

# ПАМЕТНИ ТЕКСТИЛ – МАТЕРИЈАЛИ СА МЕМОРИСАЊЕМ ОБЛИКА

**Бранислава Б. ЛАЗИЋ**

*Висока текстилна струковна школа за дизајн, технологију и менаџмент, Београд*

**Биљана Б. ПОПОВИЋ**

*Висока текстилна струковна школа за дизајн, технологију и менаџмент, Београд*

**Снежана Т. ПОЗНАНОВИЋ**

*Факултет примењених уметности, Београд*

**Апстракт:** Паметни текстил представља најновију генерацију текстила чија су својства дизајнирана тако да реагују на побуђаје из окружења и чак да интелигентно одговоре на варирање спољашњих услова или побуђаја. Многи паметни текстилни материјали развијени су за потребе војске и свемирских програма, одакле се њихова примена пренела на цивилни сектор, у све области техничког текстила, чиме су значајно побољшане функционалне и естетске перформансе текстилних материјала, односно производа у које су ти материјали уграђени. Постоји много група паметних материјала, који показују специфична својства. У раду су разматрани материјали са меморисањем облика (SMM – *Shape Memory Materials*), који реагују на различите стимулансе из окружења. У стању су да се врате у свој изворни, претходно дефинисани, облик, након што су се деформисали при излагању одређеном стимулансу. То су најчешће легуре (SMA – *Shape Memory Alloys*) или полимери (SMP – *Shape Memory Polymers*), гел и стакло са меморисањем облика, али могу бити и керамички материјали (SMC – *Shape Memory Ceramics*), хибриди (SMH – *Shape Memory Hybrids*) и композити (SMCp – *Shape Memory Composites*). Захваљујући различитим SMM, данас се могу пројектовати материјали и програмирати за активацију/покретање који прате претходно одређене секвенце, баш као машине, али са већом интелигенцијом и флексибилношћу у смислу да материјал може да осети и онда да реагује сагласно томе, чак на молекулском нивоу. У раду је посебно истакнут значај SMA/SMP, који имају широке могућности за различите инжењерске и друге примене, које су често проблематичне за традиционалне материјале и примене, као и примене у дизајну текстила.

**Кључне речи:** паметни текстил; материјали са меморисањем облика; примене паметног текстила

## УВОД

Природа нас инспирише да креирамо паметне материјале због њихових бројних предности: цена, механичке карактеристике, еколошка прихватљивост, мала маса, функционална својства итд. (Kamila, 2013). У групу паметних материјала убрајају се и материјали са меморисањем облика, који се одликују својством враћања у свој првобитни облик из значајне и готово пластичне (квазипластичне) деформације, када се примени одговарајући стимуланс, што је познато као ефекат меморисања облика (SME – *Shape Memory Effect*) (Sahra et Islam, 2018) (Huang et al., 2010). Супереластичност (у легурама) или вискоеластичност (у полимерима) се, такође, могу запазити под одређеним условима (Wilkes et Liaw, 2000). Нађене су многе легуре, полимери, керамички материјали, гел и стакло, који испољавају SME понашање. Материјали са меморисањем облика (SMM – *Shape Memory Materials*) мењају облик на основу трансформације чврстог стања. Промене се дешавају на атомском нивоу – долази до преуређења атома. Неки од SMM могу се лако прерадити у облику филмова, влакана или жица, честица и чак порозне масе и пене, што омогућава њихову уградњу, са другим материјалима, у различите композите. Због својих својстава они су један од главних елемената паметних композитних материјала. Могу осетити топлотне, механичке, магнетне или електричне стимулансе или промене рН вредности и хидростатичког притиска и показати активацију или неке претходно дефинисане одговоре на промене у окружењу, што чини могућим подешавање неких техничких параметара као што су облик, фриkcија и друге статичке и динамичке карактеристике материјала – програмирање својстава/изгледа за одређене примене, без помоћи експерата (“*do-it-yourself*” – учини-то-сам) (Shen., Chui et Tao, 2013) (Cederström et Van Humbeeck, 1995) (Huang et al., 2010).

Откриће мартензита у челику 1890. године (*Adolf Martens*) било је први корак ка открићу легура са меморисањем облика (SMA – *Shape Memory Alloys*). SME је први пут уочен у легури Au (47,5%)-Cd још 1932. године и 1938. у месингу, али на овај феномен се почела обраћати пажња тек након открића легуре Nitinol (*Ni Ti Naval Ordnance Laboratory, William J. Buehler, USA, 1959. год.*). Интересовање је нагло порасло од 1971. године, када је код ове легуре запажено значајано повратно истезање (Parihar, Khandagale et Pallavi, 2016). У последњих петнаест година било је значајних развојних пројеката у области електроактивних полимера за широки опсег примена.

## СВОЈСТВА SMM

Фазне трансформације SMM повезане су са значајним и чак драстичним променама физичких и механичких својстава, као што су модул еластичности, затезна чврстоћа, пригушивање, повраћај облика/поправљивост облика, топлотна проводљивост, коефицијент топлотног ширења, отпорност, магнетна осетљивост, флексибилност, пропустљивост паре и диелектрична константа, могућност материјала да показује неке нове функције или да их чини прилагодљивим спољним променама. У општем случају, нека од својстава, која се могу применити у паметним системима, су (Cederström et Van Humbeeck, 1995) (Woodford, 2018): сензитивност – SMM су осетљиви на неке промене из околине као што су топлота, напрезање, магнетно или електрично поље, рН, светлост, хемикалије, ензими итд.; капацитет прекидача или контроле – стимуланси из окружења морају достићи критичну вредност да би изазвали операцију; активација – SMM могу да обезбеде веома велико истезање (супереластичност или псеудоеластичност) и огромне силе за активирање; супереластичност или псеудоеластичност – SMM показује супереластично понашање уколико је деформисан на температури која је нешто изнад температуре трансформације; прилагодљивост – различита својства показују значајне промене услед

фазних трансформација; меморисање и повраћај – облик или друге промене су реверзибилне и могу се понављати; складиштење енергије и конверзија – значајна количина енергије се може складиштити и могу се постићи конверзије топлотне, хемијске, магнетне и електричне енергије у механичку енергију; пригушивање – већина SMM има висок капацитет пригушивања услед карактеристичних микроструктура и фазних трансформација.

