

## Aluminium in dunne plaat en buis

Dit Tech-Info-blad, dat binnen het project 'nieuwe materialen' is ontwikkeld, is gericht op technici uit het midden en klein bedrijf die zich willen oriënteren op de actuele mogelijkheden die het gebruik van aluminium biedt. De publicatie geeft een beeld van de bestaande aluminiumkwaliteiten en van nieuwe ontwikkelingen die zich de afgelopen jaren hebben voorgedaan op, met name, het gebied van dunne aluminiumplaat. Daarnaast is plaats ingeruimd voor praktische informatie omtrent de verwerking en toepassing van dunne aluminiumplaat die bij een eerste oriëntatie van belang is. Voor verdere bestudering van de behandelde onderwerpen zijn een aantal referenties en websites gegeven. In het kader van dit project zijn tevens uitgegeven: TI.04.18 'Hoge Sterkte Staal in dunne plaat en buis', TI.04.19 'Roestvast staal in dunne plaat en buis', TI.04.20 'Scheidingstechnieken voor dunne plaat en buis' en TI.04.22 'Ontwerpen van dunne plaat producten en de Eindige Elementen Methode'.

### Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Algemeen	1
1.2	Materiaalkeuze	1
1.3	Hergebruik	1
1.4	Corrosieweerstand	2
2	De aluminiumseries en hun toepassingen	2
2.1	Systematiek van de indeling	2
2.2	Eigenschappen en toepassingen	2
3	Enkele nieuwe ontwikkelingen	3
3.1	Stapsgewijze verbeteringen	3
3.2	Verbeterde sterkte en vervormbaarheid	4
3.3	Verbeterde sterkte en lasbaarheid	4
3.4	Brazing sheet	4
3.5	Sandwich materiaal	4
3.6	Overige ontwikkelingen	4
4	De verwerking van dunne aluminium plaat tot plaatproducten	5
4.1	Bewerkingstechnieken	5
4.2	Scheidingstechnieken	5
4.3	Vormgevingstechnieken	6
4.4	Verbindingstechnieken	7
4.5	Oppervlaktebehandelingen	9
5	Buis	9
5.1	Buis uit dunne plaat en band	9
5.2	Geëxtrudeerde buis	9
6	Ontwerpaspecten	10
6.1	Vormvrijheid bij extrusies	10
6.2	Vermoeiing	10
6.3	Stijfheid van het product	10
7	Toepassingsvoorbeelden	10
7.1	Spaceframe	10
7.2	Motorkap	10
7.3	'Tailor made blanks'	11
7.4	Gelaste panelen	11
7.5	Nieuw sandwich materiaal	11
8	Verkrijgbaarheid en bestellingen	12
9	Referenties	12
10	Websites	12
	Bijlage I: Systeem van aanduidingen	13
	Bijlage II: Fysische eigenschappen van aluminium	15
	Bijlage III: Sterkte en vervormbaarheid	16
	Bijlage IV: Metaalkundige aspecten	18

der is er een groot scala aan toepassingen, waarbij om uiteenlopende redenen voor aluminium wordt gekozen (zie figuur 1, tabel 2 en bijlage II). In de tweede plaats spelen materiaal- en verwerkingskosten een belangrijke rol. Voor een massaproduct, zoals bijvoorbeeld een stalen persdeel voor een autocarosserie, zal de meeropbrengst van een lichtere uitvoering in aluminium afgezet worden tegen de kosten die daarvoor moeten worden gemaakt. Deze kosten kunnen voortvloeien uit verhoogde materiaalkosten en uit verandering van logistiek, opslag, productiemethoden en productievolumes. De voordelen van een gegeven materiaalkeuze zijn het grootst als men daar in de ontwerpfase al rekening mee houdt en als de productieomgeving op de materiaalkeuze is ingespeeld. Bij de vergelijking van staal en aluminium komt de gewichtsvermindering bij gebruik van aluminium vooral tot uiting bij een belasting op sterkte. Door de lagere E-modulus van aluminium (zie bijlage II) is het gewichtsvoordeel bij belasting op stijfheid geringer. Bij toepassingen waarbij gewichtsbesparingen en de sterkte van de constructie centraal staan, concurreert aluminium behalve met hoge sterkte staal ook met magnesium, titanium en vezelversterkte kunststoffen.



figuur 1 Toepassingen van aluminium in transport, verpakkingen en bouw

## 1 Inleiding

### 1.1 Algemeen

Aluminium kent verschillende legeringen, waarvan eigenschappen zoals sterkte, vervormbaarheid, lasbaarheid en corrosieweerstand sterk uiteen kunnen lopen. Daarvan wordt in dit blad een globaal overzicht gegeven, inclusief enkele recente ontwikkelingen, met de bedoeling om de voordelen die het gebruik van aluminium kan bieden onder de aandacht te brengen, evenals de beperkingen die kunnen gelden. De kenmerkende eigenschappen van aluminium zijn in bijlage II kort op een rijtje gezet. In deze inleiding wordt iets verder ingegaan op materiaalkeuze en hergebruik van aluminium en de rest van het blad behandelt de legeringen, de verwerking en de toepassingen.

### 1.2 Materiaalkeuze

Bepalend voor de materiaalkeuze zijn in de eerste plaats de eisen die door de toepassing aan het materiaal worden gesteld. Een heel bekend voorbeeld hiervan is de keuze voor aluminium in de vliegtuigbouw, maar ook ver-

### 1.3 Hergebruik

Hergebruik van aluminium maakt grote energiebesparingen mogelijk. Voor de reproductie van aluminium uit schroot is slechts 5 tot 10% nodig van de energie die nodig is voor de productie van aluminium uit aluminiumoxide. Samenhangend hiermee is de schrootprijs van aluminium hoog, zodat het economisch interessant is aluminium uit

afvalstromen te scheiden. Van belang voor hergebruik is, dat daarmee rekening wordt gehouden bij het ontwerp van constructies. Permanente verbindingen van ongelijksoortige materialen, zoals aluminium aan kunststof, glas, staal of koper, maken de terugwinning beeldend moeilijker. Door verbeterde las- en lijmtchnieken worden dergelijke combinaties steeds meer toegepast. Het is zaak om de gebruiksvoordelen die multimateriaalconstructies opleveren, zoals verminderd energieverbruik, af te wegen tegen de verminderde recyclebaarheid van de daarbij gebruikte samenstellende materialen.

#### 1.4 Corrosieweerstand

Aluminium heeft een grote affiniteit tot zuurstof. Het vormt daarmee een natuurlijke oxidelaag van circa 0,01 micron dikte die het tegen verdere oxidatie beschermt. Als de oxidelaag wordt beschadigd, wordt deze door de grote affiniteit tot zuurstof snel hersteld. Daardoor heeft aluminium een goede corrosieweerstand. Deze natuurlijke corrosieweerstand kan nog worden verbeterd door anodiseren (zie ook § 4.5 'Oppervlaktebehandelingen').

## 2 De aluminiumseries en hun toepassingen

### 2.1 Systematiek van de indeling

De aluminiumlegeringen worden volgens de norm NEN-EN 573 onderverdeeld in groepen op basis van de belangrijkste legeringselementen per groep. In het dagelijks spraakgebruik worden deze groepen "series" genoemd. Dit spraakgebruik is in deze publicatie overgenomen. Naast de indeling op basis van de legeringselementen worden de legeringen onderverdeeld in gietlegeringen en kneedlegeringen en in hardbare en niet-hardbare legeringen. In tabel 1 zijn de aluminium series weergegeven. In bijlage I wordt de indeling meer in detail behandeld, inclusief de aanduidingen voor de levertostanden.

Deze publicatie is gericht op de ontwikkelingen in dun plaatmateriaal. Dit betekent dat de gewalste kneedlegeringen de meeste aandacht krijgen. Daarnaast wordt gewezen op extrusies, omdat sommige dunne plaatproducten zoals buis, ook door middel van extrusie worden gemaakt. Gietlegeringen vallen buiten het bestek van deze publicatie.

### 2.2 Eigenschappen en toepassingen

Een belangrijke reden voor toepassing van aluminium is vaak de gunstige combinatie van een relatief laag ge-

tabel 1 Hoofdgroepen van de indeling van aluminiumlegeringen (series) volgens de norm NEN EN 573. Deze norm geldt voor geknede producten. Als er van de betreffende serie ook gietlegeringen zijn, is dat tussen haakjes aangegeven. Voor gietlegeringen gelden coderingen volgens NEN-EN 1706

Serie volgens EN573	Belangrijkste legeringselement	Gietlegeringen/ Kneedlegeringen	Precipitatiehardbaar (*)
1xxx	Al	kneed	nee
2xxx	Al-Cu	kneed (+ giet)	ja
3xxx	Al-Mn	kneed	nee
4xxx	Al-Si	kneed (+ giet)	nee/ja
5xxx	Al-Mg	kneed (+ giet)	nee
6xxx	Al-Mg-Si	kneed (+ giet)	ja
7xxx	Al-Zn-Mg	kneed	ja
8xxx	Al-overige		

\* Zie bijlage IV voor een toelichting op dit begrip

wicht met een hoge sterkte. Bij de keuze van een aluminiumlegering voor een specifieke toepassing spelen echter ook vervormbaarheid, lasbaarheid en corrosieweerstand een rol. Tabel 2 geeft daarvan een indruk. Verder zijn eigenschappen als elektrische geleidbaarheid, reflectie, oppervlaktegesteldheid en anodiseerbaarheid van belang. Daarvan worden voorbeelden gegeven in de navolgende korte beschrijvingen van kenmerkende eigenschappen en toepassingen van de verschillende aluminium series.

#### 1xxx serie

Deze serie omvat de ongelegeerde aluminium kwaliteiten met een zuiverheid van 99,00% of hoger. Ongelegeerd aluminium wordt met name gebruikt voor elektrische en chemische toepassingen. De kwaliteiten worden gekarakteriseerd door een hoog elektrisch geleidingsvermogen, een uitstekende corrosieweerstand en een zeer goede vervormbaarheid. De sterkte is echter laag. Verhoging van de sterkte kan worden verkregen door koude deformatie en de daarbij optredende versterking (zie bijlagen I en IV). Typische toepassingen van de duizend serie zijn reflectoren, warmtewisselaars, tankbekledingen voor de levensmiddelenindustrie, verpakkingsmateriaal, hoogspanningskabel en lasdraad. Een veelgebruikte legering uit deze serie is EN AW-1050.

tabel 2 Globaal overzicht van eigenschappen en toepassingen van kneedlegeringen. De beoordelingen van de eigenschappen zijn gebaseerd op een onderlinge vergelijking van gangbare waarden per groep. Per groep kunnen er legeringen zijn die daarvan afwijken. De tabel is dus slechts indicatief

Groep	Sterkte	Vervormbaarheid	Corrosieweerstand	Lasbaarheid	Toepassingen (product en/of sector)
1xxx	laag	zeer goed	zeer goed	zeer goed	- Reflectoren, warmtewisselaars, hoogspanningskabel, lasdraad, keukengerei, verpakkingen, verlichting, opslagtanks, leidingen. - Energietechniek, levensmiddelen, chemie.
2xxx	hoog	redelijk	matig	slecht	- Vliegtuig- en vrachtwagenwielen, constructieonderdelen van vliegtuigen en vrachtwagens. - Constructie, transport, automatendraaiwerk.
3xxx	laag	goed	goed	goed	- Drinkenblikjes, kookgerei, warmtewisselaars, opslagtanks, meubels, dakbedekking, rolluiken, scheidingswanden. - Energietechniek, levensmiddelen, chemie, architectuur.
4xxx	gemiddeld	n.v.t.	matig tot goed	goed	- Automobiellbouw, architectuur.
5xxx	gemiddeld	goed tot matig	goed	goed	- Scheepsrompen, dekdelen en opbouw, carrosseriedelen, kozijnen, gevelbekleding. - Scheepsbouw, off-shore, automobiellbouw, constructie, architectuur.
6xxx	gemiddeld	goed	goed	goed	- Elektrische geleiders, carrosseriedelen, roldeuren, hekwerken, decoratief anodiseerwerk. - Scheepsbouw, automobiellbouw, constructie, architectuur.
7xxx	gemiddeld tot hoog	redelijk tot goed	matig tot redelijk	matig tot goed	- Dynamisch belaste constructies. - Luchtvaart, transport.

## 2xxx serie

Koper is het hoofdlegeringselement in de 2xxx serie, vaak met magnesium als tweede legeringselement. Om optimale eigenschappen te bereiken, moeten deze legeringen worden warmtebehandeld. In de oplosgegloeide en natuurlijk verouderde toestand (zie bijlage I en III) zijn de rekgrens en de treksterkte vergelijkbaar met staal (deze waarden zijn respectievelijk 275 en 425 N/mm<sup>2</sup> voor EN AW-2024 (T4) en 240 en 310 N/mm<sup>2</sup> voor de koud gewalste microgelegeerde staalkwaliteit H240LA).

Voor een verdere verhoging van met name de rekgrens kunnen deze legeringen ook kunstmatig worden uitgehard, hetgeen echter ten koste gaat van de taaheid. Met uitzondering van de legering EN AW-2219 zijn ze slecht lasbaar en hebben ze ten opzichte van de meeste andere aluminiumlegeringen een minder goede weerstand tegen corrosie. Onder bepaalde omstandigheden kunnen ze gevoelig zijn voor interkristallijne corrosie. Legeringen uit de 2xxx serie zijn bijzonder geschikt voor onderdelen en constructies waar een hoge sterkte/gewicht verhouding wordt gevraagd, zoals voor vliegtuigen en onderdelen hiervoor, vrachtwagenwielen, onderdelen voor ophangingen van vrachtwagens en voor onderdelen die een goede sterkte moeten bezitten op temperaturen tot 150 °C. Een veel gebruikte legering uit deze serie is EN AW-2024.

