

# Pametni materijali i strukture

---

Vereš, Dino

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:357398>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-17**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

**Preddiplomski sveučilišni studij**



**PAMETNI MATERIJALI I STRUKTURE**

**Završni rad**

**DINO VEREŠ**

**Osijek, 2024.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac Z1P: Obrazac za ocjenu završnog rada na sveučilišnom prijediplomskom studiju****Ocjena završnog rada na sveučilišnom prijediplomskom studiju**

<b>Ime i prezime pristupnika:</b>	Dino Vereš
<b>Studij, smjer:</b>	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
<b>Mat. br. pristupnika, god.</b>	3558, 03.09.2012.
<b>JMBAG:</b>	0165055406
<b>Mentor:</b>	doc. dr. sc. Goran Rozing
<b>Sumentor:</b>	Dalibor Buljić, dipl. ing. el.
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Naslov završnog rada:</b>	Pametni materijali i strukture
<b>Znanstvena grana završnog rada:</b>	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
<b>Zadatak završnog rada:</b>	U radu je potrebno ukratko opisati povijesni razvoj pametnih materijala i fizikalne principe istih. Napraviti podjelu pametnih materijala, prikazati i pojasniti strukture te vrste i primjenu istih. Na više primjera je potrebno pokazati primjenu pametnih materijala u elektrotehnici i ostalim granama tehnike.
<b>Datum prijedloga ocjene završnog rada od strane mentora:</b>	18.09.2024.
<b>Prijedlog ocjene završnog rada od strane mentora:</b>	Dobar (3)
<b>Datum potvrde ocjene završnog rada od strane Odbora:</b>	25.09.2024.
<b>Ocjena završnog rada nakon obrane:</b>	Dobar (3)
<b>Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije završnog rada čime je pristupnik završio sveučilišni prijediplomski studij:</b>	30.09.2024.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****IZJAVA O IZVORNOSTI RADA**

Osijek, 30.09.2024.

<b>Ime i prezime Pristupnika:</b>	Dino Vereš
<b>Studij:</b>	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
<b>Mat. br. Pristupnika, godina upisa:</b>	3558, 03.09.2012.
<b>Turnitin podudaranje [%]:</b>	12

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Pametni materijali i strukture**

izrađen pod vodstvom mentora doc. dr. sc. Goran Rozing

i sumentora Dalibor Buljić, dipl. ing. el.

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis pristupnika:

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
1.1. Zadatak završnog rada .....	1
2. RAZVOJ I OSNOVNA PODJELA PAMETNIH MATERIJALA I STRUKTURA.....	2
2.1. Materijali s unutarnjom inteligencijom .....	3
2.2 Materijali s vanjskom inteligencijom .....	17
3. VRSTE SLITINA PAMETNIH MATERIJALA I STRUKTURA .....	24
3.1. Slitina NiTi .....	24
3.2. Slitina CuZnAl.....	26
3.3. Slitina CuAlNi .....	28
4. PRIMJENA PAMETNIH MATERIJALA I STRUKTURA .....	30
4.1. Primjena u autoindustriji .....	30
4.2. Primjena u elektrotehnici.....	34
4.3. Primjena u robotici .....	39
5. ZAKLJUČAK .....	42
LITERATURA.....	43
SAŽETAK.....	45
ŽIVOTOPIS .....	46

## 1. UVOD

Od početka ljudske civilizacije čovjek se u svojoj svakodnevnicu koristio raznim materijalima kao što su kamen, drvo, bakar, bronca, željezo. Dok je razvoj materijala nekada ovisio o vještinama ljudi, danas se njihov tehnološki napredak temelji na raznim znanstvenim metodama. Edukacijom ljudi i razvojem tehnologije došlo je do otkrivanja novih, pametnih materijala. Pametni materijali definiraju se kao vrsta materijala koja pri vanjskom utjecaju mijenjaju svoju strukturu. Značajni su za razvoj i napredak mnogih područja znanosti poput telekomunikacija, autoindustrije, robotike, graditeljstva, elektrotehnike, medicine i poljoprivrede. Također su ključni za poboljšanje kvalitete života, ekonomske dobiti, produktivnosti i održivosti. U svijetu se sve više razvijaju pametni materijali koji imaju svojstvo pamćenja i oni sve više pronalaze svoje mjesto u svakodnevnoj primjeni. Jedan takav primjer primjene je u automobilskoj industriji, gdje je NiTiNOL legura zamjenila uobičajeni materijal poput čelika u pogonskom dijelu automobila. Također jedan od primjera primjene pametnih materijala u elektrotehnici susrećemo pri izradi sustava za praćenje sunca koji je ugrađen u konstrukciju koja drži solarne panele. Dijelovi tog sustava koriste slitine s efektom pamćenja oblika da bi sustav bio učinkovitiji i pratio poziciju sunca kroz cijeli dan. Iduću primjenu pametnih materijala možemo pronaći u robotici. Jedan od primjera je Stiquito tzv. kukac robot koji je izrađen od pametnih materijala i struktura. Zbog prednosti kao što su jednostavnost i jeftini dijelovi, pametni materijali koriste se prilikom edukacije učenika i studenata u obrazovne svrhe, ali i u istraživačke svrhe. Vrlo se lako sastavlja i programira zato je idealan za prvi susret učenika ili studenta s robotikom i pametnim materijalima.

### 1.1. Zadatak završnog rada

Zadatak ovog rada je opisati strukturu, vrste i primjenu pametnih materijala. Na tri primjera je potrebno pokazati primjenu pametnih materijala u praksi.

## 2. RAZVOJ I OSNOVNA PODJELA PAMETNIH MATERIJALA I STRUKTURA

Razvoja pametnih materijala započeo je u 19. stoljeću. Engleski metalurg Sir Robert Abbott Hadfield je 1882. godine patentirao prvi pametni materijal koji se zove Hadfieldov čelik. Isti je sadržavao 82% željeza, 12% mangana, te 1% ugljika i silicija dok su ostali elementi bile nečistoće u udjelu od 4%. Radi toga što sadrži takav omjer ugljika i mangana (1:10) ima austenitnu strukturu. Takva struktura povećava mu otpornost na trošenje i mogućnost očvršćivanja. Također ima visoku tvrdoću i radi toga ga je nemoguće rezati, ali ga se može savijati. Zbog svih nabrojanih svojstava koristi se u izradi dijelova za tenkove, bagere, automobile, traktore, drobilice te u građevinarstvu i ostalim industrijama. Najzanimljiviji primjer Hadfieldovog čelika susrećemo u izradi prozorskih rešetki za zatvore.

1961. godine dolazi do otkrivanja slitine nikla i titana poznatija kao nitinol. Riječ nitinol izvedena je iz sastava slitine i mjesta njenog pronalaska (Nickel Titanium-Naval Ordnance Laboratory). William J. Buehler zajedno s Frederickom Wangom otkrio je njegova svojstva tijekom istraživanja u Naval Ordnance Laboratory 1959. godine. W. J. Buehler je proučavajući kako napraviti bolji konus nosa projektila, koji bi mogao smanjiti toplinu i silu udarca, došao do zaključka da bi legura nikla i titana trebala biti u omjeru 1:1 što je i 1961. godine na uzorku predstavio na sastanku uprave laboratorija. Uzorak, presavijen poput mjeha harmonike, sudionici su prenosili i savijali. Jedan od njih je toplinom iz upaljača, na opće iznenađenje, uzrokovao da se traka u obliku harmonike skupi i poprimi svoj prethodni oblik. Kao primjer na slici 2.1. prikazana je spajalica od nitinola koja je savijena mehaničkom silom, te ista spajalica nakon što je stavljena u vruću vodu je vraćena u prvobitno stanje.



Sl. 2.1 Spajalica od nitinola [1]

Potencijal nitinola je odmah uočen, ali legura se komercijalizirala tek desetljeće kasnije. Problemi su se pojavljivali u obradi materijala i u financiranju razvoja legure.

Pametni materijali postali su ono bez čega se ne može zamisliti napredak u područjima elektrotehnike, graditeljstva, medicine i drugim područjima. Njihov razvoj doveo je do četvrte generacije materijala i to nakon faze prirodnih materijala, sintetičkih polimernih materijala i umjetno dizajniranih materijala. Kada se govori o pametnim materijalima misli se na materijale koji pod vanjskim utjecajem, kao što su temperatura, mehaničko naprezanje, kemijsko djelovanje, električno ili magnetsko polje i svjetlost, mijenjaju svoju mikrostrukturu i jedno ili više svojstava. Pametni materijali se mogu podijeliti na dvije najvažnije skupine. To su: materijali s unutarnjom inteligencijom i materijali s vanjskom inteligencijom.

## **2.1. Materijali s unutarnjom inteligencijom**

Materijale s unutarnjom inteligencijom karakterizira mogućnost pretvorbe vrste energije. Od takvih materijala najviše se ističu piezoelektrični (mehaničko djelovanje stvara električnu struju), slitine s efektom pamćenja (promjenom temperature vraćaju se u početni oblik), feroelektrični (promjena polariteta feroelektričnog materijala primjenom vanjskog električnog polja) i feromagnetni (utjecajem magnetnog polja na materijal on postaje namagnetiziran).

**Piezoelektrični materijali** su oni koji imaju sposobnost stvaranja unutarnjeg električnog naboja pod utjecajem mehaničke sile. Piezoelektrične materijale dijelimo na dvije vrste. Prva vrsta su prirodni materijali. Oni obično imaju specifičnu kristalnu strukturu zbog koje postoji veza između pozitivno nabijenih i negativno nabijenih iona u materijalu. Zbog kristalne strukture koja je asimetrična u rasporedu naboja stvara se električni naboj pri deformaciji materijala. Najpoznatiji materijal koji pripadaju ovoj skupini je kvarc. Kvarc se u elektrotehnici i elektronici koristi za stvaranje preciznih oscilacija. Zbog toga ga možemo pronaći u kvarcnim oscilatorima, rezonatorima, senzorima, kvarcnim filterima, uređajima za kontrolu procesa itd. Druga vrsta su umjetni piezoelektrični materijali. Prednost umjetnih piezoelektričnih materijala koji imaju bolja kemijska i deformabilna svojstva, puno su isplativiji i jeftiniji, te se lakše primjenjuju. Najpoznatiji materijali koji pripadaju ovoj skupini su: litijski niobat, barijev titanat i olovni cirkonij-titanat. Od umjetnih piezoelektričnih materijala se izrađuju piezoelektrični zvučnici. Piezoelektrični zvučnici koriste piezoelektrični materijal najčešće keramički kao što su materijali barijev titanat i olovni cirkonij-titanat, koji se deformiraju kada se primjeni električni napon.

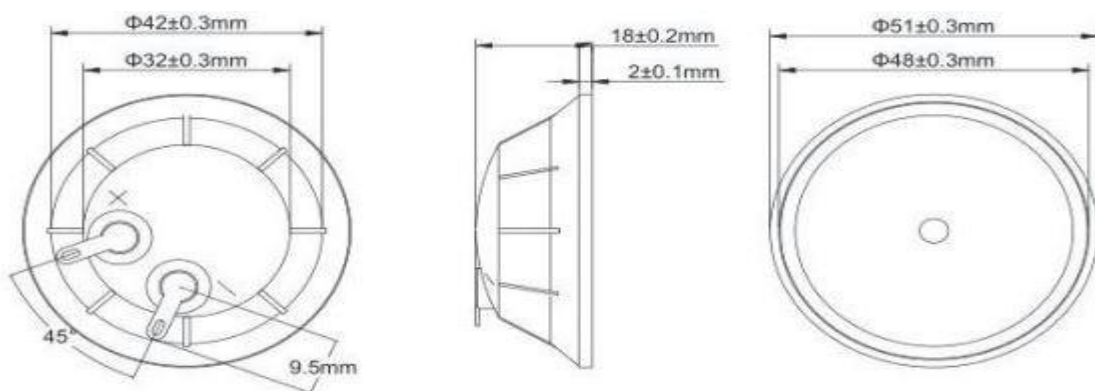


Kada se brzo mijenja napon generira se zvučna frekvencija koja proizvodi zvuk. Na slici 2.2 prikazan je piezoelektrični zvučnik.



Sl. 2.2 Piezoelektrični zvučnik [2]

Piezoelektrični zvučnici poznati su po visokoj frekvencijskoj odzivnosti tj. učinkovitiji pri reprodukciji visokih frekvencijskih zvukova. Imaju vrlo jednostavnu izvedbu bez pokretnih dijelova, poput membrana i magneta, što smanjuje potrebu za održavanjem. Obično su lakši, potrebno im je manje električne energije i tanji su od dinamičkih zvučnika, pa iz tih razloga često pronalaze primjenu u raznim prijenosnim uređajima poput mobitela i tableta, gdje se koriste za zvučne signale obavijesti i upozorenja. Dimenzije piezoelektričnog zvučnika vidimo na slici 2.3.



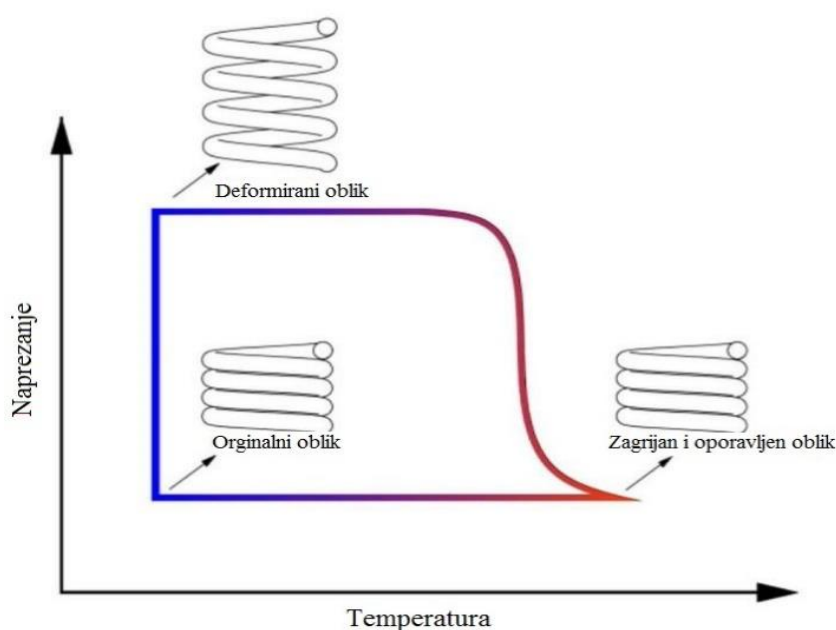
Sl. 2.3 Dimenzije piezoelektričnog zvučnika [2]

U mobilnim uređajima reproduciraju zvuk na visokim frekvencijama u rasponu od 100 Hz do nekoliko stotina kHz. Vrlo su otporni na udarce, vremenske uvjete i vlagu.

**Slitine s efektom pamćenja oblika** (*SMA- engl. Shape Memory Alloys*) posebno su dizajnirane skupine materijala koji su najčešće metali. Oni imaju sposobnost vraćanja unaprijed određenog oblika kada se događa promjena temperature ili promjena naprezanja. SMA imaju dva važna svojstva: efekt pamćenja oblika (*SME – engl. Shape Memory Effect*) i superelastičnost. SMA se razlikuju od drugih materijala prvenstveno zbog efekta pamćenja oblika i superelastičnost koji su povezani sa specifičnim načinom na koji se odvija fazna transformacija, biokompatibilnošću, visokom čvrstoćom specifičnosti, visokom otpornošću na koroziju, visokom otpornošću na trošenje i visokim svojstvima protiv zamora. SMA se koriste u mnogim grana industrije kao što su medicina, robotika, automobili, zrakoplovstvo, naftna industrija itd.

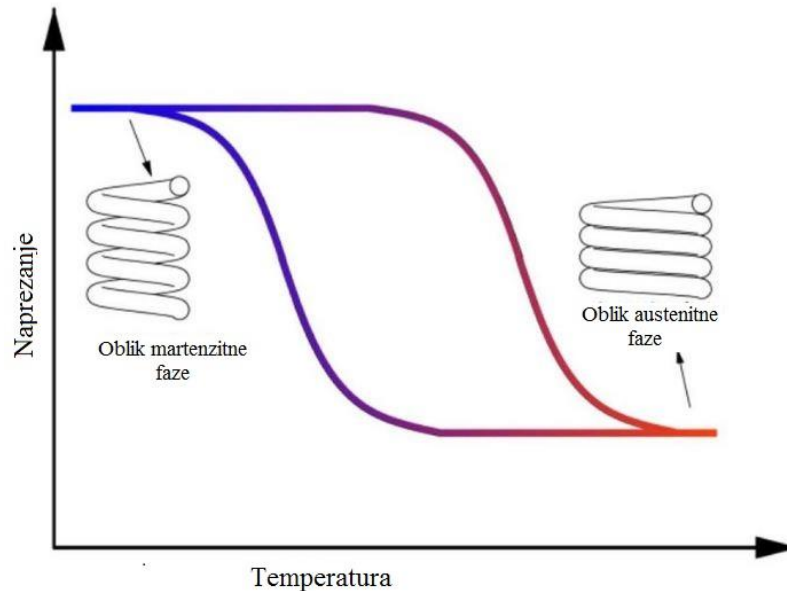
Efekt pamćenja oblika je svojstvo materijala koje omogućuje pamćenje svog originalnog oblika i sposobnost povratka u prvotni oblik nakon što su privremeno deformirani pod određenim uvjetima. U većini slučajeva efekt pamćenja oblika se postiže promjenom temperature. Slitina s efektom pamćenja oblika može biti u dva različita oblika ili faza, a to ovisi o temperature. Pri nižoj temperaturi materijal je u deformiranom stanju tzv. martenzitna faza, dok se pri višoj temperaturi vraća u svoj originalni oblik tzv. austenitna faza. Materijal "zapamti" svoj originalni oblik dok je u austenitnoj fazi. Nakon što se deformira dok je u martenzitnoj fazi, vraća se u svoj izvorni oblik kada se ponovno zagrije iznad određene temperature.

