

МАТЕМАТИЧКА ГИМНАЗИЈА

МАТУРСКИ РАД

из предмета физике

Легуре које памте облик
-како раде и шта значе за индустрију-

Ученик

Михаило Алексић, 4ц

Ментор

др Душко Латас

Београд, јун 2026.

Садржај

1	Увод	2
2	Својства легура које мењају облик	3
2.1	Мартензитна трансформација	3
2.1.1	Класификација трансформације	3
2.1.2	Термодинамичка основа трансформације	4
2.1.3	Специфичност трансформације код SMA	5
2.1.4	Механизам мартензитне трансформације	6
2.2	Ефекат памћења облика	9
2.2.1	Супереластичност	11
2.3	Хистеретично понашање SME	12
3	Потенцијал SMA за индустрију будућности	14
3.1	Досадашње примене SMA	14
3.1.1	Примене у ваздухопловству	14
3.1.2	Примене у биомедицини	14
3.2	Могућности за будуће примене	15
4	Закључак	17

1 Увод

Област паметних материјала је у скорије време у све бржем развоју, а једна грана те области, памћење облика (Shape Memory – SM), већ има разне практичне употребе и још већи потенцијал за интеграцију у будућим технологијама. Материјали који памте облик (Shape Memory Materials – SMM) се деле у две категорије: легуре (Shape Memory Alloys – SMA) и полимере (Shape Memory Polymers – SMP). Овај рад ће се бавити легурама које памте облик, њиховим особинама и значају.

Принцип по ком SMA раде базиран је на фазним трансформацијама, што је појава која се јавља код свих метала и легура. Оне подразумевају промену понашања атома и њихових међусобних односа у зависности од температуре и притиска система, са тежњом достизања што веће термодинамичке стабилности. Једна таква трансформација је између аустенитне и мартензитне форме кристалне решетке SMA. Ове две форме, као и трансформација између њих, могу да се нађу и код других легура, али само код SMA могу да произведу ефекат по којем су ове легуре познате.



Слика 1.1: Исправљање савијене жице нитинола потапањем у врућу воду.

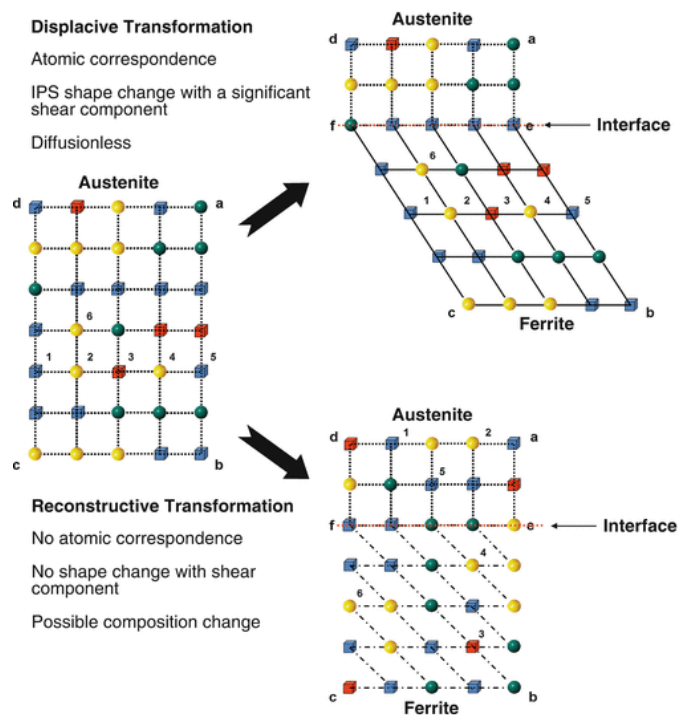
Легуре које памте облик су први пут откривене 1930-их година, али су привукле већу пажњу тек 1960-их година, када је откривена легура “нитинол”, названа по металима од које се састоји (никл и титанијум) и места где је откривена (US Naval Ordnance Laboratory). У наредним деценијама су SMA нашле употребу у дисциплинама попут ваздухопловства и биомедицине, а помоћу ефеката памћења облика и псеудоеластичности обликују технологије будућности.

2 Својства легура које мењају облик

2.1 Мартензитна трансформација

2.1.1 Класификација трансформације

Сва макроскопска својства и појаве везане за SMA су базиране управо на мартензитној трансформацији. Она је врста фазне трансформације, која се класификује као измештајућа, односно бездифузиона фазна трансформација. Назив "бездифузиона" се односи на њену суштинску разлику од дифузионе, тј. реконструктивне трансформације.



Слика 2.1: Визуелизација разлике измештајуће (displacive) и дифузионе (reconstructive) трансформације на примеру челика. [4]

Дифузиона трансформација је названа по дифузионом, термалном, слободном кретању атома и реконструкцији кристалне решетке, обично услед повишене топло-

те система. Одликује се по томе што након трансформације атоми решетке могу да се нађу на веома удаљеним позицијама од почетне услед замена са атомима око њих (видети [слику 2.1](#)).

Измештајућа трансформација се одликује, као што име налаже, измештањем атома и слојева атома, мада само у форми кратких, координисаних проклизавања између атома, због чега не долази до икакве прерасподеле услед дифузионог кретања (видети [слику 2.1](#)). То значи да су при измештајућим трансформацијама просторни односи између атома практично одржани, што је и основа њихове реверзибилности.

Измештајуће трансформације углавном нису савршено реверзибилне код већине метала и легура код којих се јављају због настанка дефеката и деформација, као и због немогућности да се генерише довољно јака унутрашња сила за потпуну повратну трансформацију. Међутим, код SMA се то практично не дешава због њихове термоеластичне природе (која је даље објашњена у [одељку 2.1.2](#)), тако да и у реалним условима испољавају потпуну реверзибилност.

Како облик и промене микроскопске структуре диктирају макроскопски облик, реверзибилност промене облика структуре код SMA управо доводи до реверзибилности промене макроскопског облика тела, познате као *shape memory effect*, о чему ће даље бити речи у [одељку 2.2](#).

