

Új anyag – új világ Alakmemória effektus

Emlékszem, az első személyi számítógép az 1980-as években jelent meg, a mobiltelefon 1988-ban (zsebben nem is tudtuk hordani, nagyon nehezek voltak), és csak 1993 után küldhettünk sms-t. Napjainkat azonban nemcsak az okostelefon, az intelligens számítógép, hanem már az intelligens anyag is természetszerűen kitölti. Talán idegennek tűnik ez a megnevezés, de valóban intelligensnek nevezünk egy anyagot, ha válaszolni tud a környezet változásaira, nagy az alkalmazkodó képessége, és ha környezetét csak a lehető legkisebb mértékben szennyezi. Ebbe az anyag típusba sorolhatók a különböző fémötvözetek, a kerámia, a rugalmas műanyag, valamint a nagy folyadék tartalmú gél is. Megdöbbenő az a közös tulajdonságuk, amelyet „emlékezőképességnek” nevezünk, hiszen egy környezeti inger hatására, mint például a hő, a fény, vagy az elektromos és mágneses tér, változtatni tudják alakjukat, vagyis előhívható a memóriájukba tárolt eredeti alakjuk. Ezt a tulajdonságot nevezük *az intelligens anyag alakmemória effektusának*. Céлом a Fe-C ötvözetek példáján keresztül bemutatni az alakemlékező anyagok viselkedését, sokoldalú gyakorlati alkalmazását, akár a fogszabályozó ív működését is, amely e tulajdonság alapján működik, és nagyon sokan használják.

Történelmi áttekintés

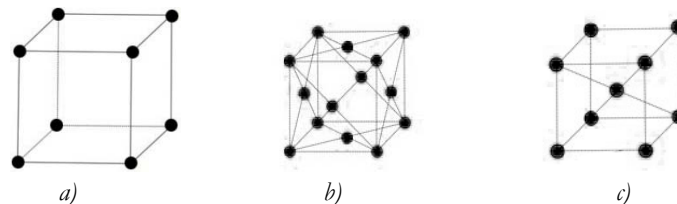
1932 – Arne Ölander, svéd fizikus az alakmemória jelenség első megfigyelője, véletlenül fedezte fel az Au-Cd (arany-kadmium) ötvözetek tanulmányozásánál.

1962 – William J. Buchler és társai az USA haditengerészeti tüzérségi kutatóintézetében (Naval Ordnance Laboratory) egy amerikai atom-tengeralattjáró építésén dolgoztak, ahol nagy szilárdságú és tökéletesen rozsdamentes nikkel-titán ötvözetű lemezeket tanulmányoztak, és azokkal kísérleteztek. Kiderült, hogy a hegesztés, hevítés hatására ezek az anyagok nagyon sok tulajdonságukat képesek megváltoztatni. Ekkor nevezték el a Ni-Ti ötvözetet nitinolnak (Ni-nikkel, Ti-Titán, N-Naval, O-Ordnance, L-Laboratory). A nitinol a mai napig a legismertebb alakemlékező ötvözet. Kezdetben nehézséget jelentett az ötvözetek megolvasztása, feldolgozása és megmunkálása, ezért csak sokkal később sikerült fejleszteni és forgalomba hozni.

Betekintés az anyagba, szilárd testek, fémek, ötvözetek

Az alakemlékező memória egy különleges mechanikai tulajdonság. Mélyebb betekintéssel az anyagba könnyen megérthető létrejötté, majd sokoldalú felhasználása. A legtöbb anyag *szilárd*, folyadék vagy gáz halmazállapotú, viszont az egyes halmazállapotokon belül különböző fázisállapotban lehetnek. A szilárd anyag lehet *amorf* vagy *kristályos*. Az amorf anyag atomjai rendezetlenül halmozódnak egymásra. Ilyen például minden befagyott folyadék, az üveg, a kátrány. A kristályos anyag atomjai a kristályrács csomópontjaiban helyezkednek el. Vannak anyagok, amelyek mindkét állapotban megtalálhatóak: pl. a szén amorf alakban kocsz, de jól ismerjük kristályos állapotban is értékes gyémántként. (A forgalomba kerülő gyémánt nagy része India, Dél-Afrika és Oroszország néhány lelőhelyéről származik. Ajánlom elolvasásra Verne Gyula 1884-ben írt A Dél csillaga című regényét). Kristályos halmazállapotban létezik ionos rács, molekula-

rács, atomrács, *fémcs rác*. A fémeknek kristályosodási képességük van, ha olvadt állapotban találhatók, hűtés hatására, köbös kristálycsírák jelennek meg. A legjellemzőbb kristályalakzatok a következők (1. ábra):



1. ábra

- a.) *egyszerű köbös* térrács, alapformája *kocka*,
- b.) *lapközepes (lapcentrált) köbös* térrács, egy fémion van a kocka lapjainak középpontjában is,
- c.) *térközepes (tércentrált) köbös* térrács, a kocka középpontjában is van egy fémion.

