

# Slitine s prisjetljivosti oblika i mogućnosti njihove primjene u radnom procesu

---

**Drakšić, Silvio**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:753916>

*Rights / Prava:* [Attribution 3.0 Unported/Imenovanje 3.0](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-11**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Silvio Drakšić**

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr.sc. Zoran Kunica

Student:

Silvio Drakšić

Zagreb, 2021.

**ZADATAK**

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
 Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
 proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
 materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

**ZAVRŠNI ZADATAK**

Student:	Silvio Drakšić	Mat. br.: 0035209822
Naslov rada na hrvatskom jeziku:	<b>Slitine s prisjetljivosti oblika i mogućnosti njihove primjene u radnom procesu</b>	
Naslov rada na engleskom jeziku:	<b>Shape memory materials and possibilities of their application in work process</b>	
Opis zadatka:		
<p>Slitine s prisjetljivosti oblika zanimljive su sa stanovišta mogućnosti oblikovanja tvorevina načinjenih od takvih materijala za primjenu u radnim procesima, u kojima to svojstvo prisjetljivosti omogućuje tvorevinama prilagodljivost – fleksibilnost odnosno rekonfigurabilnost, a prema trenutačnom stanju i zahtjevima u procesu. Tako se slitine s prisjetljivosti oblika mogu koristiti za specifične tvorevine (proizvode, ambalažu, alate i naprave, strojeve...) u strojarstvu ali i izvan njega (medicina...), odnosno za ostvarenje gibanja unutar radnih procesa – naprimjer, za aktuaciju, ili za orijentiranje ili hvatanje objekata.</p> <p>U radu je potrebno:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. opisati fenomen prisjetljivosti oblika materijala i navesti materijale kod kojih se to svojstvo pojavljuje</li> <li>2. prikazati stanje razvijenosti tehnike i primjene slitina s prisjetljivosti oblika</li> <li>3. odabrati i opisati problem, za čije bi se rješavanje mogla koristiti slitina s prisjetljivosti oblika, te koncipirati rješenje.</li> </ol>		
Zadatak zadan:	Datum predaje rada:	Predviđeni datumi obrane:
30. studenoga 2020.	1. rok: 18. veljače 2021. 2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021. 3. rok: 23. rujna 2021.	1. rok: 22.2. – 26.2.2021. 2. rok (izvanredni): 9.7.2021. 3. rok: 27.9. – 1.10.2021.
Zadatak zadao:	Predsjednik Povjerenstva:	
Prof. dr.sc. Zoran Kunica	Prof. dr. sc. Branko Bauer	

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Želio bih zahvaliti:

- mentoru *prof. dr.sc. Zoranu Kunici* na razumijevanju, savjetima i vremenu koje je posvetio za izradu ovog rada
- cijeloj svojoj obitelji, kolegama i prijateljima na potpori tijekom studija

U Zagrebu, 23. rujna 2021.

Silvio Drakšić

## **SAŽETAK**

U završnom radu dan je pregled skupine pametnih materijala pod imenom slitine s efektom prisjetljivosti oblika. Slitine s efektom prisjetljivosti oblika materijali su koji imaju jedinstvenu sposobnost „pamćenja“ izvornog oblika, odnosno povratka u izvorni oblik nakon deformacije. Navedena su osnovna svojstva i ponašanja slitina s efektom prisjetljivosti oblika te opisana martenzitna pretvorba koja je uvjet za ostvarivanje efekta. Prikazane su primjene slitina u industriji i medicini. Predložena je nova mogućnost uporabe slitina za branike i polubranike željezničko-cestovnih prijelaza.

Ključne riječi: slitine, prisjetljivost oblika, martenzitna pretvorba

## **SUMMARY**

A review of specialized subgroup of smart materials known as Shape Memory Alloys (SMA) is presented in this work. SMA-s are a unique class of memory materials with the ability to recover their shape after deformation. Common properties and behaviors of SMA-s are described and reversible martensitic transformation that makes it possible is explained. The applications of SMA-s in industry and medicine are presented, including potential use in the future. A new possibility of using SMA-s for barriers and semi-barriers of railway-road crossings has been proposed.

Key words: alloys, shape memory effect, martensitic transformation

---

**SADRŽAJ**

ZADATAK.....	I
IZJAVA.....	II
SAŽETAK.....	III
SUMMARY .....	IV
POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA .....	VI
POPIS SLIKA .....	VIII
POPIS TABLICA.....	IX
<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. FENOMEN PRISJETLJIVOSTI OBLIKA MATERIJALA .....</b>	<b>2</b>
<b>2.1. Martenzitna pretvorba .....</b>	<b>5</b>
<b>2.2. Značajke efekata prisjetljivosti oblika .....</b>	<b>10</b>
<b>3. PRIMJENE SLITINA S PRISJETLJIVOSTI OBLIKA.....</b>	<b>14</b>
<b>4. MOGUĆNOSTI NOVIH PRIMJENA MATERIJALA SEPO .....</b>	<b>19</b>
<b>5. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>23</b>
<b>6. LITERATURA.....</b>	<b>24</b>



## POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA

Oznaka	Mjerna jedinica	Značenje/Opis
$\alpha_M$	-	naziv faze materijala
$\beta$	-	naziv faze materijala
$\gamma$	-	oznaka faze
$\gamma$	°	smični kut
$\varepsilon$	%	deformacija
$\varepsilon_e$	%	elastična deformacija
$\varepsilon_p$	%	plastična deformacija
$\varepsilon_T$	%	toplinska deformacija
$\varepsilon_{uk}$	%	ukupna deformacija
$\varepsilon_{2W}$	%	reverzibilna deformacija
$\sigma$	N/mm <sup>2</sup>	naprezanje
af	-	antiferomagnetno stanje
$A_s$	°C	engl. <i>austenite start</i> – temperatura početka austenitne transformacije
$A_f$	°C	engl. <i>austenite finish</i> – temperatura završetka austenitne transformacije
BCC	-	prostorno centrirana kubična rešetka
BCT	-	tetragonalna rešetka
engl.	-	engleski
f	-	feromagnetno stanje
FCC	-	plošno centrirana kubična rešetka
HCP	-	heksagonska rešetka

---

$M_d$	°C	najviša temperatura pri kojoj nastupa mehanički inducirana transformacija u martenzit
$M_s$	°C	engl. <i>martensite start</i> – temperatura početka martenzitne transformacije
$M_f$	°C	engl. <i>martensite finish</i> – temperatura završetka martenzitne transformacije
p	-	paramagnetno stanje
$R_p$	N/mm <sup>2</sup>	granica razvlačenja
$R_{pp}$	N/mm <sup>2</sup>	pseudo granica razvlačenja
SEPO	-	slitine s efektom prisjetljivosti oblika

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Toplinski inducirana martenzitno austenitna transformacija materijala SEPO [6].....	5
Slika 2. Martenzitna pretvorba smicanjem rešetke za smični kut $\gamma$ [8].....	6
Slika 3. Shematski prikaz reverzibilne i ireverzibilne martenzitne pretvorbe [10].....	7
Slika 4. Prikaz efekata prisjetljivosti oblika u $\sigma$ - $\varepsilon$ - $T$ dijagramima [8]: a) ponašanje konvencionalnih materijala; b) pseudoelastičnost; c) dvosmjerni efekt; d) jednosmjerni efekt ili pseudoplastičnost .....	9
Slika 5. Slobodni oporavak oblika kod jednosmjerne prisjetljivosti [12] .....	11
Slika 6. Slobodni oporavak oblika kod dvosmjerne prisjetljivosti [12].....	11
Slika 7. Slobodni oporavak oblika kod pseudoelastične prisjetljivosti [12] .....	12
Slika 8. Ograničeni oporavak oblika kod jednosmjerne prisjetljivosti [12].....	12
Slika 9. Mehanički rad kod jednosmjerne prisjetljivosti [12] .....	13
Slika 10. Spajanje cijevi korištenjem materijala SEPO [8].....	15
Slika 11. Valoviti uzorci na krajevima mlaznih motora Boeing aviona [17].....	15
Slika 12. Elementi SEPO korišteni na panelima lake građe [20].....	16
Slika 13. Hvataljke robota dvosmjerne prisjetljivosti [8] .....	17
Slika 14. Zubni aparatić od NiTi slitine i shematski prikaz svrdla od NiTi slitine u uporabi za operaciju bušenja korijena zuba [19].....	17
Slika 15. Okvir naočala pod pseudoelastičnim efektom [19].....	18
Slika 16. Pojednostavnjeni prikaz sudara vozila s konvencionalnim polubranikom .....	20
Slika 17. Opasnost od odlomljenog dijela polubranika [24] .....	20
Slika 18. Pojednostavnjeni prikaz sudara vozila s polubranikom od materijala SEPO .....	21
Slika 19. Pojednostavnjeni prikaz tijeka sudara s polubranikom od materijala SEPO .....	21

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Legirni sustavi sa svojstvom prisjetljivosti oblika [4] .....	3
Tablica 2. Najvažnija svojstva CuAlNi, NiTi i CuZnAl [5] .....	4
Tablica 3. Obilježja austenitno martenzitne pretvorbe [9] .....	6
Tablica 4. Područja primjene materijala SEPO [14] .....	14

## 1. UVOD

Stoljećima su metali igrali bitnu ulogu kao strukturni elementi. Tehnike poput lijevanja, kovanja i pravljenja legura postepeno su se razvijale još od bakrenog i željeznog doba. S napretkom znanosti i tehnologije, razumijevanjem utjecaja promjene mikrostrukture materijala na promjenu ponašanja, znanost o materijalima znatno je napredovala posljednjih desetljeća. Sukladno razvitku znanosti raste i potražnja za što lakšim i što čvršćim materijalima. Dugo vremena naglasak je u znanosti bio usmjeren na razvoj konstrukcijskih materijala, a budući da je njihov razvitak danas prilično iscrpljen, a istovremeno rastu potrebe za novim materijalima s funkcionalnim svojstvima, težište znanosti polako se prebacuje s konstrukcijskih na inovativne funkcionalne materijale. Tzv. pametni materijali čine jednu od skupina funkcionalnih materijala. Pametne materijale karakterizira sposobnost osjeta određenog podražaja i odgovora na taj podražaj na točno određen način.

