

Vormgeheugenmetaal verdient meer aandacht

Hoewel er de laatste jaren regelmatig aandacht is geschonken aan het fenomeen vormgeheugenmetaal heeft deze bijzondere metaalsoort nog maar nauwelijks 'gescoord' ten behoeve van industriële toepassingen. De reden zal ongetwijfeld een combinatie zijn van onwetendheid, onbekendheid en het geheimzinnige dat zich rond dit metaal afspeelt. Toch is dat op zich te betreuren omdat juist metalen met een vormgeheugen tot fantastische applicaties kunnen leiden.

N.W. Buijs

De auteur is werkzaam bij

Van Leeuwen Stainless Steel te Beesd

De meeste publicaties die tot nu toe zijn verschenen over dit opmerkelijke fenomeen zijn in het algemeen vrij wetenschappelijk opgesteld en daarom moeilijk te begrijpen voor het 'brede publiek'. Dit leidt ertoe dat men gauw geneigd is een dergelijk artikel te laten liggen waardoor men wellicht ongekende mogelijkheden onbenut laat. Dit artikel beoogt daarom ook geen wetenschappelijke verhandeling te zijn doch het is inderdaad bedoeld om zonder al te veel diepgang een inzicht te geven wat vormgeheugenmetaal nu precies is. Voorts wordt ingegaan op mogelijke toepassingen en wordt de lezer geprikkeld om ook op zoek te gaan naar nieuwe toepassingen. Een veel gemaakte vergissing is dat men met vormgeheugenmetaal denkt aan een alternatief werkend bi-metaal, doch dat is absoluut niet het geval. Bi-metalen veranderen van vorm bij de gratie van de verschillen in lineaire uitzetting waardoor er een monotone vervorming zal ontstaan indien de temperatuur verandert. Elementen gemaakt van bi-metaal hebben ook een enorme beperking omdat deze bijna alleen maar buigfuncties kunnen vervullen.

Definitie

Vormgeheugenmetaal is een metaal dat na een beperkte deformatie bij een relatief lichte temperatuurverhoging weer geheel terugkomt in zijn oude vorm onder afgifte van arbeid. Een en ander heeft te maken met een structuuromslag in het metaal. Meestal geschiedt het deformeren van vormgeheugenmetaal bij kamertemperatuur en het verwarmen bij circa 60°C. Bij deze laatstgenoemde temperatuur heeft het materiaal een structuurverandering gekregen. Stel dat men een recht draadje heeft dat men bij

kamertemperatuur verfrommelt, dan zal het zich weer geheel strekken tot zijn rechte oorspronkelijke vorm bij circa 60°C onder afgifte van enige arbeid. Deze arbeid kan men gebruiken om iets te activeren. Wel zal de deformatie beperkt moeten blijven tot maximaal 8% en dat betekent dat men dit draadje niet mag knikken.

Er zijn verschillende legeringen die deze eigenschap bezitten doch de titaan/nikkellegeringen komen in de praktijk het meeste voor. In feite zijn er drie hoofdgroepen vormgeheugenmetaal, te weten:

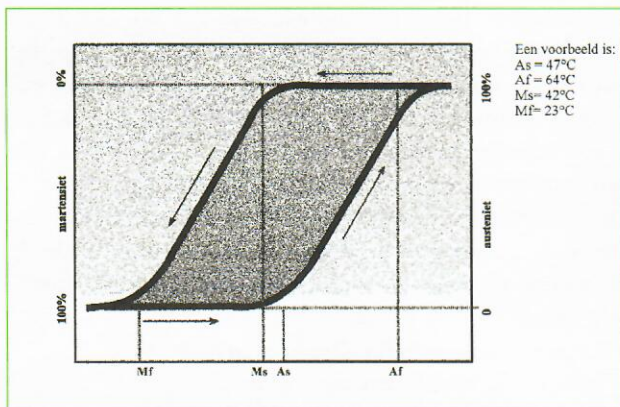
- koper/aluminium/nikkellegeringen
- koper/zink/aluminiumlegeringen
- titaan/nikkellegeringen

Mede door de zeer goede vormgeheugenkarakteristieken en de zeer hoge corrosiebestendigheid gecombineerd met uitstekende mechanische eigenschappen zijn de titaan/nikkellegeringen veruit superieur. De titaan/nikkellegeringen met een vormgeheugeneffect worden ook wel 'nitinol' genoemd. Het vormgeheugeneffect van titaan/nikkel is een gevolg van een spanningsgeïnduceerde martensitische structuurverandering die omkeerbaar is. Deze transformatie geschiedt in een temperatuurgebied dat zeer sterk afhankelijk is van de chemische samenstelling van de legering. Het meest kiest men een titaan/nikkellegering die zowel 50% nikkel als 50% titaan heeft. Naast binaire systemen (dus twee elementen) kent men ook ternaire en nog meer complexere structuren die door toevoegingen van een of meerdere legeringselementen tot stand komen. Deze elementen zullen zeer sterk de transformatietemperaturen beïnvloeden waardoor men een legering 'op maat' kan maken. Zo is het mogelijk met een weinig goud of zirkoon de transformatietemperatuur 50°C te verhogen en met een weinig kobalt, aluminium, mangaan en ijzer de overgangstemperatuur te verlagen. Het vormgeheugeneffect wordt enigszins aanschouwelijk gemaakt op afbeelding 1 en 2. Hoewel het niet de bedoeling is om diep te gaan graven in de metallurgische aspecten, moeten we toch even stilstaan bij het mechanisme.