Jednosmjerna memorija oblika (*engl. One-Way Shape Memory*) je specifičan podtip efekta pamćenja oblika koji se odnosi na sposobnost materijala da se vrati u svoj originalni oblik samo jedanput, obično nakon inicijalnog deformiranja. Na slici 2.4. je prikazan graf jednosmjerne memorije oblika u odnosu naprezanja prema temperaturi.



Sl. 2.4 Graf jednosmjerne memorije oblika [3]

Suprotno od jednosmjerne memorije oblika gdje se materijal može vratiti u svoju austenitnu fazu jednom je dvosmjerna memorija oblika. Dvosmjerna memorija oblika (*engl. Two-Way Shape Memory*) je svojstvo materijala koje omogućuje da se materijal može deformirati i vratiti u svoj originalni oblik više puta putem kontrolirane promjene temperature. Na slici 2.5. je prikazan graf dvosmjerne memorije oblika u odnosu naprezanja prema temperaturi.

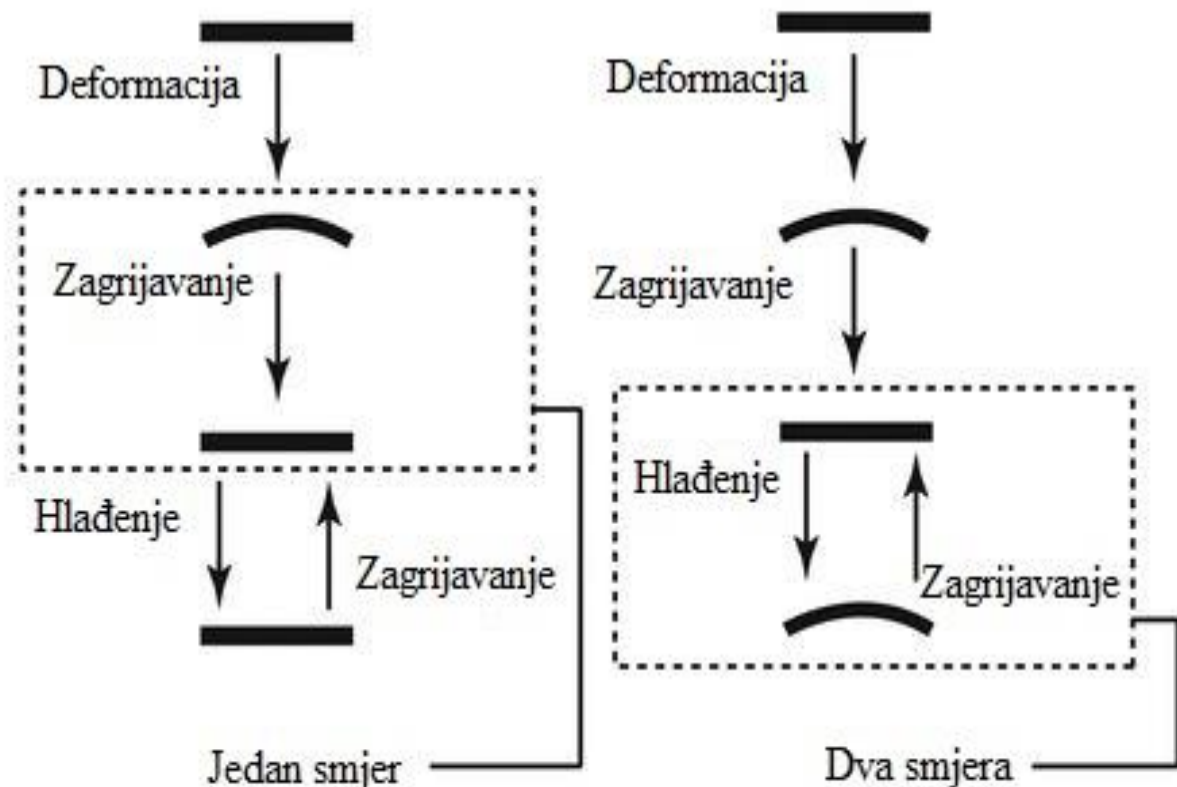


Sl. 2.5 Graf dvosmjerne memorije oblika [3]

Dvosmjerna memorija oblika se može opisati u 4 faze:

- **Deformacija u martenzitsnoj fazi** je prva faza gdje se materijal oblikuje poznatija kao deformirana faza materijala. Ona obično nastupa kada primjenom mehaničkog napora na materijal kao što je savijanje ili stiskanje.
- **Zagrijavanje u austenitsnu fazu** nastupa nakon što je materijal deformiran, zagrijavanjem iznad svoje temperaturne tranzicije prema austenitskoj fazi. Posljedica zagrijavanja uzrokuje da materijal postupno povрати svoj originalni oblik.
- **Hlađenje u martenzitsnu fazu** događa se nakon što se materijal vratio u svoj originalni oblik, deformiranje nastupa nakon ohlađenja na temperature koja je ispod svoje temperaturne tranzicije prema martenzitoj fazi.
- **Ponovno zagrijavanje u austenitnu fazu** opisuje ponovno zagrijavanje iznad svoje temperaturne tranzicije prema austenitnoj fazi, nakon toga materijal se ponovno vraća u svoj originalni oblik.

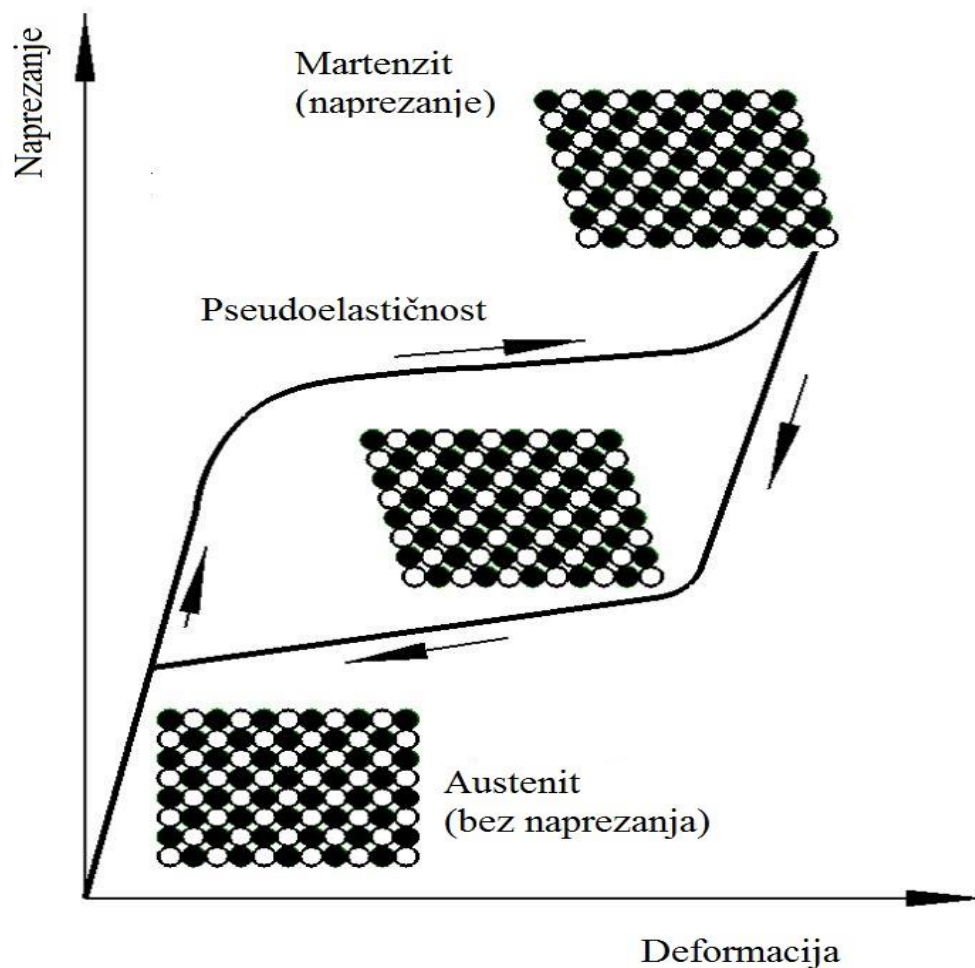
Ovaj ciklus deformacije i oporavka može se ponavljati više puta, što čini materijale s dvosmjernom memorijom oblika korisnima za primjene gdje je potrebna višekratna kontrola oblika materijala. Na slici 2.6. prikazane su faze i razlike između jednosmjerne i dvosmjerne memorije oblika.



Sl. 2.6 Faze jednosmjerne i dvosmjerne memorije oblika [4]

Superelastičnost također poznata kao pseudoelastičnost je svojstvo materijala koje se očituje u iznimnoj sposobnosti materijala da podnese velike deformacije pod opterećenjem i potom se brzo i potpuno vrati u svoj originalni oblik nakon uklanjanja tog opterećenja. Superelastični materijali mogu podnijeti znatne deformacije, često do nekoliko puta veće od njihove početne veličine, bez loma ili trajnog oštećenja. Oporavak oblika se događa nakon uklanjanja opterećenja, superelastični materijal spontano i brzo vraća se u svoj originalni oblik bez ikakvih znakova deformacije. Oporavak oblika obično se događa nakon uklanjanja opterećenja. Superelastičnost se može ponavljati mnogo puta bez gubitka svojstava. To znači da materijal može prolaziti kroz cikluse deformacije i oporavka mnogo puta bez smanjenja njegove superelastične sposobnosti.

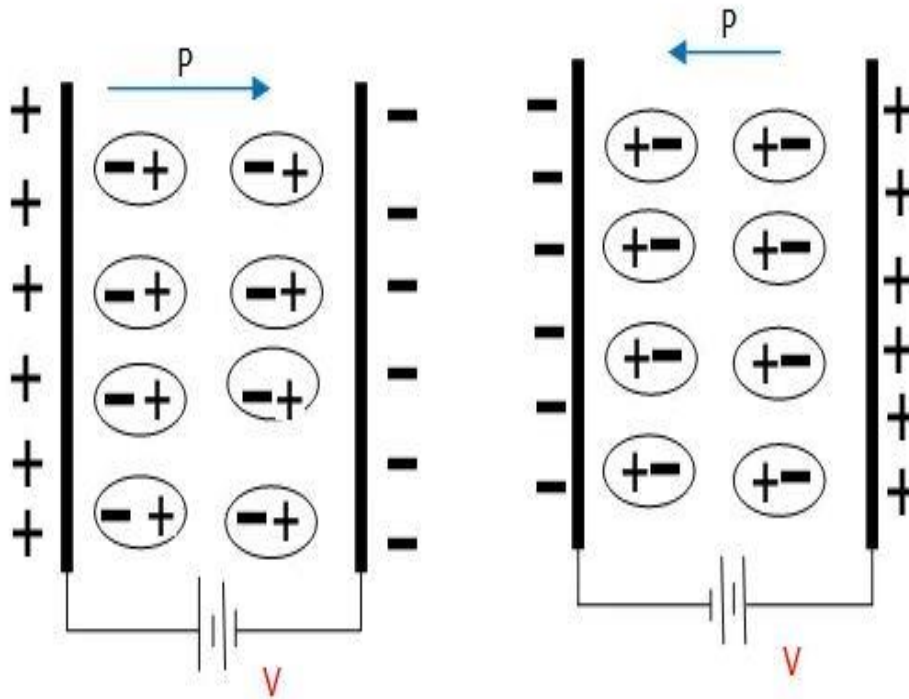
Pseudoelastičnost se postiže promjenom napreznja na materijal, kad se materijal deformira on je u martenzitnoj fazi. Kada se ukloni napreznja na materijal nastupa austenitnoj fazi. Na slici 2.7 vidljiv je odnos napreznja prema deformaciji kod superelastičnosti.



Sl. 2.7 Odnos napreznja prema deformaciji kod superelastičnosti [5]

Najpoznatija i najčešće korištena SMA legura je legura nikla i titana, poznata kao Nitinol koja se sastoji od 50% nikla i 50% titana. Nitinol pokazuje izvanrednu superelastičnost i efekt pamćenja oblika. NiTi se može deformirati do 8% svojog izvornog oblika u jednosmjernoj i do 4% u dvosmjernoj memoriji oblika. Osim nitinola postoje još neke SMA legure: Cu-Al-Ni je legura bakra, aluminijsa i nikla jeftinija je od NiTi legure, Cu-Zn-Al je legura bakra, cinka i aluminijsa, Ni-Ti-Cu je legura nikla, titana i bakra kombinira svojstva SME s električnom vodljivošću bakra.

**Feroelektrični materijali** su posebna vrsta dielektričnih materijala koji pokazuju spontanu električnu polarizaciju, čak i kada nema utjecaja vanjskog električnog polja. Polarizacija se može preokrenuti primjenom vanjskog električnog polja, što je jedno od ključnih svojstava koja razlikuje feroelektrične materijale od drugih dielektrika. Na slici 2.8. prikazana je promjena polarizacije promjenom smjera napona.



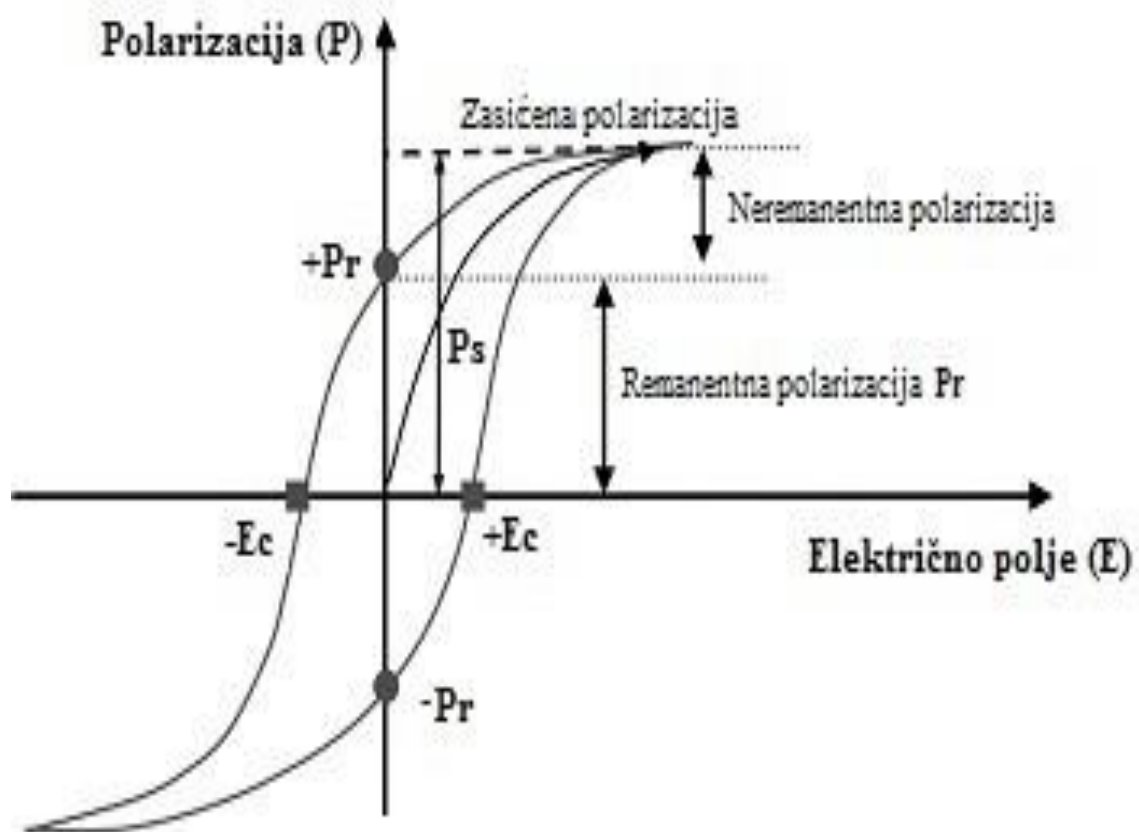
Sl. 2.8 Promjena smjera polarizacije promjenom smjera napona [6]

Naziv feroelektrika dolazi od grčke riječi "ferro", koja znači željezo, iako većina feroelektričnih materijala zapravo ne sadrži željezo. Naziv je odabran zbog analogije s feromagnetizmom, gdje materijali pokazuju spontanu magnetizaciju. Otkriće feroelektriciteta dogodilo se 1921. godine kada je Joseph Valasek proveo eksperimentalno istraživanje na Rochelle soli koje su poznate pod kemijskim nazivom kalijev natrijev tartarat tetrahidrat. Tijekom svojih eksperimenata, Valasek je primijetio da ovaj materijal pokazuje spontanu polarizaciju, a to se smatralo prvim dokumentiranim slučajem feroelektriciteta i feroelektričnog materijala.

Polarizacija u feroelektričnim materijalima odnosi se na spontano stvaranje električnog dipolnog momenta unutar materijala, bez potrebe za primjenom vanjskog električnog polja. Ova spontanost razlikuje feroelektrične materijale od običnih dielektrika, u kojima se polarizacija javlja samo kada je materijal izložen vanjskom polju. Mehanizam polarizacije proizlazi iz specifične kristalne

strukture materijala. Ovi materijali imaju asimetričnu kristalnu rešetku koja nema središte simetrije to jest to je necentrosimetrična struktura. U takvoj strukturi, atomi ili ionske skupine unutar kristala mogu se pomicati na način da stvaraju trajne električne dipolne momente, čak i u odsutnosti vanjskog električnog polja. Jedno od ključnih obilježja feroelektričnih materijala je njihova petlja histereze, koja prikazuje odnos između polarizacije i primijenjenog električnog polja. Kada se na feroelektrični materijal primijeni vanjsko električno polje, polarizacija raste sve dok ne postigne zasićenje. Kada se polje smanji na nulu, materijal zadržava određeni iznos polarizacije, što se naziva "zaostala polarizacija".

Ako se primijeni električno polje suprotnog smjera, polarizacija se smanjuje, prelazi kroz nulu i mijenja smjer, dok se ne postigne novo zasićenje u suprotnom smjeru. Ovaj ciklus se ponavlja, stvarajući karakterističnu petlju na grafu polarizacije naspram električnog polja. Slika 2.9. prikazuje petlju histereze feroelektričnog materijala.