## ТИПОВИ МАТЕРИЈАЛА СА МЕМОРИСАЊЕМ ОБЛИКА

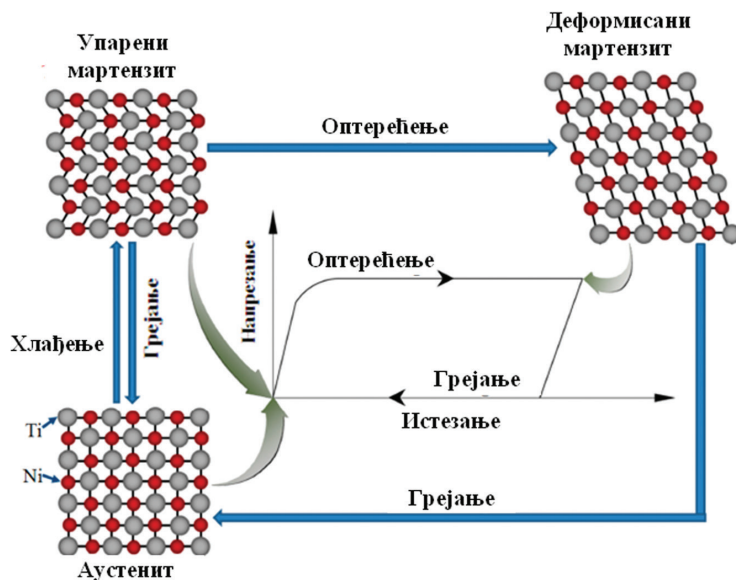
Постоји више група SMM, који укључују: легуре, полимере, хибриде, керамичке материјале и гел, а сваки од тих материјала може бити и део мешавина и композитних SMM (Pilate et al., 2016).

### Легуре са меморисањем облика

Легуре са меморисањем облика (SMA, паметни метал, меморијски метал, меморијска легура, мишићна жица, паметна легура) су легуре које „памте” свој почетни облик и након деформације се враћају у свој претходно дефинисани облик када се загревају. То је специјална класа материјала који могу да конвертују топлотну енергију у маханичко кретање (Saunders et al., 2016) (“Shape Memory Materials, Technology Insight Report, Gridlogics Technologies Pvt. Ltd”, 2015) (Lobo, Almeida et Guerreiro, 2015).

Уз SME, неки SMA такође имају ефекат меморисања температуре (TME – *Temperature Memory Effect*), тако да се највиша температура у претходном процесу загревања, у оквиру прелазног опсега, може регистровати и прецизно показати у следећем процесу загревања. Верује се да је делимично различит мартензит након топлотно програмираног процеса основни механизам за SME. На истом принципу, трака SMA може се термо-механички програмирати да се помери унапред и онда врати уназад при загревању. То је феномен познат као мулти-SME, у коме комад SMM враћа изворни облик корак по корак кроз неколико интермедијарних облика. Мулти-SME се може применити да ради практично као машина, при чему је материјал машина (Woodford, 2018).

Постоје два главна типа SMA – легуре бакар-алуминијум (CuAl) и никл-титанијум (NiTi – *Nitinol*), али могу такође бити креирани од легура цинка (Zn), бакра (Cu), алуминијума (Al) и гвожђа (Fe). SMA засноване на NiTi су пожељније за већину примена услед стабилности, практичности и супериорних термо-механичких перформанси. Лака израда у различитим облицима и величинама чини их технички употребљивим као активних елемената у различитим композитима. *Nitinol*, када се хлади, подлеже промени фазе, али остаје у чврстом стању. То изазива преуређење атома, промену облика, али не и чврстог стања. Кристална трансформација је потпуно реверзибилна, сви атоми се премештају у исто време и формирају нову структуру – не укључује дифузију атома и промену састава локално. Шематски приказ развоја кристалне структуре SMA NiTi дат је на сл. 1 (Jiang et al., 2017). *Nitinol* има две различите фазе, са три различите кристалне структуре и шест могућих трансформација (Cederström et J. Van Humbeeck, 1995) (Reddy, 2016) (Lai et al., 2013): 1) високотемпературну фазу аустенит – веома тврда и крута, кубна кристална структура; 2) нискотемпературну фазу мартензит – мање симетрична, флексибилнија; под притиском, атоми мењају позицију; ова кристална фаза допушта деформацију материјала – моноклинична кристална структура, која може бити у једном од два облика – спарени и деформисани (распарени) мартензит. Кроз фазне трансформације, материјал показује понашање слично еластичности (псеудоеластични ефекат). SMA имају различите SME – два уобичајена ефекта су једноструко и двоструко меморисање облика.