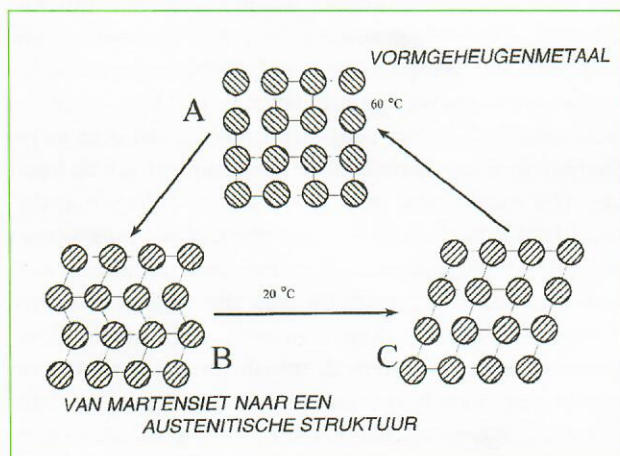
Empirisch is gebleken dat het metaal kan beschikken over het eenweg of het tweewegeffect. Bij het eenwegeffect moet het materiaal voor elke transformatie opnieuw worden vervormd en bij het tweeweg heeft men de situatie dat het materiaal niet alleen bij het opwarmen doch ook bij het afkoelen zijn vorm herinnert. We spreken in dit laatste geval ook wel van een getraind materiaal. Ook hoort men steeds meer de benaming van een intelligent materiaal.

Op afbeelding 1 ziet men hoe de kringloop zich afspeelt als functie van de temperatuur. Iedere keer als men het materiaal door het temperatuurtraject laat gaan van 20 - 65°C zal de getekende curve doorlopen worden. Bij deze tem-

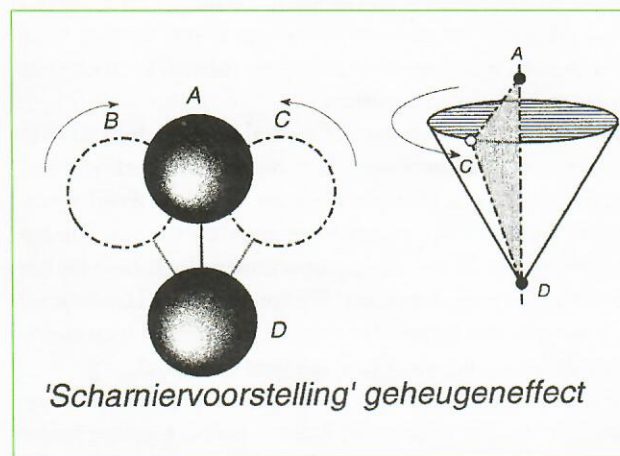
Vormgeheugenmetaal verdient meer aandacht



Afbeelding 1 Invloed van de temperatuur op de transformatie van martensiet naar austeniet en vice versa in titaan/nikkel vormgeheugenmetaal



Afbeelding 2



Afbeelding 3

peratuurcyclus verwarmen/afkoelen is de thermodynamische weg van een vormgeheugenelement gemarkeerd door de temperaturen A_s en A_f . A_s en A_f zijn de start- en finish-temperaturen van de austenietvorming. Het begin en het einde van de martensietvorming noemt men respectievelijk M_s en M_f . De hysteresis die daarbij ontstaat met de breedte $dT = M_s - M_f$ blijft constant en is in de praktijk meestal 40°C . Met andere woorden als de transformatietemperatuur bijvoorbeeld $+20^\circ\text{C}$ is dan moet het materiaal vervormd worden bij -20°C . Dit is relevant te weten voor constructeurs die te maken hebben met bijvoorbeeld (diep)gekoelde systemen. Op afbeelding 1 zijn deze temperaturen dus 23 en 64°C .

