

Failure mode and effect analysis voor aluminium

Citation for published version (APA):

van Schaijk, L. A., & Raymakers, T. (1991). *Failure mode and effect analysis voor aluminium*. (FAGO : rapport; Vol. 9125M). Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1991

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Stichting CUR
Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving

Programma-Advies-Commissie PAC 11

Rapportnummer FAGO-91.25.M.

Technische Universiteit Eindhoven
Faculteit Bouwkunde
Vakgroep FAGO
Sectie Materiaalkunde
Tel.: 040-473350

*Failure Mode and Effect Analysis voor
ALUMINIUM*

22

Rapport in het kader van het IOP-onderzoeksproject:
'Materiaaltechnologie en levensduur van bouwdelen'

Auteurs: ir. L.A. van Schayk (TUE)
ir. Th. Raymakers (TNO-Bouw)

Eindhoven, september 1991

INHOUD

TEN GELEIDE	5
1 INLEIDING	7
2 FMEA VOOR ALUMINIUM	11
3 DEGRADATIEMODELLEN	19
4 LITERATUUR	25

TEN GELEIDE

Onder auspiciën van de Programma Coördinatie Raad (PCR) van de samenwerkende collectief programmerende instellingen ISSO, SBR, C.R.O.W. en CUR is door de CUR Programma Advies Commissie PAC 11 "Materiaaltechnologie: levensduur en duurzaamheid" een voorstel gedaan voor het uitvoeren van een onderzoek op het gebied van de duurzaamheid van bouwdelen. Het doel hiervan is om te komen tot een zo goed mogelijke voorspelling van het gedrag van bouwdelen teneinde een afweging van de kwaliteit/kostenverhouding van bouwwerken te kunnen maken. In het bijzonder zou daarbij een methodiek worden opgezet met betrekking tot de levensduur en de onderhoudsbehoefte in relatie tot de kwaliteit/kostenverhouding. Het programmavoorstel is omschreven in het PAC 11 rapport "Programmaformulering materiaaltechnologie en levensduur van bouwdelen".

Door het Ministerie van Economische Zaken is een subsidie voor het uitvoeren van het onderzoekprogramma ter beschikking gesteld. De overige financiering is afkomstig van de deelnemende instellingen, te weten:

- CUR, mede namens SBR, C.R.O.W. en ISSO;
- TU-Delft, de vakgroep Mechanica en Constructies;
- TU-Eindhoven, de vakgroepen FAGO (Fysische Aspecten van de Gebouwde Omgeving) en BPU (Bouw Productie & Uitvoering);
- TNO-Bouw, de sectie Materiaalkunde en het Centrum voor Houttechnologie en TNO-IPL (Instituut voor Productie en Logistiek), de groep Corrosieonderzoek.

Door de genoemde onderzoekinstellingen wordt binnen het genoemde programma samengewerkt. Op die manier kon kennis worden ingebracht op nagenoeg het gehele, brede probleemveld.

Voor de uitvoering van het onderzoek is het oorspronkelijke onderzoeksplan van PAC 11 gehegroepeerd en moesten, op basis van de tussenresultaten, enige accenten worden verlegd. Het oorspronkelijke voorstel is daardoor in opzet vereenvoudigd en legt het accent meer in de tweede (onderzoeks)fase en komt neer op:

- fase 1:
 - inventarisatie van nationaal en internationaal onderzoek en kennis op het gebied van levensduur;
 - schetsen van de contouren van een afwegingsmethode met betrekking tot kwaliteit en kosten;
 - formuleren van materiaalbouwdeelontwikkelingen en vaststellen van lacunes in de kennis met betrekking tot de levensduur;
- fase 2:
 - toepassen van de afwegingsmethode op een aantal concrete duurzaamheidsproblemen met als doel de methodiek te vervolmaken en een goede afstemming te bewerkstelligen tussen de onderzoekinstellingen;
- fase 3:
 - eindrapportage met aanbevelingen.

Het onderhavige rapport is opgesteld door de Technische Universiteit Eindhoven, Faculteit Bouwkunde, vakgroep FAGO en geeft een verslag van één van de deelprojecten die in fase 2 zijn uitgevoerd.

1 INLEIDING

Aluminium kenmerkt zich doordat er bij expositie aan de atmosfeer aan het oppervlak spontaan een (oxyde-)beschermingslaagje wordt gevormd dat onder gematigde en milde omstandigheden stabiel blijft. Dit laagje is er verantwoordelijk voor dat het metaal doorgaans weinig aan degradatie onderhevig is en vergeleken met staal, een geringecorrosiegevoeligheid kent. Met name zuiver aluminium, maar ook sommige legeringen, bezit een 'atmosferische-corrosie-bestandheid' die we zouden kunnen vergelijken met metalen als chroom, titaan, diverse chroomhoudende nikkellegeringen, zilver en ook de hoog chromatische (roestvaste) staalsoorten en behoort kortom tot een groep metalen die we kunnen aanduiden als 'halfedel' [8].

In bouwprodukten wordt in plaats van zuiver aluminium doorgaans een aluminiumlegering gebruikt. De meeste aluminiumlegeringen behoren niet tot de bovenstaande 'corrosie-bestandheidsgroep', maar tot de groep waar metalen als zink, lood, koper en nikkel deel van uit maken [8]. Voor deze aluminiumsoorten geldt dat er behalve in de extreem agressieve milieu's ook in gematigd agressieve omstandigheden atmosferische degradaties kunnen optreden. In het algemeen kunnen we konstateren dat wanneer aluminiumlegeringen enige jaren blootgesteld worden aan met name de atmosfeer in industriële gebieden, de 'passieve beschermingsconstructie' op sommige posities zal verdwijnen, zodat er plaatselijk corrosie optreedt, in de regel 'putcorrosie' genaamd. Met name blijken de aanwezigheid van zwavelverbindingen, chloriden en roet en vuil in de atmosfeer het corrosieproces zeer te bevorderen.