Ha a kristályosodási folyamat lassú, kevés kristályosodási központ alakul ki, a kristálycsírák nagyra nőnek, durva szemcsés lesz a szerkezet. Az ilyen szerkezetű fémek ridegek, könnyen törnek. Gyors lehűlés esetén viszont, sok a kristályosodási központ és finom szemcsés szerkezet jön létre. Egy kristály jól meghatározott, ha egyféle atomból épül fel, de ha keverékekből áll, *ötvözet*ről beszélünk. *Tiszta fémeket* csak ritkán használnak. Ötvözésnek nevezzük, amikor adott tulajdonságok elérése érdekében tudatosan, idegen atomokat viszünk be egy, csak saját fajtájú atomokat tartalmazó rendszerbe. Az ötvözet legalább két kémiai elemből áll, amelyek közül az egyik fém kell, hogy legyen.

A vas-szén ötvözet, az acél, alakemlékező ötvözet

Melyek azok az ötvözetek, amelyekben kimutatható *adott feltételek mellett az alakemlékező* tulajdonság? Például az Au, Ag, Fe, Cu, Ni, Ti alapú ötvözetek.

A *vas (Fe)* és *szén (C)* ötvözete (*acél*). A vas (Fe) az egyszerű, lapközepes és térközepes köbös rác szerkezetben egyaránt megtalálható. A Föld szilárd kérgében 4,65 %-ban fordul elő. Erdélyben a vajdahunyadi, resicai bányákban bányászták, a nyersvasat pedig széntüzelésű hutákban Torockón és Szentkeresztbányán állították elő. A tiszta vas olvadáspontja 1538 °C. Leggazdaságosabb ötvöző anyaga a szén. A szén szilárdító szerepet tölt be, meggátolva a diszlokációt a vas atomok kristályrácsában, hogy elcsúszzanak egymáson. A vas-szén ötvözetekre három fázis jelenléte a jellemző: 1. *fázis* – igen kis széntartalmú ötvözet, 2. *cementit fázis* – rendkívül szilárd és nagyon rugalmas (érdemes utána olvasni a damaszkuszi acél titkának, ebből készítették az arab harcok kardját már az 1095–1291 évek keresztresztes hadjáratainak idején, www.kislexikon.hu/damaszkuszi_acel.html) 3. *ausztenit fázis*. Az ausztenit egy szilárd vas-szén ötvözet, lágy, rendkívül jól alakítható, nem mágnesezhető, de csak 912 °C felett stabil, egészen 1394 °C-ig. Ez azt jelenti, hogy e hőmérsékleti intervallumban a kristályrács lapközepes köbös térrács (nevét Sir William Chandler Roberts Austenről kapta, 1843–1902).

Hogyan alakul ki az alakemlékező ötvözet?

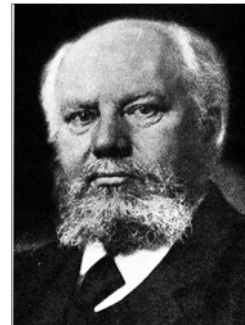
Ha az 1,7% alatti szénttartalommal rendelkező acélt hevítjük, magas hőmérsékleten stabil szerkezetű ausztenit fázisunk lesz. Ennek a hőmérsékletnek az értéke függ a szénttartalomtól is. A stabilitás hőmérsékletéhez viszonyítva, ha 20-50 °C-kal fölmelegítjük az ausztenitet, majd nagyon rövid ideig ezen a hőn tartjuk, utána pedig gyorsan lehűtjük, az eredeti köbös rácshoz viszonyítva rácstorzulást hoztunk létre. Gyors hűtéssel egy új, úgynevezett *martenzites* szövet-szerkezetűvé alakítottuk az ausztenitet. Általánosan a martenzites átalakulás egy olyan deformációval járó folyamat, mely során megváltozik az anyag ráctípusa. A hűtésnek azért kell gyorsan történnie, hogy ne legyen diffúziós atommozgás az anyagban, mert csak így tud létrejönni egy elcsavart kocka alakú kristályszerkezet. Ez az acél szerkezetében lévő szénatomok miatt alakul ki. (Az elnevezés Adolf Martens (1850–1914), német mérnök nevéből származik.)