De werking van het geheugeneffect

Vormgeheugenlegeringen kunnen dus in vaste toestand een fase-transformatie ondergaan als er een beperkt temperatuurgebied wordt doorlopen van meestal 40°C waardoor ze spontaan van vorm kunnen veranderen. Titaan/nikkellegeringen vertonen een zogenaamde kristallografische en reversibele thermo-elastische martensitische transformatie die diffusieloos verloopt. Op afbeelding 2 wordt dit proces op een populaire wijze atomaire aanschouwelijk gemaakt. De bolletjes in deze afbeelding stellen atomen voor. Een product heeft een bepaalde vorm gekregen door het in de gewenste vorm een warmtebehandeling te geven bij 500°C . Dit product zal tijdens die warmtebehandeling qua vorm gefixeerd moeten worden. Na een relatief korte tijd neemt het de gewenste vorm aan waardoor we spreken over een geprogrammeerd materiaal. Het is aan te raden deze warmtebehandeling inert te laten plaatsvinden. Indien dat niet kan, dan moet men het product na de warmtebehandeling beitsen. Bij positie 'A' heeft het product zijn ooit geprogrammeerde vorm en bezit het de austenietstructuur. Bij de positie 'B' is het materiaal normaal gesproken op kamertemperatuur en dan is de structuur martensitisch (ook wel monoclien genoemd). Deze monocliene structuur is zeer gemakkelijk te deformeren. Na een deformatie van maximaal 8% heeft men een situatie gekregen zoals bij 'C' is aangegeven. De atomen zijn in de positie 'C' weliswaar ten opzichte van elkaar verschoven, doch de onderlinge verbinding is gebleven omdat de deformatie niet te groot is geweest. Na een temperatuurverhoging tot 60°C slaat de structuur om van martensiet naar austeniet (kubisch ruimtelijk gecentreerd) waardoor de atomen weer hun oorspronkelijke positie zullen innemen. In feite wordt dan de deformatie opgeheven waardoor men eigenlijk niet van een reële deformatie kan spreken. Het is weliswaar een

Vormgeheugenmetaal verdient meer aandacht

Fysische eigenschappen van titaan/nikkel	
soortelijk gewicht	6,45 g/cm ³
specifieke warmte	0,45 J/g°C
specifieke transformatiewarmte	24,20 J/gram
thermische geleidbaarheid	80,10-6 Ωcm
magnetische permeabiliteit	<1,002
smeltpunt	1.250 - 1310°C
Mechanische eigenschappen van titaan/nikkel	
rekgrens 0,2%	180 N/mm ²
trekvastheid	850 N/mm ²
breukrek	45 %
insnoering	30 %
elasticiteitsmodulus	7.10 ⁴ N/mm ²
Transformatie-eigenschappen	
transformatietemperatuur As	-100 tot +100°C (afhankelijk van de samenstelling)
temperatuurhysterese	30 - 40°C
maximale vormherstelspanning	600 - 800 N/mm ²
specifieke arbeid	200 - 300 N/mm ²
herstelbare rek:	
N<10 ²	6 - 8%
N=10 ⁶	2%
N=10 ⁷	0,5%
maximale gebruikstemperatuur	Af + 50°C
Diversen	
corrosiebestendigheid	uiterst goed
bewerkbaarheid	matig
lasbaarheid	slecht
damping	zeer hoog in het gebied van de transformatietemperatuur
slijtbestendigheid	goed

Tabel 1 Algemene eigenschappen van titaan/nikkel vormgeheugenmetaal.

het om een simpel procédé gaat. Dit blijkt in de praktijk echter niet het geval omdat de problematiek rond het smelten, legeren en de nodige warmtebehandelingen heel wat expertise en ervaring vereist.

Na het smelten en op 'maat' maken van de legering in een vacuüm vlamlichtboogoven ontstaat er een gieteling die als knuppel verder wordt uitgesmeed. Daarna worden er allerlei producten van gewalst die zo hun uiteindelijke vorm krijgen. Deze producten krijgen een speciale warmtebehandeling voordat deze de fabriek mogen verlaten.

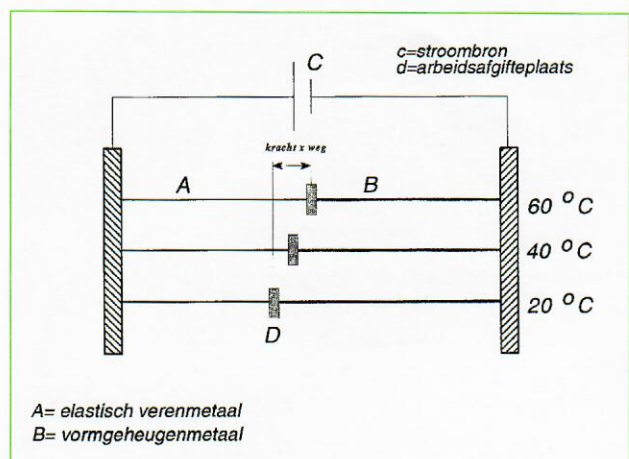
Om het geheel wat concreter te maken gaan we ervan uit dat er een veer van geheugenmetaal gemaakt moet worden. Men gaat dan als volgt te werk: een gewalste rechte draad wordt op een doorn met een bepaalde spoed gewonden en

gefixeerd. Afhankelijk van de draaddikte wordt het geheel gedurende enige tijd in een (vacuüm)oven gebracht. De oventemperatuur is ongeveer 500°C. De draad zal na deze warmtebehandeling de veervorm als definitieve vorm aannemen. Trekt men de veer uit elkaar bij kamertemperatuur tot bijvoorbeeld een grillige vorm, dan zal de veervorm weer geheel terugkomen bij ± 60°C onder afgifte van enige arbeid. Men kan overigens met een nieuwe warmtebehandeling weer een andere gewenste vorm aan de veer geven. Het geheugeneffect kan enigszins achteruitgaan door het mechanisch over te belasten, indien men het een te grote vervorming geeft of het aan te hoge temperaturen blootstelt.