Aluminiumsoorten zijn volgens de 'Aluminium Alloy Series' onderverdeeld in 7 series van legeringen. Dit zijn achtereenvolgens de zuivere aluminiumsoorten zonder belangrijke toevoegingen (de 1000 serie), de legeringen met koper, mangaan en magnesium (Al-Cu-Mn-Mg, de 2000 serie), de legeringen van aluminium met mangaan (Al-Mn, de 3000 serie), de legeringen met silicium (Al-Si, de 4000 serie), de magnesiumlegeringen (Al-Mg, soms ook met wat mangaan, de 5000 serie), de legeringen met magnesium en silicium (Al-Mg-Si, de 6000 serie) en tenslotte de legeringen met zink als belangrijkste toevoeging (Al-Zn, waarbij ook wel secundair magnesium of koper wordt toegevoegd, de 7000 serie). Een vergelijkend overzicht van internationaal gehanteerde coderingen voor aluminiumlegeringen wordt gegeven in de NPR 2700. Een meer uitgebreid overzicht wordt gegeven in 'Registration Record of International Alloy Designations and Chemical Compositions Limits for Wrought Aluminium and Wrought Aluminium Alloys', een publikatie van The Aluminum Association.

De aluminiumlegeringen die in de bouw in Nederland doorgaans worden toegepast zijn:

- ASTM 6063 T4/T5 (AlMgSi0,5)
algemeen voor profielen voor ramen, kozijnen, gevels, ook voor bijv. galerijhekken;
- ASTM 6181 T6 (AlMgSi0,8)
idem;
- ASTM 6082 T6 (AlMgSi1)
dakglasroeden
- ASTM 3003 H12 (AlMnCu)
gevel- en dakbeplating
- ASTM 5050 (AlMgMn legering)
o.a. gevel-, dak- en plafondproducten
- ASTM 5578-98 (AlMgMn legering)
gevel- en dakbeplating

Verder worden nog de magnesiumlegeringen AlMg1, AlMg3, AlMg99 gebruikt (ook voor gevelbeplatingen) en voorts de AlZn4,5Mg1 en AlZnMgCu1,5 legeringen. In sommige gevallen wordt naast zuiver aluminium (ASTM 1100) ook de legering ASTM 7032 als toplaag (platteerlaag) voor alclad aluminium gebruikt.

Voor aluminium draagconstructies verwijzen we naar tabel 1 van de TGB-Aluminiumconstructies (NEN 3854), welke in dit rapport is opgenomen.

aanduidingen				mechanische eigenschappen (keuringseisen)			reken- waarde T.G.B.
duits		amerikaans		$\sigma_{0,2}$	σ_B	A5	$\sigma_{0,2}$
legering	toestand	legering	toestand	N/mm ²	N/mm ²	%	N/mm ²
AlMnCu	F 13	3003	H12	90	125	7	90
AlMg4,5Mn	F 27	5083	O	120	270	12	120
AlMg2,7Mn	G 27	5454	H34	200	270	10	200
AlCuMg2	F 44	2024	T4	290	440	14	290
		6061	T6	240	260	8	210
AlMgSi0,5	F 13	6063	T4	65	130	15	65
AlMgSi0,5	F 22	6063	T5	160	215	12	160
AlMgSi0,8	F 28	6181	T6	200	275	10	200
AlMgSi1	F 31	6082	T6	260	310	10	250
AlZn4,5Mg1	F 35	7020	T6	290	350	10	280
AlZnMgCu1,5	F 53	7075	T6	460	530	7	425

Tabel 1 Aluminiumlegeringen (vlgs NEN 3854) voor toepassing in constructiedelen

De samenstelling van het aluminium is belangrijk voor het type en de snelheid waarmee atmosferisch corrosie kan optreden. In zijn algemeenheid kan men stellen dat hoe hoger het percentage vreemde metalen in de aluminium legering, des te groter de kans wordt op een plaatselijk verlies van de oxydelaag. De legeringen met Cu, met Cu-Ni of met Cu-Mg zijn atmosferisch sterker corrosief vanwege de kathodische toevoegingen. Ook de legeringen met Mg en met ZnCu alsmede de extra sterke soorten zoals duraluminium (aluminium met 4%Cu, 1,4%Mg, 0,5%Si, 1,1%Mn) zijn meer atmosferisch corrosief dan de voor de bouw gebruikelijke soorten (5000 en 6000 serie). Bij de sterkere en hardere legeringen dient men rekening te houden met een vergrote kans op spanningcorrosie (zie FMEA).

Naast de chemisch samenstelling is echter ook de soort en intensiteit van de warmtebehandeling van invloed op de atmosferische corrosiebestandheid. Hier wordt onderscheid gemaakt tussen thermisch veredebare legeringen (o.a. de series 2000, 6000 en 7000) en de niet-thermisch veredebare legeringen (o.a. de series 3000 en 5000). Voor de eerste worden warmtebehandelingen T4 (bij kamertemperatuur gehard) en T6, etc. (bij hogere temperatuur gehard) toegepast. Voor de thermisch niet veredebare legeringen worden behandelingen F (warmvervormd) en H (koudvervormd) gebruikt. Uit onderzoek is gebleken dat het effect van de warmtebehandeling op de corrosiegevoeligheid van blank, ongeanodiseerde en niet van een coating voorzien aluminium voor een aantal legeringen groot kan zijn [6].

