

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ

Милош М. Петровић

ИСПИТИВАЊЕ КОМПОЗИТНИХ  
МАТЕРИЈАЛА ПОМОЋУ УГРАЂЕНИХ  
ФИБЕРОПТИЧКИХ СЕНЗОРА  
ПРИЛИКОМ УДАРА КОНТРОЛИСАНОМ  
ЕНЕРГИЈОМ

докторска дисертација

Београд, 2016.

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING

Miloš M. Petrović

COMPOSITE MATERIALS TESTING  
USING EMBEDDED FIBEROPTIC  
SENSORS BY CONTROLLED ENERGY  
IMPACT

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2016.

Ментор:                    др Пеђа Михаиловић, ванредни професор  
Електротехнички факултет, Универзитет у Београду

Чланови комисије: др Милан Тадић, редовни професор  
Електротехнички факултет, Универзитет у Београду

др Весна Радојевић, редовни професор  
Технолошко-металуршки факултет, Универзитет у Београду

др Слободан Петричевић, ванредни професор  
Електротехнички факултет, Универзитет у Београду

др Јован Елазар, ванредни професор  
Државни универзитет у Новом Пазару

Датум одбране: (накнадно)

# ИСПИТИВАЊЕ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРИЈАЛА ПОМОЋУ УГРАЂЕНИХ ФИБЕРОПТИЧКИХ СЕНЗОРА ПРИЛИКОМ УДАРА КОНТРОЛИСАНОМ ЕНЕРГИЈОМ

## Апстракт

Фиброоптички сензори (ФОС) користе се последњих 30 година за праћење стања структура. Већина савремених истраживања односе се на решења на бази Брагових решетке, решетки са дугом периодом, интерферометарске сензоре или оптичку рефлектометрију у временском домену, имајући у виду значајно бољу осетљивост ових решења у поређењу са интензитетским. Са друге стране, интензитетски сензори су јефтинији и њихово испитивање је технички мање захтевно.

У оквиру ове тезе испитивана је употреба унутрашњег интензитетског ФОС за праћење стања структуре приликом удара контролисаном енергијом. Утврђена је корелација између дубине модулације интензитета светлости и ударне силе на различитим температурама и за различите типове материјала. Композитни материјал са полиетиленском матрицом, ојачањем у виду стакленог мата и уграђеним телекомуникационим влакнима подвргнут је ударима, коришћењем уређаја за тестирање ударима контролисане енергије, а који је служио као калибрациони инструмент. Преносна функција сензора генерисана је на основу повезивања дубине модулације интензитета светлости, ударне силе и растојања оптичког влакна од места удара. Презентовани су услови за валидност преносне функције. Предложена је ортогонална мрежа оптичких влакана за детекцију опасних удара и израчунато растојање између влакана у тој мрежи за посматрани материјал. Такође је предложена калибрациона процедура и алгоритам за одређивање места удара. Метод прорачуна ударне силе, промене импулса ударача и места удара проверен је приликом поновљених удара на претходно калибрисаном узорку. Сензор има могућност пружања информација о времену удара, а може и генерисати аларм када је сила већа од граничне вредности силе након које настају оштећења у материјалу. Утврђено је да у процесу израде узорка са полиетиленском матрицом и стакленим матом као ојачањем, долази до

хомогенизације оптичког влакна са решетком са дугом периодом и да нема промене спектра при примењеном статичком оптерећењу. Показано је да пластично оптичко влакно уграђено у влакнима ојачан узорак са епоксидном матрицом, као унутрашњи интензитетни ФОС, поседује инфериорну осетљивост у односу на телекомуникационо влакно.

Кључне речи: фиброоптички сензори, композитни материјали, тестирање ударом, калибрација фиброоптичких сензора

Научна област: електротехника

Ужа научна област: физичка електроника - фиброоптички сензори

УДК број: 621.3

# COMPOSITE MATERIALS TESTING USING EMBEDDED FIBEROPTIC SENSORS BY CONTROLLED ENERGY IMPACT

## **Abstract**

Fiberoptic sensors (FOS) have been used for structural health monitoring for decades. Most of the recent research is dedicated to fiber Bragg grating, long period grating (LPG), interferometric and OTDR based solutions due to their sensitivity superiority when compared to intensity FOS. On the other hand, intensity FOS is less expensive and sensor interrogation is significantly less demanding.

In this thesis, the use of intrinsic intensity fiber-optic sensors for structural health monitoring was investigated. The correlation between the light intensity modulation depth and the impact force was determined under different testing temperatures and for different types of samples. Polyethylene-based composite samples with glass mat reinforcement and embedded telecommunication fibers were subjected to impact using high-speed puncture impact tester as a calibration device. Transfer function of the sensor was generated by linking the light intensity modulation depth with the impact force and the impact point to fiber distance. Conditions for transfer function validity were presented. To detect any possible dangerous impact, a net of crossed fibers was proposed and the net spacing for the given material was calculated. Appropriate non-damaging calibration procedure was proposed, as well as the algorithm for locating the impact point. The method for calculating the impact force, the projectile momentum change, and the place of impact was verified by consecutive strikes on the previously calibrated sample. The sensor can also provide information on the time of the impact and an alarm signal if the force exceeds the damaging threshold force. It was determined that the optical fiber with LPG homogenizes when embedded during material processing in polyethylene-based composite sample with glass mat reinforcement and that there is no difference in sensor response under static loading. When used as an intrinsic intensity FOS, the plastic optical fiber, embedded in epoxy-

based composite sample with glass fiber reinforcement, was shown to provide inferior sensitivity compared to telecommunication fibers.

Keywords: fiberoptic sensors, composite materials, impact testing, fiberoptic sensor calibration

Scientific area: electrical engineering

Scientific subarea: physical electronics - fiberoptic sensors

UDC number: 621.3

## Садржај

Списак илустрација.....	v
Списак табела .....	ix
1. Увод.....	1
2. Композитни материјали.....	4
2.1. Подела композитних материјала по типу ојачања .....	5
2.2. Подела композитних материјала по типу матрице .....	6
2.3. Влакнима ојачани полимерни композити .....	7
2.3.1. Полимерна матрица.....	7
2.3.2. Влакна.....	9
2.3.3. Структура влакном ојачаног полимерног композита .....	11
2.3.4. Механизам преноса оптерећења са полимерне матрице на влакно .....	12
2.4. Типови оштећења у влакнима ојачаним композитним материјалима.....	13
2.5. Тестирање композитних материјала ударом.....	14
2.5.1. Шарпијево клатно.....	15
2.5.2. Тестирање тегом који слободно пада .....	16
2.5.3. Тестирање ударима контролисане енергије.....	17
2.5.4. Пост-импакт тестирање .....	17
2.6. Рециклабилни и биоразградљиви материјали у процесу производње композита .....	18
3. Оптичка влакна.....	19
3.1. Подела оптичких влакана .....	21
3.1.1. Подела према материјалу од кога су влакна направљена.....	21
3.1.2. Подела према начину промене индекса преламања.....	22



3.1.3.	Подела према броју модова .....	22
3.2.	Намена оптичких влакана .....	23
4.	Фиброоптички сензори .....	26
4.1.	Типови фиброоптичких сензора.....	27
4.1.1.	Подела ФОС према месту модулације .....	27
4.1.2.	Подела ФОС према просторној расподели мерене величине ....	27
4.1.3.	Подела ФОС према типу модулације .....	28
4.2.	Принцип рада ФОС .....	29
4.2.1.	Унутрашњи интензитетни ФОС.....	29
4.2.2.	ФОС са уграђеним Браговим решеткама и решеткама са дугом периодом .....	32
4.2.3.	Друге врсте ФОС .....	35
4.3.	ФОС и композитни материјали .....	37
4.3.1.	Интензитетни ФОС и композитни материјали.....	38
4.3.2.	Брагове решетке и композитни материјали .....	39
4.3.3.	Остали ФОС и композитни материјали.....	41
4.4.	Утицај уграђеног оптичког влакна на карактеристике композитног материјала.....	41
4.5.	Припрема оптичког влакна за уградњу у композитни материјал....	43
5.	Поставка експерименталног рада .....	46
5.1.	Полазне хипотезе.....	46
5.2.	Припрема узорака.....	47
5.2.1.	ПЕВГ-СМ узорак - рециклирани полиетилен високе густине, стаклени мат и стандардно телекомуникационо влакно .....	48
5.2.2.	ЕП-СВ-И узорак - епоксидна матрица са преимпрегнираним стакленим влакнима и стандардно телекомуникационо влакно .....	53

5.2.3.	ЕП-СВ-К узорак - епоксидна матрица, стаклена влакна и пластично оптичко влакно.....	55
5.2.4.	ПЕВГ-СМ-ЛПГ узорак - рециклирани полиетилен високе густине, стаклени мат и оптичко влакно са решетком са дугом периодом .....	59
5.3.	Инструментација .....	60
5.3.1.	Оптоелектронски систем за испитивање интензитетних сензора у ПЕВГ-СМ композитима.....	60
5.3.2.	Оптоелектронски систем за испитивање интензитетног сензора у ЕП-СВ-К композитима.....	64
5.3.3.	Инструмент за тестирање узорака ударима контролисане енергије.....	65
6.	Резултати и дискусија .....	69
6.1.	Временски одзив интензитетног сензора.....	69
6.1.1.	Тестирање ударом на собној температури.....	69
6.1.2.	Тестирање ударом на сниженој температури.....	74
6.1.3.	Закључци на основу посматрања временског одзива сензора ...	77
6.2.	Одређивање преносне функције интензитетног сензора.....	78
6.3.	Провера испуњености услова за калибрацију интензитетног сензора .....	84
6.4.	Праћење стања структуре .....	87
6.4.1.	Одређивање растојања од места удара.....	90
6.4.2.	Мрежа уграђених оптичких влакана за праћење стања структуре .....	93
6.5.	Испитивање спектра оптичког сигнала у сензору на бази решетке са дугом периодом .....	94
6.6.	Испитивање интензитетног сензора на бази пластичног оптичког влакна.....	98
6.7.	Отпорност оптичких влакана на ударе.....	101

7. Закључак .....	103
Литература .....	120

## Списак илустрација

<b>Слика 2.1.</b> Основни делови у структури композитног материјала .....	4
<b>Слика 2.2.</b> Подела композитних материјала по типу ојачања .....	5
<b>Слика 2.3.</b> Структура ламинарног композита: а) унидирекционе ламине, б) мултидирекционе ламине грађе (0/90°) .....	12
<b>Слика 2.4.</b> Дијаграм нормални напон-деформација за полимерни композит са дуктилном матрицом и кртим влакнима: а) карактеристике материјала, б) карактеристике композита .....	13
<b>Слика 2.5.</b> Тестирање Шарпијевим клатном .....	15
<b>Слика 2.6.</b> Пример тестирања помоћу тега који слободно пада .....	16
<b>Слика 2.7.</b> Импакт тестер за ударе контролисане енергије.....	17
<b>Слика 3.1.</b> Структура оптичког влакна .....	19
<b>Слика 3.2.</b> Уздужни попречни пресек и принцип простирања светлости .....	20
<b>Слика 4.1.</b> Конфигурација интензитетног сензора трансмисионог типа .....	29
<b>Слика 4.2.</b> Структура периодичног микробендера .....	31
<b>Слика 4.3.</b> Подужна промена индекса преламања код оптичких влакана са Браговом решетком .....	32
<b>Слика 4.4.</b> Спектар рефлектоване светлости код униформне Брагове решетке дужине 1 cm .....	33
<b>Слика 4.5.</b> Мултимодно оптичко влакно са акрилном превлаком (пречника 600 $\mu\text{m}$ ) уграђено ортогонално на карбонско влакнасто ојачање у епоксидном композиту .....	42
<b>Слика 5.1.</b> Слој рециклираног полиетилена високе густине - матрица .....	49
<b>Слика 5.2.</b> Слој стакленог мата - ојачање .....	50
<b>Слика 5.3.</b> Хидрауличка топла преса за припрему узорака .....	50

