

3D ШТАМПАНЕ МЈЕРНЕ ТРАКЕ**3D PRINTED STRAIN GAUGES**Драгана Тешовић, *Факултет техничких наука, Нови Сад***Област – ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И РАЧУНАРСТВО**

Кратак сажај – У раду је приказана фабрикација и карактеризација 3D штампаних мјерних трака. Посебан акценат стављен је на спрезање мјерне траке са инструментом. За мјерење промјене отпорности коришћен је дигитални мултиметар. Такође, приказан је и начин за одређивање мјерног фактора мјерне траке.

Кључне речи: Мјерне траке, мјерни фактор, 3D штампа.

Abstract – The paper presents the fabrication and characterization of 3D printed strain gauges. Special emphasis is placed on the integration of the strain gauge with the instrument. A digital multimeter was used to measure changes in resistance. The paper also outlines the method for determining the gauge factor of the strain gauge.

Keywords: Strain gauge, gauge factor, 3D printing.

1. УВОД

Мјерења силе, притиска и напрезања представљају мјерења која су од великог значаја у многим гранама индустрије и научним дисциплинама, као што су медицина, роботика, грађевинарство, аутомобилска индустрија итд. Силе и напрезања мјере се веома често јер су важни параметри система који се користе у процесима управљања или чак могу бити индикатори непредвиђених оштећења и најава будућих озбиљнијих кварова, који указују на животни вијек система.

Мјерна трака (енг. *strain gauge*) чини отпорнички сензор који се користи за мјерење деформација. Постављају се на површину објекта који се испитује, а свака деформација објекта услед његовог оптерећења доводи до одговарајуће деформације мјерне траке, што све заједно омогућује мјерење промјене отпорности траке. На слици 1. приказан је изглед мјерне траке израђене технологијом 3D штампе.



Слика 1. Изглед 3D штампане мјерне траке

НАПОМЕНА:

Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Јован Бајић, ванр. проф.

Задатак овог рада јесте карактеризација и тестирање мјерне траке реализоване примјеном технологије 3D штампе. Главна предност коришћења 3D штампе јесте могућност израде у више слојева, чиме се директно утиче на отпорност. Поред тога, постоји могућност штампање више трака истовремено на једном супстрату.

1.1. Деформације чврстих тијела под дејством силе

Дејством силе, интензитета F , на чврсто тијело настаје напрезање. Механички напон дефинисан је количником силе (F) и површине на коју дјелује та сила (S) и по димензији једнак је притиску (P_a). Релативно издужење тијела, које је последица напрезања, назива се дилатација. Дилатација (деформација) може бити позитивна, када се тијело издужује или негативна, када тијело трпи сабијање. Величина дилатације зависи од силе која дјелује на тијело, али и од еластичних својстава материјала од кога је тијело направљено.

1.2. Типови мјерних трака

Постоје два типа мјерних трака – слободне и лијеplене мјерне траке. Слободне мјерне траке представљају распету жицу између рамова који се могу помјерати један у односу на други, доводећи до напрезања слободне мјерне траке. Други тип мјерних трака јесу лијеplене мјерне траке. Нарезана односно нагрижена фолија, депоновани филм или метална жица причвршћује се на подлогу са којом се заједно лијеplе на површину материјала који се испитује [1].

Од материјала који се користе за израду мјерних трака, захтијева се да имају велику специфичну отпорност, што мањи температурни коефицијент и велику осјетљивост. На основу врсте материјала који се користи за израду, мјерне траке могу бити полупроводничке и металне.

За израду полупроводничких мјерних трака најчешће се користи силицијум, Si , који се обликује у мале траке које се излажу истезању. При томе долази до повећања дужине траке и то је један од узрока промјене њене отпорности. Други узрок јесте заправо промјена специфичне отпорности силицијума. Овај ефекат је знатно важнији код полупроводничких мјерних трака од првог, јер је промјена отпорности због специфичне отпорности вишеструко већа од промјена отпорности услед промјене дужине траке.

Металне мјерне траке мјере помјерање на основу промјене електричне отпорности при промјени дужине отпорника. Трака се састоји од отпорне жице савијене

и затим постављене на савитљиву подлогу облика траке. Уколико се трака истеже, повећава се дужина жице, а тиме и отпорност. Отпорност допунски расте и услед промјене специфичне отпорности, али је први ефекат доминантнији.

1.4. Мјерење силе и напрезања

Мјерне траке лијепе се на тијело која трпе напрезања и, захваљујући специјалним смолама за обезбјеђивање квалитетног налијегања, траке су изложене готово идентичној дилатацији као и само тијело. Под дејством силе, мјерна трака се истеже или сабија, чиме се мијењају њена дужина и попречни пресјек.

