

NOVI POLIGONALNI HISTEREZISNI MODEL ZA SIMULIRANJE EFEKTA SUPERELASTIČNOSTI LEGURA SA SVOJSTVOM PAMĆENJA OBLIKA

NEW POLYGONAL HYSTERETIC MODEL FOR SIMULATION OF SUPERELASTICITY EFFECT OF SHAPE MEMORY ALLOYS

Koce *TODOROV*
Svetlana *PETKOVSKA ONCEVSKA*

ORIGINALNI NAUČNI RAD
ORIGINAL SCIENTIFIC PAPER
UDK: 669.018.27 = 861

1 UVOD

Legure koje pamte oblik pripadaju grupi inteligentnih materijala s velikim potencijalom za primenu u inteligentnim konstrukcijama i sistemima [2,11]. Efekti pamćenja oblika i efekat superelastičnosti čine ove materijale različitim od ostalih materijala koji se primenjuju u inženjerskoj praksi. Ovi neuobičajeni makroskopski efekti, koji su rezultat promene kristalne strukture materijala, prouzrokovani su martiniznom i reverzibilnom (povratnom) transformacijom.

Pomenuti makroskopski efekti registrovani su kod legura različitog sastava. Prema svojoj komercijalnoj primeni, legure sa svojstvom pamćenja oblika dele se na tri grupe: legure s komercijalnom primenom i serijskom proizvodnjom (Ni-Ti; Ni-Ti-Cu; Cu-Zn-Al), legure koje su na pragu komercijalne proizvodnje (Cu-Al-Ni; Fe-Mn-Si) i legure koje, pored obavljenih naučnih istraživanja, ispoljavaju određeni potencijal za primenu, ali se karakterišu velikom krutošću odnosno njihova proizvodnja je prilično teška (Ni-Al; Ni-Ti-Zn) [9]. Nikl-titanijumske legure ispoljavaju mnoge prednosti koje doprinose tome da se one najčešće koriste u komercijalne svrhe. Ove legure poseduju sposobnost pamćenja velikog procenta povratnih dilatacija (i do 8%). One su stabilne pri cikličkom tretmanu s termičkim i mehaničkim opterećivanjem, imaju izvanrednu otpornost na koroziju i veliku duktilnost. Legure bakra, u poređenju s nikl-titanijumskim legurama, ispoljavaju manju sposobnost za povratne deformacije (od 4 do 6%) i imaju smanjenu otpornost na koroziju, ali zbog niske cene

1 INTRODUCTION

Shape memory alloys belong to the group of intelligent materials with a high potential of application to intelligent structures and systems [2, 11]. The shape memory effect and the effect of super elasticity make these materials different from the remaining materials that are applied in engineering practice. These unusual macroscopic effects are the result of the change of the crystal structure of the material, caused by martensite and reversible transformation.

These macroscopic effects have been observed at different alloys composition. According to their commercial use, shape memory alloys are divided into the three main groups: alloys that are commercially used and produced in assembly line production (Ni-Ti; Ni-Ti-Cu; Cu-Zn-Al), alloys that are on the threshold of commercial production (Cu-Al-Ni; Fe-Mn-Si) and alloys that, according to the performed scientific research, show a certain potential for use but are characterized by either great brittleness or quite difficult production (Ni-Al; Ni-Ti-Zn) [9]. Nickel-titanium alloys exhibit a great number of superior characteristics that contribute to their most frequent commercial use. These alloys have the ability of memorizing a high percentage (even up to 8%) of reversible strains. They are stable under cyclic treatment with thermal and mechanical loads, highly resistant to corrosion and characterise with a great ductility. Copper based alloys compared with the nickel-titanium ones show lower capability regarding reversible strains (4 to 6%) and are less resistant to corrosion, but

Asist., mr, Univerzitet Sv. Ćirilo i Metodije, Građevinski fakultet, Skoplje, R. Makedonija, todorov@gf.ukim.edu.mk
Prof. dr, Univerzitet Sv. Ćirilo i Metodije, Građevinski fakultet, Skoplje, R. Makedonija, once@gf.ukim.edu.mk

Assistant, M.Sc. University Ss. Cyril and Methodius, Faculty of Civil Engineering, Skopje, R. Macedonia, todorov@gf.ukim.edu.mk
Prof. Dr. University Ss. Cyril and Methodius, Faculty of Civil Engineering, Skopje, R. Macedonia, once@gf.ukim.edu.mk

proizvodnje, konvencionalnog metalurgijskog procesa proizvodnje i širokog opsega transformacijskih temperatura sve više se zamenjuju Ni-Ti legurama za određene primene.

Legure koje pamte oblik predstavljaju relativno novu grupu materijala, čija se primena u građevinarstvu, kao jedne od najkonzervativnijih oblasti u tehnici, postepeno nameće u poslednjih deset godina, uz najnovije spoznaje iz istraživanja u ovoj oblasti [4, 5, 7 i 13]. Jedinstvene karakteristike SMA – kao što su veliki kapacitet prigušenja, mogućnost velikih povratnih napona i dilatacija, sposobnost samocentrisanja i izvanredna otpornost na koroziju – čine ove materijale pogodne za primenu u sistemima pasivnog i aktivnog upravljanja konstrukcijom, kao inteligentna sredstva za vezivanje s pobuđivačima, senzorima, kao materijali za prednaprezanje i spoljašnje pritezanje, materijali koji se koriste za sanacije itd.

2 OSNOVNA SVOJSTVA LEGURA SA SVOJSTVOM PAMĆENJA OBLIKA

Termin *Shape memory alloys* – SMA objedinjuje grupu metala sa sposobnošću vraćanja na prethodno definisane forme – oblik ili geometrije, kada su izloženi određenom termomehaničkom tretmanu. Na mikronivou, materijal menja mikrostrukturu. Na makronivou, to se odlikava preko dva karakteristična efekta: efekta pamćenja oblika i efekta superelastičnosti. Zavisno od kristalne strukture, legura koje pamti oblik može povratiti zaostale – plastične deformacije ako se posle rasterećenja izlaže procesu zagrevanja (efekat jednosmernog pamćenja oblika) posle resterećenja, ili se može vratiti na prvobitni nedeformisani oblik u procesu opterećenja i rasterećenja, iako je prethodno doživela relativno velike nelinearne deformacije (nekad i do 18%).

2.1 Kristalografska struktura i fazna transformacija

Legure koje pamte oblik, u zavisnosti od stanja kristalne strukture, može da se sretne u dve različite stabilne faze: austenitna i martenzitna. Karakteristično, austenitna faza je stabilna na niskim temperaturama i pri niskim naponima, dok je martenzitna faza stabilna na niskim temperaturama i pri visokim naponima. Osim toga, martenzitna faza može se sresti u dve različite varijante: sjedinjene ili razdvojene martenzitne faze (*twinned, detwinned martensite*). S druge strane, austenitna faza zauzima samo jednu formu, uz težnju da postane čvršća i jača. Fazna promena ovih legura dešava se kada se materijal nalazi u čvrstoj fazi, odnosno pri temperaturi koja je znatno niža od tačke topljenja materijala. Iz tog aspekta, fazna transformacija uobičajeno se naziva transformacija od tvrde do tvrde (*solid-to-solid transformation*).

Na relativno visokim temperaturama, legura koja pamti oblik je u austenitnoj fazi, koju karakteriše kubna kristalna struktura, pri čemu svaki atom pamti susedni. Sa hlađenjem, kristalna rešetka se transformiše u sjedinjene martenzitne s monokliničnom kristalnom strukturom. Promena kristalne strukture iz austenitne u martenzitnu fazu jeste takozvana martenzitna transformacija. Pošto je željeni oblik definisan kada je materijal u austenitnoj fazi, ova faza često se smatra

due to the lower cost of production, the conventional metallurgic process of production and wide range of transformation temperatures, they are increasingly replacing the Ni-Ti alloys in certain applications.

Shape memory alloys represent a relatively new group of materials, whose application in civil engineering, as one of the most conservative engineering fields, has gradually been imposed for the last ten years, following the latest knowledge gained from the investigations in this field [4, 5, 7, and 13]. The unique characteristics of SMA: high damping capacity, high level of stress and strains recovery, re-centring capabilities, and high corrosion resistance make these materials appropriate for application in systems for passive and active structural control, as smart connectors, actuators, sensors, as materials for prestressing and external posttensioning, materials for retrofit applications, etc.