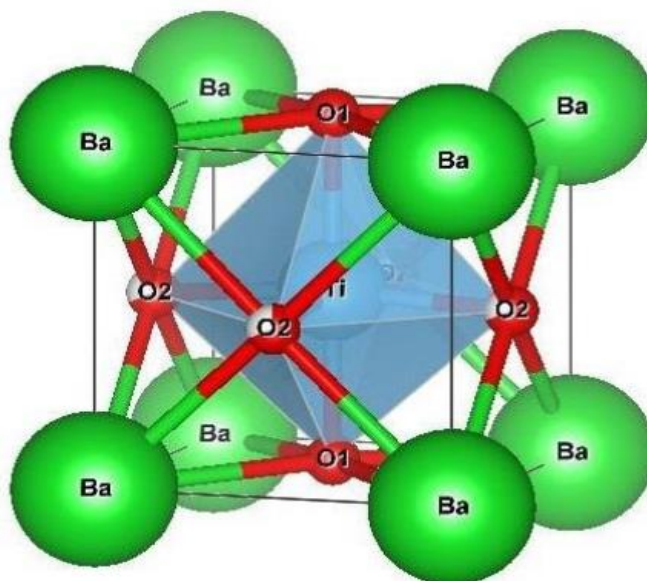
Sl. 2.9 Petlja histereze feroelektričnog materijala [7]

Na horizontalnoj osi nalazi se električno polje (E), a na vertikalnoj osi polarizacija (P). Petlja histereze prikazuje odnos između električnog polja i polarizacije dok se električno polje mijenja.

Petlja histereze na grafu može se opisati u nekoliko točaka:

- Zasićena polarizacija ( $P_s$ ) je točka na petlji gdje polarizacija dostiže svoju maksimalnu vrijednost pod utjecajem električnog polja. To znači da su svi dipoli u materijalu maksimalno usmjereni u smjeru polja.
- Remanentna polarizacija ( $P_r$ ) je polarizacija kada se električno polje ukloni ( $E = 0$ ), materijal zadržava određenu količinu polarizacije, nazvanu remanentna polarizacija ( $P_r$ ). Ova vrijednost je prikazana kao pozitivna ( $+P_r$ ) i negativna ( $-P_r$ ) remanentna polarizacija, ovisno o smjeru prethodno primijenjenog polja.
- Koercitivno polje ( $E_c$ ) je minimalno električno polje potrebno da se remanentna polarizacija poništi. Električno polje označeno je sa  $+E_c$  i  $-E_c$ , ovisno o smjeru polja. Kada električno polje dosegne ove vrijednosti, polarizacija prolazi kroz nulu.
- Neremanentna polarizacija prikazuje liniju polarizacije koja nije ostala kada se električno polje ukloni. Ona pokazuje razliku između maksimalne polarizacije i remanentne polarizacije.

Barijev titanat ( $BaTiO_3$ ) je keramički materijal s odličnim električnim svojstvima i jedan je od najistaknutijih feroelektričnih materijala koji ima i piezoelektrična te dielektričkih obilježja, zbog kojih ima veliku primjenu u elektronici. Barijev titanat nalazi se u obliku bijelog praha, pripada skupini perovskita, a kristalna struktura mu je kubična koja je vidljiva na slici 2.10.



Sl. 2.10 Kristalna struktura barijevog titanata [8]



Perovskitnu strukturu možemo prikazati kao kubičnu rešetku gdje je barij (zeleni atomi) smješten na vrhove kocke, titanij (plavi atom) je smješten u centar kocke, dok se kisik (crveni atomi) nalazi na sredini bridova kocke. Njegova struktura prolazi kroz nekoliko faznih transformacija ovisno od temperature. Dvije faze su koje su bitne za ovaj primjer su kubična faza i tetragonska faza. Kod barijevog titanata ključna je Curiejeva temperatura koja je na oko  $120^{\circ}\text{C}$ , gdje on prelazi iz kubične u tetragonsku fazu ovisno o temperaturi. Ako je temperatura iznad  $120^{\circ}\text{C}$  nalazi se u kubičnoj fazi i materijal se ponaša kao paraelektrik bez spontane polarizacije, kada je temperatura ispod  $120^{\circ}\text{C}$  nastupa tetragonska faza gdje materijal poprima feroelektrična svojstva s trajnom polarizacijom. Barijev titanat zbog svojih odličnih feroelektričnih, električnih i piezoelektričnih svojstava našao se u brojnim granama elektronike. Ovaj materijal nalazi se u brojnim keramičkim kondenzatorima zbog svoje dielektričnosti, zatim u senzorima, akcelerometrima i aktuatorima zbog dobre piezoelektričnosti. Zbog svoje feroelektričnosti barijev titanat možemo pronaći u FeRAM memoriji jer je moguće dugotrajno čuvanje podataka bez potrebe za stalnim napanjem. Zapisivanje "1" i "0" na ovu memoriju vrši se pomoću električnog polja koje usmjerava polarizaciju u jedno od dva stabilna stanja. FeRAM memorije koriste se na primjer u pametnim karticama gdje je bitna brzina pohrane i čitanje podataka s vrlo niskom potrošnjom energije.

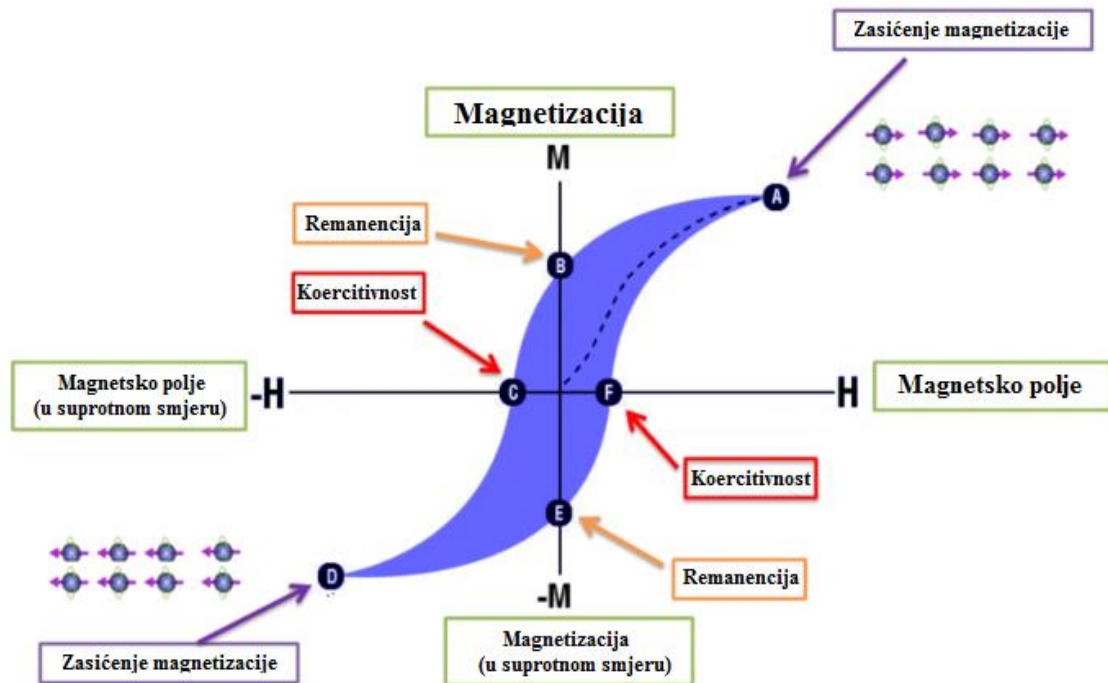
**Feromagnetni materijali** su posebna vrsta materijala zbog svojih jedinstvenih i odličnih magnetskih svojstava. Zbog tih svojstava mogu se sresti u mnogim granama industrije kao što su elektroindustrija, autoindustrija, medicina, informatička industrija, elektronika i drugdje. Ovi materijali pokazuju najjači oblik magnetizma poznat kao feromagnetizam. Naziv feromagnetizam dolazi od riječi latinske riječi „*ferrum*“ koja u prijevodu znači željezo, jer su željezne legure najpoznatije među feromagnetskim materijalima. Feromagnetizam proizlazi iz kvantno mehaničkih svojstava atoma. Elektroni u atomima imaju dvije vrste gibanja koje pridonose magnetnim karakteristikama. Prva vrsta je orbitalno gibanje oko jezgre, a druga unutarnje gibanje to jest spin. U feromagnetizmu od bitnijih pojmova za lakše opisivanje mikroskopskih fenomena magnetizma su izmjena interakcija, magnetne domene i Curiejeva temperatura. Zbog izmjene interakcija feromagnetni materijali pokazuju trajnu magnetizaciju. Izmjena interakcija je kvantnomehanički efekt koji proizlazi iz Pulijevog principa isključenja i kvantne mehanike spina elektrona. Paulijev princip isključenja nam govori da dva elektrona ne mogu zauzimati isto kvantno stanje u atomu, to jest da dva elektrona ne mogu imati iste kvantne brojeve uključujući spin, ako su u istoj orbitali. Elektronski spin podrazumjeva da elektroni imaju unutarnji kutni nazvan spin koji je usmjeren prema gore ili dolje. Spin elektrona doprinosi stvaranju magnetnog momenta, što znači da svaki elektron može djelovati kao magnet. Magnetne domene su mala

područja unutar feromagnetnih materijala u kojima su magnetski momenti ili spinski momenti atoma regulirani u istom smjeru. Ova regulacija atoma rezultira stvaranjem jakog lokalnog magnetnog polja unutar svake domene. Magnetni domeni objašnjavaju kako feromagnetni materijali mogu imati ili ne imati ukupnu magnetizaciju ovisno o vanjskim parametrima. Kada su domene nasumično regulirane magnetni učinak međusobno se poništava, tada materijal gubi magnetno svojstvo. Curiejeva temperatura ( $T_c$ ) ili točka je granica temperature iznad koje feromagnetni materijeli gube svoje feromagnetna svojstva i postaju paramagnetni to jest iznad ove točke materijal više ne postiže spontanu magnetizaciju, čak i ako je prisutno vanjsko magnetno polje. Na Curiejevoj temperaturi dolazi do promjene u unutarnjoj strukturi feromagnetnog materijala. Ispod Curiejeve temperature atomi su spontano usklađeni zbog snažne promjene sinergije između njih, a posljedica toga je trajno magnetno polje. Iznad Curiejeve temperature nastupa paramagnetizam. U paramagnetnom stanju materijal reagira na magnetno polje, ali ne zadržava magnetizaciju kada se vanjsko magnetno polje ukloni. Ako se temperatura vrati ispod Curiejeve temperature materijal opet vraća trajno magnetno polje. Curiejeva temperatura varira ovisno o materijalu, a ovo su neki primjeri: željezo  $758\text{ }^{\circ}\text{C}$ , nikal  $360\text{ }^{\circ}\text{C}$ , kobalt  $1075\text{ }^{\circ}\text{C}$ , gadolinij  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Curiejeva temperatura bitna je u proizvodnji magnetskih metrijala i uređaja kao na primjer trajnih magneta, magnetne memorije, elektromotora, MR uređaja u medicine, magnetskih senzora i drugih. Slika 2.11. prikazuje fotografiju gdje je prikazan trajni magnet napravljen od željeza vrlo velike magnetizacije.



**Sl. 2.11** Fotografija trajnog magneta

Feromagnetizam možemo opisati i pomoću makroskopskih svojstava feromagnetnih materijala, a to su magnetna petlja hitezeze. Slika 2.12. pokazuje histerezinu petlju za feromagnetne materijale poznatiju kao i M-H krivulja. Gdje je M magnetizacija, a H magnetno polje.

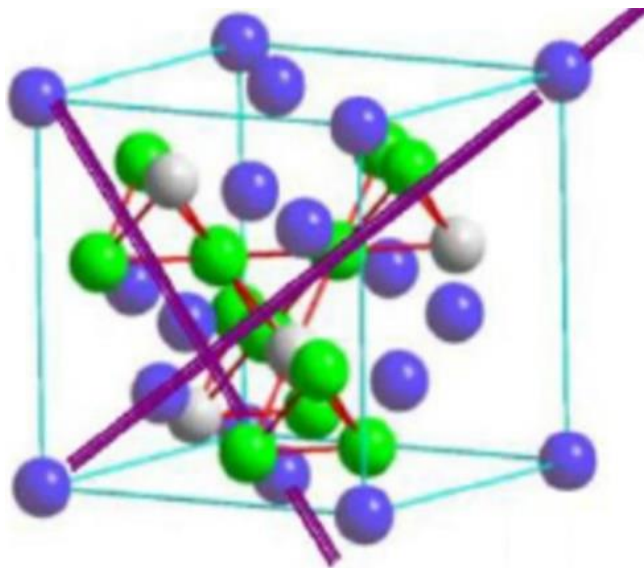


Sl. 2.12 Petlja hitezeze za feromagnetne materijale [9]

Krivulja na slici 2.12 pokazuje odnos između magnetizacije i primjenjenog magnetskog polja.

- Točka A prikazuje kada se magnetno polje poveća do maksimalne vrijednosti i dolazi do zasićenja
- Točka D prikazuje kada se magnetno polje smanji i ostvari u suprotnom smjeru i dolazi do zasićenja u negativnom predznaku
- Točka B prikazuje magnetno polje smanjeno na nulu nakon zasićenja, materijal zadržava remanentnu magnetizaciju
- Točka E prikazuje magnetno polje smanjeno na nulu nakon zasićenja, ali u suprotnom smjeru. Materija također zadržava remanentnu magnetizaciju.
- Točka C prikazuje uklanjanje remanentne magnetizacije (točka B) primjenom negativnog magnetnog polja što dovodi do koercitivnosti
- Točka F prikazuje uklanjanje remanentne magnetizacije (točka E) primjenom pozitivnog magnetnog polja što dovodi također do koercitivnosti

Neki od primjera pametnih magnetnih materijala vezano za feromagnetizam su magnetostriksijski materijali i magnetoreološke tekućine. Magnetostriksija je pojava gdje materijal mijenja svoje dimenzije ili oblik kada je izložen magnetskom polju. Ovi materijali se koriste u aktuatorima, sensorima i pretvaračima koji rade na principu ultrazvuka. Neki od primjera ovih legura su Terfenol-D koji ima izuzetno visoku magnetostriksiju (<2000 ppm), galfenol (<400 ppm), permendur (<100 ppm) i nikal-kobalt (<50ppm). Na slici 2.13 prikazna je kristalna struktura legure Terfenol-D.



**Sl. 2.13** Kristalna struktura legure Terfenol-D [10]

Magnetoreološke tekućine su vrsta pametnih materijala čija se viskoznost brzo i naglo mijenja pod utjecajem vanjskog magnetskog polja. Magnetoreološke tekućine sastoje se od tri glavne komponente: magnetnih čestica, nosivih tekućina i raznih aditiva. Magnetni materijali koji se koriste u ovim tekućinama su feritni materijal magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), legure željeza i nikla te karbonilno željezo. Feritni materijali se najčešće koriste u ovim tekućinama zbog dobre kemijske stabilnosti. To su zapravo keramički materijali to jest izolatori s feromagnetnim svojstvima, a koriste se zbog vrlo dobre otpornosti na oksidaciju i koroziju u ovim tekućinama. Kada se primjeni magnetno polje na magnetoreološku tekućinu ona mijenja svoju strukturu tako što značajno povećava viskoznost, čineći je vrlo čvrstom. Kada se ukloni magnetno polje ona ponovno postaje tekuća i smanjuje svoju viskoznost. Najčešća primjena ovih materijala je u autoindustriji i medicini. U autoindustriji se koriste u kvačilima i amortizerima za kontrolu vibracija i udaraca, dok se u medicini koriste u naprednim protetskim uređajima gdje tekućine omogućuju finu kontrolu pokreta.

**Tab 2.1.** Usporedba karakteristika nekih pametnih materijala [11]

	Piezoelektrični materijali (PE)	Slitine s efektom pamćenja oblika (SMA)	Feroelektrični materijali (FE)	Feromagnetni materijali (FM)
	keramike, polimer	metali (neke keramike)	keramike	keramike, metali
veličina promjene oblika DL	< 0,1 %	< 10 %	< 1 %	~ 0,1 %
inicijacija	električno polje	temp. (ili meh. opterećenje)	električno polje	magnetno polje
fazna transformacija	-	+	+	+
domena strukture	-	+	+	+
histereza	uska	široka	uska	uska
primjeri vrsta materijala	SiO <sub>2</sub> , PVDF	NiTi, CuZn, CuAl	Pb <sub>3</sub> MgNb <sub>2</sub> O <sub>9</sub> , BaTiO <sub>3</sub> , PbTiO <sub>3</sub>	TbFe, Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
komercijalni naziv	Kvarc, PVDF	NiTiNOL (NiTi)	PMN	TERFENOL-D, Feriti

## 2.2 Materijali s vanjskom inteligencijom

Materijali s vanjskom inteligencijom su kromatski materijali koji imaju sposobnost mijenjati najčešće boju kao odgovor na različite vanjske podražaje. Njihova sposobnost promjene boje odvija se u molekularnoj strukturi, raspodjelom atoma unutar kromatskog materijala, a efekt tih promjena je apsorpcija i refleksija svjetlosti. Vanjski podražaji poput promjene temperature (termokromatski), električnog polja (elektrokromatski), svjetla (fotokromatski), mehaničkih sila ili tlaka (mehanokromatski), kemijskih (pH osjetljivi) vrijednosti i magnetskog polja (magnetokromatski) daju rezultat promjene boje vidljiv ljudskom oku.