Mivel az átalakulás diffúziótól mentes, ebből az következik, hogy a kezdeti ausztenit és a keletkező martenzit fázis között nincs koncentráció különbség. A martenzites átalakulás gyors, megközelíti a hangsebességet. Ebben az állapotban alakítjuk, formáljuk az ötvözetet. Például, ha kinyújtunk egy ilyen martenzites állapotban lévő acél ötvözetből készült rugót, majd hajszáritóval melegítjük, és a hőmérsékletet az alakítási hőmérséklet fölé növeljük, visszanyeri deformálatlan alakját. Továbbá szuperrugalmasság akkor jelentkezik, ha az ötvözet hőmérsékletét sokkal az alakítási hőmérséklet fölé emeljük. Ekkor az ötvözet elképesztő rugalmasságot mutat, egy közönséges fémnél tízszer, vagy akár harmincszor könnyebben hajlik.

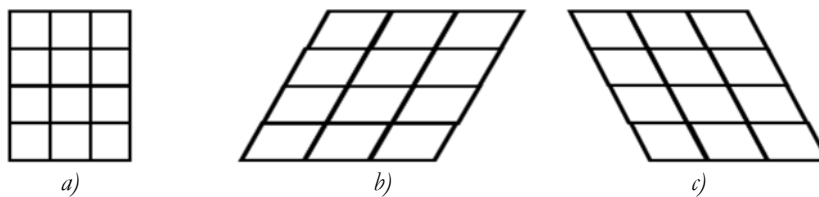
Az ehhez hasonló, diffúziómentes, a kristályrác szerkezetét megváltoztató átalakulásokat martenzites átalakulásnak nevezzük akkor is, ha nem vasötvözetekben mennek végbe. Az ilyen anyagok tulajdonsága az alakmemória effektus, ami a martenzites átalakulásokhoz kapcsolódó legérdekesebb és legfontosabb jelenség. Az átalakulás megfigyelhető alakváltozással jár. Az átalakulások a 2-4. ábrákon követhetőek.



1. kép
Sir Williams C.R. Austen

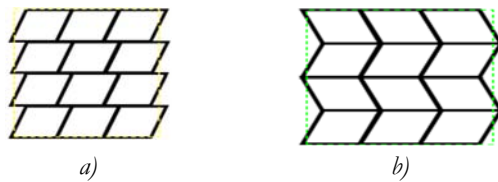


2. kép
Adolf Martens



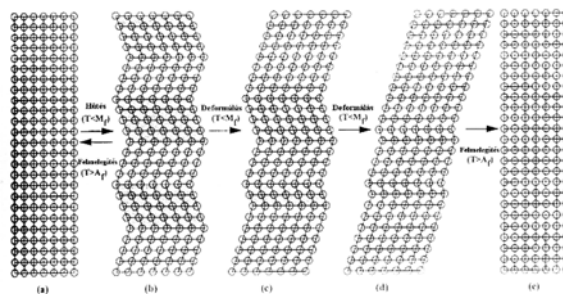
2. ábra

a) ausztenit kristály b) és c) azonos szerkezetű de különböző irányítású martenzitkristályok



3. ábra

A martenzitképződés során belső feszültségek alakulnak ki, javítani lehet: rácsimariáns csúsztatással, ez rétegződési hibák kialakulásával jár (a), vagy ikerkristályok (b) képződésével



4. ábra

Az ausztenit (a) hűtés során martenzitté (b) alakul. Az anyagot deformáljuk (c és d), majd ha megszűnik az erőhatás, az így kialakult alakváltozás megmarad. Felmelegítve újból visszaalakul az ausztenit fázis (e).

Következtetés: Az alaklélező ötvözetek tehát fémes anyagok, melyek a hőmérséklet változásának hatására képesek előre meghatározott alakot felvenni. Alacsonyabb hőmérsékleten képlékenyen alakíthatók, magasabb hőmérsékleten visszanyerik alakítás előtti alakjukat.

Fontosabb alakmemória ötvözetek:

CuZn, CuZnAl, CuZnSn, CuAlBe, CuAlNi, FeMnSi, NiMnGa, TiNi, TiNiFe, TiNiCu, TiNiCo, TiNiNb. Kereskedelmi forgalomban csak három kapható: Ni-Ti, Cu-Zn-Al és Cu-Al-Ni.

Számtalan esetben az alaklélező jelenség és a szuperhálékonyosság együttesét használják fel.