2 BASICS OF SHAPE MEMORY ALLOYS

The term shape memory alloys - SMA refers to a group of metallic materials, which have the ability to return to their predefined form, shape or geometry if exposed to an appropriate thermo-mechanical treatment. At micro level, the material changes its crystal lattice. At macro level, this is reflected by two characteristic effects: the shape memory effect and the effect of superelasticity. Depending on the state of the crystal structure, shape memory alloys can recover residual plastic deformations if subjected to a heating process (one-way shape memory effect) after unloading, or can return to the initial shape in the process of loading and unloading despite the previously experienced relatively large (sometimes up to 18%) nonlinear deformations.

2.1 Crystallographic structure and phase transformation

Depending on the state of the crystal structure, shape memory alloys can be found in two different stable phases: austenite and martensite. Typically, the austenite phase is stable at high temperatures and low stresses while the martensite phase is stable at low temperatures and under high stresses. Moreover, the martensite phase can be found in two different variants: twinned or detwinned martensite. On the other hand, the austenite phase only takes on a single form and tends to be harder and stronger. Phase transformation of these alloys occurs at solid state of the material, i.e., at a temperature, which is quite lower than the melting point of the material. For this reason, phase transformation is usually called solid-to-solid transformation.

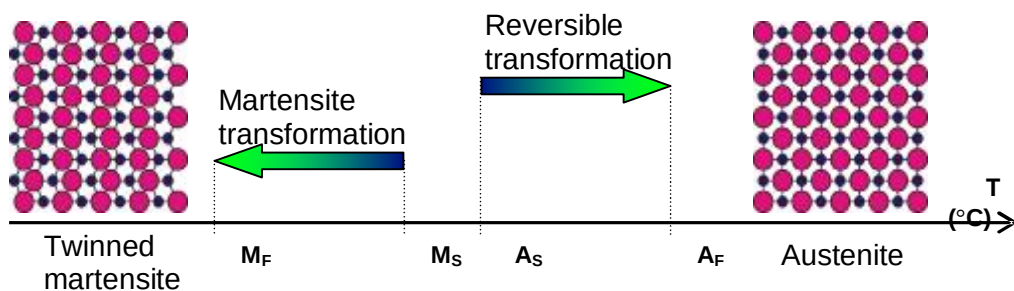
At relatively high temperatures, a shape memory alloy is in its austenite phase, characterized by a cubic crystal structure, whereat each atom remembers its neighbour. With cooling, the crystal lattice is transformed into twinned martensite with monoclinic crystal structure. The change of the crystal structure from austenite to martensite phase is called martensite transformation. Since the desired shape is defined when the material is in the austenite phase, this phase is often referred to as the natural stage. The transformation from austenite to martensite phase occurs through a displacive process,

prirodnim stanjem. Transformacija austenitne u martenzitnu fazu javlja se zbog proklizavanja koje ipak ne podrazumeva makroskopske promene oblika uzorka (9).

Martenzitna transformacija može biti uzrokovana promenom temperature (hlađenje), ili nanošenjem spoljašnjeg opterećenja (promena unutrašnjih napona). Ako se posle završetka martenzitne transformacije poveća temperatura, martenzitna faza postaje nestabilna. Ova pojava rezultira vraćanjem kristalne rešetke u prirodnu fazu, odnosno u originalnu konfiguraciju. To se naziva reverzibilna (povratna) transformacija. (sl.1).

which does not imply, however, macroscopic changes in the shape of the specimen [9].

Martensite transformation can be induced by the change of temperature (cooling) or application of an external load (change of internal stresses). If there is a temperature increase after the completion of the martensite transformation, the martensite phase becomes unstable. This results in the return of crystal lattice into its natural phase, i.e. original configuration. This process is called reversible transformation, Fig.1.



Slika 1. Šematski prikaz martenzitne i reverzibilne transformacije
Figure 1. Schematic presentation of martensite and reversible transformation

Legura koja pamti oblik u nenapregnutom stanju, karakteriše se sa četiri temperature transformacije: temperatura početka martenzitne transformacije M_S (struktura materijala počinje da se transformiše iz austenitne u martenzitnu fazu), temperatura na kraju martenzitne transformacije M_F (celokupna struktura se nalazi u martenzitnoj fazi), temperatura početka reverzibilne transformacije A_S (struktura materijala počinje da se transformiše iz martenzitne u austenitnu fazu) i temperatura na kraju reverzibilne transformacije A_F (cela struktura je u austenitnoj fazi).

Temperatura transformacije, koja može biti u prilično širokom opsegu, pretežno zavisi od sastava (kompozicije) i proizvodnje legure, ali može biti zavisna i od drugih faktora kao što su atomski red, unutrašnji naponi, defekti u kristalnoj rešetki, itd.

In a stress-free state, a SMA is characterized by four transformation temperatures: the temperatures at the start of the martensite transformation M_S , (the material structure starts to transform from austenite to martensite), the temperatures at the completion of the martensite transformation M_F (the whole structure is in the martensite phase), the temperature at the start of the reversible transformation A_S (the material structure starts to transform from martensite to austenite) and the temperatures at the completion of the reversible transformation A_F (the whole structure is in the austenite phase).

The temperatures of transformation, that can range quite widely, mainly depend on the composition and processing of the alloy, but also on other factors such as the atomic order, internal stresses, defects in crystal lattice, etc.

2.2 Termomehaničko ponašanje

Kao rezultat termoelastične martenzitne transformacije, zavisnost napon–dilatacija kod legura s pomćenjem oblika jeste nelinearna. Pored toga, ona je histerezisna i s velikim kapacitetom povratnih nelinearnih deformacija. Na makroskopskom nivou, transformacija kristalne strukture, kao mikroskopska pojava, ispoljava se preko dva efekta, koji su karakteristični samo za materijale koji pamte oblik. To su efekat superelastičnosti i efekat pamćenja oblika.

2.2.1 Efekat superelastičnosti

Efekat superelastičnosti se javlja ako se kristalna struktura materijala nalazi u austenitnoj fazi. Martenzitna transformacija može biti inicirana ili promenom

2.2 Thermo-mechanical behaviour

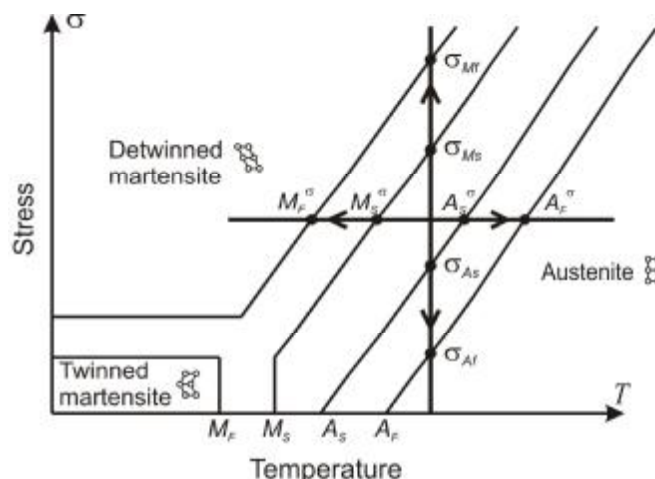
As a result of the thermo-elastic martensite transformation, the stress-strain relationship of shape memory alloys is nonlinear, hysteretic and with a great ability for reversible nonlinear deformations. At macroscopic level, the transformation of the crystal structure as a microscopic phenomenon is reflected through two effects that characterize shape memory materials. These are: effect of superelasticity and the shape memory effect.

2.2.1 Effect of superelasticity

The superelastic effect takes place when the crystal structure of the material is in the austenite phase. The

unutrašnjih napona pri konstantnoj temperaturi (izotermalni proces), ili s promenom temperature za konstantan nivo unutrašnjeg naprezanja (izobarni proces), što je prikazano na sl. 2.

martensite transformation can be initiated either by the change of internal stresses at constant temperature (isothermal process) or by the change of temperature at constant level of internal stresses (isobaric process), Fig. 2.



