

Aliatges amb memòria de forma, una filosofia diferent en l'enginyeria i el disseny amb materials

Fco. Javier Peña Andrés

Dpt materials i disseny.
Doctor en Ciències Químiques. Professor d'Elisava Escola Superior de Disseny.

Resum

Els materials amb memòria de forma també anomenats materials intel·ligents posseeixen propietats que els diferencien de la resta de materials. Aquestes propietats no són propietats millorades respecte als altres materials convencionals, sinó que són noves propietats que fan que el procés de disseny amb materials hagi de ser modificat. La comprensió d'aquestes noves propietats i l'estandardització de tots els paràmetres que les caracteritzen per part de totes aquelles persones involucrades en el procés de disseny farà que aquests materials assolixin una importància industrial que encara no tenen. En aquest article es descriuen totes les propietats que caracteritzen a aquest tipus de materials a la vegada que es fa una anàlisi de les seves possibilitats futures.

Paraules clau

Disseny, memòria de forma, superelasticitat, materials intel·ligents, materials adaptables.

Els aliatges amb memòria de forma es coneixen des de fa aproximadament seixanta anys, si bé només fa trenta anys que en van començar a aparèixer les primeres aplicacions. El progrés d'aquests materials ha estat lent. En primer lloc perquè el seu desenvolupament ha necessitat una tecnologia nova: mentre l'origen i els mecanismes que donen lloc a les propietats de memòria de forma són ben coneguts actualment, no es pot dir el mateix dels aspectes d'enginyeria. En segon lloc perquè aquests materials són ben coneguts per la comunitat científica, però no pels dissenyadors i els enginyers de disseny.

Aquests nous aliatges no són simplement un nou tipus de materials, com poden ser els aliatges de titani o els superaliatges, sinó que presenten una nova filosofia en el camp de l'enginyeria i el disseny. Aquests nous materials no tenen unes propietats millorades respecte dels materials ja existents, sinó que presenten propietats noves, de manera que aquestes propietats han de ser conegudes pels dissenyadors abans que considerin aplicar-les. Aquest fet és el responsable que els paràmetres de disseny utilitzats per a aquests tipus de materials siguin diferents als utilitzats per la majoria dels materials funcionals. Així, paràmetres de disseny com ara el límit elàstic, la resistència màxima, el mòdul elàstic, la ductilitat, entre d'altres, són reemplaçats per propietats o paràmetres com tensió de recuperació, velocitat de recuperació, temperatura de transformació, histèresi tèrmica, etc.

El coneixement d'aquests materials obre noves possibilitats en el camp del disseny i l'enginyeria de disseny. Aquestes possibilitats van des de la concepció escultòrica d'una forma mòbil o articulada que executa el seu moviment únicament per l'oscil·lació tèrmica entre el dia i la nit fins al desenvolupament de microbots capaços de realitzar un treball i produir un moviment per efecte de les propietats d'aquest tipus de materials, sense oblidar la important aportació que aquests materials estan fent en el camp de la medicina i l'ortopèdia, entre d'altres.

Com a exemple podem comentar que la utilització d'aliatges amb memòria de forma ofereix avantatges

sobre altres solucions convencionals en el camp de l'ortesi, tant a l'hora de dissenyar com en l'aspecte econòmic. És el cas de la recuperació de la mobilitat dels dits d'una mà gràcies a un dispositiu basat en el fenomen de la memòria de forma i la superelasticitat. Aquest dispositiu és capaç de proporcionar als dits del pacient una tensió constant i adequada que els permetrà estirar-se i arronsar-se simplement mitjançant escalfament i refredament d'aquest material amb memòria de forma, la qual cosa permet la rehabilitació d'aquests dits malalts d'una manera simple i, encara més important, adequada i funcional per al pacient.

En aquest article es comentaran breument les principals propietats que presenta aquest nou grup de materials com a base per entendre la nova filosofia que planteja conèixer-les en el moment en què es posen sobre la taula de treball, un problema de selecció de materials, o de disseny de qualsevol tipus de sistema mecànic o artefacte. A partir d'aquí, s'oferirà una primera aproximació a les principals aplicacions que es donen a aquests materials actualment, basades més en un criteri d'ús industrial que en les diverses propietats que caracteritzen aquests materials. L'exposició acabarà amb una aproximació, des del punt de vista de l'enginyer de disseny, a les premisses necessàries per facilitar l'ús dels aliatges amb memòria de forma en el procés normalitzat de disseny.