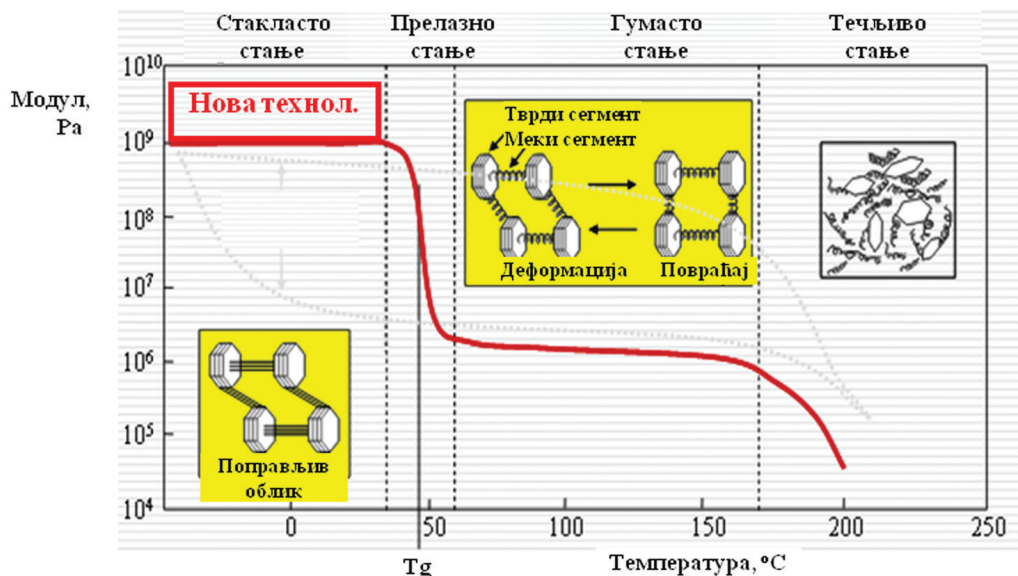


Слика 1

### Полимери са меморисањем облика

Истраживања SMP започета су четрдесетих година прошлог века (стоматолошки материјали), настављена шездесетих (полиетилен са способношћу скупљања), да би осамдесетих доживела нагли раст (Lai et al., 2011) (Hager et al., 2015). SMP спадају у категорију активних паметних материјала, који имају способност да се врате из деформисаног стања (привремени облик) у свој изворни (трајни) облик (показују вискоеластично понашање), што је изазвано различитим спољашним стимулансима. SME је резултат морфологије полимера и његовог процесуирања, нпр. функционализације полимера (Sharma, n.d.) (Meng et Li, 2013). SMP карактерише велика реверзибилна промена модула еластичности при температури остакљивања (сл. 2) (Gök, Bilir et Gürcüm, 2015).

На основу начина активације могу се класификовати као (Pilate et al., 2016): термо реактивни SMP – мењају облик са променом температуре (директно, загревање радијацијом или ласером); то су најчешћи SMP; SMP индукован загревањем електричном енергијом – у општем случају SMP нису проводљиви, тако да се чине проводљивим мешањем са угљеничним нано честицама; електрична енергија се конвертује у топлоту, а враћају свој изворни облик када електрична струја пролази кроз SMP; електроактивни SMP – употреба електрицитета за активацију SME полимера је пожељна за примене где није могуће употребити топлоту; SMP индукован светлошћу (UV и инфрацрвене) – имају извесне фото осетљиве групе које делују као молекулски прекидачи; SMP индукован магнетним пољем – бесконтактно активирање промена облика полимера остварено је инкорпорирањем магнетних наночестица у SMP и индуктивним загревањем ових једињења у наизменичним магнетним пољима; SMP активиран водом/растворима – активација полимера постиже се потапањем у воду/раствор; SMP активиран променом pH вредности – то је тродимензионална макромолекулска мрежа у облику гела, која има велики удео воде у својој структури; степен бубрења таквог гела расте или опада испод или изнад критичне температуре; SMP активиран ензимима; SMP активиран микроталасима; SMP активиран притиском; SMP активиран звуком итд. Овај материјал може припадати двоструким SMP



Слика 2

или SMP са више облика (Gök, Bilir et Gürcüm, 2015). SMP поседују широк опсег жељених својстава, као што су: ниска цена (материјала и обраде)/економичност, лакше програмирање својстава, мала густина, растељивост, мек опип, потенцијал за релативно јефтину рециклажу, висок повраћај на-презања у широком опсегу стимуланаса и чак у исто време са више стимуланаса, транспарентност, хемијска стабилност и модификација, лака обрада, биокомпатибилност и биоразградивост, са могућношћу подешавања брзине разградње, осетљивост (на топлоту, напрезање или поље), реверзибилна адхезија/пилинг и чак самолечење, активација великим ударима, високо пригушење, прилагодљив одговор, меморисање облика и способност супереластичности, које се могу применити у различитим инжењерским прилазима паметним системима. Нуде и широку палету боја, чак и промену боје при повраћају, што их чини атрактивним за примене на текстилним структурама (у облику раствора, емулзија, филма, влакна, пене и масе) (Pilate et al., 2016) (Leng et al., 2011) (Wei, Sandström et Miyazaki, 1998) (Huang et al., 2010). Са једним сетом мономера могуће је имати читав сет SMM. Пропустљивост паре и ваздуха (дишљивост, вентилација) једно је од најзначајнијих својстава удобности одеће, које се може постићи применом SMP (нпр. *Diaplex*, *Dermizax*<sup>®</sup>). Бројни SMP на бази различитих структура развијени су у лабораторијским условима, а неки типични су комерцијализовани у широком опсегу (Meng et Li, 2013).