<b>Слика 5.4.</b> Структура ПЕВГ-СМ композита.....	51
<b>Слика 5.5.</b> Позиционирање и уградња оптичких влакана у ПЕВГ-СМ композит	52
<b>Слика 5.6.</b> Узорак са преимпрегнираним стакленим влакнима и уграђеним стандардним телекомуникационим влакнима .....	54
<b>Слика 5.7.</b> Слабљење пластичног оптичког влакна у зависности од таласне дужине светлости .....	56
<b>Слика 5.8.</b> Слој ребрастог картона у ЕП-СВ-К композиту .....	56
<b>Слика 5.9.</b> Слој стаклених влакана у ЕП-СВ-К композиту .....	57
<b>Слика 5.10.</b> Вакуумирање узорка ЕП-СВ-К.....	58
<b>Слика 5.11.</b> Позиционирање влакна са решетком са дугом периодом у ПЕВГ-СМ-ЛПГ композиту .....	59
<b>Слика 5.12.</b> Блок шема система за испитивање сензора.....	61
<b>Слика 5.13.</b> Уређај са уграђеним емитерским диодама - светлосни извор.....	61
<b>Слика 5.14.</b> Уређај са уграђеним фотодиодама - фотодетектор .....	62
<b>Слика 5.15.</b> Електрична шема фотодетектора са пет пријемних канала.....	63
<b>Слика 5.16.</b> Коло трансимпедансног појачавача.....	65
<b>Слика 5.17.</b> Унутрашњост коморе импакт тестера Shimadzu Hydroshot HITS-P10 .....	66
<b>Слика 5.18.</b> Технички цртеж унутрашњости коморе импакт тестера Shimadzu Hydroshot HITS-P10 .....	66
<b>Слика 5.19.</b> Термостатичка комора (лево) и спољашњост импакт тестера .....	67
<b>Слика 6.1.</b> Узорак ПЕВГ-СМ-1 пре удара.....	69
<b>Слика 6.2.</b> Временски дијаграм силе и излазног напона на другом влакну током првог удара брзином 1 m/s - узорак ПЕВГ-СМ-1 .....	70
<b>Слика 6.3.</b> Временски дијаграм силе и излазног напона на другом влакну током удара брзином 2 m/s - узорак ПЕВГ-СМ-1 .....	71
<b>Слика 6.4.</b> Узорак ПЕВГ-СМ-1 након седмог удара брзином од 3 m/s .....	71
<b>Слика 6.5.</b> Узорак ЕП-СВ-И-1 пре удара .....	72

<b>Слика 6.6.</b> Временски дијаграм силе и излазног напона на другом влакну током првог удара брзином 1 m/s - узорак ЕП-СВ-И-1 .....	72
<b>Слика 6.7.</b> Узорак ЕП-СВ-И-1 након седмог удара брзином од 3 m/s .....	73
<b>Слика 6.8.</b> Временски дијаграм силе и излазног напона на другом влакну током трајања првог удара - узорак ПЕВГ-СМ-2 .....	74
<b>Слика 6.9.</b> Временски дијаграм силе и излазног напона на првом влакну током трајања првог удара - узорак ЕП-СВ-И-2 .....	75
<b>Слика 6.10.</b> Временски дијаграм излазног напона за прво оптичко влакно и првих пет поновљених удара брзином од 1 m/s на узорку ЕП-СВ-И-2 .....	76
<b>Слика 6.11.</b> Узорак ЕП-СВ-И-2 након седмог удара брзином од 3 m/s .....	76
<b>Слика 6.12.</b> Линеарна регресија за пет поновљених удара за оптичко влакно на растојању 9 mm за узорак ПЕВГ-СМ-1 .....	78
<b>Слика 6.13.</b> Грешка фитовања за линеарну регресију за друго влакно приликом првог удара .....	79
<b>Слика 6.14.</b> Узорак ПЕВГ-СМ-3 са четири уграђена оптичка влакна .....	80
<b>Слика 6.15.</b> Зависност дубине модулације и силе за два оптичка влакна .....	80
<b>Слика 6.16.</b> Узорак ПЕВГ-СМ-4 након удара.....	81
<b>Слика 6.17.</b> Зависност модулационе дубине од растојања од места удара и модел зависности.....	82
<b>Слика 6.18.</b> Модулациона дубина за један од удара металном куглицом на узорку ПЕВГ-СМ-4 .....	83
<b>Слика 6.19.</b> Модулациона дубина нормализована на максимум отпорне силе за пет поновљених удара брзине 1 m/s.....	85
<b>Слика 6.20.</b> Узорак ПЕВГ-СМ-1 након пет удара.....	85
<b>Слика 6.21.</b> Периода пригушених осцилација у поновљеним ударима на ПЕВГ-СМ-1 .....	86
<b>Слика 6.22.</b> Логаритамски декремент пригушених осцилација и вршна вредности отпорне силе у поновљеним ударима на ПЕВГ-СМ-1 .....	86

<b>Слика 6.23.</b> Дијаграм силе током удара брзином од 2 m/s на узорку ПЕВГ-СМ-1 .....	88
<b>Слика 6.24.</b> Фотографија узорка ПЕВГ-СМ-1 након удара брзином од 2 m/s .....	88
<b>Слика 6.25.</b> Дијаграм силе током удара брзином од 3 m/s на узорку ПЕВГ-СМ-1 .....	89
<b>Слика 6.26.</b> Фотографија узорка ПЕВГ-СМ-1 након удара брзином од 3 m/s .....	89
<b>Слика 6.27.</b> Пример бхб ортогоналне мреже уграђених оптичких влакана - троуглови и кругови означавају калибрационе тачке .....	93
<b>Слика 6.28.</b> Трансмисиони спектар оптичког влакна Т4 са решетком са дугом периодом пре уградње .....	95
<b>Слика 6.29.</b> Трансмисиони спектар оптичког влакна Т5 са решетком са дугом периодом пре уградње .....	95
<b>Слика 6.30.</b> ПЕВГ-СМ-ЛППГ-1 узорак након уградње влакна са решетком са дугом периодом .....	96
<b>Слика 6.31.</b> Трансмисиони спектар оптичког влакна Т5 са решетком са дугом периодом пре уградње .....	97
<b>Слика 6.32.</b> Трансмисиони спектар оптичког влакна Т5 без оптерећења и при статичком оптерећењу узорка ПЕВГ-СМ-ЛППГ-1 са две врсте тега..	98
<b>Слика 6.33.</b> Узорак ЕП-СВ-К-1 пре удара .....	99
<b>Слика 6.34.</b> Провођење светлости кроз уграђено пластично оптичко влакно у ЕП-СВ-К-1 .....	99
<b>Слика 6.35.</b> Временски дијаграм модулационе дубине и силе мерене на импакт тестеру за узорак ЕП-СВ-К-1 током трајања првог удара .....	100
<b>Слика 6.36.</b> Изглед узорка ЕП-СВ-К-1 након удара брзином од 3 m/s .....	101
<b>Слика 6.37.</b> Уграђено оптичко влакно на месту удара које је преживело пробијање материјала .....	101

## Списак табела

Табела 2.1. Физичка својства ПЕНГ и ПЕВГ .....	8
Табела 2.2. Механичка својства ПЕНГ и ПЕВГ .....	8
Табела 2.3. Епоксидна смола Agaldite M са учвршћивачима НУ 956 и НУ 5162....	9
Табела 2.4. Упоредне особине Е и S типа стаклених влакана.....	11
Табела 5.1. Физичко-механичка својства рециклираног ПЕВГ .....	48
Табела 5.2. Физичко-механичка својства стакленог мата .....	49
Табела 5.3. Карактеристике оптичког влакна произвођача Искра Оптоелетроника .....	53
Табела 5.4. Физичко-механичка својства модификоване епоксидне матрице (IMP 530R).....	55
Табела 5.5. Карактеристике стаклених влакана (VV - 770 H4) .....	55
Табела 5.6. Карактеристике EE163 стаклених влакана.....	57
Табела 5.7. Физичко-механичка својства епоксидне смоле EC 152 са W152 MR.	58
Табела 6.1. Нагиб линеарне регресије за влакно на растојању 9 mm за узорак ПЕВГ-СМ-1 при поновљеним ударима.....	78
Табела 6.2. Верификација преносне функције - максимална отпорна сила и промена импулса измерене на импакт тестеру и упоређене са преносном функцијом сензора .....	84
Табела 6.3. Потврђивање модела - максимална отпорна сила и промена импулса на основу мерења импакт тестера и поређење са израчунатим вредностима на основу сензора и на растојању које је добијено применом алгоритма .....	92



## 1. Увод

Композитни материјали се развијају и производе у циљу добијања нових материјала, који су оптимално прилагођени намени и имају контролисана својства. Од посебног интереса је утврђивање физичких и механичких својстава композитних материјала приликом удара. Оваква испитивања налазе примену у бројним индустријама, укључујући аутоиндустрију, бродарство, авиоиндустрију и друге.

Детекција оштећења у композитним материјалима са полимерном матрицом раније је вршена уз помоћ метода као што су ултразвук, X-зраци, акустична емисија и микроскопија. Ниједна од ових метода није погодна за праћење стања композита у реалном времену.

Из тог разлога, већ дужи низ година, као сензори за праћење понашања композитних материјала у току њихове израде и у условима експлоатације, користе се сензори направљени од оптичких влакана. Због своје величине и материјала од којих су направљени, у значајно мањој мери нарушавају механичка својства композита у које су уграђени у односу на мерне траке, а посебно су подобни за уграђивање у влакнима ојачане композитне материјале. Поседују и друге предности као што су отпорност на електромагнетско зрачење, флексибилност, мала тежина и отпорност на корозију и замор.

За мерења се користе различите врсте фиброоптичких сензора, са прилагођеним системима за испитивање сензора, а који зависе од врсте употребљених оптичких влакана и типа модулације светлости.

Стандардна телекомуникациона влакна, а у последње време и пластична оптичка влакна, често се користе за праћење модулације интензитета светлости који се мења током времена. Светлост се води оптичким влакном од светлосног извора, до материјала у који је сензор уграђен, односно до мерног места, и коначно до фотодетектора. Принцип рада интензитетних фиброоптичких сензора се заснива на промени интензитета светлости у зависности од промене мерене величине. Промена интензитета светлости настаје или услед промена у самом влакну као што су: напрезање, оштећење, савијање, микросавијање, промена индекса преламања омотача, или услед апсорпције, рефлексије, преламања светлости и слично, ван оптичког влакна.

У новије време, махом се, због супериорне осетљивости у односу на интензитетне сензоре, користе интерферометарски, као и спектроскопски сензори на бази Брагових решетке и решетке са дугом периодом. Ови сензори међутим користе посебне врсте оптичких влакана и имају значајно захтевније системе испитивања.

Претходна истраживања приликом статичких и динамичких оптерећивања композитних материјала са уграђеним интензитетним фиброоптичким сензорима, у условима који нису били строго контролисани, показала су да постоји корелација између интензитета светлости у фиброоптичком влакну и оптерећења у материјалу.

У оквиру овог рада су по први пут прецизно квантитативно повезани одзив интензитетног сензора и ударна својста композитних материјала, за различите врсте ламинарних композитних материјала.

Рад је написан на 118 страна и састоји се из седам поглавља у којима се налази 70 слика и 14 табела.

У другом поглављу приказани су основни појмови у вези са композитним материјалима и њихова подела по типу ојачања и матрице. Представљени су влакнима ојачани композити са терморективном и термопластичном матрицом, типови оштећења у композитним материјалима, методе тестирања ударом и размотрено питање рециклабилности и биоразградљивости композитних материјала [1-25].

У трећем поглављу приказане су структура оптичких влакана, објашњен начин простирања светлости кроз оптичко влакно и представљене различите поделе оптичких влакана. Такође је представљена и намена појединих оптичких влакана [26-39].

У четвртном поглављу су приказани различити типови фиброоптичких сензора, са освртом на оне врсте подела које су битне за сензоре коришћене у експерименталном раду [40-50]. Затим су представљени принципи рада различитих фиброоптичких сензора, посебно интензитетних и сензора на бази Брагове, односно решетке са дугом периодом [51-73]. Посебно је анализирана примена фиброоптичких сензора у композитним материјалима [74-111]. Коначно у оквиру овог поглавља су размотрени утицаји уграђеног оптичког влакна на

композитни материјал и на који начин је оптичко влакно потребно припремити за уградњу [112-121].