De mate van het terugkomen in de oude vorm is afhankelijk van de temperatuur van het geheugenmetaal. Indien de temperatuurhysterese ligt tussen 20 en 60°C dan zal het geheugeneffect slechts ongeveer voor de helft benut kunnen worden bij een temperatuur van 40°C. Men kan dus met behulp van de temperatuur een systeem dat geactiveerd wordt met geheugenmetaal regelen.

Warmtebronnen

In principe kan men alle warmtebronnen gebruiken om het materiaal te verwarmen teneinde het geheugeneffect te verkrijgen, mits de temperatuur enigszins beheersbaar blijft. We kunnen hierbij denken aan weerstandsverwarming, een uitwendig verwarmingselement, warme vloeistoffen en gassen, een contact-sonde en stralingswarmte. Vooral de weerstandsverwarming is aan te raden en dat vooral bij dunne draden omdat het geheugeneffect dan zo goed beheersbaar is. Naarmate de stroomdichtheid toeneemt,



Afbeelding 5

Vormgeheugenmetaal verdient meer aandacht

vormverandering zonder dat de atomen onderling van positie veranderen. Men kan zich dit het beste voorstellen door ieder atoom van een kogelscharnier te voorzien. In koude toestand kunnen de atomen beperkt alle kanten ten opzichte van elkaar bewegen doch in de austenietstructuur wordt dit scharnier vergrendeld in de verticale positie waardoor het materiaal wel drie keer zo stijf wordt als bij de martensitische structuur. Deze vergrendeling houdt dus ook in dat het materiaal weer in zijn oorspronkelijk geprogrammeerde vorm is gekomen. Op afbeelding 3 kan men zich dit mechanisme schematisch voorstellen. In deze afbeelding zijn atoom A en D boven elkaar gesitueerd zoals dat in de warme (austenitische) conditie het geval is. Indien het metaal koud (martensitisch) is dan kan het atoom A de plaatsen B of C innemen. Uiteraard kan atoom A dan ook een cirkel- c.q. kegelvorm beschrijven zoals symbolisch met het kogelscharnier is bedoeld. Wordt het metaal door verwarming weer austenitisch, dan zal atoom A zijn oude positie weer innemen verticaal boven atoom D. Het maakt dus niet uit vanuit welke plaats van de cirkel atoom A weer terugkomt op zijn oude plaats. Dit is een vereenvoudigde wijze om het geheugenefect enigszins te begrijpen. Bij het omslaan van martensiet naar austeniet komt er energie vrij die aangewend kan worden als arbeid. Vormgeheugenmetaal met een austenitische structuur is stijf en zeer elastisch waardoor het als verenmateriaal goede karakteristieken heeft. Men spreekt ook wel van een superelastisch materiaal dat op zich interessante applicaties kent zoals bijvoorbeeld brillmonturen (zie foto 1). Bij brillmonturen ligt het omslagpunt naar martensiet overigens beneden de 0°C.

In de martensitische conditie maakt geheugenmetaal een weke en zachte indruk waardoor het als veermateriaal

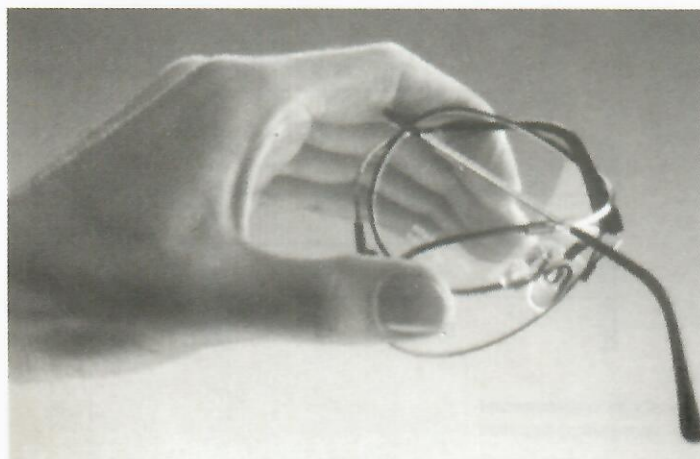
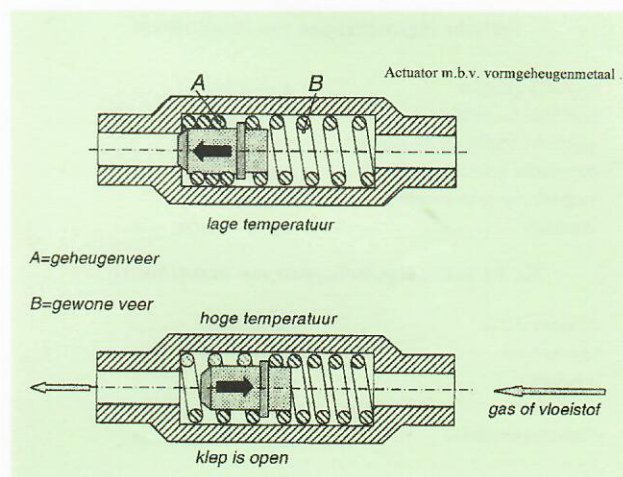