### Хибриди са меморисањем облика

SMH су начињени од конвенционалних материјала и, слично SMP, засновани су на систему двоструког домена, у коме је један увек еластичан (еластични домен), док је други (транзициони домен) у стању да мења своју крутост значајно уколико је присутан одговарајући стимуланс. Може се прецизно предвидети термо-механички (или било који други од интереса) одговор SMH заснован на својствима материјала ова два домена. Предности SMH су у томе да се еластични домен може изабрати тако

да задовољава захтеве крутости и односа повраћаја облика SMH, док се захтевани тип стимуланса може реализовати избором правог материјала за транзициони домен.

### **Керамички материјали са меморисањем облика**

Произведена је модификована керамичка структура, која може издржати циклична напрезања упоредива са SMA. SMC са овим својствима представља нову класу активатора или паметних материјала са јединственим сетом својстава која, између осталог, укључују и примену на високој температури (Lai et al., 2013). Постоји неколико група SMC: вискоеластични, мартензитни, фероелектрични, феромагнетни. Уведена су три типа SMC: силицијумско стакло са ирверзибилним меморисањем облика, бикерамичко стакло са реверзибилним меморисањем облика и силицијум са реверзибилним меморисањем облика и узорци Si-C-O стаклених влакана индуковани термичким ширењем (Matsumura et al., 2011).

### **Гел са меморисањем облика**

Гел је мек и влажан материјал који има тродимензионалну мрежну структуру (полимерни ланци су умрежени хемијским и физичким везама) и јединствена својства, као што су: висока апсорптивност (обично бубри у води и задржава велику количину воде)/губитак воде, екстремно ниско трење, мекоћа, меморисање облика, висока растељивост/еластичност, транспарентност на собној температури, осетљивост на топлоту упркос високом садржају воде, прелаз течност-гел итд. Услед великог садржаја воде (нпр. више од 90%), овај материјал се сматра еколошки прихватљивијим, јер је биоразградив и биокompatibilан. Гел са меморисањем облика (SMG – *Shape Memory Gel*) може меморисати свој изворни облик који се дешава у току процеса гелирања, а постаје мек и еластичан уколико је загрејан изнад критичне температуре, када мења фазу. SMG нуди велике и брзе промене облика под одређеним условима засноване на прелазу уређено-неуређено. На собној температури, SMG има стални облик који је обезбеђен умрежавањем између мономера и умреживача. Он се може деформисати применом напрезања у току једне секунде загревањем изнад критичне температуре, а може бити фиксиран као привремени облик хлађењем испод критичне температуре. Може се вратити у свој трајни облик када се поново загреје изнад критичне температуре, без спољашњег напрезања. Привремени облик је стабилан док се не поврати изворни облик (Hasnat et al., 2014).

### **Композити са меморисањем облика**

SMCp представљају класу релативно нових материјала који обухватају легуре, полимере, хибриде, керамику и гел. Њихов значај лежи у широком опсегу жељених карактеристика: мала густина, потенцијална рециклажа уз релативно ниске трошкове, висок повраћај напрезања у широком опсегу стимуланса, транспарентност, хемијска стабилност и модификовање, лакше процесуирање, биокompatibilност и биоразградивост, са могућношћу прилагођавања брзине деградације (Pilate et al., 2016). Да би се побољшала својства неких материјала са меморисањем облика или добиле нове функције/мултифункционалност, припремају се композити и мешавине, што има за циљ да се: побољшају напрезања повраћаја облика и механичка својства; смањи време почетка повраћаја облика повећањем топлотне проводљивости; креирају нове мешавине полимер/полимер са SME; подешава температура прекидача, механичка и биомедицинска својства SMP; произведу SMM осетљиви на електрицитет, магнетизам, светлост и влагу (Meng et Hu, 2009). SMCp могу да садрже: нанофилере на бази угљеника; племените метале (златне нанофилере, сребрне нанофилере); нанофилере металних оксида; нанокристале целулозе; остале нанофилере (миковлакна, тканине, подлоге од Kevlar влакана, угљенична или стаклена влакна). Композити и мешавине SMP могу се употребити у

различитим применама. Један од примера је креирање композита који се састоје од SMA филма и супстрата са различитим коефицијентима топлотног ширења (Winzek et al., n.d.).

SMCp, који укључују бар један тип SMM, може се управљати, уколико су добро позната својства тог SMM. Пажљивим дизајном, заједно са интеграцијом других додатних механизма (нпр. еластичним извијањем), у SMCp може се остварити више феномена и нових функција (нпр. самолечећи полимери, ефекат стимулисања меморије, атермички стимулациони ефекти, ефекат меморисања мулти-облика, ефекат просторно контролисаног меморисања облика и ефекат двоструког меморисања облика) (Meng et Li, 2013). Познати су бројни примери композита различитог састава и начина производње: нанокомпозити (на бази угљеничних наноцевчица), засновани на SMP матрици (Zeng et al., 2019); нанокомпозит полиуретана и угљеника (Argun et al., 2019); матрични композити SMA (Dahnke et al., 2019); SMG интегрисани у композите ојачане влакнима (Mrozek et al., 2016).