Evolució històrica

L'efecte anomenat memòria de forma fou descobert per Chang and Read [51Cha] en un aliatge Au-47.5at%Cd, però es va desenvolupar veritablement amb el descobriment de l'aliatge NiTi de Buehler i el seu equip [63Bue]. Entre aquests dos descobriments també es van estudiar altres aliatges que presentaven aquest efecte, com In-Tl, Cu-Zn i Cu-Al-Ni. Però aquest no fou el primer pas en el desenvolupament d'aquests aliatges. L'efecte goma [97Xia], [78Ahl] descobert l'any 1932 per Ölander [32Öla] en un aliatge Au-47.5at%Cd, constitueix la primera etapa en el descobriment dels aliatges amb memòria de forma. Quan l'aliatge és deformat just després de la transformació martensítica, el comportament a deformació és plàstic i exhibeix la propietat de la memòria de forma; en canvi, quan l'aliatge és envellit en l'estat martensític durant catorze hores o més, el comportament de l'aliatge passa a ser pseudoelàstic. També són anteriors al descobriment de l'efecte memòria de forma els estudis realitzats l'any 1938 per Greninger i Moradian [38Gre], els quals van observar l'aparició i la desaparició de martensita en disminuir i augmentar la temperatura en un aliatge de CuZn. Però van haver de passar deu anys perquè Kurdjumov i Khandros [49Kur] estudiessin el comportament termoelàstic de la fase martensítica, un fenomen bàsic de l'efecte memòria

Materials no fèrrics		Materials fèrrics	
Aliatge	Composició (at%)	Aliatge	Composició
Ag-Cd	44-49Cd	FePt	=25at%Pt
Au-Cd	46.5-48.0Cd, 49-50Cd	FeNiCoTi	23%Ni-10%Co-10%Ti
CuZn	38.5-41.5Zn		33%Ni-10%Co-4%Ti
CuZnX (X=Si,Sn,Al,Ga)	Pequeño %at de X		31%Ni-10%Co-3%Ti
CuAlNi	28-29Al, 3.0-4.5Ni	FeNiC	31%Ni-0.4%C
CuSn	~15Sn	FeNiNb	31%Ni-7%Nb
CuAuZn	23-28Au, 45-47Zn	FeMnSi	(28~33)%Mn-(4~6)%Si
NiAl	36-38Al	FeCrNiMnSi	9%Cr-5%Ni-14%Mn-6%Si
TiNi	49-51Ni		8%Cr-5%Ni-20%Mn-5%Si
TiNiCu	8-20Cu		12%Cr-5%Ni-16%Mn-5%Si
TiPdNi	0-40Ni	FeMnSiC	17%Mn-6%Si-0.3%C
InTl	18-23Tl	FePd	=30 at%Pd
InCd	4-5Cd	FePt	=25 at%Pt
MnCd	5-35Cd		

Taula 1. Materials metàl·lics fèrrics i no fèrrics que presenten efecte memòria de forma

de forma. A partir d'aquí es descobreix l'efecte de memòria de forma ja comentat i s'inicia el desenvolupament d'aquests aliatges. Apareixen altres efectes importants, com ara la capacitat d'esmoreïment, el doble efecte memòria de forma i la superelasticitat.

L'alta capacitat d'esmoreïment [95Lin], [93Lin], [97Liu], [99Cec] provocada per la fricció interna de les plaques de martensita tant en la fase martensítica com en la fase β + Martensita, és una altra propietat important d'aquests aliatges, d'entre tots els quals l'aliatge CuZnAl [82Hum], [93Xia], [95Xia], [87Aer], [87Mel] és el que presenta una capacitat d'esmoreïment força més alta.

El doble efecte memòria de forma [74Per], [92Sta], [95Lov], [95Gui], [97Dut]. La diferència essencial que existeix entre l'efecte doble memòria de forma i les altres propietats de memòria de forma és que en el cas de l'efecte doble memòria de forma el canvi macroscòpic de forma es genera espontàniament sense aplicació de tensió externa, únicament per canvi de temperatura. Cal destacar que per conferir al material les formes macroscòpiques adequades existeixen diferents tipus de mecanismes anomenats mecanismes d'ensinistrament del material. La superelasticitat, que en l'actualitat és una de les propietats més utilitzades d'aquests aliatges, es basa en la capacitat d'aquests aliatges per proporcionar deformacions recuperables molt més elevada que les que proporcionen els materials convencionals. A la Taula 1 es mostren els materials metàl·lics no fèrrics i fèrrics que presenten efecte memòria de forma.