Slitine s efektom prisjetljivosti oblika (skraćeno SEPO) predstavljaju relativno novu skupinu pametnih materijala. [1] Osnovni uvjet za prisutnost efekta prisjetljivosti oblika bezdifuzijska je reverzibilna fazna pretvorba (transformacija) poznatija pod imenom martenzitna pretvorba. Martenzitna pretvorba osnovni je mehanizam kaljenja čelika, a čovjek je ovladao njome prije više od 3500 godina. Iako je tisućama godina prisutna u civilizaciji, prvi puta znanstveno je opisana tek u radu Adolfa Martensa krajem 19. stoljeća, po komu je i dobila ime.

Efekt prisjetljivosti oblika prvi puta uočen je u prvoj polovici 20. stoljeća, a veću pažnju ova skupina materijala dobiva tek u drugoj polovici stoljeća, ponajviše zaslugom Buehlera i suradnika otkrićem efekta kod slitine NiTi [2], danas poznate pod komercijalnim nazivom NITINOL. Danas materijali SEPO još uvijek zauzimaju relativno mali udio na tržištu materijala, ali se u narednim godinama očekuje nastavak rasta potrošnje. [3]

## 2. FENOMEN PRISJETLJIVOSTI OBLIKA MATERIJALA

Termin slitine s prisjetljivosti oblika koristi se za grupu materijala koji imaju sposobnost vraćanja u njihov prethodno definirani oblik pri određenom postupku toplinske obrade.

Danas je poznat relativno velik broj materijala s mogućnosti prisjećanja oblika, ali komercijalno zanimljive materijale uglavnom čine oni koji mogu ponovljivo iskazati značajnu deformaciju ili oni materijali koji promjenom oblika ostvaraju dostatnu silu. Tablica 1. sadrži cjeloviti pregled SEPO legiranih elemenata uz prikaz histereze i temperaturnog područja karakterističnog za transformaciju.

Najčešće rabljeni materijali SEPO slitine su na bazi nikla i titanija, NiTi, komercijalnog naziva NITINOL, te slitine na bazi bakra trokomponentnog oblika: CuZnAl i CuAlNi. NiTi slitine općenito posjeduju odličnu biokompatibilnost i relativno velik iznos efekta prisjećanja oblika te relativno visoku čvrstoću, dobru otpornost toplinskom i mehaničkom umoru, korozijsku postojanost, međutim njihova je cijena u krajnjem obliku značajno veća od cijene većine drugih materijala SEPO, primjerice onih na bazi bakra. Stoga u mnogim slučajevima, kada nije presudna biokompatibilnost, slitine na bazi bakra predstavljaju podjednako dobru, a ekonomičniju alternativu. Osim što su ekonomičnije, slitine na bazi bakra mogu se i jednostavnije taliti te posjeduju visoku električnu i toplinsku vodljivost, ali i nižu čvrstoću te su sklonije pojavi umora.

[4]

Tablica 1. Legirni sustavi sa svojstvom prisjetljivosti oblika [4]

Slitina	Kemijski sastav	Područje transformacijskih temperatura, °C	Transformacijska histereza, °C
AgCd	44 do 49 atomskih % Cd	-190 do -50	≈ 15
AuCd	46,5 do 50 atomskih % Cd	30 do 100	≈ 15
CuAlNi	14 do 14,5 masenih % Al 3 do 4,5 masenih % Ni	-140 do 100	≈ 35
CuSn	≈15 atomskih % Sn	-120 do 30	
CuZn	38,5 do 41,5 masenih % Zn	-180 do -10	≈ 10
CuZnX (X=Si, Sn, Al)	mali maseni udjel X	-180 do 200	≈ 10
InTi	18 do 23 atomskih % Ti	60 do 100	≈ 4
NiAl	36 do 38 atomskih % Al	-180 do 100	≈ 10
NiTi	49 do 51 atomskih % Ni	-50 do 400	≈ 30
FePt	≈25 atomskih % Pt	≈ -130	≈ 4
MnCu	5 do 35 atomskih % Cu	-250 do 180	≈ 25
FeMnSi	32 masena % Mn, 6 masenih % Si	-200 do 150	≈ 100

U tablici 2. navedena su najvažnija svojstva najčešće rabljenih slitina; CuAlNi, NiTi i CuZnAl.

Tablica 2. Najvažnija svojstva CuAlNi, NiTi i CuZnAl [5]

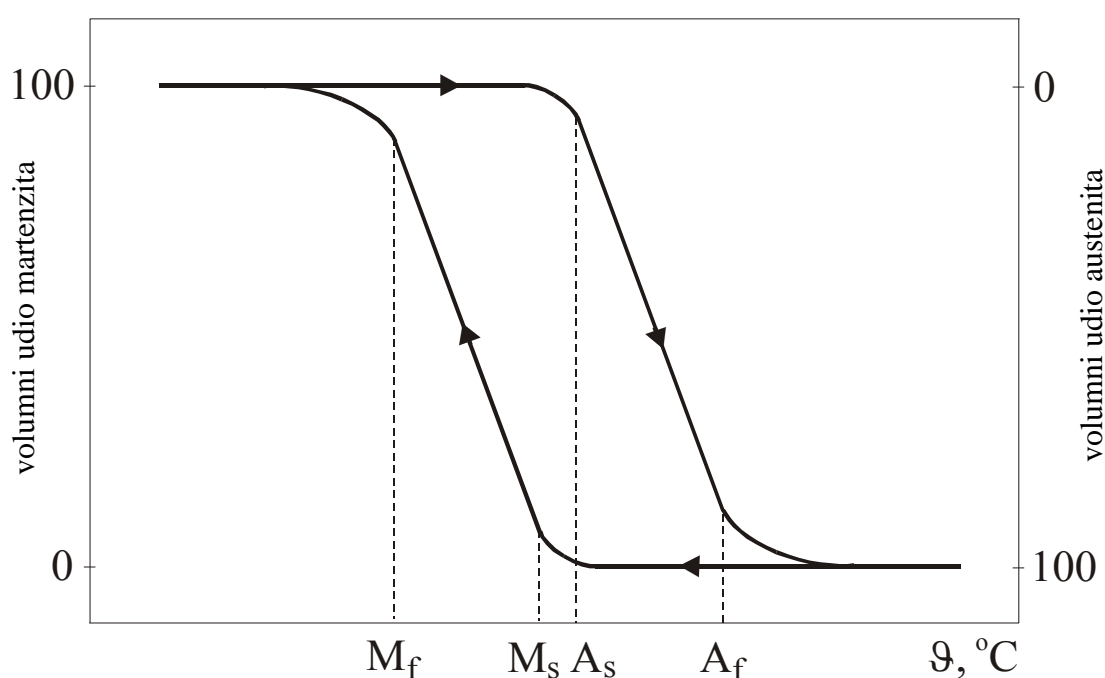
Svojstva slitina	CuAlNi	NiTi	CuZnAl
talište/°C	1000 – 1050	1250	1020
granica razvlačenja/MPa	400	580	80 – 200
vlačna čvrstoća/MPa	500 – 800	800 – 1000	500 – 600
duktilnost/%	5 – 7	54	15
zamorna čvrstoća (106 ciklusa)/MPa	350	350	270
toplinski kapacitet/J kg <sup>-1</sup> °C	373 – 574	450 – 620	390 – 400
toplinska provodnost na 20 °C/W mK <sup>-1</sup>	30 – 75	8,6 – 18	84 – 120
entalpija transformacije/kJ kg <sup>-1</sup>	9	28	7
gustoća/kg m <sup>-3</sup>	7100 – 7200	6400 – 6500	7540 – 8000
latentna toplina/J kg <sup>-1</sup>	7000-9000	19000-32000	7000-9000
električna otpornost/10 <sup>6</sup> Ωm <sup>-1</sup>	0,1 – 0,14	0,5 – 1,1	0,07 – 0,12
koeficijent toplinskog širenja/10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>	17	6,6 – 11	17
maksimalno naprezanje pri oporavku/MPa	300 – 600	500 – 900	400 – 700
uobičajeno radno naprezanje/MPa	70	100 – 130	40
maksimalna transformacijska deformacija/%			
broj ciklusa: 1	5 – 6	6 – 8	4 – 6
broj ciklusa: < 10 <sup>2</sup>	4	6 – 8	4
broj ciklusa: < 10 <sup>5</sup>		2 - 4 (3)	
normalni broj toplinskih ciklusa	> 5 · 10 <sup>3</sup>	> 10 <sup>5</sup>	> 10 <sup>4</sup>
Youngov modul elastičnosti / GPa	80 – 100	28 – 83	70 – 100
temperature transformacija promjene oblika/°C	-200 – 200	-200 – 110	-200 – 150
temperaturna histereza/°C	20 – 40	2 – 50	5 – 20
maksimalni jednosmjerni efekt prisjetljivosti oblika/%	6	7	4
uobičajeni dvosmjerni efekt prisjetljivosti oblika/%	1	3,2	0,8
maksimalna temperatura pregrijanja/°C	300	400	150
omjer troškova	1,5 – 20	10 – 100	1 – 10