Slika 2. Šematski prikaz faze promena za izobarnu i izotermalnu martenzitnu transformaciju
Figure 2. Schematic presentation of phase change at isobaric and isothermal martensite transformation

U izotermalnom procesu, martenzitna transformacija počinje u momentu kada intenzitet spoljašnjih napona dostigne vrednost σ_{Ms} , a kompletno se završava s naprezanjem σ_{Mf} . Za ovakvu transformaciju, struktura materijala prelazi u razdvojenu (*detwined*) martenzitnu varijaciju. Ukoliko se u ovom stanju materijal rasterećuje, za napon σ_{As} počinje transformacija iz martenzitne u austenitnu fazu koja se završava pri naponu σ_{Af} . Za kompletno rasterećenje materijala, zbog promena unutrašnje strukture gube se sve deformacije koje su se dogodile – materijal se vraća u početno, nedeformisano stanje. Zavisnost napon-dilatacija za superelastično ponašanje aksijalno napregnutog elementa u austenitnoj fazi, prikazana je na sl. 3. a.

U procesu opterećivanja i rasterećenja, zbog razlike između napona σ_{Mf} i σ_{As} , kao i između napona σ_{Ms} i σ_{Af} , nivo napona pri prelasku iz martenzitne u austenitnu fazu ($\sigma_{As} \rightarrow \sigma_{Af}$) manji je od nivoa napona koji odgovaraju prelasku iz austenitne u martenzitnu fazu ($\sigma_{Ms} \rightarrow \sigma_{Mf}$), pri čemu se javlja razlika u deformacijama energije za opterećivanje i rasterećivanje. Ova dovodi do formiranja histerezisnog efekta u kojem se disipira određena količina ulazne energije bez pojava zaostalih plastičnih deformacija. Intenzitet temperature pri opterećenju i rasterećenju utiče na intenzitet napona transformacije, međutim, forma histerezisnih petlji u principu se ne menja.

Efekat superelastičnosti može biti prouzrokovan promenom unutrašnje temperature materijala za konstantni nivo unutrašnjih napona. Ukoliko se materijal nalazi u austenitnoj fazi i izloži se konstantnom naponu, manjem od napona na početku martenzitne transformacije, tada će se on još uvek nalaziti u austenitnoj fazi. Ako u ovom stanju počne smanjivanje temperature, u stanju kada unutrašnja temperatura dostigne vrednost M_S^σ , dolazi do termički inicirane

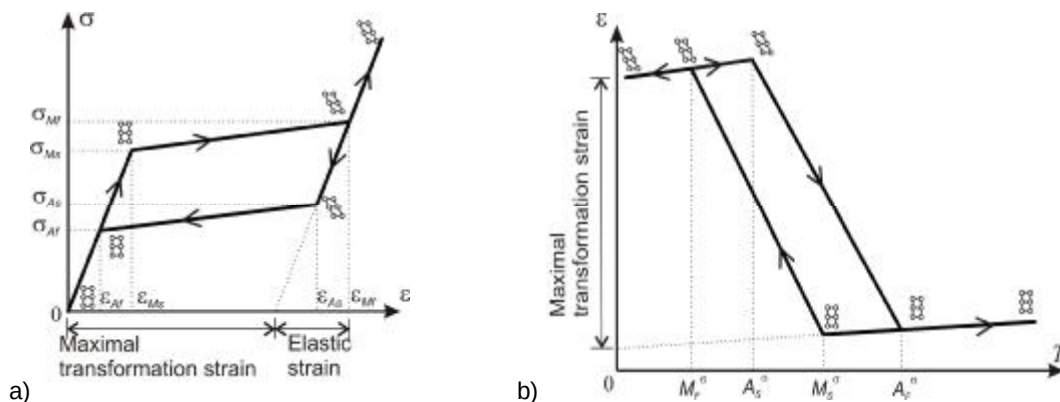
In an isothermal process, the martensite transformation starts at the moment when the intensity of internal stresses reaches the value of σ_{Ms} , and is completely finished at stress σ_{Mf} . At such transformation, the structure of the material gets into detwinned martensite variation. If, in this state, the material is unloaded, at stress σ_{As} , there starts the transformation from martensite to austenite phase that ends at stress σ_{Af} . At complete unloading of the material, due to the change of the inner structure, all the experienced deformations are lost and the material returns to the initial non-deformed state. The stress-strain relationship during superelastic behaviour of an axially loaded element in the austenite phase is shown in Fig. 3a.

In the process of loading and unloading, due to the difference between stresses σ_{Mf} and σ_{As} , as well as between stresses σ_{Ms} and σ_{Af} , the level of stress at the transition from the martensite to the austenite phase ($\sigma_{As} \rightarrow \sigma_{Af}$) is lower than the stress level at the transition from the austenite to the martensite phase ($\sigma_{Ms} \rightarrow \sigma_{Mf}$), whereat there occurs a difference in the deformation energy for loading and unloading. This leads to a hysteretic effect during which a certain quantity of input energy is dissipated without occurrence of residual plastic deformations. The temperature intensity at loading and unloading has an influence upon the intensity of the transformation stresses; however the form of the hysteretic loop does not change, in principle.

The effect of superelasticity can also be caused by the change of the inner temperature of material at constant level of internal stresses. If the material is in the austenite phase and is exposed to constant stress, which is lower than the stress at the beginning of the martensite transformation, then it will still be in the austenite phase. If in this state, there starts a decrease in temperature, a thermally initiated martensite

martenzitne transformacije. Martenzitna transformacija i u tom slučaju karakteriše se razvojem velikih makroskopskih dilatacija transformacija, čiji razvoj se završava kada temperatura dostigne vrednost M_F^σ . Kasnije hlađenje na temperaturama nižim od temperature na kraju martenzitne transformacije, dovodi samo do pojave termoelastičnih dilatacija skupljanja, proporcionalnih koeficijentu linearnog širenja/skupljanja materijala u martenzitoj fazi. Dilatacije transformacije nekoliko desetina puta su veće od termoelastičnih deformacija za istu temperaturnu razliku. Za povećanje temperature, dok dostigne temperaturu početka reverzibilne transformacije A_S^σ , nastaju termoelastične dilatacije širenja. Posle prekoračenja ovih temperatura, počinje proces reverzibilne transformacije koja se reflektuje razvojem transformacionih dilatacija skupljanja koje se završavaju na temperaturi A_F^σ (sl. 3.b).

transformation will take place in conditions when the inner temperature reaches the value of M_S^σ . Also in this case, the martensite transformation is characterized by the development of large macroscopic deformation strains, whose development ends when the temperature reaches the value of M_F^σ . Further cooling temperatures lower than the temperature at the end of the martensite transformation leads only to occurrence of thermo-elastic shrinkage strains that are proportional to the coefficient of linear spreading/shrinkage of the material in the martensite phase. The transformation strains are several tens of times higher than the thermo-elastic deformations for the same temperature difference. At increase of temperature up to the achievement of the temperature at the beginning of the reversible transformations A_S^σ , thermo-elastic expansion strains take place. After the exceeding of such temperature, there starts the process of reversible transformation, which is reflected through the development of transformation shrinkage strains that end at temperature of A_F^σ , Fig. 3.b.