Característiques dels aliatges amb memòria de forma

La transformació martensítica termoelàstica

La transformació martensítica termoelàstica és una transformació estructural en estat sòlid de primer ordre sense difusió atòmica, que té lloc per cisellada i és el resultat del moviment coordinat d'àtoms a una distància menor que l'espai interatòmic. A més, es pot completar aquesta definició comentant que la transformació s'ha de produir per nucleació i creixement de les plaques de martensita en el si de la fase β [95Chr]. Aquesta transformació pot ser produïda per efecte de la temperatura, com s'observa a la figura 1, i també

per efecte de la tensió, que donaria lloc a l'efecte superelàstic com comentarem a continuació. La Figura 1 representa el volum parcial de fase martensita en el material en funció de la temperatura. D'aquesta manera, si el material de partida és completament martensític i l'escalfem a la temperatura A_s (Austenita start) comença a transformar a fase austenítica. La transformació austenítica és completa quan la temperatura arriba a la temperatura A_f (Austenita finish). En aquest moment el material és completament austenític, i si el refredem transformarà novament a la fase martensítica tot definint en el procés dues noves temperatures com són M_s i M_f (Martensita start i Martensita finish respectivament). La morfologia que presenten la fase β i la fase martensita apareixen a la Figura 2.

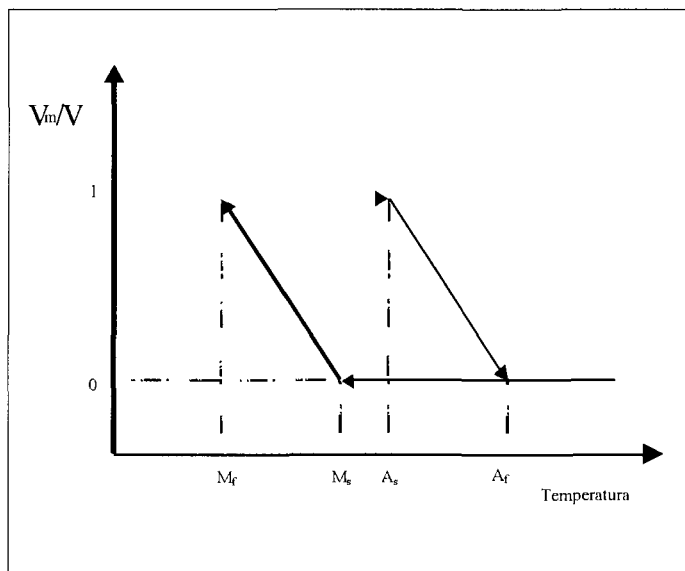


Figura 1. Evolució de la transformació martensítica en funció de la temperatura

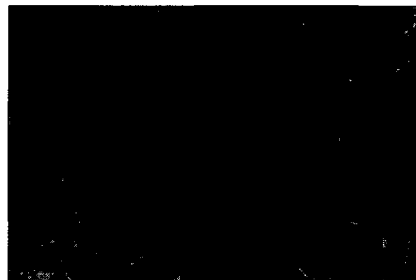




Figura 2. Micrografies en les quals s'observa la morfologia de la fase austenítica i la fase martensítica per a un aliatge CuZnAl.

Martensita induïda per tensió. Efecte superelàstic

Un aliatge amb memòria de forma exhibeix superelasticitat quan aquesta forma és deformada en un raig de temperatures en el qual es forma martensita termoelàstica sota l'aplicació d'una determinada tensió, i espontàniament desapareix, reverteix a la fase original, quan es deixa d'aplicar la tensió. D'aquesta manera, la deformació produïda és completament recuperable, i a més les deformacions obtingudes i recuperables són molt més nombroses que les dels materials convencionals. Es poden arribar a obtenir deformacions recuperables de fins al 10% en contrast amb els valors propers a l'1% que presenten els acers convencionals. Aquest efecte es pot observar a la Figura 3, on el tram AB representa el comportament elàstic de la fase β i el tram BC correspon a la formació de martensita induïda per tensió. En aquest darrer tram un petit augment de la tensió aplicada proporciona deformacions elevades.

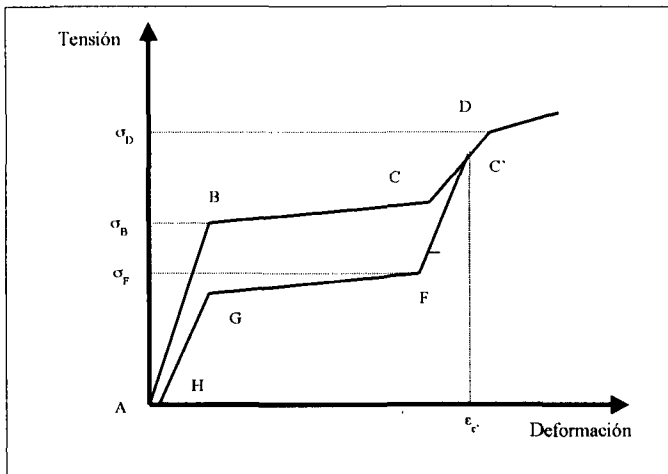


Figura 3. Representació teòrica ideal d'una corba superelàstica

Per la seva banda, el tram CD correspon al comportament elàstic de la fase martensítica i el tram DE al comportament plàstic de la fase martensítica. Si abans que es produeixi aquest comportament plàstic es retira la tensió, el material retorna a la posició original seguint els trams C'FGH.