## 2.1. Martenzitna pretvorba

Osnovni uvjet za pojavu efekta prisjetljivosti oblika jest postojanje bezdifuzijske reverzibilne fazne transformacije poznate kao martenzitna pretvorba. Martenzitna transformacija osnovni je mehanizam postupka kaljenja kojim se formira martenzitni konstituent karakteristične tvrdoće i mikrostrukture. Ono što materijale SEPO čini specifičnima činjenica je da je kod njih martenzitna pretvorba reverzibilna, dok je kod ostalih materijala, primjerice čelika, ireverzibilna. [6]

Slika 1. prikazuje uobičajeni način karakterizacije anizotermne toplinski inducirane martenzitno austenitne transformacije koja je karakteristična za SEPO materijale.



**Slika 1. Toplinski inducirana martenzitno austenitna transformacija materijala SEPO [6]**

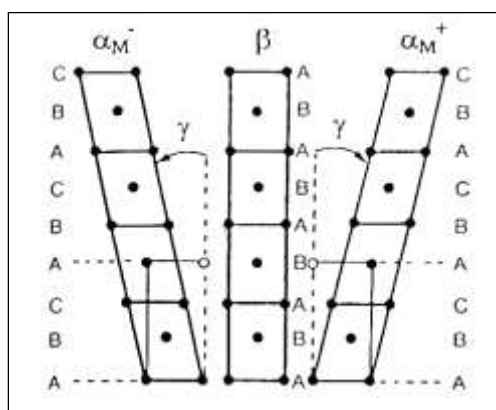
Transformaciju legura s prisjetljivosti oblika karakteriziraju sljedeće temperature, °C:

- $A_s$  – temperatura početka austenitne transformacije
- $A_f$  – temperatura završetka austenitne transformacije
- $M_s$  – temperatura početka martenzitne transformacije, i
- $M_f$  – temperatura završetka martenzitne transformacije.

Martenzitna reakcija započinje hlađenjem od  $M_s$  (engl. *martensite start*) do temperature  $M_f$  (engl. *martensite finish*), a austenitna transformacija nastupa zagrijavanjem između područja temperatura  $A_s$  (engl. *austenite start*) i  $A_f$  (engl. *austenite finish*).

Martenzitna reakcija može se potaknuti i na temperaturi većoj od  $M_s$ , ali u tom slučaju ne toplinskim putem već mehaničkim djelovanjem vanjskog naprezanja (naprezanjem inducirani martenzit) ili plastične deformacije (plastičnom deformacijom inducirani martenzit). [7]

Austenitno-martenzitna reakcija događa se u području temperatura kod kojih je brzina difuzijskih reakcija približna nuli te je stoga pokretljivost atoma vrlo mala. Zato nije moguće pojedinačno kretanje atoma, već samo njihovo istodobno premještanje. Preraspodjelom atoma putem homogenog smicanja na udaljenostima manjim od parametra kristalne rešetke dolazi do promjene u načinu njihova slaganja (Slika 2.).



Slika 2. Martenzitna pretvorba smicanjem rešetke za smični kut  $\gamma$ [8]

Slika 2. prikazuje pretvorbu strukture s HCP rešetkom (redosljed slaganja ravnina ABAB...) u strukturu s FCC rešetkom (redosljed slaganja ravnina ABCABC...). Karakteristična obilježja kristalne pretvorbe za neke materijale SEPO opisana su tablicom 2.

Tablica 3. Obilježja austenitno martenzitne pretvorbe [9]

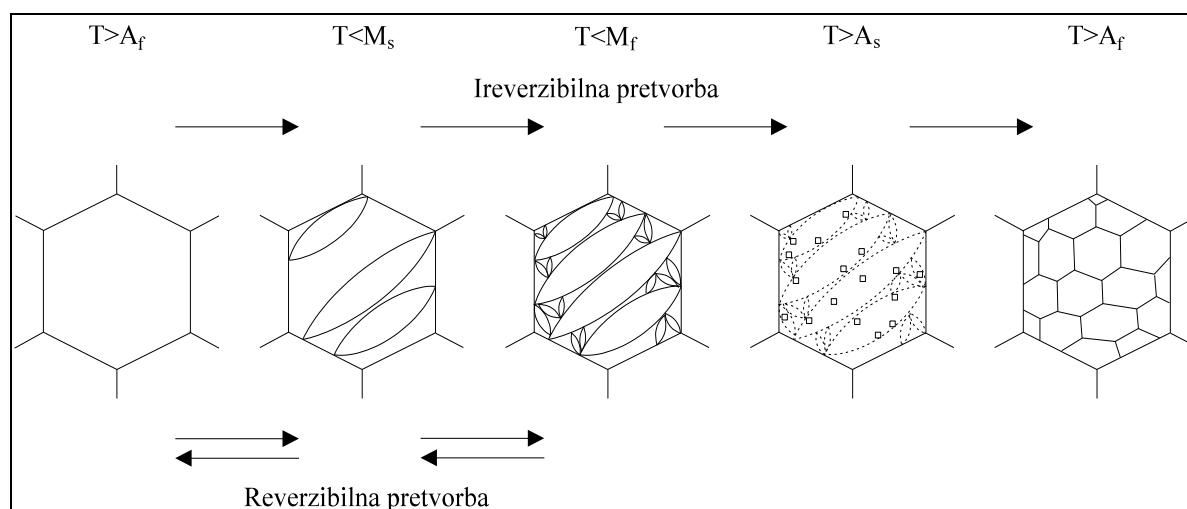
Visokotemperaturna faza	Kristalna pretvorba $\beta(\gamma) \leftrightarrow \alpha_M$	$\Delta V_{\beta\alpha_M}$	Magnetna stanja $\beta(\gamma) \leftrightarrow \alpha_M$
$\beta$ -CuZnX	BCC $\leftrightarrow$ gusto slagana rešetka	$\approx 0$	p $\leftrightarrow$ p
$\beta$ -NiTiX	BCC $\leftrightarrow$ gusto slagana rešetka	$\approx 0$	p $\leftrightarrow$ p

$\gamma$ -FeNiX	FCC $\leftrightarrow$ BCC, BCT	+0,03	p $\leftrightarrow$ f
$\gamma$ -FeNiCoX	FCC $\leftrightarrow$ BCC, BCT	< +0,02	f $\leftrightarrow$ f
$\gamma$ -FeMnX	FCC $\leftrightarrow$ HCP	-0,01	p $\leftrightarrow$ af

Kod CuZn i NiTi slitina dolazi do pretvorbe BCC kristalne rešetke visokotemperaturne faze ili austenita s oznakom  $\beta$  u strukturu s višim koordinacijskim brojem tzv. gusto slaganu rešetku niskotemperaturne faze ili martenzita s oznakom  $\alpha_M$ . Fazna pretvorba ne utječe na promjenu volumena ili magnetnih stanja. U FeNi materijalima SEPO dolazi do transformacije austenitne ( $\gamma$ ) plošno centrirane kubične rešetke (FCC) u martenzitnu prostorno centriranu kubičnu (BCC) ili tetragonalnu (BCT) rešetku, odnosno u gusto slaganu heksagonsku rešetku (HCP) kod FeMn-slitina. Istovremeno zbiva se i promjena volumena te magnetna transformacija karakterizirana prijelazom paramagnetnog (p) u feromagnetno (f) ili antiferomagnetno stanje (af).

Kako bi materijal višestruko mijenjao oblik austenitno martenzitna pretvorba mora biti kristalografski reverzibilna, odnosno povratnom pretvorbom, tijekom zagrijavanja, bez greške mora se uspostaviti izvorni austenitni kristal pri čemu uvedena deformacija nestaje, a materijal poprima visokotemperaturni oblik.

Na slici 3. prikazan je shematski tijek reverzibilne martenzitne transformacije u SEPO-u i uspoređen s ireverzibilnom pretvorbom.



