

## ALAKEMLÉKEZŐ ÖTVÖZETEK

### Cél

A nikkeltitán ötvözetek példáján keresztül megismerjük az alakemlékező ötvözetek viselkedését és alkalmazásait. A kristályszerkezet és a fázisátalakulások megismerésével megértjük az alakemlékező viselkedés fizikai magyarázatát, betekintést látunk a hőkezelés alapjaiba. Példák segítségével áttekintjük a műszaki alkalmazásba vonás lehetőségeit.

### Követelmények

Ön akkor sajátította el a tananyagot, ha képes:

- megfogalmazni az alakemlékező fémötvözetek viselkedésének definícióját,
- ismertetni jellemzői alapján a nikkeltitán alakemlékező ötvözetek szerkezetét, fázisátalakulásokat,
- megkülönböztetni az alakemlékező viselkedés fajtáit: egyutas, kétutas alakemlékező viselkedés, szuperképlékenység,
- meghatározni a hőkezelési célokat és módokat, hevítési és hűtési módszereket,
- példák alapján bemutatni az alapvető műszaki alkalmazásokat.

### Időszükséglet:

A tananyag elsajátításához körülbelül 90 percre lesz szüksége.

### Kulcsfogalmak

- kristályszerkezet
- fázisátalakulás
- alakemlékező viselkedés
- szuperképlékenység
- hőkezelés
- aktuátorok
- martenzit, ausztenit
- hiszterézis

### 1. Rövid történet

**Tevékenység:** Az alábbi bekezdés alapján jegyezze fel az emlékező fémötvözetek alkalmazásainak főbb állomásait.

Az alakemlékező hatást egy svéd fizikus, Arne Olander fedezte fel az arany-kadmium ötvözetekben, 1932-ben. Az ötvözet hűtés során deformálódik, azután melegítés hatására visszanyeri az eredeti alakját. 1958-ban a brüsszeli világkiállításon terhelt tömeg ciklikus emelésének a példáján mutatták be az alakemlékező hatást. Az USA Naval Ordnance

Laboratóriumában 1961-ben fedezték fel az alakemlékező hatást nikkeltitán ötvözeteken. A felfedezés véletlenül történt a nikkeltitán ötvözetek hőtechnikai és korróziós vizsgálatainak közben. A nikkeltitán ötvözeteket ezért Nitinol-nak nevezték el, a név utolsó 3 betűje a Naval Ordnance Laboratórium kezdőbetűiből származik.

Intenzív kutatások indultak meg olcsó, egyszerű előállítási technológiák kifejlesztésére, valamint műszaki alkalmazások keresésére. 1970-ben jelentek meg a kereskedelmi forgalomban a Nitinol termékek. Az első eszközök a méretváltozást használták ki, pl. reteszekben, kuplungokban, vagy elektromos csatlakozókban való alkalmazással. Később megjelentek az alakemlékező hatáson alapuló aktuátorok. A környezeti hőmérséklettel kontrollált szelepek, tengelykapcsolók voltak az első dinamikus alkalmazások, később kifejlesztették a robotokban alkalmazott aktuátorokat is. Ma is folyik a kutatás egyre kifinomultabb alkalmazások keresésére.

(Az alkalmazásokról az utolsó, 11. pontban írok, ott vannak képek is.)

## 2. Az alakemlékező viselkedés anyagszerkezeti okai

### Tevékenység:

- Jegyezze meg, mit értünk alakemlékező ötvözet alatt!
- Gyűjtse ki és jegyezze meg a kereskedelemben kapható alakemlékező ötvözetrendszereket!

Az alakemlékező ötvözetek a fém anyagoknak az a csoportja, amelyek képesek egy előzetesen definiált alakot ismételt felvenni megfelelő hőfolyamatok hatására. Több fajta alakemlékező ötvözet létezik pl. az Au-Cd, Ag-Cd, Cu-Al-Ni, Cu-Sn, Cu-Zn-Al, In-Ti, Ni-Al, Ni-Ti, Fe-Pt, Mn-Cu és Fe-Mn-Si, de ezek közül kereskedelmi forgalomban csak három kapható: Ni-Ti, Cu-Zn-Al és Cu-Al-Ni.

### Tevékenység:

- Tekintse meg a tananyaghoz mellékelt video anyagokat! Figyelje meg az alakemlékező fémuzaloknak a hőhatásra (meleg víz, meleg levegő) történő drasztikus alakváltozását!
- Saját szavaival fogalmazza meg, milyen átalakulás megy végbe az alakemlékező fémek szerkezetében!
- Gyűjtse ki és jegyezze meg a hevítési-hűtési ciklus során jellemző átalakulási hőmérsékleteket!
- Saját szavaival fogalmazza meg, miért és hogyan képesek az alakemlékező ötvözetek munkavégzésre!

Videók: 3 db mellékelt videoklipp, plusz két hivatkozás a youtube-ról.

[http://www.youtube.com/watch?feature=player\\_detailpage&v=fsBHF\\_j2FJ4](http://www.youtube.com/watch?feature=player_detailpage&v=fsBHF_j2FJ4)

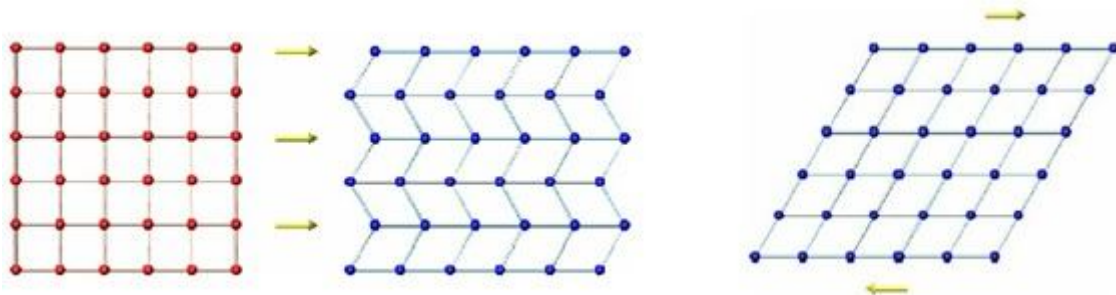
[http://www.youtube.com/watch?v=231O7jlgwXl&feature=player\\_detailpage](http://www.youtube.com/watch?v=231O7jlgwXl&feature=player_detailpage)

Az alakemlékező ötvözetek különböző terhelések hatására alakváltozást szenvednek. Ez az alakváltozás azonban alapvetően különbözik a hagyományos fémötvözetek esetében jól ismert hőtágulás, vagy a húzó, nyomó terhelések által okozott alakváltozástól az alábbiak miatt:

- Az alakváltozás folyamata az alakemlékező ötvözetek anyagszerkezetében a kristályszerkezet átrendeződésével, azaz fázisátalakulással magyarázható.
- Kisebb terhelés hatására is drasztikus hosszváltozás, vagy más alakváltozás váltható ki.
- Az alakváltozás nem vezet az alakemlékező ötvözet károsodásához, sőt, az alakemlékező ötvözet ismételten (több tízezerszer vagy akár több milliószor) képes elviselni drasztikus alakváltozást az anyag károsodása nélkül.