2.1.2 Термодинамичка основа трансформације

Како је мартензитна трансформација термодинамички процес, важно је имати у виду како термодинамичко стање система SMA утиче на њену појаву. Оно се најлакше описује термодинамичким потенцијалима, што су функције стања система које описују количину енергије која може бити претворена у рад у датим термодинамичким условима. Најчешће коришћени су Хелмхолцова слободна енергија F (често означена и као A) и Гибсова слободна енергија G , које на следећи начин описују стање система:

$$F = U - TS \quad (2.1)$$

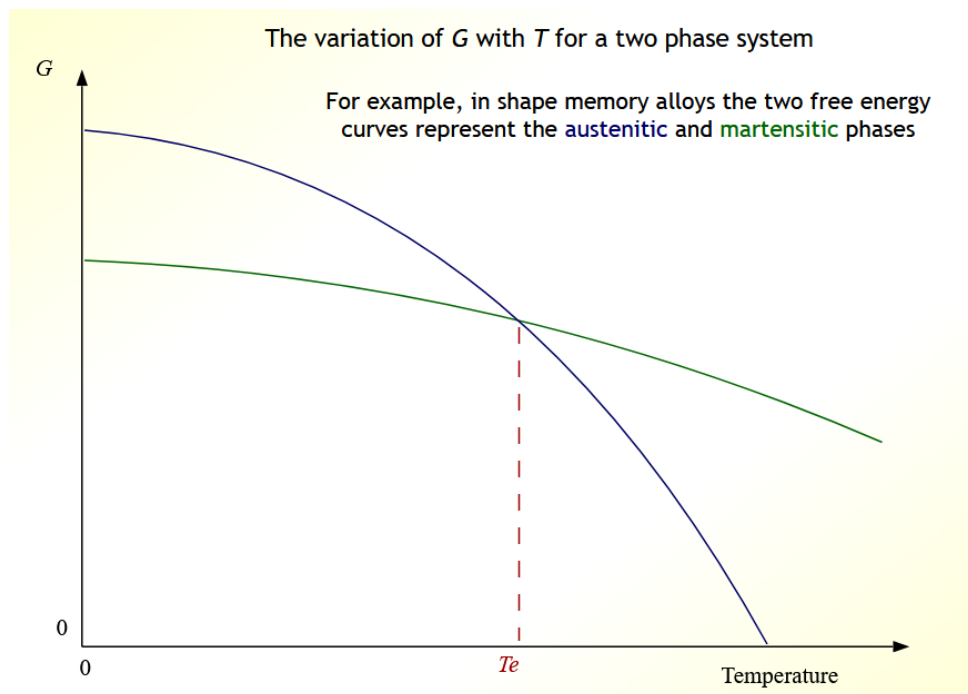
$$G = H - TS \quad (2.2)$$

где је U унутрашња енергија, H енталпија, T температура, S ентропија, а F и G Хелмхолцова, односно Гибсова слободна енергија. Избор између њих није од значаја за тренутно разматрање, јер је код њих важна само чињеница да су обе, за разлику од унутрашње енергије и енталпије, функције температуре, што омогућава увид у директну континуалну промену функције стања у зависности од промене температуре, описане једначинама:

$$dF = -SdT - pdV \quad (2.3)$$

$$dG = -SdT + Vdp \quad (2.4)$$

Из датих једначина може се приметити да је слободна енергија обрнуто сразмерна са температуром, тј. при порасту температуре ће слободна енергија да опада. Брзина опадања зависи од фактора везаних за сам материјал и, што је овде важније, стања у ком се налази тај материјал. Тако на вишим температурама преовладавају стања која су на нижим температурама имала вишу слободну енергију, али и већу брзину опадања исте (видети [слику 2.2](#)) и настаје фазна трансформација. Тим принципом мартензит при повишењу температуре изнад критичне тачке T_e прелази у аустенит и обрнуто при снижењу температуре испод исте тачке.



Слика 2.2: График зависности Гибсове слободне енергије од температуре код аустенита (плава линија) и мартензита (зелена линија). [3]

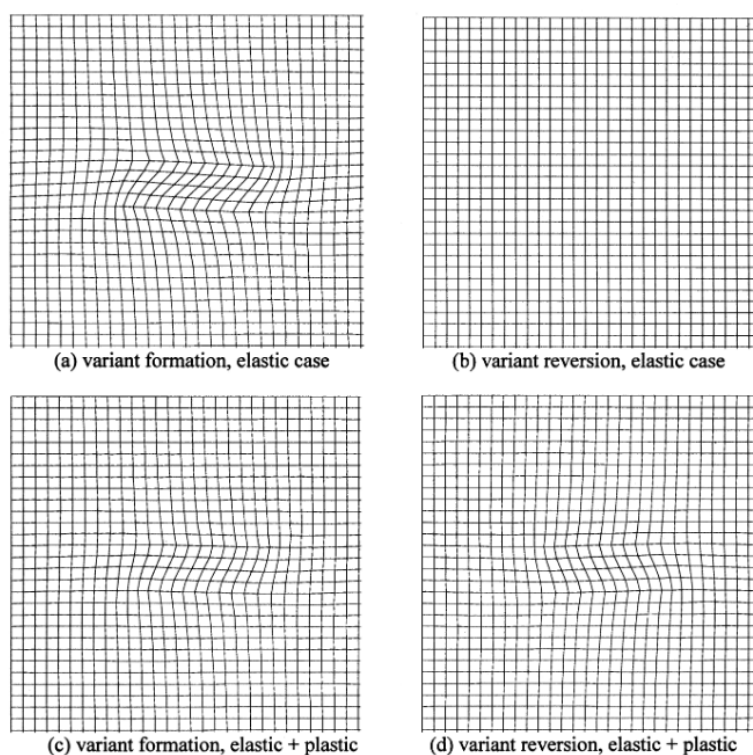
2.1.3 Специфичност трансформације код SMA

Као што је претходно поменуто у [одељку 2.1.1](#), SMA су специфичне по томе што је прелаз из аустенита у мартензит код њих заправо реверзибилан, за разлику од осталих мартензитних метала. Практична реверзибилност се доводи у питање првенствено због генерисања довољно јаке еластичне силе у решетки за потпун повратак.