2 FMEA VOOR ALUMINIUM

Een 'failure mode and effect analysis' bestaat uit een schematische analyse van de factoren, processen en verschijnselen (effecten) welke ten grondslag liggen aan de degradatie van een materiaal. We onderscheiden daarbij 6 groepen van factoren, te weten:

- mechanische factoren
- biologische factoren
- chemische factoren
- fysische factoren
- gebruiksfactoren
- onverenigbaarheidsfactoren

In de FMEA-ALUMINIUM zijn derhalve de factoren, processen en verschijnselen opgenomen die leiden tot c.q. een bijdrage kunnen leveren aan het conditieverlies van aluminium in de bouw. Tenzij anders is aangegeven, is de inwerking van de degradatiefactoren echter afgestemd op het onafgewerkte 'kernmateriaal'. De kwaliteit van anodiseerlagen en coatings, zoals die veel in van aluminium vervaardigde bouwproducten worden toegepast, wordt gemeten aan de mate waarin ze het kernmateriaal ten opzichte van de in de FMEA opgenomen agentia ook bij langdurig gebruik bescherming kunnen bieden. In de FMEA is tevens ruimte geschonken aan de rubriek 'voorwaarden'. Het is de bedoeling dat hiermee een overzicht wordt geboden van de omstandigheden die (aanvullend) moeten gelden wil het beschreven proces überhaupt kunnen optreden.

Belangrijkste degradatieprocessen van aluminium

gelijkmatige corrosie:

Hieronder wordt bij aluminium verstaan:

- a) de normale, natuurlijke reactie van aluminium met de atmosfeer waardoor een afsluitend laagje aluminiumoxyde gevormd wordt, en
- b) de reactie van dit oxydelaagje met de in de atmosfeer aanwezige luchtvervuilende stoffen, waardoor het laagje geleidelijk oplost.

Indien de afbraak sneller plaatvindt dan de vorming van een nieuw laagje, ontstaat een grote kans op een plaatselijke 'depassivering' waardoor dan putcorrosie zal gaan optreden.

putcorrosie:

Dit ontstaat vaak als vervolg op de in de meeste atmosferen automatisch optredende gelijkmatige corrosie. Aanleiding zijn meestal beschadigingen, fouten of poriën in de oxyde- of afwerklaag waardoor ten gevolge van ongelijkmatige spanningen een electrolytisch proces op gang wordt gebracht. De degradatie zal zich op een geconcentreerd versneld voortzetten omdat de omgeving kathodisch beschermd wordt. Dit proces kan als volgt worden beschreven:

Afhankelijk van het pH-gehalte in de elektrolyet vinden er anodische reacties plaats met Al-ionen (Al^{3+} , $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$). Het pH-gehalte is niet de enige belangrijke factor, de specifieke negatieve ionen hebben ieder een bepaalde agressiviteit.

Bij putcorrosie zijn enkele fasen te onderscheiden:

1. absorptie van ionen (bijvoorbeeld chloride, bromide, jodide) in de oxydelaag (scheurtjes, spleten).
2. er vindt een chemische reactie plaats tussen de ionen met de oxydelaag die daarbij wordt omgezet in oplosbare produkten.
3. de oplosbare produkten verspreiden zich.
4. wanneer de oxydelaag is verzwakt vormen zich plaatselijk Al^{3+} -ionen in het metaal-electrolytgebied. De putcorrosie is begonnen.

Voor putcorrosie van aluminium geldt dat een beschut oppervlak dat weinig of niet door regenwater schoon wordt gespoeld eerder ernstig zal zijn aangetast dan een vlak dat wel regelmatig wordt gereinigd.

vermoeiingscorrosie en spanningscorrosie:

Als gevolg van wisselende belastingen of temperatuurswisselingen kunnen grote spanningen ontstaan in het metaal die tot gevolg kunnen hebben dat zich kleine scheurtjes vormen. Het oppervlak van deze scheurtjes zal oxyderen en de corrosieprodukten kunnen aanleiding geven tot het zogenaamde 'crack-blocking'. Tijdens het oxyderen ontstaat ook waterstof. Dit wordt vooral in de punt van het scheurtje geabsorbeerd, waardoor de scheur zich plaatselijk gaat verdiepen. Het beschreven proces speelt met name ook een rol bij lage spanningen en leidt meestal tot een vermindering van de treksterkte en de buigtreksterkte.

Voor spanningscorrosie geldt een zelfde soort van proces, zij het dat hier de scheurtjes ontstaan door overbelasten of door kruip. Het blijkt dat, met name in de vliegtuigbouw, de hoge-sterkte aluminiumlegeringen gevoelig zijn voor atmosferische corrosie indien zich, en dat is vaak het geval, voldoende micro-scheurtjes hebben gevormd.

exfoliatie en interkristallijne corrosie:

Deze twee verschijnselen treden over het algemeen op bij de 'hoge sterkte' legeringen. Exfoliatie is een gevolg van een corrosieproces dat zich onder het oppervlak voortzet en daardoor schilfers wegdrukt. Ook bij staal en ijzer komt dit proces wel vaker voor.