**Fotokromatski materijali** su pametni materijali koje karakterizira mogućnost promjene boje kao odgovor na promjenu intenziteta svjetlosti. Pod utjecajem ultraljubičastog svjetla molekule unutar materijala prolaze kroz strukturnu promjenu koja mijenja njihova apsorpcijska svojstva, a što rezultira promjenom boje. Kada nestane ultraljubičasto svjetlo ili se smanji intenzitet svjetla, molekule unutar materijala poprimaju izvorni oblik. Najpoznatije vrste fotokromatskih materijala su spiropirani koji su organski, dok su anorganski srebrni bromid (AgBr), srebrni jodid (AgI). Najčešća primjena u praksi spiropirana je izrada fotokromatskih leća za dioprijske naočale. Kada su naočale izložene jakom izvoru sunčeve svjetlosti kroz par sekundi se zatamne, no ako uđemo u zatvoreni prostor bez sunčeve svjetlosti vraćaju se u izvorno prozirno stanje. Na slici 2.13 prikazane su fotokromatske naočale i proces zatamljivanja naočala pri utjecaju sunčeve svjetlosti.



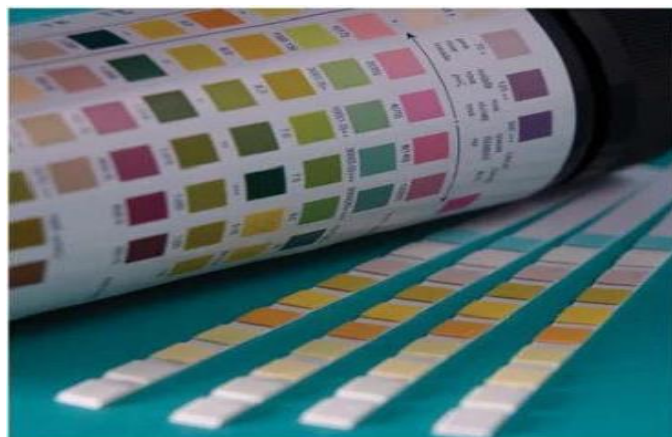
Sl. 2.13 Fotokromatske naočale [12]

Srebrni bromid i njegovu primjenu možemo pronaći u analognim fotoaparatom to jest filmskoj traci koja se nalazi u fotoaparatu. Filmska traka je napravljena je od tri sloja podloge, fotoosjetljivog sloja i zaštitnog sloja. Fotoosjetljivi sloj u filmskoj traci za snimanje crno-bijelih fotografija sadrži fotografsku emulziju u kojoj je srebrni bromid. Kada svjetlost prođe kroz objekt fotoaparata i dođe do fotoosjetljivog sloja reagira sa srebrnim bromidom razdvajajući srebro od broma stvarajući fotografiju. O intezitetu svjetlosti koja je kemijski reagirala sa srebrnim bromidom ovisi intezitet crne nijanse, više svjetlosti stvara više srebrnog metala i daje crnoj nijansi jači intezitet. Na slici 2.14 prikazan je negativ filmske trake za crno-bijele analogne fotografije.



Sl. 2.14 Filmska traka za crno-bijele fotografije [13]

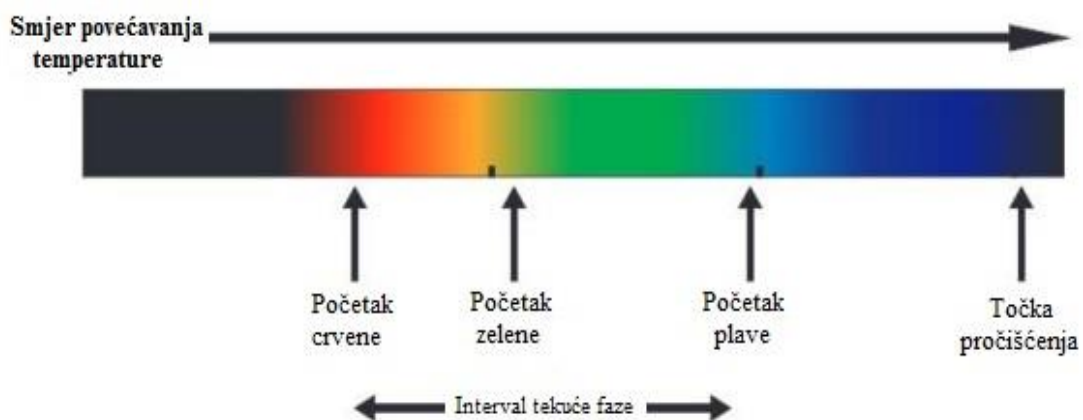
**pH osjetljivi** materijali su posebna vrsta pametnih materijala kod kojih se događa promjena fizičkih ili kemijskih svojstava na promjenu pH vrijednosti okoline. Ovi materijali najviše su korišteni u medicini, zaštiti okoliša, kemijskom inženjerstvu i farmaceutskoj industriji. Najčešće korišteni materijali pH osjetljiv polimeri, hidrogelovi i liposomi. Polimeri na promjenu pH vrijednosti odgovaraju promjenom boje, topljivosti ili strukture. Na slici 2.14 prikazan je pH osjetljiv polimerski test za mokraću koji se koristi u medicini i laboratorijskoj dijagnostici.



Sl. 2.13 pH osjetljivi polimerski test [14]

Dva primjera pH osjetljivih materijala su poliakrilna kiselina (PAA) i polietilenimin (PEI) protoniran. Poliakrilna kiselina (PAA) je polimer koji se širi i povećava svoj volumen u bazičnim uvjetima, dok se u kiselim skupi. Reakcija polietilenimina (PEI) protoniranog u kiselim uvjetima je topljivost u vodi. Hidrogelovi na bazi hitozana ili na bazi alginata su biopolimeri koji su osjetljivi na promjenu pH vrijednosti, u kiselim uvjetima se tope, dok su netopljivi u bazičnim. Njihova primjena je ciljana a to je pametna dostava lijekova u ljudskom organizmu. Ovom metodom povećavamo koncentraciju lijeka u nekim dijelovima organizma u odnosu na druge. Na primjer ljudski želudac ispunjen je želučanom kiselinom, dok su crijeva neutralna ili blago bazična. Zbog toga se hidrogel na bazi alginata koristi za izradu lijekova koji liječe želučane tegobe poput žgaravice jer neće reagirati u crijevima, nego tek u želucu. Aliginat u dodiru sa želučanom kiselinom reagira i stvori se zaštitna membrana koja nedozvoljava prolazak želučane kiseline nazad u jednjak što ublažava simptome žgaravice.

**Termokromatski materijali** su pametni materijali koji imaju reakciju promjene boje kada dolazi do promjene temperature. Promjena boje može biti reverzibilna i ireverzibilna, a to su ujedno i dvije podjele koje opisuju trajanje promjene. Reverzibilna promjena je rezultat utjecaja topline na materijal, kada se temperatura vrati na početnu točku vrati se i početna boja materijala, dok je kod ireverzibilnih ta promjena boje trajna. Termokromatski materijali podjeljeni su na dvije vrste, a to su tekući kristali i leuko boje. Tekući kristali na nižim temperaturama su u svojoj kristalnoj fazi, dok povećavanjem temperature prelaze u tekuću fazu. Kada su u kristalnoj fazi slabije reflektiraju svjetlost, odnosno boje koje vidimo su tamnije nijanse koje su pri tome i manje intezivne ili su prozirne tj. crne jer su na crnoj podlozi, a ova faza poznata je i kao smektična faza. Na slici 2.14 možemo vidjeti tri faze promjene boja tekućih kristala.



SI. 2.14 Faze promjene boja kod tekućih kristala [15]



Zagrijavanjem tekućeg kristala dolazi do promjene u strukturi i nastupa tekuća faza poznata kao kiralna faza. U tekućoj fazi molekularna struktura postaje nepravilna i manje organiziranija i dolazi do promjene boje, a ova faza se naziva i kiralna faza. Ako je intezitet temperature prevelik materijal dolazi do točke pročišćavanja, molekule unutar materijala u toj točki prestaju se ponašati kao tekući kristali i prelaze u potpuno drugačije oblike i ponovno postaju prozirni. To znači da možemo vidjeti materijal koji se mijenja iz prozirnog u obojen kako temperatura raste, a zatim ponovno u prozirno ako temperatura postane prevelika.

Prednosti tekućih kristala su precizno mjerenje temeprature i vrlo brza reakcija na promjenu temeprature. Nedostatci su povećani trošak proizvodnje zbog precizne proizvodnje tehnologije i dugotrajno izlaganje ultraljubičastom svjetlu koje oštećuje tekuće kristale uslijed čega gube intezitet boju i preciznost. Primjeri gdje se tekući kristali koriste u praksi su termotrake u medicini kada je potrebno tek rođenoj djeci izmjeriti temperaturu tijela, različiti senzori u automobilima koji označavaju pregrijavanje određenih dijelova, dekoracija prostora kao što su fotelje koje mijenjaju boju kada osjete toplinu ljudskog tijela, modna industrija u proizvodnji obuće koja promjeni boju kada je nosimo, prehrambena industrija za detekciju točne temperature hrane i pića, tester kapaciteta baterija gdje pritiskom dva prsta na bateriju zatvaramo strujni krug, kada smo zatvorili strujni krug kroz tester prolazi struja koja zagrijava tekuće kristale i prikazuje razinu preostalog kapaciteta baterije. Na slici 2.15 je prikazana baterija koja ima tester kapaciteta pomoću tekućih kristala koji su reverzibilni.



**Sl. 2.15** Tester za provjeru kapaciteta baterije

Druga vrsta termokromatskih materijala su leuko boje. Leuko boje su posebne vrste boja koje pod utjecajem na primjer temperature mijenjaju boju, također mogu biti reverzibilne i ireverzibilne. Njihov naziv dolazi od grčke riječi „*leukos*“ što u prijevodu znači bijelo. Leuko boje mogu prelaziti iz bezbojnog u obojano stanje ili obrnuto. Leuko boje su organskog podrijetla i sadrže najmanje tri komponente: bojila, razvijača i otapala. Omjer u leuko bojama ove tri komponente mora biti optimalan da bi postigli pravilan termokromatski efekt. Promjena boje ima dvije reakcije između komponenti, prvo je između bojila i razvijača, dok je druga reakcija između otapala i razvijača. Kada je leuko boja na nižim temperaturama otapalo se nalazi u krutom stanju, povećanjem temperature otapalo prelazi u tekuće stanje i dolazi do nestanka komponente bojila te nastaje dominacija samog razvijača i otapala u strukturi leuko boje. Rezultat ove reakcije je prelazak iz obojenog u neobojeno stanje, što omogućava uzorku ispod leuko boje da postane vidljiv. Leuko boje imaju razne primjere kao što su šalice koja promjeni boju kada ulijemo vrući napitak, izrada termopapira koji ima sloj leuko boje koji se koristi za ispis računa u trgovinama, prometni znakovi koji upozoravaju na stanje ceste, termalni indikator na ambalaži koji pokazuje je li proizvod u transportu bio izložen visokim temperaturama, u automobilskoj industriji gdje se događa promjena boje automobila ovisno o temperaturi okoline uzorak ispod leuko boje postaje vidljiv. Slika 2.16 prikazuje primjer reakcije premaza leuko boje na automobilu pri promjeni temperature.

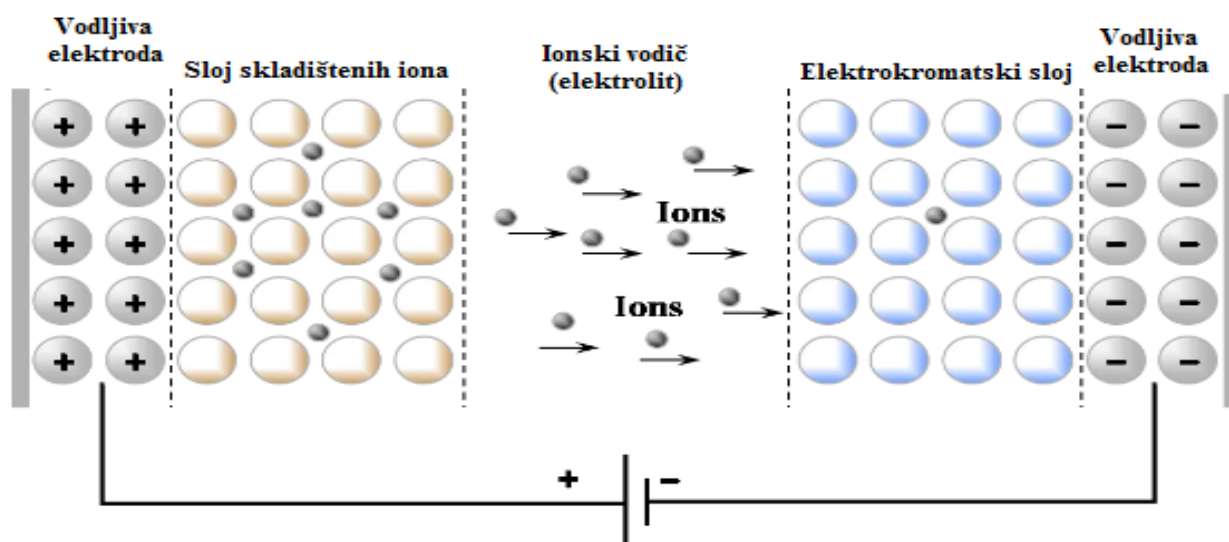


**SI 2.16** Primjer premaz leuko boje na automobilu pri promjeni temperature [16]

Prednosti leuko boja su također brza reakcija na promjenu temperature i jeftiniji proces proizvodnje od tekućih kristala, dok su nedostaci slični to jest ako se izlože prevelikoj temperaturi

ili jakom ultraljubičastom svjetlu gube svoje reverzibilno svojstvo. Za usporedbu tekući kristali svoju boju mogu mijenjati vrlo precizno i kroz širi spektar boja, dok su leuko boje jednostavnije i pokazuju samo je li nešto hladno ili toplo s jednostavnom promjenom svoje prozirnosti. Zbog svog jeftinijeg i jednostavnijeg procesa proizvodnje leuko boje puno su češće korištene u svakodnevnom životu.

**Elektrokromatski materijali** imaju mogućnost promjene boje ili prozirnosti kada primijenimo električni napon. Promjena boje ili prozirnosti je rezultat kemijske reakcije zbog utjecaja napona unutar materijala i promjene rasporeda elektrona i iona. Ova kemijsko električna reakcija se zove redoks, što je skraćeno od „redukcija-oksidacija“. Redukcija i oksidacija su dvije glavne promjene u redoks reakciji materijala zbog koje dolazi do promjena boje ili prozirnosti materijala. Oksidacija je proces kada materijal gubi ione, a redukcija kada prima ione. Na slici 2.17 prikazana je promjena rasporeda iona unutar elektrokromatskog materijala.



SI 2.17 Promjena rasporeda iona unutar elektromatskog materijala [17]

Kada narinemo napon između dvije elektrode ioni iz sloja skladištenih iona započinju prelazak kroz elektrolit prema elektrokromatskom sloju. Kada ioni dođu u elektrokromatski sloj on promjeni svoja optička svojstva to jest svoju boju ili prozirnost. Kada se napon isključi ioni se vraćaju u kontra smjeru vraćajući prvobitnu boju ili prozirnost. Ovo svojstvo ima nekoliko vrsta materijala kao što su volfram oksid ( $\text{WO}_3$ ), titanov oksid ( $\text{TiO}_2$ ) i nikal oksid ( $\text{NiO}$ ). Neke od prednosti elektrokromatskih materijala su niska potrošnja energije jer kada se promijeni boja potrebno je malo energije za održavanje promjene i trajnost odnosno mogu podnijeti tisuće ciklusa

promjene bez gubitka performansi materijala. Nedostaci su to što je brzina odgovora promjene u nekim slučajevima prespora, kada su u pitanju ekstremni uvjeti tu je nedostatak dugotrajnost, a troškovi izrade još uvijek su visoki. Elektrokromatski materijali našli su svoju primjenu pri izradi pametnih stakala koji mogu prilagoditi svoju prozirnost po želji korisnika na primjer u uredima koji za vrijeme sastanka zahtjevaju privatnost, pri izradi e-paper zaslona firme Ynvisible proizvode informacijske zaslone koji se napajaju iz gumbastih baterija koje traju do 5 godina, automobilski proizvođači koriste elektrokromatske retrovizore i krovove kojima vozač može kontrolirati svjetlost koja ulazi u automobil. Vozač kroz središnji upravljački sustav automobila može izabrati hoće li krovni prozor biti proziran, zatim može odabrati samo dijelove krovnog prozora koji će biti zamućeni ili da cijeli krovni prozor bude neproziran. Na slici 2.18 prikazan je elektrokromatski krovni prozor Porsche Taycana.