## 3xxx serie

In deze serie is mangaan het hoofdlegeringselement. In het algemeen zijn deze legeringen niet hardbaar, maar de sterkte is ongeveer 20% hoger dan van kwaliteiten uit de 1xxx serie. Omdat om legeringstechnische redenen slechts ca. 1,5% mangaan aan aluminium kan worden toegevoegd, wordt mangaan aan slechts enkele legeringen als hoofdlegeringselement toegevoegd. Vier van deze legeringen (EN AW-3003, EN AW-3004, EN AW-3005 en EN AW-3105) worden op grote schaal toegepast, onder andere als drankblikjes, kookgerei, warmtewisselaars en opslagtanks. Daarnaast wordt EN AW-3103 toegepast als dakbedekking, golfplaten en sandwichpanelen. Over het algemeen worden legeringen uit deze serie gebruikt voor licht belaste constructies.

## 4xxx serie

Het belangrijkste legeringselement in de 4xxx serie is silicium, dat in voldoende mate (tot circa 12%) kan worden toegevoegd om een substantiële daling van het smeltpunt te bereiken, zonder dat de legering bros wordt. Om deze reden worden 4xxx legeringen veelvuldig toegepast als lastoef- en soldeermateriaal. De meeste legeringen in deze groep zijn niet hardbaar. Als toevoegmateriaal voor het lassen van hardbare legeringen kan door vermenging met het basismateriaal de las tot op zekere hoogte hardingsverschijnselen gaan vertonen. De legeringen met een redelijke hoeveelheid silicium worden donkergrijs tot antracietkleurig bij het anodiseren en worden om deze reden wel toegepast in de architectuur.

De Si-houdende gietlegeringen zijn van de gietlegeringen het best gietbaar en vinden veelzijdige toepassingen in complexe gietstukken zoals motorblokken, pomphuisen, schroefbladen, cilinderkoppen e.d. Ze bezitten gemiddelde sterkte en rek, doorgaans een goede corrosieweerstand en ze zijn lasbaar.

## 5xxx serie

Het belangrijkste element in de 5xxx serie is magnesium. Eventueel in combinatie met mangaan kan na versterking (zie bijlage IV) een legering worden verkregen met gemiddelde tot hoge sterkte. Magnesium heeft een aanzienlijk groter effect op de versterking dan mangaan (0,8% magnesium heeft hetzelfde effect als 1,5% mangaan) en kan in grotere hoeveelheden worden toegevoegd. Legeringen uit deze groep zijn in het algemeen goed lasbaar en hebben een goede weerstand tegen

corrosie in maritieme milieus. Bij gebruik bij temperaturen hoger dan 65 °C kan bij legeringen met meer dan 3% magnesium spanningscorrosie optreden. Legeringen uit deze groep worden onder andere toegepast in de jacht- en scheepsbouw, de carrosseriebouw en de architectuur. Een veel gebruikte legering uit deze serie is EN AW-5754.

## 6xxx serie

Legeringen van de 6xxx serie bevatten silicium en magnesium als legeringselementen. De verhouding is zodanig, dat de uitscheiding Mg<sub>2</sub>Si gevormd kan worden, waardoor deze legeringen hardbaar zijn. Legeringen uit deze serie kunnen in de oplosgegloeide en goed vervormbare toestand T4 worden vervormd en vervolgens door uitharden in sterkte worden verhoogd. In het algemeen zijn de lasbaarheid, de weerstand tegen corrosie, de verspaanbaarheid, de anodiseerbaarheid en het elektrisch geleidingsvermogen van deze legeringen goed. Het verdient de voorkeur legeringen in de T4 toestand te lassen en pas hierna in de T6 toestand te brengen (zie ook bijlage I). Hierdoor worden de beste mechanische eigenschappen na het lassen verkregen. Bij het lassen in de T6 toestand zouden de eigenschappen door de warmte-inbreng achteruitgaan. De 6xxx serie laat zich uitstekend extruderen. Een goede maatvoering en oppervlaktekwaliteit kunnen worden gerealiseerd bij hoge snelheden en relatief lage krachten. Vrijwel alle profielen komen daarom uit de 6xxx serie. Toepassingen zijn onder andere elektrische geleiders, fietsframes, bruggen, treinwagons, masten voor zeilschepen en extrusieprofielen. Veel gebruikte legeringen uit deze serie zijn EN AW-6016 en EN AW-6082.

## 7xxx serie

Zink is in hoeveelheden van 1 tot 8% het belangrijkste legeringselement in deze groep. Toevoeging van kleinere hoeveelheden magnesium maakt deze legeringen hardbaar. Daarnaast worden in het algemeen nog kleine hoeveelheden van andere elementen toegevoegd, zoals koper en chroom. Legeringen met een hoge sterkte zijn in zekere mate gevoelig voor spanningscorrosie en worden om deze reden meestal in een enigszins oververouderde toestand (zie bijlage IV) toegepast. Een belangrijk voordeel van de 7xxx serie is, dat deze legeringen natuurlijk verouderen, waardoor ze zich bij uitstek lenen voor toepassing in gelaste constructies. Door de natuurlijke veroudering neemt immers de sterkte van de gelaste constructie toe. Dit geldt specifiek voor de koperrijke 7xxx legeringen. Aan de koperhoudende legeringen uit deze groep kan, evenals aan de 2xxx serie, beter niet worden gelast. De toepassingen zijn met name te vinden in de luchtvaart en in mobiele apparatuur. Een veel gebruikte legering uit deze serie is EN AW-7075.

## 8xxx serie

In deze serie zijn de legeringen verzameld die niet onder een van de andere series vallen. De AlLiCuMg legering EN AW-8090 is een belangrijke legering in deze serie. Deze legering werd ontwikkeld voor lucht- en ruimtevaarttoepassingen met als voordeel hogere sterkte en een lager gewicht. Bij de productie bleek het materiaal tevens als bijkomend voordeel een 10% hogere E-modulus te hebben. Het kan worden geproduceerd met een groot bereik aan mechanische eigenschappen, afhankelijk van de warmtebehandeling. In fijnkorrelige toestand is het superplastisch. Dat wil zeggen dat er bij een lage vervormingssnelheid een plastische of blijvende vervorming van meer dan 100% kan worden bereikt.

## 3 Enkele nieuwe ontwikkelingen

### 3.1 Stapsgewijze verbeteringen

De nieuwe ontwikkelingen op het gebied van aluminium dunne plaat zijn steeds het resultaat van optimalisatie

van bestaande aluminiumlegeringen en -producten. Het gebruik van de nieuwe legeringen past derhalve goed binnen bestaande ontwerp- en verwerkingspraktijken en toepassingen. Door stapsgewijze verbetering van bestaande legeringen en producten komen tevens nieuwe toepassingen binnen bereik.

Bij de voorbeelden van nieuwe ontwikkelingen die hier worden gegeven, is steeds aangegeven welke verbeteringen men heeft nagestreefd ten opzichte van de bestaande legeringen. De drijfveren voor legeringsontwikkelingen zijn in het algemeen verbetering van de producteigenschappen en vermindering van de proces- en verwerkingskosten.

### 3.2 Verbeterde sterkte en vervormbaarheid

In de auto-industrie is er bij de ontwikkeling van nieuwe modellen het streven om de prestaties en het comfort te verbeteren en tegelijkertijd het gewicht zo laag mogelijk te houden. De toepassing van aluminium in carrosseriedelen kan hieraan een belangrijke bijdrage leveren. De legeringen, waarvan gebruik wordt gemaakt, behoren tot de 5xxx en 6xxx serie. De 5xxx serie voor binnendelen (delen die niet in het zicht komen) en de 6xxx serie voor zichtdelen.

De 6xxx serie wordt toegepast vanwege de hoge kwaliteit van het geperste oppervlak, dat vrij is van vloeilijnen (zie blz. 6 'vloeilijnen') en vanwege de precipitatieharding bij het lakken van de geperste onderdelen, die het materiaal een verhoogde sterkte en deukweerstand geeft. De 5xxx serie wordt toegepast vanwege de gunstige combinatie van vervormbaarheid en sterkte van het uiteindelijke persproduct. Binnenpanelen moeten een goede stijfheid hebben en daartoe worden in het ontwerp verstevigingen aangebracht, die tijdens het persen een goede vervormbaarheid van het plaatmateriaal vereisen.

Een standaardlegering voor binnendelen is EN AW-5182. Binnen deze legeringsaanduiding is een variant ontwikkeld met een verbeterde vervormbaarheid [ref.3]. Dit maakt het mogelijk om in een paneel diepere verstevigingsribben in te persen. Daardoor kan eenzelfde stijfheid van het paneel worden bereikt bij een kleinere materiaaldikte en dus lager gewicht. De gewichtsbesparing die met de verbeterde EN AW-5182 variant kan worden bereikt, is circa 10% ten opzichte van de standaard variant.

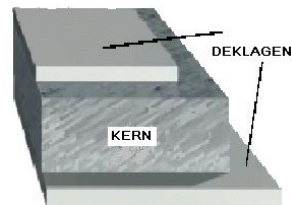
De standaardlegering voor zichtdelen is EN AW-6016. Van deze legering is een variant ontwikkeld met een verhoogde bake-hardening response (zie bijlage IV "precipitatieharding") die kan worden geleverd met verschillende typen vooraf aangebrachte smeermiddelen. Dit maakt kostenbesparingen bij de autofabrikant mogelijk door vereenvoudigingen in de procesgang [ref.4].

### 3.3 Verbeterde sterkte en lasbaarheid

In de scheepsbouw zijn de sterkte en de corrosieweerstand na het lassen belangrijke criteria voor de materiaalkeuze. De gangbare legering voor scheepstoepassingen was tot dusver EN AW-5083. Diverse werven zijn inmiddels overgestapt op AA 5059 of AA 5383. Deze legeringen hebben ten opzichte van de EN AW-5083 legering een verbeterde sterkte en vervormbaarheid bij een corrosieweerstand die overeenkomt met, of beter is dan die van EN AW-5083, ook na lassen.

### 3.4 Brazing sheet

Brazing sheet of soldeerplaat is aluminiumplaat die opgebouwd is uit een kernlaag en deklagen aan de boven- en onderzijde (zie figuur 2). De deklagen hebben een lagere smelttemperatuur dan de kernlaag. Bij verhitting boven deze smelttemperatuur zal de deklaag vloeibaar worden, terwijl de kernlaag vast blijft en haar vorm behoudt. Het gesmolten deklaagmateriaal kan nu vrij vloeien en als soldeer dienen om verbindingen tussen verschillende kernlagen te vormen. Doorgaans worden 3xxx legeringen gebruikt voor de kernlaag, maar 6xxx



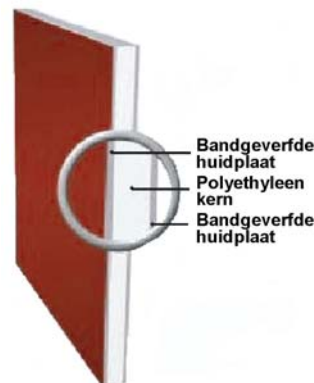
figuur 2 Tweezijdig geclad brazing sheet (er is ook enkelzijdig geclad brazing sheet)

legeringen zijn ook gangbaar. Voor de deklaag worden 4xxx legeringen gebruikt.

Warmtewisselaars vormen een belangrijke toepassing van brazing sheet. Hierdoor is het streven naar gewichtsbesparingen in de automobiellandindustrie een drijvende kracht geweest voor de ontwikkeling van nieuwe soorten brazing sheet zoals de High Strength Long Life legeringen. De verhoogde sterkte van deze legeringen maakt het mogelijk om producten te maken met dünnere wanden. Dat is een voordeel, omdat daarmee de warmte-overdracht in de warmtewisselaar wordt verbeterd en tevens gewicht wordt bespaard. De levensduur van de warmtewisselaar wordt, ondanks de kleinere wanddiktes, verlengd, doordat de corrosiebestendigheid van het materiaal is verbeterd.

### 3.5 Sandwich materiaal

Aluminium platen voor bouwtoepassingen kunnen worden gecombineerd met los isolatiemateriaal. Gangbaar zijn echter ook prefab sandwichpanelen, waarin het isolatiemateriaal geïntegreerd is (zie figuur 3). Vanuit de sandwichpanelen voor bouwtoepassingen zijn steeds dünnere sandwichpanelen ontwikkeld voor transporttoepassingen. Toepassing van sandwich materiaal in de transportsector maakt verdere gewichtsvermindering mogelijk en verder heeft sandwich materiaal zeer goede isolerende en geluiddempende eigenschappen.



figuur 3 De samenstelling van een prefab bouwpaneel

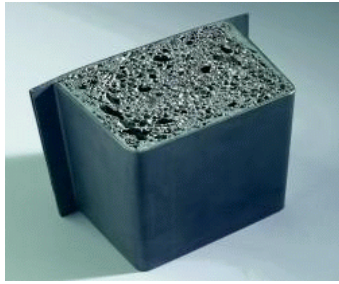
### 3.6 Overige ontwikkelingen

#### Aluminiumschuim

Naast sandwich panelen met een kunststofkern zijn er ook panelen op de markt gekomen met een kern van aluminiumschuim. De panelen zijn geschikt voor bouwen en transporttoepassingen. Ze hebben een aantal kenmerkende eigenschappen:

- ▶ een hoge stijfheid bij een laag gewicht;
- ▶ een hoge energieabsorptie bij vervorming ;
- ▶ goede dempingseigenschappen;
- ▶ goede brandwerendheid;
- ▶ goed recyclebaar.

