

## PREGLEDNI ČLANCI REVIEW PAPERS

### LEGURE KOJE PAMTE OBLIK I NJIHOVA UPOTREBA U MEDICINI

Dejan I. Tanikić<sup>a</sup>, Miodrag T. Manić<sup>b</sup>, Saša S. Ranđelović<sup>b</sup>,  
Darko M. Brodić<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru

<sup>b</sup> Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet

DOI: 10.5937/vojtehg62-5598

OBLAST: materijali

VRSTA ČLANKA: pregledni članak

JEZIK ČLANKA: srpski

#### Sažetak:

*Legure koje pamte oblik predstavljaju specifične materijale koji imaju sposobnost da promene svoj oblik i vrate se u neko zapamćeno stanje izazvano promenom temperature na kojoj se nalaze. Zbog svojih specifičnosti i neuobičajenih karakteristika, veliki je i raznovrstan spektar oblasti primene ovih materijala. Pored toga, ovi materijali najčešće su i biokompatibilni, što omogućava i njihovu primenu u medicini. U ovom radu biće predstavljene osnovne karakteristike legura koje pamte oblik, različite vrste mogućih transformacija ovih materijala, kao i neke od mogućnosti njihove primene u oblasti medicine.*

Ključne reči: efekat pamćenja oblika, legura koja pamti oblik.

#### Uvod

Osnovna karakteristika legura koje pamte oblik (engl. Shape Memory Alloys – SMA) jeste njihovo samostalno vraćanje u neki svoj zapamćeni oblik prilikom promene temperature. Ova pojava primećena je još 30-ih godina prošlog veka na legurama na bazi bakra Cu-Zn i Cu-Sn (Mantovani, 2000). Međutim, jedna od najčešće korišćenih legura koje pamte oblik, poznata kao nitinol (legura na bazi nikla i titanijuma), otkrivena je tek krajem 60-ih godina prošlog veka, u Naval Ordnance Laboratory u USA, što se smatra i otkrićem i začetkom istraživanja na polju legura koje pamte svoj oblik.

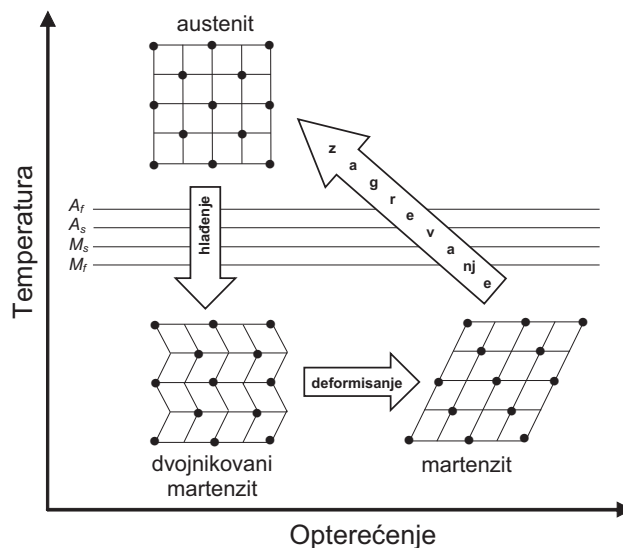
\* NAPOMENA: Ovaj rad je finansijski podržan od Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije u okviru projekta III41017 i TR34005.

Prva dokumentovana masovna upotreba legura koje pamte oblik zabeležena je 1971. godine, za izradu spojnika koje povezuju titanijumske cevne instalacije Grumman F-14 aviona (Melton, 1998). Glavni problem koji je na ovaj način rešen je spajanje titanijumskih cevi, koje se koriste radi smanjenja ukupne težine aviona, što predstavlja tipični primer primene naučnih saznanja za rešavanje konkretnih industrijskih problema. Početkom 80-ih godina prošlog veka zabeležena je značajnija primena legura koje pamte oblik u Japanu za izradu ventila za klima-uređaje. U isto vreme počinje sve masovnija primena ovih materijala, prvenstveno za stomatološke, a zatim i za druge medicinske aplikacije. Postoji stalna težnja da se novi materijali, razvijeni uglavnom za potrebe vojne i aero-industrije, iskoriste i u medicini, za izradu kompatibilnih i funkcionalnih implantata, radi poboljšanja kvaliteta života pacijenata, kojima je to neophodno.