Alaklélező műanyagok

Jellemző rájuk, hogy kicsi a sűrűségük, ezért könnyen feldolgozhatóak, akár 300–400%-os rugalmas alakváltozásra is képesek.

Intelligens folyadékok

A folyadékban zselészerű részecskék, kolloidok találhatóak. Ezek elektromos és mágneses tulajdonsága kihat a folyadékra, mert az elektromos vagy a mágneses tér erővonalainak irányába rendeződnek. Ha megszűnik ez a tér, akkor visszaáll az eredeti állapot.

Intelligens gélek

A szilárd és folyékony halmazállapot között találhatók. Könnyen deformálhatóak, nagy a folyadéktartalmuk, ugyanakkor a laza térhálós szerkezet megakadályozza a folyadék spontán kifolyását, és a rendszer összeomlását. A gél megfelelően kialakított feltételek mellett nyújtható, hajlítható, összehúzható.

Az alakemlékező effektus alkalmazásai

Az alakemlékező anyagok alkalmazásait szinte lehetetlen hiánytalanul összegyűjteni. Célom csupán egy pár gyakorlati alkalmazás bemutatása, hiszen ennél több a felhasználási terület. Az egészségügyben, valamint a fogászat területén ma szinte kizárólagosan Ti-Ni ötvözetet használnak.



5. ábra

Fogszabályozó ívek



6. ábra

Csontnyújtó készülék

A fogszabályozó ív emlékező fémből készül, gyárilag már martenzites állapotban található, kialakított ideális formája van, a fogakhoz rögzítik és a száj hőmérsékletére melegedve, próbálja visszanyerni eredeti alakját, közben mozgatva a fogakat. Az 5. ábra nagyon jól szemlélteti a behelyezéskor, valamint kezelés után a fogak állapotát.

A csontnyújtó készülék (6. ábra) a megrövidült csontok nyújtására szolgáló eszköz. A rövidülés lehet veleszületett eltérés vagy sérülés, betegség miatt is bekövetkezhet. A készülék kezdetben martenzites állapotban található, behelyezés után a test hőmérsékletére melegszik, és lassan kitér, közben nyújtja a csontokat.



7. ábra

Értágító sztentek



8. ábra

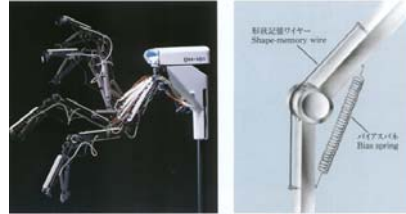
Katéter vezetőszál

Az értágító sztentek az összeszűkült, eldugult erekben a szűkületet szüntetik meg (7. ábra). A kis átmérőjű ötvözet-gyűrűt az erekbe juttatják, az megakad az összeszűkült helyen, felveszi a test melegét, kitér, és szétfeszíti az összeszűkült részt.

A katéter-vezetőszál (8. ábra) az érszűkületek, érelzáródások kimutatására alkalmazott katéteres érfestés fontos része. A megszárt érbe egy tűn keresztül vezető drótot tolnak, amelyre egy katétert húznak. A vezető drótot eltávolítva kontrasztanyagot fecskendeznek be nagy nyomással. Mágnesesrezonancia-vizsgálat esetén az erős mágneses tér nem mágnesezi, így „nem mozdítja” a nitinol betétet.



9. ábra
Szemüvegkeret



10. ábra
Robottechnika

A szemüvegkeretek kialakításakor (9. ábra), az alakemlékező effektus mellett felhasználják az ötvözet szuperelasztikusságát is. A szemüvegkeret alakemlékező ötvözetből készül, és ha deformálódik, a keretet meleg víz alá helyezve visszanyeri eredeti alakját. Ugyanígy az ilyen anyagból készült telefonantennát ujjunk köré csavarhatjuk.

A robottechnika előrehaladása során kifejlesztették a robotujjakat, amelyek áramgenerátoros fűtés hatására kiegyenesednek, majd áramoltatott meleg levegő hatására visszagömbülnek (10. ábra).

Az öngyógyuló anyag legfőbb tulajdonsága, hogy a sérült felületei maguktól, vagy külső rásegítéssel meggyógyulnak, megjavulnak (sokszor láthatjuk, hogy az élő fa is képes önmagát megerősíteni azokon a helyeken, ahol sérülésnek volt kitéve). Ezeket az anyagokat nagy sikerrel használják az autóiparban, például az „intelligens” festékek alkalmazásával, amelyekről napfény hatására a karcolások eltűnnek.