Slika 3. Karakteristični dijagrami: a) napon-dilatacija za izotermalni i b) dilatacija-temperatura za izobarni proces superelastičog ponašanja

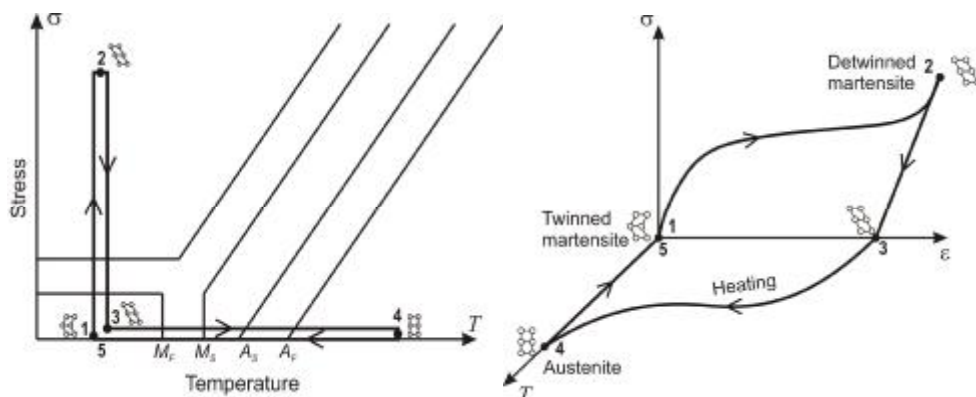
Figure 3. Characteristic diagrams: a) stress-strain at isothermal process and, b) strain-temperature at isobaric process of superelastic behavior

2.2.2 Efekat promene oblika

Efekat promene oblika se javlja kada se materijal na radnoj temperaturi nalazi u martenzitoj fazi. Ukoliko se u ovom stanju on napregne do određenog nivoa, slično kao i kod ostalih duktilnih materijala, dolazi do pojave plastičnih deformacija koje ostaju i posle kompletnog rasterećenja. Karakteristično za legure s pamćenjem oblika jeste to što ukoliko se u ovako deformiranom nenepregnutom stanju materijal izlaže termičkom tretmanu s povećanjem temperature, menja se njegova unutrašnja struktura i iz martenzitne prelazi u austenitnu fazu. Ovaj prelaz karakteriše se potpunom reverzibilnošću (povratnošću) zaostalih plastičnih deformacija, koja se zadržava i posle ponovnog hlađenja, odnosno transformacije iz austenitne u martenzitu fazu (sl. 4). Proces pri kojem materijal pamt svoju prirodnu formu u austenitnoj fazi poznat je kako jednosmeran efekat pamćenja oblika.

2.2.2 Shape memory effect

The shape memory effect takes place when the material is in the martensite phase under working temperature. If, in this state, it is stressed to a certain level, similar to the remaining ductile materials, the material suffers plastic deformations that remain even after complete unloading. For the shape memory alloys, it is characteristic that, if in such deformed non-stressed state, the material is exposed to thermal treatment by increase of temperature, its inner structure changes from martensite to austenite phase. Such transition is characterized by complete reversibility of the residual plastic deformations, which is maintained also after re-cooling, i.e., transition from austenite to martensite phase, Fig. 4. The process during which the material memorizes its natural form in the austenite phase is referred to as one-way shape memory effect.



Slika 4. Fazna promena i karakteristični dijagram napon–dilatacija pri pojavi efekta pamćenja oblika
Figure 4. Phase change and characteristic stress-strain diagram at the occurrence of shape memory effect

Uzrok pojave efekta pamćenja oblika jeste termoelastična martenzitna transformacija kristalne strukture. Naime, pri smanjenju temperature, kristalna struktura transformiše se iz austenitne (prirodne faze) u spregnutu (*twined*), martenzitu fazu, pri čemu se na makroskopskom nivou u materijalu ne beleže nikakve značajne promene. S mikroskopskog gledišta, pri martenzitoj transformaciji, slobodne površine materijala formiraju fine reljefne strukture. Ukoliko se pri ovakvom stanju materijal deformiše (zatezanje, pritisak, savijanje, torzija), kristalna struktura prelazi u razdvojenu (*detwined*) martenzitu varijaciju i kod materijala se javlja vidljiva deformacija koja ostaje i posle prestanka dejstva spoljašnjeg opterećenja.

3 POLIGONALNI HISTEREZISNI MODEL ZA SIMULIRANJE EFEKTA SUPERELASTIČNOSTI

Važan preduslov za uvođenje legura sa svojstvom pamćenja oblika u proces projektovanja jeste razvoj konstitutivnih modela kojima se reprodukuje složeno makroskopsko ponašanje materijala. Iako se u literaturi mogu pronaći brojni materijalni modeli kojima se uspešno simulira ponašanje legura koje pamte oblik pri dejstvu cikličnog opterećenja [1, 3, 10], deo njih može biti dosta složen i težak za implementaciju u postojeće kompjuterske kodove. S tim ciljem, razvijen je novi histerezisni model za opisivanje efekata superelastičnosti pri cikličnom aksijalnom opterećenju [12]. Saglasno svojoj prirodi, ovaj model svrstava se u grupu poligonalnih histerezisnih modela s promenljivom tangentnom krutošću.

Definisani model omogućuje zadovoljavajuće simulacije procesa cikličnog opterećenja i rasterećenja zategnutog elementa. U modelu je pretpostavljeno da je negativna grana, kojom se definiše ponašanje na pritisak, simetrična s pozitivnom, pri čemu se za njeno opisivanje koriste iste materijalne konstante. Ukoliko se eksperimentalnim ispitivanjem pokaže da su karakteristične vrednosti na pritisak različite od vrednosti pri zatezanju, moguće je definisanje asimetrične histerezisne petlje uz primenu istih konstitutivnih relacija. Naravno, s tim ciljem potrebno je definisanje sedam novih materijalnih konstanti koje važe za pritisnuti deo.

The reason for the occurrence of the shape memory effect is in the thermo-elastic martensite transformation of the crystal structure. Namely, in the case of the decrease of temperature, the crystal structure is transformed from austenite (natural phase) to „twinned“ martensite phase, whereat the material does not suffer any significant change at macroscopic level. From microscopic viewpoint, during the martensite transformation, a fine relief structure is formed on the free surface of the material. If in such state, the material is deformed (tension, compression, bending, torsion), the crystal structure passes over to a „detwinned“ martensite variation whereat the material undergoes visible deformations that remain even after termination of the external load effect.

3 POLYGONAL HYSTERETIC MODEL FOR SIMULATION OF SUPERELASTICITY EFFECT

An important prerequisite for the introduction of shape memory alloys in the design process is the development of constitutive models able to reproduce the complex material macroscopic behaviour. Although in literature there are a large number of material models that successfully simulate the behaviour of shape memory alloys under the effect of cyclic loads [1, 3, 10], some of them can be quite complex and difficult for implementation in the existing computer codes. For that purpose, a new hysteretic model has been developed to describe the superelasticity effect under cyclic axial loads [12]. According to its nature, this model belongs to the group of polygonal hysteretic models with variable tangent stiffness.

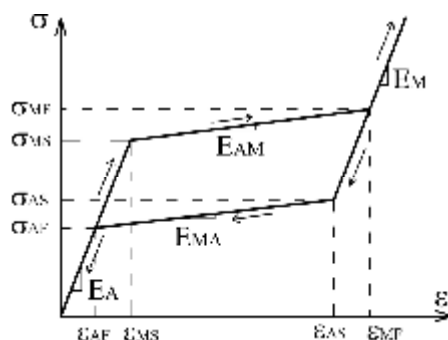
The defined model enables a satisfying simulation of the process of cyclic loading and unloading of tensile elements. In the model, it is assumed that the negative branch, which defines the behaviour under compression, is symmetrical with the positive one, whereat the same material constants are used for its description. If the corresponding experimental investigation proves that the characteristic values under compression are different from the values under tension, it is possible to define an asymmetric hysteretic loop by application of the same constitutive laws. Certainly, for that purpose, it will be necessary to define seven new material constants that will hold for the part referring to compression.

3.1 Definicija materijalnih modela

Opisivanje zavisnosti napon–dilatacija u predloženom materijalnom modelu zasniva se na sedam materijalnih konstanti, dobijenih eksperimentalnim ispitivanjem (sl. 5).

3.1 Definition of material model

The description of the stress-strain relationship in the proposed material model is based on material constants obtained by experimental tests, Fig. 5.



Slika 5. Zavisnost napon–dilatacija pri superelastičnom ponašanju
Figure 5. Stress-strain relationship at superelastic behaviour

Ulazni parametri za definisanje materijalnih modela jesu dva karakteristična modula elastičnosti u austenitnoj i martenzitnoj fazi E_A i E_M , četiri transformaciona napona: napon na početku i na kraju martenzitne transformacije σ_{MS} i σ_{MF} , naponi na početku i na kraju austenitne transformacije σ_{AS} i σ_{AF} , i dilatacije pri kraju martenzitne transformacije ϵ_{MF} .