Ook is het mogelijk om profielen te vullen met schuim (zie figuur 4), waardoor de stijfheid en de energieabsorptie bij vervorming sterk toenemen.



figuur 4 Voorbeeld van een profieldoorsnede gevuld met aluminiumschuim

### Snelle stolling

Een ontwikkeling die toepassing begint te vinden is snel gestold aluminiumlint. Door de snelle stolling, waarbij afkoelsnelheden tot  $10^6$  K/s kunnen worden bereikt, ontstaan legeringen met bijzondere eigenschappen, zoals zeer hoge sterkte en taaheid. Deze legeringen krijgen hun uiteindelijke vorm door een thermomechanisch vormgevingsproces (veelal extrusie). Op dit moment zijn er toepassingen in zuigers voor snelopende racemotoren en drijfstangeten, alsmede touwzekeringen voor de bergsport.

## 4 De verwerking van dunne aluminium plaat tot plaatproducten

### 4.1 Bewerkingstechnieken

Verschillende bewerkingstechnieken die worden toegepast om dunne aluminiumplaat tot een (onderdeel van een) product te vormen, worden in het navolgende kort behandeld onder de paragrafen scheidingstechnieken, vormgevingstechnieken, verbindingstechnieken en oppervlakbehandelingen. De bedoeling hiervan is, om een eerste indruk te geven van aspecten die specifiek zijn voor de bewerking van aluminium. Voor nadere informatie, die van belang is voor praktijktoepassingen, zijn voor de verschillende bewerkingstechnieken per paragraaf verwijzingen gegeven.

### 4.2 Scheidingstechnieken

#### Algemeen

Voor aluminium zijn alle gangbare mechanische scheidingstechnieken toepasbaar. Ditzelfde geldt voor de thermische scheidingstechnieken met uitzondering van auto-geen snijden. Voor nadere gegevens omtrent de scheidingstechnieken die in dit hoofdstuk worden behandeld zie Tech-Info-blad TI.04.20 [ref.5].

#### Mechanische scheidingstechnieken

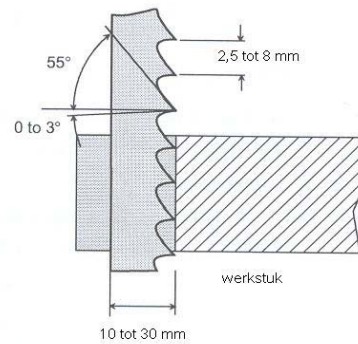
##### Knippen, ponsen en nibbelen

Bij knippen, ponsen en nibbelen is het voor het verkrijgen van een nette snijrand van belang, dat het gereedschap schoon en scherp is en dat de snijspleet goed ingesteld wordt. De optimale snijspleet varieert van 15% van de materiaaldikte voor de hardste legeringen tot 5% voor de zachtste legeringen. Bij deze scheidingsprocessen kan, evenals bij vormgevingsprocessen, het aanladen optreden (zie blz. 6 'Aanladen'). In dat geval wordt aanbevolen smering toe te passen.

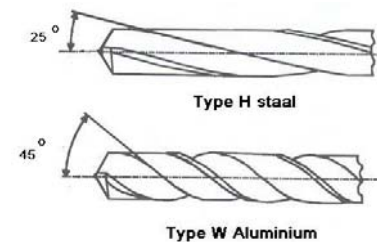
##### Zagen, boren en frezen

Voor kleine series en gecompliceerde vormen kan een lintzaag worden gebruikt en voor rechte sneden een beugel- of cirkelzaag. Er zijn linten en zaagbladen met speciaal voor aluminium geschikte vertandingen op de markt (zie figuur 5). Boren voor aluminiumtoepassingen hebben een grotere spiraalhoek dan staalboren (zie figuur 6).

Het aantal snijvlakken op de frezen is voor aluminium kleiner dan voor staal. Dit omdat aluminium een langere spaan vormt. De snijsnelheden kunnen bij het frezen van



figuur 5 Zaagblad voor aluminiumtoepassingen



figuur 6 De spiraalhoek bij boren voor aluminium is groter dan bij boren voor staal

aluminium hoog zijn (tot 1200 m/min bij toepassing van frezen die gemaakt zijn uit HSS). Dit stelt eisen aan de stabiliteit van de freesmachine.

#### Waterstraalsnijden

Waterstraalsnijden is een scheidingstechniek die zich goed laat toepassen bij aluminium en aluminiumlegeringen. Deze techniek heeft enkele belangrijke voordelen:

- ▶ er is geen thermische beïnvloeding van het materiaal;
- ▶ de verkregen snede is bijna altijd braamvrij;
- ▶ complexe snijcontouren zijn mogelijk;
- ▶ is toepasbaar op materiaaldiktes van 0,1 tot 100 mm.

Het is echter een relatief trage en luidruchtige scheidingstechniek, vooral voor grotere plaatdiktes. Ook ontstaat vervuild water, dat voor lozing moet worden gereinigd. Het waterstraalsnijden vergt een investering die vergelijkbaar is met het lasersnijden.

#### Thermische scheidingstechnieken

De voor aluminium toepasbare thermische scheidingstechnieken zijn plasmasnijden en lasersnijden. Bij deze technieken is er, evenals bij waterstraalsnijden, een grote vormvrijheid, die zeker bij kleine series economische voordelen biedt.

##### Plasmasnijden

Het plasmasnijden is toepasbaar op materiaaldiktes van 1 tot 25 mm. De warmte beïnvloede zone neemt toe met de materiaaldikte, maar ligt bij dunne plaat rond de 1 mm. De maximale snijsnelheid ligt in de buurt van 10 m/min voor een dikte van 1 mm.

##### Lasersnijden

Het lasersnijden is momenteel toepasbaar tot een grootste materiaaldikte van circa 8 mm. Met deze techniek kan zeer dun materiaal worden gesneden, tot aan foliediktes toe. Voor het lasersnijden worden twee types lasers gebruikt, te weten de CO<sub>2</sub>-laser en de Nd:YAG-laser. Voor het snijden van aluminium verdient de Nd:YAG-laser de voorkeur, omdat er met een Nd:YAG-laser met lagere laser vermogens kan worden gesneden en omdat er minder problemen zijn met reflecties van de laserstraal bij het snijden van zuiver aluminium. De snedekwaliteit is in het algemeen beter dan bij plasmasnijden en de warmte beïnvloede zone bedraagt circa 0,1 mm. De maximale snijsnelheid ligt in de buurt van 10 m/min

bij een materiaaldikte van 1 mm. Er wordt over het algemeen met stikstof gesneden; het snijden met zuurstof leidt in de praktijk tot de vorming van bramen, die moeilijk te verwijderen zijn. Bij grotere materiaaldiktes neemt de maximale snijsnelheid af [ref.5].

### 4.3 Vormgevingstechnieken

#### Materiaalgedrag

Het vormen van aluminiumproducten uit plaat kan met dezelfde gereedschappen en machines worden gedaan als het vormen van producten uit andere metalen, zoals staal en koper. Er moet echter rekening mee worden gehouden, dat aluminium zich in aantal opzichten anders gedraagt. Zo is aluminium veel zachter dan staal, heeft het een grotere terugvering na buigen en brengt spanningsrelaxatie een grotere vormverandering met zich mee dan bij staal het geval is.

#### Leveringstoestand

Als voor een product, dat een vervormingsbewerking moet ondergaan, de keuze op aluminium is gevallen, dan is het belangrijk de keuze van de legering af te stemmen op het vereiste niveau van sterkte en vervormbaarheid. De koudverstevigende legeringen in de zachte toestand of "O" temper hebben de beste vervormbaarheid. Het sterkteniveau loopt daarbij op van de 1xxx serie naar de 3xxx en de 5xxx serie. De precipitatiehardende legeringen in de toestand T4 zijn goed vervormbaar, maar minder dan de 1xxx en de 3xxx serie in de O-toestand. De precipitatiehardende legeringen hebben vooral een goede combinatie van sterkte en vervormbaarheid, in het bijzonder als de vervorming in de toestand T4 wordt uitgevoerd en de legering daarna door uitharding een sterkteverhoging ondergaat (toestand T6). In bijlage IV worden sterkte en vervormbaarheid van de verschillende series aan de hand van getallen iets verder toegelicht. Voor gedetailleerde informatie over de beste materiaalkeuze voor een specifiek vormgevingsproces wordt aangeraden om in overleg te treden met de materiaalleverancier.

#### Oppervlaktebeschadigingen

Aluminium is gevoelig voor krassen en andere lokale beschadigingen die kunnen ontstaan tijdens het vormgevingsproces. Om krassen en beschadigingen te vermijden, is een aantal maatregelen te nemen. Allereerst is het belangrijk om in een schone omgeving te werken en te vermijden dat werkruimtes en gereedschappen tegelijkertijd voor staal en aluminium worden gebruikt. Vervuiling met staaldeeltjes is funest bij de verwerking van aluminium. Verder kan aluminiumplaat vaak geleverd worden met een eenzijdig of tweezijdig aangebrachte folie, die tijdens vormgevingsprocessen bescherming biedt. De folie kan na het proces worden verwijderd.

#### Aanladen

Ook in persgereedschappen die alleen voor aluminium worden gebruikt, kunnen zich harde deeltjes op het gereedschap vastzetten die zijn ontstaan door wrijving tussen het gereedschap en het aluminium product. Dit verschijnsel wordt aanladen genoemd. Het kan met name worden opgelost door een goede keuze van het smeermiddel, bijvoorbeeld een 'dry lube' smeerfilm. Ook is het aan te raden hoeken met een kleine kromtestraal te vermijden en het gereedschapsoppervlak door middel van polijsten zo glad mogelijk te maken.

#### Vloeilijnen

Aluminium dunne plaat voor automobieltoepassingen is veelal afkomstig uit de 5xxx en de 6xxx serie. De 5xxx serie vertoont na vervorming vloeilijnen. Dit zijn lijntjes in het oppervlak, die ook na een lakbehandeling zichtbaar blijven. Vandaar dat de 5xxx legeringen voornamelijk voor delen worden gebruikt die zich niet in het zicht bevinden.

## Processen

Voor alle processen die hierna worden behandeld, gelden zonder meer de opmerkingen die onder 'leveringstoestand' zijn gemaakt. Dat wil zeggen dat de keuze van het materiaal moet worden afgestemd op het vereiste niveau van sterkte en vervormbaarheid. In zijn algemeenheid lenen de 1xxx, 3xxx en 5xxx series in zachte toestand zich goed voor de hierna beschreven processen. Om in de praktijk tot een goede afstemming te komen van materiaal, smeermiddelen en gereedschap is het aan te raden om de desbetreffende leveranciers te raadplegen.

#### Buigen

Vanwege de relatief lage elasticiteitsmodulus van aluminium treedt bij buigen al snel een aanzienlijke terugvering op.

De terugvering is evenredig met de materiaalsterkte en omgekeerd evenredig met de elasticiteitsmodulus. Verder zal de terugvering groter zijn bij een kleinere materiaaldikte en bij een grotere buigradius. Een grotere terugvering kan worden gecompenseerd door iets verder door te buigen, of door de buigradius te verkleinen. Om hierbij reproduceerbaar te kunnen werken, is het nodig om de omzethoek te bepalen en dezelfde materiaal kwaliteit te gebruiken. Bij een andere materiaal kwaliteit zal de omzethoek opnieuw moeten worden bepaald. De toelaatbare minimale buigstraal varieert van  $0 \times d$  ( $d$  = materiaaldikte) voor de best vervormbare kwaliteit (1xxx serie) tot  $2,5 - 3,5 d$  voor kwaliteiten met hogere sterkteniveau's (bijv. EN AW-5754 H26, EN AW-6082 T6). Zie voor verdere informatie VM113 [ref.15].

#### Strekken

Het strekken is een vervormingsproces dat plaatsvindt bij onderdelen die voornamelijk een vervorming in de richting van het plaatoppervlak ondergaan, zoals bijvoorbeeld een autodak of een motorkap. Bij het strekken neemt het plaatoppervlak toe en de dikte af. Om een gelijkmatig gevormd onderdeel te verkrijgen, moet de plaat overal plastisch vervormen. Om dit te bereiken moeten de vervormbaarheid van het plaatmateriaal, de ruwheid van het plaatoppervlak, de smering en het gereedschap op elkaar worden afgestemd.

#### Dieptrekken

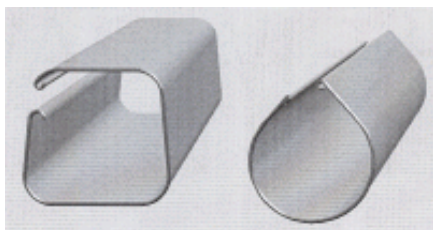
Dieptrekken is een proces dat wordt toegepast bij de massaproductie van holle producten, zoals bijvoorbeeld carrosserie-onderdelen. Hoewel de vormverandering van de plaat vaak groot is, blijft de plaatdikte vrijwel onveranderd (tenzij het dieptrekken wordt gecombineerd met een strekbewerking, zoals bij het dieptrekken van drankenbussen). De beperking aan het dieptrekproces zit vaak niet in de vervormbaarheid van het materiaal, maar in de mogelijkheid om de benodigde proceskracht op het materiaal over te brengen. Om deze reden zijn de precipitatiehardende legeringen vaak goed dieptrekbaar, evenals legeringen die een (gedeeltelijke) koudversteving hebben ondergaan [ref.1, 6].

#### Rolvormen

Het rolvormen is een techniek, waarbij een band met behulp van een aantal opeenvolgende vormwalsen tot een open of een gesloten profiel wordt gewalst. Zowel bij de gesloten als de open profielen is er een grote verscheidenheid in de vormen die kunnen worden gerealiseerd. Figuur 7 geeft voorbeelden van rolvormprofielen. Ook het trapezium paneel uit figuur 11 is door rolvormen gemaakt. Omdat met het proces hoge productiesnelheden kunnen worden gehaald, is het economisch aantrekkelijk.