Interkristallijne corrosie is het resultaat van een proces dat zich afspeelt in de grensvlakken van kristallen. Door oververzadiging van kristallen kunnen zich op grensvlakken afscheidingen voordoen, waardoor t.g.v. de veranderde samenstelling in die vlakken potentiaalverschillen ontstaan. Indien aan een andere voorwaarde van corrosie is voldaan, nameleijk de vorming van een elektrolyet (water, zuur), komt een corrosieproces op gang dat de grensvlakken volgt. In een gevorderd stadium manifesteert het proces zich ook als putcorrosie.

draadvormige corrosie:

Ook draadvormige corrosie komt vaker voor bij legeringen met hogere sterkten. Het is het resultaat van een proces dat zich draadvormig in het grensvlak van het aluminium en de afwerklaag uitbreidt. Vaak is de oorzaak gelegen in het onzorgvuldig aanbrengen van de afwerklaag (fouten en/of zoutresten in de verfbaden). Draadvormige of filiforme corrosie tast de eigenschappen van het materiaal niet aan. Omdat het vaak begint bij één punt kan hier op den duur putcorrosie ontstaan.

spleetcorrosie:

Het achterliggende proces van spleetcorrosie is niet wezenlijk verschillend van dat van putcorrosie. Spleten kunnen zich voordoen ten gevolge van lasverbindingen en van fabrikage (extrusie) fouten. Ook kunnen zij zich voordoen door montagethoden waarmee lokaal hoge trekspanningen in het materiaal worden geïntroduceerd (bijvoorbeeld boutverbindingen).

contactcorrosie:

Indien aluminium in vochtige en aangezuurde omstandigheden in contact treedt met metalen die minder anodisch zijn, ontstaat er een electrolytisch proces dat de z.g. contactcorrosie ten gevolg heeft. Het aluminium fungeert hierbij als anode en zal derhalve materiaal verliezen.

Indien aluminium echter in contact treedt met basische stoffen, bijvoorbeeld uit cementgebonden mortels, zal hierdoor ook het oxydelaagje worden vernietigd, waardoor er afhankelijk van het oppervlak en de omstandigheden depassivering kan ontstaan.

Belangrijkste degradatieverschijnselen van aluminium

Corrosie:

- gelijkmatige corrosie
- putcorrosie ('pitting')
- vermoeingscorrosie ('corrosion fatigue crack')
- spanningscorrosie ('stresscorrosion')
- spleetvorming + corrosie
- afschilfering ('exfoliation')
- interkristallijne corrosie
- draadvormige ('filiforme') corrosie
- contactcorrosie

Erosie:

- verruwing
- verdoffing
- verkleuring

Belangrijkste voorwaarden voor het ontstaan van corrosie van onbehandelde aluminiumlegeringen

externe voorwaarden:

- aanwezigheid water
- een lokatie, oriëntatie en bouwdeelvorm c.q. detaillering waardoor via achtereenvolgende deposities concentraties van roet, vuil, e.d. ontstaan
- de inwerking van uitloogstoffen afkomstig van omgevende materialen
- blootstelling aan hoge belastingen (permanent of wissel)
- blootstelling aan hoge temperaturen
- contact met ander materialen

produkt-voorwaarden:

- fouten, beschadigingen of poriën in oxydelaag of in afwerklaag
- spanningen in het oppervlaktemateriaal t.g.v. onvolledig of onvoldoende nabehandelen
- spanningen in het oppervlaktemateriaal t.g.v. het lassen
- de aanwezigheid van scherpe hoeken en randen
- de aanwezigheid van (micro)scheurtjes

Belangrijkste verliezen aan materiaaleigenschappen t.g.v. corrosie

- 1 verlies van oppervlakte-eigenschappen zoals glans, kleur, ruwheid
- 2 verlies van treksterkte
- 3 verlies van afschuifsterkte
- 4 verlies van taaiheid (verbrossing)

ALUMINIUM: Failure Mode and Effect Analysis

Code	Degradatie-factoren	Degradatie-proces	Degradatie-verschijnsel	Voorwaarden	Modellen	Literatuur
a MECHANISCH						
a1	overbelasten	doorbuiging	plastische vervorming, scheuren, breuk		ja	4, 7
		oxydatie van de (micro)-scheuren	spannings-corrosie, materiaal-verlies	aanwezigheid H ₂ O;	ja	4, 16
a2	langdurig belasten	doorbuiging	kruipt		ja	4, 7
		oxydatie van de (micro)-scheuren	spannings-corrosie, materiaal-verlies	aanwezigheid H ₂ O	ja	1, 5, 8, 18
a3	wisselende belasting	vermoeiing	scheuren, breuk	langdurig	ja	4, 7
		oxydatie van de (micro)-scheuren	vermoeiings-corrosie, materiaal-verlies	langdurig; aanwezigheid H ₂ O	ja	1, 5, 8, 18
b BIOLOGISCH						
b1	uitwerpselen vogels	oxydatie	materiaal-verlies	fouten in oppervlakte-laag	--	Ned.Bouw Doc.
b2	urine	oxydatie	materiaal-verlies	fouten in oppervlakte-laag	--	Ned.Bouw Doc.
c CHEMISCH						
c1	lucht	oxydatie	vorming oxydehuid	--	ja	1, 4, 6, 8
c2	Cl ⁻ (depositie)	oplossen oxydehuid	algehele corrosie, materiaal-verlies	oppervlakte-vuul; aanwezigheid H ₂ O	ja	1, 2, 4, 6, 8, 11
		oplossen anodiseer-laag	algehele corrosie, materiaal-verlies	ingesloten zout- en vuildeeltjes; aanwezigheid H ₂ O	ja	1, 2, 4, 6, 8, 11