Foto 1



Afbeelding 4

geen enkele rol speelt. Dat maakt de samenwerking tussen een gewone stalen veer en een geheugenveer zo interessant omdat bij kamertemperatuur de gewone veer het sterkst is en bij verhoogde temperatuur van 60°C de geheugenveer qua kracht domineert. Op deze wijze kan men een actuator maken die door geringe temperatuurverschillen een heen-en-weergaande beweging maakt onder afgifte van arbeid (zie afbeelding 4). In afhankelijkheid van de temperatuur van het medium zal de actuator wel of niet open staan. Ook in de brandpreventie en -bestrijding kan men gebruik maken van dit fenomeen. Een voorbeeld is het openzetten van brandluiken die tijdens een brand hitte moeten afvoeren om zoveel mogelijk te voorkomen dat de staalconstructies inzakken. Ook zou men met dit materiaal een geheel nieuwe sprinklerinstallatie kunnen ontwerpen.

Vaak heeft men in de praktijk nog onvoldoende vertrouwen in dit materiaal, doch dat is geheel onterecht omdat het altijd zal gehoorzamen aan temperatuurwisselingen. Indien men echter bijvoorbeeld tienduizenden keren het metaal zijn geheugenfunctie moet laten verrichten is het belangrijk dat men de deformatie niet geheel benut tot 8% doch het beperkt laat tot zo'n 3 - 6%. In tabel 1 ziet men enige eigenschappen van dit veelbelovende metaal.

Productie

Over de productie van vormgeheugenmetaal is veel te zeggen doch thans niet relevant genoeg om er uitgebreid bij stil te staan. In onderstaande opsomming kan men zich een idee vormen, hoewel hier de indruk wordt gewekt dat

Vormgeheugenmetaal verdient meer aandacht



Afbeelding 6 Lamprobot met kunstspieren van geheugenmetaal

wordt het materiaal warmer en zal het in afhankelijkheid van de temperatuur zijn werk doen. Zo ziet men op afbeelding 5 een schematische voorstelling van een geheugendraad die samenwerkt met een elastisch materiaal. Bij 20°C is het elastisch materiaal 'de baas' en zal het relatief weke geheugenmetaal uitrekken. Bij 40°C zijn de beide draden ongeveer even sterk en bij 60°C is het geheugenmetaal 'de baas' en zal het elastische materiaal geheel zijn uitgerekt. Indien men een contact of schakelaar aanbrengt op de overgang van de twee draden dan zal het duidelijk zijn dat er iets geactiveerd kan worden met behulp van de temperatuur.

Toepassingen

Omdat het geheugeneffect alle kanten uitwerkt, kan men er bijvoorbeeld trek-, druk-, torsie- of buigelementen van vervaardigen. Een goed voorbeeld is te zien op afbeelding 6 en 7. Op afbeelding 6 ziet men een robotlamp die ontwikkeld is voor het 'Huis van de Toekomst' in opdracht van futuroloog Chriet Titulaer. Deze lamp kan allerlei bewegingen maken door het samentrekken van allerlei geheugendraadjes in samenspel met gewone trekveren. Met andere woorden gewone motoren zijn vervangen door actuators van geheugenmetaal die als kunstspieren functioneren. Doordat er ook nog spraakherkenning aan toegevoegd is, kan men met verbale commando's de lamp naar wens laten bewegen. Zo is de eerste robot ontwikkeld die zonder conventionele motoren de menselijke stem gehoorzaamt. Het gaat dan ook niet om de lamp, doch veeleer om het principe om systemen met geheugenmetaal aan te sturen met de menselijke stem. Een en ander kan zeer

