

Aluminium,

De eisen die aan precisie-instrumenten worden gesteld nemen steeds maar toe. Ook het aanbod aan constructiematerialen blijft groeien; denk aan kunststoffen of keramische materialen. Deze materialen bieden nieuwe mogelijkheden qua ontwerp en realisatie. Toch zien we dat aluminium voortdurend wordt gekozen als het meest geschikte materiaal voor nieuwe instrumenten. Kennelijk heeft aluminium dermate sterke papieren dat het nog van geen wijken weet. Op het hoe en waarom gaat dit artikel in. Tevens zal een blik in de toekomst worden geworpen, met de vraag of het ook zo zal blijven.

• **Jan Nijenhuis** •

Sinds jaar en dag worden optische instrumenten gemaakt van aluminium. Waarom dat zo is, zal worden uitgelegd aan de hand van de volgende criteria:

- Schaalbaarheid van constructies
- Thermische geleiding
- Eenvoud van ontwerp
- Vacuümtoeepassingen
- Oppervlaktebehandelingen/corrosie
- Stabiliteit
- Kosten
- Sterkte/stijfheid
- Gewicht

Alvorens deze criteria te behandelen, moet worden gezegd dat een instrument meestal aan alle criteria moet voldoen. Deze criteria zijn erg verschillend, hetgeen een geschikt compromis bemoeilijkt, ware het niet dat we aluminium hebben. Zie Tabel 1 voor een kwantitatieve vergelijking van materialen.

Schaalbaarheid van constructies

Schaalbaarheid is één van de belangrijkste redenen waarom optische instrumenten van aluminium worden gemaakt. Wat is namelijk het geval. Instrumenten worden nooit alleen bij

kamertemperatuur gebruikt. En zeker bij precisie-instrumenten kunnen temperatuurschommelingen van minder dan 1°C al funest zijn. Dit uit zich in minder scherpe beelden c.q. opnamen dan mogelijk is. Door alle optische componenten van aluminium te maken (het gaat dan natuurlijk om spiegels) net als de mechanische structuur waarin alles wordt opgehangen, kan dit zeer effectief worden bestreden. Bij temperatuurschommelingen schaaft dan alles mee. Dit is bij TNO al vele malen succesvol toegepast in tal van ruimtevaartprojecten. Er zijn andere materialen waarmee hetzelfde trucje kan worden uitgehaald, zoals beryllium en siliciumcarbide (SiC) of zelfs zerodur. De inspanningen en kosten die dat met zich meebrengt, zijn echter veelal enorm vergeleken met die voor aluminium. Beryllium brengt bovendien bij verkeerd gebruik een reëel gevaar voor de gezondheid met zich mee.

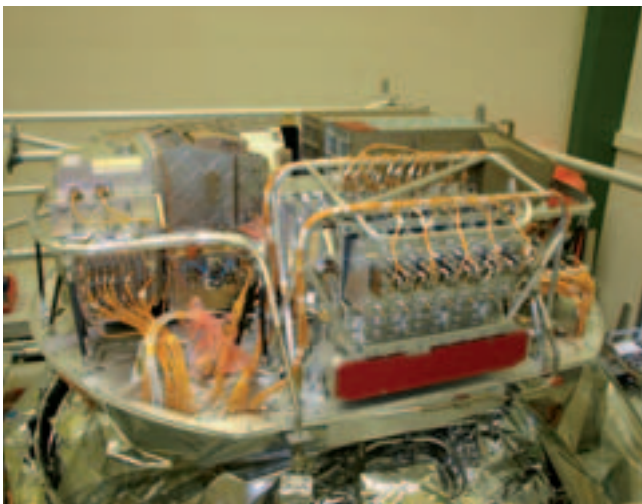
Thermische geleiding

Schommelingen in temperatuur kunnen ook thermische gradiënten veroorzaken in een instrument. Dat kan eveneens tot sterk verminderde prestaties leiden. Een effectieve manier om dat tegen te gaan, is toepassing van materialen met een hoge warmtegeleiding. Ook daar scoort aluminium erg goed. Van de metalen is aluminium bijna de beste. Koper of zilver

de kampioen van het compromis

Tabel 1. Vergelijking van materiaaleigenschappen.