Code	Degradatie- factoren	Degradatie- proces	Degradatie- verschijnsel	Voorwaarden	Modellen	Literatuur
		oxydatie	putcorrosie	oppervlakte- vuil; aanwezigheid H ₂ O	ja	1, 2, 4, 6, 8, 11
		oxydatie	spleet- corrosie	spleten 0,05- 0,2 mm; vuil; vocht; gebrek aan zuurstof	--	1, 2, 4, 6, 8, 10, 11
		oxydatie	'cubic corrosion'	bij lasnaden	--	4, 7
c3	SO ₂ /SO ₄ ²⁻ (depositie)	oplossen oxydehuid	corrosie, materiaal- verlies	oppervlaktevuil of ingesloten zout- en vuil- deeltjes; aan- wezigheid H ₂ O	ja	1, 2, 4, 6, 8, 11
		oplossen anodiseer- laag	corrosie, materiaal- verlies	oppervlaktevuil of ingesloten zout- en vuil- deeltjes; aan- wezigheid H ₂ O	--	1, 2, 6, 8
		oxydatie	putcorrosie	oppervlaktevuil of ingesloten zout- en vuil- deeltjes; aan- wezigheid H ₂ O	ja	1, 2, 4, 6, 8
		oxydatie	spleet- corrosie	spleten 0,05- 0,2 mm; oppervlakte- vuil; zuurstof- gebrek; aan- wezigheid H ₂ O	--	1, 6, 8, 11
		oxydatie	'cubic corrosion'	bij lasnaden	--	4, 7, 11
c4	HNO ₃ (depositie)	vorming HCl	electro- chemische corrosie	oppervlak met Cl ⁻ -zouten verontreinigd	--	8, 11
		vorming electrolyt- laag bij relatief lage R.V. (≥60%)	versnelling corrosie- proces	aanwezigheid H ₂ O	--	8,11

ALUMINIUM: Failure Mode and Effect Analysis

Code	Degradatie- factoren	Degradatie- proces	Degradatie- verschijnsel	Voorwaarden	Modellen	Literatuur
d FYSISCH						
d1	zand/stof + wind	erosie	oppervlakte schade zandstraal- effect	wind; zand; stof	--	10, 11
d2	temperatuur wisselingen	spanning - relaxatie	vermoeding	--	--	10, 11
d3	U.V. straling	kleur- en glansverlies van anodi- seerlaag	idem	alleen geanodiseerd aluminium	--	3, 9
d4	extreem hoge temperatuur	uitbreken Al ₃ Mg ₂ deeltjes	inter- kristallijne corrosie	alleen bij AlMg ₅	--	6, 7, 8
e GEBRUIK						
e1	Pb, Fe, Ni, Cu in depositie	electrolyse	putcorrosie	aanwezigheid H ₂ O	ja	1, 4, 6, 8, 18
e2	vuil- en roet- depositie	oxydatie	putcorrosie	aanwezigheid H ₂ O	--	6, 8, 11
e3	slijtage	wegslijten	cavitatie, wrijving	loopzone	--	
e4	misbruik	beschadiging aluminium	vermindering esthetische kwaliteit; corrosie	loopzone	--	
		beschadiging anodiseer- laag	corrosie	aanwezigheid H ₂ O	--	

Code	Degradatie- factoren	Degradatie- proces	Degradatie- verschijnsel	Voorwaarden	Modellen	Literatuur
f ONVERENIGBAARHEIDSFACTOREN						
f1	vers hout	aantasting door inhouds- sappen (verzuring)	corrosie, materiaal- verlies	--	--	
f2	vochtig hout, -isolatiemat. of -steen	oxydatie	corrosie, materiaal- verlies	lucht- vervuiling (zie c1, c2, etc.)	--	2,10,11
f3	houtver- duur- zamings- middelen	agressieve reactie	corrosie, materiaal- verlies	koper/kwik- zouten	--	4,10,11
f4	cement, beton (vers of nat)	oxydatie	corrosie, materiaal- verlies	oppervlakte- vuil	--	4,10,11
f5	Pb, Fe, Ni, Cu	electrolyse	contact- corrosie, materiaal- verlies	aanwezigheid H ₂ O	ja	1

3 DEGRADATIEMODELLEN

De in de FMEA weergegeven processen, waar rekenregels van bekend zijn, zijn de volgende:

- a1 /scheurvorming t.g.v. overbelasting
- a2 /kruip
- a2 /spanningcorrosie
- a3 /vermoeiingscorrosie;
- c1 /algemene atmosferische corrosie;
- c2 /gelijkmatige corrosie in combinatie met putcorrosie t.g.v. Cl⁻;
- c3 /gelijkmatige corrosie in combinatie met putcorrosie t.g.v. SO₂;

a1 /scheurvorming t.g.v. overbelasting

T.a.v. dit proces is in de technisch mechanica en konstruktieleer voldoende kennis aanwezig, hoewel er naar specifieke legeringen nog onderzoek zal moeten worden gedaan (zie TGB-Aluminium, NEN 3854) en voorts [4,7].

a2 /kruip

Kruip is het langzaam, plastisch, al of niet continu voortgaand deformerend onder invloed van een spanning die bij korte statische belasting geen plastische vervorming veroorzaakt. Kruip in metalen wordt in de regel veroorzaakt door de aanwezigheid van dislocaties in het rooster waardoor korrelgrenzen ontstaan. Indien het aantal korrelgrenzen te groot is kan het materiaal eventueel naderhand gerekristalliseerd worden.

Bij een voldoende hoge mechanische belasting gaan de korrels ten opzichte van elkaar verschuiven (lopen) en vertoont het materiaal kruip. Het kruipgedrag van metalen is afhankelijk van de temperatuur en de belasting. In het algemeen kan men 3 stadia onderscheiden: het 'vertragingstadium' (waarin de reksnelheid daalt), het 'eenparigheidsstadium' (waarin de reksnelheid constant is) en tenslotte het versnellingsstadium (waarin de reksnelheid toeneemt totdat uiteindelijk breuk optreedt).