A tananyaghoz mellékelve találunk néhány videót az alakemlékező viselkedés kísérletekkel való demonstrálására: Video1.avi, Video2.avi, Video3.avi.

Az alakemlékező hatás a kristályszerkezetben hőmérsékletváltozással és mechanikai terheléssel kiváltott átrendeződés, azaz fázisátalakulás következménye. Az alacsony hőmérsékleten stabil fázis a martenzit, a magas hőmérsékleten stabil fázis az ausztenit. Azt a hőmérsékletet, ahol a fázisátalakulás történik, átalakulási hőmérsékletnek nevezzük. Az 1. ábra egyszerűsített modellen mutatja a fázisátalakulás során a kristályszerkezet átrendeződését.



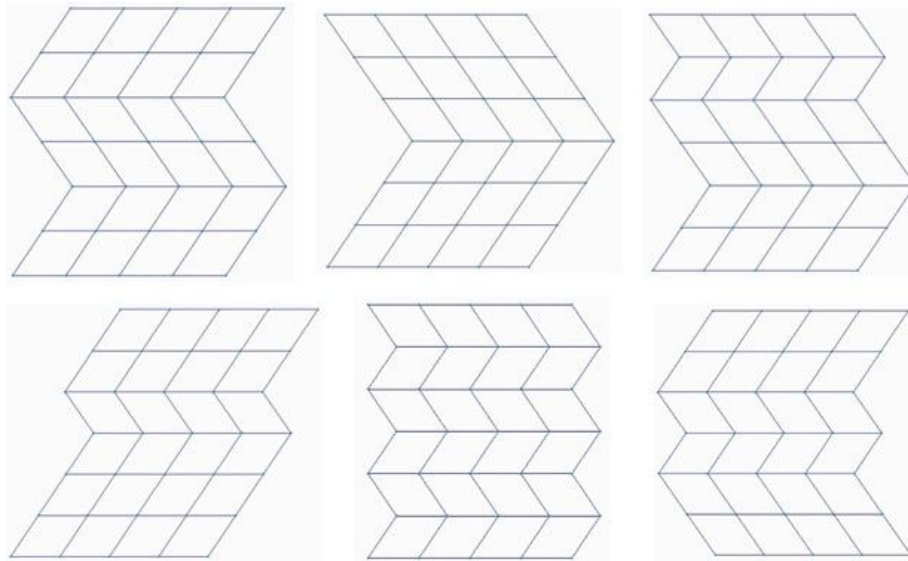
**1. ábra Alakemlékező ötvözetek fázisátalakulása**

(fig\_2\_2\_1.jpg)

A magasabb hőmérsékleten stabil ausztenit fázisban a kristályszerkezet szimmetrikus, a köbös elemi cellák szögei merőlegesek, (1. ábra, bal oldali rész). Hűtés során, az átalakulási hőmérsékleten martenzites fázis alakul ki, a kristályszerkezet átrendeződik, az elemi cellák szögei nem  $90^0$ -osak (1. ábra, középső rész). Ez a martenzites átalakulás különbözik az acéloknál megszokott martenzites átalakulástól. Az ausztenit többféleképpen is át tud alakulni martenzitté, ugyanakkor a martenzit csak egyféleképpen alakulhat át ausztenitté. Ezt kristályszerkezeti modell segítségével tudjuk megérteni. A szomszédos rétegek, az úgynevezett ikerkristály rétegek (az ábrán egymás feletti két réteg) orientációja a martenzites kristályszerkezetben kétféle lehet: vagy ellentétes, mint ahogyan az 1. ábra középső részén látjuk, vagy pedig azonos lesz az orientáció, mint ahogyan az 1. ábra jobb oldali részén látjuk.

Az ikerkristály rétegek különböző orientációi miatt a martenzit kristálynak többféle változata lehet. A 2. ábrán ikerkristály rétegből álló egyszerűsített modelleket látunk. Az orientációk különböző lehetőségei miatt különböző alakzatok állhatnak elő ugyanazon rétegszám esetén.

A makroszkopikus méretű anyagokban az ikerkristály rétegek száma óriási, ennek megfelelően a különböző orientációk miatt adódó variációk száma, azaz a martenzit kristály alakja a legkülönbözőbb lehet.



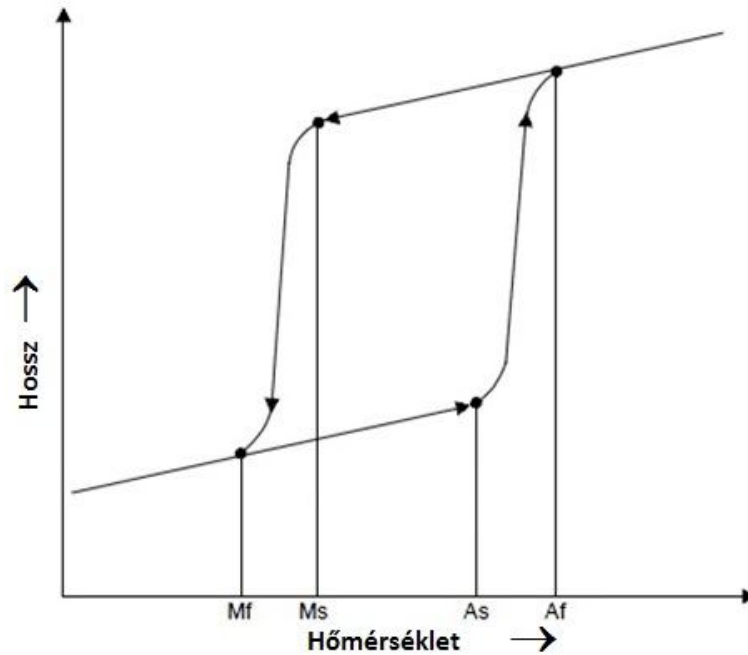
**2. ábra Különböző martenzit kristály alakzatok**

(fig\_2\_2\_2.jpg)

A kristály orientációt a martenzites átalakulás során alkalmazott külső terheléssel lehet befolyásolni. Tapasztalat szerint, ha egy adott hevítés-hűtésből és mechanikai terhelésből álló ciklust többször ismételnék, akkor egy adott ciklusszám után egy speciális belső feszültségeloszlás alakul ki, amely a későbbiekben mindig ugyanazt a martenzites átalakulási változatot (az ikerkristály rétegeknek ugyanazon orientációs elrendeződését), azaz ugyanazt az alakot biztosítja. Ilyenkor mondják azt, hogy az anyagot betanították.