Ostali parametri potrebni za definisanje zavisnosti napon–dilatacija, modul transformacije, dilatacije na početku martenzitne i reverzibilne transformacije i dilatacije na kraju austenitne transformacije, mogu se izračunati pomoću prethodno definisanih konstanti:

Input parameters for definition of the material model are the two characteristic modulus of elasticity in the austenite and martensite phase E_A and E_M , the four transformation stresses: the stresses at the beginning and at the end of the martensite transformation σ_{MS} and σ_{MF} , the stresses at the beginning and at the end of the austenite transformation σ_{AS} and σ_{AF} , and the strain at the end of the martensite transformation ϵ_{MF} .

The remaining parameters that are necessary for definition of the stress-strain relationship, the modulus of transformation, the strains at the beginning of the martensite and reversible transformation and the strain at the end of the austenite transformation, can be computed by means of the previously defined constants:

$$E_{AM} = \frac{\sigma_{MF} - \sigma_{MS}}{\epsilon_{MF} - \epsilon_{MS}}; \quad E_{MA} = \frac{\sigma_{AS} - \sigma_{AF}}{\epsilon_{AS} - \epsilon_{AF}} \quad (1)$$

$$\epsilon_{MS} = \frac{\sigma_{MS}}{E_A}; \quad \epsilon_{AS} = \epsilon_{MF} - \frac{\sigma_{MF} - \sigma_{AS}}{E_M}; \quad \epsilon_{AF} = \frac{\sigma_{AF}}{E_A} \quad (2)$$

Veza između napona i dilatacija u predloženom modelu definisana je promenom tangentskog modula elastičnosti za postupak cikličnog opterećivanja s kontrolom deformacija. To podrazumeva da je istorija promene dilatacija poznata, a potrebno je da se dobije istorija promene napona. Prirast dilatacija jednak je razlici dilatacija dva susedna koraka.

The stress-strain relationship in the proposed model is defined by the variation of the tangential modulus of elasticity for the procedure of cyclic loading at control of deformations. This means that the history of variation of strains is known and it is necessary to obtain the history of variation of stresses. The increase of strains is equal to the difference of strains in two successive steps.

$$De = e_i - e_{i-1} \quad (3)$$

Ako je ova vrednost pozitivna, registruje se opterećivanje, dok se u suprotnom registruje – rasterećivanje.

If this value is positive, a loading process occurs. In the opposite case, there is an unloading process.

Prirast napona dobija se kao proizvod tangentskog modula elastičnosti i prirasta dilatacija, dok će se vrednost napona dobiti ukoliko se na prethodnu vrednost napona doda proračunati prirast:

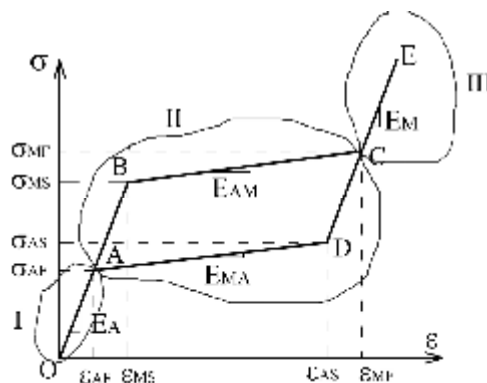
The increase of stresses is obtained as a product of the tangential modulus of elasticity and the strain increase, while the stress value is obtained by adding the computed increase to the previous stress value.

$$Ds = E_T \times De \quad (4)$$

$$s_i = s_{i-1} + Ds \quad (5)$$

Na taj način, problem opisivanja zavisnosti napon–dilatacija svodi se na određivanje trenutnog tangentialnog modula elastičnosti. Radi njegovog lakšeg definisanja, zavisnost napon–dilatacija podeljena je na tri grane (sl. 6), pri čemu je tangentialna krutost svakog od njih definisana odgovarajućim relacijama.

Thus, the problem of describing the stress-strain relationship is reduced to defining the current tangential modulus of elasticity. Due to its easier definition, the stress-strain relationship is divided into three branches, Fig. 6, whereat the tangent stiffness of each of these is defined by corresponding relationships.



Slika 6. Karakteristične grane zavisnosti napon–dilatacija
Figure 6. Characteristic branches of the stress-strain relationship

Deo I (O÷A) definiše stanje napona i dilatacija kada se materijal nalazi u potpunoj austenitnoj fazi – $e < e_{AF}$. Za ovaj deo, pri opterećenju i rasterećenju, tangentialni modul jednak je austenitnom modulu elastičnosti – $E_T = E_A$.

Deo II (A÷B÷C÷D) predstavlja glavnu histerezisnu petlju, pri čemu se vrednost dilatacija nalazi u području između dilatacija na kraju austenitne faze i dilatacija na kraju martenzitne faze, tj. – $e_{AF} < e < e_{MF}$. Pri potpunom opterećenju i rasterećenju, tangentialni modul jednak je modulu karakterističnom za svaku fazu: deo (A÷B), $E_T = E_A$; deo (B÷C), $E_T = E_{AM}$; deo (C÷D), $E_T = E_M$; deo (D÷A), $E_T = E_{MA}$.

Ukoliko vrednost dilatacija, pri opterećenju i rasterećenju, prevaziđe vrednost dilatacija na kraju martenzitne transformacije $e > e_{MF}$, tada se zavisnost nalazi u delu III, pri čemu je tangentialni modul jednak modulu martenzitne faze – $E_T = E_M$.

Opisane relacije važe za proces opterećenja i rasterećenja, pri čemu se odvija celokupna martenzitna, tj. celokupna reverzibilna transformacija. Za ovakav proces, vrednosti napona i dilatacija kreću se po granicama glavne histerezisne petlje (O÷B÷C÷E÷D÷A÷O).

Ukoliko pri procesu opterećivanja ne otpočne i rasterećivanje, pre nego što vrednosti dilatacija dostigne vrednost na kraju martenzitne transformacije $e_{MS} < e < e_{MF}$, formira se nova tzv. sekundarna histerezisna petlja (sl. 7).

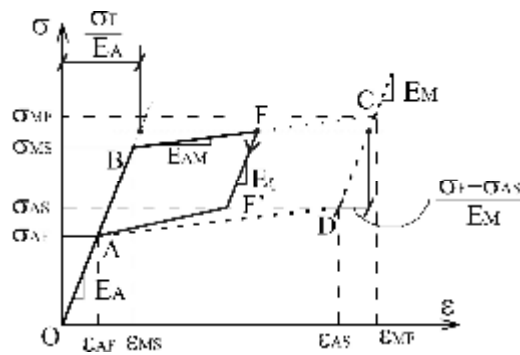
Part I (O÷A), defines the stress-strain state when the material is in complete austenite phase, $e < e_{AF}$. For this part, during loading and unloading, the tangential modulus is equal to the austenite modulus of elasticity, $E_T = E_A$.

Part II (A÷B÷C÷D) represents the main hysteretic loop, whereat the value of the strains is in the range between the strain at the end of the austenite phase and the strain at the end of the martensite phase, i.e., $e_{AF} < e < e_{MF}$. During the complete loading and unloading, the tangential modulus is equal to the modulus characteristic for each phase: part (A÷B), $E_T = E_A$; part (B÷C), $E_T = E_{AM}$; part (C÷D), $E_T = E_M$; part (D÷A), $E_T = E_{MA}$.

If the value of the strains during loading and unloading exceeds the value of the strain at the end of the martensite transformation $e > e_{MF}$, then the relationship is in part III, whereat the tangential modulus is equal to the modulus in the martensite phase, $E_T = E_M$.

The described relationships hold for the process of loading and unloading whereat complete martensite, i.e., complete reversible transformation is performed. For such process, the values of stresses and strains range within the boundaries of the main hysteretic loop (O÷B÷C÷E÷D÷A÷O).

If in the process of loading, one starts with unloading prior to reaching the strain value at the end of the martensite transformation, $e_{MS} < e < e_{MF}$, a new, the so called secondary hysteretic loop is formed, Fig. 7.