Како се мартензитна трансформација, као и било која друга фазна трансфор-

мација, не дешава тренутно на нивоу целог тела, током самог прелаза долази до тренутака где се мартензитни део решетки нађе поред, или чак окружен аустенитном решетком. Пошто формације нису истог облика, настаје напрезање решетки, које атоми аустенита надомештају искривљењем своје решетки око трансформисаног мартензитног дела.

Кључна разлика долази у томе какво искривљење веза настаје. Код SMA је искривљење комплетно еластично, што је и разлог зашто се називају термоеластичним. Међутим, код осталих метала напрезање и искривљење имају и неповратну пластичну компоненту, уместо да су искључиво еластични (видети [слику 2.3](#)). Зато кристална решетка није у стању да се потпуно врати у првобитно стање при повратној трансформацији.



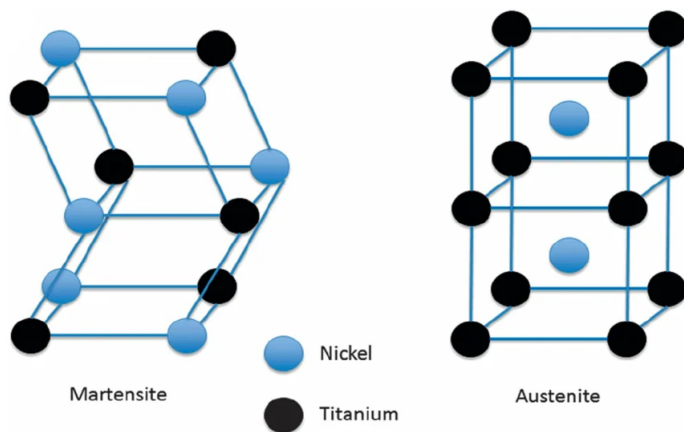
Слика 2.3: Визуелизација формирања мартензита и повратка код SMA ((a) и (b)) и код других метала ((c) и (d)). [5]

2.1.4 Механизам мартензитне трансформације

Пример нитинола (NiTi)

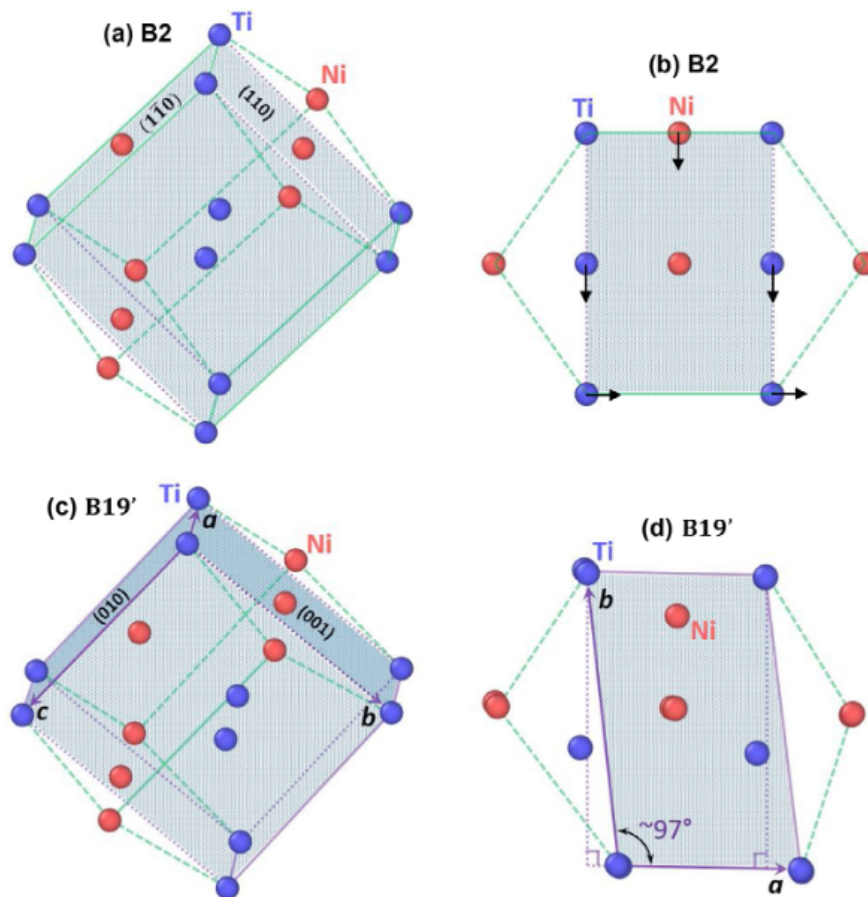
Нитинол је најпопуларнији од SMA и главна легура овог рада. Сви даљи одељци ће углавном користити њега за пример својстава SMA. Форме које нитинол заузима су B2 аустенит и B19' мартензит.

Нитинол свој прелаз из B2 аустенита у B19' мартензит врши координисаним, кратким проклизавањима одређених атома решетки (претежно титанијума). Услед



Слика 2.4: Шематски приказ структуре кристалне решетке мартензита (лево) и аустенита (десно) нитинола. [6]

истих, темена претходно коцкастих јединичних ћелија решетке заузимају формацију паралелоипеда, са слојевима под углом од око 97° један у односу на другог (видети [слику 2.5](#)).