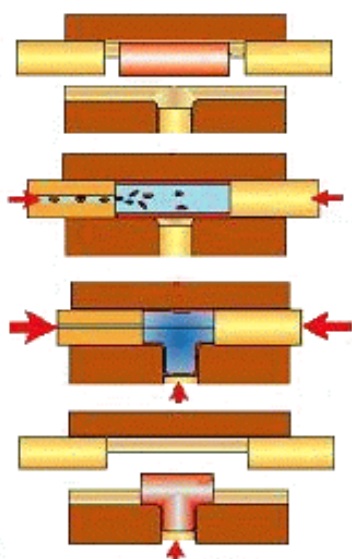
#### Hydrovormen

Hydrovormen is een techniek waarin een holle vorm, zoals een buis, wordt opgesloten in een matrix en door middel van vloeistofdruk tot de vorm van de matrix

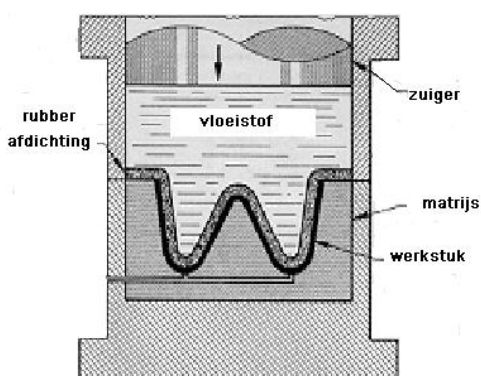


figuur 7 Voorbeelden van rolvormprofielen

wordt geëxpandeerd. Deze techniek heeft het voordeel, dat zeer grote vervormingen mogelijk zijn, waardoor in één procesgang vormen kunnen worden gemaakt, waarvoor anders meerdere processen nodig zijn. Dit is geïllustreerd in figuur 8 waarin uit een buis een T-stuk wordt gemaakt in één procesgang. Dit levert een beter en goedkoper product op. Het hydrovormen kent ook varianten voor plaat. Daarbij wordt de plaat met behulp van een rubberafdichting door vloeistofdruk in een matrijs geperst (zie figuur 9).



figuur 8 Processtappen bij het hydrovormen van een T-stuk uit buis



figuur 9 Hydrovormen van plaat

#### Rubberpersen

Bij het rubberpersen wordt plaat of buis met een rubberstempel over of in een vaste matrijs geperst. In het geval van buispersen wordt het rubberstempel aan de binnenzijde van de buis aangebracht en vervolgens met een plunjer onder druk gezet. Het rubber zet daardoor uit en perst de buis in de vorm van de matrijs op eenzelfde wijze als de vloeistof dat doet bij het hydrovormen.

Een voordeel is dat rubber een zacht gereedschapsmateriaal is, wat het proces geschikt maakt voor plaatmateriaal met kwetsbare oppervlakten zoals zacht aluminium. Het gereedschap is relatief eenvoudig, waardoor de gereedschapskosten laag kunnen zijn. Het proces is minder geschikt voor grote series en gecompliceerde vormen [ref.11,12].

#### Forceren

Forceren is een techniek waarbij een draaiende ronde plaat met een forceergereedschap tot een rotatiesymmetrisch product wordt gevormd, zoals bijvoorbeeld een lampenkap of een autowiel. Het proces kan voor kleine series met handgereedschap op een draaibank worden uitgevoerd en voor grotere series zijn er geautomatiseerde forceermachines op de markt. De dikte van de platen die kunnen worden vervormd, is afhankelijk van de capaciteit van de forceermachine.

Door de optredende koudverstevinging kan een goede sterkte van het product worden verkregen. De wanddiktereductie van plaat tot product moet daarbij tussen 20 en 75% liggen.

### 4.4 Verbindingstechnieken

#### Keuze van een verbindingstechniek

De verbindingstechnieken worden gewoonlijk onderverdeeld in lassen, lijmen, solderen en mechanisch verbinden. Bij de keuze van de verbindingstechniek speelt een aantal criteria een rol, zoals de geometrie van de verbinding, de eigenschappen van de te verbinden materialen en de vraag of de verbinding losneembaar moet zijn of niet. Op de website [www.dunneplaat-online.nl](http://www.dunneplaat-online.nl) kan aan de hand van deze criteria, en enige aanvullende eisen, een verbindingstechniek voor een gegeven toepassing worden geselecteerd.

#### Lassen

##### MIG en TIG lassen

De meest toegepaste lasprocessen voor het lassen van aluminium dunne plaat zijn MIG lassen [ref.13] en TIG lassen [ref.14]. MIG staat voor Metal Inert Gas en TIG voor Tungsten Inert Gas. Het zijn beide booglasprocessen die onder een inert beschermgas worden uitgevoerd. Het belangrijkste verschil is dat bij het TIG lassen de boog wordt gevormd tussen het werkstuk en een niet afsmeltende electrode, terwijl bij het MIG lassen de boog wordt gevormd tussen het werkstuk en een continu aangevoerde toevoegdraad. Door toepassing van de niet afsmeltende electrode kan bij TIG lassen worden gekozen of men al dan niet toevoegdraad wil gebruiken.

Bij het lassen van aluminium moet aandacht worden besteed aan het vermijden van warmtscheuren en porositeiten. Dit vraagt wat betreft warmtscheuren een goede keuze van het lastoevoegmateriaal, de lasprocedure, de warmte-inbreng en de lasnaadvorm.

Met betrekking tot het vermijden van porositeiten is het van belang de laskanten goed droog en schoon te maken, met een RVS-borstel te borstelen en zo snel mogelijk, maar zeker binnen enkele uren, te hechten en af te lassen. Vermijd verder het lassen van materiaal dat kouder is dan 10 °C, waarop zich condens kan vormen. Ook is het van belang om voor droge gastoevoerleidingen te zorgen, zodat het toegepaste beschermgas geen vocht kan opnemen uit de toevoerleidingen. Zorg er tevens voor dat het beschermgas de las volledig afschermt en dat er ook geen tocht is, bijvoorbeeld door openstaande deuren. Zie voor verdere informatie VM83 [ref.7].

##### Laserlassen

De voorkeur voor het lassen van aluminium hebben de Nd:YAG-laser en de hoogvermogen diodelaser, omdat deze hun energie makkelijker in het aluminium kwijt kun-

nen en er dus met lagere vermogens kan worden gelast dan met een CO<sub>2</sub>-laser. Het lassen van dunne aluminiumplaat met behulp van een laser brengt een aantal voordelen met zich mee. Door de uiterst geconcentreerde warmte-inbreng kan met hoge snelheid worden gelast en wordt in het gelaste materiaal een kleine warmte beïnvloede zone gevormd en treedt er slechts geringe vervorming van het werkstuk op. Een nadeel van de laser is dat grote zorg aan de lasnaad moet worden besteed. De maatnauwkeurigheid van de lasnaad is afhankelijk van de naadvorm en de plaatdikte, maar moet voor dunne plaat vaak rond de 0,1 mm liggen. Dit vereist naast een nauwkeurige lasnaadvoorbewerking ook een zeer goede inklemming van de te lassen delen, om vervorming door uitzetting te voorkomen. Zie voor verdere informatie de voorlichtingspublicatie VM121 [ref.16] en de praktijk-aanbeveling over laserlassen PA.02.12 [ref.8].

#### Weerstandlassen

Hoewel weerstandlassen van aluminium niet gangbaar is, laat aluminiumplaat zich met speciale apparatuur goed verbinden door middel van puntlassen en rolnaadlassen. Wel dient bij bepaling van de lasinstellingen rekening te worden gehouden met verschillen in lasbaarheid tussen de legeringen uit de verschillende series. Een probleem bij het weerstandlassen, en met name het puntlassen, is de betrekkelijk korte standtijd van de elektroden. Dit is een reden waarom de automobiellindustrie, daar waar mogelijk, overstapt op het drukvoegen van aluminium.

#### Lijmen

Het lijmen van aluminium heeft een aantal voordelen:

- ▶ geen of slechts een geringe warmte-inbreng;
- ▶ een lijmverbinding heeft een betere vermoeiingssterkte en een hogere stijfheid dan een puntlas of een klinkverbinding;
- ▶ ongelijksoortige materialen kunnen worden verbonden;
- ▶ er kunnen vloeistof- en gasdichte verbindingen worden verkregen.

De belangrijkste nadelen van lijmen zijn dat een lijmverbinding niet direct na het lijmen zijn volle sterkte heeft, maar pas na drogen of uitharden en dat de levensduur van een lijmverbinding zonder speciale zorgvuldigheid (o.a goed ontvetten, schuren) moeilijk te voorspellen is. Zie voor verdere informatie VM86, VM87 en VM89 [ref.16,17,18].

#### Hardsolderen

Hardsolderen is een techniek die voor kleine series van eenvoudige verbindingen of voor reparaties handmatig kan worden uitgevoerd met behulp van een brander. Gangbaar is echter het hardsolderen in een oven onder vacuüm of een gecontroleerde atmosfeer (zie § 3.4 'Brazing sheet'). Een belangrijke toepassing van deze verbindingstechniek is de productie van warmtewisselaars. Hardsolderen verschilt van lassen doordat het moeder materiaal niet smelt. Het vindt plaats bij temperaturen > 450 °C en het soldeermateriaal is een aluminiumlegering.

Een belangrijk voordeel van deze techniek is dat in één procesgang een groot aantal verbindingen tot stand kan worden gebracht op plaatsen die met andere verbindingstechnieken niet toegankelijk zijn. Bij toepassing van een vloeimiddel is het belangrijk om het product na het solderen grondig te reinigen, omdat resten vloeimiddel corrosie kunnen veroorzaken.

#### Mechanische verbindingen

##### Algemeen

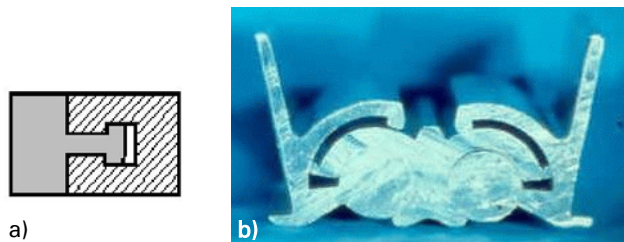
Mechanische verbindingen hebben een aantal voordelen:

- ▶ de sterkte en levensduur van de verbinding zijn voorspelbaar;

- ▶ ongelijksoortige materialen kunnen worden verbonden;
- ▶ de verbinding kan losneembaar zijn;
- ▶ de verbinding komt zonder warmte-inbreng tot stand.

Nadeel van puntverbindingen, zoals schroeven, klinken, drukvoegen of puntlassen, is dat deze verbindingen een lagere sterkte hebben dan een continue verbinding, zoals een lasnaad, en dat ze altijd in meer of mindere mate een oneffenheid in het oppervlak vormen.

Bij extrusieprofielen is er, wat betreft de doorsnede, een grote vormvrijheid. Hierdoor is het mogelijk stevige losneembare verbindingen te maken met profielen die in elkaar passen. Een dergelijke verbinding wordt een vormverbinding genoemd. Hiervan zijn in figuur 10 twee voorbeelden gegeven. De profielen kunnen worden gecombineerd met plaatmateriaal door middel van een verdere vormverbinding of een schroefverbinding.



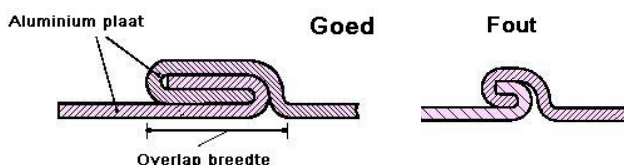
figuur 10 a) Eenvoudige profieldoorsnede waarmee een vaste vormverbinding wordt gevormd;  
b) Profieldoorsnede waarmee een scharnierende vormverbinding wordt gevormd

#### Felsen

Bij felsverbindingen is het van belang de goede overlapbreedte te kiezen. Bij een te kleine overlap heeft de verbinding onvoldoende sterkte en positionele nauwkeurigheid. Bij te grote overlapbreedte wordt onnodig veel materiaal gebruikt. Als richtwaarde kan voor de overlapbreedte 10x de materiaaldikte worden genomen.

De felsverbinding links in figuur 11 komt in 4 stappen tot stand:

- ▶ het vouwen van beide plaatuiteinden;
- ▶ het in elkaar haken van beide gevouwen uiteinden;
- ▶ het aandrukken van de in elkaar gehaakte uiteinden;
- ▶ het doordrukken van het bovenliggende uiteinde.



figuur 11 De felsverbinding: links goed, rechts fout

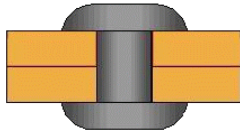
Door de laatste stap komen de platen nauwkeurig in elkaar verlengde te liggen en wordt de verbinding tevens gefixeerd. Het felsen moet worden uitgevoerd met aluminiumlegeringen in zachte toestand.

Felsverbindingen worden vaak gecombineerd met lijm of kit om de verbinding extra sterkte te geven en corrosie te voorkomen. Door de spleten die over kunnen blijven, kan de felsverbinding gevoelig zijn voor corrosie, zeker bij toepassing van verschillende materialen.

#### Klinken

Klinkverbindingen (zie figuur 12) worden met name in de vliegtuigbouw veel gebruikt, vanwege hun betrouwbaarheid, inspecteerbaarheid en relatief goede vermoeiingsweerstand. Maar ook buiten de vliegtuigbouw vindt de klinkverbinding toepassing. De klinkverbinding komt tot stand door in de te verbinden platen een gat te boren en de klinknagel daarin met een hamer vast te zetten (zie [www.dunneplaat-online.nl](http://www.dunneplaat-online.nl)).