Slika 7. Sekundarna histerezisna petlja pri rasterećenju
Figure 7. Secondary hysteretic loop at unloading

Od početka rasterećenja (tačka F), pa sve dok naponi ne dostignu vrednost na početku austenitne transformacije $s < s_{AS}$ (tačka F'), tangenti modul može se sračunati kao procentualno učešće austenitnog i martenzitnog modula, u zavisnosti od dostignute vrednosti dilatacija u momentu kada počne rasterećenje.

From the beginning of the process of unloading (point F) until the stresses reach the value at the beginning of the austenite transformation $s < s_{AS}$ (point F'), the tangential modulus can be computed as percentage of participation of the austenite and martensite modulus, depending on the reached value of strains at the moment of unloading.

$$E_T = E_x = x \cdot E_M + (1 - x) \cdot E_A \quad (6)$$

gde je:

where:

$$x = \frac{e_F - \frac{s_F}{E_A}}{e_{AS} + \frac{s_F - s_{AS}}{E_M} - \frac{s_F}{E_A}} ; 0 < x < 1 \quad (7)$$

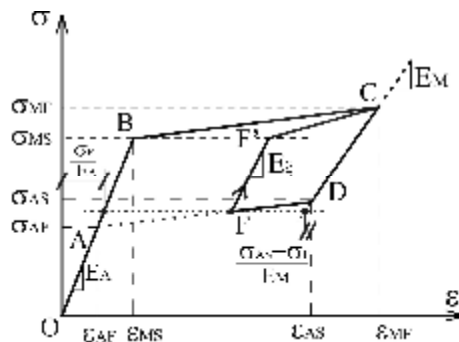
U momentu kada napon $s = s_{AS}$ otpočne proces reverzibilne transformacije, pri čemu zavisnost s, e produžava da se kreće po grani F'-A:

At the moment when stress $s = s_{AS}$, there starts the process of reversible transformation whereat relationship $s \div e$ continues to follow the F'-A branch:

$$E_T = \frac{s_{F'} - s_{AF}}{e_{F'} - e_{AF}} \quad (8)$$

Slične relacije važe i ukoliko pri rasterećenju, kada se materijal nalazi u delu reverzibilne transformacije (D÷A), za dilatacije $e_{AF} < e < e_{AS}$, započinje proces opterećivanja (sl. 8).

Similar relationships hold also if, during the process of unloading, when the material is in the part of reversible transformation (D÷A), for strain $e_{AF} < e < e_{AS}$, there starts the process of loading, Fig. 8.



Slika 8. Sekundarna histerezisna petlja pri opterećenju
Figure 8. Secondary hysteretic loop at loading

Tangentni modul, od početka opterećivanja (tačka F), pa sve dok naponi ne dostignu vrednost koja se javlja na početku martenzitne transformacije $s < s_{MS}$ (tačka F'), dobiće se kao kombinacija modula u austenitnoj fazi i modula u martenzitnoj fazi (Eq.6). I u ovom slučaju, učešće martenzitnog dela može se sračunati prema relacijama datim u jednačini 7.

Prilikom opterećivanja, kada naponi dostignu vrednost napona na početku martenzitne transformacije $s = s_{MS}$ (tačka F'), započinje martenzitna transformacija, pri čemu je tangentialna krutost jednaka:

$$E_T = \frac{s_{MF} - s_{F'}}{e_{MF} - e_{F'}} \quad (9)$$

Ova zavisnost važi sve dok dilatacija ne dostigne vrednost koja odgovara kraju martenzitne transformacije $e = e_{MF}$, pri čemu materijal počinje da se ponaša u kompletnoj martenzitnoj fazi s tangentialnim modulom $E_T = E_M$.

3.2 Numerička simulacija

Definisani histerezisni model iskorišćen je za simulaciju nekoliko karakterističnih slučajeva cikličnog opterećenja pod dejstvom aksijalnog pritiska i zatezanja. Dobijeni rezultati numeričke simulacije upoređeni su s rezultatima dobijenim iz izvedenih eksperimentalnih ispitivanja, kao i s nekim ostalim materijalnim modelima.

Prvi razmatrani primer predstavlja simulaciju procesa parcijalnog cikličnog opterećenja i potpunog rasterećenja (sl. 9 i 10), pri čemu se vrednosti napona naizmenično menjaju od pritiska u zatezanje, i obratno. Drugi primer predstavlja proces kompletnog opterećenja i parcijalnog rasterećenja (sl. 11 i 12), tako što su u prvih sedam ciklusa dilatacije pozitivne (zatezanje), dok su u narednih sedam ciklusa negativne (pritisk). Dobijeni rezultati upoređeni su s numerički dobijenim rezultatima Fugazza [6]. Treći razmatrani primer predstavlja parcijalno opterećenje i parcijalno rasterećenje, pod pritiskom i zatezanjem. Rezultati analize prikazani su s tri karakteristična dijagrama, ulazna istorija dilatacija, proračunata istorija napona i zavisnost napon–dilatacija.

The tangential modulus, from the beginning of loading (point F) until the stresses reach the value at the beginning of the martensite transformation $s < s_{MS}$ (point F'), will be obtained as a combination of modulus in the austenite phase and modulus in the martensite phase (Eq. 6). Also in this case, the participation of the martensite part can be computed according to the relationship given in Eq.7.

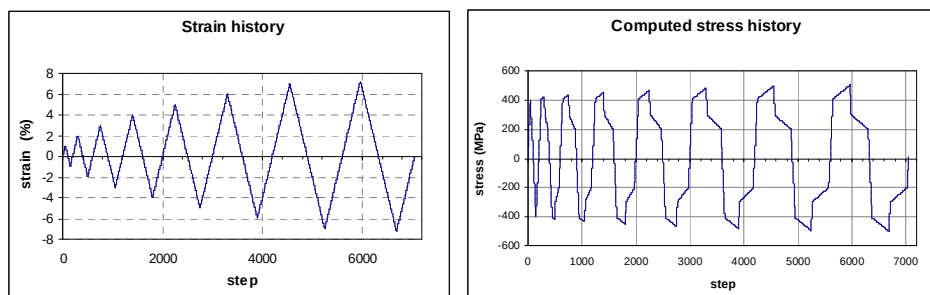
In the process of loading, when the stresses reach the value at the beginning of the martensite transformation $s = s_{MS}$ (point F'), there starts the martensite transformation, whereat the tangential stiffness is equal to:

This relationship will hold until the strains reach the value corresponding to the end of the martensite transformation $e = e_{MF}$, whereat the material starts to behave in complete martensite phase with a tangential modulus $E_T = E_M$.

3.2 Numerical simulation

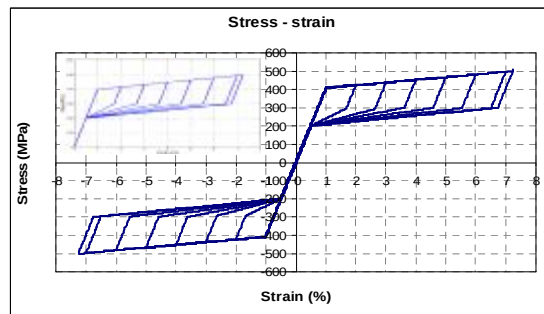
The defined hysteretic model has been used for simulation of several characteristic cases of cyclic loading under the effect of axial compression and tension. The results obtained from the numerical simulation have been compared with the results obtained from performed experimental investigations as well as with some other material models.