## Principi funkcionisanja legura koje pamte oblik

U osnovi funkcionisanja legura koje pamte oblik nalazi se fazna transformacija u čvrstom obliku (slika 1), koja se naziva martenzitna termoelastična transformacija iz martenzita u austenit i obrnuto (Ochonski, 2010). Ove transformacije odvijaju se na određenim temperaturama, pa su za razumevanje principa funkcionisanja legura koje pamte oblik karakteristične četiri temperature:

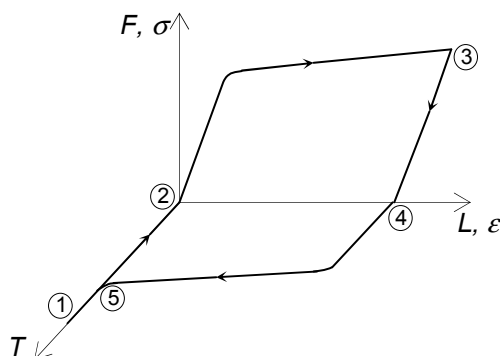
- $M_s$  – početak formiranja martenzitne faze,
- $M_f$  – završetak formiranja martenzitne faze,
- $A_s$  – početak formiranja austenitne faze,
- $A_f$  – završetak formiranja austenitne faze.



Slika 1 – Austenitno-martenzitna transformacija  
Figure 1 – Austenite-martensite transformation

## Efekat jednosmernog pamćenja oblika

U slučaju efekta jednosmernog pamćenja oblika materijal se vraća u svoje prvobitno stanje jednostavnim zagrevanjem. Ovaj efekat ilustrovan je na slici 2.



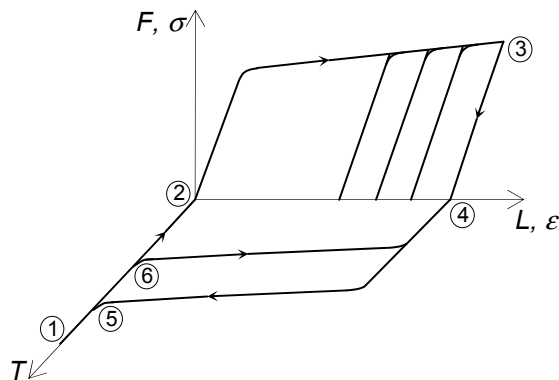
Slika 2 – Efekat jednosmernog pamćenja oblika  
Figure 2 – One-way shape memory effect

Uzorak se u početnom trenutku nalazi na sobnoj temperaturi (tačka 1) u stanju austenita. U prvoj fazi uzorak se hladi, bez dejstva spoljnih sila, što je praćeno formiranjem martenzita (tačka 2). Zatim se, na sniženoj temperaturi, vrši deformisanje uzorka primenom spoljne sile –  $F$ , koja doводи do promene dimenzija pripremljenog uzorka –  $L$  (tačka 3). Nakon rasterećenja, uzorak ostaje u deformisanom stanju (tačka 4). Zagrevanjem uzorka, on se vraća u prvobitni, nedeformisani oblik, što je praćeno ponovnom transformacijom iz martenzita u austenit (tačka 5).

## Efekat dvosmernog pamćenja oblika

Osnovna odlika ovog efekta jeste promena oblika predmeta naizmeničnim zagrevanjem i hlađenjem, bez dejstva spoljašnjih sila (Slika 3). Uzorak se na početku nalazi u stanju austenita na sobnoj temperaturi (tačka 1). Hlađenjem se, bez primene spoljašnjeg opterećenja, vrši transformacija austenita u martenzit (tačka 2). Na sniženoj temperaturi uzorak se višestruko opterećuje i rasterećuje spoljašnjom silom –  $F$ , kako bi „zapamtio” deformisani oblik (tačka 3). Nakon prestanka dejstva spoljašnje sile uzorak ostaje u deformisanom obliku, sa promenjenom dimenzijom –  $L$  (tačka 4). Zagrevanjem se vrši transformacija martenzita u austenit, i na taj način uzorak vraća početno, nedeformisano stanje (tačka 5). Međutim, za razliku od prethodnog slučaja, ponovnim hlađenjem (tačka 6) predmet se,