Az alakemlékező ötvözetek alkalmazásainál sokszor azt a fontos jelenséget használják ki, hogy amikor a martenzites szerkezetű ötvözetet felmelegítik az átalakulási hőmérsékletre, a szerkezet felveszi az eredeti köbös formát (1. ábra, bal oldali rész), eközben azonban erő kifejtésére, munkavégzésre képes.

Egy alakemlékező ötvözetből készült huzal jelleggörbéje látható a 3. ábrán.



3. ábra Alaklélező ötvözet hosszváltozása hevítés, hűtés esetén  
(fig\_2\_2\_3.jpg)

Négy jellemző hőmérséklet olvasható le:

- az ausztenitképződés kezdetének hőmérséklete:  $A_s$ ,
- az ausztenitképződés befejezésének hőmérséklete:  $A_f$ ,
- a martenzitképződés kezdetének hőmérséklete:  $M_s$ ,
- a martenzitképződés befejezésének hőmérséklete:  $M_f$ .

Az alaklélező viselkedés jelleggörbéje nem lineáris, és jellemző a hiszterézis hurok jelenléte. A kristályszerkezet megváltozása termodinamikailag nem reverzibilis folyamat. Amikor melegítünk, a folyamat az alsó görbe szerint megy végbe:  $A_s$  hőmérsékleten indul meg az ausztenit képződés, az  $A_f$  hőmérsékleten már az anyag 100%-a ausztenit. A hűtés folyamatát a felső görbén követhetjük végig:  $M_s$  hőmérsékleten indul meg a martenzit képződés, az  $M_f$  hőmérsékleten már az anyag 100%-a martenzites. A hiszterézisnek köszönhetően az ausztenit képződés és a martenzitté való visszaalakulás nem ugyanazon görbe mentén játszódik le. A hiszterézis ciklusban munkavégzés történik, az alaklélező ötvözet az alakváltozással erőt tud kifejteni, munkát tud végezni.

### 3. Hőkezelési tendenciák a NiTi ötvözetekben

#### Tevékenység:

- Saját szavaival fogalmazza meg a hevítés hőmérséklete, a hőntartás ideje és az alakváltozással kifejtett erő közötti összefüggést NiTi ötvözetek esetében!

Az alaklélező ötvözetben az alaklélező hatás megfelelő hőkezelő eljárással „programozható”. A folyamat egyszerű: az ötvözetet ausztenites szerkezetre alakítják, vagyis az ausztenites átalakulásra jellemző hőmérséklet fölé hevítik. A hevítés hőmérséklete és a hőntartás ideje függ az ötvözet anyagától és a tervezett tulajdonságoktól. NiTi ötvözetek

esetében  $400^{\circ}\text{C}$  és 1-2 perces hőntartás már elegendő lehet, de általában  $500^{\circ}\text{C}$ -os hőmérsékleten 5 perces hőntartást alkalmaznak.

Hosszabb hőntartási idő és magasabb hőmérséklet megválasztása esetén az ötvözetnek az aktuátorként való működési hőmérséklete is magasabb lesz, ekkor gyorsabb (martenzites) alakváltozás tervezhető, de ezzel szemben az alakváltozással kifejtett erő kisebb lesz.

#### 4. Egyutas és kétutas alakemlékező hatás

##### Tevékenység:

- Saját szavaival fogalmazza meg az egyutas és kétutas alakemlékező hatás jelentését!

Egyutas alakemlékező hatásnak nevezik azt a képességet, amikor hevítés hatására előre definiált alakot vesz fel az alakemlékező ötvözet.

Kétutas alakemlékező hatásnak nevezik azt a képességet, amikor nemcsak a hevítés, hanem az ausztenit-martenzit átalakulási hőmérséklet alá történő hűtés hatására is előre definiált alakot vesz fel az alakemlékező ötvözet. A kétutas alakemlékező hatásnak vannak korlátjai, és a hőkezelés programozása is komplikáltabb.

#### 5. Szuperképlékenység

##### Tevékenység:

- Saját szavaival fogalmazza meg, milyen körülmények között jelentkezik a szuperképlékeny viselkedés, milyen változások mennek végbe a szerkezetben!

Az alakemlékező ötvözetek ún. szuperképlékeny viselkedést mutatnak, ha kevéssel az ausztenites átalakulási hőmérséklet felett deformáljuk őket. Szuperképlékeny állapotban kevéssel az ausztenites átalakulási hőmérséklet felett alkalmazott mechanikai terheléssel martenzitképződést váltunk ki. Mivel az átalakulási hőmérséklet felett vagyunk, a terhelés megszűntetése után a martenzit azonnal visszaalakul ausztenitté, és az ötvözet visszanyeri eredeti alakját. Rendkívül rugalmas, gumihoz hasonló viselkedésről van szó.

A szuperképlékenységet nem sikerült alkalmazni aktuátorokban, a tapasztalatok szerint ez a viselkedés lehet előnyös és hátrányos is esetenként. Egy jellemző, ismert alkalmazás a hajlékony szemüvegkeret, a 4. ábrán szuperelasztikus Duraflex ötvözetből készült szemüvegkeret látható. Az ilyen szemüvegkeretek drasztikus deformáló hatás után önmaguktól visszanyerik eredeti alakjukat, nem mennek tönkre.



4. ábra Duraflex szemüvegkeret (fig\_2\_2\_4.jpg)

## 6. Alakemlékező ötvözetek összehasonlítása

### Tevékenység:

- Gyűjtse ki és hasonlítsa össze a NiTi ötvözetek tulajdonságait a kereskedelmi forgalomban kapható többi alakemlékező ötvözetrel! Különösen figyeljen a ciklusszámra, a mechanikai terhelésre és a biokompatibilitásra.
- Jegyezze meg, mekkora terhelés (a következő bekezdés 3-5. sorára gondoltam, azaz „Egy kb. 0,4 mm átmérőjű huzal segítségével kb. 20N erőt lehet kifejteni az alakemlékező viselkedés kihasználásával. Ez kb. 160N/mm<sup>2</sup> mechanikai feszültséget jelent (erő/keresztmetszet).” kifejtésére képesek a NiTi ötvözetek az alakemlékező viselkedéssel előidézett hosszváltozás során!

A különböző alakemlékező ötvözetek közül a NiTi ötvözetek aktuátorként való alkalmazása a legelterjedtebb. A legnagyobb előny az aktuátorként való alkalmazásnál az, hogy kis méret, kis tömeg közvetítésével nagy erőkifejtést lehet megoldani. Egy kb. 0,4 mm átmérőjű huzal segítségével kb. 20N erőt lehet kifejteni az alakemlékező viselkedés kihasználásával. Ez kb. 160N/mm<sup>2</sup> mechanikai feszültséget jelent (erő/keresztmetszet).

A többi anyaghoz képest az alakemlékező ötvözetek nagy deformációra képesek. A NiTi ötvözetek 7-8% hosszváltozást is szenvedhetnek. Az 1. táblázatban az AMT (Advanced Materials and Technologies) cég által gyártott alakemlékező ötvözetek tulajdonságait látjuk.