## ПРИМЕНЕ SMM

SME се може применити у многим областима, тако да се SMM уграђују у широку лезу производа за различите области примене. SMM се примењују у (Meng et Li, 2013) (Wei, Sandström et Miyazaki, 1998) (Abu-Zarifa, n.d.) (Gatti, 2019) (Zhang Y. et al., 2019) (Zhang J. et al., 2019):

- **разним индустријама:** у електроници (различити активатори) (Nissle et Gurka, 2019); роботици (комбинација својстава активатора и сензора, посебно у области микро инжењеринга); микрофлуидима и пнеуматичима; микроалатима за хватање; микропумпама; микрославинама итд. (Meng et Hu, 2009); телекомуникацијама (антене за мобилне телефоне); машинама (пригушни елементи) и пловилима; цевоводима (у неким случајевима са термохромним додацима за лако запажење топлотног профила, споне и везе, спојеви за цеви, безбедносни системи који реагују на температуру) (Cederström et Van Humbeeck, 1995) (Woodford, 2018); подешавању површинских структура (нпр. борање); производима који се могу преобликовати; аутомобилској индустрији (топлотни мотори, склопови седишта, подесиве аутомобилске конструкције, морфабилно обликовање каросерије) (Hager et al., 2015); грађевинарству (Wang et al., 2019) (Bhargava et Shahab, 2019); у авиоиндустрији (промена облика крила, навођење авиона, лопатице хеликоптера) и свемирским програмима ("Applications for Shape Memory alloys", n.d.); активној контроли и исцелјивању оштећења својстава и структуре материјала (Quan et Hai, 2015); креирању материјала са адаптивним нивоом изолације;
- **медицини и здравственој нези** (Huang et al., 2010) (Leng et al., 2011) (Abu-Zarifa, n.d.) (Cederström et Van Humbeeck, 1995) (Woodford, 2018) (Hager et al., 2015): биомедицинске примене засноване на концепту хладне хибрираниране еластичне меморије; метални, керамички и стакласти биоматеријали са биоактивним својствима, која индукују раст нове кости и као коштани имплантати, посебно где се захтева велика тврдоћа и отпорност на хабање (зглобови вештачког кука), композитни биоматеријали за репарацију коштаног ткива; у ортопедској хирургији, стоматолозији и ортодонтским протезама за исправљање зуба за спречавање настајања каменца, у различитој офталмолошкој опреми укључујући сонду за пунктирање и контактна сочива, медицинске имплантате; за ојачање артерија и вена, за стентове и игле за минимално инвазивне хируршке захвате; вештачки мишићи, интравенска канила, самоподешавајуће ортодонтске жице и селективно подесиви алати за мање хируршке процедуре, кардиваскуларни стентови и хируршке конци, минимално инвазивана имплантација уређаја и привремених, биоразградивих имплантата, структурне компоненте са својством самопоправке (самоисцељења); контролу геометрије

материјала у области програмиране испоруке лекова, инжењеринга ткива и регенеративне медицине – паметни хируршки конци, биоразградиви имплантати као што су ортодонтски материјали, коштани вијци, ексери, плоче, мрежице и скелети за инжењеринг ткива;

- **оптометрији/наочарима** (Huang et al., 2019): подесива/повратна оптика (решетке, холограми, подесиви оптички прозори); оквири наочара; примене у напредној оптоелектроници;
- **производима за домаћинство** (Woodford, 2018) (Abu-Zarifa, n.d.) (Hager et al., 2015): као замена за биметалне плочице у многим апаратима за домаћинство; противпожарни и заштитни системи, детектор аларма за дојаву пожара; уређењу ентеријера (завесе које спуштају или подижу зависно од интензитета сунчеве светлости); у паковању хране; играчкама;
- **текстилу** (Cederström et Van Humbeeck, 1995) (Gök, Bilir et Gürcüm, 2015): раствори за дораду текстила; дишљив (вентилишући) текстил; тканине за пригушивање; производи за негу коже; производи за дренажу рана; тканине дезодоранси; паметни текстил за складиштење енергије (Chan Vili, 2007); паметни текстилни материјали за израду заштитне одеће (Yüce, 2017) (Šalej Lah et al., 2019); текстилне површине/одећа која се не гужва, односно која се враћа у раван положај без обзира колико је материјал био погужвана, температурно адаптивна одећа (Vasile et al., 2010); SMP влакна, филмови, пена и ламиниране тканине са SME; одећа која се адаптира променама температуре и одржава константну температуру тела носиоца/оптимална дишљивост; креирање предива, тканина и одеће са меморисањем облика; боља изолациона својства (већи степен заштите од екстремних температура инкорпорирањем SMA између слојева одеће, као успоривачи горења) (Tseghai, 2015); влакнасте мембране са адаптивним понашањем при променама околине (Zhang Q. et al., 2019); влакна ојачана SMP ради постизања мултифункционалности; наборане адаптивне тканине (Ashir et al., 2019); жице брусхалтера (“Applications for Shape Memory alloys”, n.d.); примене у дизајну одеће; меморијски мадраци; улошци за удобност обуће (Gök, Bilir et Gürcüm, 2015); интеграција SMP у тканину ради постизања и побољшана својства као што су добар естетски изглед, удобност, мекоћа, паметно контролисано отпуштање лекова; мониторинг рана; паметна својства влажења и заштита од екстремних варирања услова околине; развијање различитих нових и јединствених функција текстила као што су луминисцентни текстил, текстилни дисплеји, одећа осетљива на емоције, само-чистећи текстил, текстил са регулацијом температуре и самопокретни текстил (Thakur, 2017); за уређење ентеријера (Chan Vili, 2007); примене у области заштитног текстила (нпр. *Diaplex* тканина, *Dermizax*<sup>®</sup>) итд.;
- **биоинспирисаном/биомиметичком инжењерству**;
- **спорту** (“Applications for Shape Memory alloys”, n.d.): шлемови и други заштитни делови спортске опреме, спортска одећа; голф клубови;
- **наносима на површине** – за драматично побољшање перформанси, као што је самочишћење, ћелијска адхезија, одвајање воде, екстракција светлости итд. (Huang et al., 2010);
- **играчкама** итд.