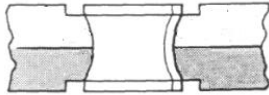
figuur 12 Klinkverbinding

#### *Ponsklinken en drukvoegen*

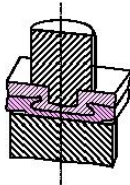
Een variant op het klinken is het ponsklinken (zie figuur 13). Bij deze techniek hoeft geen gat te worden geboord, omdat de nagel zijn eigen gat ponsst. Als de goede positie is bereikt, wordt plaatmateriaal door onder- en bovenstempel om de nagel geperst, waardoor deze wordt vastgezet.

Bij drukvoegen (zie figuur 14) wordt een verbinding gevormd door te verbinden plaatdelen met behulp van een stempel en matrijs lokaal zodanig in elkaar te persen, dat een vormverbinding ontstaat. Inmiddels zijn vele uitvoeringen van het drukvoegproces op de markt.

Zowel ponsklinken als drukvoegen zijn snelle verbindingen, waaraan niet te hoge eisen kunnen worden gesteld voor wat betreft sterkte en vermoeiingseigenschappen. Een belangrijk nadeel van deze technieken is, dat er altijd een indrukking zichtbaar is, waardoor ze zich minder lenen voor toepassing bij zichtdelen.



figuur 13 Ponsklinkverbinding



figuur 14 Voorbeeld van een drukvoeg

### 4.5 Oppervlaktebehandelingen

#### Algemeen

Aluminium heeft een grote affiniteit tot zuurstof. Hierdoor wordt een natuurlijke oxidelaag van circa 0,01  $\mu\text{m}$  dikte gevormd, die verdere oxidatie tegengaat. Bij beschadiging van de oxidelaag, wordt deze door de grote affiniteit tot zuurstof snel hersteld. Daardoor biedt de natuurlijke oxidelaag een goede weerstand tegen corrosie.

Naast de natuurlijke oxidelaag is de afwerking van het oppervlak van belang voor de corrosieweerstand, evenals voor de krasbestendigheid en de decoratieve waarde. De afwerkingen zijn onder te verdelen in de categorieën mechanisch, organisch en elektrochemisch.

#### Mechanische bewerkingen

Met mechanische oppervlaktebewerkingen zoals schuren, polijsten, borstelen en stralen worden krassen en vlekken verwijderd en wordt een oppervlakteafwerking verkregen die kan variëren van matglans tot hoogglans. De verkregen oppervlakteafwerking kan het beoogde eindresultaat zijn maar ook een tussenstap in een verdere oppervlaktebehandeling. Het is van belang om bij deze processen schoon te werken om vervuiling van het aluminiumoppervlak met vreemde metaaldeeltjes te voorkomen, omdat deze in het relatief zachte aluminiumoppervlak kunnen indringen en aanleiding kunnen zijn tot corrosieproblemen. Ook moet stof worden afgezogen om gezondheidsrisico's en explosiegevaar te voorkomen.

### Organische deklagen

Organische deklagen, zoals verf en poedercoatings, worden zeer breed toegepast. Voor kleinere series wordt het oppervlak veelal met een mechanische methode voorbereid en wordt het oppervlak chemisch gepassiveerd. Dat wil zeggen dat de beschermende oxidehuid volledig wordt gesloten.

Voor toepassingen waarin grote hoeveelheden materiaal worden gebruikt, kan voorgelakt materiaal op een rol worden geleverd.

De organische deklagen zijn in vrijwel alle kleuren beschikbaar. Ze bieden bescherming tegen corrosie en ze kunnen ook andere functies vervullen, zoals isolatie of absorptie van zonlicht.

### Elektrochemische oppervlakte-afwerking

De natuurlijke oxidelaag kan door het anodiseren, een elektrochemisch proces, op een dikte worden gebracht die varieert van enkele microns tot aan 150 micron. De belangrijkste redenen voor het aanbrengen van een anodiseerlaag zijn een verhoging van de corrosie- en slijtage-weerstand en de decoratieve waarde van ingekleurde anodiseerlagen. De anodiseerlaag is een glasachtige laag die werkt als een elektrische isolator en die bij buiging snel zal scheuren. De hechting van anodiseerlagen op de ondergrond is in het algemeen zeer goed.

## 5 Buis

### 5.1 Buis uit dunne plaat en band

Dunne aluminiumband komt op een rol uit de walserij. De opgerolde aluminiumband wordt tot plaat verwerkt door de band van de rol te wikkelen, te richten en op maat te knippen. De plaat kan worden rondgeperst tot een buis en worden dichtgelast. Ook is het mogelijk om de verwerkingsstap tot plaat over te slaan en band op de gewenste breedte te slitten en deze band via een reeks vormwalsen tot een buis te vormen en vervolgens dicht te lassen.

De uit dunne plaat of band gemaakte buizen hebben een aantal kenmerken:

- ▶ er kan een brede variëteit van legeringen en bijbehorende eigenschappen worden toegepast;
- ▶ er kunnen buizen met een dunne wand of een grote diameter worden verkregen;
- ▶ er kunnen verschillende afwerkingen worden verkregen zoals mill finish, mat geanodiseerd, glanzend in vele kleuren en verschillende patronen;
- ▶ ter plekke van de lasnaad is de materiaalsterkte in het algemeen iets lager, vanwege de warmte-inbreng tijdens het lassen.

### 5.2 Geëxtrudeerde buis

Extruderen is een proces waarbij een verwarmd aluminium persblok door een matrijs tot de gewenste vorm wordt geperst. De doorsnede van het product krijgt de vorm van de uitsparing in de matrijs. Naast massieve staf en allerlei open profielen is het ook mogelijk om holle gesloten profielen te extruderen. De meest eenvoudige vorm daarvan is een ronde buis. Om buis te extruderen wordt de matrijs samengebouwd met een doorn. Bij dit systeem levert de matrijs de buitencontour en de doorn de binnencontour.

Als bijzondere eisen aan afmetingen en toleranties worden gesteld, kunnen de geëxtrudeerde buizen door koudtrekken op de vereiste eindafmetingen worden gebracht. Bij het koudtrekken van de buizen treedt versteviging op. De hierdoor verkregen sterkteverhoging gaat bij verhitting van de buizen, bijvoorbeeld door lassen, weer verloren.

De legeringskeuze moet worden afgestemd op het extrusieproces. Dit beperkt de legeringskeuze. Veel toegepast is EN AW-6060, vanwege de goede balans die deze legering biedt tussen sterkte en vervormbaarheid.

Evenals buis uit dunne plaat en band kan geëxtrudeerde buis in verschillende afwerkingen worden verkregen. Met name anodiseren levert zeer duurzame en decoratieve oppervlakken op.

## 6 Ontwerpaspecten

### 6.1 Vormvrijheid bij extrusies

Bij extrusieprofielen is er, voor wat betreft de doorsnede van de profielen, een grote variatie aan vormen en afmetingen mogelijk. Hierdoor kunnen profielen worden gemaakt die door middel van vormverbindingen aan elkaar kunnen worden gezet tot bijvoorbeeld vloer- of wanddelen. Dergelijke profielen vinden veel toepassing in de transportsector. Verder biedt de combinatie van plaat en profiel uitstekende kansen voor licht en stevig construeren. Dit komt tot uiting in verschillende bouw-systemen die op de markt zijn.

### 6.2 Vermoeiing

De vermoeiingssterkte wordt verminderd door factoren die een spanningsconcentratie veroorzaken. Dergelijke factoren zijn bijvoorbeeld ruwe knipranden, slecht afgewerkte boorgaten of onvolkomenheden in de lasverbindingen. In het ontwerp van een constructie kan vermindering van de vermoeiingssterkte worden tegengegaan door een gelijkmatige spanningsverdeling en krachtdoorleiding te waarborgen, scherpe hoeken op randen en uitsparingen te vermijden, en lassen zoveel mogelijk buiten gebieden met verhoogde spanning te plaatsen. In de afwerking is het belangrijk om te zorgen voor gladde oppervlakken en gelijkmatige overgangen. Omdat aluminium geen onderste vermoeiingsgrens heeft, is het voor de levensduurbepaling van wisselend belaste constructies noodzakelijk een berekening uit te voeren. Dit moet worden gedaan voor het betreffende belastingsgeval op basis van de vermoeiingsgegevens (zoals de Wöhlercurve) van de betreffende legering.

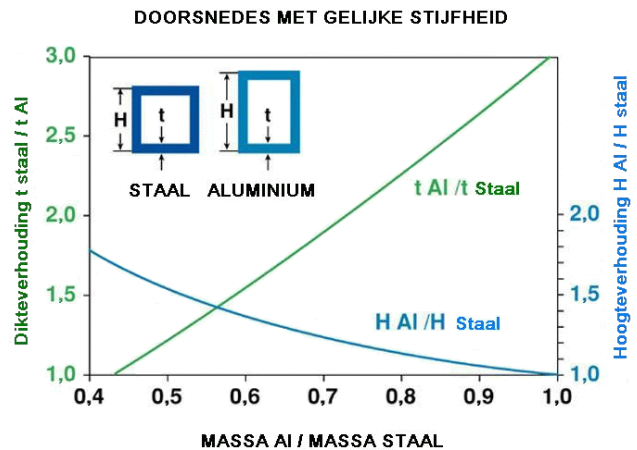
### 6.3 Stijfheid van het product

Als in een constructie-element buig- en drukspanningscomponenten optreden, dan moet dat element voldoende stijfheid hebben om stijfheidsproblemen zoals plooiën en knikken te voorkomen. De stijfheid van een constructie-element is afhankelijk van de E-modulus van het materiaal waarvan het gemaakt is en van het traagheidsmoment van de doorsnede. Een relatief lage E-modulus, zoals bij aluminium, kan worden gecompenseerd door het traagheidsmoment van de doorsnede te verhogen. Dit kan worden gedaan door de wanddikte te vergroten, de diameter te vergroten of verstevigingen aan te brengen. Het effect van dergelijke veranderingen op de stijfheid en het gewicht van een constructie-element moet per geval worden berekend, omdat de van toepassing zijnde formules afhankelijk zijn van het specifieke belastingsgeval en van de toegepaste ontwerpcriteria [ref.9].

Met behulp van figuur 15 kan voor een rechthoekig profiel worden nagegaan welke gewichtsvermindering kan worden bereikt door vervanging van staal door aluminium. Uitgangspunt is een rechthoekig stalen profiel. Om een aluminium profiel dezelfde stijfheid te geven, moeten hoogte en dikte van het profiel groter worden. Naarmate er in een constructie meer vrijheid is om de hoogte van het profiel te vergroten, kan een grotere gewichtsvermindering worden bereikt.

#### Een voorbeeld

Als de hoogte 1,3 maal groter mag worden, dan kan met figuur 15 gevonden worden dat het gewicht van het aluminium profiel 0,6 maal dat van het staalprofiel kan zijn, door vanaf de rechterschaal via de blauwe curve de horizontale massaschaal af te lezen. Vervolgens kan via de groene curve op de linkschaal worden afgelezen dat de dikte van het aluminium profiel daarbij circa 1,6 maal groter moet zijn dan die van het stalen profiel.



figuur 15 Diagram ter bepaling van staande rechthoekige profieldoorsnedes van staal en aluminium met gelijke stijfheid (t = plaatdikte; H = profielhoogte)

## 7 Toepassingsvoorbeelden

### 7.1 Spaceframe

Alcoa en Audi hebben samen een aluminium spaceframe ontwikkeld, dat aanzienlijke gewichtsbesparingen mogelijk maakt. De Audi A8 was de eerste auto van aluminium die in serieproductie werd gemaakt. De componenten voor het frame en het plaatwerk worden door Alcoa toegeleverd. In 1999 werd de A8 gevolgd door de A2.

Het spaceframe van de A2 (zie figuur 16) heeft een uitstekende stijfheid/gewichtsverhouding gekregen door toepassing van persdelen uit plaat, extrusies en gietstukken. Verder zijn ook relatief nieuwe technieken als hydrovormen en laserlassen toegepast. Ook dit draagt bij aan een verbeterde stijfheid. Door toepassing van het laserlassen zijn de puntlasverbindingen, die gangbaar zijn in de carrosseriebouw, vervangen door continue verbindingen, en door toepassing van hydrovormen kunnen holle profielen worden gevormd met een grotere diameter/dikte verhouding.



figuur 16 Spaceframe van de Audi A2

### 7.2 Motorkap

De motorkap behoort tot de eerste aluminium onderdelen van de autocarrosserie die in massa zijn geproduceerd. Voorafgaand aan massaproductie zijn de productiemethoden en de gebruikseigenschappen van de motorkap in kleinere series bewezen. Met de aluminium motorkap kan op een efficiënte en kosteneffectieve wijze een gewichtsvermindering worden bereikt ten opzichte van staal. Bij een goed ontwerp is 45% haalbaar.

Een motorkap (zie figuur 17) bestaat uit een binnen- en een buitendeel. Het buitendeel is een onderdeel van de vormgeving en de aërodynamica van de auto en wordt door het binnendeel ondersteund. Beide delen worden uit plaatmateriaal geperst met een dikte die veelal tussen de 1,0 en 1,2 mm ligt. Een gebruikelijke legering voor het buitendeel is EN AW-6016 T4 en voor het binnendeel EN AW-5182 O. Naast gewicht zijn de belangrijkste criteria voor de keuze van het materiaal voor het buitendeel stijfheid, deukweerstand, verwerkbaarheid, uiterlijk en corrosieweerstand. Voor het binnendeel zijn dat vervormbaarheid en stijfheid na vervorming.