The first considered example represents simulation of the process of partial cyclic loading and complete unloading, Fig. 9 and Fig. 10, whereat the values of stresses are alternately changed from compression into tension and vice versa. The second example represents a process of complete loading and partial unloading, Fig. 11 and Fig. 12 so that, in the first 7 cycles, the strains are positive (tension), while in the next 7 cycles, they are negative (compression). The obtained results have been compared with the numerical results obtained by Fugazza [6]. The third considered example represents a process of partial loading and partial unloading under compression and tension. The results from the analysis

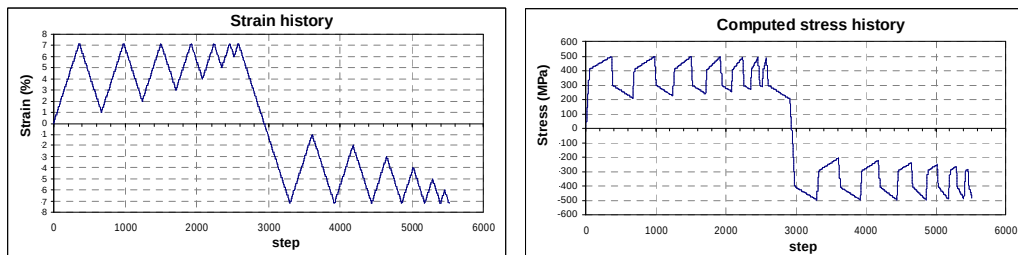


Slika 9. Ulazna istorija dilatacija i sračunata istorija napona u slučaju parcijalnog opterećenja i kompletnog rasterećenja, primer 1

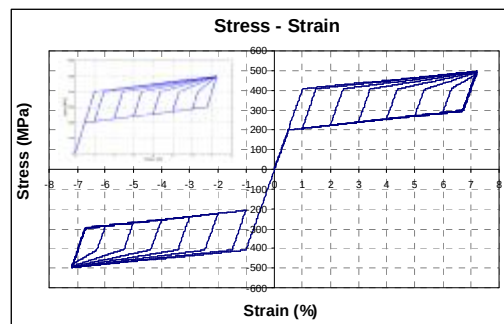
Figure 9. Input history of strains and computed history of stresses in the case of partial loading and complete unloading, Example 1



Slika 10. Sračunata zavisnost napon–dilatacija i poređenje s rezultatima dobijenim u [6], primer 1
Figure 10. Computed stress-strain relationship and comparison with the results obtained by Fugazza [6], Example 1



Slika 11. Ulazna istorija dilatacija i sračunata istorija napona za slučaj kompletnog opterećenja i parcijalnog rasterećenja, primer 2
Figure 11. Input history of strains and computed history of stress in case of complete loading and partial unloading, Example 2



Slika 12. Sračunata zavisnost napon–dilatacija, primer 2, poređenje s rezultatima dobijenim u [6]
Figure 12. Computed stress-strain relationship, Example 2, and comparison with the results obtained by Fugazza [6]

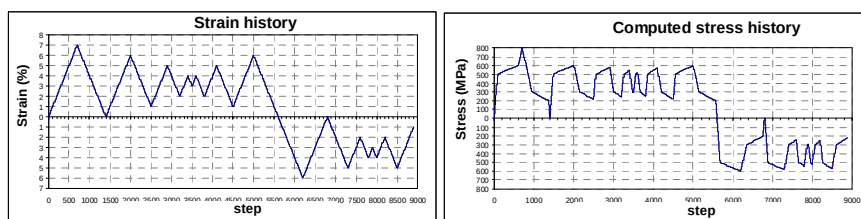
Numerička analiza za prva dva primera sprovedena je za isti modul elastičnosti u austenitnoj i martenzitnoj fazi. Vrednosti materijalnih karakteristika usvojene su prema podacima datim u referenci [6] i iznose: $E_A=E_M=40000$ MPa, $\varepsilon_{MF}=7.2\%$, $\sigma_{MS}=500$ MPa, $\sigma_{MF}=600$ MPa, $\sigma_{AS}=300$ MPa, $\sigma_{AF}=200$ MPa.

S ciljem da se prikaže funkcionisanje histerezisnog modela i za materijale s različitim deformacijskim karakteristikama u austenitnoj i martenzitnoj fazi, u trećem primeru usvojeni su različiti moduli elastičnosti za dve karakteristične faze: $E_A=60000$ MPa, $E_M=20000$ MPa, $\varepsilon_{MF}=6\%$, $\sigma_{MS}=500$ MPa, $\sigma_{MF}=600$ MPa, $\sigma_{AS}=300$ MPa $\sigma_{AF}=200$ MPa (sl.13 i 14).

are presented by three characteristic diagrams, input history of strains, computed history of stresses and stress-strain relationship.

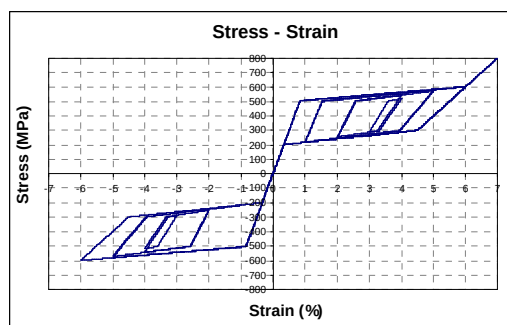
Numerical analysis of the first two examples has been carried out for the same modulus of elasticity in the austenite and martensite phase. The values of the material characteristics have been adopted according to the data given in reference [6] and amount to: $E_A=E_M=40000$ MPa, $\varepsilon_{MF}=7.2\%$, $\sigma_{MS}=500$ MPa, $\sigma_{MF}=600$ MPa, $\sigma_{AS}=300$ MPa, $\sigma_{AF}=200$ MPa.

To present the functioning of the hysteretic model also for material with different deformation characteristics in the austenite and martensite phase, in the third example, different modulus of elasticity have been adopted for two characteristic phases: $E_A=60000$ MPa, $E_M=20000$ MPa, $\varepsilon_{MF}=6\%$, $\sigma_{MS}=500$ MPa, $\sigma_{MF}=600$ MPa, $\sigma_{AS}=300$ MPa $\sigma_{AF}=200$ MPa, Fig.13 and Fig.14.



Slika 13. Ulazna istorija dilatacija i sračunata istorija napona u slučaju kompletnog opterećenja i parcijalnog rasterećenja, primer 3

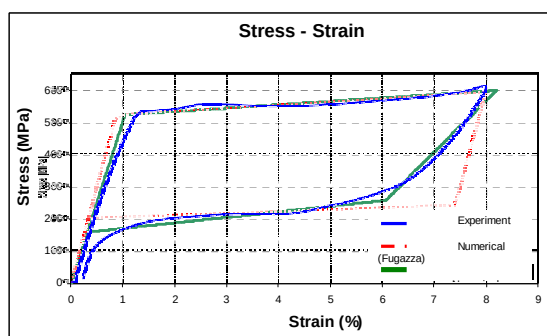
Figure 13. Input history of strains and computed history of stress in the case of partial loading and partial unloading, Example 3



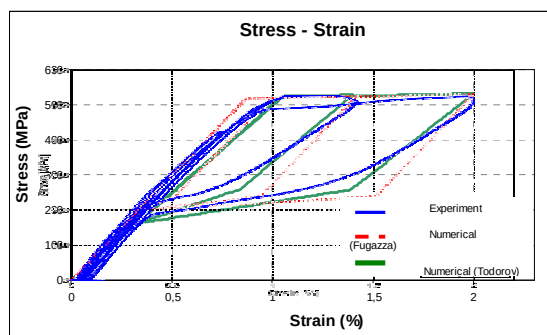
Slika 14. Sračunata zavisnost napon–dilatacija, primer 3
Figure 14. Computed stress-strain relationship, Example 3

Definisani materijalni model korišćen je za numeričku simulaciju rezultata, dobijenih u eksperimentalnim ispitivanjima nikl-titanijumske žice prečnika 1.49 mm. Materijal je proizvod *Nitinol Devices & Components* [8], dok su rezultati eksperimentalnih i numeričkih testiranja preuzeti iz [6]. Iz analize eksperimentalnih zavisnosti (krive) dobijenih za celokupno opterećenje i rasterećenje, za numeričku simulaciju usvojene su sledeće karakteristike: $E_A=50000\text{MPa}$, $E_M=16000\text{MPa}$, $\varepsilon_{MF}=8.2\%$, $\sigma_{MS}=520\text{MPa}$, $\sigma_{MF}=600\text{MPa}$, $\sigma_{AS}=260\text{MPa}$, $\sigma_{AF}=160\text{MPa}$, (sl. 15 i 16).