**Slika 3. Shematski prikaz reverzibilne i ireverzibilne martenzitne pretvorbe [10]**

Ohlađivanjem austenita na temperaturu nižu od  $M_s$  javljaju se prvi kristali martenzita koji se protežu do granica izvornog austenitnog zrna. Daljnje hlađenje zrna osigurava dodatnu pokretačku silu za martenzitnu reakciju te se posmiču preostala područja austenitnog kristala te formiraju sitnije martenzitne iglice smještene između većih ranije nastalih  $\alpha_m$ -kristala. Reverzibilnom povratnom pretvorbom potaknutom zagrijavanjem postepeno nestaju martenzitne iglice i njihovi defekti i to slijedom suprotnom onomu kod formiranja. Posljednje formirani martenzitni kristali pri temperaturi  $M_f$  prvi će iščeznuti i to već na temperaturi  $A_s$ , dok će prvi kristali martenzita nastali pri temperaturi  $M_s$  zadnji se transformirati u austenit i to tek na temperaturi  $A_f$ . Dakle, nije potrebna nova nukleacija  $\beta$ -faze, kao u slučaju ireverzibilne pretvorbe, već se povratna (austenitna) transformacija odvija smicanjem rešetke u suprotnom smjeru. Ireverzibilnu pretvorbu obilježavaju nukleacijski procesi i nastanak novih austenitnih kristala pri temperaturi većoj od  $A_s$  te se javlja čitav niz manjih  $\beta$ -kristala unutar granica prvotnog austenitnog zrna. [7 i 8]

Danas je poznat niz fizikalnih čimbenika koji potpomažu reverzibilnost martenzitne pretvorbe, a time i efekt prisjetljivosti oblika. [6, 9 i 10]

- 1) Odsutnost difuzijskih procesa u temperaturnom području pretvorbe:  $\Delta T = A_f - M_f$ ;
- 2) Minimalna promjena volumena tijekom  $\beta \leftrightarrow \alpha_m$  pretvorbe;
- 3) Velika smična deformacija rešetke  $\gamma_{\beta\alpha_m}$ ;
- 4) Kristalografska uređenost austenita;
- 5) Precipitacija koherentnih čestica podkritične veličine u čvrstoj otopini  $\beta$ -faze;
- 6) Unutarnja plastična deformacija  $\alpha_m$ -kristala bez promjene kristalne rešetke;
- 7) Visoka granica razvlačenja austenita;
- 8) Odsutnost magnetne pretvorbe za vrijeme strukturne transformacije.

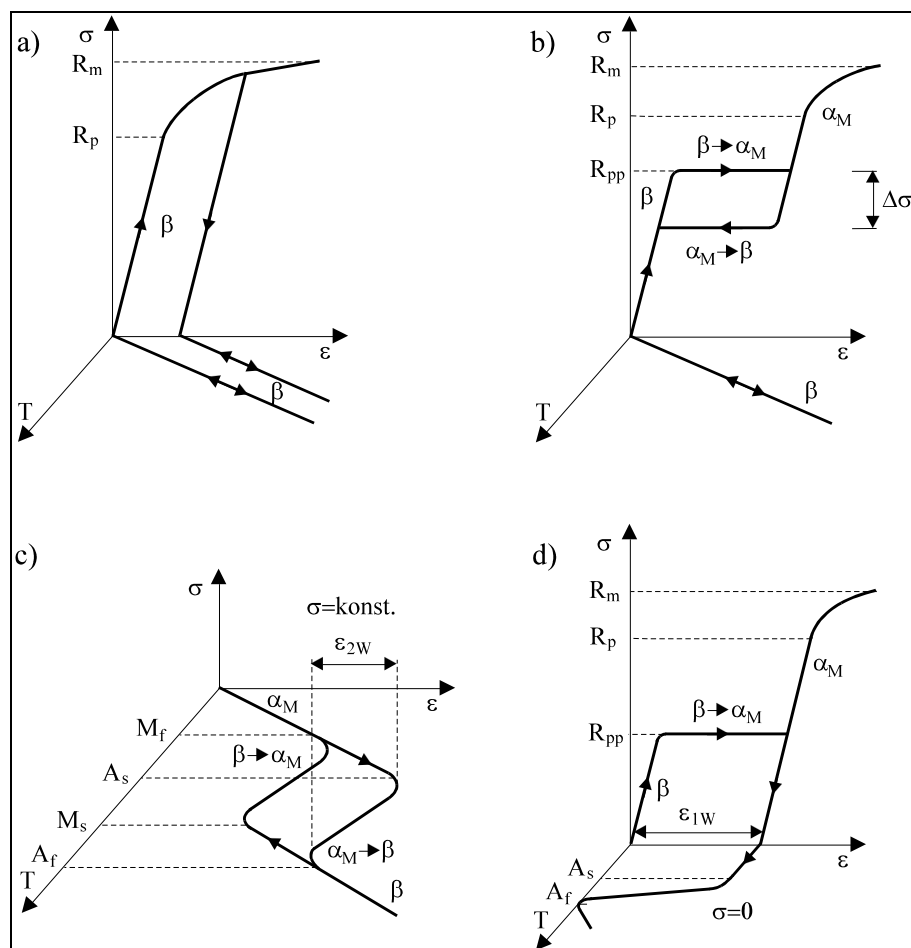
Efekt prisjetljivosti oblika ili termoelastična martenzitna transformacija rezultat je promjene unutar kristalografske strukture materijala između dviju faza, niskotemperaturne martenzitne i visokotemperaturne austenitne faze. [12]

Oblik slitina s prisjetljivosti oblika dobiva se toplinskom ili termomehaničkom obradom, odnosno tzv. „treningom“ ili programiranjem slitine. Najpoznatija metoda programiranja deformiranje je

na povišenim temperaturama, iznad temperature  $A_f$ , nakon čega slijedi hlađenje na sobnu temperaturu, pri čemu je slitina konstantno podvrgnuta naprezanju. [6]

Razlikuju se tri pojave efekta prisjetljivosti oblika: pseudoelastičnost, jednosmjerni efekt ili pseudoplastičnost te dvosmjerni efekt.

Efekti prisjetljivosti oblika mogu se inducirati promjenom temperature, sa ili bez djelovanja vanjskog mehaničkog naprezanja. Različiti oblici ponašanja materijala SEPO, uz "normalno" ponašanje konvencionalnih materijala prikazani su trokoordinatnim dijagramima naprezanje ( $\sigma$ ), istežanje ( $\varepsilon$ ), temperatura ( $T$ ) na slici 4.



**Slika 4. Prikaz efekata prisjetljivosti oblika u  $\sigma$ - $\varepsilon$ - $T$  dijagramima [8]: a) ponašanje konvencionalnih materijala; b) pseudoelastičnost; c) dvosmjerni efekt; d) jednosmjerni efekt ili pseudoplastičnost**

Slika 4.a) pokazuje poznato ponašanje tradicionalnog konstrukcijskog materijala (čelik, Al-slitina i sličnog) kada pod djelovanjem naprezanja nižeg od granice razvlačenja  $R_p$ , nastupa

reverzibilna elastična deformacija ( $\varepsilon_e$ ), a potom i ireverzibilna plastična ( $\varepsilon_p$ ), za naprezanja  $\sigma > R_p$ , što s daljnjim porastom naprezanja vodi do loma materijala. Promjenom temperature mijenja se duljina ( $\varepsilon_T$ ) u skladu s koeficijentom toplinske istezljivosti. Stoga se ukupna deformacija,  $\varepsilon_{uk.}(\sigma, T)$  može iskazati kao zbroj tri deformacijske komponente:

$$\varepsilon_{uk.}(\sigma, T) = \varepsilon_e(\sigma) + \varepsilon_p(\sigma) + \varepsilon_T(T).$$

Pseudoelastični materijal, dijagram 4 b), deformira se pod djelovanjem naprezanja prvo čisto elastično. Nakon dostizanja pseudo granice razvlačenja,  $R_{pp}$ , dolazi do znatnog pseudoelastičnog istezanja ( $\varepsilon_{pe}$ ) uslijed naprežanjem inducirane transformacije austenita u martenzit pri temperaturi većoj od  $A_f$ , a manjoj od  $M_d$  ( $M_d$  – najviša temperatura pri kojoj nastupa mehanički inducirana transformacija u martenzit). Uvedena pseudo deformacija iščezava povratnom pretvorbom ( $\alpha_M \rightarrow \beta$ ), tijekom rasterećenja, uz pojavu histereze naprezanja  $\Delta\sigma$ . Ostvarena pseudoelastičnost može iznositi čak do 10 % pa je ukupna reverzibilna deformacija pseudoelastičnih materijala SEPO značajno veća od “klasične” elastičnosti konvencionalnih konstrukcijskih materijala.

U slučaju dvosmjernog efekta, prikazanog na slici 4.c), reverzibilna deformacija ( $\varepsilon_{2w}$ ) posljedica je  $\beta \leftrightarrow \alpha_M$  pretvorbe inducirane isključivo promjenom temperature. Promjena oblika odvija se hlađenjem između temperature  $M_s$  i  $M_f$  kada slitina poprima niskotemperaturni oblik, a visokotemperaturni oblik uspostavlja se zagrijavanjem temperature od  $A_s$  do  $A_f$ . Ciljano deformiranje materijala događa se u relativno uskom temperaturnom području u rasponu od nekoliko stupnjeva do nekoliko desetaka stupnjeva.