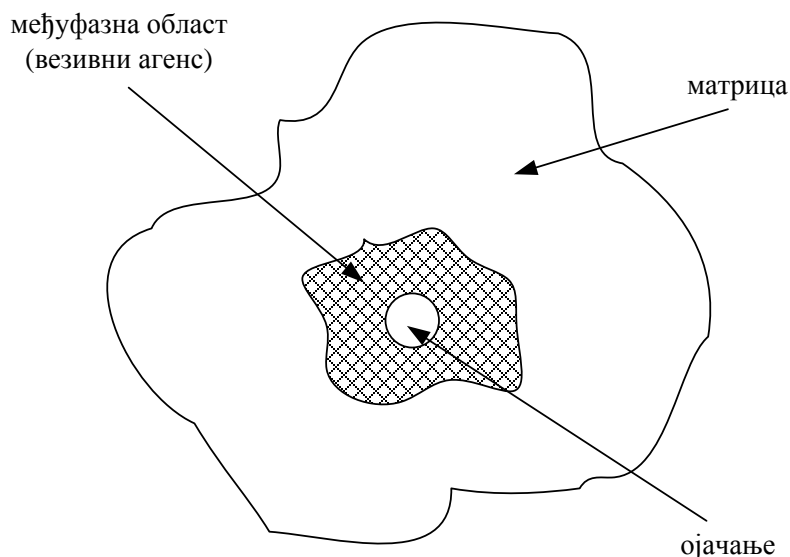
Поставка експерименталног рада представљена је у петом поглављу. У оквиру њега су дате полазне хипотезе за експериментални рад, описан начин припреме узорака и уградња оптичких влакана у ове узорке и описана инструментација која се користи за испитивање сензора и тестирање узорака ударом [122-130].

Резултати експеримената приказани су у шестом поглављу. Најпре је посматран временски одзив интензитетног сензора уграђеног у различите врсте композитних материјала на различитим температурама. Потом је извршено одређивање преносне функције интензитетног сензора у зависности од ударне силе и растојања сензора од места удара за један тип посматраног материјала. Проверени су услови под којима је могуће извршити калибрацију интензитетног сензора и одређивање преносне функције. Предложена је мрежа уграђених оптичких влакана за праћење стања структуре у реалном времену, начин њене калибрације и начин употребе за детекцију критичних оштећења. Додатно су приказани резултати испитивања спектра оптичког сигнала у композитним материјалима са уграђеним оптичким влакнима са решетком са дугом периодом, као и резултати испитивања интензитетног сензора на другим таласним дужинама у пластичном оптичком влакну [131].

У седмом поглављу су приказани закључци, након чега је дат списак употребљених референци.

## 2. Композитни материјали

Модерне технологије захтевају материјале посебних својстава, попут мање густине, повећане чврстоће или повећане отпорности на удар, а које не могу да задовоље конвенционални метали, керамике или полимерни материјали [1], [2]. Ради добијања нових материјала оптимално прилагођених намени стварају се композитни материјали као комбинација два или више материјала, користећи карактеристике појединачних елемената, при чему резултат, односно композит, има значајно другачија физичка и хемијска својства од саставних делова. Одговарајућим избором компонената и њиховим релативним масеним уделом могу се, поред претходно наведеног, добити материјали са жељеном крутошћу, отпорношћу на корозију и хабање, термичком и акустичком изолацијом, итд.



**Слика 2.1.** Основни делови у структури композитног материјала [3]

Композитни материјал дефинише се на један од два начина [4]:

1. чврст материјал који се састоји из две или више раздвојених фаза, укључујући везивни материјал (матрицу) и ојачање (честице или влакна),
2. чврст материјал који се састоји из два или више слојева (често симетрично састављених), начињених од на пример пластике, метала, дрвета или композитних материјала према претходној дефиницији, са или без адхезивних међуслојева.

На слици 2.1 приказани су основни делови у структури композита у складу са првом дефиницијом. Између континуалне фазе (матрице) и дисконтинуалне фазе (ојачања) постоји видљива међуфазна граница.

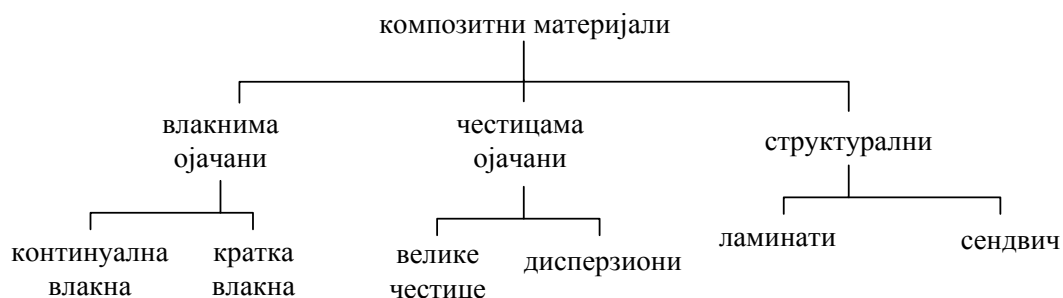
Композитни материјали су употреби јако дуго. На пример, бетон се користи више хиљада година, а још у Римском царству су додавали различите примесе, попут коњских власи или вулканске глине у керамичку матрицу како би ојачали бетон и смањили могућност настанка пукотина [5]. Бројни примери композитних материјала налазе се и у природи. Дрво се, посматрано као композит, састоји из лигнина као матрице и целулозних влакана као ојачања, док се у костима налази мекани колаген ојачан чврстим, али кртим, минералним влакнима на бази калцијум фосфата.

Тема дизајнирања композитних материјала је и даље веома актуелна, а многа истраживања спроводе се у циљу унапређења карактеристика материјала како на макро нивоу, тако и на микро нивоу [6], [7].

Композитни материјали могу бити природни или синтетички, при чему је традиционално већи фокус био на синтетичким материјалима.

## 2.1. Подела композитних материјала по типу ојачања

Једна од могућих подела композитних материјала по врсти ојачања је на влакном ојачане, честицама ојачане и структурално ојачане. Свака од ових подела се може даље разложити на барем две подгрупе, на начин приказан на слици 2.2.



Слика 2.2. Подела композитних материјала по типу ојачања [1]

Честице за ојачање могу бити сферичног, кубног, тетрагоналног, плочастог или неправилног облика, а најчешће су приближно еквиаксијалне. Честично

ојачани композити деле се на оне са великим честицама (прашкасте), где се интеракција између матрице и честица не може свести на молекуларни или атомски ниво, док су дисперзиони са честицама реда величине 10 или 100 nm. Код првих, спољашње оптерећење примењено на матрицу преноси се делимично на честице, док код других то није случај, већ оне спречавају померање матрице.

Влакна која се користе као ојачање често су цилиндричног облика. Влакнима ојачани композити представљају можда и технолошки најзначајнији тип композита. Код њих је циљ да влакна високе затезне чврстоће преузму спољашње напрезање. Јачина везе између влакна и матрице одређује ефикасност преноса напрезања на влакно [8]. Дужина влакана дефинише да ли ће доћи до извлачења влакана из матрице или преноса оптерећења и одређена је пречником влакана, затезном чврстоћом влакана и чврстином везе матрице и влакана.

Структурални композити састоје се из више слојева (ламина), а ојачање може бити у виду континуалних влакана или тканине. Код ламината, најчешће се ређају наизменично слојеви матрице и ојачања, док сендвич представља структуру са раздвојеним ојачавајућим омотачем и меканим језгром.

Оријентација ојачања утиче на изотропију својстава материјала. На основу претходно наведеног, изотропија се може постићи само код честицама ојачаних композита, најчешће дисперзионих, као и код влакнима ојачаних композита са кратким влакнима, ако је оријентација тих влакана насумична. Структурални композити не могу бити изотропни. Анизотропни композитни материјали немају иста својства у различитим правцима примењеног спољног оптерећења.

## **2.2. Подела композитних материјала по типу матрице**

Композитни материјали се према типу матрице могу поделити на металне, полимерне и керамичке. Полимерни композити су најчешћи, а могу бити ојачани стакленим, карбонским или араמידним влакнима. Циљ многих полимерних, али и металних композита је већа чврстоћа или тврдоћа, при чему је матрица често дуктилна, мале густине и има за циљ да држи влакна у месту. Композити са керамичком матрицом имају за циљ повећање отпорности материјала на пропагацију пукотине. Врста матрице одређује и максималну температуру на којој се материјал може употребити, као и начин припреме композите.

Комбинацијом различитих матрица, као и типова ојачања, добијају се такозвани хибридни композити. На овај начин се побољшавају недостаци класичних композита, као што су ниска жилавост, недовољна крутост или висока цена.

### **2.3. Влакнима ојачани полимерни композити**

У оквиру ове тезе посматраће се полимерни композити са различитим облицима влакнастих ојачања. Полимерни композити са влакнастим ојачањем представљају напредне инжењерске материјале. На пример, употреба полимерних композита са карбонским влакнима је широм распрострањена. Ови материјали чине скоро 50% нових авиона *Boing 787 Dreamliner*, односно више од 20% у структури авиона *Airbus A380*, а користе се и при изградњи бродова и других возила [9], [10].

#### **2.3.1. Полимерна матрица**

Полимерне матрице представљају везивно средство композитног материјала које му одређује коначни облик. Оне не повећавају у већој мери чврстоћу материјала, већ служе да пренесу спољашње напрезање на влакна која имају високу затезну чврстоћу. У употреби су термореактивни и термопластични полимери.

Термореактивни полимери имају умрежену структуру са ковалентним везама између свих молекула, чиме је смањена слобода кретања полимерних ланаца и повећана кртост. Након полимеризације не могу се поново омекшати, а при загревању се не топе, већ долази до њихове разградње. Имају ниску цену и лако се употребљавају. Примери термореактивних матрица су епоксидне смоле, фенолформалдехидне смоле, незасићени полиестри и полиамиди [11].

Термопластични полимери су флексибилнији. Приликом загревања се топе, а хлађења очвршћавају, а овај процес се може понављати, у теорији, неограничен број пута. Код термопластичних полимера постоје јаке интрамолекуларне и слабе интермолекуларне везе. Полиетилен, полистирен, најлон и поликарбонати спадају у термопластичне матрице.

### 2.3.1.1. Полиетилен

Полиетилен (ПЕ) је један од комерцијално најчешће коришћених полимера јер се применом различитих метода за његову синтезу могу добити производи различитих комбинација својстава. Такође, погодан је и због његове лаке употребе у даљим процесима производње у којима се користи.

Разликују се полиетилени ниске густине (ПЕНГ) и политетилени високе густине (ПЕВГ). Полиетилени ниске густине имају нерегуларности у својим молекулским ланцима и мањи модул еластичности, па се ретко користи у композитним материјалима. Са друге стране, полиетилен високе густине мало апсорбује воду и хемијски је отпоран на већину киселина, база или растварача. Његова инертност отежава постизање добре међуфазне адхезије у композитима, па се додају адитиви да би се постигла добра веза између матрице и влакана који служе као ојачање [12].

У табелама 2.1 и 2.2 и приказана су физичка и механичка својства ПЕНГ и ПЕВГ.

**Табела 2.1.** Физичка својства ПЕНГ и ПЕВГ

	Температуре прелаза		Температуре прераде		Специфична густина	
	$T_g$ , °C	$T_m$ , °C	нижа, °C	виша, °C	нижа, g/cm <sup>3</sup>	виша, g/cm <sup>3</sup>
ПЕНГ	-90	120	130	250	0,92	0,95
ПЕВГ	-30	135	150	270	0,95	0,97

**Табела 2.2.** Механичка својства ПЕНГ и ПЕВГ

	Затезна чврстоћа, МПа	Деформација до лома, %	Коефицијент истезања, GPa
ПЕНГ	8,3 - 32,1	50 - 970	0,17 - 0,70
ПЕВГ	22,1 - 31,4	10 - 1200	1,08 - 1,10



### 2.3.1.2. Епоксидна смола

Чисте епоксидне смоле се комерцијално не користе, али се додавањем погодног хемијски активног реагенса, тј. очвршћивача и катализатора, трансформишу у термореактивне чврсте материјале. Преко 90% светске производње епоксидних смола базира се на бисфенолу А и епихлоридину. Епоксидне смоле се умрежавају на собној температури вишефункционалним аминима, а на повишеним анхидридима дикарбоксилних киселина.