A kereskedelmi forgalomban kapható három fajta termék közül a Ni-Ti ötvözetek tulajdonságai a legelőnyösebbek, pl. a legnagyobb mértékű alakváltozás érhető el ennél az ötvözetnél, ez bírja ki a legnagyobb ciklusszámot, emellett kiváló biokompatibilis anyag.

### Biokompatibilitás definíciója, beletegyük???:

A biokompatibilitás azt fejezi ki, hogy a szervezetbe épített **anyag képes-e hosszú időn keresztül ellátni a funkcióját**, azaz megőrzi-e és milyen mértékben az eredeti tulajdonságait a használat során és eközben milyen hatást gyakorol a szervezet szöveteire.

A szervezet minden a szöveteivel kapcsolatba kerülő idegen anyaggal elkerülhetetlenül **kölcsönhatásba lép**. A bioanyag felületén érintkezik a test szilárd és folyadék halmazállapotú közegeivel, amelyek **kémiaiilag és biológiaiilag aktívak** és gyakran a beépített anyag gyors **leromlását** eredményezik. Figyelembe kell azonban venni azt is, hogy a bioanyagok a szervezet -az implantátumhoz közeli ill. attól távoli- szöveteiben **dúsulásokat** ill. másjellegű -pl. élettani- **elváltozásokat okozhatnak**.

### 1. táblázat Alakemlékező ötvözetek tulajdonságai

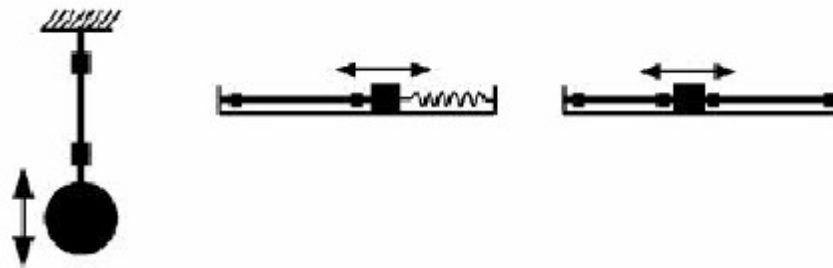
	Ni-Ti	Cu-Zn-Al	Cu-Al-Ni
olvadáspont (°C)	1250	1020	1050
sűrűség (kg/m <sup>3</sup> )	6450	7900	7150
rug. modulusz (GPa)	95	70-100	80-100
szakadási nyúlás (%)	30-50	15	8-10
átl. szemcseméret (µm)	20-100	50-150	30-100
átalakulási hőmérséklet (°C)	-100-tól 110-ig	-200-tól 110-ig	-150-től 200-ig
max. egyutas memória (%)	7	4	6
kétutas memória (%)	3,2	0,8	1
mechanikai feszültség (MPa)	100-130	40	70
hiszterézis ciklusok száma	100000	10000	5000
biokompatibilitás	kiváló	rossz	rossz

## 7. Egyutas és kétutas erőhatás előnyei, hátrányai

### Tevékenység:

- Gyűjtse ki és jegyezze meg, milyen esetben, miért van szükség visszaállító mechanizmus használatára alakemlékező aktuátorok esetében!
- Rajzolja le és jegyezze meg a visszaállító mechanizmusok elvének néhány egyszerű példáját, az előnyök és hátrányok felsorolásával együtt!

Az egyutas alakemlékező hatáson alapuló aktuátoroknál az alakváltozással kiváltott erő kifejtés csak a hevítési-hűtési ciklus egyik irányában lehetséges. Pl. egy huzal, amely melegítés hatására összehúzódik, nem fog külső erő kifejtése nélkül megnyúlni hűtés után. Egy visszaállító mechanizmus beiktatása szükséges ahhoz, hogy a huzal visszanyerje az eredeti hosszát a hevítési-hűtési ciklus után. Ez az egyutas alakemlékező aktuátoroknak az egyik hátránya. Az 5. ábrán néhány egyszerű lehetőséget látunk a visszaállító mechanizmus megvalósítására.



**5. ábra Függesztett tömeggel (bal), rugóval (középső) és szembeapcsolással (jobb) megvalósított visszaállító mechanizmus**

(fig\_2\_2\_5.jpg)

A visszaállító mechanizmust legtöbbször rugó beiktatásával oldják meg, lásd 5. ábra, középső rész. A visszaállító mechanizmusnak helyigénye van, növeli az aktuátor súlyát, az eszköz tervezését is komplikálja. Emellett még azt is meg kell említeni, hogy amikor pl. a rugós aktuátort erő kifejtésre használjuk, akkor a kimeneti erővel a rugót is húzzuk (vagy összenyomjuk), és ezért a rugóerőt le kell vonni az alakemlékező ötvözet által kifejtett hasznos erő értékéből.

Az 5. ábra bal oldali vázlata a gravitációt használja ki a hossz visszaállításához. A húzó erőnek elég nagyoknak kell lennie, egyébként az aktuátor az ausztenitnek megfelelő pozícióban marad a hevítés megszüntetése után is.

Harmadik módszer a hossz visszaállításához, amikor mindkét elmozdulási irányban alkalmazunk egy alakemlékező huzalt. Ezt az elrendezést „antagonisztikus” aktuátornak nevezik. Ez az elrendezés már mindkét irányban produkál kimeneti erőt, azonban az egymással szemben elhelyezett két huzal hevítését és hűtését külön-külön, függetlenül, meghatározott program szerint kell megoldani. Pl. ha az egyik huzalt hevítjük és közvetlenül ezután a másik huzalt is hevítjük, akkor az először hevített huzal akadályozza a másik



huzalnak az alakváltozását. Továbbá, ha a két huzal elég közel van egymáshoz, akkor a huzalok közötti hővezetés miatt nehéz független hőhatást kiváltani.

A kétutas alakemlékező hatás a hevítés és a hűtés során is képes erő kifejtésére. Ezért az ilyen aktuátoroknál nincs szükség visszaállító mechanizmusra. A kétutas alakemlékező hatás megvalósítása azonban nehéz, léteznek korlátjai is az alakemlékező viselkedés kialakításának, ezért ma még gyakori az egyutas aktuátorok alkalmazása.

## 8. Hevítési módszerek

### Tevékenység:

- Gyűjtse ki és jegyezze meg, milyen hevítési módszerek vehetők számításba alakemlékező aktuátorok esetében!
- Gyűjtse ki és jegyezze meg a különböző hevítési módszerek előnyeit és hátrányait!

A hevítést elektromos árammal közvetlenül, különálló fűtő elem segítségével, vagy az aktuátort körülvevő anyag hőátadásával valósítják meg.