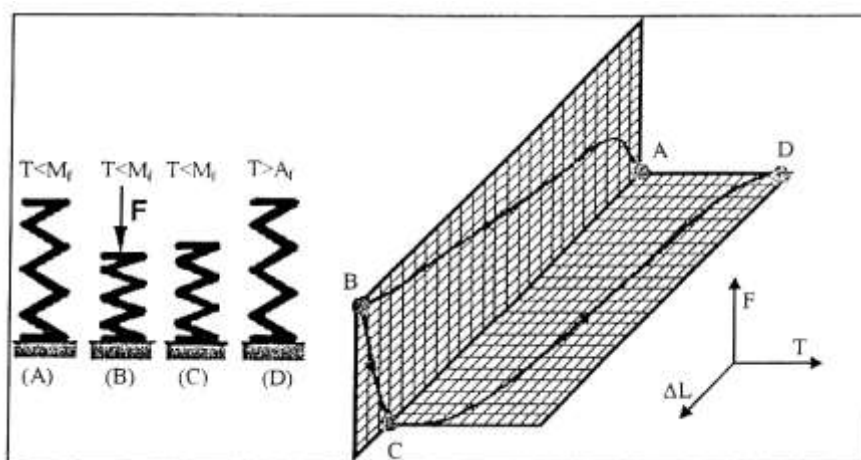
## 2.2. Značajke efekata prisjetljivosti oblika

Slitine s efektom prisjetljivosti oblika predstavljaju funkcionalne materijale koji se vrlo često rabe kao senzori i aktuatori. Značajke slitina, opisane na primjeru opruge od materijala SEPO, mogu se svrstati u četiri zasebne kategorije:

1. Slobodni oporavak oblika
2. Ograničeni oporavak oblika
3. Primjene karakterizirane mehaničkim radom
4. Visoka sposobnost prigušenja vibracija.

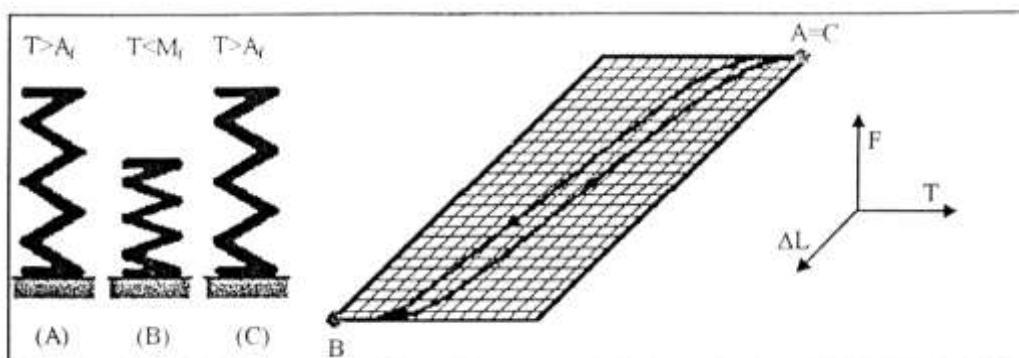
**Slobodni oporavak oblika** koristi se kod elemenata s prisjetljivošću oblika koji moraju ostvariti unaprijed definiranu relativno veliku reverzibilnu deformaciju temeljem jednosmjerne, dvosmjerne ili pseudoelastične prisjetljivosti.

Slobodna pseudoplastična promjena oblika (Slika 5.), nastupa deformiranjem opruge pri temperaturi nižoj od  $M_f$  (od A do B), pri čemu dolazi do reorijentacije martenzitnih kristala i njihovog usmjerenog formiranja, da bi zatim nakon rasterećenja (B do C) i zagrijavanja iznad temperature  $A_f$  (od C do D) opruga ponovno poprimila početni oblik.



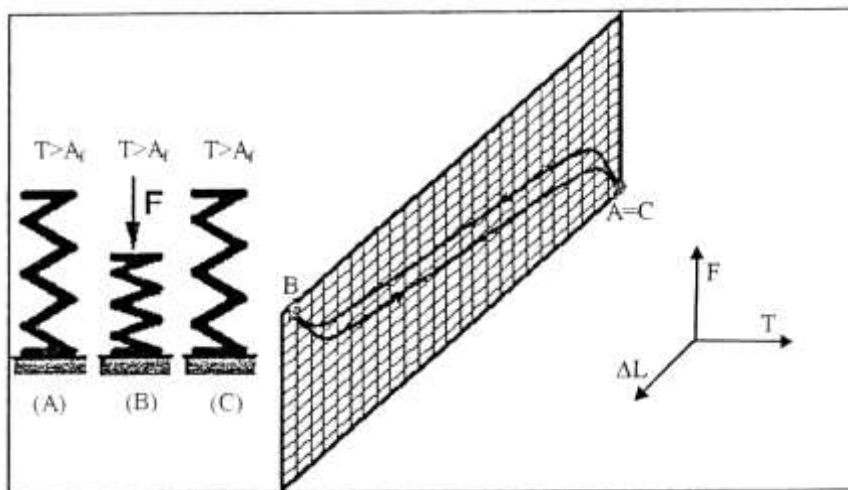
Slika 5. Slobodni oporavak oblika kod jednosmjerne prisjetljivosti [12]

Za potpunu promjenu oblika temeljem dvosmjernog efekta potrebno je oprugu hladiti ispod temperature  $M_f$  (A do B) čime se ona sabija, a naknadno zagrijavanje iznad  $A_f$  vrijednosti potiče rastezanje opruge (B do C) (Slika 6.).



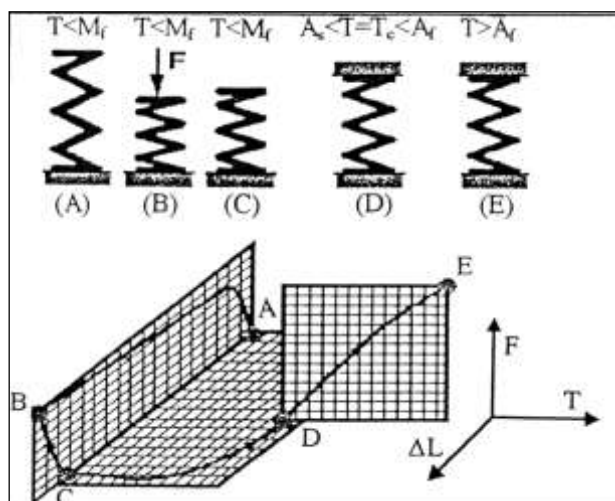
Slika 6. Slobodni oporavak oblika kod dvosmjerne prisjetljivosti [12]

Slobodna promjena oblika pseudoelastične SEPO opruge, prikazana na slici 7, ostvaruje se deformiranjem opruge iznad temperature  $A_f$  (A do B) kada poprima niske temperaturni oblik, dok se izvorni visokotemperaturni oblik uspostavlja naknadnim rasterećenjem (B do C).



Slika 7. Slobodni oporavak oblika kod pseudoelastične prisjetljivosti [12]

**Ograničeni oporavak oblika** – u ovome slučaju fizički se onemogućava potpuna promjena oblika. Slika 8. prikazuje ograničeni oporavak oblika na primjeru opruge pseudoplastične prisjetljivosti.

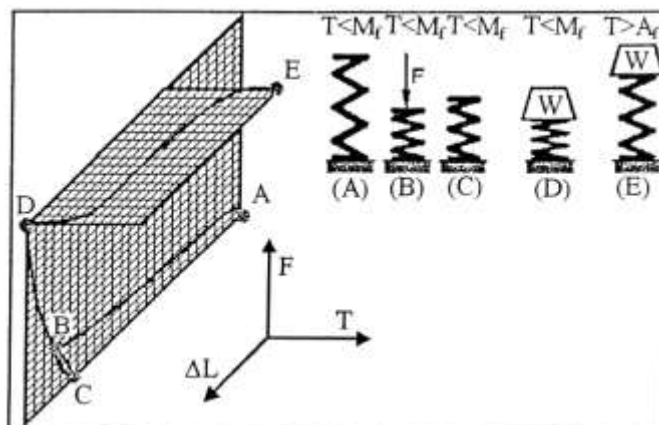


Slika 8. Ograničeni oporavak oblika kod jednosmjerne prisjetljivosti [12]

Prethodno deformirana martenzitna opruga (A do B) i potom rasterećena (B do C) zagrijavanjem, ne može se u cijelosti vratiti u visokotemperaturni oblik, ako je njen povrat onemogućen fizičkom zaprekom. Ovakva nepotpuna promjena oblika može rezultirati silom, odnosno naprezanjima koja mogu doseći do  $800 \text{ N/mm}^2$ . Ograničeni oporavak oblika moguć je i kod elemenata s pseudoelastičnom ili dvosmjernom prisjetljivošću.



**Primjene karakterizirane mehaničkim radom:** Pseudoplastično deformirani element s efektom prisjetljivošću oblika (A do C) obaviti će određeni mehanički rad, pod uvjetom da je opterećen utegom mase  $W$  (C do D) i zagrijan iznad  $A_f$  kada povratna austenitna transformacija pokreće oporavak te promjenu oblika i podizanje utega (D do E) (Slika 9.).