Карактерише их изузетна хемијска отпорност, добра флексибилност и жилавост, мали вискозитет, мали коефицијент скупљања и висока адхезивна моћ. Лако се везују за већину влакана и остварују јаку међуфазну везу [13].

У табели 2.3 приказане су нека физичко-механичка својства једне типичне епоксидне смоле Araldite M у комбинацији са учвршћивачима HY 956 и HY 5162 [14].

**Табела 2.3.** Епоксидна смола Araldite M са учвршћивачима HY 956 и HY 5162

Својство	Araldite M/ HY 956	Araldite M/ HY 5162
вискозитет на собној температури [mPas]	1200-1400	500-600
однос у смеси	100:20	100:40
густина [g/cm <sup>3</sup> ]	1,1	1,1
модул еластичности [GPa]	17000-18000	400-500
затезна чврстоћа [MPa]	270-300	25-30

### 2.3.2. Вlakна

Влакно се дефинише као материјал код кога је однос дужине и пречника већи од 10, а пречник мањи од 1 mm [13]. Вlakна морају поседовати висок модул еластичности, велику затезну чврстоћу, задовољавајућу термичку постојаност и еластично понашање приликом оптерећења. Употреба влакана заснована је на три карактеристике:

1. мали пречник влакна дозвољава већи ниво чврстоће материјала и смањује могућност појаве напрстина на површини,
2. оптимални однос дужине и пречника влакана омогућава успешан пренос оптерећења са матрице на влакна,
3. висока флексибилност влакана дозвољава употребу различитих техника за израду оптималних текстилних структура као облика ојачања.

Иако се најчешће користе континуална влакна због једноставности њиховог оријентисања, кратка влакна такође могу у значајној мери да повећају снагу резултујућег композита.

Влакна се могу поделити на органска и неорганска. Стаклена и керамичка влакна су пример неорганских, док су карбонска, графитна и арамидна пример органских влакана. Неорганска влакна углавном имају добру чврстоћу, топлотну отпорност и крутост, а органска добру савитљивост, еластичност и топлотну осетљивост. Додатно, природна органска влакна, попут оних добијених од дрвета, пиринча, каучука и других биљака, све чешће се користе као замена за неорганска и друга органска влакна у различитим полимерним композитима [15],[16].

### 2.3.2.1.    **Стаклена влакна**

Стаклена влакна поред претходно набројаних карактеристика поседују и отпорност према читавом низу хемикалија, отпорност на старење, потпуну постојаност према микробиолошким дејствима и друге повољне карактеристике. Основа влакана је силицијум, а добијају се фузијом мешавине различитих оксидних материјала на високим температурама. Прва стаклена влакна за комерцијалну употребу извучена су 1938. године, а 1948. године започело је намотавање стаклених влакана импрегнираних терморективном смолом [**Error! Bookmark not defined.**], [17].

Постоји више типова стаклених влакана, а употреби су најчешће Е и S тип влакана. Стаклена влакна типа Е имају добра електроизолациона својства, добру затезну чврстоћу и висок Јунгов модул еластичности. Стаклена влакна типа S имају већу затезну чврстоћу, али су и скупља, па се употребљавају тамо где се захтевају високе перформансе. У табели 2.4 приказане су упоредне механичке карактеристике Е и S типа влакана.

**Табела 2.4.** Упоредне особине Е и S типа стаклених влакана [17]

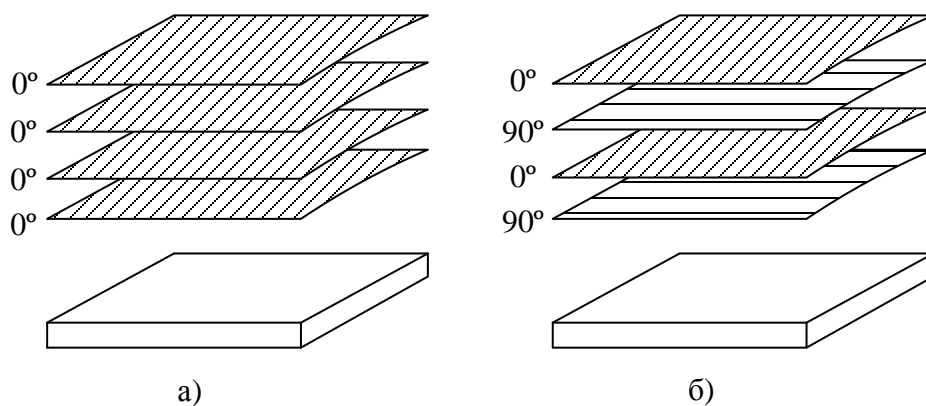
Својство	Е	S
густина, $\rho$ [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	2,54	2,49
затезна чврстоћа, $R_m$ [МПа]	3448	4585
модул еластичности, $E$ [GPa]	72,4	85,5
пречник, $d$ [ $\mu\text{m}$ ]	3-20	8-13
коэффициент термичког ширења, $\alpha$ [ $10^{-6}/\text{K}$ ]	5,0	2,9

Намотавање влакана у процесу производње се може вршити на различите начине, а у индустријској пракси се користе термини: снопови, ровинзи и пређе. Сноп представља скуп континуалних влакана, ровинг је скуп неуплетених континуалних влакана, док је пређа скуп уплетених континуалних влакана.

Ровинзи се користе за добијање различитих врста ојачања укључујући и стаклени мат. Стаклени мат израђује се од неупредених стаклених влакана повезаних термоочврставајућом смолом, као што су уреаформалдехидна или фенолна смола. Може бити са уситњеним влакнима или континуалним влакнима. Иако је слабији од стакленог мата са континуалним влакнима, мат са уситњеним влакнима обезбеђује ниску цену ојачања.

### **2.3.3. Структура влакном ојачаног полимерног композита**

У процесу креирања полимерног композита, у полимерну матрицу се уграђују слојеви који садрже ојачање. Ако се користе континуална влакна, тада је основни ниво структуре унидирекциона ламина која садржи низ паралелних влакана оријентисаних у истом смеру, што је приказано на слици 2.3а. На слици 2.3б приказане су унидирекционе ламине постављене наизменично под различитим углом у односу на осу ламината.



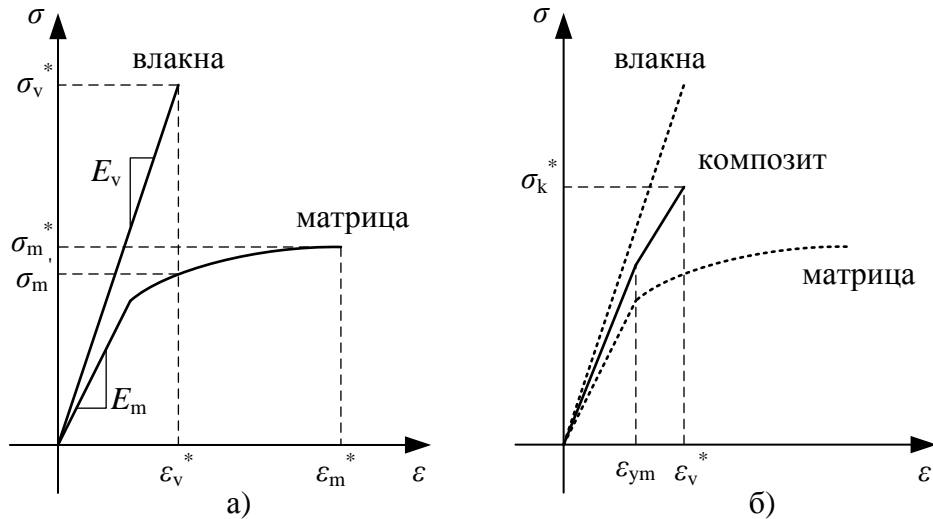
**Слика 2.3.** Структура ламинарног композита: а) унидирекционе ламине, б) мултидирекционе ламине грађе (0/90°) [18]

Повољним подешавањем оријентације влакана у различитим слојевима може се подстаћи квазиизотропност посматраног композита. Мултидирекциони композити могу да имају ојачање не само од унидирекционих ламина, већ и од тканина, кратких влакана или насумично оријентисаних влакана у мату.

#### 2.3.4. Механизам преноса оптерећења са полимерне матрице на влакно

Дужина влакана који се користе као ојачање мора да буде таква да се приликом преноса оптерећења омогући ефикасан пренос са матрице на влакна. Уколико су влакна превише кратка, матрица се деформише око влакана тако да практично нема преноса оптерећења и ојачање је слабо. Што је дужина влакана већа, ојачање је ефективније [1].

На слици 2.4 приказан је дијаграм нормални напон ( $\sigma$ ) - деформација ( $\epsilon$ ) за полимерни композит са пластичном (дуктилном) матрицом и кртим влакнима веће чврстоће као ојачањем. Слика 2.4а) приказује појединачне карактеристике матрице и ојачања приликом примене оптерећења, док је на слици 2.4б) приказана збирна карактеристика композитног материјала.



**Слика 2.4.** Дијаграм нормални напон-деформација за полимерни композит са дуктилном матрицом и кртим влакнима: а) карактеристике материјала, б) карактеристике композита [1]

Може се приметити да се до границе еластичне деформације матрице ( $\epsilon_{ym}$ ) и влакна еластично деформишу, па и композит у целини трпи еластичну деформацију, а карактеристика је линеарна. Након што се повећа примењено оптерећење, матрица почиње да се пластично деформише, али влакна и даље могу да се деформишу еластично. Због тога се композитни материјал и даље понаша као да пролази кроз еластичну деформацију, већи део оптерећења преноси се на ојачање, карактеристика је и даље приближно линеарна, а модул еластичности је мањи. Материјал почиње да се у већој мери оштећује тек након преласка границе еластичне деформације влакана, која ће због кртости кренути да пуцају. Међутим неће сва влакна пуцати истовремено, а и влакна која су пукла у могућности су да и даље примају оптерећење, иако у мањој мери због своје мање дужине.

## 2.4. Типови оштећења у влакнима ојачаним композитним материјалима

Деформације материјала могу бити еластичне и пластичне. Еластичне деформације омогућавају материјалу да се након деловања спољашњег оптерећења врати у иницијално стање, док код пластичних деформација материјал

остаје трајно деформисан. У случају великих спољашњих оптерећења може доћи и до разарања структуре материјала и појаве пукотине, односно лома материјала.

У случају композитних материјала, механизми оштећења су комплекснији због анизотропије, нехомогености структуре и преноса оштећења са матрице на ојачање [19], [20]. Раст прслина успорен је присуством међуфазних области између ојачања и матрице, односно између слојева у ламинатима.

Разликују се следеће врсте разарања:

1. прслине у матрици
2. раскидање веза између матрице и влакана
3. лом влакана
4. деламинација (раслојавање)

## **2.5. Тестирање композитних материјала ударом**

Композитни материјали се често користе у окружењима у којима трпе оштећења настала ударом. Због тога је отпорност композитног материјала на удар важно својство материјала [21]. Постоје различите технике тестирања ударних својстава материјала. Она се могу грубо поделити на две категорије [22]:

1. удари ниске енергије
2. удари високе енергије

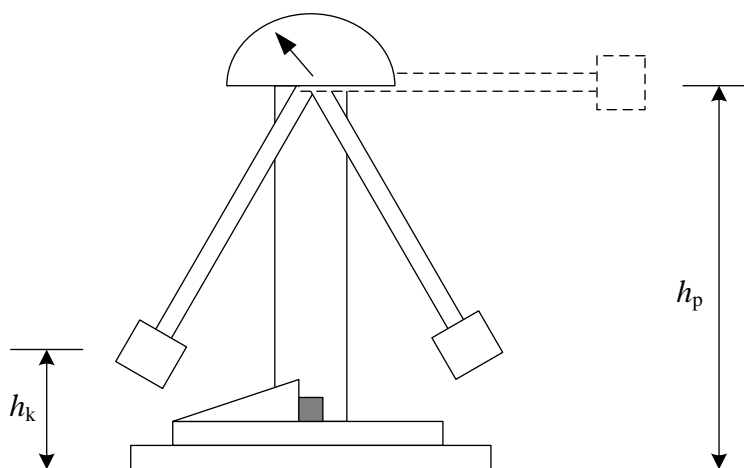
У тестирање ударима ниске енергије спадају Шарпијево (*charpy*) клатно и тестирање тегом који слободно пада (*drop-weight impact testing*), док су балистички удари у групи удара високе енергије.