A közvetlenül árammal való hevítés jól vezérelhető folyamat, de vannak hátrányai. Először is az alakemlékező ötvözeteknek az elektromos ellenállása kicsi, ezért a fűtéshez nagy áramerősségre van szükség. Például egy kb. 0,4 mm átmérőjű huzalon 2,75A áramnak kell átfolynia. Ennek a biztosítása azonban megnöveli a méreteket és a költségeket is. Emellett még, mivel az alakemlékező ötvözetben áram folyik keresztül, szigetelést is kell alkalmazni, amely további méret- és költségnövekedéssel jár.

A különálló fűtőelem alkalmazásával elkerülhetők a közvetlen árammal való hevítésnek a hátrányai. A fűtőellenálláson adott feszültség mellett kis áramerősség folyik a nagy ellenállás miatt. Azonban ez is járulékos kiegészítése az alakemlékező ötvözetnek, amellyel az aktuátor mérete, súlya megnő. A hozzáadott hevítendő tömeg (a fűtőellenállás) miatt megnövekszik az aktuátor ciklusideje is.

Ha az alakemlékező ötvözetet a környező tér (anyag) hevíti, akkor az aktuátor a környezeti hőmérséklet változása szerint működik. A fent említett két megoldás hátrányai ebben az esetben előnyként is jelentkezhetnek. Az aktuátornak ez a működési módja alkalmas tulajdonképpen a környezeti hőmérséklet szabályozására. Például a fűtés és hűtés szabályozására szolgáló termosztátok az alakemlékező hatás elvén működnek. Ez az egyik leghatékonyabb alkalmazási terület, hiszen itt elektromosság nélkül megvalósított szenzorról és aktuátorról van szó.

## 9. Hűtési módszerek

### Tevékenység:

- Gyűjtse ki és jegyezze meg, milyen hűtési módszerek vehetők számításba alakemlékező aktuátorok esetében!
- Gyűjtse ki és jegyezze meg a különböző hűtési módszerek előnyeit és hátrányait!

Az alakemlékező ötvözet hűtését a környezet, a környező anyag hőelvonásával valósítják meg. A környezeti hőmérsékletnek alacsonyabbnak kell lennie az átalakulási hőmérsékletnél.

Ha a környezeti hőmérséklet az átalakulási hőmérséklethez közeli, a hűtő hatás lassú.

Ha a környezeti hőmérséklet jóval alacsonyabb az átalakulási hőmérsékletnél, akkor a hűtő hatás gyorsabb.

Ha gyors változásokat kell produkálnia az aktuátornak, akkor valamilyen aktív hűtést kell alkalmazni ahhoz, hogy a martenzites átalakulás gyorsan végbemenjen. Ehhez hatékony módszer a hideg levegő áramoltatása. Hogyha az alkalmazásnál megengedett, a hűtőfolyadékos módszer is nagyon hatékony.

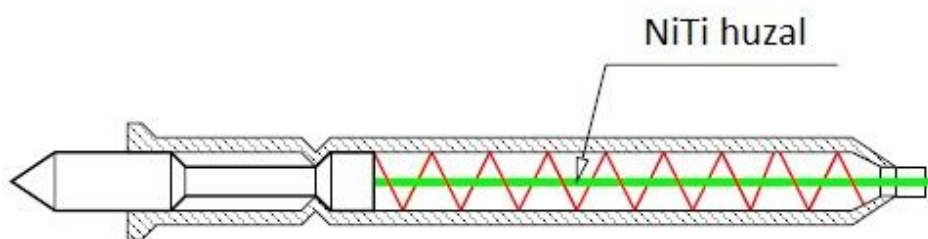
Az elektromos elven működő Peltier-elem segítségével gyors fűtő és hűtő hatás is megoldható. A feszültség irányától függ, hogy fűtő vagy hűtő hatást fejt ki az elem. Azonban a Peltier-elemnek az aktuátorban való alkalmazása is méretnövekedéssel és az ár emelkedésével jár együtt.

## 10. Alakemlékező aktuátorok működési elve

### Tevékenység:

- Rajzolja le, jegyezze meg a lineáris, csuklós és forgató aktuátorok felépítését, működési elvét, hevítési, hűtési módjait.

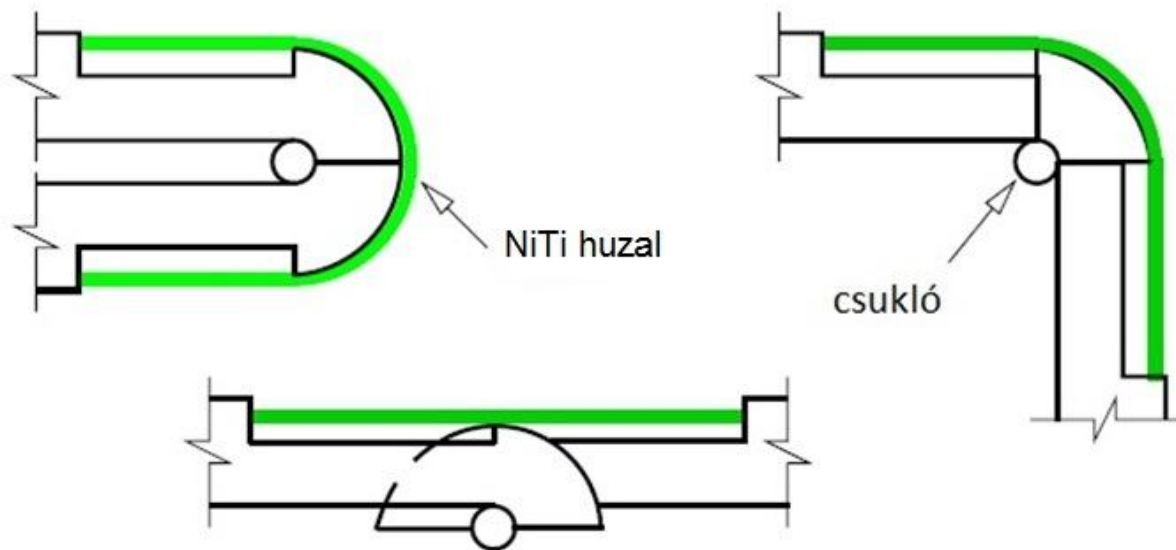
A 6. ábrán látható lineáris aktuátor elvi megoldásánál az alakemlékező huzal (zöld szín) egy dugattyú végéhez van rögzítve. A dugattyú egy hengerben mozog. Hogyha az alakemlékező huzal hossza megnő, akkor a dugattyú mozgatásával kitolja a dugattyúhoz rögzített hegyes csúcsban végződő csapot. A hevítés és hűtés is elektromos árammal történik (Peltier-elem segítségével).