Bij metalen onderscheiden we de 'koude kruip' en de 'hoge temperatuur kruip'. Voor een temperatuur die lager is dan ongeveer een kwart van het smeltpunt in Kelvin treedt koude kruip op. Bij aluminium is dit gemiddeld bij 250 K. Het proces van koude kruip kent alleen een vertraging- en een eenparigheidsstadium. De hiermee gepaard gaande deformaties zijn echter veel kleiner dan bij hoge temperatuur kruip. In figuur 1 worden voor aluminium zowel de hoge temperatuur kruipkromme als de kromme ten gevolge van koude kruip gegeven.

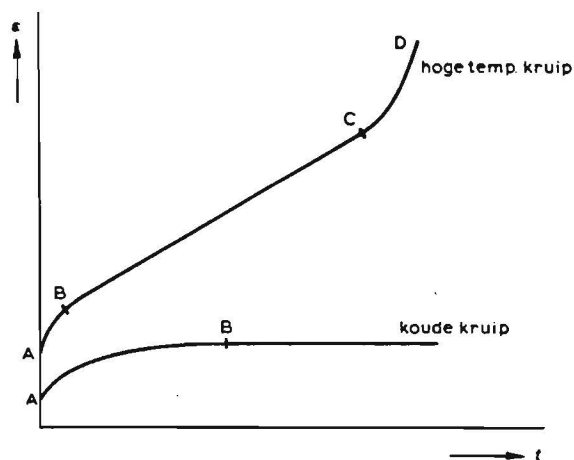


Fig.1 Vervormings-kruipkrommen voor aluminium bij hoge en lage temperatuur

Het aluminium dat in bouwdeelen wordt toegepast zal in de regel met combinaties van belastingen en gebruikstemperaturen worden geconfronteerd waarbij de kruip door de bovenste kromme wordt bepaald. In alle gevallen zal de koude kruip kromme maatgevend zijn en dientengevolge de in de praktijk optredende bouwdeel-kruip zeer minimaal. De conclusie is hiermee gerechtvaardigd dat kruipverschijnselen voor aluminium bouwdeelen doorgaans geen rol van betekenis spelen. Temeer ook omdat het kruipgedrag van aluminium sterk overeenkomst vertoont met het koude kruipgedrag van andere metalen als staal, koper, zink, etc. verwijzen we hier naar algemeen metaalkundige verhandeling over het onderwerp kruip in metalen en voorts naar [4,7].

a2 /spanningscorrosie en a3 /vermoeiingscorrosie

Zoals reeds bij kruip besproken kan de fabrikage en warmtebehandeling van aluminiumprodukten leiden tot dislocaties die in de doorsnede van het materiaal alsook aan het oppervlak aanleiding geven tot veel z.g. oppervlakte-imperfecties. Via een op de samenstelling van het aluminium afgestemde warmtebehandeling kan hiervan een goed deel worden gecorrigeerd.

Indien het materiaaloppervlak echter onder zeer langdurige constante spanning staat kunnen de imperfecties tot micro-scheurtjes leiden welke met name onder aanwezigheid van water of waterdamp (condenseert in scheurtjes) zullen gaan corroderen. De hierdoor ontstane corrosieprodukten raken 'ingesloten' (crackblocking) en er ontstaan lokaal, in de scheurtip) spanningsconcentraties die tot verdieping en vergroting van de scheurtjes aanleiding kunnen geven. Hiermee dringt het corrosieproces dieper in het materiaal en wordt het degradatie-oppervlak vergroot.

Bij wisselbelasting veranderen de scheurtjes steeds van vorm. Als ze onder trekspanning staan gaan ze openstaan en zuigen de elektrolyt aan, en als ze onder drukspanning staan persen ze het er weer uit. Hierdoor gaat het proces verder en wordt het materiaal snel zwakker. De frequentie van de wisselbelasting blijkt een grote invloed op het proces en daarmee op de vermoeiingssterkte van het materiaal te bezitten. Het corrosieproces verloopt in de regel een stuk sneller dan het corrosieproces onder een vergelijkbare constante belasting.

In de bouw worden aluminiumprodukten tegenwoordig bijna altijd voorzien van een oppervlakte laag waarmee eventuele imperfecties van de atmosfeer worden afgeschermd. Daarnaast worden ook specifieke maatregelen getroffen om het oppervlak te perfectioneren (polijsten, sealen).

Voor bouwprodukten geldt dat er in de regel geen onafgewerkt aluminium wordt gebruikt voor buitentoepassingen die zodanig worden belast dat zich grote aantallen microscheurtjes zullen vormen (in tegenstelling tot bijvoorbeeld de vliegtuigbouw waar het probleem van de vermoeiingscorrosie of 'fatigue-crack' aan de orde van de dag is). Vandaar dat de conclusie gerechtvaardigd lijkt dat de kans zeer klein is dat bouwprodukten op deze wijze zullen corroderen. Wel merken we op dat gelet op de geringe dikte (ca. 20 micrometer) en de brosheid van de (keramische) anodiseerlaag, de te verwachten kans op het door de oppervlaktelaag heendringen van microscheurtjes bij geanodiseerde produkten groter zal zijn dan bij aluminiumprodukten die voorzien zijn van een vaak dikkere en meer vervormbare coating. Modellen zoals die voor het berekenen en voorspellen van spanningscorrosie en vermoeiingscorrosie worden gebruikt, kan men vinden in een aantal, voornamelijk op de legeringen gebruikt bij vliegtuigbouw geënte onderzoeksverslagen die daarover recentelijk zijn gepubliceerd en voorts in [1,5].

c1 /algemene atmosferische corrosie

Als maatstaf voor het bepalen van algemene atmosferische corrosie, d.w.z. corrosie ten gevolge van alle agentia die (toevallig) in een bepaalde atmosfeer voorkomen, geldt het optredende massa-verlies als functie van het aantal expositiejaren. De volgende uitdrukking hiervoor werd gevonden:

$$M = Kt^n$$

waarin:

- M is het totale verlies van massa veroorzaakt door corrosie per eenheid van blootgesteld oppervlak (g/m^2);
- t is de expositietijd (in jaren);
- K is de proportionaliteits constante;
- n is de 'massaverlies-exponent'.