Тестирање ударом помоћу специјализованих уређаја за тестирање може припадати и једној и другој категорији. Удари специјализованим уређајима су стандардизовани, па се тако на пример за тестирање пластике ударима високе енергије помоћу пробијања користи стандард ASTM D3763 [23]. Приликом ових тестова, машина најчешће прикупља податке о отпорној сили и померају ударача, на основу којих се могу прорачунавати и друге величине, попут промене брзине, апсорбоване енергије приликом удара и друго.

У оквиру овог експерименталног рада, коришћен је уређај за тестирање ударима контролисане енергије, а фокус је био на ударима ниске енергије.

### 2.5.1. Шарпијево клатно

Традиционално, тестирање ударом врши се Шарпијевим клатном. Ова врста тестирања је једноставна и јефтина за реализацију. Узорци материјала које је потребно тестирати претходно се обраде на тај начин да се подеси њихова величина према носачу, а често се уреже зарез на једној страни тестне епрувете како би се дефинисала област настанка пукотине.



Слика 2.5. Тестирање Шарпијевим клатном [21]

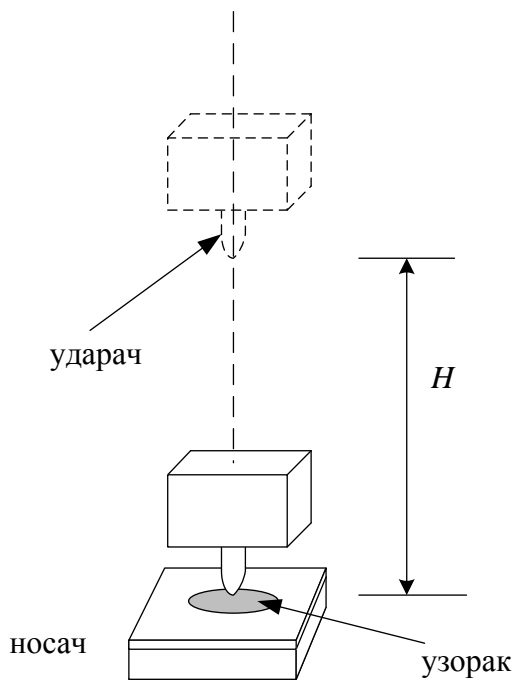
Клатно познате тежине подиже се на познату висину и пушта да слободно пада, као што је приказано на слици 2.5. Након што пробије тестну епрувету, клатно се зауставља на другој висини.

Разлика у потенцијалним енергијама клатна пре и после удара представља количину енергије која је потрошена приликом удара. Истовремено, може се на основу изгледа материјала проценити тип оштећења до кога је дошло - деламинација, извлачење влакана из матрице, лом влакана, итд.

Модерне верзије Шарпијевог клатна подразумевају уграђене сензоре у врху ударача и електронску обраду података. Пост-импакт обрада узорака обрађених Шарпијевим клатно ретко када је ефективна.

### 2.5.2. Тестирање тегом који слободно пада

Тестирање тегом који слободно пада представља најчешћи тест ударом код композитних материјала. Приликом овог тестирања могу настати јасно видљива и једва видљива оштећења на композитном материјалу [21].



Слика 2.6. Пример тестирања помоћу тега који слободно пада [21]

Приликом овог тестирања, тег познате масе подиже се на одређену познату висину и пушта да слободно пада на узорак, као што је приказано на слици 2.6. Узорак који се тестира постављен је на носач. У ударач је уграђен сензор који мери оптерећење приликом удара.

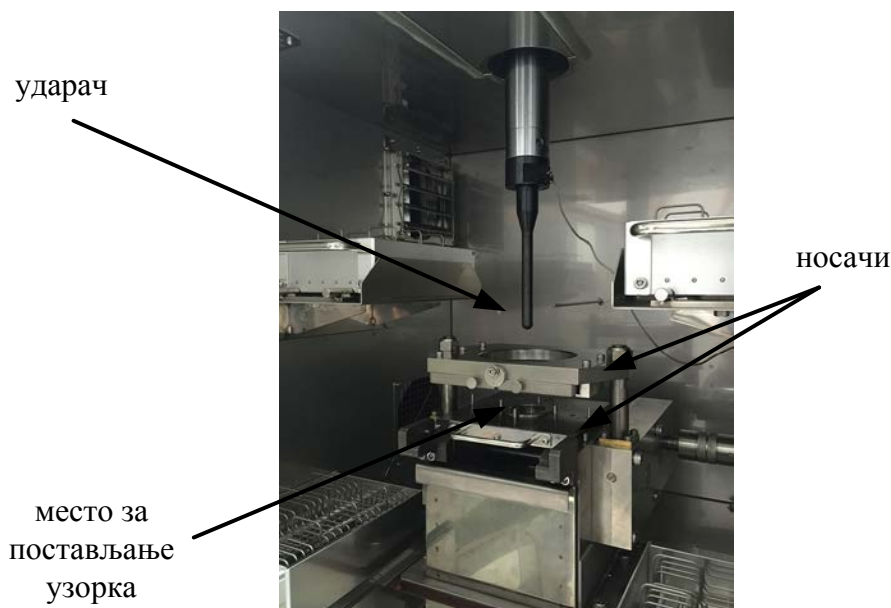
Анализом прикупљених података утврђује се која врста оштећења је настала унутар материјала, а често је неопходно пост-импакт тестирање ради подробнијег утврђивања врсте оштећења. Под условом да није дошло до пробоја материјала, на основу података се може проценити апсорбована енергија [24].

Тестирање тегом који слободно пада представља ситуацију која је ближа реалности у односу на Шарпијево клатно.



### 2.5.3. Тестирање ударима контролисане енергије

Савремени уређаји за тестирање ударима омогућавају контролисање брзине удара у ширем опсегу вредности, чиме се омогућава прецизнија контрола енергије којом ударач делује на узорак, односно тестирања и на високим и на ниским брзинама удара.



Слика 2.7. Импакт тестер за ударе контролисане енергије

На слици 2.7 приказана је унутрашњост коморе уређаја за тестирање ударима контролисане енергије. Узорак се фиксира између два носача, а покретни ударач са уграђеним сензором врши тестирање узорка. Аутоматизација уређаја је потпуна, а софтверски се подешавају параметри попут жељене брзине у тренутку удара и дубине на којој треба да се зауставити ударач. Кретање ударача контролише се хидраулички. Уређај прикупља податке о позицији ударача и отпорној сили, а на основу прикупљених података могуће је одредити и брзину ударача у сваком тренутку и прорачунати енергију удара.

### 2.5.4. Пост-импакт тестирање

Карактеризација механизма оштећења захтева и употребу других метода тестирања од којих су неке недеструктивне, као што су: ултразвучно тестирање,

микроталасно тестирање, X зраци и електронска микроскопија (SEM), а нека деструктивна попут компресионог тестирања. Недеструктивна тестирања најчешће омогућавају увид у величину и облик оштећења до којих је дошло у процесу тестирања ударом.

## **2.6. Рециклабилни и биоразградљиви материјали у процесу производње композита**

У индустрији се јавља све већа потреба да се већ употребљени материјали репроцесирају и поново употребе, како из економских разлога, тако и због заштите животне средине. Тако на пример, употреба рециклиране пластике приликом израде композитних материјала у новије време привлачи пажњу јер се на тај начин смањује количина отпада и цена производње композитних материјала. Не само што се пластика прави од необновљивих ресурса, већ најчешће није биоразградљива.

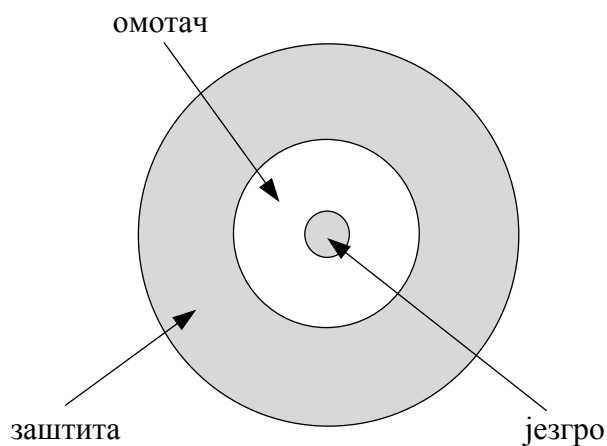
Претходне студије показале су да механичка својства, димензионална стабилност, међуфазна адхезија и трајност рециклираног полиетилена високе густине може да се упореди са чистим полиетиленом високе густине, што повећава применљивост овог материјала [12]. Отпадна пластика може садржати различите врсте полимера, загађивача и индустријских адитива, што може довести до варијабилности у перформансама у композитима где се примењује као матрица.

Полимерни композити се тешко могу даље рециклирати, па су начини њиховог уклањања најчешће незадовољавајући: претварање у отпад и спаљивање. Савремена истраживања у области композитних материјала усмеравају се у правцу стварања тзв. „зелених композита“ за секундарну и терцијарну употребу, односно тамо где се не захтевају врхунска механичка својства [15], [25]. У овим композитима се често користе полиетилен и полипропилен као матрице, док се као ојачање користе различите врсте природних влакана. Добијени композити имају мању дуктилност, процесабилност и димензиону стабилност. Посебна врста зелених композита су композити са биоразградљивом матрицом, а тренутни изазови су усмерени у правцу избора одговарајуће биоразградиве матрице и метода припреме и процесирања.

### 3. Оптичка влакна

Оптичка влакна представљају диелектричне цилиндричне таласоводе који воде електромагнетни талас дуж осе цилиндра. Користе се у највећој мери у телекомуникационој индустрији у циљу омогућавања великих брзина протока, због већег пропусног опсега у односу на друге системе преноса, као и мање осетљивости на шум и електромагнетно зрачење [26].

Трослојна структура оптичког влакна илустрована је на слици 3.1 на којој је приказан попречни пресек оптичког влакна.

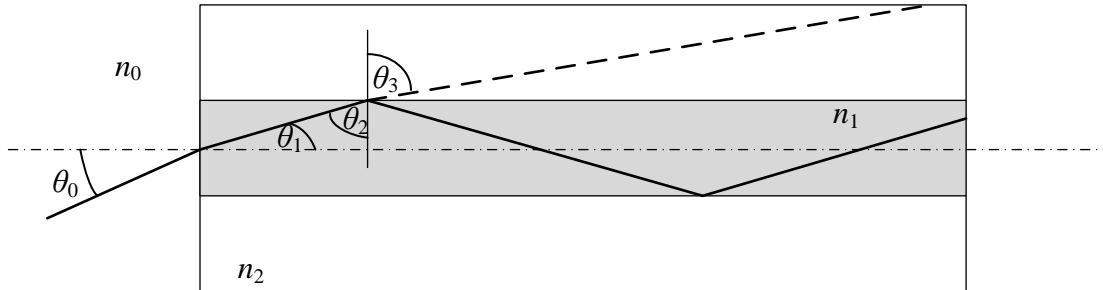


Слика 3.1. Структура оптичког влакна

За пренос светлости кроз оптичко влакно задужена су два слоја: омотач и језгро. Светлост се кроз оптичко влакно води кроз језгро направљено од оптички чистог стакла или полимера. Омотач је направљен најчешће од сличног материјала као и језгро, односно допираног стакла или полимерних материјала, с тим што је у њему индекс преламања нешто мањи него у језгру. На граници између језгра и омотача остварени су услови за тоталну рефлексију светлости, због чега светлост која је уведена у језгро под одговарајућим углом не напушта ту област. Додатни трећи слој не учествује у вођењу светлости. Он се назива примарна заштита или превлака и омогућава додатну механичку чврстоћу влакну и штити га од спољних утицаја.