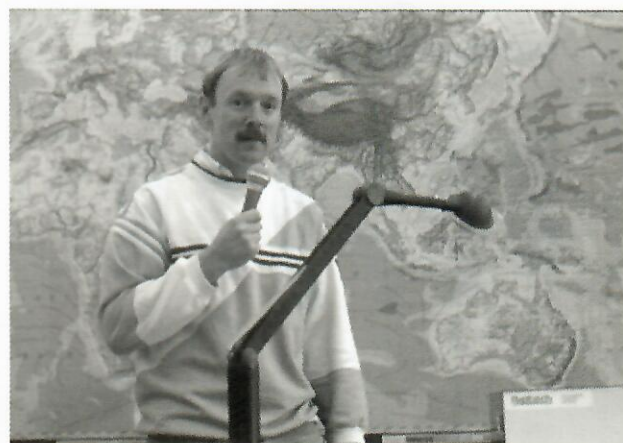


Foto 2

wenselijk zijn voor mensen met spierziekten en daarom heeft onder andere het Nationale Revalidatiefonds de Stichting Fondsenwervingsacties Volksgezondheid middelen beschikbaar gesteld om deze robotvorm te ontwikkelen (zie ook foto 2). In de toekomst wordt ook niet uitgesloten dat dergelijke trekdraadjes als kunstspier worden geïmplanteerd in het menselijk lichaam omdat geheugenmetaal zeer weefselvriendelijk is. Deze comptabiliteit heeft er reeds voor gezorgd dat er implantaten zijn ontwikkeld en worden toegepast.

Op foto 3 ziet men een robothand die kunstspieren heeft van geheugenmetaal. Deze hand is ontwikkeld door Hitachi in Japan.

Op afbeelding 7 ziet men een staaf van 10 mm doorsnede die voor de nodige trekkracht kan zorgen. Bij kamertemperatuur wordt de staaf met ongeveer 300 kg uitgerekt tot

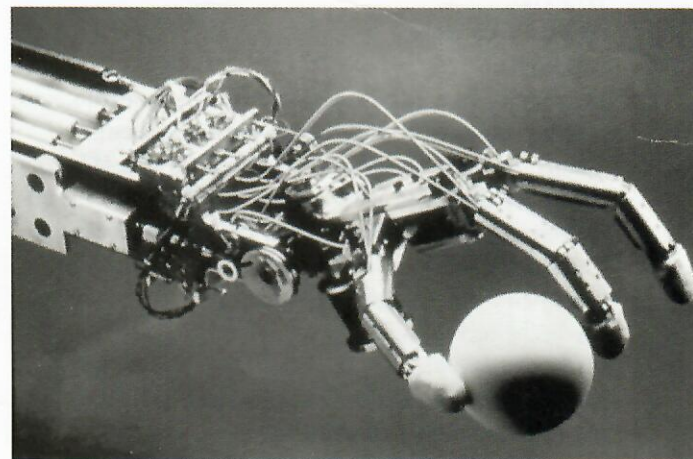
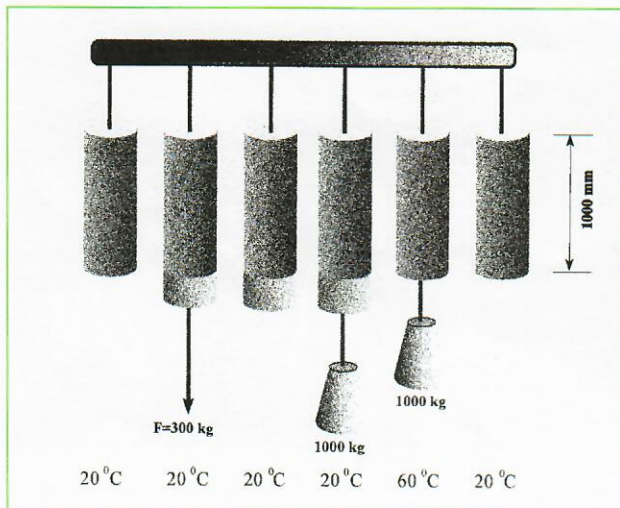


Foto 3

Vormgeheugenmetaal verdient meer aandacht



Afbeelding 7 Lineaire geheugenmetaalmotor.

een verlenging van circa 8%. De staaf blijft nu onveranderd verlengd bij kamertemperatuur. Bij het opwarmen tot 60°C zal de staaf weer terugkeren tot zijn oude lengte en kan gelijktijdig probleemloos een gewicht opheffen van 1000 kg. Het arbeidsvermogen is in dit geval 300 Nm. In feite kan men stellen dat deze arbeidsslag een dergelijke staaf maakt tot een lineaire motor. Dit kan men uiteraard ook stellen bij kunstspieren van geheugenmetaal. Het is nu aan de constructeurs om allerlei toepassingen te bedenken met dergelijke 'motoren'. Het zal duidelijk zijn dat deze 'motoren' uiterst compact zijn en absoluut geluidloos functioneren. In feite kan men geheugenmetaal de volgende functie laten verrichten:

- verbinden
- spannen
- vergrendelen
- schakelen en sturen
- aandrijven

Toepassingen die reeds op de markt verkrijgbaar zijn, kan men in de volgende hoofdgroepen onderverdelen:

- Elementen om branddeuren te sluiten (zie foto 4) bij een temperatuur boven 45°C vallen openstaande branddeuren automatisch dicht (bron Hiltra Barneveld);
- Thermische sensoren en actuatoren;
- Systemen t.b.v. energie-conversie;
- Medische technologie;
- Gadgetartikelen;
- Koppelingen voor hydraulische leidingen, onder andere ten behoeve van de vliegtuigbouw.