Efecte memòria de forma

L'efecte memòria de forma es basa en el fet que després de deformar el material en estat martensític, aquesta deformació continua, però és recuperable si el material s'escalfa a una temperatura $T > A_f$ de manera que s'hi produeixi la transformació inversa i es recuperi la forma original. Aquest efecte es pot observar de manera gràfica a la Figura 4. Aquest efecte es denomina efecte memòria de forma simple perquè només es memoritza la forma calenta, i es distingeix de l'efecte memòria de forma doble en què en aquest es recorden tant la forma freda com la calenta.

D'acord amb aquest efecte, podem plantejar aplicacions basades en una recuperació lliure de la forma, aplicacions basades en la generació d'una tensió determinada, com s'observa a la Figura 4a, i també aplicacions basades en la capacitat de realitzar un treball determinat, com es mostra a la Figura 4b.

L'efecte memòria de forma i el de la superelasticitat estan directament relacionats entre si. Generalment, tots dos es poden observar en els mateixos materials i dependran de la temperatura d'assaig i de la tensió aplicada, de manera que per a una mostra en el règim de temperatures entre A_s i A_f ambdós efectes tenen lloc simultàniament i parcialment.

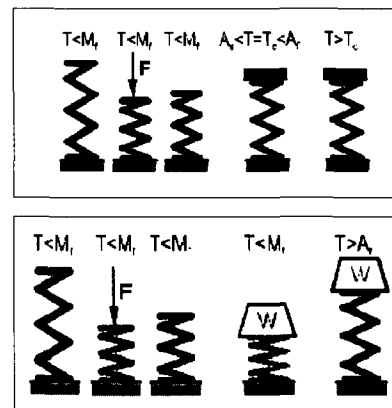


Figura 4 a i b. Generació d'una tensió de recuperació i capacitat de generar treball en aliatges amb memòria de forma

Efecte memòria de forma doble

L'efecte memòria de forma doble es basa en la memorització tant de la forma calenta com de la forma freda. En contraposició amb l'efecte memòria de forma simple, no calen forces externes perquè es produeixi, de manera que el pas d'una forma a una altra es realitzarà simultàniament mitjançant escalfament i refredament del material. Aquest efecte està representat d'una manera gràfica a la Figura 5, en la qual s'observa com passa el material, representat a la figura com una molla, d'una forma determinada ($T > A_f$) a una altra forma ($T < M_f$) únicament per efecte de la temperatura, sense necessitat d'aplicar-hi cap mena d'esforç.

L'efecte memòria de forma doble no és una característica intrínseca dels aliatges amb memòria de forma, sinó un efecte que es pot induir a partir de diversos tractaments termomecànics.

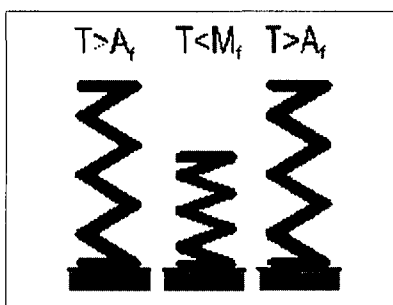


Figura 5. Representació gràfica de l'efecte memòria de forma doble

Capacitat d'esmoreïment

Els aliatges amb memòria de forma estan considerats com un dels materials metàl·lics amb més capacitat d'esmoreïment ja que la fricció interna que presenten durant l'esmoreïment mecànic dels materials, anomenat també fricció interna, és el resultat d'una transformació irreversible d'energia mecànica en energia tèrmica dissipada. Al mateix temps que disminueix l'amplitud de les oscil·lacions mecàniques a causa de la fricció interna, s'observa també la variació del mòdul de rigidesa (mòdul d'elasticitat longitudinal o mòdul de cisellada segons el tipus de sol·licitació) que està associat al mateix fenomen físic. Altrament dit, la presència d'una elevada densitat d'intercares mòbils entre les variants de martensita i entre la martensita i la matriu β durant la transformació, fa d'aquesta mobilitat un

mecanisme important i eficient de dissipació d'energia que a més no afecta significativament altres propietats importants per a l'ús d'aquests materials. Així doncs, es poden considerar dues regions de temperatura per estudiar la fricció interna en aliatges amb memòria de forma: la regió de temperatures en la qual el material és completament martensític i la regió en què la fase β coexisteix amb la fase martensítica. Per a la fase β no s'ha observat una elevada capacitat d'esmoreïment, però sí un fenomen de relaxació.