Slika 9. Mehanički rad kod jednosmjerne prisjetljivosti [12]

**Visoka sposobnost prigušenja vibracija:** Elementi načinjeni od materijala SEPO učinkoviti su u prigušivanju vibracija i to čak do 90 % u slučaju udarnih opterećenja. [12]

Slitine s efektom prisjetljivosti oblika zahtijevaju iznimno precizno podešen kemijski sastav jer su pretvorbene temperature koje imaju značajan utjecaj na eksploatacijske karakteristike slitine vrlo osjetljive već na male promjene sastava. Stoga se zahtijeva točnost legiranja veća od 0,1 %, a atomi legiranih elemenata moraju biti jednoliko raspoređeni u osnovnoj rešetki bez prisustva bilo kakvih segregacija. Mikrostruktura materijala SEPO u principu mora biti monofazna: austenitna ili martenzitna. U lijevanom stanju materijali SEPO češće su heterogeni, te ih stoga treba prikladnom toplinskom ili toplinsko-mehaničkom obradom dovesti u monofazno austenitno ili martenzitno područje.

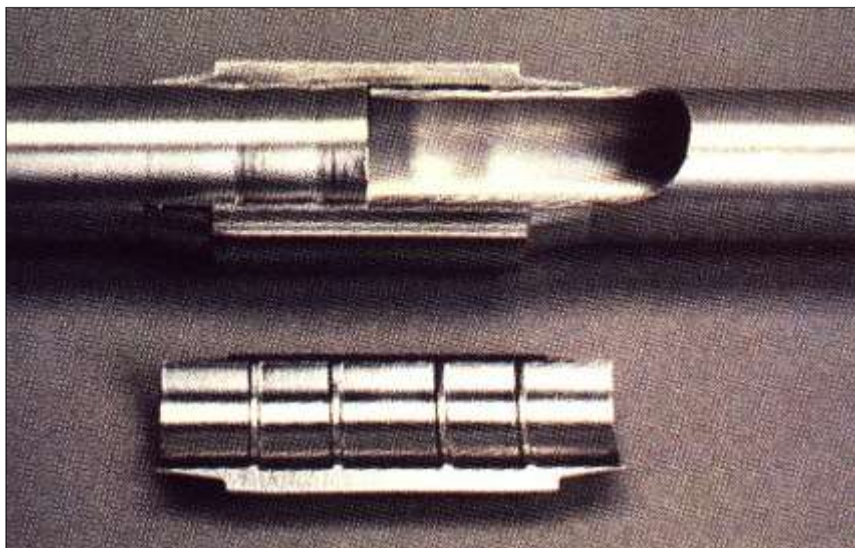
### 3. PRIMJENE SLITINA S PRISJETLJIVOSTI OBLIKA

Funkcionalni materijali svojim su svojstvima otvorili nove mogućnosti inženjerima. Posjeduju široko područje primjene, osobito u tehnici i medicini.

**Tablica 4. Područja primjene materijala SEPO [14]**

Efekt prisjetljivosti oblika	Jednosmjerni efekt	Dvosmjerni efekt	Pseudoelastičnost
Učvršćenje/spajanje	- spajanje cijevi - razdvojno zakivanje		- brtvila - okviri za naočale
Regulacija		- ventilski razvod - zaštita od topline ili hladnoće	
Motorna vozila		- zatvoreni sistemi - otvaranje svjetla za maglu - zvučna izolacija	- slitine s visokim dekrementom prigušenja
Obrada podataka	- utični spojevi	- magnetno memoriranje podataka - sustav glava/disk	
Energija/motor		- termogeneratorski agregati - upravljanje solarnim ćelijama	
Automatizacija		- dijelovi robota - manipulatori - prihvat alata	
Medicina	- implantati - stentovi (potpornji)	- upravljanje endoskopom	- zubne spojnice
Tekstilna industrija	- ukruta odjeće		- nadomjestak za gumu

Materijali SEPO zbog svoje se relativno visoke cijene najčešće koriste u razvijenijim dijelovima svijeta i gospodarskim djelatnostima koje raspolažu većim količinama novca. Jedan od najpoznatijih i relativno ranih primjera uporabe materijala SEPO bio je u američkom ratnom zrakoplovu F-14 1971. godine. Materijal SEPO tada se koristio za spajanje hidrauličkih cijevi, što se prakticira još i danas. [15] Spojnica izrađena od materijala SEPO pothlađuje se ispod temperature  $M_f$ , zatim proširuje te natakne na krajeve cijevi. Zagrijavanjem na radnu temperaturu višu od  $A_f$  spojnica oporavlja se do izvornog oblika te njenim stezanjem nastupa čvrsti i eventualno nepropusni mehanički spoj.



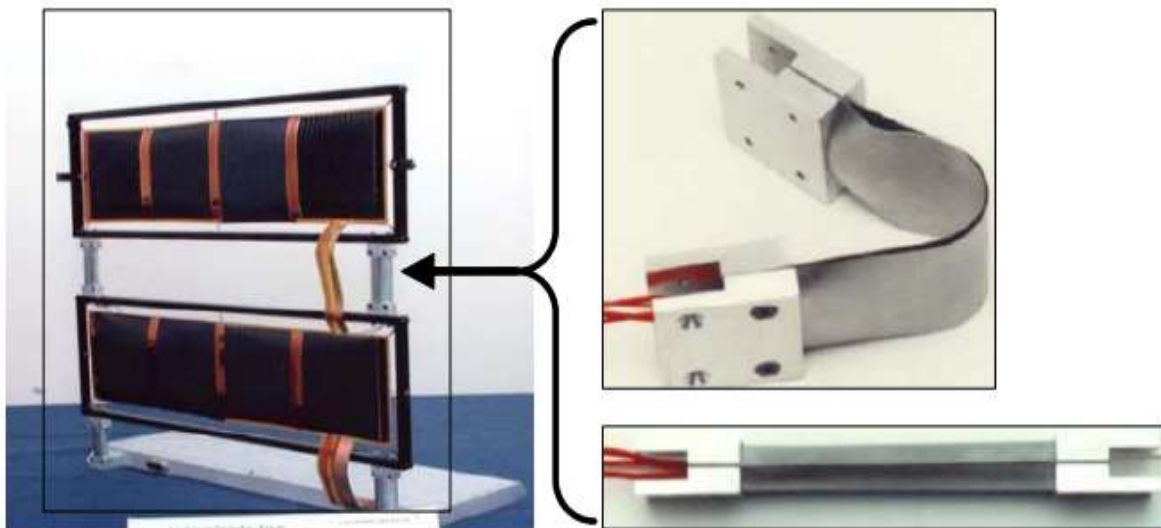
**Slika 10. Spajanje cijevi korištenjem materijala SEPO [8]**

Razine buke prilikom polijetanja i slijetanja zrakoplova sve su strože regulirane u svijetu. Kako bi smanjio razinu buke, američki proizvođač zrakoplova Boeing počeo je izvoditi testove s mlaznim motorima koji imaju ugrađeni valoviti uzorak na kraju mlaznica. Snopovi materijala SEPO pri nižoj brzini i visini leta, odnosno prilikom polijetanja i slijetanja, deformiraju završetke mlaznica prema protoku zraka, miješajući tako zrak i smanjujući buku. Pri većim brzinama leta i većoj nadmorskoj visini materijali SEPO hlade se u martenzitni oblik te izravnavaju, poboljšavajući tako performanse motora. [15 i 16]



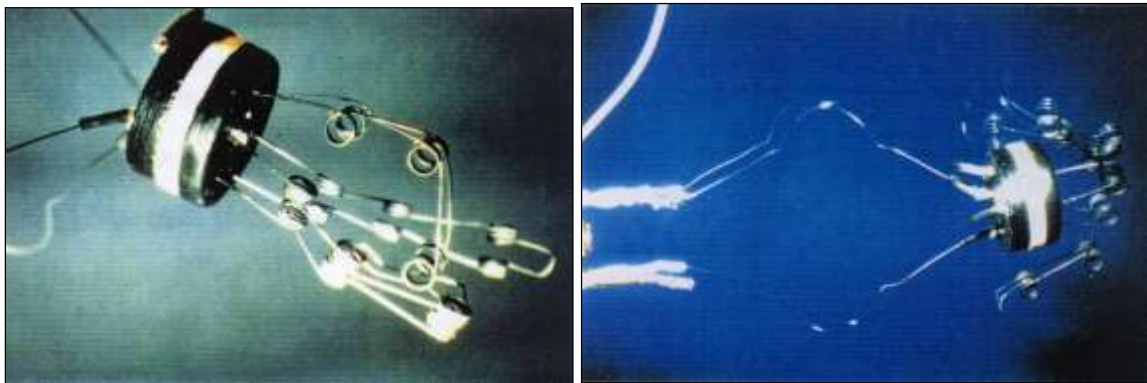
**Slika 11. Valoviti uzorci na krajevima mlaznih motora Boeing aviona [17]**

Karakteristike materijala SEPO koriste se i kod aktivacije solarnih panela. Pomični elementi građeni od materijala SEPO pri zagrijavanju mijenjaju oblik te u roku od oko 30 sekundi otvaraju ranije sklopljene solarne panele. [18] Drukčiji primjer aktivacije panela koristio se na Marsu u sklopu Pathfinder programa. SEPO element korišten je za pomicanje pokrova koji je panel štitio od prašine i tako maksimizirao njegov rad. [19]