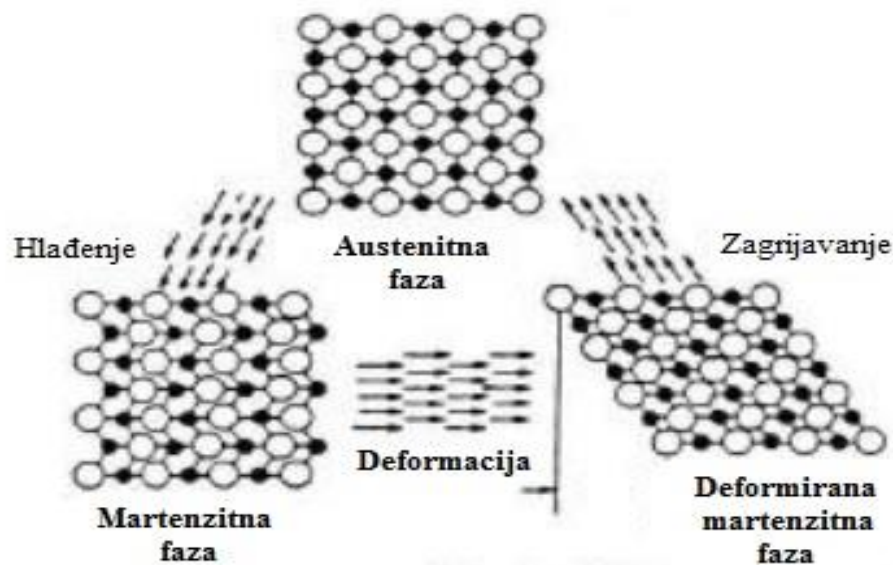


**SI 2.18** Elektrokromatski krovni prozor Porsche Taycana [18]

### 3. VRSTE SLITINA PAMETNIH MATERIJALA I STRUKTURA

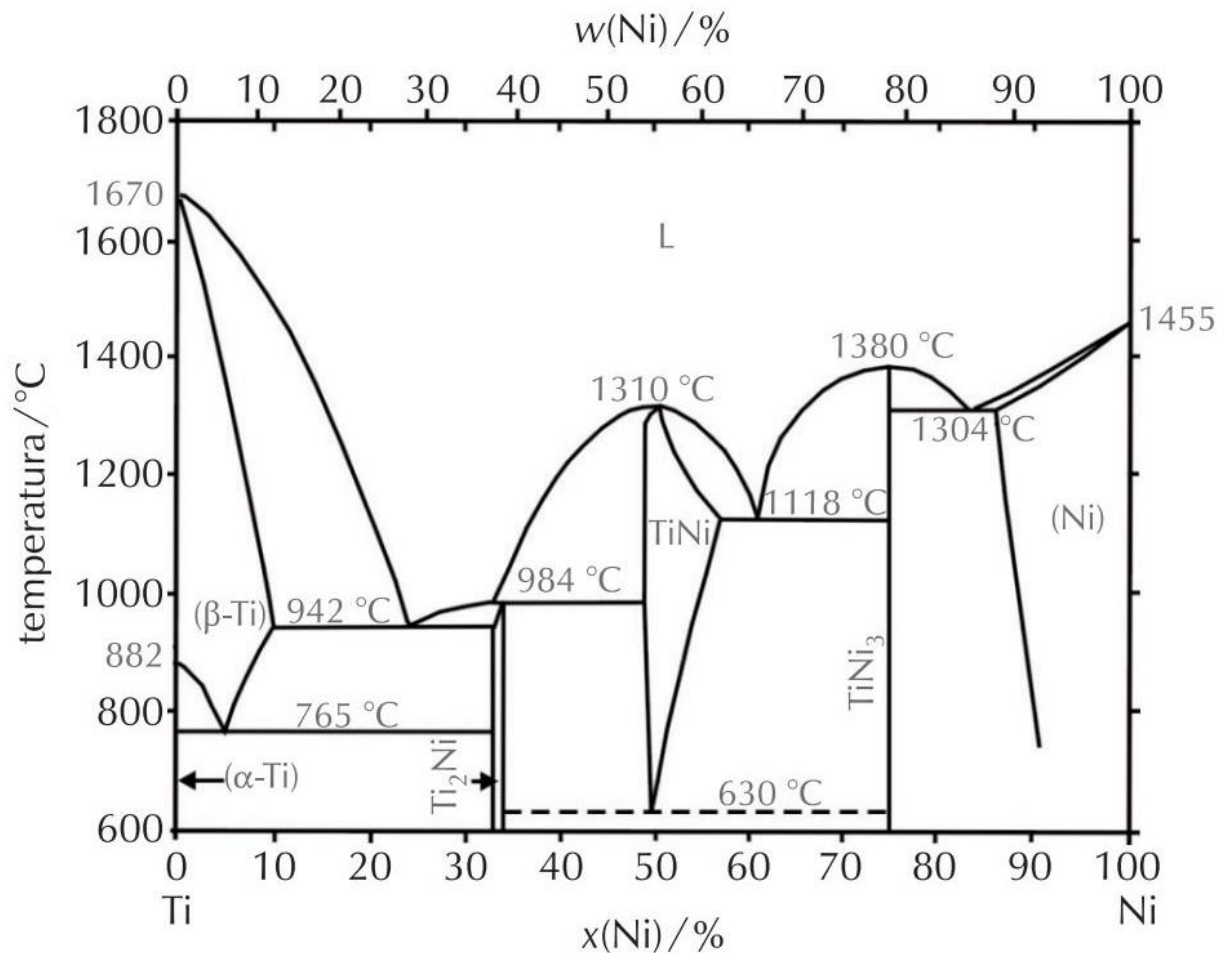
#### 3.1. Slitina NiTi

Slitina NiTi poznatija i kao NiTiNOL je legura koja se sastoji od 50% nikla i 50% titana. Neka od značajnih svojstava nitinola su: pamćenje oblika, superelastičnost i biokompatibilnost. Nitinol ima sposobnost pamćenja oblika što znači da kad se zagrije iznad određene temperature poznate kao temperatura transformacije, ima mogućnost vraćanja u svoj izvorni oblik iako je bio deformiran. Pri temperaturama iznad temperature transformacije javlja se superelastičnost, a to svojstvo nam govori da se nitinol može značajno saviti ili rastegnuti do 8% i zatim se vratiti u svoj prvobitan oblik kada opterećenje prestane bez da se trajno deformira. Nitinol je našao svoju značajnu primjenu u medicini jer je biokompatibilan materijal. Zbog biokompatibilnosti našao je primjenu u medicinskim stentovima, ortodontskim aparatičima i implatatima. Jedinstvenost NiTi slitina zasniva se na termo elastičnoj faznoj transformaciji, a koja omogućava svojstva navedena iznad. Visokotemperaturna faza, poznata i kao austenitna ima intermetalnu kristalnu strukturu, dok martenzitna faza ima monolitnu kristalnu strukturu. Kada se austenitna faza ohladi, austenit se pretvara u martenzit, dok je oblik materijala izvana isti kao i prije. Na mikroskopskoj razini dolazi do promjene te se materijal lako deformira u novi oblik i ostaje u tom obliku. Kada se materijal ponovno zagrije, dolazi u austenitnu fazu te se vraća u originalni oblik. Primjer navedenog na mikroskopskoj razini može se vidjeti na slici 3.1.



SI 3.1 Promjena strukture na mikroskopskoj razini [19]

Osim promjena na mikroskopskoj razini od važnog značaja za samu NiTi slitinu je fazni dijagram. Fazni dijagrami omogućuju određivanje stabilnosti različitih faza u ovisnosti o temperaturi i kemijskom sastavu različitih slitina. Fazni dijagram slitine NiTi s prisjetljivosti oblika prikazan je na slici 3.2.



Sl. 3.2 Fazni dijagram slitine NiTi s prisjetljivosti oblika [20]

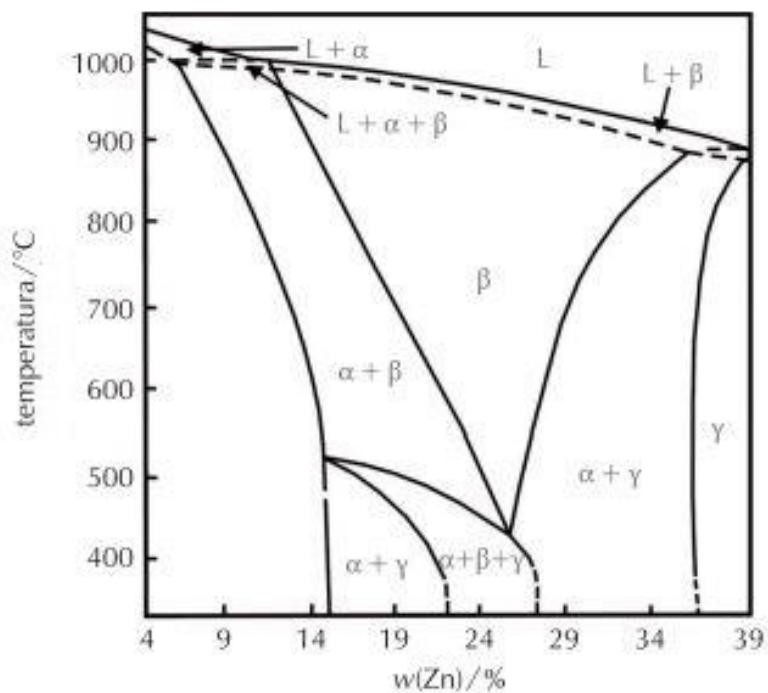
Visokotemperaturna austenitna faza ima kubičnu strukturu B2. Faza TiNi s tipom strukture B2 nastaje sporim hlađenjem na sobnu temperaturu. U faznom dijagramu značajan je središnji dio između faza Ti<sub>2</sub>Ni i TiNi<sub>3</sub>. Faza Ti<sub>2</sub>Ni je kubične strukture, dok faza TiNi<sub>3</sub> ima heksagonsku strukturu D0<sub>24</sub>. Brzim hlađenjem slitina se transformira u martenzit. Niskotemperaturna martenzitna faza je monoklinske strukture B19'. Fazni dijagram još ove slitine, uvijek je predmet brojnih rasprava zbog prisutnosti ili odsutnosti eutektoidnog raspada TiNi → Ti<sub>2</sub>Ni<sub>3</sub> → TiNi<sub>3</sub> na temperaturi od 630 °C [20]. Maksimalna granica istezanja su do 8% jednosmjernoj i do 4% u dvosmjernoj memoriji oblika, a nakon njih dolazi do plastične deformacije te povratak u originalni oblik nije moguć. Sama proizvodnja Nitinola je izuzetno zahtjevan proces. S obzirom na to da sadrži gotovo 50% titanija, rastaljeni nitinol je izrazito reaktivan, lako oksidira i mora se obrađivati

u vakuumu. Najčešće korišteni procesi su procesi taljenja vakuumskom indukcijom (VIM) i taljenja vakuumskim potrošnim lukom (VAR). Ostali procesi taljenja, kao što su taljenje nepotrošnim lukom, taljenje elektronskim snopom i taljenje plazmom, također se koriste, iako su većinom u eksperimentalnoj fazi te nisu u širokoj primjeni. Nitinol zbog svoje biokompatibilnosti često je korišten u medicini na primjer u izradi pločica za fiksiranje polomljenih kostiju, stentova i implatata. Zbog polovičnog udjela nikla u slitini, događa se problem u vezi biokompatibilnosti nitinola. Nikal je toksičan materijal, kada je izložen tjelesnim tekućinama oslobađa svoje ione koji mogu izazvati jake alergijske i kancerogene reakcije unutar ljudskog tijela. Zbog oslobođenih iona može doći i do upalnog procesa organizma što daje rezultat odbacivanja, naprimjer stenta koji je ugrađen u krvnu žilu i izazvati razne komplikacije. Kako bi izbjegli negativne odgovore tijela potrebno je stvaranje pasivnog sloja na površini nitinola kako bi se poboljšala biokompatibilnost to jest otpornost na koroziju. Pasivizacija površine kojim se stvara zaštitni sloj na nitinolu može se napraviti pomoću nekoliko procesa kao naprimjer elektropoliranje, anodna oksidacija, anodizacija, ionska i tako dalje. Najčešće korišteni materijali kojima se stvara zaštitni oksidni sloj je titanov dioksid ( $\text{TiO}_2$ ), ali koriste se još i aluminijev oksid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), titanov nitrid (TiN) ili zlatne (Au) prevlake jer zlato ne reagira s tjelesnim tekućinama. Regulatorni zahtjevi za kemijski sastav i elemente u tragovima u nitinolu definirani su prema ASTM standardu F2063-00. Temperature transformacije nitinola izuzetno su osjetljive na male varijacije u koncentraciji Ni ili Ti. Osjetljivost se povećava s većim sadržajem nikla u slitini. Za slitine koje sadrže više od 55% nikla, odstupanje od jednog masenog postotka nikla (ili titana) rezultirat će pomakom temperatura transformacije od približno  $100^\circ\text{C}$ . Ova ekstremna osjetljivost postavlja stroge zahtjeve za svaki postupak taljenja kako bi se strogo kontrolirao omjer nikla i titana te zadovoljila potrebna tolerancija u temperaturama transformacije.

### **3.2. Slitina CuZnAl**

CuZnAl je legura koja se sastoji od bakra (Cu), cinka (Zn) i aluminijska (Al), poznata po svojim svojstvima oblikovne memorije. Bakar je baza ove slitine koji joj daje osnovnu strukturu i čvrstoću. Cink se dodaje u leguru kako bi se poboljšala mehanička svojstva (npr. elastičnost i otpornost na koroziju), dok aluminij umanjuje gustoću legure i doprinosi stabilnosti oblikovne memorije te pomaže kod održavanja željezne kristalne strukture tijekom raznih promjena. Svojstva CuZnAl slitine su memorija oblika i superelastičnost koja su zajednička s nitinolom. Umjesto biokompatibilnosti kod nitinola slitina CuZnAl nije biokompatibilna nego je krase odlična

mehanička svojstva čvrstoće i duktilnosti, a to znači da je vrlo otporna na habanje i lomljenje. CuZnAl je druga najčešće korištena slitina s prisjetljivosti oblika, nakon NiTi. Jednostavnija je i jeftinija za proizvodnju uz bolju električnu i toplinsku vodljivost i veću duktilnost. Negativna strana je ta što ima znatno lošija svojstva pamćenja oblika. Isto tako CuZnAl pokazuje značajan efekt pamćenja oblika u određenom području kemijskog sastava. Slitina ima  $\beta$ -faznu prostorno centriranu kubičnu strukturu, bcc, koja je stabilna na visokim temperaturama. Uobičajeni postupak je da se slitina toplinski obrađuje (betatizacija) kako bi se zadržala  $\beta$ -faza. Nakon betatizacije slijedi hlađenje u vodi kako bi se  $\beta$ -faza transformirala u martenzit. Slitine CuZnAl imaju vrlo veliku tendenciju raspada na ravnotežne faze tijekom pregrijavanja pa je potrebna stabilizacija martenzita. Na slici 3.3 je prikazan ravnotežni fazni dijagram slitine CuZnAl pri vertikalnom presjeku kod  $w(\text{Al}) = 6\%$ .



**Sl. 3.3** Ravnotežni fazni dijagram slitine CuZnAl pri vertikalnom presjeku kod  $w(\text{Al}) = 6\%$  [20]

Ravnotežni fazni dijagram slitine CuZnAl pri vertikalnom presjeku kod  $w(\text{Al}) = 6\%$ . Visokotemperaturna  $\beta$ -faza je neuređene strukture bcc. Nakon brzog hlađenja na sobnu temperaturu nastaje složena struktura B2 i  $\text{D0}_3$  (ili L21) koja se zatim transformira u martenzit 9R (6M) ili 18R (6M) daljnjim hlađenjem ili bez njega, ovisno o sastavu slitine. Povećanjem sadržaja aluminija  $\beta$ -faza je podložna raspadu na  $\alpha$ -fazu (primarnu čvrstu otopinu Cu, fcc) i  $\gamma$ -fazu ( $\text{Cu}_5\text{Zn}_8$ , kubična struktura) pri  $427\text{ }^\circ\text{C}$  [20].

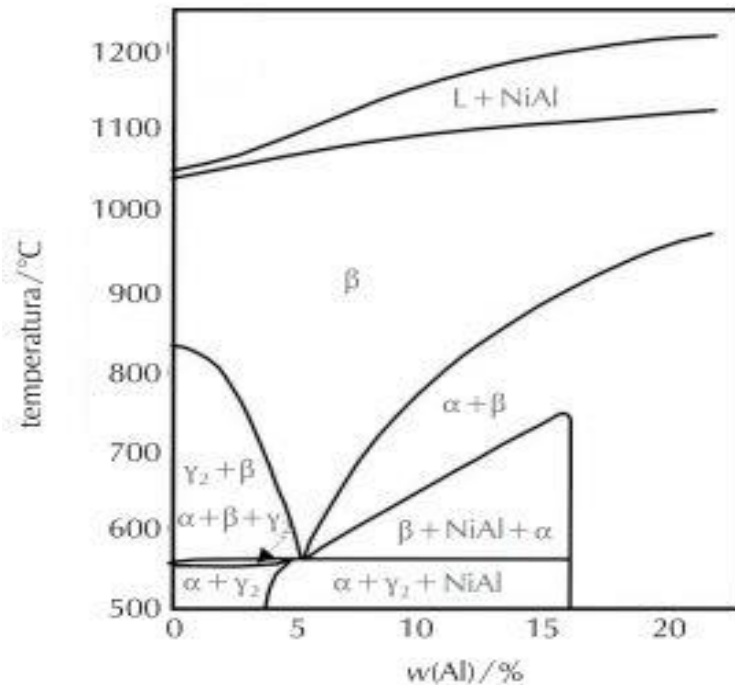


### 3.3. Slitina CuAlNi

Još jedna slitina koja pamti oblik i koja je poznata po svojoj memoriji oblika je slitina CuAlNi. Ova slitina sastavljena je od bakra (Cu), aluminijsa (Al) i nikla (Ni). Bakar je osnovni element CuAlNi slitine zbog koje slitina ima dobru električnu vodljivost i duktilnost, dok nikal i aluminij u slitini omogućuju bolju otpornost na koroziju, toplinsku stabilnost i efekt prisjetljivosti oblika. Slitine CuAlNi koriste se zbog niže cijene i jednostavnijeg procesa proizvodnje u usporedbi sa NiTi slitinom. Taljenje se najčešće provodi u vakuumskim indukcijskim pećima uz zaštitnu atmosferu inertnog plina, kako bi se spriječila oksidacija aluminijsa, dok se postupci metalurgije praha i tehnologije brzog očvršćivanja primjenjuju za proizvodnju sitnozrnatih slitina bez upotrebe elemenata koji služe za usitnjavanje zrna. Polikristalne slitine CuAlNi proizvedene konvencionalnim putem vrlo su krhke, što je povezano s velikom elastičnom anizotropijom i krupnozrnatom mikrostrukturom. Anizotropija martenzitne transformacije ima izravne posljedice na makroskopsko ponašanje polikristala. Polikristali imaju nizak stupanj oporavka oblika zbog nasumično distribuirane orijentacije te je pseudoelastični efekt ograničen na 2 %, što je premala vrijednost za praktičnu upotrebu. Bolja kontrola kemijskog sastava i sitnozrnata mikrostruktura nakon lijevanja mogu se dobiti proizvodnjom slitina postupcima brzog očvršćivanja te metalurgijom praha i procesima mehaničkog legiranja. Slitine CuAlNi imaju bolju toplinsku stabilnost i više radne temperature od drugih slitina s prisjetljivosti oblika. Karakteristične temperature martenzitnih transformacija su od  $-200$  do  $200$  °C i ovise o udjelu aluminijsa i nikla, pri čemu je mnogo utjecajniji udjel aluminijsa. Pojava toplinski inducirano martenzita isključivo ovisi o kemijskom sastavu. Martenzit induciran naprežanjem, odnosno deformacijom, ovisi isključivo o kristalografskoj orijentaciji, ispitnoj temperaturi i tipu naprežanja. Proces stabilizacije svodi se na homogenizacijsko žarenje u  $\beta$ -faznom području i nužan je kako bi se inducirala reverzibilna martenzitna transformacija. Kod slitina CuAlNi s prisjetljivosti oblika iz početne austenitne  $\beta$ -faze nastaju dva tipa toplinski inducirano martenzita 18R ( $\beta 1'$ ) i 2H ( $\gamma 1'$ ), što ovisi o kemijskom sastavu slitine, toplinskoj obradi i uvjetima naprežanja. Kod slitina s niskim sadržajem aluminijsa ( $w = 11 - 13$  %) hlađenjem nastaje martenzit 18R. Viši sadržaj aluminijsa ( $w > 13$  %) prati formiranje martenzita 2H. Ako je kemijski sastav takav da je na granici između nastanka obaju martenzita, tada oba mogu postojati u mikrostrukтури [20].