Per a aplicacions en què el material se sotmet a una vibració contínua a una temperatura constant, una mostra totalment martensítica ofereix un esmoreïment més estable. D'altra banda, quan la mostra està sotmesa a càrregues variables (per exemple, a impactes) amb baixa freqüència, la coexistència de les dues fases és adequada, ja que pot produir martensita induïda per tensió al mateix temps que produeix un alliberament de calor. La fricció interna en la fase martensítica és deguda a la mobilitat reversible de i entre les diferents variants de martensita.

Si es fa una comparació entre la capacitat d'amortiment que presenten els aliatges NiTi, CuZnAl i CuAlNi, ja que són els tres aliatges comercialment més importants, s'observa que l'aliatge CuZnAl és el que presenta més capacitat d'esmoreïment en un factor que és el doble que el del aliatge NiTi, i encara molt més gran que l'aliatge CuAlNi [87Aer], [87Mel].

Finalment, hem de tornar a remarcar que paràmetres externs com són la temperatura, el temps, la freqüència i l'amplitud poden canviar la capacitat d'esmoreïment. Existeixen també variables internes, com són la mida de gra, la densitat d'intercares de martensita i l'estructura dels defectes, que poden influir en el comportament esmoreïdor d'aquests aliatges.

En comparació amb els materials convencionals, es pot dir que els aliatges amb memòria de forma base coure i l'aliatge NiTi mostren una capacitat d'esmoreïment com a mínim un ordre de magnitud més alt que els materials clàssics, com són els acers.

Principals aplicacions dels aliatges amb memòria de forma

A continuació s'exposa un breu resum de les principals aplicacions dels aliatges amb memòria de forma a partir bàsicament d'un criteri d'ús industrial més que de les diferents propietats anteriorment explicades. Dins de

cada un d'aquests grups d'aplicacions pràctiques s'esmentaran les més usuals i aquelles que s'espera que es desenvolupin en un futur no molt llunyà.

Restitució lliure

Inclou aplicacions en què l'única funció de l'element amb efecte memòria de forma és causar moviment o deformació.

Ni hi ha gaires aplicacions pràctiques que obeeixin a la restitució lliure. Per descomptat, no és el grup de més importància industrial. En són un exemple algunes muntures d'ulleres fabricades amb aliatges amb memòria de forma que poden recobrar la forma inicial quan es submergeixen en aigua calenta en el cas que s'hagin deformat accidentalment. Un altre tipus de muntures d'ulleres recupera també la forma, però aprofitant la superelasticitat a més de la restitució lliure, tal com veurem en l'últim grup d'aplicacions.

Restitució forçada

Inclou aplicacions en què s'impedeix el canvi de forma de l'element amb memòria, la qual cosa genera una tensió. En seria un exemple ideal la restitució d'un anell sobre una barra rígida. En aquest cas hi ha una part de restitució lliure abans del contacte, però la funció primària de l'element amb memòria de forma és generar una tensió.

Els usos més importants d'aquest grup d'aplicacions dels aliatges amb memòria de forma són les juntes i acoblaments de tota mena. L'aplicació més important és, sens dubte, l'acoblament de tubs i canonades. Els avantatges que presenten els aliatges amb memòria de forma en aquest camp són realment significatius: el primer ús fora del laboratori fou acoblar les canonades del sistema hidràulic de l'avió de combat Grumman F-14. Aquesta innovació permetia un estalvi d'espai i una compacticitat impensables amb els mètodes tradicionals, i alhora una gran facilitat d'instal·lació. Més recentment, i aprofitant els avantatges comentats, aquesta mena d'acoblaments s'han introduït amb èxit en el món industrial i en la marina, a més de generalitzar-se en el que fou el seu camp pioner, l'aviació, on les canonades i acoblaments d'aliatges basats en el Ti representen un estalvi gens menyspreable de massa.

Igualment, existeix una gran varietat d'anells fixadors per a tota mena d'usos (enginyeria mecànica, aplicacions piezoelèctriques, dispositius militars, segells

hermètics, tecnologia espacial, etc.). El principal avantatge respecte d'altres sistemes subjectadors o acobladors, com la soldadura, rau en el fet que cal una temperatura considerablement menor a l'hora d'instal·lar-los, la qual cosa pot ser molt útil en moltes aplicacions. No hem d'oblidar el gran avantatge que pot arribar a representar la reversibilitat de l'acoblament, com també la gran resistència a la corrosió en el cas del Ni-Ti. També cal destacar la mida i el pes reduïts, la rapidesa i la facilitat d'instal·lació, la gran fiabilitat i la resistència a condicions de treball i ambients severes.