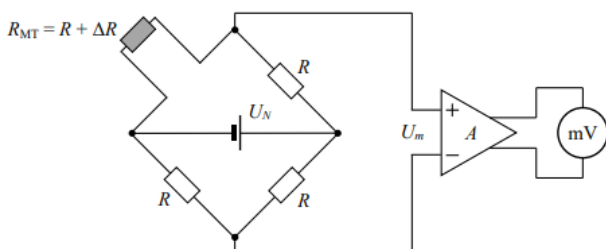
У општем случају, за произвољан отпорник било би веома тешко одредити у каквој сразмјери се мијењају дужина и попречни пресјек, када на тај отпорник дјелује сила. Међутим, савремени технолошки процеси омогућавају производњу мјерних трака код којих постоји стална (константна) сразмјерност између дилатације и промјене отпорности, која се назива осјетљивост мјерне траке или мјерни фактор, одређена изразом (1):

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} \quad (1)$$

Осјетљивост мјерне траке зависи од изабраног материјала, кроз Поасонов коефицијент и промјене електричне отпорности полупроводника или метала услед механичке деформације кроз пиезорезистивни коефицијент.

Типичан мјерни фактор за металне мјерне траке је око 2, док је за полупроводничке мјерне траке већи од 150.

Да би се могле мјерити мале промјене отпорности погодније је везати мјерну таку у мјерни мост, а потом мјерити напон мјерне дијагонала моста [2]. За веома мала напрезања и напон мјерне дијагонала је мали, па га је прије довођења на инструмент, некада потребно додатно појачати колом са операционим појачавачем, као на слици 2.



Слика 2. Везивање једне мјерне траке и три стална отпорника у мјерни мост [2]

Мјерење се обавља тако што се мост доводи у равнотежу када је трака ненапрегнута (када нема дилатације). Да би се то остварило, стални отпорници у гранама моста морају имати једнаку отпорност као и ненапрегнута мјерна трака. Приликом дјеловања силе и дилатације мјерне траке, отпорност мјерне траке ће се промијенити за неку вриједност ΔR и мост ће се раздесити.

2. ТЕХНОЛОГИЈА 3D ШТАМПЕ

Технологија 3D штампе, позната као адитивна производња, омогућава стварање физичких објеката, слој по слој, користећи дигиталне моделе. 3D штампа може се замислити као штампа танких хоризонталних слојева. Ти слојеви представљају хоризонтални пресјек предмета. Производи који се 3D штампашу могу бити од различитих материјала, од пластике, преко керамике до метала.

2.1. 3D штампачи

3D штампачи стварају тродимензионалне предмете од дигиталног фајла тако што их граде слој по слој, узастопно, све док предмет у потпуности није готов. Сваки слој је прецизан, танко сјечен, хоризонтални пресјек објекта који настаје. Изглед 3D штампача приказан је на слици 3.



Слика 3. Изглед 3D штампача

3D штампач састоји се од механичке конструкције штампача са актуаторима, материјала за штампање, врућег краја, топлог кревета, млазнице, истискивача филамента, интерфејса са корисником (екран) и управљачке електронике [3].

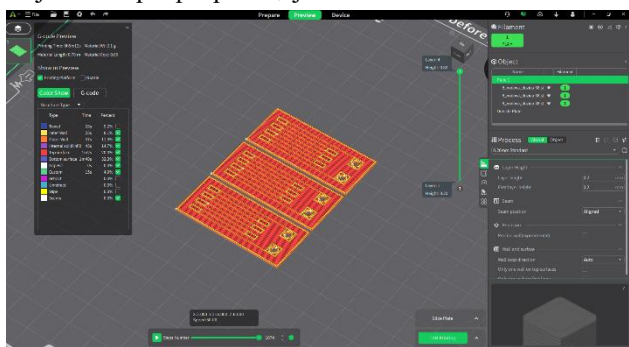
Када постоји идеја како би прототип за 3D штампање могао да изгледа, потребно је направити модел у неком од софтвера за 3D моделовање. Неки од бесплатних комерцијално доступних алата су: *Tinkercad*, *ScatchUp*, *123D Design*, *FreeCAD*, *AutoCAD*, *OnShape*, *Blender*. *STL* датотека чува информације о 3D моделима. Овај формат описује само геометрију површине тродимензионалног објекта без представљања боје, текстуре или других уобичајених атрибута 3D модела. *STL* датотеке обично су генерисане програмом за аутоматско пројектовање (*CAD*), као крајњи производ процеса 3D моделовања. „*stl*“ је екстензија датотеке *STL* формата датотеке.

Софтвери за припрему 3D штампе који долазе уз 3D штампаче не могу да направе 3D модел онога што се штампа већ само служе за [4]:

- позиционирање и оријентацију 3D модела у радном простору штампача,
- генерисање G-кода за путању кретања главе/дизне штампача,
- умножавање комада за штампу више истовјетних комада у једном процесу,
- дефинисање параметара штампе – дебљина зидова, проценат испуне, геометрија испуне, облик потконструкције, итд.

