	35
Seigerungen	42
Aufbau und Wachstum der Metalle	48
A. Chemische Zusammensetzung der handelsüblichen Legierungen	54
B. Der Einfluss verschiedener Legierungselemente auf das Verhalten des Werkstoffs	66
C. Der Verteilungszustand der Fremdelemente und Legierungskomponenten	69
2. <i>Die Verarbeitungsformen und -arten</i>	90
A. Halbfabrikate	90
B. Fertigfabrikate	120
Drücken	121
Treiben	122
Tiefziehen	123
Streckziehen	127
Stanzen, Prägen	127
Kaltspritzen	127
Kaltpressen	128
Spanabhebende Bearbeitung	130
C. Verbindungsmethoden	136
Schrauben	138
Falzen	139
Nieten	140
Weichlöten	142
Hartlöten	145
Gasschweissen	146
Elektrisches Lichtbogenschweissen	153
Arcatomschweissen	154
Elektrisches Widerstandsschweissen	154
Stumpfschweissen	154

Punktschweissen	155
Nahtschweissen	157
Kleben	158
3. <i>Die physikalischen Eigenschaften der gebräuchlichen Aluminiumwerkstoffe.</i>	169
4. <i>Die Wärmebehandlung der Aluminiumwerkstoffe.</i>	183
Temperglühen	193
Aushärtung	199
Rekristallisation	208
5. <i>Das chemische und elektrochemische Verhalten des Aluminiums</i>	225
A. Allgemeine Chemie und Elektrochemie	225
Chemie der Elemente	228
Elektrolytische Dissoziation	233
Die Wasserstoffionenkonzentration	236
Oxydation und Reduktion	239
Der Bau der Atome	240
Osmotischer Druck; Lösungsdruck; Elektrolytisches Potential . .	246
Lokalelement	261
Passivität	266
Polarisation; Depolarisation; Überspannung	269
B. Spezielle Chemie des Aluminiums	275
C. Entstehung und Eigenschaften der natürlichen Oxydhaut	290
D. Spezielle Elektrochemie des Aluminiums	298
a) Das Potential des Aluminiums als stromerzeugendes Element .	298
b) Das Verhalten des Aluminiums in Lösungen unter Einwirkung des elektrischen Stromes	305
Anodisches Verhalten in Elektrolyten mit geringem Lösungsvermögen	320
Anodisches Verhalten des Aluminiums in Elektrolyten mit mittlerem Lösungsvermögen	329
Anodisches Verhalten des Aluminiums in Elektrolyten mit sehr starkem Lösungsvermögen	355
E. Das chemische Verhalten der technischen Aluminiumwerkstoffe . .	361
Wasser	369
Säuren und Basen	375
Fluorwasserstoff und Fluoride	377
Chlorwasserstoff und Chloride	378
Bromwasserstoff und Bromide	379
Jodwasserstoff und Jodide	379
Chlorsäure	379
Schwefelsäure und Sulfate	379
Schweflige Säure und Sulfite	380
Thiosulfate	381
Schwefelwasserstoff und Sulfide	381
Salpetersäure und Nitrate	382
Nitrite	383
Elementare Halogene	383
Permanganate	383
Chromsäure und ihre Salze	384
Phosphorsäure und Phosphate	385
Silikate und Silikofluoride	386
Cyanwasserstoff und Cyanide	386
Kohlensäure und Karbonate	386

