

De vormgeheugenlegering NiTi

Krupp Forschungsinstitut, Essen BRD*

Wat is een vormgeheugenlegering

Sinds geruime tijd worden in de techniek enkele metallische materialen die een geprononceerd vormherinneringsvermogen bezitten van de aanduiding (vorm)geheugenlegeringen voorzien. Ze hebben de eigenschap gemeen dat ze in vaste toestand in een aantal modificaties voorkomen. Van metaalkundig standpunt uit is het geheugeneffect te verklaren als een spanningsgeïnduceerde martensitische structuurverandering, die omkeerbaar is.

Tot deze geheugenlegeringen behoren vooral NiTi, maar ook CuAlZn en AuCd. De transformaties gebeuren in een temperatuurgebied dat zeer sterk afhankelijk is van de samenstelling van de legering. Bij NiTi is deze transformatietemperatuur ongeveer 110 graden Celsius voor de samenstelling van 55 gew.% Ni en 45 gew.% Ti.

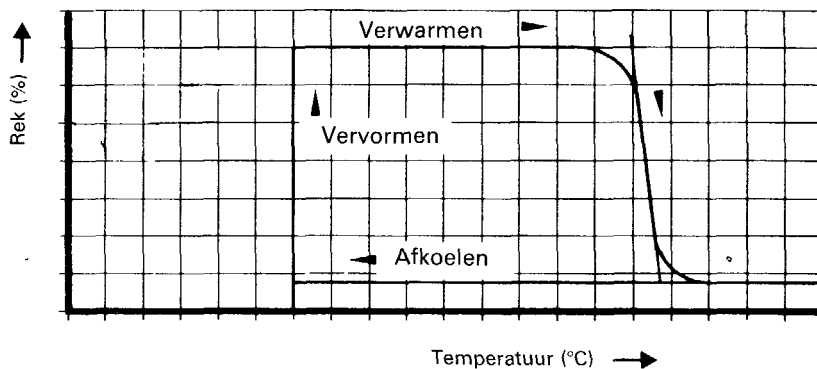
Het geheugeneffect van NiTi kan aanschouwelijk ongeveer als volgt worden beschreven; zie figuur 1. Als een onderdeel van dit materiaal bij een lage temperatuur plastisch wordt vervormd en vervolgens op een temperatuur verwarmd die boven de transformatietemperatuur ligt, dan neemt het onderdeel nagenoeg volledig de vorm weer aan die het had voordat het plastisch werd vervormd. Bij deze "terugvorming" kan het onderdeel een kracht uitoefenen, dat wil zeggen het kan mechanische arbeid verrichten, zie figuur 2.

Uit de resultaten van experimenten blijkt dat er onderscheid moet worden gemaakt tussen het éénwegeffect, waarbij een (telkens) éénmaal op te wekken geheugeneffect optreedt, en van herhaalbare vormgeheugeneffecten. Het éénwegeffect betekent dat een onderdeel voor elke transformatie opnieuw plastisch vervormd moet worden. Dit in tegenstelling tot het herhaalbare geheugeneffect, waarbij in het begin een plastische vervorming wordt aangebracht en dan door middel van temperatuurcycli, bestaande uit verwarmen en afkoelen, vervormingscycli mogelijk zijn.

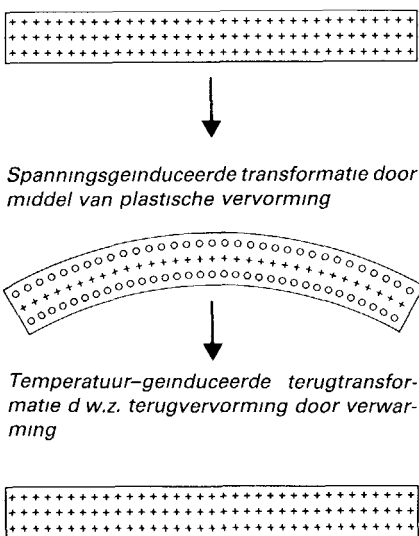
* Door de heer H G J Rutten vertaalde en bewerkte tekst van de voordracht, gehouden door de heer J. Jorde van het Krupp Forschungsinstitut, op de leergang Vormgeheugenmetalen, georganiseerd op 14 oktober 1985 door het Mikrocentrum Nederland