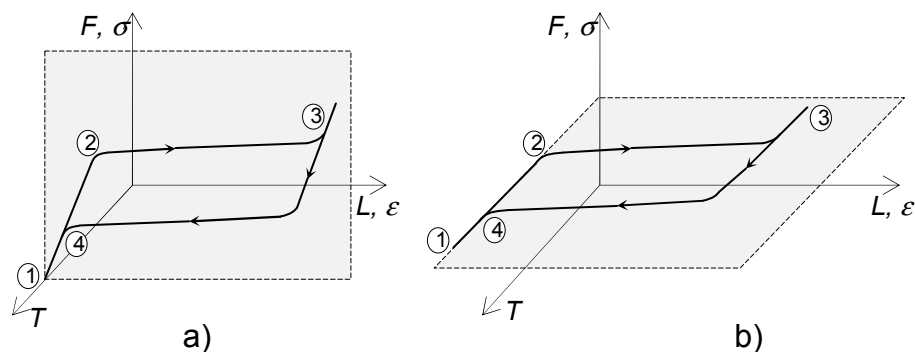
bez dejstva spoljašnjeg opterećenja, deformiše i dobija svoj „zapamćeni“ oblik (tačka 4). Na ovaj način dimenzije uzorka se menjaju bez dejstva ikakve spoljašnje sile, njegovim jednostavnim hlađenjem i zagrevanjem.



Slika 3 – Efekat dvosmernog pamćenja oblika  
Figure 3 – Two-way shape memory effect

### Supertermoelastični efekat

Prilikom dejstva spoljašnjih sila na neki materijal on se deformiše. Spособnost materijala da se nakon prestanka dejstva spoljašnjeg opterećenja vrati u prvobitno stanje naziva se elastičnost i ovo svojstvo imaju gotovo svi materijali. Međutim, samo neki materijali imaju sposobnost da prihvate mnogostruko veće opterećenje i da se, nakon rasterećenja, vrate u prvobitni oblik. Ova osobina naziva se superelastičnost ili pseudoelastičnost. Supertermoelastični efekat podrazumeva superelastični i supertermički efekat.



Slika 4 – a) Superelastični efekat, b) supertermički efekat  
Figure 4 – a) Superelastic effect, b) Superthermic effect

### *Superelastični efekat*

Superelastični efekat odvija se pri konstantnoj temperaturi (slika 4 a). Na početku se uzorak nalazi u austenitnoj fazi (tačka 1), a zatim se vrši klasično opterećivanje spoljašnjom silom  $-F$ , pri čemu se menjaju dimenzije pripremljenog uzorka  $-L$ . Sa povećanjem spoljašnjeg opterećenja dolazi do velike deformacije uzorka, koja se objašnjava formiranjem martenzita u unutrašnjosti austenitne faze pripremljenog uzorka. Nakon toga, dolazi do dodatne elastične deformacije martenzitne faze akumuliranom silom  $-F$ , što dovodi do maksimalnog deformisanja uzorka (tačka 3). Konačno, sa prestankom dejstva spoljašnje sile, uzorak se rasterećuje i vraća u prvobitni oblik (tačke 4 i 1). Ova pojava slična je klasičnoj elastičnosti materijala, ali su deformacije materijala koji poseduju superelastičnost višestruko veće od deformacija koje se javljaju kod materijala koji nemaju ovu karakteristiku.

### *Supertermički efekat*

Za razliku od superelastičnog efekta, supertermički efekat (slika 4 b) odvija se pri nekoj konstantnoj spoljašnjoj sili  $F$ , pri čemu je i u ovom slučaju na početku procesa uzorak u austenitnoj fazi (tačka 1). Smanjenje temperature praćeno je odgovarajućom kontrakcijom, odnosno promenom dimenzija pripremljenog uzorka  $-L$ . Daljim smanjenjem temperature dolazi do formiranja martenzita unutar austenitne faze uzorka, što ima za posledicu vrlo velike promene dimenzije uzorka. Nakon toga sledi i dodatno skupljanje martenzita, koja je rezultat daljeg smanjenja temperature i koja dovodi do maksimalnog deformisanja uzorka (tačke 2 i 3). Proces je reverzibilan, jer se sa povećanjem temperature uzorak vraća u početno, nedeformisano stanje (tačka 4). Dakle, promena oblika vrši se pri stalnoj spoljašnjoj sili, jednostavnom promenom temperature, po čemu je ovaj efekat sličan efektu dvosmernog pamćenja oblika.