6. ábra Lineáris aktuátor

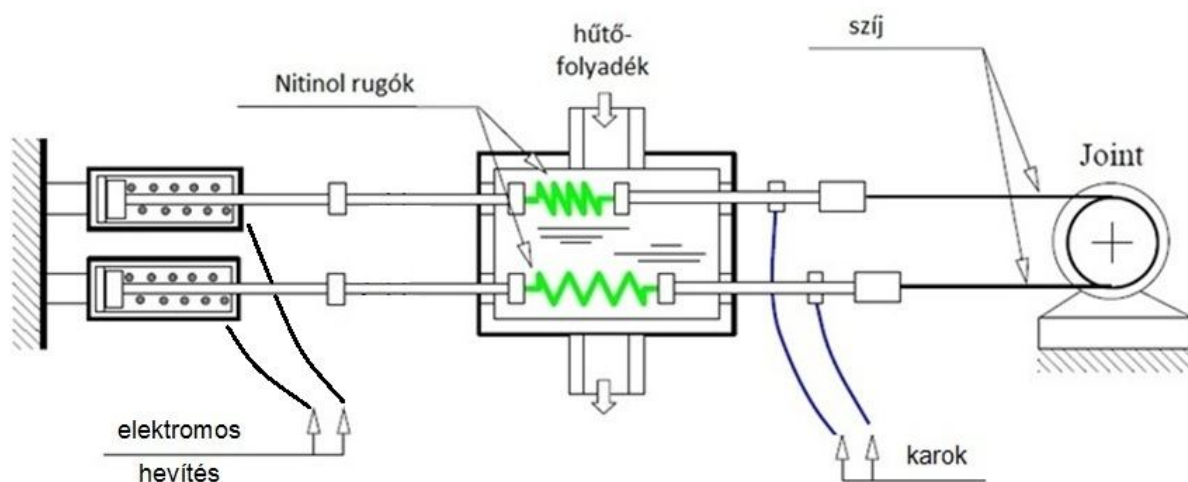
(fig\_2\_2\_6.jpg)

A 7. ábrán látható csuklós aktuátorban az alakemlékező huzalnak már nem a hosszváltozását, hanem az alakemlékező viselkedésből következő alakváltozást használják ki. A huzal két különböző alakot vesz fel: egyenes és hajlított alakot. Az alakváltozás során hajlítja vagy kiegyenesíti a csuklót. A bal felső részen látható hajlított alak összecukott, az alsó ábrán látható egyenes huzal pedig szétnyitott állapotban tartja a csuklós aktuátort. A jobb felső ábra egy közbenső állapotot mutat, amikor az alakemlékező huzal a görbült állapotból kiegyenesedik. A hevítés közvetlenül a Nitinol huzalon átvezetett elektromos árammal történik.



7. ábra Csuklós aktuátor  
(fig\_2\_2\_7.jpg)

A 8. ábrán forgató aktuátor működési elvét látjuk. Két alakemlékező Nitinol rugó van beépítve a középső házba. A rugók összenyomott (8. ábrán a felső Nitinol rugó, zöld színnel) és széthúzott (8. ábrán az alsó Nitinol rugó, zöld színnel) állapotok között változtatják az alakjukat. Ellentétes módon vannak programozva, amikor az egyik rugó összenyomott állapotban van, a másik rugónak széthúzott állapotban kell lennie. A hevítés elve elektromos, a hűtést a rugókat tartalmazó házban átfolytatott hűtőfolyadékkal oldják meg. A rugók merev karokhoz (8. ábrán a jobb oldalon) csatlakoznak, amelyekhez rögzített szíj forgatja el a tárcsát.



8. ábra Alakemlékező hatás elvén működő forgató aktuátor  
(fig\_2\_2\_8.jpg)

## 11. Néhány műszaki alkalmazás

### Tevékenység:

- Gyűjtse ki és jegyezze meg, milyen műszaki alkalmazásokkal lehet találkozni a NiTi alakemlékező ötvözetek esetében.

Alakemlékező Nitinol ötvözetből készült félkész termékeket, huzalokat, rugókat, lemezeket, csöveket ma már számos vállalkozás forgalmaz, lásd 9. ábra.



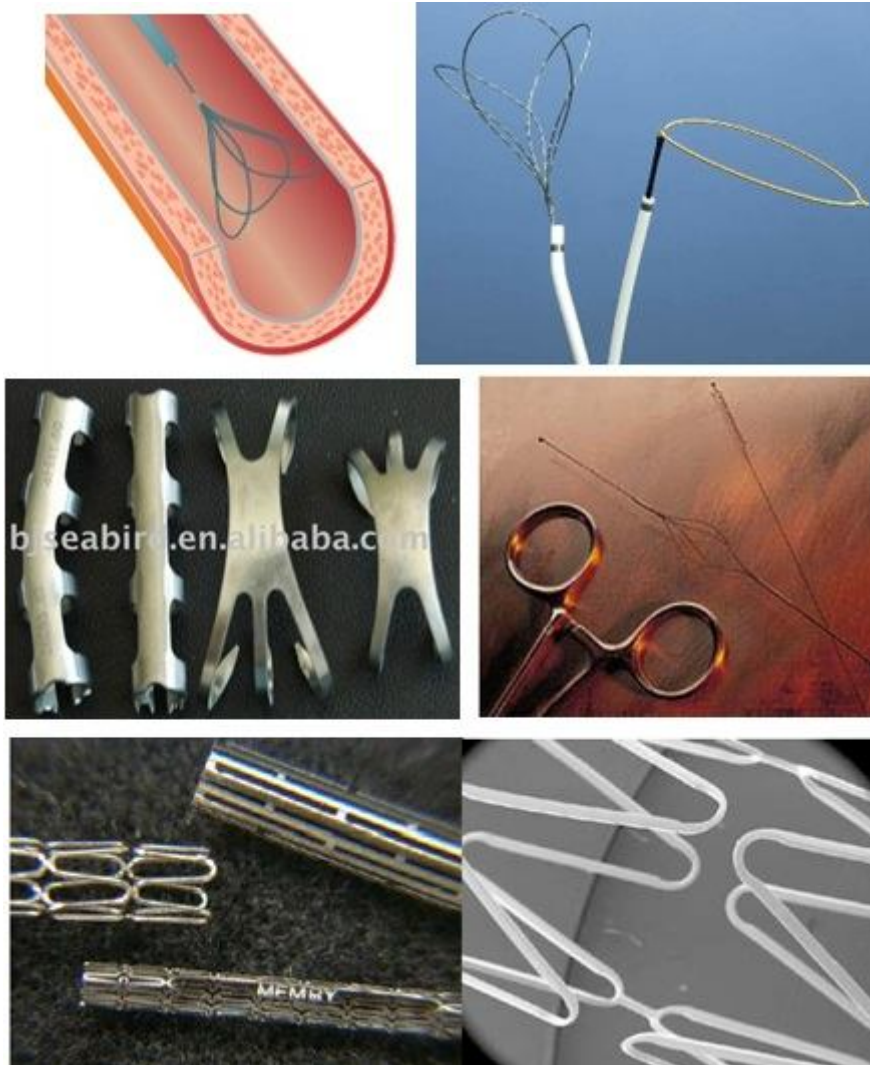
9. ábra Nitinol félkész termékek  
(fig\_2\_2\_9.jpg)

Járműipari alkalmazásokra látunk példákat a 10. ábrán. A baloldali ábrán dieselmotoroknál alkalmazott, alakemlékező elven működő, motorhűtést szabályozó zsarus szellőzőrendszer látható. A jobboldali ábrán a General Motors egyik új fejlesztésének vázlatát mutatjuk. A kipufogó gáz hőjét felhasználó generátor elektromos áram fejleszt, amelyet visszatáplálnak elektromos vagy hibrid hajtásba. A generátor működtetését alakemlékező hatás alkalmazásával oldották meg. Általánosan elterjedt ma már a járműiparban az alakemlékező ötvözetek felhasználása különböző szenzorokban és aktuátorokban. Legjellemzőbbek, leggyakoribbak a hőmérsékletérzékelők, hőmérséklet szabályozó aktuátorok, különböző kapcsolók, szelepek.