Borsäure und Borate	388
Lösliche Hydroxyde	388
Ammoniak	389
Wasserstoffsuperoxyd	390
Organisch-chemische Verbindungen	391
Ameisensäure	391
Essigsäure und ihre Derivate	391
Milchsäure	392
Höhere Fettsäuren	392
Oxalsäure	392
Weinsäure und Zitronensäure	393
Benzoessäure und Salicylsäure	393
Alkohole, Äther und Ester	393
Aldehyde und Ketone	394
Halogenierte Kohlenwasserstoffe	395
Phenole	395
Reaktionstabelle	396-459
 6. <i>Das Korrosionsverhalten der Aluminiumwerkstoffe</i>	467
A. Der elektrochemische Charakter der Korrosion	467
B. Die hauptsächlichsten Korrosionsarten des Aluminiums	475
a) Korrosion durch sichtbare Verdrängung von Wasserstoff	476
Korrosion in stark saurer Lösung	477
Korrosion in stark alkalischer Lösung	477
Lokalelementkorrosion in saurer bis neutraler Lösung	481
b) Korrosion durch depolarisierende Wirkung des Sauerstoffs	482
Depolarisation mit Bildung lockerer Oxydschichten	482
Depolarisation mit Bildung kompakter Oxydschichten	484
c) Korrosion durch Elektronenaustausch mit einem andern Metall	485
d) Korrosion durch Verminderung der Wertigkeit eines in Lösung befindlichen Kations, ohne dessen vollständige Entladung	486
e) Korrosion durch gasförmige oder wasserfreie Stoffe	488
Oxydation durch den Luftsauerstoff	488
Oxydation durch gasförmiges Chlor	488
f) Lösungskorrosion durch andere Metalle bei höherer Temperatur	489
g) Erosion (physikalische Korrosion)	490
C. Die Erscheinungsformen der Aluminiumkorrosion	491
a) Gleichmässige Korrosion	492
b) Ungleichmässige Korrosion	493
1. Örtliche Abtragung am quasihomogenen Werkstoff	494
2. Interkristalline Auflockerung	497
3. Intrakristalline Korrosion	504
4. Schichtkorrosion	505
5. Korrosion unter mechanischer Spannung	507
Einige Beispiele für die thermische Korrosion	507
 7. <i>Die Beschaffenheit der Oberfläche</i>	513
A. Die Topographie der Oberfläche	514
a) Die Oberfläche der Aluminiumhalbfabrikate	515
b) Die Oberfläche nach mechanischer Bearbeitung	520
c) Die Topographie der Oberfläche nach chemischer Behandlung (Beizen)	525

B. Die Diskontinuität der Oberfläche	527
a) Die Diskontinuität an Halbfabrikaten	527
b) Diskontinuität durch äussere Einflüsse	535
C. Beschaffenheit der Oxydhaut	542
III. Die künstliche Verstärkung der Oxydhaut	545
1. <i>Chemische Sudverfahren</i>	545
Das Chromat-Soda-Sudverfahren (MBV, Pylumin)	555
2. <i>Die Schichtbildung durch anodische Oxydation</i>	569
A. Die Zusammensetzung der anodischen Oxydschicht	578
a) Der Wassergehalt (gebundenes Wasser)	578
b) Die Zwischenschicht	580
c) Die Porosität der beiden Schichten	581
d) Die Kristallstruktur des anodisch erzeugten Aluminiumoxyds	586
B. Bildungsmechanismus und Schichtaufbau	589
C. Die anodische Schicht im polarisierten Licht	603
a) Sehr dünne anodische Schichten	603
b) Dicke anodische Schichten	605
Theorie über die Entstehung der dielektrischen Grundsicht	609
D. Die Ausbildung der anodischen Oxydschicht an scharfen Krümmungen und Kanten	614
E. Die Tiefenwirkung (Streufähigkeit) bei der anodischen Oxydation	619
IV. Die Eigenschaften der anodischen Oxydschichten	624
1. <i>Das spezifische Gewicht</i>	624
2. <i>Schichtdicke, Masshaltigkeit, Gleichmässigkeit</i>	625
3. <i>Die natürliche Farbe und das Aussehen</i>	637
4. <i>Die Haftfestigkeit</i>	645
5. <i>Härte und Abreibfestigkeit, Sprödigkeit, Dehnbarkeit</i>	649
A. Härte und Abreibfestigkeit	649
a) Die Ritzhärte	650
b) Die Verschleissfestigkeit nach W. Mauksch und N. Budiloff	652
c) Die Abschleiffestigkeit nach dem Pressluft-Schleifkorn-Verfahren	656
B. Sprödigkeit und Dehnbarkeit	658
6. <i>Porigkeit, Färbereigenschaften</i>	662
a) Die Imprägnierbarkeit	662
b) Die Anfärbbarkeit	665
c) Die Quellbarkeit des Oxyds	666
Alkalisilikatsealing	671
Bichromatsealing	671
Nickel-Cobalt-Salz-Sealing	673
7. <i>Verhalten bei höherer Temperatur</i>	673
8. <i>Chemische Widerstandsfähigkeit, Korrosionsschutz</i>	675
9. <i>Elektrisches Verhalten</i>	683
a) Die Dielektrizitätskonstante	683
b) Oberflächenleitfähigkeit	684

c) Durchgangsfähigkeit	685
d) Durchschlagsfestigkeit	687
10. <i>Optische Eigenschaften</i>	699
a) Brechungsvermögen der anodischen Oxydschichten	699
b) Eigenstrahlung (Emissionsvermögen)	699
c) Rückstrahlung (Reflexionsvermögen)	704
11. <i>Einfluss der Anodisierung auf die mechanischen Eigenschaften des Metalls</i>	714
a) Dauerfestigkeit (Biegewechselbarkeit)	715
b) Spannungskorrosion	716