Diverse vindingen staan op naam van de heer Besselink die werkzaam is bij Memory Metal Holland. Zo ziet men

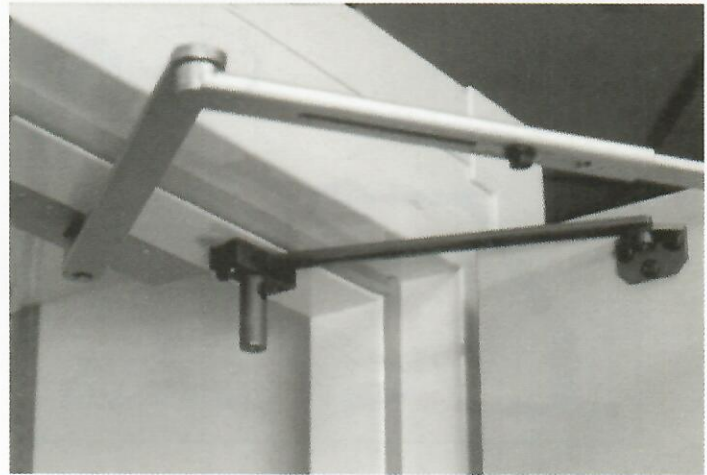


Foto 4

bijvoorbeeld op foto 5 een ontkoppelingsmechanisme met een torsietaaf aandrijving die voor de ruimtevaart wordt gebruikt. Deze torsietaaf geeft een last vrij van 2000 N door een vermogen dat gegenereerd wordt met 12 V en 0,5 A.

Ten aanzien van de thermische actuatoren kan men zich onder andere allerlei 'memorymotoren' voorstellen. Zoals hierboven reeds de kunstspier is omschreven, kan men ook roterende systemen maken van geheugenmetaal. Op afbeelding 8 ziet men een memorymotor die dankzij warm water zo'n 200 toeren per minuut maakt. De werking bestaat hieruit dat een draad die dus recht is geprogrammeerd in het warme water recht wil gaan staan. Hierdoor komt er een trekspanning in de draad en omdat de draad aan één kant gaat afbuigen van de geleiderol (vanwege de

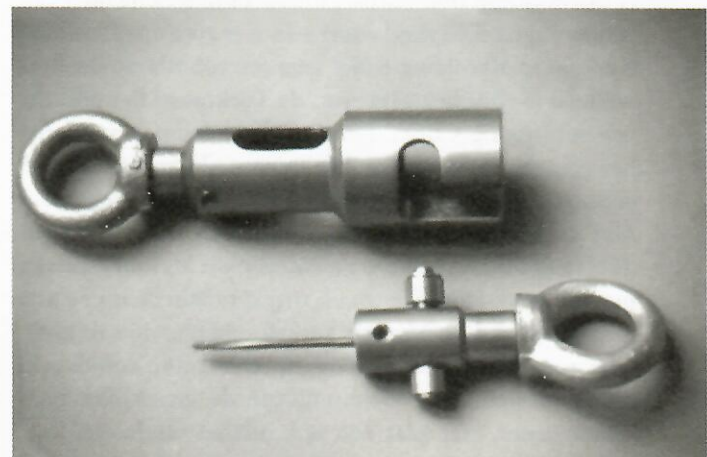
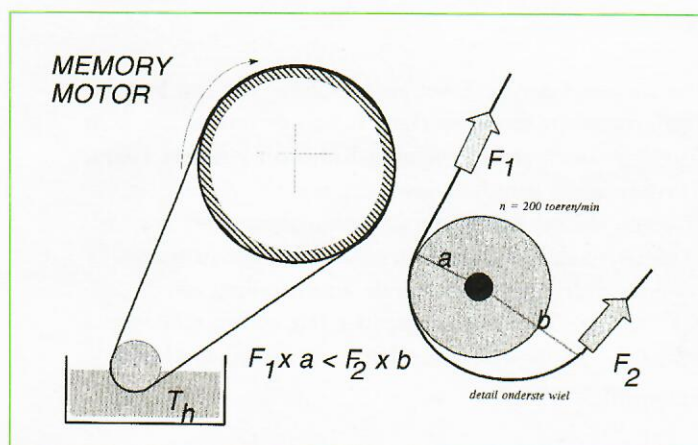


Foto 5

Vormgeheugenmetaal verdient meer aandacht



Afbeelding 8

sterkneiging) zal er een winnend moment zijn waardoor de draad de zaak laat roteren. Het is dus mogelijk om uit restwarmte (bijvoorbeeld warm afvalwater van 60°C) op deze wijze nog energie te halen.