The defined material model has been used for numerical simulation of the results obtained from the experimental testing of nickel-titanium wires with a diameter of 1.49mm. The material has been produced by *Nitinol Devices & Components* [8], while the results from the experimental and numerical testing are taken from Fugazza [6]. From the analysis of the experimental curve obtained at complete loading and unloading, the following characteristics have been adopted for the numerical simulation: $E_A=50000\text{ MPa}$, $E_M=16000\text{ MPa}$, $\varepsilon_{MF}=8.2\%$, $\sigma_{MS}=520\text{ MPa}$, $\sigma_{MF}=600\text{ MPa}$, $\sigma_{AS}=260\text{ MPa}$, $\sigma_{AF}=160\text{ MPa}$, Fig.15 and Fig.16.



Slika 15. Poređenje eksperimentalnih i numerički dobijenih krivâ, pri ukupnom opterećenju i rasterećenju
Figure 15. Comparison between the experimentally and numerically obtained curve at complete loading and unloading



Slika 16. Poređenje eksperimentalnih i numerički dobijenih krivâ, pri cikličnom opterećenju i rasterećenju
Figure 16. Comparison between the experimentally and numerically obtained curve at cyclic loading and unloading

4 ZAKLJUČAK

Legure sa svojstvom pamćenja oblika pripadaju grupi inteligentnih materijala s velikim potencijalom za primenu u inteligentnim konstrukcijama i sistemima. Efekat pamćenja oblika i efekat superelastičnosti stvaraju legure sa svojstvom pamćenja oblika, veoma različite od ostalih materijala koji se primenjuju u inženjerskoj praksi. Neuobičajeni makroskopski efekti koji se manifestuju rezultat su promene kristalne strukture materijala, prouzrokovane martenzitnim i reverzibilnim transformacijama. Fizičko-mehaničke karakteristike legura sa svojstvom pamćenja oblika kreću se u širokim granicama i zavise od kontrole procesa dobijanja tih legura, procentualne zastupljenosti komponentata u legurama, prisustva trećeg elementa i sl.

Predloženi originalni histerezisni model za opisivanje efekata superelastičnosti pri cikličnom aksijalnom opterećivanju svrstava se u grupu poligonalnih histerezisnih modela s promenljivom tangentnom krutošću. Taj model odlikuje niz prednosti, kao što su: jednostavan algoritam za proračun; lako definisanje potrebnih materijalnih parametara pomoću jednoaksijalnog testa na pritisak ili zatezanje; različite elastične karakteristike u austenitnoj i martenzitnoj fazi; mogućnost simulacije različitih uslova opterećivanja pri cikličnom opterećenju; laka implementacija u nekom od otvorenih softverskih kodova.

5 LITERATURA REFERENCES

- [1] Auricchio F., Considerations on the Constitutive Modelling of Shape Memory Alloys, Shape Memory Alloys - Advances in Modelling and Applications, 126-188, CIMNE Barcelona, 2001.
- [2] Boller C., Shape Memory Alloys – Their challenge to contribute to smart structures, Annual meeting of the Materials Research Society, Boston, USA, December 1999.
- [3] Brinson L. C., Huang M.S., Simplifications and Comparisons of Shape Memory Alloy Constitutive Models, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol.7, January 1996.
- [4] DesRoches R., Smith B., Shape Memory Alloys in Seismic Resistant Design and Retrofit: A Critical Assessment of the Potential and Limitations, Journal of Earthquake Engineering, Vol 7, No. 3, pp. 1-15, September, 2003.
- [5] Duerig W. T., Melton N. K., Applications of Shape Memory, Materials Science Forum, Vol. 56-58, 679-692, 1990.
- [6] Fugazza D., Shape-memory alloy devices in earthquake engineering: Mechanical properties, Constitutive modelling and Numerical simulations, MSc thesis, European school of advanced studies in reduction of seismic risk, ROSE School, September 2003.

- [7] Janke L., Czaderski C., Motavalli M., Ruth J., Applications of shape memory alloys in civil engineering structures - Overview, limits and new ideas, *Materials and Structures* 38, 578-592, June 2005.
- [8] NDC, Nitinol Devices & Components, <http://www.nitinol.com>
- [9] Otsuka K., Wayman C. M., *Shape Memory Materials*, Cambridge University Press, 1999.
- [10] Paiva A., Savi M.A., An Overview of Constitutive Models for Shape Memory Alloys, *Mathematical Problems in Engineering*, Article ID56876, pp.1-30, 2006
- [11] Stalmans R., Van Humbeeck J., *Shape Memory Alloys: Functional and Smart, Smart materials and technologies – sensors, control systems and regulators seminar*, Prague, Czech Republic, October 1995.
- [12] Todorov K., *Application of Shape Memory Alloys in the Systems for Passive Control of Structures, MSc thesis* (in Macedonian), University Ss. Cyril and Methodius, Faculty of Civil Engineering - Skopje, R. Macedonia, 2008.
- [13] Todorov K. and Oncevska S.P., *Commercial Shape Memory Alloys and Their Application in Structural Control, 12 International Symposium on Macedonian Association of Structural Engineers*, Struga, R. Macedonia, Vol.2,599-604, 2007.

REZIME

NOVI POLIGONALNI HISTEREZISNI MODEL ZA SIMULIRANJE EFEKTA SUPERELASTIČNOSTI LEGURA SA SVOJSTVOM PAMČENJA OBLIKA

Koce TODOROV
Svetlana PETKOVSKA ONCEVSKA

Termin *legure koje pamte oblik* odnosi se na grupu inteligentnih materijala (*Shape memory alloys – SMA*) i objedinjuje grupu metala sa svojstvima vraćanja u prethodno definisanu formu, oblik ili geometriju, kada su izloženi određenom termomehaničkom tretmanu. Jedinstvene karakteristike SMA – kao što su: veliki kapacitet prigušenja, mogućnost velikih povratnih napona i dilatacija, samocentrirajuća mogućnost i izvanredna otpornost na koroziju – čine ove materijale pogodnim za primenu u sistemima za pasivno i aktivno upravljanje (control) konstrukcija i za naučna istraživanja. U ovom radu, izložene su opšte karakteristike legura sa svojstvom pamćenja i najvažnije fizičko-mehaničke karakteristike najčešće korišćenih komercijalnih legura.

Definisanje materijalnog modela za numeričku simulaciju superelastičnog odgovora legura koje pamte oblik veoma je značajno za njihovo matematičko modeliranje. S tim ciljem, razvijen je novi, originalni poligonalni histerezisni model s promenljivom tangentnom krutošću, kojom se opisuje efekat superelastičnosti u slučaju cikličnog aksijalnog opterećenja.

Model ima niz prednosti, kao što su: jednostavni algoritam za proračun, lako definisanje potrebnih materijalnih parametara za jednoaksijalan test na pritisak ili zatezanje, različite elastične karakteristike u austenitnoj i martenzitnoj fazi, mogućnost simuliranja različitih uslova za ciklično opterećivanje, laka implementacija u neki od otvorenih softverskih kodova.

Ključne reči: legure sa svojstvom pamćenja oblika, superelastičnost, histerezisni model.

SUMMARY

NEW POLYGONAL HYSTERETIC MODEL FOR SIMULATION OF SUPERELASTICITY EFFECT OF SHAPE MEMORY ALLOYS

Koce TODOROV
Svetlana PETKOVSKA ONCEVSKA

The term shape memory alloys (SMA) refers to the group of metallic materials that demonstrate the ability to return to the same predefined shape or size when exposed to an appropriate thermal procedure. The unique characteristics of SMA, i.e., the high damping capacity, the high level of stress and strains recovery, the re-centring capabilities and the high corrosion resistance make this material attractive for scientific research. This paper shows the general characteristics of the shape memory alloys and the main physical-mechanical properties of the most frequently used commercial alloys.

Definition of a material model for numerical simulation of the superelastic response of shape memory alloys is very important for their mathematical modelling. For that purpose, a new original polygonal hysteretic model with variable tangent stiffness has been developed for description of the superelasticity effect in the case of cyclic axial loading.

The model has a number of advantages as are the simple algorithm for computation, the easy definition of the necessary material parameters by means of a uniaxial compressive or tension test, the different elastic characteristics in the austenite and martensite phase, the possibility of simulation of different loading conditions at cyclic loading and the easy implementation in some of the open software codes.

Key words: shape memory alloys, superelasticity, hysteretic model.