GCODE датотека садржи наредбе у G-коду, који је језик који се користи да опише како 3D штампач треба да штампа одређени 3D модел. Она чува команде у обичном тексту, при чему сваки ред представља другачију наредбу, као што су брзина штампања којом треба да штампа одређени слој, температура на којој треба да се постави кревет и истискивач филамента и гдје би се дијелови штампања требали кретати.

Након припремљеног 3D модела, слика 4, може се прећи на израду. За израду супстрата, на који се штампа NinjaTek EEL проводни филамент, користио се PLA филамент. Параметри штампе који су се подешавали при раду јесу температура кревета од 60°C, која остаје иста за оба филамента, температура PLA филамента од 220°C и температура проводног филамента од 230°C. Број водова, дужина, ширина и дебљина водова чине параметре мјерне траке који су се мијењали при фабрикацији.



Слика 4. Модел slice-ован у софтверском алату

3. РЕЗУЛТАТИ ТЕСТИРАЊА

Поглавље 3 посвећено је процесу практичног тестирања функционалности и анализи добијених резултата.

Табела 1. Параметри мјерне траке и отпорности

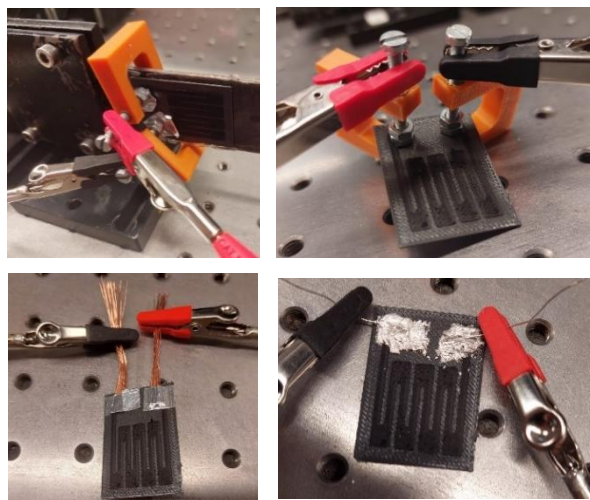
Параметри	Отпорност [kΩ]
Број водова: 6	150.1
Број водова: 8	158.5
Број водова: 10	191.8
Број водова: 12	205.8
Дужина вода: 34mm	176.5
Дужина вода: 38mm	239.5
Дужина вода: 42mm	250.1
Ширина вода: 1.2mm	115
Ширина вода: 1.6mm	90.1
Ширина вода: 2mm	52.7
Дебљина вода: 0.2mm	158.5
Дебљина вода: 0.4mm	61.3
Дебљина вода: 0.6mm	39.81
Дебљина вода: 0.8mm	29.98

Као што је већ поменуто, различити параметри мјерне траке су се мијењали па самим тим и њена отпорност, што је приказано у табели 1. Тестирања су вршена на

различитим поставкама, односно на различитим начинима мјерења отпорности мјерне траке.

У зависности од начина спрезања мјерне траке са дигиталним мултиметром, како би се измјерила отпорност, долази до промјене укупне отпорности саме траке. У наставку ће бити приказана четири начина остваривања контаката између мјерне траке и инструмента.

На слици 5. приказана су четири начина мјерења отпорности мјерне траке: мјерна трака залијепљена на метални профил, мјерна трака директно везана за сонде дигиталног мултиметра, мјерна трака са лицнастом жицом и мјерна трака са термалном пастом.



Слика 5. Поставке за мјерење отпорности

Посматра се промјена отпорности у зависности од остварених контаката, у интервалу од 20 минута, са биљежењем отпорности на сваких 5 минута.

Резултати мјерења за сва четири начина приказани су у табели 2.

Табела 2. Резултати мјерења

	Први начин	Други начин	Трећи начин	Четврти начин
t [min]	R [kΩ]	R [kΩ]	R [kΩ]	R [kΩ]
0	111.88	74.12	91.12	552
5	109.72	73.25	84.84	536
10	107.39	73.16	84.47	527
15	106.22	73.11	83.79	535
20	105.81	73.11	83.64	529

График 1. приказује промјене отпорности у току времена за сва четири описана начина мјерења.