Slitina CuAlNi se teško plastično deformira kretanjem dislokacija. Zbog loše hladne obradljivosti na ovim slitinama provodi se međužarenje na temperaturama iznad  $800$  °C, tj. u  $\beta$ -faznom

području. Na slici 3.4 je prikazan ravnotežni fazni dijagram slitine CuAlNi pri vertikalnom presjeku kod  $w(\text{Al}) = 14\%$ .



**Sl. 3.3** Ravnotežni fazni dijagram slitine CuAlNi pri vertikalnom presjeku kod  $w(\text{Al}) = 14\%$  [20]

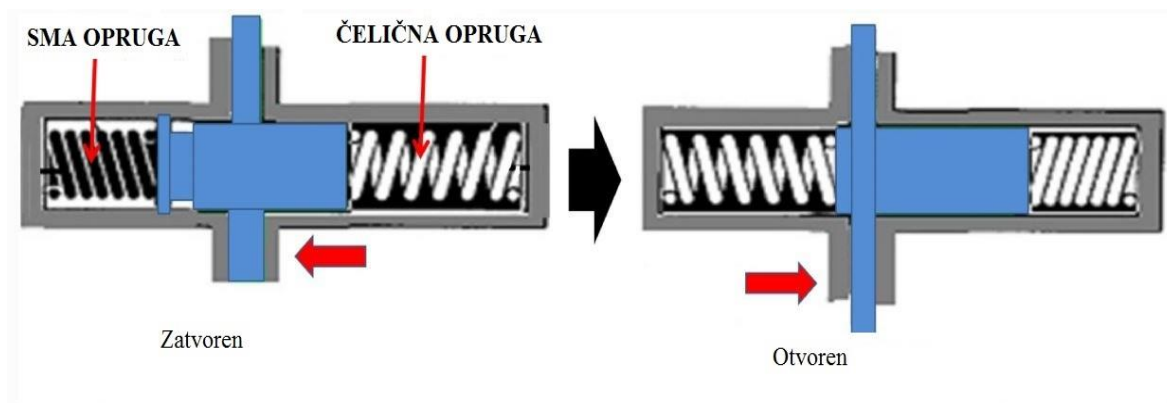
Efekt prisjetljivosti oblika u slitinama CuAlNi podložan je starenju nakon kaljenja. Stoga je potrebno prilagoditi i stabilizirati temperaturu martenzitne transformacije, optimizirati toplinsku stabilnost i mehanička svojstva. Toplinska stabilnost slitina bakra s prisjetljivosti oblika ograničena je brzinom raspada martenzita, stoga treba izbjegavati duže držanje slitina na temperaturama iznad  $150 - 200\text{ }^\circ\text{C}$ . Starenje na nižim temperaturama može pomaknuti temperature faznih transformacija. Gornja granica za transformaciju je  $200\text{ }^\circ\text{C}$ , iznad koje slijedi nagla degradacija u transformaciji zbog efekta starenja. Slitine CuAlNi podložne su niskotemperaturnom efektu starenja koji značajno može mijenjati njihovo transformacijsko ponašanje. Starenje martenzita smanjuje efekt prisjetljivosti oblika i pseudoelastičnost. Slitine bakra s prisjetljivosti oblika mogu se vruće obrađivati na zraku, a zbog iznimne krhkosti pri niskim temperaturama neizbježan je postupak vruće deformacije. Slitine CuAlNi metastabilne su i stoga se provodi otapajuće žarenje u betafaznom području i kontrolirano hlađenje, što je potrebno za zadržavanje efekta prisjetljivosti oblika. Kaljenje u vodi često se upotrebljava kao proces kaljenja, ali se također može provoditi i hlađenje na zraku kod slitina s povećanim sadržajem aluminija. Slitine CuAlNi mogu biti dobra zamjena za skupe slitine NiTi u nemedicinskim uvjetima proizvodnje [20].

## 4. PRIMJENA PAMETNIH MATERIJALA I STRUKTURA

Pametni materijali s vanjskom i unutarnjom inteligencijom poznati su i kao materijali s raznim funkcijama. Najveću primjenu, zbog svojih vrlo dobrih svojstava, imaju u raznim industrijama. Neki od poznatijih industrijskih sektora u kojima se koriste pametni materijali su: elektroindustrija (sustav za solarne panele, električne spojnice, električni prekidači, električni senzori, piezoaktuatori, mobilne telefonske antene, LED diode, OLED diode), autoindustrija (injektor za ubrizgavanje goriva u “common rail” dizel motorima, u homokinetičkim zglobovima, u automatskim mjenjačima, u mehanizmima za zatvaranje prtljažnika automobila) i u robotskoj industriji (razni jednostavni mali roboti od nitin žice, razne hvataljke robota) i mnoge druge industrije.

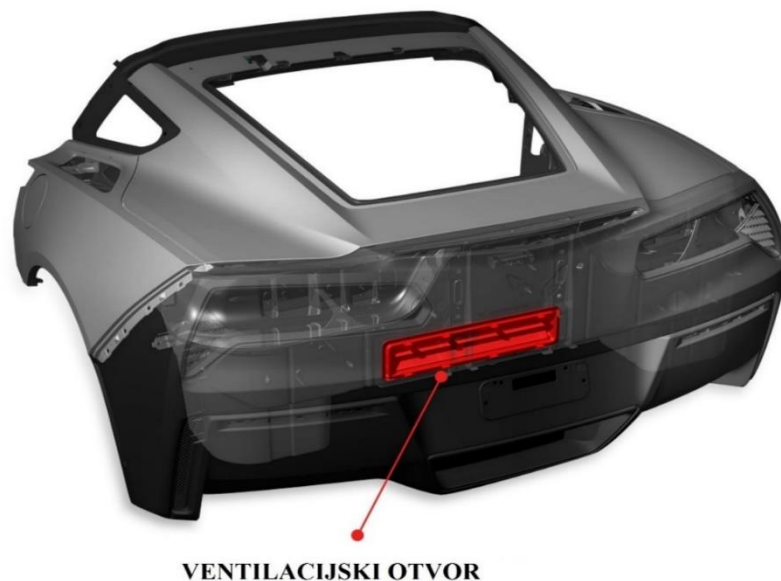
### 4.1. Primjena u autoindustriji

Korištenje SMA materijala u automobilskoj industriji najzastupljenije je u sportskim automobilima gdje su performanse automobila primarni cilj. Većina proizvođača automobila aktivno primjenjuju ovu tehnologiju kako bi pojednostavili neke dijelove automobila i poboljšali vozne karakteristike sportskih automobila. SMA slitine počele su se intenzivnije koristiti u raznim dijelovima automobila. Za autoindustriju je veliki napredak da jedna SMA žica može zamijeniti složeni mehanički sustav koji se koristi za aktiviranje regulatora ventila za kontrolu stupnja prijenosa automatskog mjenjača. Zanimljiva primjena je temperaturno kontrolirani regulator ventila koji kontrolira promjenu stupnja prijenosa u sustavu automatskog prijenosa brzina u automobilu. Na slici 4.1. prikazan je SMA ventil kojem se na jednom kraju nalazi opruga od čelika, a na drugom kraju je opruga od SMA.



Sl. 4.1. Izvedba SMA ventila [21]

Na niskim temperaturama, SMA opruga je u martenzitnom stanju koje ima nižu čvrstoću od čelika i kao rezultat toga, opružna sila čelika nadmašuje silu opruge od SMA. Tada dolazi do zatvaranja ventila jer klip pomiče čelična opruga. Kada se temperatura prijenosnog sustava poveća i dosegne temperaturu transformacije austenita, SMA daje veću silu od čelika gurajući klip u suprotnom smjeru i tada se ventil otvara. To olakšava rad na niskim temperaturama, kontrolira potrošnju goriva i poboljšava hladno pokretanje automobilskog motora. Ova je tehnologija ugrađena u sustavu automatskog prijenosa za mijenjanje brzina. Promatrajući prednosti ove tehnologije sve više proizvođača automobila (Porsche, Hyundai, Ford Motors, Volkswagen, Chevrolet, Mercedes-benz) danas se odlučuje za ugradnju uređaja koji koriste SMA materijale. Još jedan primjer upotrebe legura s pamćenjem oblika susrećemo u automobilu Chevrolet Corvette iz 2014. godine. Kako bi smanjili ukupnu težinu automobila (90 lbs/41 kg lakši od prethodnika), redizajnirana sedma generacija Chevrolet Corvette prvo je vozilo koje koristi laganu žicu od legure s pamćenjem oblika koju je razvio General Motors umjesto teže motoriziranog pokretača za otvaranje i zatvaranje ventilacijskog otvora koji ispušta zrak iz prtljažnika. To omogućuje da se poklopac prtljažnika lakše zatvori nego na prethodnim modelima gdje bi zarobljeni zrak mogao otežati zatvaranje poklopca. U novoj Corvette, žica od legure s pamćenjem oblika otvara ventilacijski otvor kad god se otvori poklopac prtljažnika, koristeći toplinu koju proizvodi prolazak električne struje. Na slici 4.2. prikazan je otvor od legure s pamćenjem oblika u Chevrolet Corvette.



**Sl. 4.2.** Ventilacijski otvor od legure s pamćenjem oblika u Chevrolet Corvette [22]

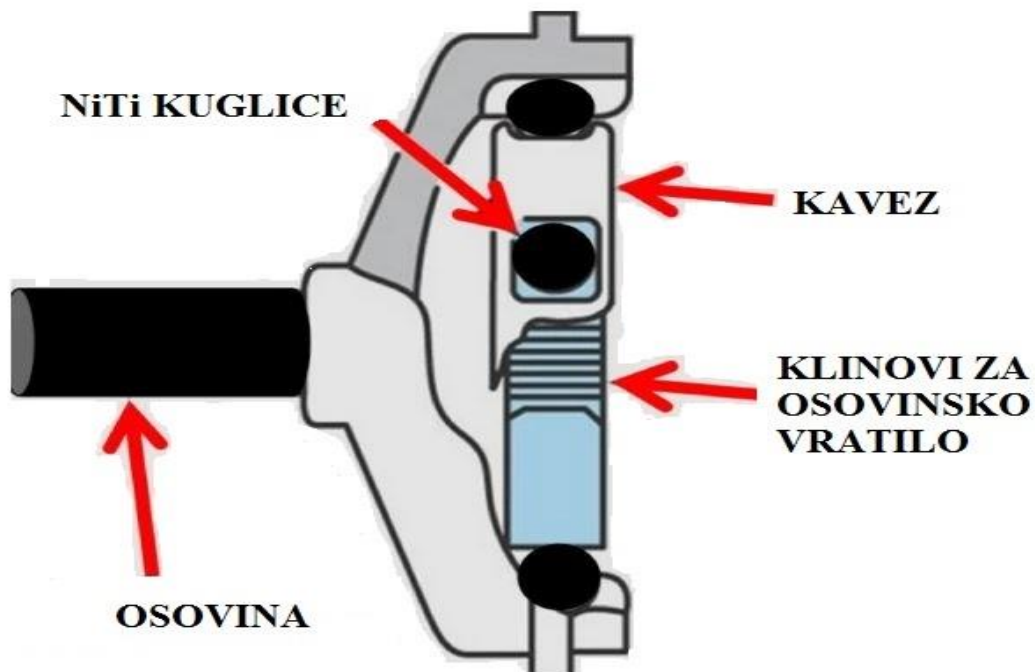
Kada se aktivira, žica se steže i pomiče polugu za otvaranje ventilacijskog otvora, dopuštajući da se poklopac prtljažnika zatvori. Nakon što se poklopac prtljažnika zatvori, električna struja koja prolazi kroz materijal koji pamti oblik se isključuje, dopuštajući žici od pametnog materijala da se ohladi i vrati u normalan oblik, što zatvara otvor za održavanje temperature u kabini. Korištenje legura s pamćenjem oblika također pomaže u smanjivanju ukupne mase automobila, što može poboljšati performanse vozila i povećati uštedu goriva. Sustav sa SMA legurom koji se koristi na novoj redizajniranoj Corvette otprilike je 0,5 kilograma lakši od konvencionalnog motoriziranog sustava za otvaranje i zatvaranje prtljažnika. Još jedan od primjera primjene pametnih materijala u automobilskoj industriji je homokinetički zglob poboljšan NiTi slitinom. Homokinetički zglob je vrsta strojnog elementa koja se koristi u automobilima i drugim vozilima kako bi se omogućio prijenos snage i rotacije između osovine i kotača, čak i kada se osovina i kotač kreću pod različitim kutovima ili brzinama. Homokinetički zglob se sastoji od vanjskog prstena koji je pričvršćen na osovinu i unutarnjeg prstena koji je pričvršćen na kotač. Između ta dva prstena nalazi se skup od šest kuglica smještenih u žljebovima koji omogućavaju rotaciju kao što je vidljivo na slici 4.3.



**Sl. 4.3.** Homokinetički zglob [23]

Ovaj strojni element omogućava rotaciju pod različitim kutovima između osovine i kotača, dok se brzina rotacije održava konstantnom. Homokinetički zglobovi su važni jer omogućavaju

prenošenje snage i rotacije s pogonske osovine na kotače tijekom vožnje, čak i kada se osovina i kotači kreću pod različitim kutovima, kao što je slučaj pri skretanju vozila. Zahvaljujući homokinetičkom zglobu, osovina se može rotirati bez utjecaja na brzinu kotača, čime se osigurava glatko i učinkovito kretanje vozila. Najčešće se koriste na prednjem pogonu automobila i nekim oblicima pogona na sve kotače. Također se mogu naći u drugim mehaničkim sustavima koji zahtijevaju prijenos rotacije pod različitim kutovima uz održavanje konstantne brzine, kao što su industrijski strojevi i uređaji. Čelične kuglice koje se koriste u homokinetičkom zglobu podložne su koroziji i trošenju u žljebovima što dovodi do bržeg kvara sustava homokinetičkog zgloba. Na slici 4.4. prikazane su kuglice izrađene od NiTi materijala koji pružaju puno veću otpornost na koroziju, te imaju puno veću čvrstoću.



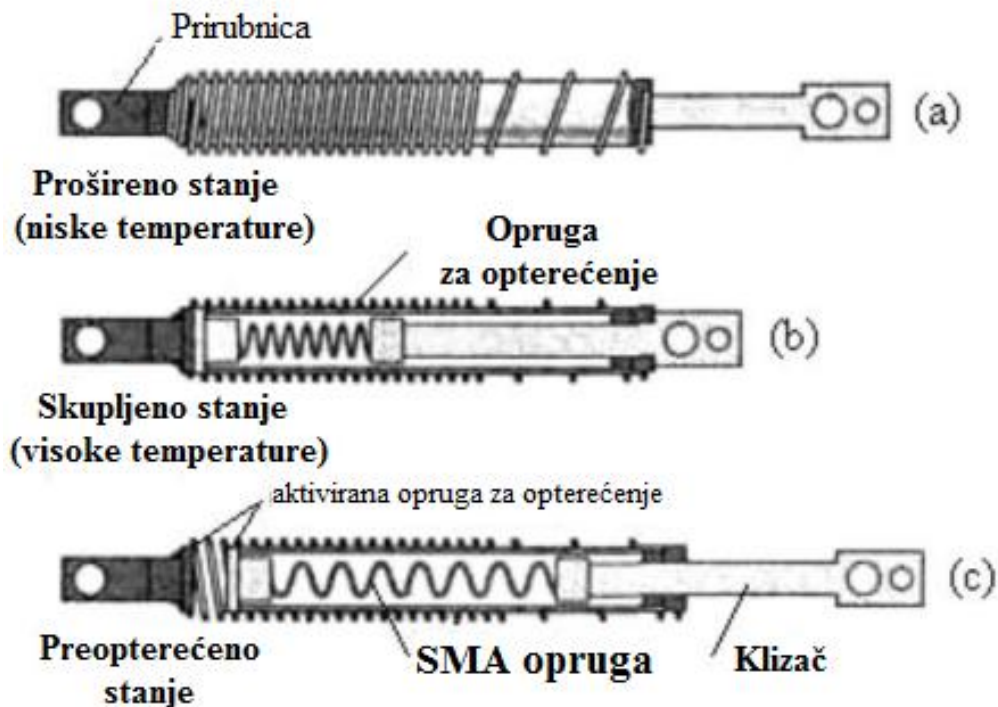
**Sl. 4.4** NiTi kuglice u homokinetičkom zglobu [21]

Ove NiTi kuglice dizajnirane su i uspješno testirane u homokinetičkom zglobu. Poboljšana mehanička svojstva homokinetičkog zgloba protiv umora materijala i njegova veća čvrstoća u usporedbi s čeličnim dijelom potpomognutim SMA ne mijenjaju svoja svojstva čak ni pri povišenim temperaturama, što ga čini boljom alternativom od konvencionalnih čeličnih kuglica. NiTi kuglice se mogu same prilagoditi prema kutnoj neusklađenosti kako bi zaštitile osovину od vibracija velike amplitude što je još jedna velika prednost njihovog korištenja u homokinetičkom zglobu.