Alloy	Temper	Brooklyn			New Haven			Daytona Beach		
		n	K	R	n	K	R	n	K	R
1100	0	0.78	2.7	0.99	0.30	3.3	0.83	0.27	1.7	0.43
1100	H16	0.52	5.4	0.88	0.66	1.9	1.00	0.65	1.1	0.99
1100	H18	0.71	3.3	0.98	0.31	3.0	0.84	0.25	1.9	0.38
2024	T3	0.66	6.8	0.97	0.29	4.7	0.84	0.19	6.2	0.42
2024 CD	T3	1.18	1.2	0.99	0.35	2.4	0.71	0.67	0.9	0.98
3003	0	0.88	2.8	0.98	0.43	2.5	0.72	0.51	1.4	0.98
3003	H14	0.78	4.3	0.99	0.26	3.6	0.44	0.59	1.8	0.95
3004	H36	0.90	2.7	0.98	0.46	3.3	0.93	0.77	0.8	0.97
3004 CL	H36	0.88	2.2	0.99	0.86	0.6	0.60	0.62	1.0	0.99
5005	0	1.10	1.3	0.98	0.35	2.1	0.88	1.41	0.1	0.91
5005	H36	0.45	4.9	0.78	0.66	1.9	0.99	0.48	1.7	0.86
5050 ^r	0	0.50	5.6	0.81	0.58	1.9	0.99	0.69	0.9	0.96
5050 ^v	0	1.04	1.6	0.96	1.45	0.3	0.79	1.39	0.2	0.77
5050 ^r	H36	0.21	7.6	0.33	0.78	1.6	0.91	0.76	0.9	0.98
5050 ^v	H36	0.92	2.1	0.98	0.40	1.9	0.71	0.97	0.6	0.87
5052	0	1.02	1.8	0.98	0.36	2.5	0.70	0.59	0.8	0.93
5052	H16	0.60	4.3	0.99	0.31	3.0	0.75	0.53	1.0	0.97
5086	0	0.94	1.6	0.87	0.31	3.2	0.74	1.00	3.6	"
5086	H34	0.91	2.7	0.95	0.33	3.9	0.81	0.71	0.9	0.85
5086	H36	0.38	6.3	0.82	0.81	2.7	0.92	0.62	1.4	0.80
6005 Ext	T5	0.58	3.4	0.94	1.95	0.05	0.93	^b
6005 Ext	T42	0.69	2.5	0.96	1.38	0.2	0.98	1.77	0.03	0.80
6063 Ext	T5	0.73	2.3	0.99	0.89	0.6	0.91	1.54	0.06	0.83
6061	T4	0.67	3.8	0.98	0.77	1.3	0.82	1.06	0.8	0.84
6061	T6	0.65	4.5	1.00	0.33	2.9	0.62	0.61	1.3	0.99
6061 CL	T4	0.82	2.7	0.99	0.43	2.0	0.70	0.73	1.4	0.98
7075	T6	0.82	3.9	0.91	0.34	4.0	0.50	0.82	2.3	0.93
7075 CL	T6	1.22	1.3	0.98	1.65	0.2	0.81	0.95	0.7	0.76
7178 CL	T6	1.01	1.5	0.98	1.41	0.3	0.96	0.70	0.8	0.94

Tabel 2. Onderzoekresultaten massaverlies aluminiumpanelen (M) na 7 jaar expositie uitgedrukt in de factoren n (massaverlies exponent) en K (proportionaliteitsconstante). R is correlatie-coëfficiënt, hoe dichter R bij 1 des te beter benadert het meetresultaat de formule.

De hiervoor weergegeven tabel geeft een overzicht van meetresultaten naar de atmosferische corrosie van 29 aluminium legering-nabehandelings-combinaties waarvan de expositie 'in situ' plaatsvond, en wel in Brooklyn, New Haven en Daytona Beach (allen USA).

Voor alle resultaten geldt: $t = 7$ (jaar)

c2 /Cl⁻ corrosie

Chloride ionen zijn een belangrijke katalysator voor de diverse corrosie-processen van aluminium. De ionen zijn voldoende klein om zelfs bij de geringste fout of open porie van een afsluitlaag al het aluminium te kunnen bereiken en daarmee het corrosieproces in gang te zetten.

Het gevonden degradatiemodel betreft een rekenregel welke is ontstaan naar aanleiding van het onderzoek van Boers [11]. Hij geeft als rekenregel voor de corrosie van zuiver en niet van een afwerklaag voorzien aluminium:

$$A = (-0,6 + 0,18 * Cl^-) * t^n$$

waarin A = gewichtsverlies in g.m⁻²
 Cl⁻ = jaargemiddelde chloridegehalte in neerslag in mg.l⁻¹
 t = expositietijd in jaren
 n = constante

Het blijkt dat in maritieme klimaten inderdaad grotere massaverliezen ten gevolge van corrosie zijn gemeten dan in gebieden die meer landinwaarts liggen. Overigens vormt het model Boers een variant op het algemene model besproken onder c1.