Bij de temperatuurcyclus verwarmen/afkoelen is de thermodynamische weg van een vormgeheugenonderdeel gemarkeerd door de temperaturen A_s en A_f bij het begin en einde van het ontstaan van austeniet maar ook door M_s en M_f bij het begin en einde van de martensietvorming in de legeringsstructuur. De daarbij ontstaande hysteresis met de breedte $dT = M_s - M_f$, die ongeveer 40 graden Celsius is, verandert zijn grootte en ligging bij alle volgende cycli niet meer, zie figuur 3.

Op deze plaats is het zinvol te wijzen op het geheel andere werkingsprincipe



Figuur 1 Het éénmaal op te wekken geheugeneffect van NiTi, ofwel éénwegeffect



Figuur 2

van het thermo-bimetaal. Deze verbinding van twee metalen strippen met een onderling verschillende lineaire uitzettingscoëfficiënt leidt tot een zuiver monotoon stijgende functie van temperatuur en vervorming; de hysteresis ten gevolge van verwarmen en afkoelen is zeer smal. Het principe van het bimetaal beperkt de grootte van de uit te oefenen kracht en laat uitsluitend buigingsvervorming toe.

Wat kan een vormgeheugenlegering?

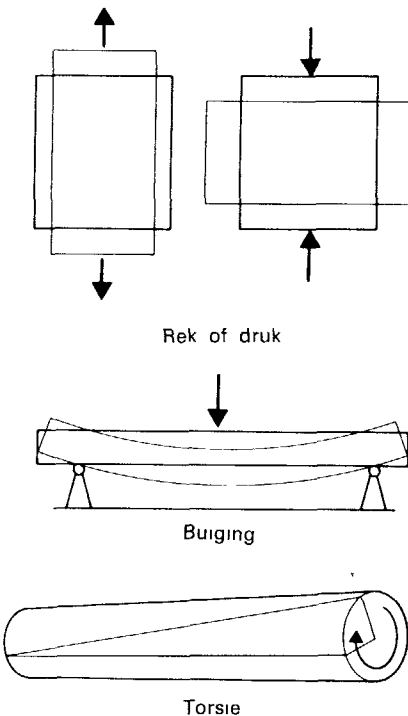
Door gebruik te maken van onderdelen in de vorm van druk-, buig-, trek- of torsie-elementen, zie figuur 4, gemaakt van bijvoorbeeld de geheugenlegering NiTi, kunnen ten behoeve van de constructieve opgave bijzondere krachteleffecten worden opgewekt, gehandhaafd en weer worden opgeheven, als ook warmte worden omgezet in cyclische arbeid.

Omdat hierbij van een structuurverandering in het uitgangsmateriaal NiTi gebruik wordt gemaakt, zijn uitwendige storingen tengevolge van wrijving, slijtage of corrosie uitgesloten. De betrouwbaarheid van geheugenonderdelen is extreem hoog, zowel bij het gebruik maken van het éénwegeffect als bij vele miljoenen malen te herhalen vormgeheugeneffecten.

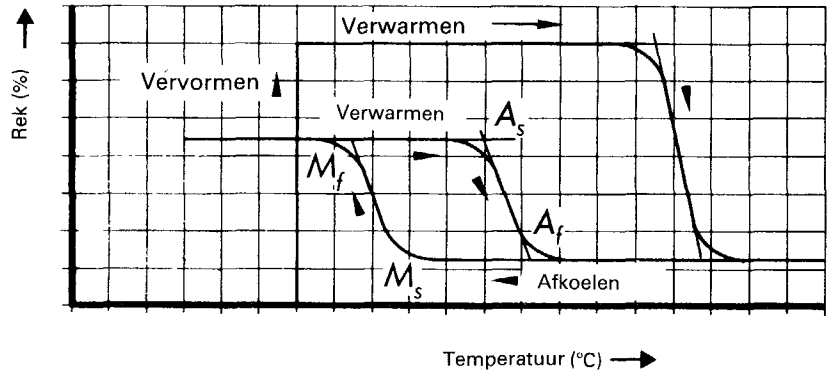
Een eveneens gunstige omstandigheid bij de oplossing van constructieve problemen ligt in het feit dat het geheugenmateriaal NiTi als constructiemateriaal voor aandrijvingen kan worden gebruikt, omdat zijn sterkte vergelijkbaar is met die van constructiestaal, het spaanloos vervormd, verspanend bewerkt en ook gelast kan worden.