## 4.2. Primjena u elektrotehnici

Korištenje obnovljivih izvora energije je u porastu kako u Hrvatskoj, tako i na razini europske unije koja dodjeljuje poticaje pri izgradnji solarnih elektrana na privatne kuće. U Hrvatskoj oko 23% proizvedene struje dolazi iz obnovljivih izvora (bez velikih hidroelektrana) kao što su energija vjetra, biomasa, geotermalna energija, bioplin, male hidroelektrane i fotonaponski sustavi. Sunce je najčišći i najsigurniji izvor energije koji imamo i svake godine naš planet obasja količinom energije oko 15 000 puta veća nego što je potrebno svijetu. Stoga solarna energija postaje sve važniji izvor energije u ovom stoljeću. Povećanje učinkovitosti u proizvodnji električne energije solarnih panela možemo postići bilo promjenom materijala koji se nalaze u solarnim panelima, promjenom koncentracije sunčevog zračenja ili korištenjem solarnih sustava za praćenje. Da bi značajno povećali izlaznu snagu solarnog sustava potrebno je da sunčeve zrake padaju pod kutem od 90 stupnjeva u odnosu na površinu panela. Da bi dobili što bolji kut sunčevih zraka potreban nam je sustav praćenja sunca, korištenjem ovakvih možemo postići da panel bude učinkovitiji do 30% nego kada je sustav solarnih panela fiksiran. Sustavi koji prate sunce kod solarnih panela mogu biti aktivni i pasivni. Sustav koji aktivno prati sunce je mehanizam koji ovisi o vanjskom izvoru energije za pokretanje solarnih panela dok se okreću kako bi pratili sunce. Aktivni sustav za automatsko praćenje je sastavljen od motora, elektroničkog sklopa i vanjskog napajanja. Ako se energija za pomicanje sustava koji prati kretanje sunca dobije iz baterija ili nekog drugog oblika vanjskog napajanja koji nije sunce, tada je to sustav za aktivno praćenje. Sustav za pasivno praćenje koristi mehanizam koji ne zahtijeva nikakvu vanjsku energiju za pokretanje praćenja. Ovaj sustav koristi sunčevu energiju topline kako bi pokretao sustav praćenja sunca. Pasivni sustavi praćenja često su jeftiniji jer nemaju motore, elektroniku i vanjsko napajanje za pokretanje, ali aktivni sustavi su puno precizniji pri radu. Na primjer pri oblačnom danu pasivni sustav će imati problema pri aktivaciji sustava jer je intenzitet sunčeve energije mal, dok aktivni sustav koji je postavljen na tajmer imat će svaki dan istu putanju praćenja sunca. S druge strane aktivni sustav je puno zahtjevniji za održavanje jer je sastavljen od velikog broja elektroničkih i mehaničkih sklopova koji su izloženi konstantnim vanjskim utjecajima poput oluje, velike vlage koja za rezultat ima oksidaciju kao i niske temperature zimi. Tako da je aktivni sustav potrebno češće provjeravati i servisirati što mu je još jedna mana. Slitine s efektom pamćenja oblika korištene su kod pasivnog sustava praćenja sunca i nalaze se unutar aktuatora koji su odgovorni za pokretanje i rotaciju solarnih panela. Aktuator je jedan od glavnih elemenata pasivnog sustava

praćenja sunca kod solarnih sustava. Na slici 4.5 prikazan je princip rada akuatora s SMA oprugom.



Sl. 4.5 Princip rada akuator s SMA oprugom [24]

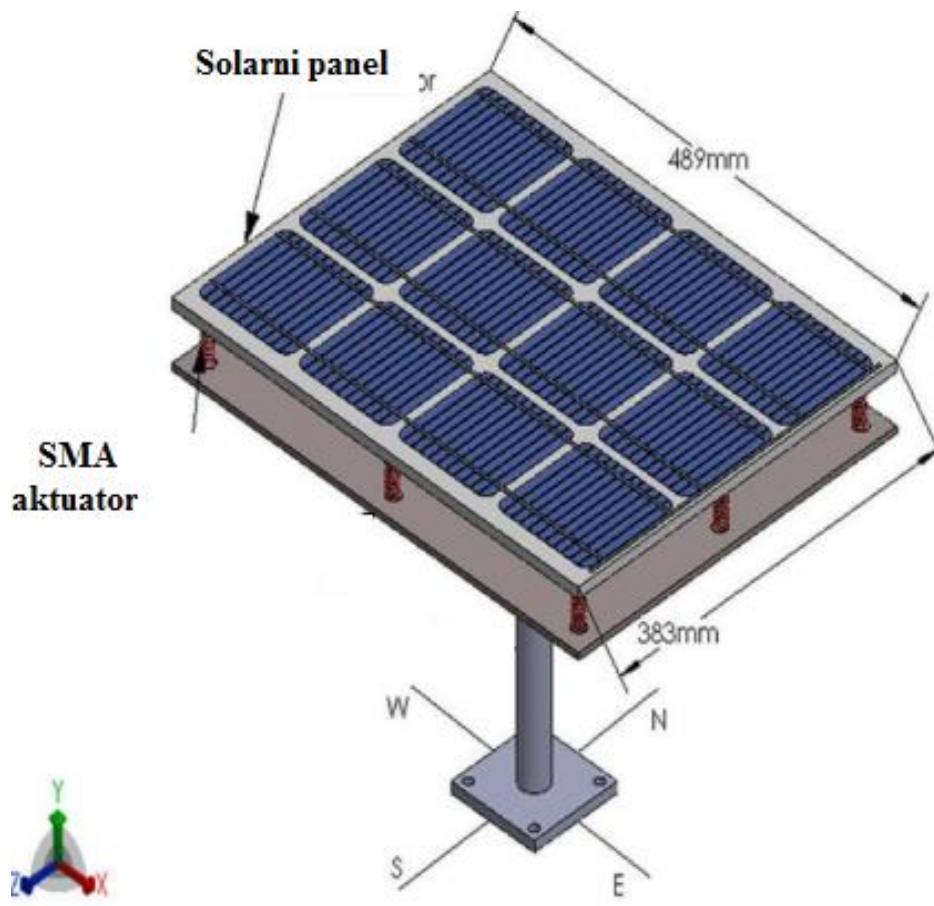
Na slici 4.5 vidimo tri moguća položaja akuatora:

- Prošireno stanje** pri niskim temperaturama gdje je SMA opruga u izduženom stanju kod niskih temperatura. U ovom stanju SMA opruga ne pokazuje svojstvo pamćenja oblika, opruga je izdužena i mehanizam je u “opuštenom” stanju. Prirubnica je fiksni dio akuatora, a klizač je pomični dio akuatora
- Skupljeno stanje** nastupa pri visokim temperaturama, tada se SMA opruga aktivira i povlači klizač u lijevo u željeni položaj
- Preopterećeno stanje** može biti posljedica ekstremnog zagrijavanja SMA opruge. Tada se aktivira opruga za opterećenje da bi spriječila oštećenje SMA opruge ili kompletnog akuatora

Aktiviranje SMA akuatora može se postići zagrijavanjem električnim naponom ili toplinom sunčeve energije. Neke od novih ideja za sustave pasivnog praćenja sunca je da sunce zagrijava akuator i omogućuje solarnom panelu da prati sunce mijenjanjem kuta nagiba bez dodatne



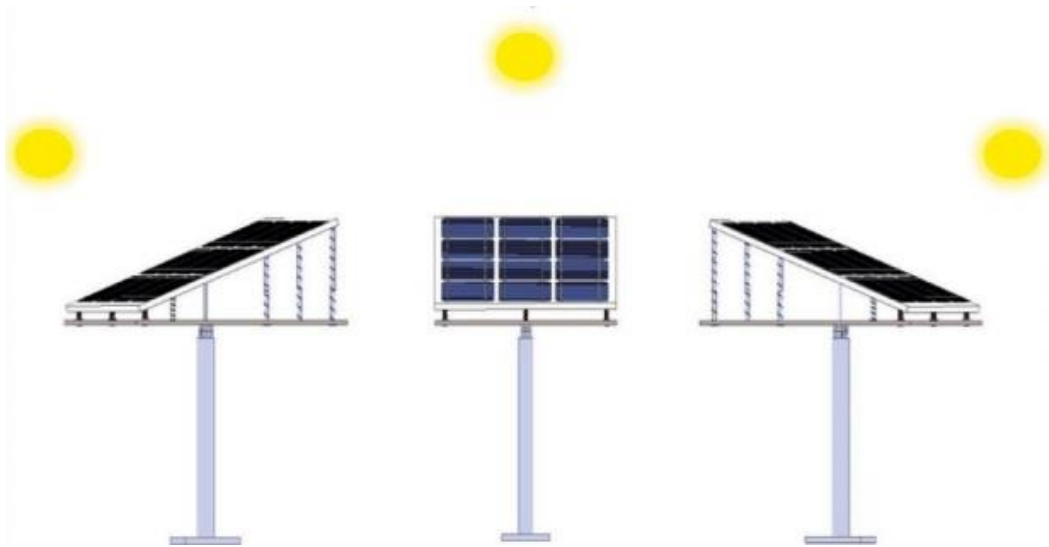
elektronike i napajanja. Na slici 4.6 prikazan je model pasivnog sustava praćenje sunca pomoću SMA aktuatora.



Sl. 4.6 Model pasivnog sustava za praćenje sunca pomoću SMA aktuatora [25]

Kako bi dobili štedljiv, praktičniji i pasivan sustav praćenja sunca kojem ne treba napajanje elektromehanički aktuator zamijenjen je SMA aktuatorom u ovom slučaju. Pasivni sustav konstruiran je kao niz aktuatora na rubovima nosača solarnog panela. Rezultat utjecaja sunčeve topline aktivira ili deaktivira SMA oprugu, to jest aktuatori prelaze iz proširenog u skupljeno stanje i obratno. Kako sunce mijenja svoj položaj tako zagrijava pojedine aktuatore u sustavu dok se drugi hlade, prilikom tog procesa grijanja ili hlađenja dolazi do promjene nagiba solarnog panela. Sustav počinje s aktivacijom čim krene izlaziti sunce i prvo zagrijavaju aktuatore koji su istočno okrenuti prema suncu, kako se sunce kreće dalje tako zagrijava južne aktuatore i oni naginju južni dio panela, kako se sunce pomiče tako aktivira iduće aktuatore. Na kraju dana sustav završava svoj dnevni ciklus okrenut prema zapadu, idući dan opet dolazi do početka novog ciklusa pomicanja solarnog panela.

Na slici 4.7 prikazan je princip rada aktuatora s SMA oprugom kroz jednodnevni ciklus.



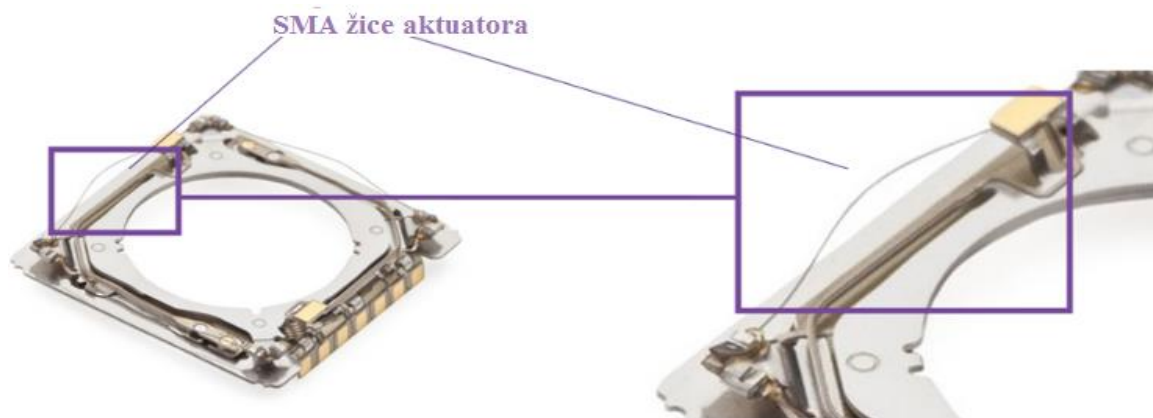
Sl. 4.7 Princip rada aktuator s SMA oprugom kroz dan [25]

Još jedan primjer aktuatora od slitina koje pamte oblik su stabilizator kamere kod pametnih telefona kao što su modeli Samsung Galaxy S21 Ultra, iPhone 14 Pro Max i Sony Xperia 1 IV. Samsung Galaxy 21 Ultra ima modul sa 4 kamere i laserskih senzorum, ali samo dvije koriste slitinu SMA za stabilizaciju slike u aktuatoru, a to su 108MP široka kamera i 10 MP telephoto kamera sa 10x optičkim uvećanjem slike. Na slici 4.8 vidimo modul kamera Samsung Galaxy S21 Ultra koji imaju SMA stabilizator.



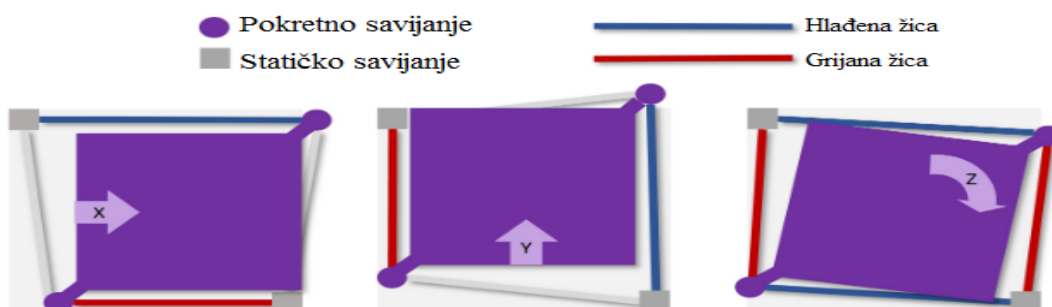
Sl. 4.8 Modul kamera Samsung Galaxy S21 ultra sa SMA stabilizatorom [26]

Stabilizacija slike postala je jedna od bitnih obilježja vrhunske kamere kod pametnih telefona. Stabilizacija slike rješava problem zamućenja slike uzrokovanog nemirnim držanjem telefona tokom snimanja fotografije ili videozapisa. Pravilna stabilizacija osigurava da svjetlost pravilno dolazi do senzora da bi slika bila što jasnija i oštija. Stabilizacija je osobito ključna u uvjetima slabog osvjetljenja gdje duže vrijeme ekspozicije može povećati zamućenje slike. Postoje dvije vrste stabilizacije slike, a to su OIS (eng. *Optical image stabilization*) odnosno mehanička i EIS (eng. *Electronic image stabilization*) digitalna stabilizacija slike. OIS je mehanički sustav koji koristi aktuator za fizičko pomicanje leće kamere ili senzora, čime se stabilizira slika u stvarnom vremenu. Aktuator se sastoji od osnovne ploče, statične ploče, pokretne ploče i četiri SMA žice. Na slici 4.9 vidljiv je položaj četiri SMA žice kod kod OIS aktuatora.



Sl. 4.9 Modul kamera Samsung Galaxy S21 ultra sa SMA stabilizatorom [27]

Četiri SMA žice promjera su 25 mikrona koje su u kvadratnoj konfiguraciji oko leće kamere ili senzora slike. One se skupljaju kada se zagrijavaju i šire kada se ohlade, prilagođavajući tako položaj senzora. Dvije SMA žice služe za kontrolu kretanja duž X osi, dok su druge dvije za Y osi, a sve četiri žice rade zajedno kako bi kontrolirale kretanje rotacije po Z osi. Ovaj princip rada OIS senzora sa SMA slitinom vidljiv je na slici 4.10



Sl. 4.10 Princip rada OIS senzora [27]

### 4.3.Primjena u robotici

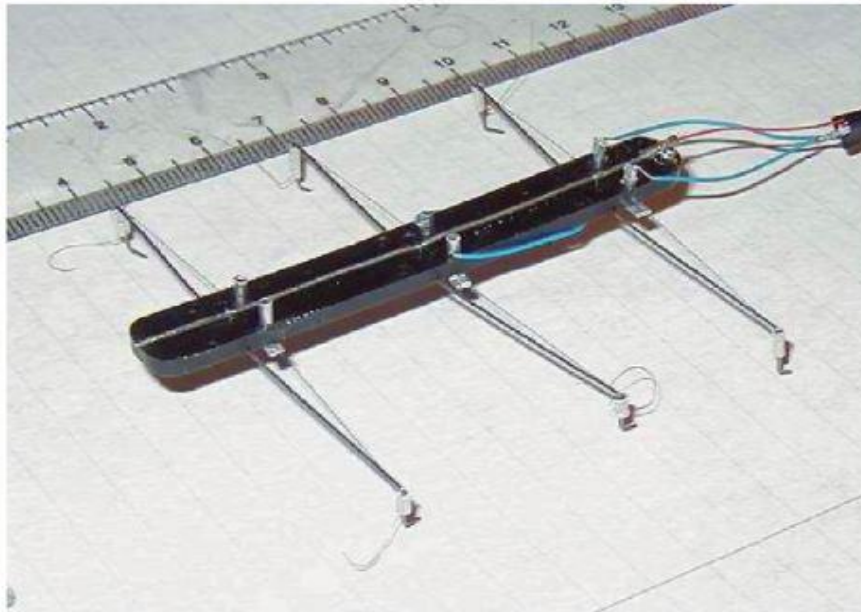
Hodajući roboti izazivaju sve veći interes kod ljudi, međutim njihova primjena u industriji je trenutno ograničena. Iz tih razloga veliki hodajući roboti popularni su na tržištu zabave. Prednost istih u odnosu na onog koji se kreće na kotačima je lakši prelazak preko neravnih površina. Primjer hodajućeg robota psa Tiger i-Cybie koji služi za zabavu je prikazan na slici 4.11.