10. ábra Autóipari alkalmazások  
(fig\_2\_2\_10.jpg)

Igen gyakori, nagy sikerrel alkalmazott anyagok az alakemlékező ötvözetek a humán gyógyászatban is. A MeritMedical cég által forgalmazott értágító hurkokat látjuk a 11. ábra felső részén. Különböző rögzítő implantátumokat, sebészeti eszközöket mutatunk a 11. ábra középső részén. A jellemzően alakemlékező ötvözetből készült sztentekről láthatunk felvételeket a 11. ábra alsó részén.



**11. ábra Gyógyászattechnikai alkalmazások**

(fig\_2\_2\_11.jpg)

Ma már a háztartási és divat iparágakban is egyre több alkalmazással lehet találkozni. A hideg és meleg víz keverésének szabályozásánál találkozni lehet alakemlékező fémek használatával pl. zuhanycsapok esetében, lásd 12. ábra bal felső kép. Az izzólámpa hőjére nyílik szét a 12. ábra jobb felső képen látható, alakemlékező ötvözetből készült lámpabúra. Hajszáritóval ráfújva az alakjukat, fazonukat változtatják a 12. ábra alsó képen látható divatmodellek.



12. ábra Alakemlékező ötvözet alkalmazása a háztartásban és a divatban  
(fig\_2\_2\_12.jpg)

### Irodalom:

Dobránszy János, Magasdi Attila: Az alakemlékező ötvözetek alkalmazása, Jövőnk anyagai, technológiái, 134. évfolyam, 11-12. szám, 2001.

Marek Novotny: Shape memory alloys, Institute Of Automation and Control, Micro and Nanosystems Research Group: <http://www.ac.tut.fi/aci/courses/ACI-51106/pdf/SMA/SMA-introduction.pdf>

Weimin Huang: Shape memory alloys and their application to actuator, PhD Thesis, Cambridge University, 1998.  
<http://www.ntu.edu.sg/home/mwmhuang/cambridge/Phd2side.pdf>

### Önellenőrző kérdések:

1. Jelölje meg, hogy az alábbiak közül melyik írja le helyesen az alakemlékező ötvözetek fogalmát:
  - a nemfémek anyagoknak az a csoportja, amelyek képesek egy előzetesen definiált alakot ismételt felvenni megfelelő hőfolyamatok hatására,
  - a fémek anyagoknak az a csoportja, amelyek képesek egy előzetesen definiált alakot ismételt felvenni húzó igénybevétel hatására,
  - **a fémek anyagoknak az a csoportja, amelyek képesek egy előzetesen definiált alakot ismételt felvenni megfelelő hőfolyamatok hatására**
  - a fémek anyagoknak az a csoportja, amelyek képesek egy előzetesen definiált méretet ismételt felvenni megfelelő hőfolyamatok hatására,
  - a fémek anyagoknak az a csoportja, amelyek képesek egy előzetesen definiált alakot felvenni megfelelő hőfolyamatok hatására.
2. Jelölje meg az alábbi felsorolásból azt a sort, amelyben mindhárom felsorolt ötvözet képes alakemlékező viselkedésre:
  - Ni-Ti, Cu-Ti-Al és Cu-Al-Ni
  - **Ni-Ti, Cu-Zn-Al és Cu-Al-Ni**
  - Ni-Ti, Cu-Zn-Al és Cu-Ti-Ni
  - Ni-Ti, Au-Cd, és Ag-Au
3. Jelölje meg a következő válaszok közül, melyek az alakemlékező viselkedés jellemzői!
  - ausztenit-perlit átalakulás,
  - **ausztenit-martenzit átalakulás**
  - keménységnövelés,
  - szilárdságnövelés,
  - **hiszterézis jelleg az alakváltozás lefutásában**
  - **munkavégzési lehetőség melegítés vagy hűtés hatására**
  - kúszással szemben való ellenállás
4. Jelölje meg a következő válaszok közül, melyek az alakemlékező ötvözetek átalakulási hőmérsékleteire vonatkozó jellemzők:
  - **hevítés során ausztenit keletkezik**
  - hevítés során martenzit keletkezik
  - hűtés során ausztenit keletkezik
  - **hűtés során martenzit keletkezik**
  - az ausztenit- és martenzitképződés egy jellemző hőmérsékleten megy végbe
  - **az ausztenit- és martenzitképződés egy jellemző hőmérséklettartományban megy végbe**
  - a fázisátalakulások kismértékű méretváltozással járnak együtt
  - **a fázisátalakulások nagymértékű méretváltozással járnak együtt**
5. Az alábbi felsorolásból melyik igaz a NiTi ötvözetek hőkezelési tendenciájára:
  - **Hosszabb hőntartási idő és magasabb hőmérséklet megválasztása esetén az ötvözetnek az aktuátorként való működési hőmérséklete is magasabb lesz,**

ekkor gyorsabb alakváltozás tervezhető, de ezzel szemben az alakváltozással kifejtett erő kisebb lesz.

- Hosszabb hőntartási idő és magasabb hőmérséklet megválasztása esetén az ötvözetnek az aktuátorként való működési hőmérséklete alacsonyabb lesz, ekkor gyorsabb (martenzites) alakváltozás tervezhető, de ezzel szemben az alakváltozással kifejtett erő kisebb lesz.
- Hosszabb hőntartási idő és magasabb hőmérséklet megválasztása esetén az ötvözetnek az aktuátorként való működési hőmérséklete is magasabb lesz, ekkor lassabb (martenzites) alakváltozás tervezhető, de ezzel szemben az alakváltozással kifejtett erő kisebb lesz.
- Hosszabb hőntartási idő és magasabb hőmérséklet megválasztása esetén az ötvözetnek az aktuátorként való működési hőmérséklete is magasabb lesz, ekkor gyorsabb (martenzites) alakváltozás tervezhető, és az alakváltozással kifejtett erő nagyobb lesz.