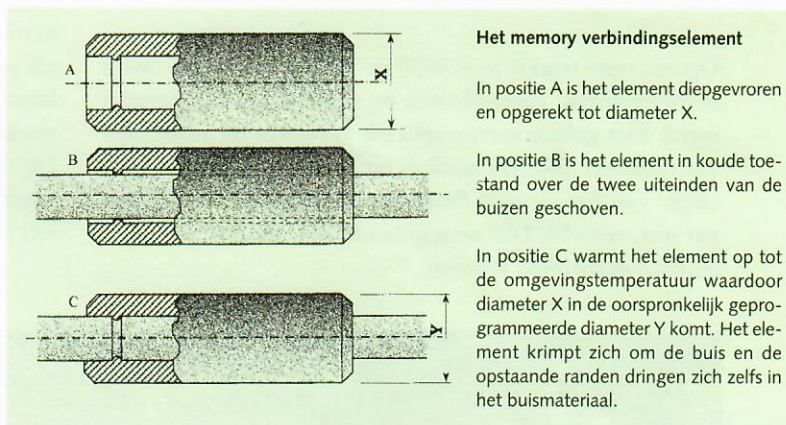
Over medische toepassingen kan uitvoerig worden ingegaan, doch omwille van het feit dat deze zaken niet veel raakvlakken hebben met de industrie worden geen details verstrekt. Wel worden de volgende toepassingen vermeld:

- Botfixatieklemmen; dankzij de lichaamstemperatuur gaat een uitgerekte klem naar haar oorspronkelijke vorm waardoor de ruimte van een botbreuk opgeheven wordt, met als gevolg dat de genezing veel sneller verloopt.
- Ribfixatieklemmen; ribbreuken genezen vrij moeilijk omdat huidige gipstechnieken geen bescherming of fixatie kunnen bieden. Klemmen van geheugenmetaal die zich door hun vormgeheugen geheel om de rib sluiten geven tijdens de tijdelijke implantatie deze bescherming wel.
- Elementen die een blokkering van twee versleten werfels vergemakkelijken tijdens een blokkadeoperatie.
- Tandtechnologische toepassingen zoals beugeldraad en wortelinstelelementen.

Ten aanzien van het verbinden is het van belang te vermelden dat een Amerikaans bedrijf verbindingbusjes maakt voor onder andere hydraulische leidingen. Deze busjes worden bij zeer lage temperaturen opgerekt over een doorn en bewaard op deze lage temperatuur. Nadat zo'n busje met een tang over de twee uiteinden van de buizen is gepositioneerd, zal dit busje opwarmen naar de omgevingstemperatuur waardoor het zijn oude diameter

herinnert. De bus zal zich nu met grote kracht om de buizen krimpen waardoor een perfecte verbinding ontstaat (zie afbeelding 9). Zelfs de 'ringetjes' zullen zich in de buizen dringen. Deze verbinding blijft zelfs in een uitstekende conditie bij de hoogste inwendige drukken waardoor het door de Amerikaanse luchtvaartinspectie is goedgekeurd voor het gebruik in vliegtuigen.

Ook is het materiaal populair als gadgetartikel omdat de meest vreemde bewegingen kunnen leiden tot allerlei 'eye-catchers' die aantrekkelijk zijn voor relatiegeschenken. De kunstwerksector zal zich ook laten bedienen door dit fenomeen omdat het metaal in combinatie met koud en warm water allerlei speelse bewegingen kan maken. Door de auteur van dit artikel is dan ook een zogenaamde 'memory-mobile' ontwikkeld die voor langere tijd heeft gestaan in het Kantoor van de Toekomst'.



Afbeelding 9

Het memory verbindingselement

In positie A is het element diepgevroren en opgerekt tot diameter X.

In positie B is het element in koude toestand over de twee uiteinden van de buizen geschoven.

In positie C warmt het element op tot de omgevingstemperatuur waardoor diameter X in de oorspronkelijk geprogrammeerde diameter Y komt. Het element krimpt zich om de buis en de opstaande randen dringen zich zelfs in het buismateriaal.

Slot

Dit artikel beoogt vooral de lezers te prikkelen om na te denken waar een dergelijk materiaal ingezet kan worden. De grote doorbraak voor dit metaal moet nog plaatsvinden. Een groot gedeelte van de ontwikkeling van dit metaal vindt zijn oorsprong in de ruimtevaart waar het onder andere met succes werd toegepast om er parapluvormige antennes van te maken die tijdens de lancering waren 'opgerold' tot een kluwen. Het zou jammer zijn dat de toepassingen zich niet verder zouden uitbreiden dan dat het tot nu toe heeft gedaan, want daarvoor is het materiaal te uniek.

Verantwoording

De foto's die in dit artikel zijn afgedrukt werden ter beschikking gesteld door Memory Metal Holland. ◀