Een element gemaakt van de geheugenlegering NiTi met een diameter van 10 mm is aan een zijde ingeklemd en heeft bij de omgevingstemperatuur T_1 een lengte van 1000 mm; zie figuur 15. Dit element wordt nu met een kracht K belast waardoor een rek ϵ_{max} optreedt (plastische vervorming).

In de derde figuur wordt de kracht verwijderd. Het element keert niet volledig in zijn uitgangstoestand terug, maar behoudt een deel van de plastische vervorming. Vervolgens kan men het element belasten met een massa van bijvoorbeeld 1000 kg die aanvankelijk ondersteund wordt. In de vijfde figuur wordt het element verwarmd op de temperatuur T_2 , die boven de transformatietemperatuur ligt. Nu treedt, ver-



Figuur 4



Figuur 3 Het herhaalbare geheugeneffect van NiTi, ofwel tweewegeffect

eenvoudigd voorgesteld, het vormgeheugen van het element in werking. Het herinnert zich aan de niet vervormde toestand in de eerste figuur en wordt de lengte ϵ_{M1} korter. Hierbij wordt de massa van 1000 kg opgetild. In dit voorbeeld is het arbeidsvermogen van het element 300 N.m

Typische toepassingen, waarbij met profijt van geheugenlegeringen gebruik gemaakt kan worden, toont figuur 6.

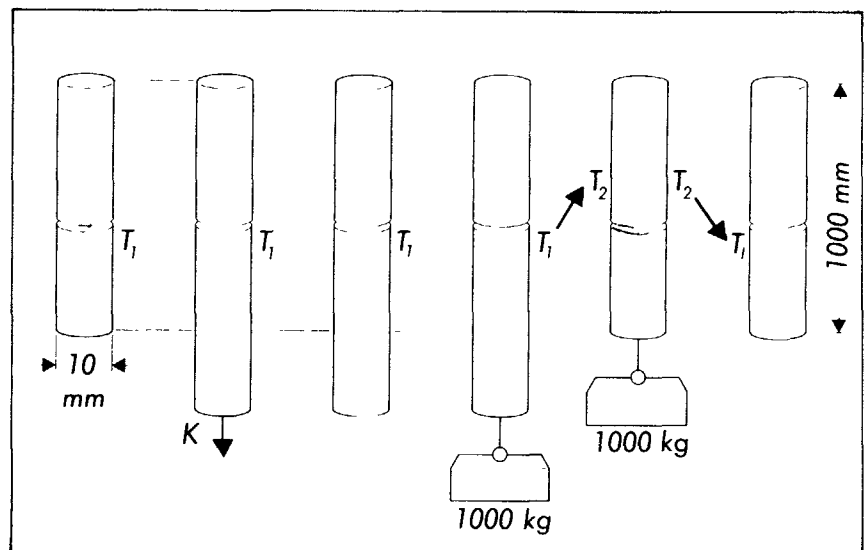
De warmte-overdracht

De constructie van mechanismen die met onderdelen van geheugenlegeringen werken omvat:

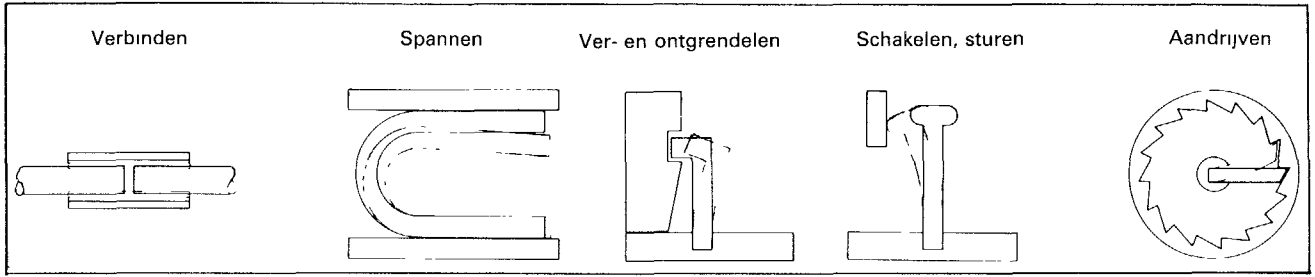
- de keuze van technisch gunstige methoden voor het verwarmen/afkoelen,
- het ontwerp en de plaatsing van deze energievoorziening,
- de vormgeving van het geheugenonderdeel met het oog op het bereikbare geheugeneffect alsmede zijn geschiktheid tot het uitoefenen van krachten, momenten, bewegingen

De volgende energievormen c.q. -dragers kunnen gebruikt worden

- De Joule-verwarming die ontstaat als door het geheugenonderdeel een elektrische stroom loopt. Deze verwarming is mogelijk als de doorsnede van het onderdeel klein is in vergelijking met de lengte. Het voordeel is dat de warmte direct in het materiaal ontstaat. Daardoor kan van de mogelijkheid gebruik worden gemaakt om de transformatietemperatuur in een extreem korte tijdspanne te bereiken waardoor het vormgeheugeneffect zeer plotsklaps optreedt.
- De warmte van een verwarmingselement. Dit kunnen zowel omwikkelde, of met siliconrubber omhulde verwarmingsdraden, maar ook miniatur verwarmingsbandelementen zijn
- De warmte-inhoud van hete vloeistoffen, dampen of gassen. Twee tegenovergestelde constructieprincipes zijn hierbij mogelijk:



Figuur 5 Een vormgeheugenelement kan arbeid verrichten



Figuur 6

- een stilstaande warmtedrager in combinatie met een bewegend geheugenonderdeel,
 - een bewegende warmtedrager in verbinding met een stationair geheugenonderdeel.
- De torsiebuis is in bijzondere mate effectief. Deze kan als transportbuis in de kringloop van een warmtedrager geïntegreerd worden en maakt een optimaal materiaalgebruik mogelijk, omdat hij tevens als aandrijforgaan in een roterende aandrijving kan dienen. Zelfs bij het gebruik van relatief dunwandige buisconstructies zijn reeds aanzienlijke koppels haalbaar.
- De warmte van een contactlichaam. Het lichaam heeft ofwel een eigen elektrische verwarming of er is op de een of andere wijze warmte in opgeslagen die op vraag aan het geheugenonderdeel kan worden toegevoerd. In sommige gevallen is het mogelijk gebruik te maken van de smeltwarmte of de vormingsenthalpie van daarvoor geschikte stoffen. Deze stoffen zijn dan in aparte kamers in het contactlichaam opgeslagen.
- De stralingswarmte. Dunwandige geheugenonderdelen vervaardigd uit bijvoorbeeld blik, plaat of strippen bieden de mogelijkheid de transformatietemperatuur in het materiaal te bereiken door middel van stralingswarmte.

De belangrijkste technische gegevens

De technische gegevens van het materiaal NiTi zijn natuurlijk afhankelijk van zijn samenstelling, maar ook van de vervormingstoestand van het onderdeel, omdat NiTi gevoelig is voor koudversterking. Bovendien is er nog de temperatuurafhankelijkheid omdat boven en onder de transformatietemperatuur enige eigenschappen een ander verloop hebben. Als in de literatuur ten opzichte van elkaar afwijkende gege-