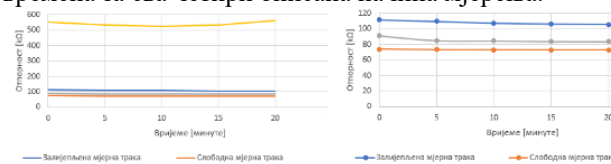


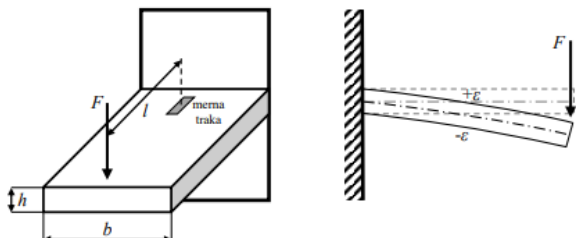
График 1. Промјена отпорности током времена

Може се закључити да мјерење промјене отпорности има најбоље резултате уколико се користи поставка мјерне траке са лицнастом жицом. Резултати добијени на тај начин приближно су константни током времена и приближни номиналној вриједности отпорности тестиране траке (90.1kΩ, ширина вода 1.6mm). Поставка мјерне траке са термалном пастом даје

најлошије резултате, гдје се читава отпорност која је вишеструко већа од отпорности саме мјерне траке.

3.1. Одређивање мјерног фактора

Осјетљивост мјерне траке или мјерни фактор GF (енг. *gauge factor*) представља се као релативна промјена отпорности за дато напрезање. Дјеловањем силе на конзолу, на чијем другом крају се налази мјерна трака, долази до промјене отпорности траке, слика 8.



Слика 8. Дјелство силе на конзолу [2]

На основу дјеловања силе, за траку чија је дужина водова 42mm и савијање у опсегу до 20mm, са кораком од 5mm, добијају се промјене отпорности приказане у табели 3.

Савијање [mm]	Отпорност [kΩ]
0	273.3
5	278.6
10	286.3
15	294.1
20	301.6

Табела 3. Промјена отпорности за различита напрезања

Како би се одредио мјерни фактор, неопходно је одредити напрезање траке. Напрезање се одређује помоћу израза (2):

$$\varepsilon = \frac{6(l - z)\delta h}{4l^3} \quad (2)$$

гдје је l дужина конзоле, z растојање мјерне траке од фиксираног дијела, δ савијање, h дебљина конзоле. На основу одређеног напрезања, мјерни фактор се рачуна помоћу израза (3):

$$GF = \frac{\Delta R}{R} * \frac{1}{\varepsilon} \quad (3)$$

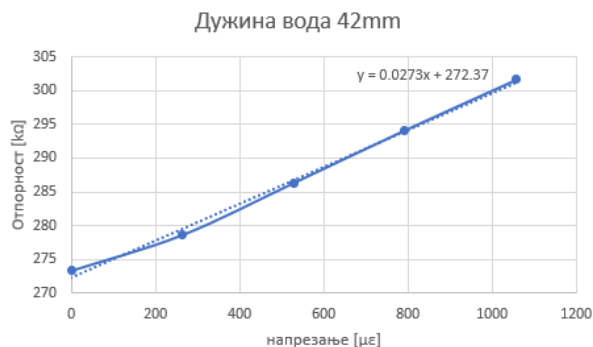


График 2. Одређивање мјерног фактора

На графику 2. приказана је зависност отпорности од напрезања. Мјерни фактор у овом случају има

вриједност $GF=100$. Честице унутар проводног филамента, коришћеног за водове и контакте, мијењају специфичну отпорност која доминира у овом случају, због свог различитог распореда.

4. ЗАКЉУЧАК

Првобитни циљ који је постављен у овом раду била је фабрикација и карактеризација 3D штампаних мјерних трака, али и осмишљање мјерне поставке за тестирање трака. Сами контакти доста утичу на отпорност траке, па је неопходно пажљиво бирање поставке за тестирање.

С обзиром на то да се приликом тестирања добијао мјерни фактор чија вриједност је већа од очекиване, може се закључити да пиезоэффект није занемарљив. На отпорност трака такође утиче и начин налијегања филамента приликом саме израде.

5. ЛИТЕРАТУРА

- [1] <https://www.optolab.ftn.uns.ac.rs/images/NASTAVA/SIA/files/predavanja/4-merenje-sile-pritiska-i-naprezanja.pdf> (приступљено у јуну 2024.)
- [2] http://www.kelm.ftn.uns.ac.rs/literatura/mut/10_Merenje_sile_i_naprezanja.pdf (приступљено у јуну 2024.)
- [3] <https://print24.com/rs/journal/osnove-stampanja/3d-stampanje> (приступљено у јулу 2024.)
- [4] https://solbins.com/en_US/3dstampa-3dskeniranje/softveri-za-3d-stampu-i-3d-skeniranje (приступљено у августу 2024.)

Кратка биографија:



Драгана Тешовић рођена је у Фочи 1999. год. Дипломски рад на Факултету техничких наука из области Електротехнике и рачунарства – Примењена електроника одбранила је 2022.год.
контакт: tesovicdragana195@gmail.com