Слика 2.5: Приказ симулације атома нитинола пре ((a) и (b)) и после ((c) и (d)) прелаза из две перспективе. Померање атома титанијума узрокује промену облика јединичне ћелије решетке. [7]

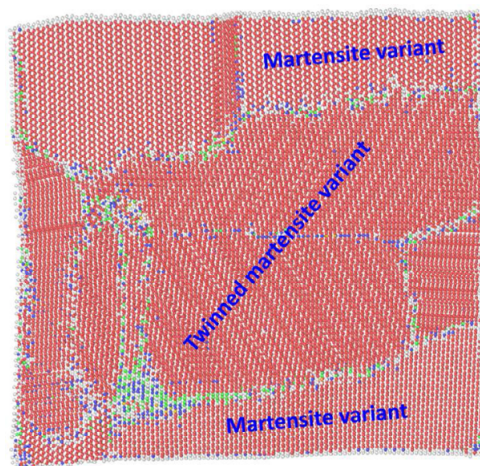
Пример SMA базираних на гвожђу

Осим нитинола има и многих других легура са SM својством. Један пример су одређене легуре базиране на гвожђу, као нпр. Fe-Mn-Si легуре. За разлику од нитинола, ова врста SMA врши прелаз делимичним дислокацијама читавих равни атома, тако да се распоред слагања мења и fcc (face-centered cubic) аустенит прелази у hcp (hexagonal close packed) мартензит.

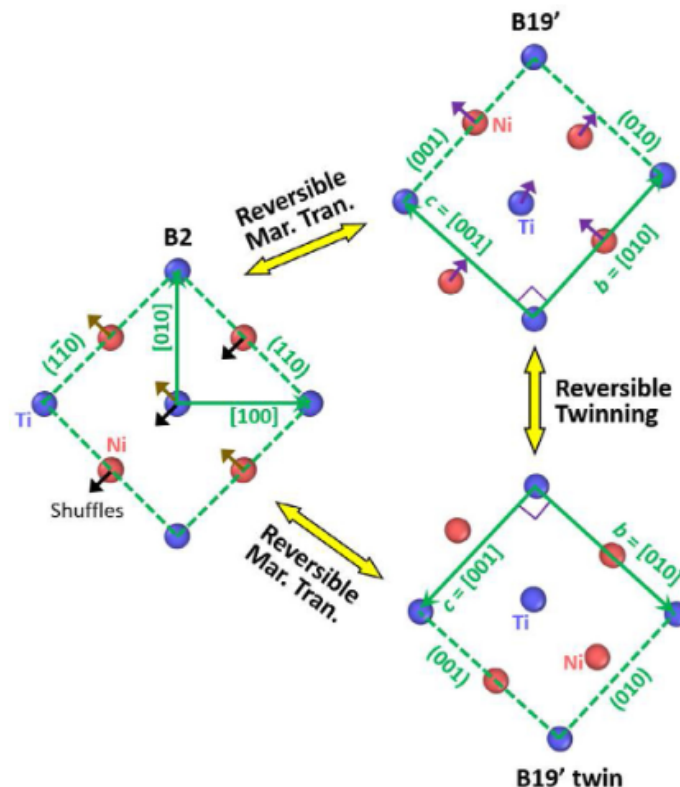
Формирање близаначке формације

Како је аустенитна форма коцкастог облика, она има велику количину оса и равни симетрије. Стога је логично закључити да се мартензит може формирати у разним оријентацијама. Различите оријентације мартензита се формирају спонтано у различитим деловима аустенита и пропадају док не наиђу на другу формацију, где онда настаје гранична кристалографска раван између њих.

Слика 2.6: Пресек симулације групе атома мартензитног нитинола; примећују се близанци мартензита и границе између њих. [7]



У комбинацији са одређеним симетријама које и мартензитна формација има (али у мањем броју), долази до могућности да настану формације мартензита које су равански симетричне једна у односу на другу, које се називају близаначке формације (twin formations).



Слика 2.7: Пример мартензитне трансформације и близанчења (twinning) нитинола. [7]

Међутим, феномен близанаца је изузетно важан због својства које они поседују међу собом - способност да, услед екстерних напрезања, мартензит пређе у своју близаначку форму (видети [слику 2.7](#)). Тиме је мартензитни SMA у могућности да се микроскопским близаначким надомештањима прилагоди макроскопским деформацијама, опет задржавши просторни распоред атома решетке, што је кључан предуслов за реверзибилност трансформације (већ поменуто у [одељку 2.1.1](#)) и појаву ефекта памћења облика.