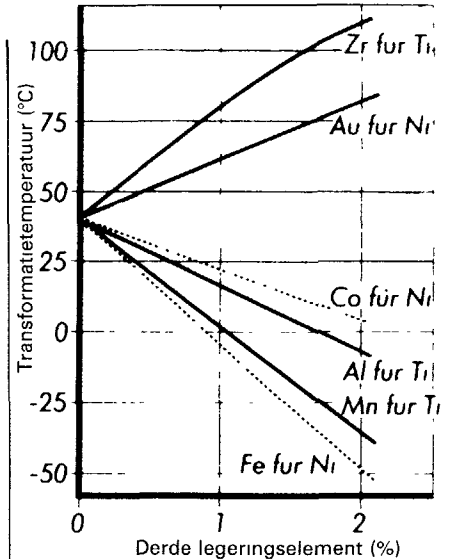
vens worden gepubliceerd, dan ligt dat veelal aan niet overeenkomstige uitgangsgedaten of -omstandigheden. Een keuze uit voor de praktijk belangrijke gegevens van de geheugenlegering Ni55Ti45 in de warmtebehandelde toestand en beneden de transformatietemperatuur is:

Soortelijke massa	8,45 g/cm ³
Soortelijke warmte	0,45 J/g°C
Soortelijke transformiewarmte	24,2 J/g
Soortelijke elektr. weerst	8,10 ⁻⁶ Ω cm
Warmtegeleidingscoëfficiënt	0,1 W/cm.°C
Elasticiteitsmodulus:	7,10 ⁴ N/mm
Glijmodulus	2,7 ⁴ N/mm
Treksterkte:	850 N/mm
Rek grens	180 N/mm
Rek bij breuk	45%
Insnoering bij breuk	30%

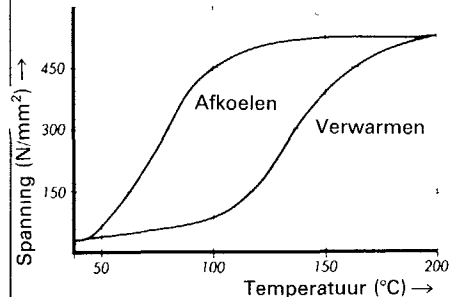
De stap naar de ternaire legering biedt de mogelijkheid de transformatietemperaturen te verhogen of te verlagen. Zo is het mogelijk met goud of zirkoon als derde legeringselement de transformatietemperaturen tot ca. 50 graden Celsius te verhogen en met kobalt, aluminium, mangaan of ijzer te verlagen; zie figuur 7.

Bij een ingeklemd geheugenonderdeel, dat wil zeggen bij volledige blokkering van zijn rek ϵ_{M1} , induceert het geheugeneffect een spanning (kracht) in de doorsnede van het onderdeel die bij cyclische verwarming en afkoeling een spanningshysterese heeft; zie figuur 8.

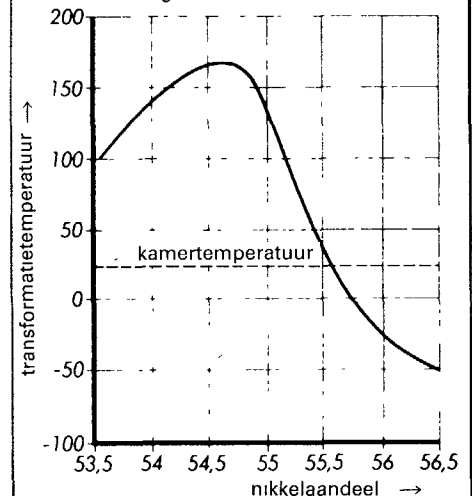
Kleine veranderingen in de samenstelling van de legering veroorzaken een relatief grote verschuiving van het temperatuurgebied waarbinnen de transformatie plaatsvindt. Het maken van een smelt van de legering NiTi wordt extra bemoeilijkt door de onvermijdelijk aanwezige geringe hoeveelheden koolstof dat met titaan de verbinding TiC vormt. Gelet op de transformatietemperatuur is de smelt nu verarmd aan titaan. Met dit gedrag moet bij het vaststellen van de analyse van de legering rekening worden gehouden, zie figuur 9.



Figuur 7 De invloed van een derde legeringselement op de transformatietemperatuur



Figuur 8 Spanningshysterese die bij verwarmen/afkoelen optreedt als een geheugenelement wordt ingeklemd



Figuur 9 Invloed van het nikkelpercentage in gewichtsprocenten op de transformatietemperatuur