| Materiaal | Elasticiteitsmodulus E (GPa) | Dichtheid ρ (kg/m ³) | E/ρ (10 ⁷ m ² /s ²) | Lineaire uitzettingscoëfficiënt α bij 20°C (µm/mK) | Warmtegeleidingscoëfficiënt λ (W/mK) | Treksterkte σ_{br} (MPa) | Rekgrens $\sigma_{0,2}$ (MPa) | Micro-rekgrens $\sigma_{0,2}$ (MPa) |
|------------------|--------------------------------|---------------------------------------|--|---|--|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| Aluminium 6061T6 | 68,9 | 2.700 | 2,55 | 23,6 | 167 | 310 | 276 | 127 |
| Ti6Al4V | 114 | 4.430 | 2,57 | 8,6 | 6,7 | 1170 | 1100 | 524 |
| Invar 36 | 141 | 8.050 | 1,75 | 1,3 | 10,2 | 448 | 276 | 21 |
| Sintered SiC | 420 | 3.100 | 13,4 | 2,3 | 180 | 375 (druk 3.000) | 375 | 375 (!) |
| Beryllium | 303 | 1.844 | 16,4 | 11,5 | 216 | 370 | 240 | 12 - 100 |
| RVS (AISI304) | 193 | 8.000 | 2,41 | 17,3 | 16,2 | 505 | 215 | 50 |



Afbeelding 1. Inwendige van de ruimtetelescoop Herschel van de Europese ruimtevaartorganisatie ESA, met drie astronomische instrumenten. Alle drie zijn ze in aluminium uitgevoerd en worden ze tot ver in het cryogene temperatuurbereik afgekoeld. Op de voorgrond HIFI (Heterodyne Instrument for the Far Infrared), die infraroodstraling uit het heelal meet om watermoleculen te kunnen detecteren in interstellaire gaswolken en bij kometen en planeten. Met de informatie van verre kosmische gaswolken kunnen wetenschappers de allereerste stervorming in het heelal bestuderen. Voor het Nederlands expertise-instituut voor ruimteonderzoek SRON heeft TNO het opto-mechanische ontwerp voor HIFI gemaakt.

kunnen beter zijn (mits de goede legering wordt gekozen), maar deze materialen zijn als constructiemateriaal minder geschikt: niet sterk genoeg, te zwaar of te duur, enzovoort. SiC scoort in dat opzicht beter. Het heeft een vergelijkbare warmtegeleiding, is relatief licht en heeft een behoorlijke sterkte.

Eenvoud van ontwerp

Aluminium wordt al sinds jaar en dag voor instrumenten gebruikt. Er is dus erg veel ervaring voorhanden. Dat geeft een voorsprong in de markt. Er is een enorm arsenaal aan machines en technieken beschikbaar om onderdelen te vervaardigen. Dat biedt een enorme keuzevrijheid in het ontwerpproces. Bij nieuwe materialen als kunststoffen en SiC ligt dat heel anders. Daar moet men nog aan wennen. Lang niet alle eigenschappen zijn algemeen bekend en dat kan gemakkelijk tot verrassingen leiden. Net als bij nieuwe consumentenproducten geldt ook hier dat nieuwe materialen op specifieke punten aanzienlijk beter moeten scoren om in aanmerking te komen als vervangend materiaal.

Vacuümtoepassingen

Instrumenten die in vacuüm worden gebruikt, moeten van daarvoor geschikte materialen zijn gemaakt. Voor materialen als RVS, titanium en aluminium is dat het geval, maar kunststoffen kunnen veelal niet worden toegepast omdat die materialen te veel uitgassen. Bij optische instrumenten worden dan bijvoorbeeld de optische componenten vervuild, waardoor ze minder goed gaan werken. Ook keramische materialen kunnen goed geschikt zijn om in vacuüm toe te passen

mits ze maar niet poreus zijn. Van de metalen is aluminium niet de beste oplossing maar komt daar wel dichtbij. RVS (AISI-316L) is voor hoogvacuümtoepassingen één van de beste oplossingen.