На слици 3.2 приказан је уздужни попречни пресек језгра и омотача оптичког влакна и илустрован начин простирања светлости за степенасто

оптичког влакно, код кога су индекси преламања у језгру и омотачу константни по целој површини попречног пресека и обележени са  $n_1$  и  $n_2$ , док је са  $n_0$  обележен индекс преламања околине из које долази светло.



Слика 3.2. Уздужни попречни пресек и принцип простирања светлости [27]

Када светлост прелази из једне средине у другу, на граници између две средине долази до преламања светлости, а што је одређено законом преламања:

$$n_0 \cdot \sin \theta_0 = n_1 \cdot \sin \theta_1 \quad (3.1)$$

$$n_1 \cdot \sin \theta_2 = n_2 \cdot \sin \theta_3 \quad (3.2)$$

До тоталне рефлексije долази када је угао  $\theta_3$  једнак  $90^\circ$ , а како су углови  $\theta_1$  и  $\theta_2$  комплементарни, на основу претходних једначина може се извести да је максимална вредност угла која задовољава услове тоталне рефлексije одређена следећом релацијом:

$$\sin \theta_{0,\max} = \frac{1}{n_0} \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (3.3)$$

За све вредности упадног угла који су мањи од  $\theta_{0,\max}$  доћи ће до тоталне рефлексije. Ако је упадни угао већи од максимално дозвољеног за посматрано оптичко влакно, тада долази до расипања светлости, односно део светлости напушта језгро. Због значаја претходно изведене величине за описивање пропагационих својстава оптичког влакна, уводи се појам нумеричке апертуре влакна представљен следећом релацијом:

$$NA = n_0 \cdot \sin \theta_{0,\max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (3.4)$$

### **3.1. Подела оптичких влакана**

Због разноврсности примене оптичких влакана развијене су различите врсте влакана, прилагођене одговарајућим наменама. Оне се разликују у карактеристикама попут облика и димензија попречног пресека језгра и омотача, разлици и промени индекса преламања дуж језгра и омотача, особинама светлости које се уводи у влакно, итд. Једна од могућих подела оптичких влакана је према [26]:

1. материјалу од кога су влакна направљена
2. начину промене индекса преламања
3. броју модова који се могу простирати кроз влакно

#### **3.1.1. Подела према материјалу од кога су влакна направљена**

Оптичка влакна најчешће се израђују од стакла (силицијума). Израда ових оптичких влакана је прилично јефтина, а раде поуздано у широком опсегу промене температуре, имајући у виду да је температура топљења силицијума изнад 1000°C. Такође поседују добра механичка и хемијска својства, а погодна су за вођење видљиве и блиско инфрацрвене светлости, где је ниво апсорпције светлости најмањи [ 28 ]. Промена индекса преламања постиже се углавном допирањем стакла различитим примесима, мада се може постићи и на друге начине. Стаклена оптичка влакна имају широк спектар примене, не само у области телекомуникација, већ и у многим другим, укључујући и оптичке сензоре.

Пластична оптичка влакна традиционално се праве од полимера. Посебна погодност ових влакана у односу на стаклена је у њиховој високој савитљивости и истегљивости и још нижој цени, али и нижој температури топљења.. Језгра ових оптичких влакана углавном се добијају од поли (метил метакрилата) (ПММА), који се захваљујући својој провидности и отпорности на гребање назива и пластичним стаклом, док се као омотач користе флуоризовани полимери [29]. Пластична оптичка влакна углавном су са степенастим индексом преламања, а имају веће слабљење у односу на стаклена влакна што ограничава способност преноса података на већим растојањима. Могућности њихове примене су поред кућних оптичких мрежа за пренос података [ 30 ] и у области фиброоптичких сензора и др.

### 3.1.2. Подела према начину промене индекса преламања

Према начину промене индекса преламања оптичка влакна се деле на степенаста и градијентна оптичка влакна.

Код степенастих оптичких влакана вредност индекса преламања унутар језгра и унутар омотача је униформна дуж попречног пресека. Релативна промена индекса преламања између језгра и омотача може се изразити као:

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (3.5)$$

Вредност релативне промене  $\Delta$  је за већину оптичких влакана начелно мала и креће се између 0.1 и 5% [28]. Степенаста оптичка влакна могу проводити један или више модова електромагнетног таласа.

Код градијентних оптичких влакана вредност индекса преламања унутар језгра радијално опада ка периферији језгра где се изједначава са индексом преламања омотача. Израда ових оптичких влакана може да буде технолошки захтевна због немогућности контроле процеса допирања. Због тога се као алтернатива производе мултистепенаста влакна.

Могуће су и друге варијанте промене индекса преламања у зависности од примене попут W профила, троуганог профила са прстеном, итд.

### 3.1.3. Подела према броју модова

Број модова који се може пренети кроз оптичко влакно зависи од различитих параметара: димензија оптичког влакна, материјала, промене индекса преламања и таласне дужине. Оптичка влакна се према броју модова могу поделити на мономодна и мултимодна оптичка влакна. Код мономодних влакана, омогућено је простирање само једног мода таласа, док код мултимодних тај број може бити јако велики. Подела између мономодних и мултимодних влакана заснива се на структуралном параметру оптичког влакна, односно нормализованој фреквенцији која је дефинисана следећим изразом, где је  $r_1$  полупречник језгра, а  $\lambda_0$  таласна дужина светлости у вакууму [28]:

$$V = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda_0} \cdot r_1 \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda_0} \cdot r_1 \cdot NA \quad (3.6)$$

За вредности нормализоване фреквенције  $V < 2,405$  оптичко влакно је мономодно, док је у супротном мултимодно. Ова граница дефинише и горњу границу вредности пречника мономодног оптичког влакна и она износи око 8-10  $\mu\text{m}$ . Имајући у виду вредности пречника, за анализу простирања таласа у оквиру мономодног влакна не може се применити геометријска оптика већ се посматра електромагнетно поље и проблем простирања решава Максвеловим једначинама. Мономодна влакна веома су погодна за примену у телекомуникацијама, јер оне могућавају различите начине простирања таласа унутар влакна, смањују могућност деформација сигнала током простирања и самим тиме повећавају брзину комуникација. С друге стране, начин увођења светлости у ова влакна је критичан проблем управо због малих димензија језгра и јако мале нумеричке апертуре [17].

Оптичка влакна већег попречног пресека по правилу су мултимодна. Карактеристичне вредности пречника језгра су 50 и 62,5  $\mu\text{m}$ . Број вођених таласа кроз мултимодно влакно може се за влакно са степенастим индексом преламања наћи апроксимативно као [28]:

$$N_{SI} = \frac{V^2}{2} \quad (3.7)$$

Простирање светлости се у мултимодним оптичким влакнима може анализирати помоћу геометријске оптике, при чему у градијентним оптичким влакнима долази до постепеног савијања зрака светлости током простирања, што резултира кривом путањом. Брзина простирања таласа зависи од упадног угла светлости, па долази до деформације оптичког сигнала током његовог простирања. Могућност употребе мултимодних влакана у телекомуникацијама смањена је због тога на мања растојања, код којих је критично кашњење између најбржег и најспоријег зрака задовољавајуће у односу на жељену брзину протока [27].

### **3.2. Намена оптичких влакана**

Иако је основна намена оптичких влакана у области телекомуникација, она се могу користити и за осветљавање, директан пренос слике, пренос енергије, као фиброоптички сензори, итд.

У телекомуникацијама се користе стандардна телекомуникациона влакна која се израђују углавном од стакла, кружног су попречног пресека, мономодна су или мултимодна и служе за поуздан и брз пренос података на великим растојањима уз мале губитке и мали утицај електромагнетног зрачења. Због тога, брзине протока које се могу остварити на овај начин достижу и од 111 Gbps до 400 Gbps по каналу [31], [32]. Као извори светлости користе се ласери или емитерске диоде, а као пријемници фотодетектори.

Кохерентни снопови оптичких влакана, која су међусобно залепљена, а чији су врхови исполирани и у оба краја на истом положају, могу да служе за пренос слике осветљеног предмета [27]. Овакви снопови светлости имају честу примену за посматрање тешко доступних места, посебно у медицини.

Стандардна телекомуникациона влакна користе се при томе и за друге намене, укључујући и намену у области фиброоптичких сензора, где само оптичко влакно представља сензор. Међутим, како је у области фиброоптичких сензора неопходно повећати утицај појединих физичких величина које би требало детектовати на простирање светлости, а што је супротно ономе што је неопходно у телекомуникацијама, развијена су и специјализована оптичка влакна различитих врста [17], [33], [34].

Код вођења светлости у мономодним оптичким влакнима, ради одржавања линеарне поларизације важно је да попречни пресек језгра буде идеално кружни. Како је ово тешко оствариво, а права оптичка влакна су благо елиптична, долази до различите брзине пропагације ортогоналних таласа и двојног преламања [28]. Намерним подстицањем асиметричности попречног пресека језгра или повећањем разлике у индексу преламања, ефекти двојног преламања се могу учинити израженијима. Тако настају оптичка влакна са елиптичним језгром [35], као и лептираста (*bow-tie*) и панда оптичка влакна [34] која су погодна за употребу код интерферометарских и полариметарских сензора.

У мономодна [36] и мултимодна [37], стаклена и пластична оптичка влакна [38], [39] уграђују се Брагове решетке и решетке са дугом периодом. Код ових оптичких влакана, дуж језгра се на одговарајућим местима врши промена индекса преламања, најчешће осветљавањем оптичког влакна ласерима високе оптичке снаге у области ултраљубичастог зрачења. Добијена решетка служи као филтер за одређене таласне дужине светлости, с тим што код Брагових решетака она доводи



до рефлексије одређене таласне дужине светлости, а код решетке са дугом периодом до слабљења на одређеним таласним дужинама светлости у трансмисионом спектру. Оптичка влакана са уграђеним Браговим решеткама представљају веома интересантан избор за примену у области фиброоптичких сензора.

Поред претходно наведених, постоје и друге варијанте оптичких влакана: са квадратним попречним пресеком, са измештеним језгром, са више језгара, итд [28].

## 4. Фиброоптички сензори

Фиброоптички сензори, односно сензори на бази оптичких влакана, раде на принципу модулације неке од особина светлосног сигнала који се води оптичким влакном, под дејством величине коју је потребно мерити. Карактеристике светлосног сигнала које се том приликом могу мењати су интензитет, фазно кашњење, поларизација и спектар. Ако се користе мултимодна оптичка влакна, тада је примарна промена интензитет оптичког сигнала, јер се друге промене усредњавају према простирућим модовима [17]. Код мономодних оптичких влакана могуће је модулисати како интензитет, тако и фазно кашњење и поларизацију, па се ова влакна чешће користе као полариметарски или интерферометарски сензори.

У односу на друге врсте сензора, фиброоптички сензори поседују бројне предности, пре свега због своје мање величине, веће поузданости и тачности или примене у оним окружењима у којима класични електрични сензори не могу да се примене, односно тамо где је изражено нуклеарно или електромагнетно зрачење, хемијски агресивна средина или где је потребно смањити тежину сензора. Посебно се у последње време користе као уграђени сензори у различитим материјалима, укључујући и композитне материјале, јер не доводе до значајнијег ремећења структуре материјала, чиме омогућавају ефикасно праћење стања материјала [40], [41]. Предности фиброоптичких сензора огледају се и у њиховој малој величини и тежини, ниској цени, повећаној осетљивости у односу на мерену величину, отпорности на електромагнетне сметње, брзини одзива, широком температурном опсегу примене, као и многе друге.

Фиброоптички сензори могу да се користе за мерење бројних параметара, као што су: напрезање, померај, оштећење, убрзање, пуцање, вибрација, деформација, истрошеност, фреквенција, удар, корозија, акустична емисија, ниво течности, притисак, температура, итд. [27].