Sl. 4.11 Pas robot Tiger i-Cybie [28]

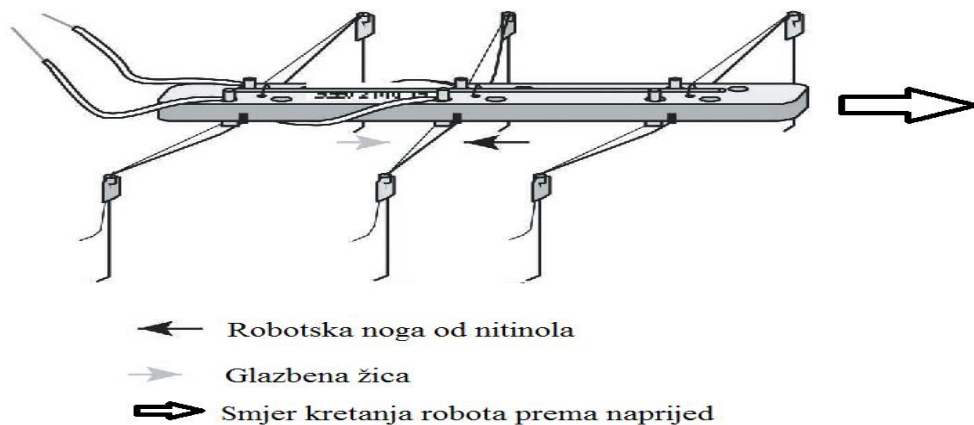
Veliki hodajući roboti imaju velike i teške izvore napajanja te puno elektronike. Većina ih ne koristi pogon koji oponaša ljudski pokret, definiran kao skupljanje i opuštanje mišića u ljudskom tijelu, već je njihov pogon za pokretanje komprimirani zrak ili elektromotori. Pametni materijal nitinol koristi se za oponašanje rada mišića u ljudskom tijelu. On ima svojstvo skupljanja kad se zagrije i vraćanja u prvobitnu veličinu kad se ohladi. Znanstvenici Dr. Mills i Conrad 1990-ih godina razvili su komponente koje korisniku omogućuju izradu vrlo jeftinog hodajućeg robota kukca Stiquito.

Stiquito je mali, jeftin heksapodni robot koji se obično koristi na sveučilištima, veleučilištima i srednjim školama od 1992. na pokaznim laboratorijskim vježbama, a napravljen je od nitinola i žice za gitare prikazan na slici 4.12.



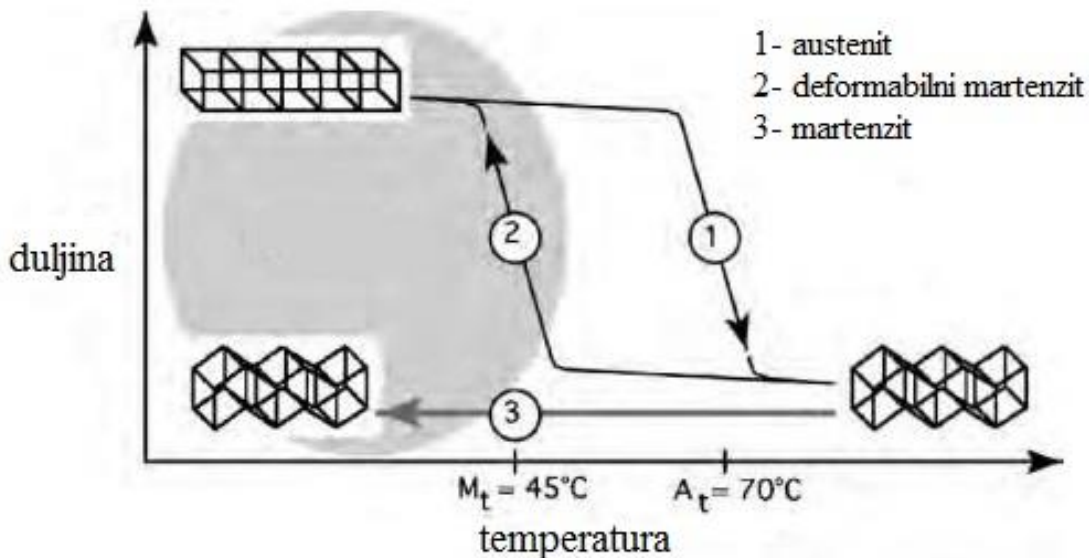
**Sl. 4.12** Stiquito hodajući robot [29]

Robot Stiquito hoda kad se žice aktuatora od nitinola koje su aktivirane toplinom skupljaju, a žica za gitaru vraća protusilom noge u početni položaj. Toplina se stvara prolazom električne struje kroz nitinol žicu. Noge robota mogu se aktivirati pojedinačno ili u skupinama kako bi se dobile različite verzije hoda robota. Nitinolska žica provodi toplinu induciranu električnom strujom u mehaničko gibanje zamjenjujući motore, vijke i druge komponente koje su potrebne za pokretanje nogu robota što je vidljivo na slici 4.13.



**.Sl. 4.13** Smjer kretanja Stiquito robota [29]

Mehaničko gibanje Stiquita rezultat je promjena u deformabilnom stanju (martenzitnom) ispod temperature transformacije martenzita,  $M_t$ . U tom stanju žica može promijeniti svoju duljinu za 8%. Nitinol žica koja koristi noge Stiquita je žica koja pamti oblik tj. „trenirana žica“. Kada se žica zagrije iznad temperature transformacije austenita  $A_t$ , kristalna struktura prelazi u čvrsto i nedeformabilno stanje tj. austenit. Sve dok se temperatura žice održava malo iznad  $A_t$ , žica će ostati skupljena. Tijekom normalne uporabe nitinolske žice, primjenjuje se povratna sila glazbene žice za gitaru dok je ona u austenitnom stanju. Kada temperatura padne ispod  $M_t$ , austenit se ponovno vraća u deformabilni martenzit, a povratna sila žice za gitaru povlači nitinol žicu natrag u njezin izvorni, prošireni oblik. Ako se žica zagrije previše iznad  $A_t$ , tada nova, kraća duljina rezultira transformacijom u martenzit, a "sjećanje" na izvornu, dužu dužinu nije moguće vratiti. Promjena kristalne strukture nitinola vidljiva je na slici 4.14.



Sl. 4.14 Promjena kristalne strukture nitinola [29]

Nitinolna žica radit će milijune ciklusa ako se ne pregrije i ako se tijekom svake transformacije primjeni odgovarajuća sila oporavka. Kako bi se spriječilo pregrijavanje nitinol žice, Stiquito kontroler sprječava pregrijavanje ako se koristi prema uputama. Autonomni kontroleri i softver moraju ograničiti struju koja se dovodi do nitinolnih žica aktuatora kako bi se izbjeglo njihovo pregrijavanje. Glazbena žica za gitaru nogama pružaju ispravnu silu oporavka.

## 5. ZAKLJUČAK

U ovom radu opisani su pametni materijali i strukture, a prvi put su otkriveni još u 20. stoljeću. Sredinom 20. stoljeća otkriven je efekt pamćenja oblika koji je primijećen na NiTi leguri, naziva NiTiNOL. Slitina NiTiNOL je dobila naziv iz kombinacije kemijskih simbola nikla (Ni), titana (Ti), a iz imena laboratorija "Naval Ordnance Laboratory" dolazi skraćenica (NOL). Osim dobrog efekta pamćenja oblika slitina nitinol ima superelastična i biokompatibilna svojstva. Krajem 20. stoljeća dolazi do porasta razvoja pametnih materijala kao i njihovih slitina. Slitine pametnih materijala nastale su da bi poboljšala i druga svojstva kao što su otpornost na koroziju, bolja električna vodljivost, toplinska stabilnost, te bolja mehanička svojstva pametnih materijala. Neke „pametne“ slitine su odličnih karakteristika i svojstava ali su izrazito skupe, zbog svog kompliciranog procesa proizvodnje te zato koristimo druge jeftinije oblike slitina. Danas, u 21. stoljeću pametne materijale možemo pronaći u svakodnevnom životu, a oni se nalaze u dioptrijskim naočalama, pametnim krovim prozorima ili retrovizorima automobila, raznim pH testovima u medicini, baterijama, sustavima solarnih panela i kamerama naših pametnih telefona itd. Pametni materijali osmišljeni su da bi nam olakšali svakodnevni život, a tu kao primjer imamo fotokromatske naočale koje će se same promijeniti svoju nijansu da bi lakše gledali kroz njih tijekom jako sunčanih dana. Kod sustava solarnih panela dolazi do bolje energetske iskoristivosti panela, a fotografiranja ili snimanja videa na pametnom telefonu zbog pametnih materijala u stabilizatorima kamera dobit ćemo puno bistrije finalne slike i snimke, pogotovo kada su napravljene prilikom slabog okolinskog osvjetljenja. U automobilskoj industriji komplicirane i teške mehaničke komponente zamijenjene su elementima koji su napravljeni od pametnih materijala. Pametne materijale susrećemo i u obrazovnom sustavu gdje se jednostavni robot Stiquito koristi za edukaciju učenika i studenata o osnovama robotike, gdje su noge robota napravljene od nitinola. Neki od izazova u budućnosti predstavljat će recikliranje pametnih materijala. Pametni materijali često su napravljeni od kombinacije više komponenti uključujući metale, polimere i kemijske spojeve koje je teško razdvojiti. Recikliranje takvih složenih materijala zahtjeva specijalne tehnološke procese recikliranja. Trenutno nema univerzalni postupak recikliranja ovih materijala, a i teško ih je reciklirati jer često izgube svoja posebna svojstva poput memorije oblika ili termoosjetljivosti zbog višestrukog ciklusa upotrebe. To dovodi do zaključka da se ne mogu koristiti za iste proizvode nakon reciklaže što smanjuje njihovu održivost. Iz ovih razloga proizvodnja pametnih materijala treba biti usmjerena na stvaranje proizvoda koji su lakši za reciklažu ili razlaganje.

## LITERATURA

- [1] [https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Nickel\\_titanium](https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Nickel_titanium) pristup ostvaren 11.11.2023.
- [2] <https://www.pztpiezo.com/ultrasonic-speaker/ultrasonic-horn/piezoelectric-speaker.html> pristup ostvaren 16.11.2023
- [3] Iskender Özkul, Mehmet Ali Kurgun, Ece Kalay i Canan Aksu Canbay : Shape memory alloys phenomena: classification of the shapememory alloys production techniques and application fields, Eur. Phys. J. Plus, 2019.
- [4] <https://anubhav-pabby19.medium.com/shape-memory-alloys-ea73d432c923> pristup ostvaren 15.12.2023
- [5] Xuan Zhang, Kazuyuki Hanahara i Yukio Tada: Dynamic Characteristics of Hanging Truss Having Shape Memory Alloy Wires, Graduate School of System Informatics, Kobe University, Japan 2017.
- [6] L. Župan: Razvoj i primjena keramike u elektrotehnici, završni rad, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, 2019.
- [7] N. Izyumskaya, Yahya Alivov, Seong-Jun Cho i H. Morkoc: Processing, Structure, Properties, and Applications of PZT Thin, Virginia Commonwealth University London 2008.
- [8] Arindam Samanta i Tapan Nath: Structural and Electrical properties study of Nanostructured Perovskite Oxides prepared via Solid State method, Department of Physics Indian Institute of Technology Kharagpur, India 2018.
- [9] Saad Mabrouk Yakouti : Spintronics: Future Technology for New Data Storage and Communication Devices, Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2020.
- [10] Jamel H. Alexander i Oliver J. Mayers: Microstructure properties and strengthening mechanisms of the as4-3501-6 polymeric resin with embedded terfenol-d particles, Mississippi State University USA, 2014.
- [11] T. Filetin, Pregled i razvoja i primjene suvremenih materijala, Hrvatsko društvo za materijla i tribologiju, Zagreb, 2000.
- [12] <https://iopteq.com/pages/111/index.html> 28.02.2024
- [13] [https://www.oxfordduplicationcentre.com/35mm\\_negative\\_scanning.htm](https://www.oxfordduplicationcentre.com/35mm_negative_scanning.htm) pristup ostvaren 26.04.2024



- [14] <https://www.medscope.co.uk/collections/urinalysis-strips/products/surers11-50surescreen-urinalysis-strips-11-parameters-50-strips> pristup ostvaren 27.04.2024
- [15] <https://spotsee.io/technologies/liquid-crystal-formulations/> pristup ostvaren 01.06.2024
- [16] <https://www.topgear.com/car-news/video/lamborghinis-flip-paintjob-terrible-or-genius> pristup ostvaren 13.06.2024
- [17] Keyur Patel, Gopal Bhatt, Jaymin Ray, Priya Suryavanshi i Chetan Panchal : All-inorganic solid-state electrochromic devices: a review, Journal of Solid State Electrochemistry, 2017.
- [18] <https://newsroom.porsche.com/en/2022/innovation/porsche-taycan-panoramic-roof-sunshine-control-christophorus-404-29731.html> pristup ostvaren 16.07.2024.
- [19] Andrew Littlefield : Application of the impedance method of modeling active materials to plate structures, Rensselaer Polytechnic Institute Troy, New York, 2000.
- [20] I. Ivanić : Slitine s prisjetljivosti oblika (II. dio): podjela, proizvodnja i primjena
- [21] S. Gopalakrishnan: ISSS Journal of Micro and Smart Systems A Technical Publication of the Institute of Smart Structures and Systems
- [22] <https://www.slashgear.com/2014-corvette-is-the-first-gm-vehicle-to-use-smart-materials-13269167/> pristup ostvaren 21.07.2024
- [23] <https://autoportal.hr/tehnika/homokineticki-zglob-temelj-prednjeg-pogona-prenosi-snagu-medu-vratilima-koja-nisu-u-istoj-osi/> 22.07.2024.
- [24] Sonia Degeratu, Sabin Rizescu, Laurentiu Alboteanu : Using a Shape Memory Alloy Spring Actuator to Increase the Performance of Solar Tracking System, Annals of the University of Craiova, 2014.
- [25] Amine Riad, Mouna Ben Zohra, Abdelilah Alhamany i Mohamed Mansour: Bio-sun tracker engineering self-driven by thermo-mechanical actuator for photovoltaic solar systems, MISI Laboratory, FST of Settat, Hassan First University, Morocco 2020.
- [26] <https://eu.community.samsung.com/t5/other-galaxy-s-series/s21-ultra-camera-terrible-quality/td-p/2767789> pristup ostvaren 28.07.2024.
- [27] <https://www.cambridgemechatronics.com/en/news/resources-blogs/sma-shift-actuators-superior-smartphone-cameras/> pristup ostvaren 28.07.2024.
- [28] <https://www.manualslib.com/products/Hasbro-Tiger-Electronics-I-Cubie-13223914.html> pristup ostvaren 11.08.2024.
- [29] Andrew Adamatzky i Maciej Komosinski: Artificial Life Models in Hardware, London, 2009.

# SAŽETAK

## PAMETNI MATERIJALI I STRUKTURE

U završnom radu opisana je struktura, vrste i primjena pametnih materijala. Pametni materijali su materijali koji uz pomoć vanjskog utjecaja mogu mijenjati svoja svojstva. Prva slitina pametnog materijala otkrivena je 1961. godine i imala je omjer titanija i nikla 1:1. Leguru titana i nikla znanstvenici su savili mehaničkom silom, a prilikom zagrijavanja NiTiNOL legura se vratila u svoj prvobitni oblik. Neke značajnije slitine koje se koriste za izradu pametnih materijala su CuAlNi i CuZnAl. Efekt pamćenja oblika i superelastičnost su dva važna svojstva za slitine pametnih materijala. Postoje dvije skupine pametnih materijala: materijali s unutarnjom i materijali s vanjskom inteligencijom. Materijali s unutarnjom inteligencijom mogu pretvoriti jednu vrstu energije u drugu, dok materijali s vanjskom inteligencijom najčešće mijenjaju boju kao odgovor na različite vanjske podražaje. Pametne materijale danas možemo susresti svuda oko nas. U ovom radu opisana je primjena pametnih materijala u autoindustriji, elektrotehnici i robotici.

KLJUČNE RIJEČI : pametni materijali, NiTiNOL legura, efekt pamćenja oblika

## ABSTRACT

### SMART MATERIALS AND STRUCTURES

This thesis explores the structure, types, and applications of smart materials. Smart materials are a class of materials capable of altering their properties in response to external stimuli. The first smart material alloy, discovered in 1961, was a titanium-nickel alloy with a 1:1 ratio. When this NiTiNOL alloy was mechanically deformed, it returned to its original shape upon heating, demonstrating the shape memory effect. Some of the more significant alloys used for the production of smart materials are CuAlNi and CuZnAl. Shape memory and superelasticity are two critical properties of these alloys. There are two groups of smart materials: those with intrinsic intelligence and those with extrinsic intelligence. Materials with intrinsic intelligence can convert one form of energy into another, while materials with extrinsic intelligence typically change color in response to various external stimuli. Today, smart materials are widely used across various fields. Thesis describes the application of smart materials in the automotive industry, electrical engineering, and robotics.

KEY WORDS: smart materials, NiTiNOL alloy, shape memory effect

## ŽIVOTOPIS

Dino Vereš rođen je 01. siječnja 1994. godine u Osijeku. 2008. godine završava osnovnu školu u Višnjevcu pored Osijeka te iste godine upisuje srednju Elektrotehničku i prometnu školu Osijek. Srednju školu završava vrlo dobrim uspjehom, potom se 2012. godine upisuje na Elektrotehnički fakultet u Osijeku, gdje se nakon prve godine opredjeljuje za smjer Elektroenergetika. Tijekom studiranja 2017. godine se zapošljava u jednoj od najvećih telekomunikacijskih firmi u Hrvatskoj A1 Hrvatska d.o.o. u sektoru za fiksnu pristupnu mrežu u regiji istok za HFC i FTTH tehnologiju, u kojoj radi i danas kao viši specijalist za održavanje fiksne pristupne HFC i FTTH mreže.

U Osijeku, 2024.

Dino Vereš

---