2.2 Ефекат памћења облика

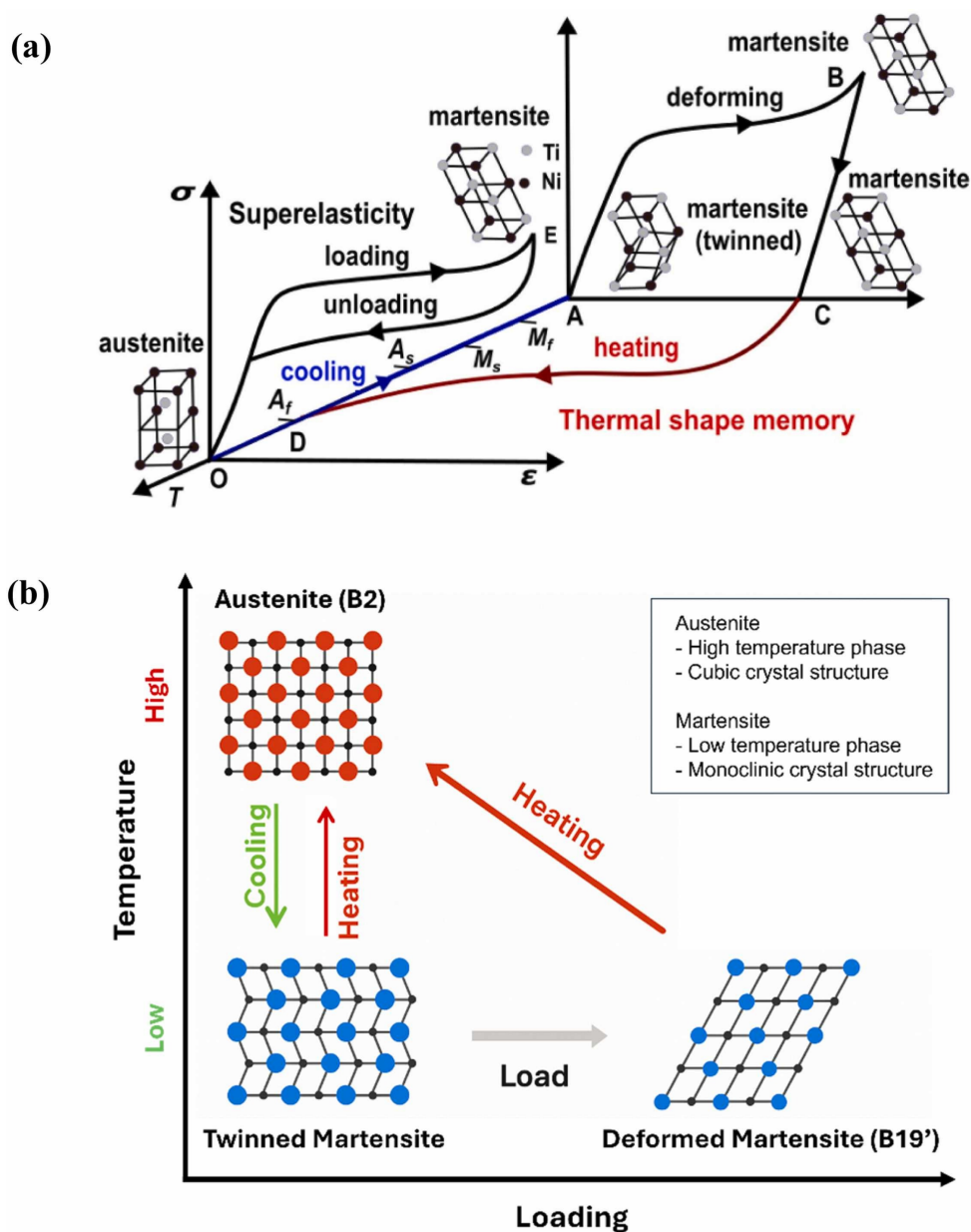
Ефекат памћења облика (Shape Memory Effect - SME) је главна макроскопска особина SMA, по чему су и добиле своје име. У [одељку 2.1](#) је комплетно објашњена основа појаве SME, а за практичну макроскопску примену истог је потребно само неколико параметара везаних за материјал:

M_s	Температура почетка прелаза у мартензит
M_f	Температура краја прелаза у мартензит
A_s	Температура почетка прелаза у аустенит
A_f	Температура краја прелаза у аустенит

Користећи ове параметре, стање и понашање SMA се могу графички описати користећи параметре стања:

T	Температура
ϵ	Деформација
σ	Напрезање

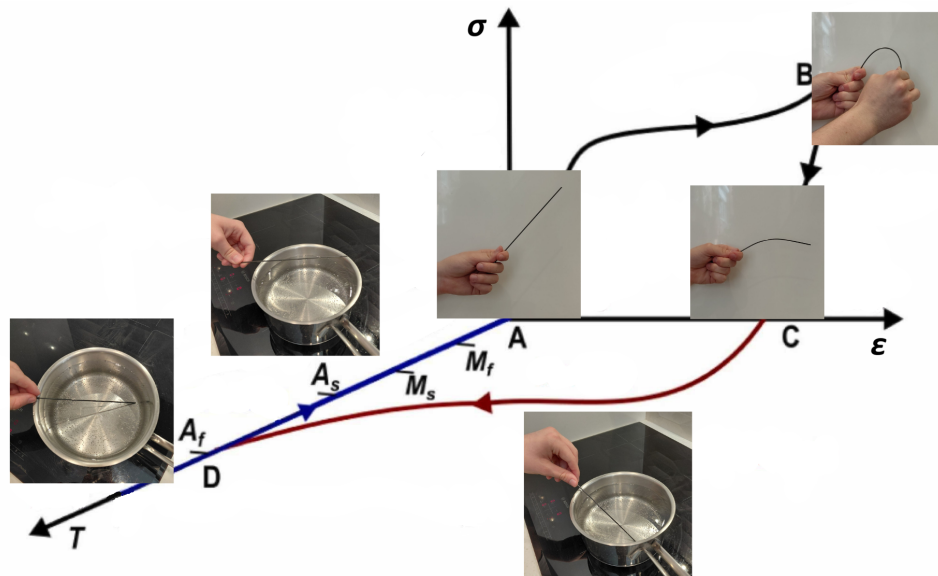
као и њихов ток промене. Разлог зашто постоје одвојени опсези почетка и краја за мартензит и аустенит, као и важност тока промене параметара стања су даље образложени у одељку 2.4.



Слика 2.8: (a) Графички и шематски приказ циклуса деформисања (A-B), загревања (C-D) и хлађења (D-A) нитинола. (b) Шематски приказ утицаја напрезања (Load) и грејања (Heating) на кристалну решетку. [1]

График са [слике 2.8\(а\)](#) приказује циклус A-B-C-D-A:

Сегмент	Процес	Пример
A-B	Деформација тела	Савијање жице
B-C	Уклањање деформишуће силе	Пуштање жице
C-D	Опоровак деформације загревањем	Стављање жице у врућу воду
D-A	Хлађење тела	Вађење жице из вруће воде



Слика 2.9: Визуелизација SME циклуса на примеру жице нитинола. Сlike прате сегменте циклуса по [табели изнад](#).

Промена нагиба криве A-B показује тренутак где долази до почетка близанчења, којим се прилагођава макроскопско деформацији система (образложено у [одељку 2.1.4](#)). Слично, промена нагиба криве C-D показује тренутак почетка прелаза мартензита у аустенит, који приближно одговара тачки A_s на T оси. Исто тако се A_f поклапа са тачком D, тј. тренутком тоталног опоравка деформације.