Het buiten- en binnendeel worden verbonden door drukvoegen en felsen, waarbij vaak ook een afdichtende kit wordt toegepast. Het EN AW-6016 T4 buitendeel wordt tijdens het lakuiharden op circa 175 °C circa 50 N/mm<sup>2</sup> sterker door de optredende precipitatieharding (of bakehardening). Door deze sterkteverhoging neemt de deukweerstand van de motorkap toe.



figuur 17 Motorkap van de Peugeot 307. Buitenkant (a) en binnenkant (b). Buitendeel EN AW-6016 T4. Binnendeel EN AW-5182 O. Gewicht 8,2 kg

### 7.3 'Tailor made blanks'

'Tailor made blanks' (zie figuur 18) zijn samengesteld uit twee of meer plaatdelen, die verschillen wat betreft dikte en/of materiaaleigenschappen. Hierdoor is het mogelijk de materiaaleigenschappen precies op die plekken aan te brengen, waar ze met het oog op bijvoorbeeld dieptrekbaarheid, stijfheid of sterkte nodig zijn. De 'tailor made blanks' worden in de meeste gevallen door middel van laserlassen gemaakt.

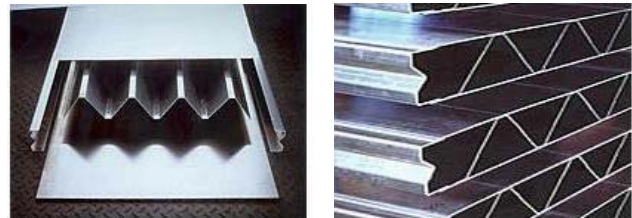
De mogelijkheden van het lassen van aluminium plaat met behulp van een Nd:YAG-laser zijn de laatste jaren enorm toegenomen, omdat in hoog tempo Nd:YAG-lasers met hogere vermogens beschikbaar zijn gekomen (momenteel tot circa 6 kW). Hierdoor neemt nu ook de verkrijgbaarheid van aluminium 'tailor made blanks' toe.



figuur 18 Onderdeel van een wielkast (Lamborghini) geperst uit een aluminium 'tailor made blank' EN AW-6016 met diktes van 2,7 mm en 1,3 mm

### 7.4 Gelaste panelen

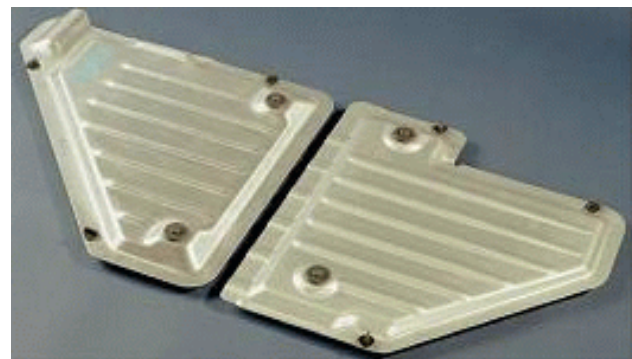
Door middel van laserlassen kunnen panelen worden samengesteld uit huidplaten met daartussen geprofileerde versterkingsplaat. Het paneel uit figuur 19 heeft huidplaten en een versterkingsplaat die gemaakt zijn van de AA 5059 legering. Het paneel is geschikt voor dekplaten in de scheepsbouw en biedt daarbij een gewichtsbesparing van circa 30% ten opzichte van extrusiepanelen voor dezelfde toepassing.



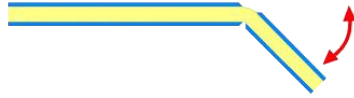
figuur 19 Coraldec panelen. Links de samenstellende delen, rechts de gelaste panelen

### 7.5 Nieuw sandwich materiaal

Een voorbeeld van een nieuw sandwichmateriaal is Hylite. Dit materiaal heeft 0,2 mm dikke EN AW-5182 huidplaten in zachte of harde toestand en een kern van polypropyleen. De sandwich is leverbaar in diktes van 1,2 tot 2,5 mm. Het materiaal kan op eenzelfde manier worden vervormd als aluminiumplaat en heeft inmiddels verschillende toepassingen gevonden, bijvoorbeeld als vloerpaneel in de Audi A2, als plaat voor luchtvrachtcontainers en als materiaal voor kantoorartikelen (zie figuren 20 en 21).



figuur 20 Bodemplaat van de Audi A2 uit Hylite



figuur 21 Een opbergdoosje. De vouwnaden en scharnieren van het doosje zijn gemaakt door de huidplaat plaatselijk weg te frezen (zie rechts)

## 8 Verkrijgbaarheid en bestellingen

Grotere hoeveelheden (denk aan 10 ton of meer) kunnen direct van de aluminiumproducent worden betrokken als plaat of op de rol. Kleinere hoeveelheden zijn leverbaar via de tussenhandel. Om tot een goede levering te komen, is het van belang kennis te nemen van de technische leveringsvoorwaarden volgens NEN EN 485-1. Deze norm is opgenomen in NEN bundel 21 [ref.10]. Gegevens die in de bestelling moeten worden opgenomen zijn onder andere:

- ▶ de afmetingen en vorm van het product en de toleranties daarop;
- ▶ de hoeveelheid;
- ▶ de leveringstoestand;
- ▶ de verpakkingwijze;
- ▶ de keuringsdocumenten.

## 9 Referenties

Als praktijkgericht studiemateriaal wordt Vocational TALAT aanbevolen. Belangrijke naslagwerken voor de praktijk zijn de NEN-bundel 21 en het Aluminium Taschenbuch.

- [1] Vocational TALAT. Volume 1, 2 and 3. Aluminium for product fabrication, joining aluminium and forming aluminium. Verkrijgbaar via [www.eaa.net](http://www.eaa.net) - education en het Aluminium Centrum ([www.aluminiumcentrum.nl](http://www.aluminiumcentrum.nl))
- [2] Aluminium Taschenbuch. Band 1-3.
  1. Grundlagen und Werkstoffe. ISBN 3-87017-274-6.
  2. Umformen, Gießen, Oberflächenbehandlung, Recycling und Ökologie. ISBN 3-87017-242-8.
  3. Weiterverarbeitung und Anwendung. ISBN 3-87017-275-4
- [3] Improved AA 5182 aluminium alloy as a preferred choice for critical forming operations. C.Lahaye, J. Bottema, P. De Smet, P. Jonason, T. Håkansson and A. Olofsson. SAE paper 1999-01-3173
- [4] Benefits of using pre-treated, pre-aged aluminium 6xxx sheet material for closure applications. C. Lahaye, J. Bottema, P. De Smet and S. Heyvaert. SAE paper 2001-01-3043
- [5] Scheidingstechnieken voor dunne plaat en buis. M. de Nooij en A. Gales. Tech-Info-blad TI.04.20. Uitgave FME-CWM, februari 2004
- [6] Dieptrekken. Vormgeven van dunne metaalplaat. VM110. Uitgave FME-CWM, 1995.
- [7] Lassen van aluminium en aluminiumlegeringen. Diverse auteurs. VM83. Uitgave FME-CWM, 1991
- [8] Lassen van metalen met hoogvermogen lasers. G.R.B.E. Römer. Praktijkaanbeveling PA.02.12, Uitgave FME-CWM, september 2002.
- [9] Ontwerpen van dunne plaat producten en de Eindige Elementen Methode. E. Meijers. Tech-Info-blad TI.04.22. Uitgave FME-CWM, maart 2004
- [10] Europese normen voor aluminiumplaat, -profielen en -buizen. NEN-bundel 21. Nederlands Normalisatie Instituut, December 2001.

- [11] Rubberpersen. Tech-Info-blad TI.98.06, Uitgave FME-CWM, december 1998
- [12] Rubberpersen (II). Tech-Info-blad TI.00.10, Uitgave FME-CWM, oktober 2000
- [13] MIG/MAG lassen. Uitgave NIL, 1996
- [14] TIG- en plasmalassen VM 81. Uitgave FME-CWM, 1990
- [15] Buigen (vormgeven van dunne metaalplaat) VM113, Uitgave FME-CWM, juli 1996
- [16] Lijmen algemeen VM86. Uitgave FME-CWM, november 1991
- [17] Lijmen van metalen VM 87. Uitgave FME-CWM, november 1991
- [18] Keuren van lijmen en lijmverbindingen VM89, Uitgave FME-CWM, januari 1992

## 10 Websites

### On-line informatie

[www.eaa.net](http://www.eaa.net)

Website van de Europese Aluminium Associatie (EAA) met daarop de Aluminium Automotive Manual [www.aluminiumcentrum.nl](http://www.aluminiumcentrum.nl)

Website van het Aluminium Centrum, aanspreekpunt in Nederland voor vragen over aluminium

[www.nen.nl](http://www.nen.nl)

Deze website van het Nederlands Normalisatie Instituut geeft informatie omtrent van toepassing zijnde normen

[www.DunnePlaat-Online.nl](http://www.DunnePlaat-Online.nl)

Deze website van samenwerkende organisaties op het gebied van dunne plaat geeft informatie omtrent nieuwe ontwikkelingen in dunne plaat toepassingen en de keuze van verbindingstechnieken

[www.fme-cwm.nl](http://www.fme-cwm.nl)

Via deze brancheorganisatie zijn verdere tech-info-bladen, praktijkaanbevelingen en informatiebladen te verkrijgen

[www.syntens.nl](http://www.syntens.nl)

Innovatienetwerk voor ondernemers, stimuleert en begeleidt ondernemers in het midden- en kleinbedrijf via tal van projecten bij innovatie in de meest brede zin van het woord.

[www.fdp.nl](http://www.fdp.nl)

Kenniscentrum voor professioneel plaatwerk

[www.ind.tno.nl](http://www.ind.tno.nl)

TNO Industrie vergroot de concurrentiekracht van bedrijven door hen te ondersteunen met productontwikkeling, met ontwikkeling van productieprocessen en productiemiddelen, met materiaalontwikkeling en met productonderzoek.

### Leverancier (tussenhandel)

[www.mcb.nl](http://www.mcb.nl)

### Producenten

[www.alcan.com](http://www.alcan.com)

[www.alcoa.com](http://www.alcoa.com)

[www.corusgroup.com](http://www.corusgroup.com)

[www.pechiney.com](http://www.pechiney.com)

### Bronvermelding

Voorzover niet anders vermeld, zijn de figuren in dit Tech-Info-blad ontleend aan de EAA (Vocational Talat), het Aluminium Centrum en overgenomen van de websites van de aluminiumproducenten.

Figuur 8: Schuler Metal Forming Handbook, 1998, Springer Verlag, ISBN 3-540-61185-1

## BIJLAGE I

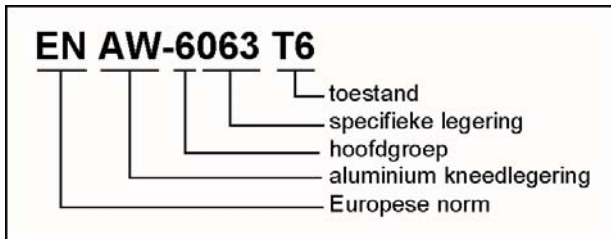
### Systeem van aanduidingen

#### NEN-EN 573

Voor Nederland geldt de Europese norm NEN-EN 573, deel 1 t/m 3. In deze norm zijn de aluminiumlegeringen beschreven. Voor een aantal legeringen is in tabel B-1 aangegeven, hoe de aanduiding volgens verschillende andere normen tot de Europese norm wordt herleid.

#### De aluminium groepen

De legeringen worden in de norm NEN-EN 573 onderverdeeld in groepen op basis van de belangrijkste legeringselementen per groep. Het systeem begint altijd met de lettercombinatie EN, wat duidt op de Europese norm. Na een spatie wordt EN gevolgd door de letters AW of AC. De letter W van "wrought" geeft aan dat het om een kneedlegering gaat, die door walsen of extruderen wordt gemaakt. De letter C van "cast" op dezelfde positie geeft aan, dat het om een gietlegering gaat. Om een specifieke legering aan te duiden wordt deze lettercombinatie gevolgd door 4 cijfers (zie ook figuur B-1). Het eerste cijfer of duizendtal geeft aan welk hoofdlegeringselement is toegepast. het tweede cijfer geeft aan of het een oorspronkelijke legering is, of dat deze een wijziging heeft ondergaan. Het derde en vierde cijfer staan voor een verder gespecificeerde en geregistreerde legering. Bij legeringen uit de 1xxx serie geven het derde en vierde cijfer echter de mate van zuiverheid aan. Die is minimaal 99%. De EN AW-1050 is een legering met een zuiverheid van 99,50%. Tot slot geeft de laatste letter van de normaanduiding gevolgd door één of twee cijfers de toestand aan waarin het materiaal zich bevindt.



figuur B-1 Voorbeeld van een aanduiding volgens EN 573

De groepen zijn:

- 1xxx Al
- 2xxx Al-Cu
- 3xxx Al-Mn
- 4xxx Al-Si
- 5xxx Al-Mg
- 6xxx Al-Mg-Si
- 7xxx Al-Zn-Mg
- 8xxx Al- andere elementen
- 9xxx niet in gebruik

Naast de viercijferige aanduiding geeft de norm als aanvulling ook een aanduiding op basis van chemische symbolen. Deze wordt, indien gewenst, tussen vierkante haken achter de viercijferige aanduiding geplaatst. De chemische aanduiding voor ongelegeerd aluminium bestaat uit het symbool Al, gevolgd door een percentage dat de zuiverheid aangeeft. De chemische aanduiding voor gelegeerd aluminium bestaat uit het symbool Al gevolgd door de symbolen van de belangrijkste legeringselementen. Indien van toepassing wordt een symbool gevolgd door een getal dat het percentage van het desbetreffende element weergeeft. Komen er meerdere elementen in de aanduiding voor, dan worden ze in volgorde van nominaal gehalte gerangschikt. Het aantal chemische symbolen voor legeringselementen moet tot vier beperkt blijven.

De groepen worden in het spraakgebruik aangeduid als de duizend serie (1xxx serie), de tweeduizend serie (2xxx serie) enz. Dit gebruik is in deze brochure overgenomen.