**Slika 12. Elementi SEPO korišteni na panelima lake građe [20]**

Na području automatizacije ovi se materijali rabe za izradu različitih funkcionalnih elemenata, primjerice pokretnih dijelova robota, manipulatora ili elemenata za prihvat alata. Zglobovi robota načinjeni od žica NiTi slitine ostvaruju ciljano gibanje na temelju dvosmjerne prisjetljivosti pobuđene promjenom temperature (Slika 13.). Efektom dvosmjerne prisjetljivosti eliminira se potreba za složenim pogonskim mehanizmima (elektromotorni, pneumatski) te povećava pouzdanost, smanjuju dimenzije i masa, a valja napomenuti da se izostavlja i potreba za podmazivanjem. [8] Kako su svi pokreti rezultat izvođenja dvosmjernog efekta, upravljanje hvataljkama provodi se elektrootpornim zagrijavanjem što dovodi do njihovog zatvaranja dok se prekidanjem strujnog kruga žice hlade i vraćaju u početni položaj te se hvataljke otvaraju. Nedostaci ove primjene su energetska neefikasnost, sporo vrijeme reakcije (relativno brzo elektrootporno zagrijavanje, sporije hlađenje) te nedovoljna preciznost pokreta. [19]



**Slika 13. Hvataljke robota dvosmjerne prisjetljivosti [8]**

NiTi slitine sa svojim efektom prisjetljivosti oblika i biokompatibilnosti daju zanimljive mogućnosti u medicini. Biokompatibilni elementi ne smiju izazivati alergijske niti upalne reakcije u tijelu domaćina, a NiTi slitine ispunjavaju taj zahtjev. NiTi slitine upotrebljavaju se u dentalnoj medicini još od 70-ih godina prošlog stoljeća, a razlogu tomu je da su učinkovnije od svojih alternativa. U metalima s linearnom elastičnošću, poput nehrđajućeg čelika, pri porastu deformacije dolazi i do značajnog porasta rasta naprezanja, što rezultira velikom silom na zube pri samo malom korektivnom pomaku. Prednost pseudoelastičnih aparata leži u tome da djeluju u području u kojem pri porastu deformacije gotovo da i ne dolazi do dodatnog povećanja naprezanja. Na taj način pružaju, konstantnu, umjerenu silu na zube kroz dulji period, za razliku od čelika koji često djeluje preagresivno te uzrokuje bol pacijentima. NiTi aparati također ne zahtijevaju dodatno zatezanje. U dentalnoj medicini koriste se i svrdla od materijala SEPO koja mogu izdržati velike kutove savijanja te velik broj okretaja. [19]



**Slika 14. Zubni aparat od NiTi slitine i shematski prikaz svrdla od NiTi slitine u uporabi za operaciju bušenja korijena zuba [19]**

Materijali SEPO mogu se pronaći i u nekim predmetima koji se koriste svakodnevno. U nekim uređajima za kuhanje riže i kave može se pronaći ventil načinjen materijala SEPO koji se aktivira pri određenoj temperaturi. Razvijene su i naočale i slušalice od materijala SEPO koje se mogu značajno deformirati bez pojave pucanja, a i golf palice u kojima SEPO jezgra apsorbira snažan udar pri kontaktu s lopticom. [19]. Na tržištu se već nalaze uređaji koji prekidaju tok tekućine na previsokoj temperaturi i tako sprječavaju opekline od prevruće vode. [21]



**Slika 15. Okvir naočala pod pseudoelastičnim efektom [19]**

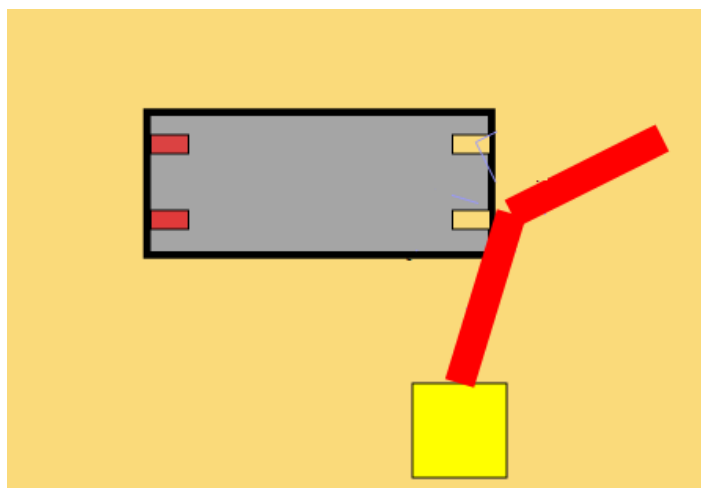
Budućnost uporabe materijala SEPO donosi nove ideje primjene poput uporabe mehaničke energije pri povratku u oblik i pretvaranje te energije u električnu.

## 4. MOGUĆNOSTI NOVIH PRIMJENA MATERIJALA SEPO

Hrvatski željezničko-cestovni prijelazi jedni su od opasnijih u Europi. Postotak poginulih na željezničko-cestovnim prijelazima u odnosu na ukupan postotak poginulih u prometu u Hrvatskoj iznosi oko 2 %, što je značajno više od europskog prosjeka od 1 %. [22] U Hrvatskoj se prosječno godišnje na ukupan broj od oko 1500 željezničko-cestovnih prijelaza dogodi oko 500 izvanrednih događaja, od toga šest ozbiljnih nesreća, a ostatak brojke čine nesreće bez smrtnih ishoda i incidenti, među kojima su najbrojniji lomovi polubranika/branika (oko 450).

Vrlo česti lomovi branika i polubranika problem su za Hrvatske željeznice iz više razloga. Svaki polomljeni branik potrebno je u najkraćem mogućem roku sanirati. Za to je potrebno dovesti radnu snagu i zamijeniti polomljeni branik ili polubranik novim. Taj popravak vrijedan nekoliko tisuća kuna uz trošak nosi i još jedan rizik – za vrijeme dok je branik polomljen, najčešće ne postoji drugo sredstvo regulacije prometa na tom željezničko-cestovnom prijelazu. Svaki daljnji prelazak stoga nosi daleko veću opasnost. S obzirom da je uzrok velike većine polomljenih branika i polubranika nesmotrenost vozača, iza čega slijede vremenske nepogode [23], potrebno je branike i polubranike učiniti izdržljivijim elementima u željezničko-cestovnom sustavu prijelaza.

Prilikom udara vozila u polubranik načinjen od konvencionalnih materijala, branik ne stvara pravi otpor vozilu veće mase čak niti pri manjim brzinama vozila. Branik se neizbježno savija pod udarcem, a iznosi deformacije premašuju iznose koje tradicionalni materijali mogu podnijeti, kao što je prikazano na slici 16.



**Slika 16. Pojednostavnjeni prikaz sudara vozila s konvencionalnim polubranikom**

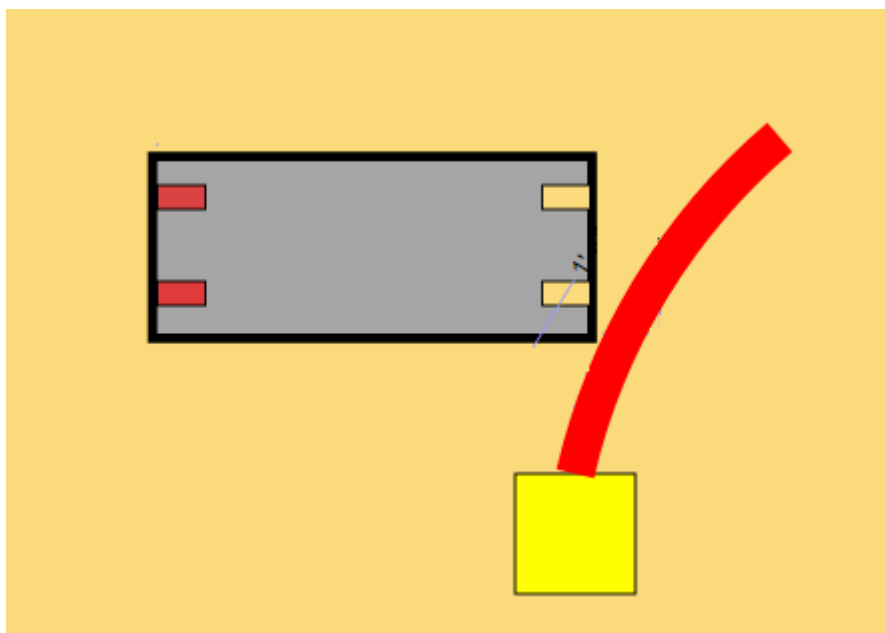
Odlomljeni dijelovi branika također mogu stvarati opasnost na cesti, a i putnicima vozila koje je prelomilo branik.