Un altre grup important d'aplicacions dins de la restitució forçada està format pels connectors elèctrics i electrònics, dels quals n'hi ha una gran varietat, que combinen les seves peculiars i excel·lents propietats mecàniques amb unes no menys bones propietats elèctriques.

Actuadors

També s'anomenen aplicacions productores de treball, ja que totes tenen en comú la generació d'un moviment contra una tensió. El cas ideal seria un filferro o una molla que eleva una determinada massa quan se l'escalfa. En funció de la massa, de les característiques mecàniques de l'element en qüestió i del tipus d'efecte memòria de forma (simple o doble), la molla, en refredar-se, farà que la massa baixi. Tanmateix, en general l'element actuator amb memòria de forma treballa contra una molla que el fa retornar a una posició determinada.

S'acostuma a dividir els actuadors en dos tipus: tèrmics i elèctrics. Aquests darrers són activats a través de corrent continu i se situen en el marc de la competència amb servomotors, solenoides o controladors hidràulics i pneumàtics. En comparació amb els elements que substitueixen, podem dir que són més simples de disseny, silenciosos, compactes i, en general, menys cars. Els actuadors tèrmics es controlen mitjançant canvis en la temperatura ambient, i normalment competeixen amb els bimetalls termostàtics. Als avantatges comentats, cal sumar-hi la capacitat de subministrar un gran moviment bruscat i sobtat, per la qual cosa la superioritat respecte dels bimetalls és notable.

Encara hi ha un tercer tipus d'actuador, d'escàs interès comercial, ja que el seu cost inicial és molt elevat i la fatiga fa que la seva vida no sigui viable més enllà dels 1.000 cicles, a més de tenir un rendiment molt baix (al voltant del 3%). Ens referim als anomenats motors de

calor, que transformen l'energia tèrmica en mecànica aprofitant propietats de l'efecte memòria de forma. La teoria no preveu gaire futur per a aquests dispositius, però successius avenços en la ciència i la tecnologia dels aliatges amb memòria de forma podrien convertir aquests motors en una alternativa real.

A més de les molles actuadores comentades anteriorment (que es basen en l'efecte doble memòria de forma o que treballen contra un altre suport i dels quals es pot fer un ús diferent al termostàtic), cal englobar en el grup d'actuadors un variat conjunt de dispositius que s'han generalitzat en l'automoció, la construcció, la valvuleria, la tecnologia espacial i militar, la detecció d'incendis, el condicionament d'aire, els fusibles mecànics i elèctrics, el control, la robòtica o la biomedicina. Per la seva extensió no exposarem un comentari detallat de les aplicacions concretes dins de cada camp.

Com a mostra de la previsible evolució dels aliatges amb memòria de forma, podem comparar un automòbil actual, en el qual només hi ha un parell de dispositius basats en l'efecte memòria de forma, amb un automòbil del futur pròxim, en els quals els mateixos fabricants preveuen introduir actuadors tèrmics i elèctrics en tots els seus sistemes bàsics (fins a un nombre d'aplicacions superior a vint, que reduiran el cost i incrementaran les prestacions).

Aplicacions superelàstiques

Són aplicacions que tenen l'efecte superelàstic com a propietat responsable de la seva funcionalitat. Són aplicacions de caire isotèrmic i impliquen l'emmagatzement d'energia potencial. Si bé molts sistemes AMF es poden comportar com a ressorts superelàstics de grans prestacions, el principal inconvenient d'aquest grup d'utilitats és l'estret rang de temperatures en què es pot observar l'efecte superelàstic.

Els usos més importants d'aquest grup d'aplicacions dels aliatges amb memòria de forma es troben en el camp de la biomedicina. La major part de les aplicacions superelàstiques comparteixen la seva funcionalitat amb aplicacions de restitució o actuadores (com exemple, les muntures d'ulleres superelàstiques, que a més de restituir per si soles petites deformacions poden recuperar la forma original quan s'escalfen). Les aplicacions biomèdiques no en són una excepció. N'hi ha una gran diversitat, i les expectatives futures n'auguren un increment

enorme. De fet, les innovacions en aquest camp són contínues. La biocompatibilitat del Ni-Ti, les seves propietats superelàstiques i les grans possibilitats que ofereix l'efecte memòria de forma en un sistema eminentment tèrmic com és el cos humà, fan idònia l'aplicació d'aquest aliatge amb memòria de forma. Tanmateix, altres sistemes, com el Cu-Zn-Al, no biocompatibles poden ser utilitzats en aplicacions biomèdiques, com ara dispositius ortopèdics, aprofitant bé la superelasticitat, la restitució o la producció de treball, o fins i tot una combinació de totes tres propietats.