Az űrkutatásban is alkalmazzák az alakemlékező anyagokat. Ilyen ötvözetből készítik az űrhajó napelem tartó szerkezetét, amely összehajtván kis térfogatban elfér, majd a világűrben a nap sugárzása felmelegíti, és a napkollektor kiterül.

A divat világában is találkozunk alakemlékező ötvözet-szálat tartalmazó szövetekkel, amelyekben az ötvözetszálak vasalás közben a meleg hatására kiegyenesednek, kismítva minden gyűrődést. A rendkívüli hajlékonyságot mutató szuperrugalmas anyagok a női öltözködés több területén kedveltek: melltartók merevítő betétei, speciális hajformáló eszközök, cipőtálpak stb.

Rohanó új világunk tele van titkos, nagyon érdekes újdonságokkal, amelyek közé tartozik az intelligens anyag is. Remélem, ezzel a cikkel felkeltettem az érdeklődésedet a különleges anyagok kutatása iránt.

Irodalom:

1. Dobránszy János, Magasdi Attila: *Az alakemlékező ötvözetek alkalmazása, Jövők anyagai, technológiái*, 134. évfolyam, 11-12. szám, 2001.
2. Zsoldos Ibolya: *Alakemlékező ötvözetek*, www.sze.hu/~zsoldos/ ... / *Alakemlékező ötvözetek*
3. Juhász András, Tasnádi Péter: *Érdekes anyagok és anyagi érdekségek*. Akadémiai Kiadó Bp. 1992.
4. www.dekorferro.hu/femipar/index.php/femek-kristalyszerkezete
5. Artinger István, Kator Lajos, Zija György: *Új fém szerkezeti anyagok és technológiák*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1974.

6. Szakács György, Dévény Miklós: *Keményfémek és szuperkemény anyagok alkalmazása*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1978.
7. Dr. Daróczi Lajos: *Martenzites átalakulások és alakmemória effektus*- Szilárdtest Fizika Tanszék – Debrecen – tudományos előadás, 2015.
8. Bicsak Jenő: *Vasalapú szerkezeti anyagok*, Terminológia, Kolozsvár, 2002.

Dávid Anna fizikatanár,
Bolyai Farkas Elméleti Líceum, Marosvásárhely

Az inverz kinematika

II. rész

A Jacobi-mátrix

Ha csődöt mond az analitikus megoldás (kettőnél több csont esetén), színre lépnek a hierarchikus mozgást megoldó iteratív megoldások. Ebben az esetben az effektortól iterálunk az alapig, és optimalizálunk minden egyes ízületet, hogy az utolsó olyan közel kerülhessen a célponthoz, amennyire csak lehet. Nyilván ugyanaz a megoldás jó több inverz kinematika feladatra is, ám ezek a megoldások rendkívül költségesek.

Ha átfogalmazzuk a feladatot több csont esetére, akkor a következőket kapjuk:

Ismert: Effektor koordinátái

$$e = [e_1 e_2 \dots e_N]$$

Ismeretlen: Szabadságfok (DOF)

$$\theta = [\theta_1 \theta_2 \dots \theta_M]$$

Vagyis meg kell oldanunk a következő egyenletet:

$$\theta = f^{-1}(e)$$

A problémák itt is ugyanazok. Az f nemlineáris, az inverz függvény kiszámítása nem triviális, másrészt nem egy-egy értelmű: több állapothoz is tartozhat ugyanaz a végaszerv-helyzet.

Gondoljunk bele, hogy hányféleképpen érinthetünk meg az ujjbegyünkkel egy falon lévő pontot...

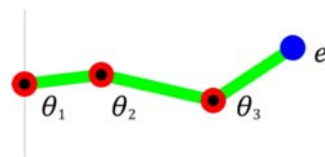
Az inverzió nemlinearitásával és többértelműségével egy **iterációs** eljárás segítségével birkózhatunk meg, amely a lehetséges megoldások közül egyet állít elő.

Az iteráció alapötlete: ha egy t időpillanatban ismerjük az effektor helyzetét, akkor ebből következtethetünk a $t + \Delta t$ időpontban érvényes helyzetre.

Ha Δt kicsiny, akkor a nemlineáris függvényt megközelíthetjük az érintőjével (lineáris approximáció).

Az első, inkább matematikainak mondható megoldás a Jacobi-mátrixot használja.

A Jacobi-mátrix egy vektorértékű függvény elsőrendű parciális deriváltjait tartalmazó mátrix.



10. ábra
Egy három csontból álló rendszer