V. Technische Verfahren der anodischen Oxydation 720

1. <i>Die Einrichtung zur technischen Anodisierung</i>	721
a) Entfettungseinrichtung	724
b) Beizvorrichtungen	727
c) Wasch- und Spüleinrichtungen	728
d) Anodisierbehälter	729
e) Nachbehandlungseinrichtungen	736
f) Stromquellen	738
g) Hilfselektroden	741
2. <i>Die Vorbehandlung der zu anodisierenden Teile</i>	751
a) Aufstecken	752
b) Oberflächenreinigung	753
3. <i>Das Schwefelsäureverfahren</i>	759
4. <i>Das Oxalsäureverfahren</i>	774
5. <i>Das Chromsäureverfahren</i>	780
Das Bengough-Stuart-Verfahren	780
6. <i>Das Ematalverfahren</i>	790
7. <i>Die anodischen Glänzverfahren</i>	800
a) Das Brytalverfahren	801
b) Das Alzakverfahren	802
c) Andere Glänzverfahren	804
8. <i>Die Nachbehandlung der anodisierten Teile</i>	807
A. Neutralisieren und Spülen	807
B. Färben	809
C. Imprägnierung mit lichtempfindlichen Salzen	823
D. Das Nachverdichten (Porenverschlüssung)	826
a) Schliessen der Poren durch Quellung mit oder ohne Einlagerung von Salzen oder Hydroxyden	826
b) Schliessen der Poren durch Füllung mit organischen Stoffen	828
c) Schliessen der Poren durch kathodische Metallabscheidung	832
E. Das Nachpolieren und Fertigmachen	833

VI. Die Fehlermöglichkeiten 839

1. <i>Die Fehler am Werkstoff</i>	840
A. Chemische Zusammensetzung, Verarbeitungsart	840
B. Die Struktur des Werkstoffs	842

C. Poren- und Schlackeneinschlüsse im Guss (Giesstechnik)	845
D. Gasblasen in Blechen und Profilen.	848
E. Oxyd- und Schlackeneinschlüsse in Walz- und Pressmaterial	849
F. Ziehriefen an gepresstem bzw. kaltgezogenem Werkstoff	851
G. Bürstenmarken und Schaberstreifen im Blech.	852
H. Schleif- und Polierspuren	853
I. Eingebrauntes Fett.	854
K. Spannungsrisse.	854
L. Schwermetalleinschlüsse, grobe Verletzungen	856
M. Rekristallisation (Strecknarben)	858
2. <i>Die Fehler beim Anodisieren</i>	859
A. Mangelhafte Entfettung.	859
B. Ungenügendes Beizen.	859
C. Deformierung der Stücke beim Aufstecken	864
D. Wahl der Kontaktpunkte	864
E. Hilfselektroden für tiefe Hohlräume	865
F. Zu dünne Schichten	865
G. Mangelhafter Temperatenausgleich des Anodisierbades	866
H. Kurzschlüsse.	866
I. Fingerabdrücke, Verschmutzungen vor dem Färben und Sealen.	867
K. Chloridhaltige Anodisierbäder	867
L. Fehler beim Färben	868
M. Mangelhafte Nachverdichtung	870
N. Fehler beim Nachpolieren	870

VII. Konstruktive Richtlinien 872

VIII. Anwendungsbeispiele für die anodische Oxydation . . 904

1. <i>Gebrauchsgegenstände</i>	904
2. <i>Chemische Apparatur, Nahrungsmittelindustrie</i>	906
3. <i>Instrumentenbau</i>	911
4. <i>Architektur</i>	911
5. <i>Bedruckte Gegenstände</i>	912
6. <i>Armaturen</i>	913
7. <i>Flugzeug- und Fahrzeugbau</i>	913

IX. Untersuchungs- und Prüfverfahren 916

1. <i>Überwachung der Anodisierbäder</i>	916
A. Die Überwachung der Schwefelsäureelektrolyten.	918
a) Die Bestimmung des Gesamtsulfations (freie plus gebundene Schwefelsäure)	919
b) Die Bestimmung der freien Schwefelsäure (amerikanische Methode)	920
c) Die Bestimmung des gelösten Aluminiums.	922
Gravimetrische Aluminiumbestimmung	924
Kolorimetrische Aluminiumbestimmung	925
B. Die Überwachung der Chromsäureelektrolyten.	926
a) Titrimetrische Bestimmung der freien Chromsäure	926
b) Bestimmung der freien Chromsäure durch pH-Messung	927