## Biokompatibilnost i biofunktionalnost

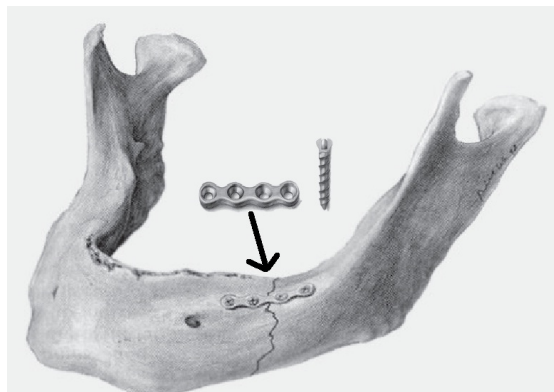
Zbog svojih specifičnih osobina materijali koji pamte oblik već su našli mnogobrojne primene u najrazličitijim oblastima, a svoju sve širu primenu nalaze i u medicini. Već duže vreme koriste se za izradu medicinskih implantata. Dve su osnovne karakteristike koje implantati moraju da poseduju: biokompatibilnost i biofunktionalnost. Biokompatibilnost podrazumeva da se implantat od nekog materijala može koristiti u ljudskom telu (kratkoročno ili dugoročno) bez ikakvih negativnih posledica po ljudski organizam, odnosno da nije toksičan po organizam u predviđenom roku. Materijali koji su biokompatibilni nazivaju se biomaterijali, a biokompatibilnost je opisni izraz kojim se označava sposobnost materijala da se pona-

ša na odgovarajući način u organizmu u koji se aplicira. Takođe, postoji razlika između površinske i strukturalne kompatibilnosti (Tanikić, et al., 2012). Površinska kompatibilnost označava hemijsku, biološku i fizičku (uključujući površinsku morfologiju) pogodnost površine implantata za primenu kod tkiva domaćina. Strukturalna kompatibilnost predstavlja optimalnu adaptaciju implantata mehaničkom ponašanju tkiva domaćina. Bi-ofunkcionalnost, sa druge strane, obezbeđuje neometano izvršavanje svih potrebnih funkcija implantata, bez ikakvih ograničenja i ometanja funkcionisanja drugih delova organizma u predviđenom intervalu. Neophodno je da svaki potencijalni materijal za izradu implantata uspešno prođe tri testa: in vitro, in vivo i kliničku studiju. Kada se sve to ima u vidu, zaključuje se da samo mali broj materijala koji pamte svoj oblik zadovoljavaju sve potrebne kriterijume za korišćenje u medicini.

U prirodi postoji veliki broj legura koje pamte oblik, a najveći broj jesu legure na bazi gvožđa (FePt, FePd, FeMnSi), bakra (CuZn, CuZnAl, CuSn, CuAlNi), srebra, zlata, mangana, itd. Ipak, najširu primenu našla je legura NiTi (sa 48-52% Ni), poznata pod nazivom nitinol. Pored dobrih mehaničkih karakteristika, nitinol je odličan u pogledu biokompatibilnosti (Thierry, et al., 2002), kao i indiferentnosti u odnosu na magnetnu rezonancu i kompjutersku tomografiju (Holton, et al., 2002). Štaviše, ponašanje nitinola u ljudskom organizmu je mnogo povoljnije i prirodnije u poređenju sa klasičnim materijalima, najčešće korišćenim u medicini, kao što su čelik 316L i legure Co-Cr.

## Primena u ortopediji

Opšte je poznato i prihvaćeno da se pločice od različitih materijala koriste za fiksiranje polomljenih kostiju sve do njihovog konačnog zarastanja. Međutim, materijali koji pamte oblik pružaju jednu novu mogućnost koja pozitivno utiče na konačno zarastanje prelomljenih delova kostiju. Naime, zarastanje kostiju je mnogo uspešnije i kvalitetnije ukoliko su prelomljeni delovi pritisnuti jedan ka drugom tokom zarastanja. Ova spoljašnja sila može se obezbediti korišćenjem pločica izrađenih od materijala koji pamte oblik, pri čemu se one prevashodno deformišu na nižoj temperaturi, a zatim se, nakon apliciranja na mesto preloma, nakon zagrevanja na telesnu temperaturu, one vraćaju u svoj zapamćeni oblik, tako da obezbeđuju stalnu silu kojom su polomljeni delovi kosti pritisnuti jedan na drugi. Primer pločice koja je primenjena za fiksiranje polomljene vilične kosti prikazan je na slici 5 (Machado, Savi, 2003). Za fiksiranje polomljenih delova kostiju uspešno se koriste i SMA žice. Žica se najpre podvrgava niskoj temperaturi i isteže, a zatim se, nakon apliciranja i zagrevanja telesnom temperaturom vraća u prvobitni oblik, obezbeđujući stalnu zatežuću silu. Na taj način izbegava se potreba stalnog pritezanja žice izrađene od klasičnog materijala, koja se tokom vremena isteže i opušta.