## 4.1. Типови фиброоптичких сензора

Могуће су различите поделе фиброоптичких сензора (ФОС). У оквиру овог рада биће посматране поделе према: месту модулације, просторној расподели величине која се мери и типу модулације.

### 4.1.1. Подела ФОС према месту модулације

Најједноставнија подела фиброоптичких сензора је према месту модулације. Посматрано на овај начин, фиброоптички сензори могу бити спољни (*extrinsic*) или унутрашњи (*intrinsic*) [28].

Спољни фиброоптички сензори су они код којих се интеракција између светлости и величине коју је неопходно мерити дешава ван оптичког влакна [42]. Иако се промена дешава споља у односу на влакно, место на коме се дешава промена је на пригодан начин повезано са оптичким влакном, на пример лепљењем, исецањем или механичком везом.

Унутрашњи фиброоптички сензори су они код којих се интеракција између светлости и величине коју је неопходно мерити дешава унутар оптичког влакна, односно где спољна величина која се мери мења нека унутрашња својства оптичког влакна. Промена параметара светлости је углавном привремена, односно траје док траје промена мерене величине, а мерење помоћу ових сензора је у реалном времену. Неки примери унутрашњих оптичких сензора су они који се заснивају на савијању или на оптичким влакнима са уграђеним Браговим решеткама. У оквиру овог рада коришћени су унутрашњи фиброоптички сензори.

### 4.1.2. Подела ФОС према просторној расподели мерене величине

У зависности од просторне расподеле мерене величине, фиброоптички сензори могу бити: тачкасти, интегрисани, дистрибуирани и квази-дистрибуирани [28].

Тачкасти сензори могу да врше мерење само у једној тачки. Овакви сензори се често користе за мерење притиска, температуре, убрзања или хемијских параметара [42]. Разлика између интегрисаних и дистрибуираних сензора је у

могућности одређивања просторне компоненте у одзиву сензора. Код интегрисаних сензора, мерена вредност резултат је интеграције одзива сензора у више тачака у једну резултантну вредност. С друге стране, дистрибуирани сензори могу да одреде не само вредност мерене величине већ и место промене те величине. Квази-дистрибуирани сензори имају могућност да прате промену стања мерене величине у дискретним тачкама простора у оквиру једног оптичког влакна. Пример оваквог сензора је низ Брагових решетки уписаних дуж једног оптичког влакна, од којих свака може да прати промену спољне величине тамо где се налази.

#### **4.1.3. Подела ФОС према типу модулације**

Према типу модулације, фиброоптички сензори могу бити: интензитетни, интерферометарски, полариметарски и спектроскопски [28].

Интензитетни фиброоптички сензори су они којих промена мерене величине доводи до промене интензитета светлости. Представљају једне од првих ФОС, а захваљујући једноставној предајној и пријемној оптици, имају ниску цену у односу на друге системе и развијена су нека решења унутрашњих и спољашњих интензитетних ФОС [43], [44], [45].

Интерферометарски сензори су они код којих промена мерене величине утиче на фазу светлости. Овакви сензори захтевају кохерентне светлосне изворе, мономода влакна, комплексне уређаје за контролу поларизације, што све заједно може да у великој мери утиче на њихову цену. Међутим једном примењени, имају супериорну осетљивост у односу на друга решења [46].

Код полариметарских сензора промена мерене величине узрокује промену поларизације светлости унутар оптичког влакна [47]. Пример примене ових сензора је мерење струје на бази Фарадејевог ефекта [48].

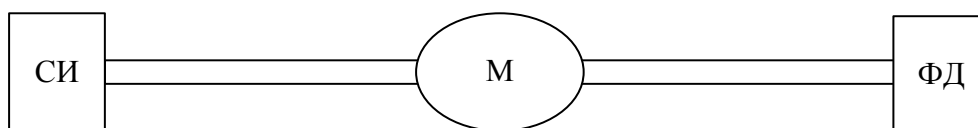
Једна од најатрактивнијих категорија ФОС су спектроскопски сензори код којих мерена величина врши модулацију спектра светлости. Пример ове групе сензора су они са уграђеним Браговим решеткама или решеткама са дугом периодом. Ови сензори имају већу осетљивост у односу на интензитетне сензоре, а мању цену у односу на интерферометарске, што повећава могућност њихове примене у области испитивања композитних материјала [41], [49], [50].

## 4.2. Принцип рада ФОС

У оквиру овог поглавља биће детаљније анализиран принцип рада пре свега оних фиброоптичких сензора који су коришћени у оквиру експерименталног рада, а у складу са поделом ФОС према типу модулације.

### 4.2.1. Унутрашњи интензитетни ФОС

Претходно је наведено да интензитетни ФОС представљају најједноставније решење по питању предајне и пријемне оптике и повезане електронике, што њихову цену чини најнижом у односу на друга решења, али је и осетљивост сензора мања у односу на друга решења.



Слика 4.1. Конфигурација интензитетног сензора трансмисионог типа [17]

На слици 4.1 приказана је конфигурација интензитетног сензора трансмисионог типа. СИ представља светлосни извор, а ФД фотодетектор. Светлосни извор је ређе кохерентни извор светлости попут ласера или ласерске диоде, а чешће једноставнији и јефтинији некохерентни извор попут емитерске диоде (*Light Emitting Diode - LED*). Као фотодетектори користе се фотодиоде, фототранзистори и слично, са или без додатних појачавача. Оптичка влакна која повезују светлосни извор и фотодетектор углавном су мултимодна стандардна телекомуникациона влакна, а могу бити и пластична оптичка влакна. Конфигурација се назива трансмисионом, јер се светлост води из извора оптичким влакном до места на коме се модулише, где је са М означен модулатор светлости, након чега се прослеђује даље фотодетектору другим делом оптичког влакна или другим оптичким влакном. Поред наведене, постоји и конфигурација рефлексионог типа код које се светлост након модулације рефлектује помоћу огледала и враћа назад истим влакном до фотодетектора.

Код унутрашњих интензитетних ФОС, слабљење унутар оптичког влакна може настати због савијања или микросавијања оптичког влакна или промене индекса преламања језгра и омотача [17].

Савијање оптичког влакна доводи до промене услова тоталне рефлексције на граници између језгра и омотача, услед чега један број модова вишег реда престаје да се води кроз језгро, већ прелази у омотач и напушта оптичко влакно, што доводи до слабљења интензитета светлости. Такође, због закривљености оптичког влакна, сабијености са једне и истегнутости са друге стране, долази до различите брзине пропације различитих зрака које се простиру закривљеним областима. Што је полупречник кривине савијеног оптичког влакна мањи, слабљење је веће. За мултимодна оптичка влакна са степенастом променом индекса преламања слабљење је сразмерно изразу [17], [26]:

$$2\alpha^s \approx \exp\left[-\frac{2}{3} \cdot n_2 \cdot R \cdot \left(\frac{\xi^2}{n_2^2 \cdot k_0^2} - \frac{2 \cdot r_1}{R}\right)^{3/2}\right] \quad (4.1)$$

У претходном изразу  $\alpha^s$  представља слабљење,  $k_0$  таласни број оптичких таласа у вакууму,  $\xi^2 = (\beta^2 - n_2^2 \cdot k_0^2)$ ,  $\beta$  фазни коефицијент простирућег таласа,  $r_1$  полупречник језгра,  $n_2$  индекс преламања омотача, а  $R$  полупречник кривине савијеног оптичког влакна. Приказана зависност је комплексна, али се може видети да на слабљење доминантно утичу полупречник кривине, односно однос полупречника језгра и полупречника кривине. Слабљење од 3 dB у мултимодном оптичком влакну настаје када за полупречник кривине савијања важи [17], [26], [33]:

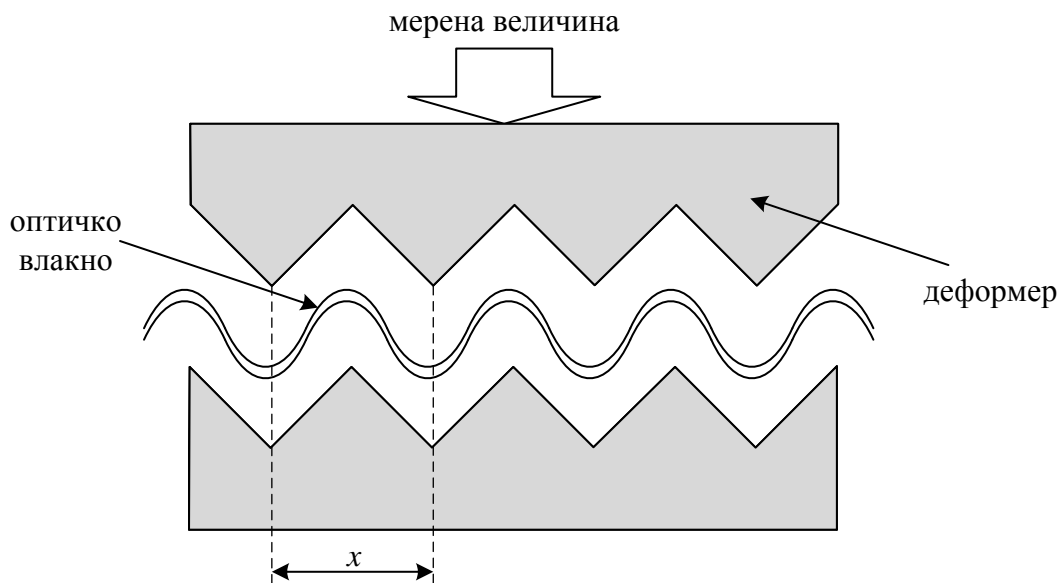
$$R \leq \frac{r_1}{\Delta} \quad (4.2)$$

Други извор слабљења у оптичким влакнима представљају микросавијања. Микросавијања су савијања веома малог полупречника кривине, најчешће периодична и могу довести до значајног слабљења интензитета светлости. Ако се микросавијања мењају са периодом  $x$ , слабљење је оптимално [17], [33]:

$$x = \frac{C \cdot \pi \cdot r_1 \cdot n_1}{NA} \quad (4.3)$$

У претходној релацији,  $C$  је константа која зависи од промене индекса преламања оптичког влакна и износи 1,42 за степенаста и 2 за градијентна оптичка влакна,  $r_1$  је полупречник језгра,  $n_1$  индекс преламања језгра, а  $NA$  нумеричка апертура оптичког влакна.

Периодични микробендер је најчешће коришћена структура код мултимодних оптичких влакана [28], [51]. Пример структуре микробендера приказан је на слици 4.2. Микросавијање настаје у општем случају применом неке врсте деформера [17], [52].



**Слика 4.2.** Структура периодичног микробендера [28]

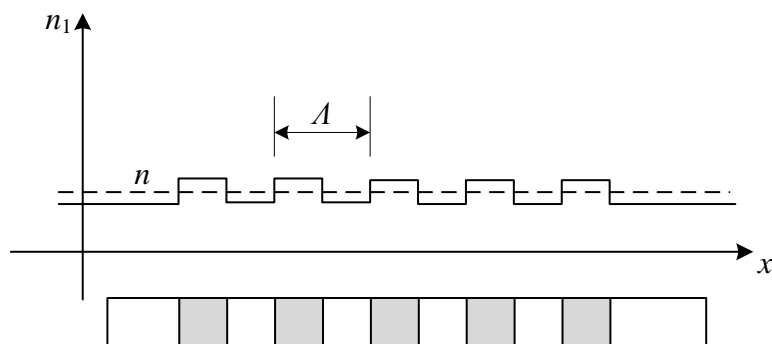
Слабљење оптичког сигнала зависи од периоде микробендера, као и растојања између његове горње и доње стране. Под дејством мерене величине, мења се структура микробендера, односно корак или дубина микросавијања, што доводи до промене у интензитету оптичког сигнала. У случају да периода микробендера није правилна, може се јавити различита осетљивост сензора када се ова структура користи у композитним материјалима [53]. Због тога, неопходно је развити механизам калибрације, како би овај сензор могао да се ефикасно користи за мерења у композитним материјалима.