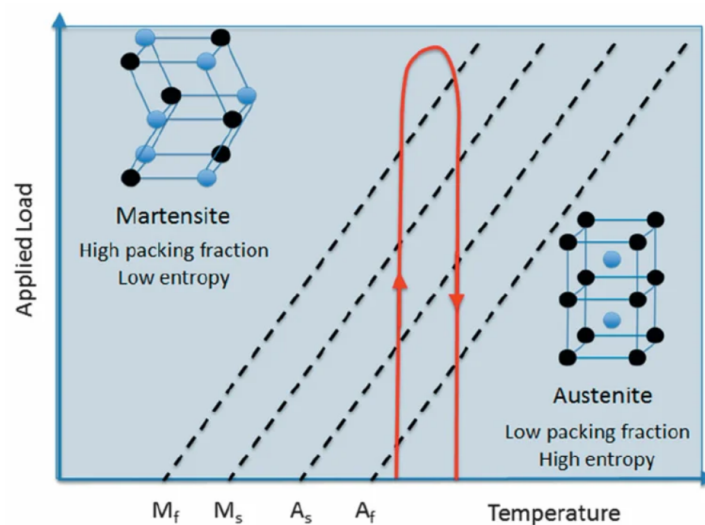
2.2.1 Супереластичност

Освртањем назад на график из [слике 2.8\(а\)](#), може се приметити и циклус O-E-O, који се одвија целим током изнад A_f . Такође се да увидети да су облици кривих O-E и E-O слични облицима кривих A-B и C-D. Та сличност је присутна јер су циклуси практично исте природе. Прецизније речено, може се повући паралела између O-E и A-B, као и између E-O и C-D.

Мартензит на датој температури има вишу границу слободне енергије од аустенита, тако да је при нормалним условима он нестабилнији. Међутим, када деформација аустениту додели довољно енергије да дође до границе слободне енергије

мартензита, аустенит ће проћи кроз мартензитну трансформацију, којом се формира мартензит оријентисан у смеру повољном у односу на смер деформације. Тиме је овај процес еквивалентан близанчењу из А-В. Међутим, пошто је на датој температури аустенит стабилнији од мартензита без присуства спољашњег утицаја, опоравак деформације повратном трансформацијом креће истог тренутка када слободна енергија падне назад испод мартензитне границе, што је скоро одмах при уклањању силе. Тело се тада враћа у почетно стање без загревања и хлађења. Зато еквиваленти за В-С и D-A не постоје у циклусу О-Е-О.

Пошто овакав процес испољава практично еластично својство због моменталног деловања силе опоравка, то својство је названо супереластичност (такође звано и псеудоеластичност).



Слика 2.10: Графички приказ супереластичног циклуса. [6]

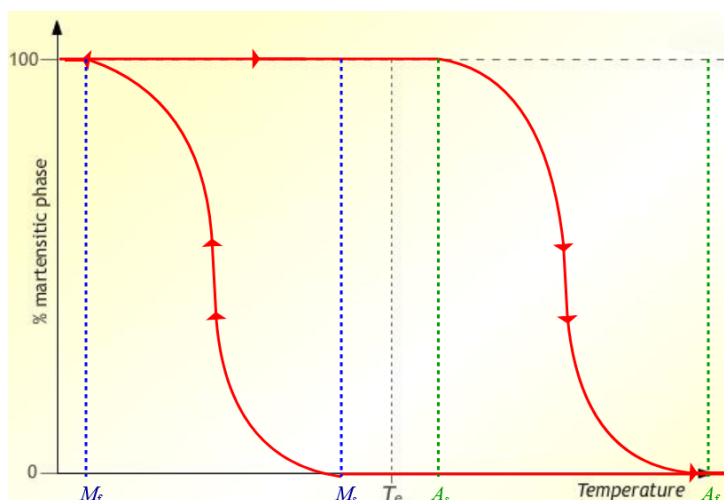
2.3 Хистеретично понашање SME

Посматрањем циклуса са [слике 2.8\(а\)](#) је приметно да криве А-В и С-Д, односно О-Е и Е-О нису исте. За разлику од графика стања обичног еластичног материјала, процеси напрезања и опоравка не прате исту путању.

Ова појава налаже да није могуће знати како ће се стање система мењати без знања о претходним стањима и променама истих. На пример, не може се знати колико ће напрезања додати одређена деформација супереластичне SMA без знања о томе на којој кривој циклуса О-Е-О и где на тој кривој се налази тренутно стање система. То је зато што, као што је већ речено, криве нису исте, а нису ни истог нагиба целом својом дужином.

Зависност система од претходног тока стања попут ове се назива хистерезис, а такав систем се назива хистеретичним. Може се појавити у различитим реверзи-

билним процесима, у случају SMA при мартензитним трансформацијама и близанчењу.



Слика 2.11: Графички приказ зависности процентуалног удела мартензита од температуре. Уочљива је хистеретична природа циклуса. [3]

Сама појава хистерезиса се објашњава енергетски, на нивоу јединичних ћелија решетке (подсетник на слободну енергију у одељку 2.1.2). Како енергија није потпуно равномерно расподељена у систему због унутрашњих енергија напрезања решетке и малих дефеката, одређене јединичне ћелије ће примити, односно отпустити довољно енергије за трансформацију раније, а неке касније. Стога вредности температуре почетка и краја трансформације нису исте.

График са слике 2.10 читко приказује хистеретичне криве циклуса реверзибилне мартензитне трансформације између почетних и крајњих температура трансформације. Међутим, указује и на још једну специфичност циклуса хистерезиса, што је непоклапање почетних температура трансформација са температуром уједначења слободних енергија аустенита и мартензита. Образложење те разлике лежи у енергетској баријери трансформације делова кристала, као и целе решетке. Решетка је у стању да истрпи одређену енергетску разлику од стабилније формације пре него што трансформација наступи. Зато SMA остаје у првобитној формацији и мало даље од T_e , све док енергетска разлика не дође до критичне тачке (M_s , односно A_s), када прелаз заправо креће.