Slika 5 – SMA pločica za fiksaciju vilice  
 Figure 5 – SMA plate for mandible fixation

Ekperimentalna primena spojnice izrađenih od materijala koji pamte oblik počela je početkom 80-ih godina u Kini. Spojnice su bile izrađene od nitinola, a koristile su se za fiksaciju prelomljenih kostiju, obezbeđujući na taj način potrebnu pritisnu silu između slomljenih delova. Tokom četvorogodišnjeg prisustva u organizmu nisu primećene nikakve negativne posledice korišćenja ovih spojnice. Danas se spojnice od nitinola koriste u gotovo svim zapadnoevropskim državama. Izgled jedne takve spojnice pre i nakon deformacije usled promene temperature prikazan je na slici 6 a.



Slika 6 – a) SMA spojnice pre i nakon deformisanja, b) SMA odbojnik pršljenova pre i nakon deformisanja

Figure 6 – a) Shape memory staple before and after deformation, b) Shape memory spacer before and after deformation

Još jedna od mogućnosti primene SMA elemenata u medicini prikazana je i na slici 6 b (Petrini, Migliavacca, 2011). U ovom slučaju radi se o odbojniku koji služi za održavanje potrebne razdaljine između dva kičmena pršljena. Na ovaj način postiže se potreban efekat dejstva stalne strane sile, kojom se pršljenovi međusobno razdvajaju sa jedne strane, kao i onemogućavanje povreda kičme usled mogućih nepravilnih pokreta pacijenta, bez obzira na to u kojem se položaju nalazi. Takođe, ovaj odbojnik uspešno se koristi i kao pomagalo pri lečenju skolioze kičme.

Jedan od glavnih problema koji se javlja u ortopedskoj hirurgiji je upravo velika razlika u čvrstoći kostiju, odnosno živog tkiva i metalnih ili keramičkih implantata (Ryan, et al., 2006). Prilikom raspodele opterećenja između kosti i implantata veličina prouzrokovanog napona u njima direktno je povezana sa njihovom čvrstoćom. S obzirom na to, očigledno je da je kost u znatnoj meri manje opterećena od implantata. Što je veći stepen razmimoilaženja čvrstoća tkiva i implantata to je veće razmimoilaženje u naprezanjima implantata i tkiva. Ovaj fenomen utiče na remodeliranje i proces ozdravljenja kostiju i dovodi do povećane poroznosti kostiju (poznate i kao atrofija kostiju). U praksi je pokazano da se, upotrebom implantata sa sličnom čvrstoćom koju ima i tkivo-domaćin, izbegava opasnost od ove pojave i na taj način poboljšava proces ozdravljenja kostiju. Imajući to u vidu, jasno je da je poželjno korišćenje materijala sa manjom čvrstoćom, pa su zbog toga implantati proizvedeni od poroznih NiTi legura predmet interesovanja u nekoliko poslednjih decenija. Poznatim metodama metalurgije prahova moguće je dobiti porozne NiTi legure sa potrebnim fizičkim i mehaničkim karakteristikama. Na taj način dobijaju se permanentni implantati, koji se tokom dužeg perioda u potpunosti prilagođavaju i asimiliraju u organizmu, bez ikakvih neželjenih posledica (Bansiddhi, et al., 2008).

## Primena u stomatologiji

Superelastičnost je efekat koji se najčešće koristi u stomatološkoj primeni materijala koji pamte oblik. Zubne proteze predstavljaju pomagala koja obezbeđuju pravilan rast i korekciju položaja zuba, primenom sila kojima žica proteze deluje na zube. Sile koje se protezom ostvaruju ne smeju biti prevelike, jer mogu dovesti do deformisanja zuba, ali ni premale, jer se u tom slučaju ne ostvaruje potreban efekat. Ukoliko se proteze izrađuju od materijala koji pamte oblik može se postići efekat konstantne, ravnomerno dejstvujuće sile, koja pravilno deluje na korekciju rasta i položaja zuba tokom dužeg perioda (slika 7). U ovom slučaju period potreban da se ostvari pravilan raspored zuba znatno se smanjuje, pri čemu se smanjuje i broj poseta stomatologu zbog pritezanja žica proteze. SMA implantati takođe se uspešno koriste za izradu veštačkih zuba, kao i nedostajućih delova zuba, kao i za izradu stomatoloških alata i pribora.