Oppervlaktebehandelingen/corrosie

Alle instrumenten staan in meer of mindere mate aan corrosie bloot. Aluminium is van huis uit een tamelijk onedel metaal en corrodeert dus snel. De geoxideerde huid vormt echter een mooie beschermende laag op het oppervlak. Dit kan voldoende zijn, maar in agressievere milieus – zeker als er chloor in het spel is – kan een veel betere bescherm laag worden verkregen door het oppervlak te anodiseren. Daarbij wordt een dikke en tevens harde aluminiumoxidehuid aangebracht die erg slijtvast is. Ook bescherm lagen als conversiecoatings of verven zijn natuurlijk mogelijk, of vele andere materialen. Wat dat betreft zijn er op dit criterium veel alternatieven voor aluminium voorhanden. Sommigen, zoals roestvaststaal of titanium, kunnen daarbij veel beter zijn. Kunststoffen en keramische materialen kennen ook geen corrosieproblemen.

Stabiliteit

Optische instrumenten moeten vaak een hoge mate van stabiliteit bezitten. Bij metalen moet dat veelal via warmtebehandelingen worden verkregen. Dat geldt zeker voor aluminium. Veelal wordt de legering 6061 T6 of 6082 T6 gebruikt. Wil men een zo spanningsarm mogelijke versie, dan is de T651 behandeling beter omdat daarbij het materiaal net iets over de vloeigrens wordt getrokken. De T652 behandeling specificeert dan ook nog dat de uitzettingscoëfficiënt in alle drie hoofdrichtingen binnen nauwe grenzen gelijk moet zijn. Met genoemde legeringen is veel ervaring opgedaan. Vaak worden hier spiegels van gemaakt. Gezien de hoge eisen aan vormvastheid (in het nanometergebied) zegt dit veel over de stabiliteit van deze legeringen. Keramische materialen scoren op het gebied van stabiliteit nog beter. Dat heeft uiteraard veel te maken met het feit dat keramiek geen plastisch gedrag kent.

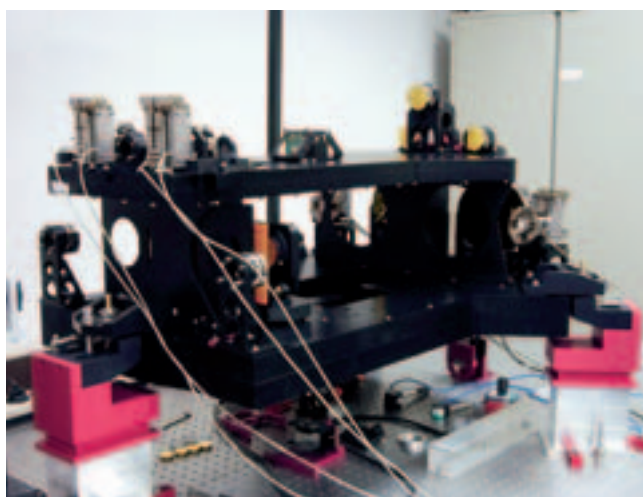
Een maat om stabiliteit van materialen mee te classificeren is de micro-rekgrens. Bij de rekgrens mag 0,2% blijvende rek resulteren. Bij de micro-rekgrens is dat 0,0001%. In Tabel 1 is van een aantal materialen de micro-rekgrens gegeven. Aluminium springt daar vrij gunstig uit.

Kosten

Instrumenten zoals TNO industrie en Techniek die ontwikkelt, worden veelal gekenmerkt door een hoge mate van voor realisatie benodigde kennis. Dat betekent dat de kosten van een instrument vooral in de lonen van de betrokken medewerkers gaan zitten. Materiaalkosten zijn dan totaal van ondergeschikt belang. Dat neemt niet weg dat er ook instrumenten zijn waar dit anders ligt, zeker als deze in serie moeten worden vervaardigd. Aluminium is dan meestal toch goedkoper dan andere materialen. Daar komt nog bij dat de verspaanbaarheid van aluminium erg goed is. Hoge snijsnelheden in combinatie met een grote aanzet zijn mogelijk. Dat brengt lagere productiekosten met zich mee en dat is voor serieproducten belangrijk.

Sterkte/stijfheid

De sterkte van het constructiemateriaal is bij een optisch instrument doorgaans van ondergeschikt belang. Slechts in specifieke gevallen speelt dit een rol; denk aan verbindingsmiddelen en dergelijke. Stijfheid is echter wel erg belangrijk, omdat die bepalend is voor het dynamische gedrag van de constructie. Dat betekent dat ook moet worden gekeken naar de soortelijke massa van het materiaal. Meer in het bijzonder gaat het dan over de specifieke stijfheid van het materiaal.