Дубоко разумевање природе циклуса SME нуди прилику за софистициране манипулације материјалом по потребама примене. Тако је могуће да се SMA прецизно подеси за извршавање разних послова, од актуаторских до структурних. SMA разних својстава су већ у употреби на бројним местима, којих ће са временом бити и још више.

3 Потенцијал SMA за индустрију будућности

3.1 Досадашње примене SMA

SMA су већ доста тражене у разним дисциплинама, а место су нашле у авионима, аутомобилима, као и у биомедицинским уређајима. Истичу се, између осталог, по великој актуаторској снази за малу масу и величину, што омогућава развиће система на вишем нивоу, који не би били оствариви са стандардним електромагнетним актуаторима.

3.1.1 Примене у ваздухопловству

Ваздухопловство је једна од индустрија са највећом стопом интеграције SMA у нове системе. Коришћене су у многим структурним компонентама, које углавном имају исту сврху оптимизације аеродинамичности. Прецизније, имају функцију контролисане промене облика делова авиона, која служи за активну адаптацију на променљив проток ваздуха при турбулентним условима.

SMA су нашле употребу и у војном и у комерцијалном ваздухопловству. Са војне стране највећи пројекат који их користи је Smart Aircraft and Marine Propulsion System Demonstration (SAMPSON) програм, чија је идеја за адаптивне уводнике ваздуха базираним на SMA испробана на уводницима ваздуха F-15 ловачког авиона. Што се тиче комерцијалне употребе најуспешнији пример употребе SMA су шеврони варијабилне геометрије, који су били испробани летом Boeing 777-300ER авиона, а служили су да смање шум млазних мотора авиона.

3.1.2 Примене у биомедицини

Једно посебно значајно својство које имају одређене SMA, попут нитинола, јесте биокомпатибилност, што је способност да се материјал интегрише у биолошки систем без токсичности, упале или имуне реакције. Осим тога, нитинол показује и високу компатибилност са магнетном резонанцом и компјутеризованом томогра-

фијом. Тиме се отварају врата у читав свет могућности употребе SMA у биомедицинске сврхе.

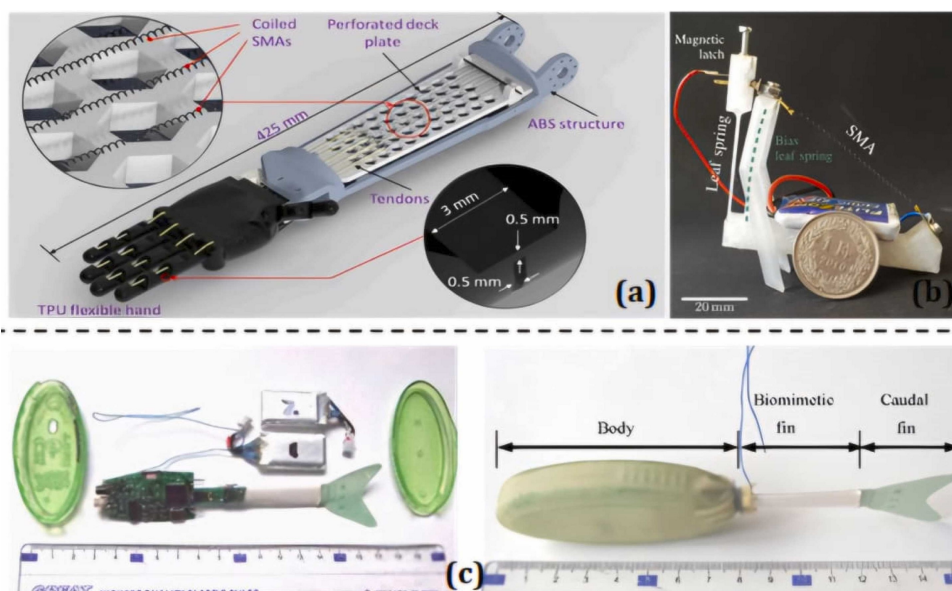
Главни принцип употребе нитинола за биомедицинске уређаје користи комбинацију савитљивости мартензита на собној температури и супереластичности аустенита на телесној температури. Тако се праве имплантати који могу да се у скупљеном облику, уз минималну инвазивност, лако убаце у тело, а онда да се у телу загреју и уз помоћ SME трансформишу у функционални облик.

Примери који су данас у активној употреби су стентови, који спречавају запушење крвних судова, и филтери доње шупље вене (IVC filter), који служе да заробе тромбове и зауставе их на путу до плућа. Међутим, има и других уређаја који користе SMA у областима попут ортопедије и неурохирургије.

3.2 Могућности за будуће примене

Примена SMA још треба да достигне свој пун потенцијал у већ наведеним областима, као и у многим другим. Међутим, најзанимљивија међу њима је роботика. Како је и она сама релативно нова област, развиће примене SMA у њој ће бити праћено и развићем ње саме.

Већ постоје бројни пројекти који на иновативне начине користе SMA као актуатор. Међу њима су роботске руке, роботи пузачи и роботске рибице (видети [слику 3.1](#)), који користе компактност SMA као актуатора.



Слика 3.1: (а) Роботска рука; користи танке опруге од SMA да би савијала прсте и зглоб шаке. [10] (б) Минијатурни робот пузач; користи SMA осцилатор за кретање. [11] (с) Роботска рибица; користи биомиметичко пераје на бази SMA. [12]

Може се увидети да је тренутан тренд који пројекти из роботике са применама

SMA прате биомиметика, односно биомимикрија. Она представља форму дизајнирања која се угледа на природне појаве и механизме. У случају SMA у роботизи, опруге од SMA се праве и користе тако да имитирају мишиће и друге покретачке механизме нађене код животиња. Сличност лежи у томе што је контракција SMA активирана електричним импулсом, као код мишића (само што SMA реагује термомеханички уместо биомеханички).