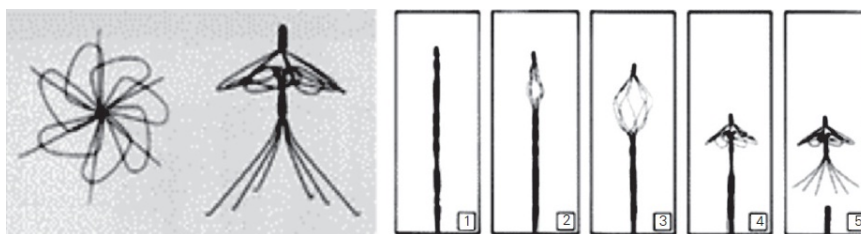


Slika 7 – Proteze izrađene od legura koje pamte oblik  
Figure 7 – Shape memory alloy dental braces



## Kardiovaskularna primena

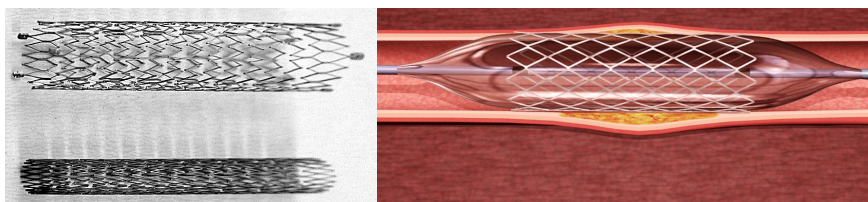
Materijali koji pamte oblik primenjuju se i u ovoj grani medicine, pri čemu se njihovom upotrebom izbegava potreba za klasičnim operativnim postupkom, koji najčešće zahteva i potpunu anesteziju. Simonov filter predstavlja jednu od prvih primena SMA materijala. Koristi se za prevenciju plućne embolije, a naročito je koristan kod osoba koje ne smeju da koriste antikoagulate. Praktična uloga ovog filtera je „hvatanje i zadržavanje” krvnih ugrušaka, sve do njihovog ponovnog rastvaranja u krvi. Apliciranje ovog filtera izvodi se primenom efekta pamćenja oblika, a faze aktiviranja filtera prikazane su na slici 8 (Machado, Savi, 2003).



Slika 8 – Simonov filter i faze kroz koje prolazi prilikom aktiviranja  
Figure 8 – Simon filter and its activation phases

Filter se u početku nalazi u martenzitnoj fazi, i u tom stanju se održava pomoću katetera, kroz koji prolazi tečnost kojom se obezbeđuje snižena temperatura. Nakon konačnog postavljanja u krvni sud, na telesnoj temperaturi počinje transformacija martenzitne u austenitnu fazu. Na taj način filter se vraća u svoj prvobitno zapamćeni oblik, pri čemu obezbeđuje potrebnu funkciju.

U poslednjih nekoliko decenija veoma je učestala primena stentova od materijala koji pamte oblik, radi obezbeđivanja konstantnog unutrašnjeg prečnika krvnog suda. Stent se, pre upotrebe, nalazi u martenzitnoj fazi, a zatim se pomoću katetera, kojim se održava na sniženoj temperaturi, dovodi u zonu apliciranja. Nakon postavljanja stenta u željenu poziciju, telesna temperatura utiče na njegovo vraćanje u prvobitno zapamćeni oblik, odnosno transformaciju martenzitne u austenitnu fazu, pri čemu stent formira svoj konačni oblik, u kojem omogućava neometani protok krvi (slika 9).



Slika 9 – SMA stent i njegov izgled nakon apliciranja  
Figure 9 – SMA stent and its shape after appliance

## Hirurški instrumenti i pribor

Razvoj savremenih hirurških instrumenata i pribora omogućava izvođenje hirurških zahvata uz minimalno oštećenje okolnih tkiva. U skladu s tim trendom i dimenzije savremenih hirurških instrumenata su sve manje, uz istovremeno poboljšanje performansi. Zbog toga je upotreba hirurških instrumenata i pribora izrađenih od materijala koji pamte svoj oblik za ovu svrhu u stalnom usponu. Sposobnost instrumenata izrađenih od SMA da zapamte veoma komplikovane oblike, kao i superelastičnost, karakteristike su koje su od izuzetne važnosti za hirurške instrumente.

SMA korpa je hirurški instrument koji se, pored ostalog, može koristiti za uklanjanje kamena iz bubrega, žučne kese itd. (Kourambas, et al., 2000). Ova korpa se aplicira na sličan način kao i Simonov filter, korišćenjem katetera pomoću kojeg se korpa održava na sniženoj temperaturi u „sklopljenom” stanju. Nakon postavljanja u neposrednu blizinu kamena koji treba odstraniti, korpa se oslobađa i vraća u zapamćeni oblik (pod dejstvom telesne temperature), i na taj način obuhvata objekat, odnosno objekat biva „uhvaćen” u korpu i moguće ga je odstraniti na brz i efikasan način bez dodatnog oštećenja tkiva koje bi moralo biti izazvano klasičnom hirurškom intervencijom.