## ПРАВЦИ БУДУЋЕГ РАЗВОЈА

Сан „материјал је машина” постаје све опипљивији. Захваљујући различитим SMM, данас се могу пројектовати материјали и програмирати за активацију/покретање, који прате претходно одређене секвенце, баш као машине, али са већом интелигенцијом и флексибилношћу у смислу да материјал може да осети и онда да реагује сагласно томе, чак на молекулском нивоу (Huang et al., 2010). Неколико последњих деценија водећа истраживања су у области SMA. Ради се на хибридном SMA



материјалима који су показали веома добре перформансе у лабораторијским условима за различите примене. Трендови развоја укључују (Saha et Islam, 2018): екстензивну производњу 3D штампане SMA опреме која користи SMA филament, посебно у роботизи и биомедицинским применама; развој и примену нових SMA конструкционих материјала (греде и шипке, поред развоја подлошки и вијака), што би повећало сигурност градње у трусним подручјима; комерцијалне системе SMA активатора и контролних алгоритама, посебно у превозним средствима и малим сателитима; употребу SMA као алтернативе за системе складиштења пиезоелектричне енергије.

Главни садашњи тренд је достићи нове/јединствене облике/функције релевантне за свакодневни живот, одрживе у будућности. Пошто је заштита животне средине једна од главних брига широм света, од значаја су иницијативе као што је рециклажа застареле електронске опреме. SMM би могли да представљају будућност у тој области. Посебна нада се улаже у развој SMM заснованих на конвенционалним полимерима који се широко примењују у индустрији као једноставне модификације полимера и полимера произведених тако да су перформансе и цена аутоматски гарантоване.

SMP, као полимери са меморисањем облика који одговарају на стимулансе, од великог су значаја за фундаментална истраживања и технолошке иновације (Pilate et al., 2016) (Sharma, n.d.). То су паметни материјали који обећавају и који изазивају велико интересовање, посебно њихови композити, укључујући одбрамбене структуре које су у стању да се развију, морфолошке структуре, биоматеријале, паметни текстил и тканине, пену, погон аутомобила и самолечеће композитне системе (Sharma, 2011). У фази истраживања је примена SMA као вештачких мишића за покретање руку. Развој погонске опреме од SMA структуре, посебно повећање њене брзине одзива и фреквенције, од великог је значаја за њен даљи развој. Други аспект је повећање способности прилагођавања SMA на високим и ниским температурама, што би довело до шире примене (Quan et Hai, 2015).

Према тренутним трендовима у погледу микро-електро-механичких система и чак нано-електро-механичких система, танак филм SMA (углавном на бази NiTi, произведеног таложењем прскањем), постао је озбиљан кандидат за покретање ових микро/субмикро система. Ово је даље подржано налазима да се SME дешава чак и SMA нано димензија (Woodford, 2018). Такође, активно се испитују други типови својстава меморисања облика – двоструки ефекат меморисања облика (Pilate et al., 2016). Веома су интересантне потенцијалне примене материјала заснованих на SMCp као медицинске и биомедицинске опреме, самоисцељујућих система, самосклопивих структура, активатора, сензора итд. или њихова директна имплементација у индустрији. Потенцијалне примене фазно упарених SMA активатора су роботи који се крећу за излагање опасностима или непознатој територији, посебно у *space* роботизи. Шта више, таласасто понашање може се употребити за покретање црвстих или змијастих робота и пливајућих робота (Winzek et al., n.d.). Очекују се нови, комерцијално успешни, текстилни производи са предностима у три области: водоотпорне, дишљиве и тканине постојане на пламен за одевне производе; одећа која се не гужва, не пегла и са фиксирањем облика; естетски активна одећа која може мењати облик или текстуру површине.

## ЗАКЉУЧАК

Материјали са меморисањем облика спадају у паметне материјале. Они су у стању да се врате у свој изворни, претходно дефинисани облик, након што су се деформисали при излагању одређеном побућају. Поред тога, поседују и друга изузетна својства, због којих налазе широку примену у многим областима. То су најчешће легуре или полимери, хибриди, керамички материјали и гел са меморисањем облика, као и композити и мешавине SMM, којима се побољшавају својства неких материјала са

меморисањем облика, или добијају нове функције и/или постиже мултифункционалност. Од посебног значаја су SMM за различите инжењерске и примене у медицини, спорту, текстилу итд., имајући у виду њихову биокompatibilност и биоразградивост, што их сврстава у еколошки прихватљиве материјале значајне за живот људи. Предвиђа се развој нових материјала/функција у овој области.

## ИЛУСТРАЦИЈЕ

### 1. Шематски приказ развоја кристалне структуре SMA NiTi

Schematic diagram of crystal structure evolution of NiTi SMA

(S. Jiang, J. Yu, L. Hu et Y. Zhang, "Investigation on Deformation Mechanisms of NiTi Shape Memory Alloy Tube under Radial Loading", *Metals* 7/7, 2017, 268, 8)

### 2. Промене у SMP при промени температуре

Changes in SMP as temperature changes

(M. O. Gök, M. Z. Bilar et B. H. Gürcüm, "Shape-Memory Applications in Textile Design", *Procedia – Social and Behavioral Sciences* 195, 2015, 2161)

## ЛИТЕРАТУРА И ИЗВОРИ

Abu-Zarifa, Anwar. "Smart materials". <http://site.iugaza.edu.ps/aabuzarifa/files/Advanced-Materials-20151-Ch5.pdf>. [приступљено 20. 08. 2019].

Applications for Shape Memory alloys. [https://depts.washington.edu/matseed/mse\\_resources/Webpage/Memory%20metals/applications\\_for\\_shape\\_memory\\_al.htm](https://depts.washington.edu/matseed/mse_resources/Webpage/Memory%20metals/applications_for_shape_memory_al.htm). [приступљено 30.08.2019].