Приказани пројекти су још увек само докази концепта, без комерцијалне употребе. Међутим, са даљим развојем продукције и примене SMA, овако широк спектар примена ће сигурно бити врло користан, са употребом од подводног истраживања, све до биоелектричних протеза.

4 Закључак

Легуре које памте облик су изузетно занимљива група материјала за истраживање, а све што их чини посебним се своди на мартензитну трансформацију и њено деловање у комбинацији са својствима решетке легуре. Прецизније речено, своди се првенствено на специфично својство мартензитне трансформације, што је одржаност геометријског распореда атома кристалне решетке након трансформације, која омогућава потпун опоравак претходног стања решетке повратном трансформацијом.

Међутим, мартензитна трансформација код SMA не даје исти резултат као код осталих легура и метала, чије трансформације подлежу ефектима пластичних деформација. У комбинацији са близанчењем мартензита и термоеластичношћу SMA, она је у стању да потпуно опорави деформације макроскопске легуре. Овај феномен се назива ефектом памћења облика.

Откриће ефекта памћења облика и супереластичности као његове последице је заинтригирало многе гране индустрије, које су досад осмислиле многе концепте и теоретске употребе за та два феномена. Иако постоје примене SMA које су већ увелико у практичној употреби, већина идеја још није напустила нацртни папир.

Ова ситуација је међутим оправдана, јер рад са SMA не тече потпуно глатко. Главни проблем јесте чињеница да, упркос скоро савршеном опоравку деформација, дефекти у решетки могу да се с временом нагомилају у кристалу и ослабе повратну силу, а са тиме и ефективност легуре. Осим тога, брзина одзива актуаторске SMA је обично релативно спора, а и прецизно управљање самом трансформацијом у актуатору је, иако могуће, често компликовано.

Упркос томе, потенцијал примене SMA у индустрији је још увек велик. Многе примене су већ смишљене, а још више тек предстоји, само је потребно развити продукцију квалитетних SMA и њену скалабилност. Сигурно је да ће у блиској будућности легуре које памте облик, као и њима слични паметни материјали, бити стуб индустрије какав и заслужују да буду.

Литература

- [1] A. Ahmed, S. I. Pranto, M. H. Al Faruq, M. T. T. Kasfia, A. Bin Rashid, *A comprehensive overview of shape memory alloys: Recent advances in fabrications, properties, and applications for next-generation smart systems*, Next Materials, Vol. 10, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2025.101441>
- [2] S. Banerjee, P. Mukhopadhyay, *Chapter 4 – Martensitic Transformations*, u: Phase Transformations, Pergamon Materials Series, Vol. 12, Pergamon, 2007, str. 257--376. [https://doi.org/10.1016/S1470-1804\(07\)80057-5](https://doi.org/10.1016/S1470-1804(07)80057-5)
- [3] University of Cambridge, *DoITPoMS Teaching and Learning Package – Superelasticity and Shape Memory Alloys*, <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/superelasticity/>, приступљено 27.5.2026.
- [4] F. G. Caballero, *Microstructure Evolution in Steels*, u: R. B. Hetnarski (ur.), Encyclopedia of Thermal Stresses, Springer Netherlands, Dordrecht, 2014, str. 3056--3065. https://doi.org/10.1007/978-94-007-2739-7_934
- [5] S. Zhang, P. G. McCormick, *Thermodynamic analysis of shape memory phenomena — I. Effect of transformation plasticity on elastic strain energy*, Acta Materialia, Vol. 48, No. 12, str. 3081--3089, 2000. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(00\)00120-8](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(00)00120-8)
- [6] A. Chauhan, S. Patel, R. Vaish, C. Bowen, *A review and analysis of the elasto-caloric effect for solid-state refrigeration devices: Challenges and opportunities*, MRS Energy & Sustainability, Vol. 2, 2015. <https://doi.org/10.1557/mre.2015.17>
- [7] B. Li, Y. Shen, Q. An, *Structural origin of reversible martensitic transformation and reversible twinning in NiTi shape memory alloy*, Acta Materialia, Vol. 199, str. 240--252, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.08.039>
- [8] M. Koyama, M. Seo, K. Nakafuji, K. Tsuzaki, *Stacking fault aggregation during cooling composing FCC--HCP martensitic transformation revealed by in-situ electron channeling contrast imaging in an Fe-high Mn alloy*, Science and

- Technology of Advanced Materials, Vol. 22, No. 1, str. 135–140, 2021. <https://doi.org/10.1080/14686996.2021.1877570>
- [9] F. T. Calkins, J. H. Mabe, G. W. Butler, *Boeing's variable geometry chevron: morphing aerospace structures for jet noise reduction*, u: Smart Structures and Materials 2006: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies, SPIE, Vol. 6171, 2006. <https://doi.org/10.1117/12.659664>
- [10] Q. Y. Hamid, W. Z. Wan Hasan, M. A. Azmah Hanim, A. A. Nuraini, M. N. Hamidon, H. R. Ramli, *Shape memory alloys actuated upper limb devices: A review*, Sensors and Actuators Reports, Vol. 5, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.snr.2023.100160>
- [11] S. Thomas, P. Germano, T. Martinez, Y. Perriard, *An untethered mechanically-intelligent inchworm robot powered by a shape memory alloy oscillator*, Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 332, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.113115>
- [12] Z. Wang, G. Hang, J. Li, Y. Wang, K. Xiao, *A micro-robot fish with embedded SMA wire actuated flexible biomimetic fin*, Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 144, No. 2, str. 354–360, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2008.02.013>

Захвалница

Желео бих да се захвалим др Душку Латасу са Физичког факултета, пре свега за несебичну подршку коју ми је пружио током истраживања и писања рада, али и за подстицање моје знатижеље кроз своју наставу, што ме је и довело до одабира ове теме. Његова посвећеност физици и не свакидашње наставне методе су били најинспиративнији део мог средњошколског образовања. Велика ми је част имати га за професора и ментора.