Sve veću primenu SMA hirurški instrumenti nalaze i u laparoskopiji (Duerig, et al., 1999). Pored dobrih osobina u pogledu dimenzija i težine, SMA instrumente karakteriše i mogućnost veoma finog i preciznog pozicioniranja i funkcionisanja. U slučajevima kada se ovi materijali koriste za izradu hirurških instrumenata za laparoskopiju, funkcije koje omogućava efekat pamćenja oblika uglavnom su prihvatanje, stezanje, sečenje itd.

## Zaključak

Primena legura koje pamte oblik beleži intenzivni rast. Njihove povoljne mehaničke i fizičke karakteristike, kao i efekat pamćenja oblika, koriste se u gotovo svim oblastima nauke i tehnike. Štaviše, njihova biokompatibilnost je jedna od najbitnijih karakteristika koja ih svrstava u prioritetnu klasu materijala koji se koriste u medicini.

U ovom radu prikazani su osnovni vidovi funkcionisanja legura koje pamte oblik, kao što su jednosmerno i dvosmerno pamćenje oblika, superelastičnost i supertermičnost. Takođe, prikazane su i neke od mogućnosti primene legura koje pamte oblik u medicini. Danas su te legure veoma prisutne u medicini, ali se, zahvaljujući dobrim osobinama, u budućnosti može očekivati pronalaženje novih materijala, kao i novih vidova aplikacija ovih materijala.

## Literatura

- Bansiddhi, A., Sargeant, T.D., Stupp, S.I., Dunand, D.C., 2008, Porous NiTi for bone implants: A review, *Acta Biomaterialia*, 4(4), pp.773–782.
- Duerig, T.M., Pelton, A., Stöckel, D., 1999, An overview of nitinol medical applications, *Materials Science and Engineering A*, 273(275), pp.149-160.
- Holton, A., Walsh, E., Anayiotos, A., Pohost, G., Venugopalan, R., 2002, Comparative MRI compatibility of 316L stainless steel alloy and nickel-titanium alloy stents, *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance*, 4(4), pp.423–430.
- Kourambas, J., Delvecchio, F.C., Munver, R., Preminger, G.M., 2000, Nitinol stone retrieval-assisted ureteroscopic management of lower pole renal calculi, *Urology*, 56(6), pp.935–939.
- Machado, L.G., Savi, M.A., 2003, Medical applications of shape memory alloys, *Brazilian Journal of Medical and Biological Research* 36(6), pp.683-691.
- Mantovani, D., 2000, Shape memory alloys: Properties and biomedical applications, *JOM*, 52(10), pp.36-44.
- Melton, K.N., *General applications of SMA's and smart materials in: Shape memory materials*, [Internet], Dostupno na: <<http://catdir.loc.gov/catdir/samples/cam034/97036119.pdf>>, Preuzeto: 20.12.2013.
- Ochonski, W., 2010, Application of shape memory materials in fluid sealing technology, *Industrial Lubrication and Tribology*, 62(2), pp.99-110.
- Petrini, L., Migliavacca, F., *Biomedical Applications of ShapeMemory Alloys*, [Internet], Dostupno na: <<http://www.hindawi.com/journals/jm/2011/501483/>>, Preuzeto: 25.12.2013.
- Ryan, G., Pandit, A., Apatsidis, D., 2006, Fabrication methods of porous metals for use in orthopaedic applications, *Biomaterials*, 27(13), pp.2651–2670.
- Tanikić, D., Manić, M., Đenadić, D., Randelović, S., Milovanović, J., Đekić, P., 2012, Metals and Alloys in the function of biomaterials, *Vojnotehnički glasnik/The Military Technical Courier*, 60(2), pp.202-215.
- Thierry, B., Merhi, Y., Bilodeau, L., Trépanier, C., Tabrizian, M., 2002, Nitinol versus stainless steel stents: acute thrombogenicity study in an ex vivo porcine model, *Biomaterials*, 23(14), pp.2997–3005.