#### Leveringstoestanden (NEN-EN 515)

In het algemeen wordt de numerieke aanduiding gevolgd door een aanduiding die aangeeft welke behandelingen het materiaal ondergaan heeft. Deze aanduidingen bestaan uit letters en cijfers.

*F: zoals geproduceerd*

De letter F geldt voor producten die zijn ontstaan uit fabricageprocessen, waarbij geen controle op de thermische omstandigheden of op het verstevigen plaatsvindt. Voor deze toestand worden geen eisen gesteld aan de mechanische eigenschappen.

*O: zachtgegloeid*

De O geldt voor zachtgegloeide producten. De O kan door een cijfer worden gevolgd.

O1: bij hoge temperatuur gegloeid en langzaam afgekoeld;

O2: warmtebehandeld tijdens mechanische bewerking;

O3: gehomogeniseerd.

tabel B-1 Herleiden van de aanduidingen van verschillende normen van een aantal legeringen tot de Europese norm

NEN-EN 573	ISO	DIN 1725	Werkstof Nr.	AA codering	Nederland
EN AW-1050	Al 99,5	Al 99,5	30255	AA 1050	2S
EN AW-1200	Al 99,0	Al 99	30205	AA 1200	1S
EN AW-2017	AlCu4SiMg	AlCuMg1	31325	AA 2017	17S
EN AW-2024	AlCu4Mg1	AlCuMg2	31355	AA 2024	24S
EN AW-3003	AlMn1Cu	AlMn	30515	AA 3003	3S
EN AW-3004	AlMn1Mg1	AlMn1Mg1	30526	AA 3004	4S
EN AW-5005	AlMg1(B)	AlMg1	33315	AA 5005	B57S
EN AW-5052	AlMg2,5	AlMg2,5	33523	AA 5052	57S
EN AW-5083	AlMg4,5Mn0,7	AlMg4,5Mn	33547	AA 5083	D54S
EN AW-5754	AlMg3	AlMg3	33535	AA 5754	-
EN AW-6060	AlMgSi	AlMgSi0,5	33206	AA 6060	50S
EN AW-6082	AlMgSiMn	AlMgSi1	32315	AA 6082	51S
EN AW-6262	AlMg1SiPb	AlMgSiPb	30615	AA 6262	-
EN AW-7020	AlZn4,5Mg1	AlZnMg1	34335	AA 7020	74S
EN AW-7075	AlZn5,5MgCu	AlZnMgCu1,5	34365	AA 7075	75S

#### *H: verstevigd*

De H wordt toegevoegd aan de aanduiding van niet-hardbare legeringen, om aan te geven dat de sterkte verkregen is door versteving al of niet in combinatie met een gloeibehandeling. De H wordt gevolgd door tenminste twee cijfers, waarvan het eerste aangeeft hoe de hardheid is bereikt en het tweede wat de mate van versteving is. Soms wordt een derde cijfer gebruikt voor bijzondere vervaardigingsprocessen.

Betekenis van het eerste cijfer:

H-1x: uitsluitend verstevigd

H-2x: verstevigd op een hardheidsniveau boven het gewenste eindniveau en vervolgens door een gloeibehandeling op de gewenste hardheid gebracht

H-3x: verstevigd en gestabiliseerd

H-4x: verstevigd en daarna gelakt en gemoffeld

Betekenis van het tweede cijfer:

H-x2: materiaal is  $\frac{1}{4}$  hard

H-x4: materiaal is  $\frac{1}{2}$  hard

H-x6: materiaal is  $\frac{3}{4}$  hard

H-x8: materiaal is hard

H-19: materiaal is extra hard

Een derde cijfer wordt toegevoegd als de hardheidstoestand en de mechanische eigenschappen een weinig verschillen van de met twee cijfers aangeduide toestand. Ook wordt het derde cijfer gebruikt als enkele andere eigenschappen duidelijk worden beïnvloed.

#### *T: warmtebehandeld*

De T wordt toegevoegd aan een aanduiding van hardbare legeringen om aan te geven, dat de sterkte is verkregen door een warmtebehandeling, eventueel in combinatie met een aanvullende versteving. De T wordt gevolgd door één of meer cijfers die de specifieke volgorde van de behandelingen aangeven.

T1: na warmvervormen afgeschrikt en natuurlijk verouderd

T2: na warmvervormen afgeschrikt, verstevigd en natuurlijk verouderd

T3: oplosgegloeid, verstevigd en natuurlijk verouderd (koud uitgehard)

T4: oplosgegloeid en natuurlijk verouderd

T5: na warmvervormen afgeschrikt en vervolgens kunstmatig verouderd

T6: oplosgegloeid en kunstmatig verouderd

T7: oplosgegloeid en kunstmatig oververouderd

T8: oplosgegloeid, verstevigd en kunstmatig verouderd

T9: oplosgegloeid, kunstmatig verouderd en verstevigd

Achter de aanduidingen T1 t/m T9 kunnen aanvullende cijfers worden toegevoegd om een variatie in de behandeling aan te geven, die de toestand van het product wezenlijk heeft veranderd ten opzichte van de oorspronkelijke T-toestand. Deze cijfers kunnen betrekking hebben op:

- ▶ oplosgloeien of precipitatieharden;
- ▶ de mate van versteving na oplosgloeien;
- ▶ een bewerking ter vermindering van de inwendige spanningen.

## BIJLAGE II

### Fysische eigenschappen van aluminium

De methode om in kryoliet aanwezige aluminiumoxides door middel van een elektrolyseproces te reduceren tot aluminium is in 1886 in Amerika ontdekt door Hall en rond dezelfde tijd in Frankrijk door Heroult. Deze ontdekking heeft het mogelijk gemaakt om op industriële schaal aluminium te produceren, wat in de twintigste eeuw van enorme betekenis is gebleken, in het bijzonder voor de ontwikkeling van de luchtvaart. Aluminium is het meest voorkomende metaal in de aardkorst en in verschillende landen, waaronder Suriname, Guyana, Australië, Rusland en Amerika, wordt het als erts, genaamd bauxiet, gevonden. Omdat de beschikbaarheid van aluminium groot is, is de prijs ten opzichte van andere non-ferro metalen laag. Wel is aluminium duurder dan staal.

Op gewichtsbasis kan aluminium tweemaal zoveel elektrische energie transporteren als koper. Dit maakt aluminium geschikt voor hoogspanningskabels, de 6xxx serie biedt een goede balans tussen sterkte en geleidbaarheid.

Aluminium heeft een hoge thermische geleidbaarheid. Dit maakt het geschikt voor toepassingen als radiatoren en kookgerei.

Aluminium heeft een hoge reflectiewaarde. Hiervan wordt gebruikgemaakt in lichtarmaturen en voor de reflectoren van autokoplampen.

Aluminium is niet magnetisch. Dit is van belang voor toepassingen in de elektronica of voor een maritieme toepassing als mijnenvegers.

Aluminium behoudt tot zeer lage temperatuur zijn taaiheid en kent geen bros-overgangsgebied. Sommige legeringen worden zelfs sterker en taaier bij lage temperaturen. Dit maakt ze ideaal voor cryogene toepassingen, zoals tanks voor vloeibaar gas.

Aluminium is goed herbruikbaar (of recyclebaar). Hierbij is slechts een klein deel van de energie nodig die nodig is bij de vervaardiging van primair aluminium. Dit levert tevens een kostenbesparing op.

Aluminium heeft een grote affiniteit tot zuurstof. Het vormt daarmee een natuurlijke oxidelaag van circa 0,01 micron dikte die het tegen verdere oxidatie beschermt. Als de oxidelaag wordt beschadigd, wordt deze door de grote affiniteit tot zuurstof snel hersteld.

Aluminium heeft geen duidelijke onderste vermoeiingsgrens. Daarom moeten aluminiumconstructies die dynamisch worden belast, gedurende hun levensduur met

tussenpozen worden gecontroleerd op het ontstaan van haarscheurtjes. Boorgaten e.d. in gebieden met spanningsconcentraties moeten worden vermeden, omdat dat tot sterk versnelde scheurinitiatie kan leiden.

Zuiver aluminium is zacht en heeft een lage sterkte, maar door het te legeren met elementen als koper, mangaan, silicium, magnesium en zink kunnen verschillende legeringen worden gemaakt die alle een hogere sterkte hebben dan zuiver aluminium. De aluminiumlegeringen onderscheiden zich onderling door verschillen in vervormbaarheid, sterkte, corrosiebestendigheid, anodiseerbaarheid, extrudeerbaarheid en lasbaarheid.

In tabel B-2 is van zuiver aluminium (Al) en ijzer (Fe) een aantal belangrijke fysische eigenschappen opgenomen.

tabel B-2 Een aantal belangrijke fysische eigenschappen van aluminium (Al) en ijzer (Fe)

Fysische eigenschappen	Aluminium	IJzer
Smeltpunt (° C)	660	1538
Kookpunt (° C)	2519	2861
Smeltwarmte (J/g)	400	247
Soortelijk gewicht (kg/m <sup>3</sup> ) <sup>1)</sup>	2700	7870
Uitzettingscoëfficiënt (K <sup>-1</sup> ) <sup>1)</sup>	23,1 x 10 <sup>-6</sup>	11,8 x 10 <sup>-6</sup>
Soortelijke warmte (J/g K) <sup>1)</sup>	0,904	0,449
Warmtegeleidingscoëfficiënt (W/cm K) <sup>1)</sup>	2,37	0,802
Elektrische soortelijke weerstand (Ω mm <sup>2</sup> /m) <sup>1)</sup>	0,027	0,10
Elasticiteitsmodulus (N/mm <sup>2</sup> ) <sup>1)</sup>	70000	210000
Treksterkte (N/mm <sup>2</sup> ) <sup>1), 2)</sup>	40-50	220-270
1) Bij kamertemperatuur		
2) Afhankelijk van korrelgrootte en kristaloriëntatie		

## BIJLAGE III

### Sterkte en vervormbaarheid

De tabellen B-3 en B-4 geven de mechanische eigenschappen van een aantal legeringen. Uit elke groep is 1 legering gekozen. Tabel B-3 geeft de eigenschappen in de zachte toestand en tabel B-4. geeft de eigenschappen in een toestand van verhoogde sterkte. Deze verhoogde sterkte is ofwel bereikt door versterking (dit is

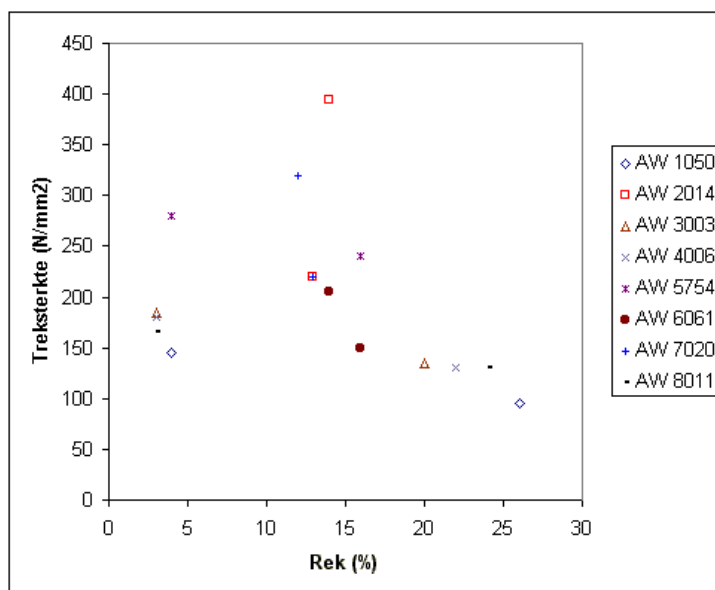
het geval bij EN AW-1050, EN AW-3003, EN AW-4006, EN AW-5754 en EN AW-8011, toestand H14) ofwel door een oplosgloeïing en natuurlijke veroudering (EN AW-2014, EN AW-6061 en EN AW-7020, toestand T4). Om een indruk te geven van de range van sterktes en vervormbaarheid die door de verschillende aluminiumgroepen wordt bestreken, zijn de betreffende gegevens uit de tabellen ook weergegeven in de figuren B-2 en B-3. Voor een uitgebreider overzicht wordt verwezen naar NEN bundel 21 [ref.10].

tabel B-3 Enkele mechanische eigenschappen volgens EN 485-2. Plaatdikte van 1,5 tot 3 mm. Zachte toestand

		Rekgrëns-Rp <sub>0,2</sub> (N/mm <sup>2</sup> )		Treksterkte-Rm (N/mm <sup>2</sup> )		Rek A50 (%)	Buigstraal 90°	Hardheid HBS
		min.	max.	min.	max.	min.	min.	
EN AW-1050 A [Al99,5]	O / H111	20		65	95	26	0 t	20
EN AW-2014 [AlCu4SiMg]	O		140		220	13	1,0 t	55
EN AW-3003 [AlMn1Cu]	O / H111	35		95	135	20	0 t	28
EN AW-4006 [AlSi1Fe]	O	40		95	130	22	0 t	28
EN AW-5754 [AlMg3]	O / H111	80		190	240	16	1,0 t	52
EN AW-6061 [AlMg1SiCu]	O		85		150	16	1,0 t	40
EN AW-7020 [AlZn4,5Mg1]	O		140		220	13	-	45
EN AW-8011A [AlFeSi(A)]	O / H111	30		85	130	24	-	25