Les aplicacions biomèdiques més importants són les plaques per a osteosíntesi (implantades en fractures d'ossos), els claus i les grapes emprats en traumatologia, els separadors vertebrals, implants de tota mena, agulles tipus Mammalok, filferros guia de diferents usos mèdics, instrumental artroscòpic, o material odontològic i d'ortodòncia, com els filferros correctors, la principal característica dels quals és la superelasticitat. Destaquen també en aquest camp en contínua expansió els stents autoexpandibles emprats com a elements reforçadors d'artèries i venes més o menys col·lapsades per pèrdua d'elasticitat o per pressió externa.

Utilització d'aliatges amb memòria de forma en l'enginyeria del disseny

Els models descriptius del procés de disseny generalment posen l'èmfasi en la importància de generar un concepte de solució en una etapa inicial del procés. D'aquesta manera quedaria reflectida la naturalesa del pensament en el disseny "la idea", o dit d'una altra manera, quedaria enfocada la solució. Aquesta idea de solució inicial se sotmet posteriorment a una anàlisi, avaluació, millora i desenvolupament exhaustius en base a diversos criteris prèviament plantejats i incorporats en "la idea". És evident que, per sort o per desgràcia, de vegades l'anàlisi i l'avaluació mostren fallades més o menys importants de "la idea" que fan necessària la rectificació o fins l'abandonament d'aquesta idea, amb la qual cosa es planteja la necessitat de generar una nova idea i tornar a començar el cicle. En aquest nou cicle assoleix una considerable importància la utilització de l'experiència adquirida per conduir el dissenyador cap a la que s'espera que sigui la direcció correcta, si bé sense garantia total d'èxit.

Si ens centrem en "la idea" de treball, el dissenyador crea diversos principis de treball basats en diferents

solucions tècniques com poden ser: solucions basades en consideracions hidràuliques, pneumàtiques d'efecte de memòria de forma, etc. A partir d'aquí se selecciona la millor idea en base als criteris previs plantejats en començar el procés de disseny. En aquest punt del procés de disseny, el dissenyador necessita fer una anàlisi preliminar. És important tenir en compte que l'anàlisi de la idea que utilitza materials amb memòria de forma no es pot portar a terme sense determinar prèviament les propietats del material, la forma i les dimensions de l'aliatge seleccionat. D'aquesta manera, per ser capaç d'analitzar el principi de treball en el qual l'efecte de memòria de forma és utilitzat, el o la dissenyador necessita incrementar considerablement el seu coneixement dels factors que controlen el comportament dels aliatges amb memòria de forma. Aquest fet no afavoreix de manera clara la utilització dels aliatges amb memòria de forma en el disseny enginyeril. Per obtenir la informació necessària, al dissenyador li cal recórrer a la investigació, la qual cosa requereix un temps i un cost elevats. Així, al dissenyador se li planteja el risc que la tecnologia basada en l'efecte memòria de forma no compleixi el principi de treball ideat. Aquest fet porta el dissenyador a evitar aquest risc utilitzant un principi de treball basat en una tecnologia convencional i, per tant, a desestimar la idea d'utilitzar aliatges amb memòria de forma.

Conclusió

En base al desenvolupament exposat, es planteja la necessitat de realitzar un treball coordinat i conjunt entre científics i enginyers de disseny. La idea és madurar la tecnologia dels aliatges amb memòria de forma, per a la qual cosa cal aquest esforç conjunt, que s'encaiminaria cap a les direccions següents:

- Estandardització de materials amb propietats estables i segures. Estandardització de mètodes d'assaig i d'unió d'aquests materials. Obtenció d'una base de dades que abraci des de materials fins a propietats, passant pels mètodes d'assaig i unió. Cal literatura que ofereixi descripcions detallades de desenvolupament de projectes i productes utilitzant aliatges amb memòria de forma.
- Reunions i congressos que involucrin dissenyadors i metal·lurgistes, en els quals es discuteixin i es comentin les necessitats que facilitaran l'ús dels aliatges amb memòria de forma.
- Cal un ventall complet de materials disponibles que abracin diferents rangs de temperatures de transformació.
- Cal el coneixement d'equacions constitutives que descriguin el comportament del material i en relacionin les diferents propietats termomecàniques. Aquestes equacions seran emprades com a eines bàsiques de disseny.
- Cal models de procediment de disseny correctes en la utilització d'aliatges amb memòria de forma.
- Cal el desenvolupament de sistemes adaptatius que mesurin els canvis en les propietats del material o en el comportament del producte.