### SHAPE MEMORY ALLOYS AND THEIR MEDICAL APPLICATION

FIELD: Materials  
 ARTICLE TYPE: Review Paper  
 ARTICLE LANGUAGE: Serbian

#### Summary

*Shape memory alloys - SMAs are specific materials which has the ability to change their shape and return to some memorized state, which is caused by the changes in their temperature. Because of their specificity and unusual characteristics, the area of usage of SMAs is very large and heterogeneous. SMAs are mostly biocompatible, which enables their usage in medicine. Some basic characteristics of the shape memory alloys,*

*different types of their transformations, as well as some possibilities of their usage in medicine will be presented in this paper.*

#### Introduction

*The main characteristic of the shape memory alloys, their possibility to return to some remembered state, has been noticed on copper based alloys in the thirties of the last century. However, nitinol (nickel-titanium alloy), as one of the most used SMAs, was discovered at the end of the sixties of the last century. The first documented large usage of SMAs was in 1971 for a coupling to connect titanium hydraulic tubing in a Grumman F-14 aircraft. The large usage of SMAs for the production of valves in air condition systems was recorded in Japan in the eighties of the last century. The first usage of SMAs in the dental and medical fields was recorded at the same time.*

#### SMA functionality principles

*The main functionality principle of SMAs is explained by the solid state phase transition, called martensitic thermoelastic transformation from the austenitic to the martensitic phase and vice-versa.*

*One-way shape memory effect: In this case, material is firstly deformed at some lower temperature. Due to the one-way shape memory effect, the material can return to its memorized shape by simple heating.*

*Two-way shape memory effect: The main characteristic of this effect is changing of the material shape by its alternately heating and cooling, without any external forces.*

*Superthermoelastic effect: Some materials have the ability to accept extremely large loads and return to its original shape after unloading. This characteristic is known as superelasticity or pseudoelasticity.*

*Superelastic effect: This effect happens at the constant temperature. This occurrence is similar to the classical elasticity, but the deformations of the superelastic materials are multiple times larger than the deformations of classic materials.*

*Superthermic effect: Unlike the superelastic effect, this effect happens during loading with the constant external force. The changes in the material shape occur with the changes in the environment temperature, similar as in the case of the two-way shape memory effect.*

#### Biocompatibility and biofunctionality

*Two main demands which medical implants must fulfil are biocompatibility and biofunctionality. Biocompatibility means that the used implant material is non toxic, while biofunctionality provides smooth execution of all needed functions of the implant in the required period of time. There are many SMAs in the nature, the basis of most of them are Fe, Cu, Ag, Au, Mn... However, the most popular SMA is NiTi alloy, called nitinol, which shows good mechanical as well as biocompatible characteristics.*

#### Applications in orthopedic surgery

*Metal plates are already widely used in orthopedic surgery. However, metal plates and other orthopedic devices made from shape memory alloys provide some new, quality possibilities. It is a well-known fact that bone healing is much better in cases when broken*

parts are pressed towards each other during healing. This external force can be obtained by using SMA plates. In this case, SMA plates are deformed at a lower temperature, and then applied onto the broken bone. After application, the plate is heated at the body temperature, which causes returning to the memorized shape, thus providing necessary force for broken parts to stick together.

#### Dental applications

Dental braces are medical devices that provide normal teeth growth and correction of the teeth disposition, using external forces obtained from the braces wires made from SMAs. Forces should not be too large because they can deform teeth, also they should not be too small because they will not be able to realize the main purpose. SMAs in braces enable constant and uniform external forces, which affects the teeth during a long period of time, avoiding the need for frequent dentist interventions.

#### Cardiovascular applications

SMA devices are commonly used in this medical field, resulting in avoiding classic operations which require total anaesthesia. The Simon filter is used for catching and holding clots of the blood stream, preventing the emboli in cases where a patient is unable to use anticoagulants. SMA stents are also very often used devices, the application of which is based on the shape memory effect. Stents enable constant fluid flow in potentially dangerous zones.

#### Surgery instruments and tools

The modern surgery requires minimal damage of the tissue, which implies the tendency towards small, extremely precise instruments and tools. The ability of SMA instruments to remember very complicated shapes, as well as the superelastic effect, are very important characteristics that can upgrade surgical instruments. The shape memory basket, the application of which is very similar to the Simon filter, is often used for removing kidney or bladder stones. The other applications of SMA instruments are guidewires, catheters, instruments for laparoscopy, etc.

#### Conclusion

Good mechanical and physical characteristics of shape memory alloys as well as the ability to remember some previous shapes are widely used in almost all fields of science and engineering. Their biocompatibility is one of the crucial characteristics which classify them into the priority class of materials for biomedical usage. The first part of this work explains the one-way shape memory effect, the two-way shape memory effect, the superelastic effect and the superthermic effect. After that, some examples of the SMA applications in biomedicine are presented.

Key words: shape memory effect, shape-memory alloy.

Datum prijema članka/Paper received on: 28. 02. 2014.

Datum dostavljanja ispravki rukopisa/Manuscript corrections submitted on: 18. 03. 2014.

Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje/ Paper accepted for publishing on: 20. 03. 2014.