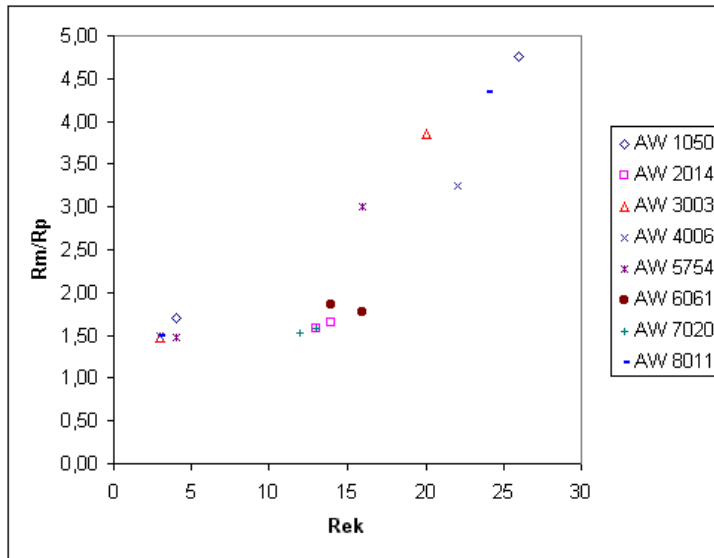
tabel B-4 Enkele mechanische eigenschappen volgens EN 485-2. Plaatdikte van 1,5 tot 3 mm. Versterkte (H14) of warmtebehandelde toestand (T4)

		Rekgrëns-Rp <sub>0,2</sub> (N/mm <sup>2</sup> )		Treksterkte-Rm (N/mm <sup>2</sup> )		Rek A50 (%)	Buigstraal 90°	Hardheid HBS
		min.	max.	min.	max.	min.	min.	
EN AW-1050 A [Al99,5]	H14	85		105	145	4	1,0 t	34
EN AW-2014 [AlCu4SiMg]	T4	240		395		14	5,0 t	110
EN AW-3003 [AlMn1Cu]	H14	125		145	185	3	1,0 t	46
EN AW-4006 [AlSi1Fe]	H14	120		140	180	3	2,0 t	45
EN AW-5754 [AlMg3]	H14	190		240	280	4	-	72
EN AW-6061 [AlMg1SiCu]	T4	110		205		14	1,5 t	58
EN AW-7020 [AlZn4,5Mg1]	T4	210		320		12	2,5 t	92
EN AW-8011A [AlFeSi(A)]	H14	110		125	165	3	-	41



figuur B-2 Treksterkte en rek bij breuk voor de legeringen uit de tabellen B-3 en B-4





figuur B-3 De treksterkte-rek grensverhouding en de rek voor de legeringen uit de tabellen B-3 en B-4

De combinatie van sterkte en vervormbaarheid is gunstiger naarmate een legering meer rechtsboven in figuur B-2 ligt, omdat dan zowel treksterkte als rek groter zijn. In de praktijk echter gaat een toename van de sterkte veelal ten koste van de rek. In de figuur is dit verband terug te zien in de groep punten tussen enerzijds EN AW-1050 in zachte toestand met een rek van 31% en een treksterkte van 90 N/mm<sup>2</sup> en anderzijds EN AW-7020 in harde toestand met een rek van 12% en een treksterkte van 325 N/mm<sup>2</sup>. Voor de koudverstevigende legeringen in harde toestand geldt, dat de toename van de sterkte in grotere mate ten koste van de rek is gegaan dan voor de andere legeringen. Deze groep punten ligt aan de linkerkant van de figuur, in het rekgebied tot 5%.

Aansluitend hierop kan uit de figuur B-2 worden afgelezen, dat de natuurlijke veroudering tot gunstigere combinaties van treksterkte en rek leidt dan koudversteving. Als bijvoorbeeld EN AW-3003 wordt genomen, dan laat de figuur zien dat in de zachte toestand de treksterkte circa 135 N/mm<sup>2</sup> en de rek circa 20% is. In de koudverstevigde toestand zijn deze waarden respectievelijk 185 N/mm<sup>2</sup> en 3%. Voor de precipitatiehardende legering EN AW-6061 is in zachte toestand de treksterkte circa 150 N/mm<sup>2</sup> en de rek circa 16%. In de geharde toestand zijn deze waarden 205 N/mm<sup>2</sup> en 14%. Een vergelijkbare sterkte-toename leidt hier dus tot een veel kleinere afname van de rek. Verdere bestudering van de figuur leert, dat dit ook voor de andere precipitatiehardende legeringen geldt.

Een legering is, bij een gegeven rek en rekgrens, beter vervormbaar naarmate de n-waarde (of verstevings-exponent) hoger is (zie voor het begrip n-waarde NEN-EN 10130). Als de n-waarde niet beschikbaar is, dan kan in plaats daarvan de Rm/Rp verhouding, naast de rek, als indicatie voor de vervormbaarheid worden genomen. Figuur B-3 geeft de rek en de Rm/Rp verhouding voor de verschillende legeringen. Als indicatie voor de vervormbaarheid geldt in de eerste plaats de rek, en bij een gegeven rek is de vervormbaarheid beter naarmate de Rm/Rp verhouding hoger is. Uit de figuur is op te maken dat de precipitatiehardende legeringen bij eenzelfde rek een wat lagere Rm/Rp verhouding hebben. Vergelijk hiertoe EN AW-5754 en EN AW-6061 bij een rek van 16% of trek een denkbeeldige lijn door de punten voor de koudverstevigende legeringen. Dan blijken de precipitatiehardende legeringen iets onder deze lijn te liggen.

## BIJLAGE IV

### Metaalkundige aspecten

#### Sterkteverhogende mechanismen

In aluminium spelen een aantal sterkteverhogende mechanismen een rol. Dit zijn versteving, precipitatieharding, oplosharding en korrelverfijning. Deze sterkteverhogende mechanismen vormen de metaalkundige basis voor de verschillen in sterkte en vervormbaarheid van de verschillende aluminiumlegeringen.

In bijlage I is terug te vinden hoe de verschillende mechanismen worden toegepast om de gewenste sterkte en vervormbaarheid van het aluminium te realiseren.

#### Versteving

Bij blijvende vervorming, zoals bijvoorbeeld door walsen, treedt versteving op. Hiermee wordt bedoeld, dat voor een verdere vervorming een hogere kracht nodig is. Dit verschijnsel heeft zijn oorsprong in de microstructuur van het aluminium. De vervorming op macroscopische schaal correspondeert met afschuivingen op microscopische schaal van metaalroostervlakken ten opzichte van elkaar. Door deze afschuivingen verandert de oriëntatie van het metaalrooster, wat samen met het verdwijnen en vastlopen van dislocaties (verplaatsbare onvolkomenheden in het metaalrooster die afschuiving vergemakkelijken) verdergaande afschuiving en plastische vervorming moeilijker maakt.

Het resultaat van versteving is, dat aluminium na een blijvende vervorming sterker is geworden. Dit verschijnsel treedt bij alle aluminiumlegeringen op. De sterkteverhoging kan weer ongedaan worden gemaakt door het aluminium te verwarmen tot boven de rekristallisatietemperatuur. Deze behandeling wordt zachtgloeien genoemd.

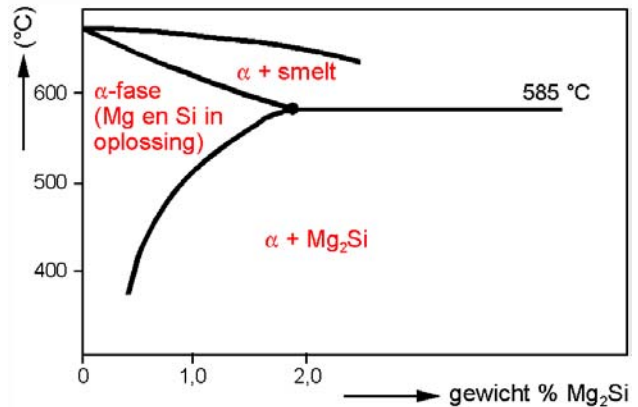
#### Precipitatieharding

De aluminiumatomen in aluminium zijn geordend in een regelmatige stapeling die het (kubisch vlakken gecentreerde) aluminiumrooster wordt genoemd. Als legeringselementen aan aluminium worden toegevoegd, dan nemen die een plaats in tussen de aluminiumatomen. Men zegt dan dat de legeringselementen opgelost zijn in het aluminiumrooster. Naarmate de temperatuur lager is, neemt de oplosbaarheid af van legeringselementen zoals magnesium, silicium, koper en zink. In bijvoorbeeld een legering met magnesium en silicium worden bij langzame afkoeling vanaf de stoltemperatuur uitscheidingen van de verbinding  $Mg_2Si$  gevormd. Deze uitscheidingen, of precipitaten, verhogen de sterkte van het aluminiumrooster.

Of de legeringselementen bij een gegeven hoeveelheid en temperatuur opgelost zijn of uitgescheiden, kan worden afgelezen uit het fasediagram van de betreffende legering. Om een voorbeeld te geven: Als een legering bij kamertemperatuur 1 gewichtsprocent  $Mg_2Si$  bevat, dan is uit het fasediagram in figuur B-4 af te lezen dat bij een langzame afkoeling vanuit de smelt bij circa 650 °C de eerste stollingsverschijnselen optreden en dat de legering bij circa 620 °C geheel gestold is.

Magnesium en silicium zijn bij deze temperatuur in het aluminiumrooster opgelost. Bij verdere afkoeling vindt bij circa 500 °C de uitscheiding van  $Mg_2Si$  plaats.

Als snel wordt afgekoeld tot kamertemperatuur in plaats van langzaam, dan vind geen uitscheiding plaats, maar blijven Si en Mg in oplossing. In de loop van de tijd kan een deel daarvan alsnog uitscheiden. In dat geval is sprake van *natuurlijke veroudering*. Ook kan uitscheiding alsnog plaatsvinden als het aluminium een gloeibehandeling ondergaat. In dat geval spreekt men van precipitatieharding. Als de gloeibehandeling plaatsvindt bij de lakuit-hardening van carrosseriedelen, wordt ook wel van *bakehardening* gesproken in plaats van precipitatieharding.



figuur B-4 Fasediagram behorende bij de 6xxx serie

Als de gloeibehandeling te lang wordt voortgezet, kan na de sterkte-toename weer een sterktevermindering plaatsvinden. In dat geval spreekt men van oververoudering.

Precipitatieharding wordt veel toegepast om de sterkte van dunne plaat te verhogen.

#### Oplosharding

Elementen die zijn opgelost in het aluminiumrooster, verhogen de sterkte van het aluminium. Voorbeelden daarvan zijn mangaan en magnesium in respectievelijk de 3xxx en de 5xxx serie.

#### Korrelverfijning

De oriëntatie van het metaalrooster is niet overal hetzelfde. De microstructuur ziet er daardoor onder een lichtmicroscop uit als korrels. Naarmate deze korrels kleiner zijn, is de combinatie van sterkte en vervormbaarheid in het algemeen beter. De korrelgrootte kan bij de productie van aluminiumband worden beïnvloed door de keuze van de gloei- en walsschema's.



## Auteurs

Dit Tech-Info-blad is samengesteld door P.D. Marchal (Corus RD&T) op basis van informatie die beschikbaar is gesteld door het Aluminium Centrum, MCB en Corus. De samensteller werd ondersteund door een klankbordgroep bestaande uit: P. Boers (FME-CWM), A. Gales (TNO Industrie), J. van de Put (Syntens), H.L.M. Raaijmakers (Federatie Dunne Plaat), G. Vaessen (NIMR), R. van de Velde (Aluminium Centrum) en G. van Wijngaarden (MCB Nederland BV).

## Technische informatie

Voor technisch inhoudelijke informatie over de in deze voorlichtingspublicatie behandelde onderwerpen kunt u zich richten tot het Aluminium Centrum, MCB of Corus RD&T.

De adressen zijn:

### Aluminium Centrum

Voorveste 2  
Postbus 107  
3990 DC Houten  
tel.: 030 - 638 55 66  
Internet: [www.aluminiumcentrum.nl](http://www.aluminiumcentrum.nl)

### MCB Nederland B.V.

Postbus 2  
5550 AA Valkenswaard  
tel.: 040 - 208 86 91  
Internet: [www.MCB.nl](http://www.MCB.nl)

### Corus RD&T

Postbus 10.000  
1970 CA IJmuiden  
tel.: 0251 - 49 40 73  
Internet: [www.corusresearch.com](http://www.corusresearch.com)

## Informatie over, en bestelling van VM-publicaties

### Vereniging FME-CWM / Industrieel Technologie Centrum (ITC)

Bezoekadres: Boerhaavelaan 40,  
2713 HX ZOETERMEER  
Correspondentie-adres: Postbus 190,  
2700 AD ZOETERMEER  
Telefoon: (079) 353 11 00/353 13 41  
Fax: (079) 353 13 65  
E-mail: [pbo@fme.nl](mailto:pbo@fme.nl)  
Internet: <http://www.fme-cwm.nl>

### Nederlands Instituut voor Lastechniek (NIL)

Adres: Krimkade 20,  
2251 KA VOORSCHOTEN  
Telefoon: (071) 560 10 70  
Fax: (071) 561 14 26  
E-mail: [info@nil.nl](mailto:info@nil.nl)  
Internet: <http://www.nil.nl>

© Vereniging FME-CWM/juni 2004

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke ander wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever. Hoewel grote zorg is besteed aan de waarborging van een correcte en, waar nodig, volledige uiteenzetting van relevante informatie, wijzen de bij de totstandkoming van de onderhavige publicatie betrokkenen alle aansprakelijkheid voor schade als gevolg van onjuistheden en/of onvolkomenheden in deze publicatie van de hand.

Vereniging FME-CWM  
afdeling Technische Bedrijfskunde  
Postbus 190, 2700 AD Zoetermeer  
telefoon 079 - 353 11 00  
telefax 079 - 353 13 65  
e-mail: [pbo@fme.nl](mailto:pbo@fme.nl)  
internet: <http://www.fme-cwm.nl>