Arun, D. I. et al. "Experimental and Monte Carlo simulation studies on percolation behaviour of a shape memory polyurethane carbon black nanocomposite", *Smart Materials and Structures* 28/5, 2019, 055010, 1–11.

Ashir, Moniruddoza et al. "Development of adaptive pleated woven fabrics with shape memory alloys", *Textile Research Journal* 89/12, 2019, 2330–2341.

Bhargava, Aarushi et Shahab, Shima. "Coupling of nonlinear shape memory polymer cantilever dynamics with focused ultrasound field", *Smart Materials and Structures* 28/5, 2019, 055002, 1–11.

Cederström, J. et Van Humbeeck, J. "Relationship Between Shape Memory Material Properties and Application", *Journal de Physique IV* 5, 1995, C2–334–C2–341.

Chan Vili, Yvonne Y. F. "Investigating Smart Textiles Based on Shape Memory Materials", *Textile Research Journal* 77/5, 2007, 290–300.

Dahnke, C. et al. "Thermomechanical behavior of shape memory alloy metal matrix composite actuator manufactured by composite extrusion", *Smart Materials and Structures* 28/5, 2019, 055022, 1–15.

Gatti, Gianluca. "A K-shaped spring configuration to boost elastic potential energy", *Smart Materials and Structures* 28/7, 2019, 077002, 1–16.

Gök, Mustafa O., Bilir, Mehmet Z. et Gürcüm, Banu H. "Shape-Memory Applications in Textile Design", *Procedia – Social and Behavioral Sciences* 195, 2015, 2160 – 2169.

Hager, Martin D. et al. "Shape memory polymers: Past, present and future developments", *Progress in Polymer Science* 49–50, 2015, 3–33.

Hasnat, Kabir et al. "The Application of Shape Memory Gel as a Smart Material", in: *Proceedings of the 12<sup>th</sup> Azia Pacific Physics Conference, JPS Conf. Proc.* 1, 012048, The Physical Society of Japan, 2014, 1–4.

Huang, Wei Min et al. "Shape memory materials", *Materialstoday*, 13/7–8, 2010, 54–61.

- Huang, Xinzuo et al. "Flexible and colorless shape memory polyimide films with high visible light transmittance and high transition temperature", *Smart Materials and Structures*, 28/5, 2019, 055031, 1–10
- Ionov, Leonid. "Actively-moving materials based on stimuli-responsive polymers", *J Mater Chem* 20, 2010, 3382–3390.
- Jiang, Shuyong et al. "Investigation on Deformation Mechanisms of NiTi Shape Memory Alloy Tube under Radial Loading", *Metals* 7/7, 2017, 268 (1–10).
- Kamila, Susmita. "Introduction, Classification and Applications of Smart Materials: An Overview", *American Journal of Applied Sciences* 10/8, 2013, 866–880.
- Lai, Alan et al. "Shape Memory and Superelastic Ceramics at Small Scales", *Science* 341, 2013, 1505–1508.
- Leng, Jinsong et al. "Shape-memory polymers and their composites: Stimulus methods and application", *Progres in Material Science* 56, 2011, 1077–1135.
- Lobo, Paulo Silva, Almeida, João et Guerreiro, Luís. "Shape memory alloys behaviour: A review", *Procedia Engineering* 114, 2015), 776–783.
- Matsumura, T. et al. "Shape Memory Ceramics", in: *MRS Online Proceeding Library Archive* 604, 2011, 161.
- Meng, Harper et Li, Guoqiang. "A review of stimuli-responsive shape memory polymer composites", *Polymer* 54/9, 2013, 2199–2221.
- Meng, Qinghao et Hu, Jinlian. "A review of shape memory polymer composites and blends", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 40/11, 2009, 1661–1672.
- Mrozek, Randy et al. "Highly compliant shape memory polymer gels for tunable damping and reversible adhesion", *Smart Materials and Structures* 25/2, 2016, 025004, 1–10.
- Nissle, S. et Gurka, M. "Characterization of active hybrid structures made of fiber reinforced composites and shape memory alloys—part A: characterization of the load transfer", *Smart Materials and Structures* 28/4, 2019, 045002, 1–10.
- Parihar, A. A., Khandagale, Kajal et Jivrag, Pallavi. "Smart Materials", *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering* 13/5, 2016, 28–32.
- Pilate, Florence et al. "Shape-memory polymers for multiple applications in the material words", *European Polymer Journal* 80, 2016, 268–294.
- Quan, Du et Hai, Xu. "Shape Memory Alloy in Various Aviation Field", *Procedia Engineering* 99, 2015, 1241–1246.
- Reddy, Deexith. "Shape Memory Alloys", *International Journal of Engineering Research and Applications* 6/7, 2016, 56–58.
- Saha, Swapnil Sayan et Islam, Artful. "Shape Memory Materials – Concepts, Recent Trends and Future Directions", in: *2018 Joint International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV) and 2018 2<sup>nd</sup> International Conference on Imaging, Vision & Pattern Recognition (icIVPR)*, Kitakyushu, Japan, June 2018, 5.
- Saunders, Robert et al. "A validated model for induction heating of shape memory alloy actuators", *Smart Materials and Structures* 25, 2016, 1–20.
- Shape Memory Materials, Technology Insight Report, Gridlogics Technologies Pvt. Ltd, 2015, 1–57. <https://www.patentinsightpro.com/techreports/0315/Tech%20Insight%20Report%20-%20Shape%20Memory%20Materials.pdf>. [приступљено 15. 08. 2019].
- Sharma, Swati. "New Purview of Alacrity: Shape Memory Polymers (SMPs)". <https://www.technicaltextile.net/articles/new-purview-of-alacrity-shape-memory-polymers-smps-7492>. [приступљено 01. 09.2 019].