Bibliografía

- A. ÖLANDER. *An electrochemical investigation of solid cadmium-gold alloys*. J. Am. Chem. Soc. 56, p 3819 (1932).
- GRENNIGER, A. B, and MORADIAN. V. G. *Strain deformation in metastable beta copper Zinc and beta copper-tin alloys*. Trans AIME, 128, p 337 (1938).
- KURJUMOV G. V, and KHANDROS L. G. Doki, *Akad. Nauk SSSR*, 66, p 211 (1949).
- W. J. BUEHLER, J. W. GILFRICH and R. C. Willey. *Effect of low temperature phase changes on the mechanical properties of alloys near composition TiNi*. J. Appl. Phys. 34, p 1475, (1963).
- PERKINS, J. *Residual stresses and the origin or reversible (two way) shape memory effects*. Scripta Metall. 8, p 1469 (1974)
- M. AHLERS, G. BARCELÓ and R. RAPACIOLI. *A model for the rubber-like behavior in CuZnAl martensites*. Scripta Metall. 12, p 1075, (1978).
- J. VAN HUMBEECK and L. DELAY. *The evolution of the damping characteristics of CuZnAl martensitic alloys with time and temperature. The peaking effect*. Journal de Phys. Coll. C 4 Supl. Au n° 12 tome 43, p 691 (1982).
- AERNOUDT, J. VAN HUMBEECK, L. DELAEY AND W. VAN MOORLEGHEM *in the science and technology of shape memory alloys. Copper-base shape memory alloys: alloys for tomorrow*. Ed. V. Torra. p 221 (1987)
- B. G. MELLOR, *in the science and technology of shape memory alloys. Engineering properties of shape memory alloys*. Ed. V. Torra. pp 334-339 (1987)
- R. STALMANS, J. VAN HUMBEECK AND L. DELAY. *The two way memory effect in copper-based shape memory alloys. Thermodynamics and mechanisms*. Acta Metall. Mater. 40 n° 11, p 2921 (1992).
- TSUZAKI, Y. NATSUME, Y. KUROKAWA and T. MAKI. *Improvement of the shape memory effect in FeMnSi alloys by the addition of carbon*. Scripta Metall. 27, p 471 (1992).
- H. C. LIN, S. K. WU, and Y. C. Chang. *Damping characteristics of TiNi shape memory alloys*. Metall. And Mater. Trans. A, 24, p 2189 (1993).
- T. XIAO AND G. P. JOHARI AND C. MAI. *Time dependence of internal friction and shape change in CuZnAl shape memory alloys*. Metall and Mater. Trans. A. 24, p 2743 (1993).
- M. AHLERS. *Phase stability of martensitic structures*. Journal de Phys IV, Coll. C8, Suppl. Au Journal de Phys. III vol 5, p 21 (1995).
- J. W. CHRISTIAN, G. B. OLSON, M. COHEN. *Classification of displacive transformation: What is a martensitic transformation?*. Journal de Phys IV, Coll. C8, Suppl. Au Journal de Phys. III vol 5, p 3 (1995).
- J. M. GUILLEMANY and J. FERNÁNDEZ. *Mechanisms of the two way shape memory effect obtained by stabilised stress induced martensite*. Journal de Phys. IV. Coll. C 5 Supl. Au Journal de Phys III vol 5, p 355 (1995).
- H. C. LIN, S. K. WU, and Y. C. *Damping characteristics of Ti50Ni49.5Fe0.5 and Ti50Ni40Cu10 ternary shape memory alloys*. Chang. Metall. And Mater. Trans. A. 26, p 851 (1995).
- E. C. LOVEY, P. L. RODRIGUEZ, J. MALARRIA, M. SADE AND V. TORRA. *On the origin of the two way shape memory effect in CuZnAl alloys*. Journal de Phys. IV. Coll. C 2 Supl. Au Journal de Phys III vol 5, p 287 (1995).
- T. XIAO AND G. P. JOHARI. *Mechanisms of internal friction in a CuZnAl shape memory alloy*. Metall and Mater. Trans. A. 26, p 721 (1995).
- J. DUTKIEWICZ, J. PONS AND E. CESARI. *Stabilization and two way memory effect in CuAlMn transformin at elevates temperatures*. Journal de Phys. IV. Coll. C 5 Supl. Au Journal de Phys III n° 11, p 287 (1997).
- Y. LIU AND J. VAN HUMBEECK. *ON THE DAMPING BEHAVIOUR OF NiTi SHAPE MEMORY ALLOYS*. Journal de Phys. IV. Coll. C 5 Supl. Au Journal de Phys III n° 11, p 519 (1997).
www.cerer.army.mil/fl/seg/sma.html