6. Mi a kétutas alakemlékező hatás?

- melegítés és hűtés hatására történő alakváltozás
- melegítés és hűtés hatására történő ausztenit-martenzit fázisátalakulás
- melegítés és hűtés hatására történő fázisátalakulás
- **melegítés és hűtés hatására is előre definiált alakot vesz fel az alakemlékező ötvözet**

7. Válassza ki a helyes választ a következő kérdésre: Milyen körülmények között, hogyan tudjuk előidézni a szuperképlékeny viselkedést, milyen átalakulások játszódnak le az aynagszerkezetben szuperképlékeny állapotban?

- Szuperképlékeny állapotban kevéssel az átalakulási hőmérséklet alatt alkalmazott mechanikai terheléssel martenzitképződést váltunk ki. A terhelés a megszüntetése után a martenzit azonnal visszaalakul ausztenitté, és az ötvözet visszanyeri eredeti alakját.
- Szuperképlékeny állapotban kevéssel az átalakulási hőmérséklet felett alkalmazott mechanikai terheléssel ausztenitképződést váltunk ki. A terhelés a megszüntetése után a martenzit azonnal visszaalakul martenzitté, és az ötvözet visszanyeri eredeti alakját.
- Szuperképlékeny állapotban kevéssel az átalakulási hőmérséklet felett alkalmazott mechanikai terheléssel martenzitképződést váltunk ki. A terhelés a megszüntetése után a martenzit azonnal visszaalakul ausztenitté, és az ötvözet megtartja eredeti alakját.
- **Szuperképlékeny állapotban kevéssel az átalakulási hőmérséklet felett alkalmazott mechanikai terheléssel martenzitképződést váltunk ki. A terhelés a megszüntetése után a martenzit azonnal visszaalakul ausztenitté, és az ötvözet visszanyeri eredeti alakját.**

8. Az alábbi felsorolásból válassza ki a NiTi alakemlékező ötvözetek tulajdonságait más alakemlékező ötvözetekkel való összehasonlítás szerint:

- **Lényegesen több ciklusban nagyobb méretváltozással képesek kiváltani nagyobb erőhatást.**
- Lényegesen több ciklusban kisebb méretváltozással képesek kiváltani nagyobb erőhatást.



- A NiTi ötvözetek biokompatibilis anyagok, a többi alaklélező ötvözet azonban nem biokompatibilis.
- Az alaklélező ötvözetek általában, így a NiTi ötvözetek is biokompatibilis anyagok.

9. Mekkora terhelés kiváltására képesek a NiTi alaklélező ötvözetek?

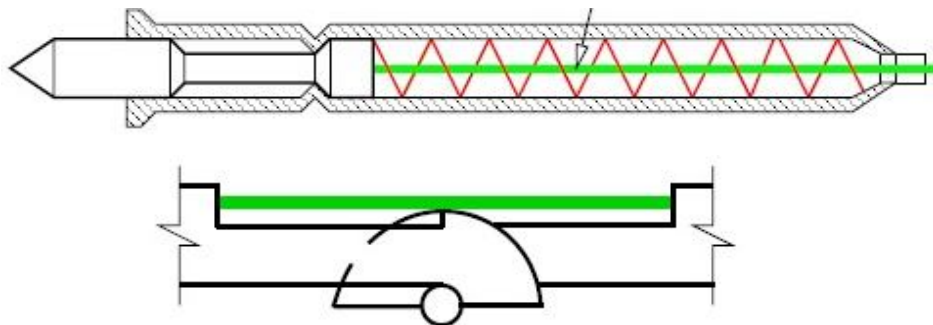
- 100-160 MPa
- 200-220 MPa
- 40-70 MPa
- akár 1200-1600 MPa

10. Milyen hátrányokkal jár együtt a visszaállító mechanizmusok alkalmazása?

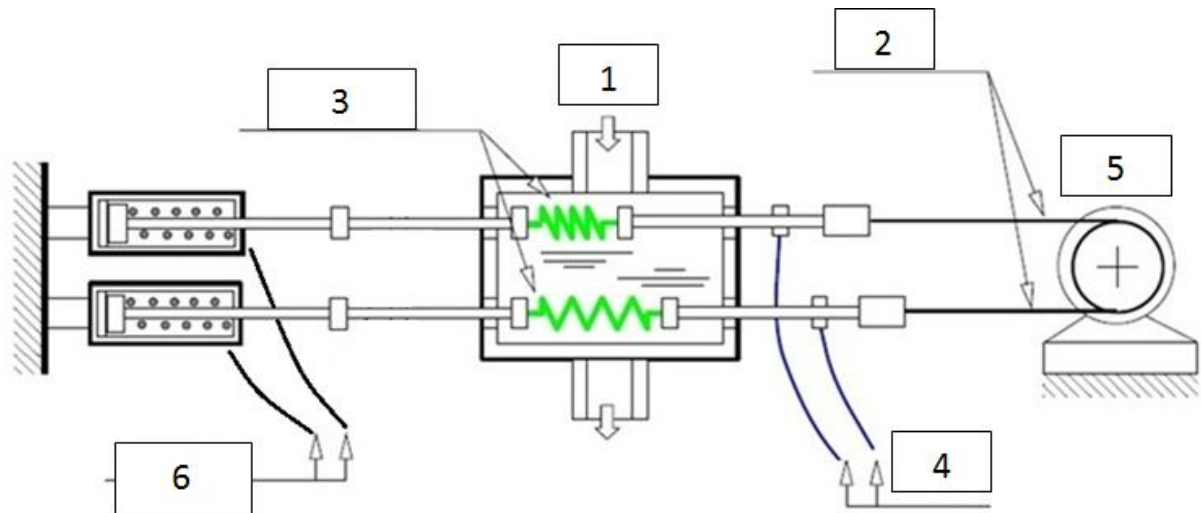
- rugós mechanizmus esetében az alaklélező huzallal a rugót is húzzuk (vagy összenyomjuk), és ezért a rugóerőt hozzá kell adni az alaklélező ötvözet által kifejtett hasznos erő értékéhez
- rugós mechanizmus esetében az alaklélező huzallal a rugót is húzzuk (vagy összenyomjuk), és ezért a rugóerőt le kell vonni az alaklélező ötvözet által kifejtett hasznos erő értékéből
- szembekapcsolt mechanizmusnál az egymással szemben elhelyezett két huzal hevítését és hűtését külön-külön, függetlenül kell megoldani.
- szembekapcsolt mechanizmusnál az egymással szemben elhelyezett két huzal hevítését és hűtését együtt kell megoldani.

11. Az alábbi ábrák milyen aktuátorokat mutatnak?

- a felső csuklós, az alsó pedig lineáris aktuátor
- a felső lineáris, az alsó pedig csuklós aktuátor
- mindkettő vízszintes erőhatást kifejtő aktuátor
- a felső lineáris, az alsó pedig forgató aktuátor



12. Nevezze meg a forgató aktuátor részeit:



(fig\_2\_2\_13.jpg)

- alaklélező huzal (3)
- karok (4)
- elektromos hevítés (6)
- szíj (2)
- tárcsa (5)
- hűtőfolyadék (1)