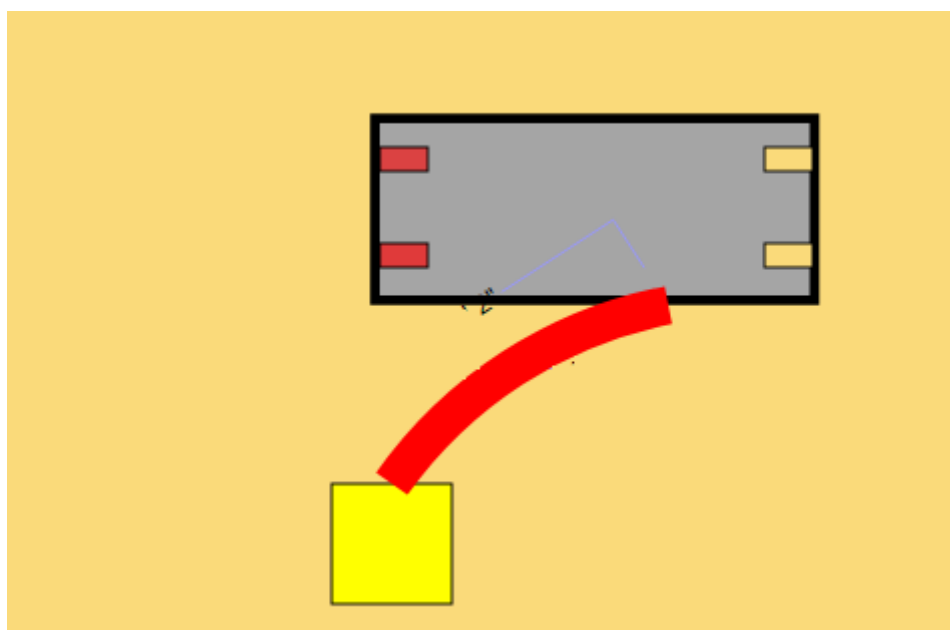
**Slika 17. Opasnost od odlomljenog dijela polubranika [24]**

Izbor materijala SEPO nameće se kao zanimljiv izbor za **proizvodnju polubranika i branika**. Polubranici s pseudoelastičnim značajkama imaju mogućnost pretrpiti znatne deformacije, te nakon prestanka djelovanja naprezanja vratiti se u osnovni oblik. Na slikama 18. i 19. prikazan je sudar vozila s polubranikom od materijala SEPO.





**Slika 18. Pojednostavnjeni prikaz sudara vozila s polubranikom od materijala SEPO**



**Slika 19. Pojednostavnjeni prikaz tijeka sudara s polubranikom od materijala SEPO**

Kao što je prikazano na slikama 18. i 19., materijali s karakteristikom pseudoelastičnosti trpe znatnu deformaciju bez pojave loma, te se nakon prestanka naprezanja vraćaju u izvorni oblik.

Polubranici i branici od materijala SEPO predstavljali bi **značajno veći početni trošak** u odnosu na konvencionalne branike s obzirom na visoku cijenu materijala. Posebna korist od ovakvih branika postojala bi na prijelazima gdje su lomovi iznimno česti, primjerice u Krešimirovoj ulici u Rijeci gdje je u razdoblju od 2013. do 2017. do loma došlo 66 puta. [23]

Osim dugoročne financijske uštede, povećala bi se i sigurnost na prijelazima gdje prometuje najveći broj vozila.

Ipak, za provedbu ovoga prijedloga **nužna su daljnja istraživanja:**

- analiza oštećenja, posebno lomova branika i polubranika u smislu vrste (opsega), mjesta pojavljivanja i učestalosti pojavljivanja
- utvrđivanje kritičnih čvrstoća (uz konzultiranje normi i propisa za branike i polubranike)
- provjera čvrstoće materijala SEPO
- dokazivanje da se materijal SEPO može tehnički i ekonomično primijeniti

## 5. ZAKLJUČAK

Slitine s efektom prisjetljivosti oblika specifična su skupina materijala s mogućnošću oporavka oblika utjecajem temperature ili naprežanja. Svojstvo **reverzibilne martenzitne pretvorbe** jedinstveno je za ovu skupinu materijala, a svaki od tri efekta prisjetljivosti specifičan je te otvara nove mogućnosti inženjerima. Materijali SEPO nisu zamjena za konvencionalne konstrukcijske materijale, već skupina materijala čiji jedinstveni efekt može obavljati određenu funkciju u sustavu.

**NiTi slitine** najčešće su korišteni materijali SEPO, a njihova biokompatibilnost izdvaja ih od ostalih materijala s efektom prisjetljivosti. Materijali SEPO još uvijek su u uporabi gotovo isključivo u razvijenim zemljama, te djelatnostima s najvećim financijskim resursima poput **medicine i zrakoplovne industrije**. Glavni je razlog tome visoka cijena slitina zbog intenzivnog procesa „treninga“ koji je potrebno obaviti nad materijalom kako bi „naučio“ efekt prisjetljivosti.

U radu je **predložena nova mogućnost primjene materijala SEPO za branike i polubranike na željezničko-cestovnim prijelazima**. Novi branici i polubranici na željezničko-cestovnim prijelazima načinjeni od materijala SEPO predstavljali bi bolju alternativu postojećim, kojom bi se pridonijelo financijskim uštedama te poboljšanju sigurnosti. Ipak, za provedbu ovoga prijedloga nužna su daljnja istraživanja.

## 6. LITERATURA

- [1] Jackson C. M., Wagner H. J., Wasilewski R. J., 55-Nitinol—The alloy with a memory: Its physical metallurgy, properties and applications, Tech. Rep. NASA SP-5110, NASA Technology Utilization Office, Washington, D.C. (1972).
- [2] Buehler W. J., Gilfrich J. V., Wiley R. C., Effects of low-temperature phase changes on the mechanical properties of alloys near composition TiNi, *Journal of Applied Physics* 34 (1963) 1475.
- [3] MarketsandMarkets, Shape Memory Alloys Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product, By End Use (Biomedical, Aerospace & Defense, Automotive, Consumer Electronics & Household), By Region, And Segment Forecasts, 2019–2025, 2019.
- [4] Hodgson D.E., Wu M.H., Biermann R.J.: Shape Memory Alloys, 1999, str. 1–8 (<http://www.sma-inc.com>).
- [5] Ivanić I., et al.: Slitine s prisjetljivosti oblika (II. dio): podjela, proizvodnja i primjena, Metalurški fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Sisak, 2013.
- [6] Franz M.: Slitine s efektom prisjetljivosti oblika, Hrvatska akademija znanosti i umjetnosti, Zagreb, 1995, str. 1–14.
- [7] Hornbogen E., Skrotzki B.: Fractality and Reversibility of Ferrous Martensite, *Steel Research* 63 (1992) 8, str. 348–353
- [8] Hornbogen E.: Legierungen mit Formgedächtnis, Westdeutscher Verlag, Opladen, 1991
- [9] Hornbogen E.: Reversibility and Hysteresis of Martensitic Transformations, *Phys. Stat. Sol.* (b) 172 (1992), str. 161–172
- [10] Hornbogen E., Jost N.: Alloys of Iron and Reversibility of Martensitic Transformations, European Symposium on Martensitic Transformation and Shape Memory Properties, *Journal de Physique IV* (1991) 1, str. C4-199 do C4-210
- [11] Čorić D., Franz M.: Study of Martensitic - Austenitic Transformation in Cu-Shape Memory Alloys, *Transactions of Famena*, Vol. 26, No. 1, Zagreb (2002), str. 33–42

- [12] Sun L., Huang W. M., Ding Z., Zhao Y., Wang C. C., Purnawali H., Tang C., Stimulus-responsive shape memory materials: A review, *Materials and Design* 33 (2012) 577–640, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2011.04.065>.
- [13] Stalmans R., Humbeeck J. van: *Shape Memory Alloys: Functional and Smart, Smart Materials and Technologies - Sensors, Control Systems and Regulators*, Prag (Češka), 1995, str. 1–7
- [14] Hornbogen E.: *Legierungen mit Formgedächtnis - Neue Werkstoffe für die Technik der Zukunft*, *Metall* 41(5), 1987.
- [15] Melton K. R., General applications of shape memory alloys and smart materials, in: K. Otsuka, C. M. Wayman (Eds.), *Shape Memory Materials*, Cambridge University Press, Cambridge, 1999, Ch. 10, pp. 220–239.
- [16] Mabe J., Cabell R., Butler G., Design and control of a morphing chevron for takeoff and cruise noise reduction, in: *Proceedings of the 26th Annual AIAA Aeroacoustics Conference*, Monterey, CA, 2005, pp. 1–15
- [17] Mabe J. H., Calkins F., Butler G., Boeing's variable geometry chevron, morphing aerostructure for jet noise reduction, in: *47th AIAA/ ASME / ASCE / AHS / ASC Structures, Structural Dynamic*
- [18] Birman V., Review of mechanics of shape memory alloy structures, *Applied Mechanics Reviews* 50 (11) (1997) 629–645.
- [19] Lagoudas D. C., *Shape Memory Alloys Modeling and Engineering Applications*, 2008, str. 5–58.
- [20] Carpenter B., Lyons J., EO-1 technology validation report: Lightweight flexible solar array experiment, Tech. rep., NASA Godard Space Flight Center, Greenbelt, MD (8 August 2001).
- [21] Roy, B. N., Future of shape memory alloy and its utilization, Metallurgical Engineering Department, B.I.T. Sindri, Dhanbad, India, 2016.
- [22] Badanjak D., Barić D., Novačko L., Current safety situation at level crossings in Croatia and the future research, University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences, Croatia, 2009.
- [23] Knežević J., Belančić M., Analiza stanja sigurnosti na željezničko-cestovnim prijelazima u Primorsko-goranskoj županiji, časopis *Željeznice* 21, godina 17, broj 2/2018
- [24] <https://www.carscoops.com/tag/mazda-323/>, pristupljeno: 2021-09-20