C. Die Überwachung der Oxalsäureelektrolyten	932
a) Bestimmung der freien Oxalsäure.	932
b) Bestimmung des Gesamtoxydations (freie plus gebundene Oxal- säure)	934
c) Bestimmung des Aluminiumgehaltes	935
d) Durchschnittlicher Oxalsäureverbrauch	936
D. Die Überwachung der Ematalbäder	937
a) Titrimetrische Bestimmung des Titangehaltes	938
b) Kolorimetrische Bestimmung des Titangehaltes.	939
E. Die Überwachung des Glanzoxydationsbades nach Pullen	939
a) Bestimmung des Natriumkarbonates	941
b) Bestimmung des Trinatriumphosphates	941
2. Kontrolle der Färbelösungen (Farbflotten)	941
3. Kontrolle der Sealingbäder	942
a) Kontrolle des Bichromatsealingbades	942
b) Kontrolle der Nickel-Kobalt-Sealingbäder	943
c) Kontrolle des Heisswassersealingbades	944
4. Bestimmung der Tiefenstreuung in engen Hohlräumen	944
5. Bestimmung der Schichtdicke	946
A. Schichtdickenbestimmung unter Zerstörung des Werkstücks	950
a) Messung der Schichtdicke am Mikroschliff.	950
b) Bestimmung des Oxyds (mikrometrisch oder kolorimetrisch) nach Ablösung des Metalls	951
B. Schichtdickenbestimmung ohne Zerstörung des Werkstückes, aber unter Ablösung des anodischen Filmes	952
C. Schichtdickenbestimmung ohne Veränderung von Werkstoff und Oxydfilm	953
a) Direkte Messung mit Hilfe der Mikrometerschraube des Mikroskops	953
b) Schichtdickenbestimmung aus der elektrischen Durchschlags- spannung	956
6. Bestimmung der Porosität und Korrosionsbeständigkeit	958
A. Bestimmung der Porosität	958
B. Prüfung des Korrosionsschutzwertes der anodischen Schicht	960
a) Die thermische Salzsäureprobe	962
b) Die oxydische Kochsalzprobe.	963
c) Die Salzsäureprobe im Rührversuch	965
7. Bestimmung der Dehnbarkeit	965
8. Bestimmung der Verschleissfestigkeit	969
A. Verschleissprüfung nach W. Mauksch und N. Budiloff	969
B. Die Abschleiffestigkeit nach H. G. Arlt	971
9. Messung des Reflexionsvermögens	974
10. Einige nützliche Winke für Werkstoffuntersuchungen	976
A. Mikroskopische Prüfung.	977
B. Mechanische Prüfung	980
C. Qualitativ chemische Nachweise	983
Beizprobe in Natronlauge	986
Mangannachweis	986
Magnesiumnachweis	986

Kupfernachweis	987
Nickelnachweis	987
Cadmiumsulfatprobe	988
Löslichkeitsprobe in Königswasser	988
Eisennachweis	988
Titannachweis	989
Spektralanalyse	989
X. Kostenberechnung	995
XI. Reinigung und Unterhalt anodisch oxydierter Teile . . .	1012
XII. Patente über die anodische Oxydation von Aluminium und Aluminiumlegierungen	1015
Sachregister	1025
Autorenregister	1034

LITERATURVERZEICHNIS

Der Werkstoff

Unlegiertes und legiertes Aluminium	89-90
Die Verarbeitungsformen und -arten	167-168
Die physikalischen Eigenschaften der gebräuchlichen Aluminium- werkstoffe	182
Die Wärmebehandlung der Aluminiumwerkstoffe	223-224
Das chemische und elektrochemische Verhalten des Aluminiums .	460-466
Das Korrosionsverhalten der Aluminiumwerkstoffe	510-512
Die Beschaffenheit der Oberfläche	543-544

Die künstliche Verstärkung der Oxydhaut

Chemische Sudverfahren	568-569
Die Schichtbildung durch anodische Oxydation	622-623

Die Eigenschaften der anodischen Schichten

Die technischen Verfahren der anodischen Oxydation

Die Fehlermöglichkeiten

Konstruktive Richtlinien

Anwendungsbeispiele für die anodische Oxydation

Untersuchungs- und Prüfverfahren

Kostenberechnung

Patentzusammenstellung