c3 /SO₂ corrosie

Een industriële atmosfeer is voor aluminium het meest agressief. Dit is te wijten aan de aanwezigheid van sulfaat ionen en zwavelhoudende roet en vuil in de atmosfeer. De aanwezigheid van water is echter ook hier noodzakelijk. Barton [11] geeft voor zuiver en niet van een afwerklaag voorzien aluminium de volgende twee modellen:

open expositie: $A = 8,671 * 10^{-9} (H_2O)^{2,245} * (X)^{1,1818}$

afgeschermd van regen: $A = 1,496 * 10^{-11} (H_2O)^{4,399} * (X)^{2,366}$

waarin: A = gewichtsverlies (g.m^{-2} per dag)
H₂O = uren per dag met relatieve vochtigheid groter dan 80 %
X = SO₂ -depositieflux (mg.m^{-2} per dag) gemeten met een alkalisch oppervlak

Dit houdt in dat de corrosie in de tijd bij een open expositie aanvankelijk snelst verloopt maar naderhand stabiliseert. Het proces dat plaatvindt op plekken waar het aluminium niet in de neerslagzone is toegepast zal daarentegen aanvankelijk langzaam verlopen maar naderhand zeer snel.

C4 /NO₃ corrosie

Van dit corrosieproces zijn geen nadere kwantitatieve gegevens gevonden.

4 LITERATUUR

1. Ailor, W.H., Atmospheric Corrosion, John Wiley & Sons Inc. 1982, ISSN 0190-0994
 - p.85 Mikhailovsky, Y.N., Theoretical and engineering principles of atmospheric corrosion of metals.
 - p.107 Pourbaix, M., The Linear Bilogarithmic Law for Atmospheric Corrosion.
 - p.275 Munier, G.B., L.A. Psota-Kelty and J.D. Sinclair, Ion Chromatographic Analysis of Contaminants on Zinc and Aluminium Surfaces Exposed to a range of urban indoor environments.
 - p.297 Sowinski, G. and D.O. Sprowls, Weathering of aluminium alloys.
 - p.329 Skerrey, E.W., Long term atmospheric performance of aluminium and aluminium alloys.
 - p.353 Lashermes M., A. Guilhaudis, M. Reboul, and G. Trentelivres, Thirty-Years Atmospheric Corrosion of Aluminium Alloys in France.
 - p.561 Kucera V. and E. Mattson, Atmospheric corrosion of bimetallic structures.
 - p.575 Lawson H.H., Atmospheric corrosion of aluminium-coated steels.
 - p.827 Gatto F. and A. Perrone, Atmospheric Corrosion Testing of Aluminium in Italy.
 - p.923 Mikhailovski Y.N. and P.V. Strekalov, Atmospheric Corrosion Tests in the USSR
 - p.969 Craig J.H. and R.N. Parkins, Corrosion fatigue of metals in the atmosphere.
 - p.983 Kurobe T., Corrosion fatigue testing of aluminium in Japan.
2. Carter V.E., Atmospheric Corrosion of Aluminium and Its Alloys: Results of Six-Yera Exposure Tests, Metal Corrosion in the Atmosphere, ASTM STP 435, 1968, pp.257-270
3. Janssen Steenberg M.H., Bescherming van aluminium gevels, I2-Bouwkunde en Civiele Techniek - no 7/8 - 1985
4. Aluminium-Taschenbuch, Aluminium-Verlag, 14. Auflage, Aluminium-Zentrale Düsseldorf 1983
5. Wanhill R.J.H. and L. Schra, Corrosion Fatigue Arrest in Aluminium Alloys: Basic Data, Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium NLR, NLR TR 87128 U, 1987
6. Dean S.W en Anthony H.A., Atmospheric Corrosion of Wrought Aluminium Alloys During a Ten-Year Period, ASTM STP 965, 1986 pp. 191-219

7. Zaat, Prof.dr.s.J.H., Technische metaalkunde deel 2, Agon Elsevier, 1974
8. Barton, K., Schutz gegen atmospherische Korrosion, Theorie und Technik, Verlag Chemie, 1973
9. Klis van der T., Oppervlaktebehandeling van aluminium, Vereniging voor Oppervlaktetechnieken van Metalen, Bilthoven, 1969
10. Manders-Maanders, Ir. E.H.C., Effecten van Atmosferische Expositie. Degradatieprocessen van gebouwen, Rapport 2: Gebouwkwaliteit en Milieu, november 1989
11. Lanting, Drs R.W., Ir. J.C. Moree, Aantasting van materialen door luchtverontreiniging, Ministerie van VROM, mei 1984
12. Mastenbroek, F.J. (arch., HBO), Aluminium gevels en corrosie, I - Bouwkunde en civiele techniek, nr. 9, 1986
13. Simpson, John W., Peter J. Horrobin, The Weathering and Performance of Building Materials, Medical and Technical Publishin CO ltd.,1970
14. Ploos van Amstel, L., Bouwen (hoofdstuk 22), Bouwstoffen hto, uitgeverij SMD, Leiden 1982, ISBN 90 238 1451, blz.459-471
15. Boon, Dr. J.W., Ing.P. Breedveld, De corrosie van aluminium in de Nederlandse atmosfeer, Polytechnisch Tijdschrift / Bouwkunde, Weg- en Waterbouw nr. 35, 1990
16. Kanaar, M., Spanningscorrosie in aluminiumlegeringen, Aluminium nr. 1, januari 1987
17. Vonk, J.H., Putcorrosie van aluminium, Aluminium nr. 1, januari 1988
18. Zetten, L. van, Ir. J. Witteveen, Aluminium in de bouw, Uitgeversmaatschappij C.Misset n.v., 1967
19. V.N.A.I. in samenwerking met Tussenafdeling der Metaalkunde THDelft, Symposium Aluminium en de konstrukteur, januari 1976
20. Normen: NPR 2700
NEN 3854 (TGB Aluminium)
DIN 1725
DIN 1745
DIN 1748