- Shen, Jing, Chui, Chunghin et Tao, Xiaoming. "Luminous fabric devices for wearable low-level light therapy", *Biome Opt Express*. 4/12, 2013, 2925–2937. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3862154/>. [приступљено 10. 08. 2019].
- Šalej Lah, Alenka et al. "A NiTi alloy weft nitted fabric for smart firefighting clothing", *Smart Materials and Structures* 28/6, 2019, 065014, 1–10.
- Thakur, Suman. "Shape Memory Polymers for Smart Textile Applications", in: *Textile for Advanced Application*, 2017, 323–337.
- Tseghai, Granch Berhe. September 3, 2015. <https://www.slideshare.net/GranchBerheTseghai/10-smart-textiles-52380352>. [приступљено 27. 08. 2019].
- Vasile, Simona et al. "Analysis of Hybrid Woven Fabrics with Shape Memory Alloys Wires Embedded", *FIBRES & TEXTILE in Eastern Europe* 18/1(78), 2010, 64–69.
- Wang, Bin et al. "Earthquake resilient RC walls using shape memory alloy bars and replaceable energy dissipating devices", *Smart Materials and Structures* 28/6, 2019, 065021, 1–16.
- Wei, Z. G., Sandström, R. et Miyazaki, S. "Shape-memory materials and hybrid composites for smart systems – Review, Part I Shape-memory materials", *Journal of Material Science* 33, 1998, 3743–3762.
- Wilkes, Kenneth et Liaw, Peter. "The fatigue behavior of shape-memory alloys", *JOM* 52/10, 2000, 45–51.
- Winzek, Bernhard et al. "Thin film shape memory composites". [http://www-m6.ma.tum.de/~turova/html/Beitrag\\_Winzek\\_Metz.pdf](http://www-m6.ma.tum.de/~turova/html/Beitrag_Winzek_Metz.pdf). [приступљено 18. 08. 2019].
- Woodford, C. "Shape-memory materials", November 5, 2018. <https://www.explainthatstuff.com/how-shape-memory-works.html>. [приступљено 10. 05. 2019].
- Yüce, Ismail. "Shape Memory Polymers and Shape Memory Alloys: Use in Smart Textiles", *International Journal of Development Research* 7/11, 2017, 16730–16736.
- Zeng, Hao et al. "Modeling the thermomechanical behaviors of shape memory polymers and their nanocomposites by a network transition theory", *Smart Materials and Structures* 28/6, 2019, 065018, 1–9.
- Zhang, Quanchao et al. "Temperature-controlled reversible pore size change of electrospun fibrous shape-memory polymer actuator based meshes", *Smart Materials and Structures* 28/5, 2019, 055037, 1–10.

## СКРАЋЕНИЦЕ

- SMA – легуре са меморисањем облика (*Shape Memory Alloys*)
- SMG – гел са меморисањем облика (*Shape Memory Gels*)
- SME – ефекат меморисања облика (*Shape Memory Effect*)
- SMM – материјали са меморисањем облика (*Shape Memory Materials*)
- SMP – полимери са меморисањем облика (*Shape Memory Polymers*)
- SMH – хибриди са меморисањем облика (*Shape Memory Hybrids*)
- SMC – керамика са меморисањем облика (*Shape Memory Ceramics*)
- SMCp – композити са меморисањем облика (*Shape Memory Composites*)
- TME – ефекат меморисања температуре (*Temperature Memory Effect*)

Branislava B. Lazić  
Biljana B. Popović  
Snežana T. Poznanović

## SMART TEXTILES – SHAPE MEMORY MATERIALS

**Summary:** The group of smart materials also includes shape memory materials (SMM), which are able to recover their original shape from a significant and almost plastic (quasiplastic) deformation, when the appropriate stimulus is applied, which is known as the shape memory effect (SME). Phase transformations of SMMs are associated with significant and even drastic changes in physical and mechanical properties and the ability of the material to exhibit some new functions or to make them adaptable to external changes. In general, some of the properties that can be applied in smart systems are: sensitivity; switch or control capacity; activation; superelasticity or pseudoelasticity; flexibility; memorizing and recovery; energy storage and conversion; attenuation. There are several groups of SMMs, which include: alloys, polymers, hybrids, ceramic materials and gels, and each of these materials can be part of blends and composite materials with shape memory.

There are two main types of shape memory alloys (SMA) – copper-aluminum and nickel-titanium (Nitinol) alloys. SMA can exist in two different phases, with three different crystalline structures (eg. martensite, deformed martensite and austenite) and six possible transformations. Shape memory polymers (SMP) fall into the category of very smart materials, and have the ability to recover from a deformed state (temporary form) to their original (permanent) form (exhibit highly elastic behavior), which is caused by various external stimuli. SMP have a wide range of desired properties, which make them highly desirable in a variety of applications. In order to improve the properties of some SMM or to obtain new functions / multifunctionality, composites and mixtures are prepared. Numerous examples of composites of different structure and production process are known. SMM are used in various fields: in various industries, where applications in electronics and robotics, aerospace and space programs are of particular importance; medicine; household and textile and clothing products, etc. The main current trend in the development of SMM is to achieve new / unique shapes / functions relevant to daily life, sustainable in the future.

**Keywords:** smart textiles, shape memory materials, smart textiles applications