Afbeelding 2. Voor de nieuwe Unit Telescopes van ESO (European Southern Observatory) in Chili ontwikkelde TNO de Star Separator, die signalen van zwakke sterren kan corrigeren voor verstoringen door de dampkring. Inmiddels zijn er drie afgeleverd aan ESO, helemaal in aluminium uitgevoerd.

Dan blijkt dat veel materialen hiervoor een vrijwel gelijke waarde hebben, zoals aluminium, titanium en staal (zie Tabel 1). Materialen als beryllium en SiC scoren veel hoger en zijn dus superieur. Beryllium is echter door zijn giftigheid (inademen van berylliumstof), lage sterkte en hoge kostprijs niet erg populair. Kunststoffen kunnen hier beter scoren dan aluminium, maar niet in alle richtingen. Want meestal betreft het laminaten, waarvan de stijfheid afhankelijk is van de richting waarin het wordt belast. Die eigenschap kan worden uitgebuit voor specifieke toepassingen, maar als sprake is van de noodzaak om uniform goed te presteren dan is aluminium een sterke kandidaat.

Naast pure sterkte speelt ook het breukgedrag een belangrijke rol bij de vraag welk materiaal het best geschikt is voor een specifieke toepassing. Metalen vertonen plastisch gedrag. Veelal is dit een zeer gewenste eigenschap. Lokale overbelasting leidt zo niet tot breuk maar tot een kleine lokale plastische vervorming. Die is wellicht minder gewenst voor de prestaties van het instrument, maar het is wel enorm veilig. SiC, keramiek in het algemeen en zerodur zijn erg bros. Overbelasting leidt daar dan ook zonder waarschuwing tot breuk. Nu kan een instrument natuurlijk heel zorgvuldig worden ontworpen wat betreft de optredende spanningen, maar je wapenen tegen een ongelukje is erg moeilijk. Vooral omdat je nooit goed weet uit welke hoek het gevaar komt. Je laat iets onbenulligs vallen en voor je het weet is keramiek kapot. Bovendien belemmeren beschermende maatregelen de uitvoering van het werk en kost het veel geld.



Afbeelding 3. Werk aan precisie-instrumenten vraagt aandacht en concentratie. TNO-medewerkers (rechts de auteur) werken aan de Star Separator voor ESO.

Toekomst

Uit dit alles komt men wellicht tot de conclusie dat de auteur alleen maar met aluminium wil werken. Niets is echter minder waar. Nieuwe materialen bieden nieuwe mogelijkheden en die moeten zeker goed worden onderzocht. Een onderzoeker kan het zich niet permitteren daar zomaar aan voorbij te gaan. De ervaring leert echter dat het moeilijk is een materiaal te vinden dat zo goed scoort over de hele linie. Vooral specifieke toepassingen bieden kansen voor de alternatieven en die worden dan ook grif benut. Voor verbindingen worden doorgaans RVS- of titaniumbouten toegepast. Transmissie-optiek moet transparant zijn en dan is 'glas' het aangewezen materiaal.

De vraag dringt zich op of de 'dominantie' van aluminium zal afnemen in de toekomst. Voorzover het mogelijk is die vraag te beantwoorden, lijkt dat langzamerhand in zekere mate te gaan gebeuren. In het bijzonder siliciumcarbide kan op termijn een geduchte concurrent worden. Op de meeste criteria scoort het gelijk of beter dan aluminium, behalve op twee belangrijke aspecten, namelijk prijs en kwetsbaarheid. Het eerste punt zal naar verwachting in de loop der tijd minder belangrijk worden, naarmate het materiaal meer wordt toegepast. Vermindering van de kwetsbaarheid vergt maatregelen die weer kostenverhogend kunnen zijn. Dat betekent dat als de nood maar hoog genoeg is (en de prijs dus minder van belang is), SiC superieur is en meer en meer zal worden toegepast. Dat neemt echter niet weg dat naar verwachting het merendeel van de optische instrumenten nog vele jaren zal worden gemaakt van aluminium.

Auteursnoot

TNO Industrie en Techniek houdt zich onder meer bezig met de ontwikkeling van precisie-instrumenten voor de ruimtevaart, de lithografische industrie, de astronomie, enzovoort. Jan Nijenhuis is er als systems engineer verantwoordelijk (geweest) voor de technische ontwikkeling van een hele serie optische instrumenten.

Informatie

www.tno.nl