Унутрашњи интензитетни сензори на бази савијања и микросавијања могу да се користе за мерење различитих величина, укључујући [28]: померај/истезање, притисак, деформацију, вибрације, температуру или влажност. По престанку

деловања мерене величине, интензитет светлости се најчешће враћа на вредност која је била пре њеног деловања, па се мерење стога мора вршити у реалном времену. Приликом употребе ових сензора неопходно је применити неку од техника компензације како би се смањио утицај других величина на мерење, попут флукуација ирадијансе светлосног извора или мањих промена у оптоелектронској ефикасности мерног система.

#### 4.2.2. ФОС са уграђеним Браговим решеткама и решеткама са дугом периодом

Оптичка влакна са уграђеним Браговим решеткама се разликују по структури од обичних оптичких влакана, јер је код њих извршено подужно периодично варирање индекса преламања језгра на одређеној дужини влакна, због чега се добијена структура понаша као филтерско огледало за одређене таласне дужине [41], [54]. Оваква влакна осетљива су на температуру, притисак и силу, а модулација оптичког сигнала сензора је спектроскопска, односно одзив сензора се посматра кроз промењен спектар светлости у односу на промену мерене величине [55].



Слика 4.3. Подужна промена индекса преламања код оптичких влакана са Браговом решетком [27]

На слици 4.3 приказана је подужна промена индекса преламања унутар језгра код оптичких влакана са уграђеном Браговом решетком. Модификација индекса преламања постиже се излагањем језгра оптичког влакна интензивним ултраљубичастим зрачењем таласне дужине око 240 nm [41], [56] осветљавањем



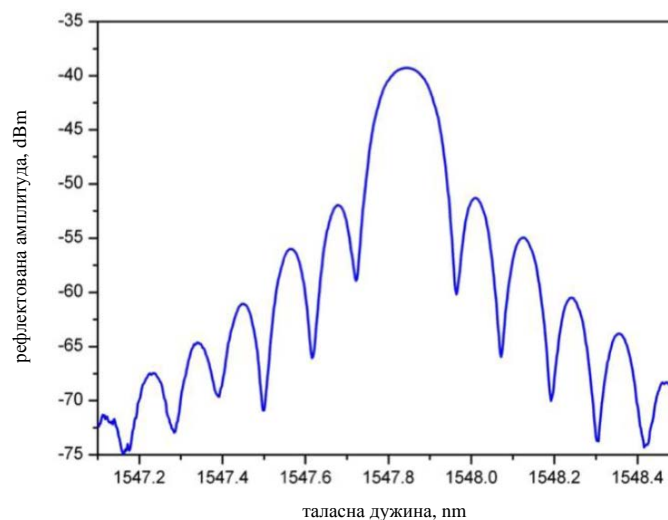
са стране или са једног краја ласером. Осветљавање се врши холографски или помоћу посебне маске.

Ако се светлост неког ширег опсега таласних дужина уведе у такво оптичко влакно, тада се на месту решетке рефлектује светлост таласне дужине  $\lambda_B$ , која је одређена као [17], [57]:

$$\lambda_B = 2 \cdot n \cdot \Lambda \quad (4.4)$$

У претходној релацији је са  $n$  обележена средња вредност индекса преламања језгра, који подужно варира између две веома блиске вредности, а са  $\Lambda$  подужни период промене индекса преламања, односно период решетке. Стандардно, вредност периода решетке износи између 200 и 1000 nm, дужине решетке између неколико mm и неколико десетина cm, а релативна промена индекса преламања је између  $10^{-5}$  и  $10^{-3}$  [41].

Решетке чија је периода у опсегу од 100  $\mu\text{m}$  до 1 mm називају се решеткама са дугом периодом. Разлика између ових и Брагових решетки је у начину интерференције спектра светлости и последично начину испитивања сензора. Док код Брагових решетки долази до интерференције између директно вођене светлости и рефлектоване светлости, код решетки са дугом периодом долази до интерференције између директно вођене светлости и модова који се простиру кроз омотач [58], [59], због чега се у спектру светлости јављају слабљења на одређеним дискретним таласним дужинама .



**Слика 4.4.** Спектар рефлектоване светлости код униформне Брагове решетке дужине 1 cm [41]

Структура Брагове решетке не мора нужно бити униформна, као на слици 4.3. Ако је структура униформна, тада је изглед типичног рефлектованог спектра, у овом случају за једну решетку дужине 1 cm, приказан на слици 4.4:

Промена спектра рефлектоване светлости  $\Delta\lambda_B$  условљена је како променом температуре  $\Delta T$ , тако и променом дужине решетке  $\Delta\varepsilon$ . На основу једначине (4.4) следи:

$$\Delta\lambda_B = 2 \cdot \left( \Lambda \cdot \frac{\partial n}{\partial T} + n \cdot \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \cdot \Delta T + 2 \cdot \left( \Lambda \cdot \frac{\partial n}{\partial \varepsilon} + n \cdot \frac{\partial \Lambda}{\partial \varepsilon} \right) \cdot \Delta\varepsilon \quad (4.5)$$

Први део десне стране једначине говори о промени спектра која је условљена променом температуре. До ове промене долази због промене због температурне флукуације индекса преламања језгра и периоде решетке. Релативна промена спектра у односу на промену температуре се може изразити као:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = \lambda_B \cdot \left( \frac{1}{n} \cdot \frac{\partial n}{\partial T} + \frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \quad (4.6)$$

У претходној релацији,  $(\partial n / \partial T) / n$  представља термо-оптички коефицијент и приближно је једнако  $8,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  у стандардним телекомуникационим влакнима где је језгро допирано германијумом, док је  $(\partial \Lambda / \partial T) / \Lambda$  термални коефицијент ширења оптичког влакна и приближно је једнако  $0,55 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Температурна осетљивост Брагових решетке је око  $10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  на  $1550 \text{ nm}$  [41].

Други део десне стране једначине (4.5) говори о промени спектра која је последица деформације решетке, односно њеног истезања. Ако је деформација подужна, под претпоставком да се влакно еластично деформише, добија се [41], [56]:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \cdot (1 - p_e) \cdot \Delta\varepsilon \quad (4.7)$$

У претходној релацији је са  $p_e$  обележена ефективна фотоеластична константа оптичког влакна која износи око 0,21 [60]. Осетљивост Брагове решетке на аксијалну деформацију износи око  $1,2 \text{ pm}/\mu\text{e}$  на  $1550 \text{ nm}$  [41].

Раздвајање утицаја промене температуре и промене деформације није могуће једном Браговом решетком. Због тога се приликом употребе ове врсте

сензора користе различите технике. Често се у исто оптичко влакно уграђује још једна Брагова решетка која је изложена само утицају промене температуре [61], [62]. Температурна осетљивост оптичких влакана са Браговим решеткама у неким случајевима је и погодна за компензацију утицаја температуре код неких других интерферометарских решења [63].

Поред стандардних Брагових решетки са униформном решетком, користе се и решетке чији се период мења дуж решетке. Овакве решетке могу да се користе за мерење деформација које нису униформне у односу на дужину решетке, односно за детекцију локалне расподеле деформације у околини решетке [64], [65].

Сензори на бази Брагових решетки имају бољу осетљивост у односу на интензитетне јер је одзив сензора независан у односу на флукуације интензитета светлости проузроковане светлосним извором, оптоелектронском ефикасношћу мерног система или губицима на улазним/излазним крајевима. Погодни су за квази-дистрибуирана мерења јер се може уписати више решетки у оквиру једног оптичког влакна, са различитим таласним дужинама  $\lambda_B$  [66], [67]. У предности ових сензора убраја се и њихова линеарност у великом опсегу промена температуре и/или деформације, као и могућност њиховог уграђивања у мономода и мултимода стандардна телекомуникациона влакна, а у новије време и уградња у пластична оптичка влакна [68], [69].

Погодност сензора на бази уграђених Брагових решетки или решетки са дугом периодом огледа се и у томе што мерење није неопходно вршити у реалном времену.

### **4.2.3. Друге врсте ФОС**

Поред претходно приказаних фиброоптичких сензора постоје и бројна друга решења.

Код унутрашњих интензитетних сензора користе се и они код којих слабљење настаје услед промене индекса преламања омотача. Код ових сензора се подужно на одређеном месту уклони омотач и замени материјалом чији индекс преламања зависи од мерене величине [70]. Оптичка влакна која се том приликом користе требало би да имају могућност лаког уклањања омотача без оштећења

остатка влакна, а опсег вредности индекса преламања материјала који служи као замена би требало да се у зависности од мерене величине креће између вредности индекса преламања језгра и омотача.

Код спољашњих интензитетних сензора користе се поред светлосног извора и фотодетектора најчешће два оптичка влакна, предајно и пријемно. Слабљење код ових сензора настаје због трансверзалног, лонгитудиналног или угаоног помераја врхова оптичких влакана, удаљавања или приближавања рефлексивне површине, прекидања зрака неким другим елементом и др. [27], [33].

Посебно су интересантна друга интерферометарска решења код којих под дејством мерене величине долази до промене фазног кашњења између таласа. Фиброоптички интерферометри могу да се формирају на два или на једном оптичком влакну [17].

Код фиброоптичких интерферометара који су формиран на два оптичка влакна, сноп светлости из извора се дели на два дела и тако подељен уводи у свако од оптичких влакана. Једно влакно је изложено промени мерене величине, док друго није, односно користи се као референтно. По проласку светлости кроз оптичка влакна зраци се мешају и долази до њихове интерференције, а интензитет добијеног оптичког сигнала зависи од фазне разлике између светлосних зрака. Пример оваквог сензора је Мах-Зендеров (*Mach-Zehnder*) интерферометар [57].

Код фиброоптичких интерферометара образованих на једном влакну долази до интерференције два мода дуж истог оптичког влакна. Погодни су за уграђивање и имају већи мерни опсег у односу на оне формиране на два оптичка влакна, али и мању осетљивост приликом мерења температуре и истезања [33], [71]. Пример оваквог сензора је Фабри-Пероов (*Fabry-Pérot*) интерферометар [72].

Интерферометарски сензори имају већу тачност мерења у односу на интензитетне за један до два редова величине, али и поједине недостатке. Промена фазе коју могу да мере ограничена је на опсег од 0 до  $2\pi$ , резолуција мерења није константна, по искључивању интерферометра губе се сви подаци, а сам интерферометар осетљив је на више величина истовремено чије утицаје је тешко раздвојити [17]. Сви ови проблеми су решиви али знатно компликују начин испитивања сензора и повезану електронику.

Полариметарски сензори најчешће се образују на једном оптичком влакну и то у посебним оптичким влакнима која потенцирају ефекте двојног преламања светлости, као што је претходно наведено. Као мера двојног преламања користи се разлика у константама простирања дуж различитих равни поларизације [71], [73]. Полариметарски сензор је осетљив и на лонгитудинална и на трансверзална померања, за разлику од Фабри-Пероовог, иако је његова осетљивост лошија у односу на интерферометарска решења. Проблем осетљивости на температуру решава се у комбинацији са другим сензорима.

### **4.3. ФОС и композитни материјали**

Паметне структуре представљају посебну категорију композитних материјала. Ове структуре развиле су се из потребе да се обезбеди праћење стања структуре (*structural health monitoring*) у реалном времену на основу којег се може проценити ниво оштећења структуре. Да би то било могуће, неопходан је мултидисциплинаран приступ који укључује знања о сензорима, процесирању сигнала, инструментацији и инжењерству материјала [49].

У нове структуре уграђују се сензори још у поступку њихове израде како би се спречила мања оштећења већ у раној фази, посебно у авиоиндустрији [74], грађевинској индустрији [75] и бродарству [76]. Тада се могу извести поправке ниске цене уместо захтевних трошкова обнове или реконструкције целокупне структуре. Употреба нових материјала такође узрокује потребу за праћењем стања структуре. На пример, полимери ојачани влакнима се све чешће користе у различитим новим структурама. Иако су лабораторијски детаљно испитани, њихово понашање у реалном свету није познато. Уградња система за праћење структуре омогућује процену реалног понашања материјала, обезбеђује безбедно функционисање структура и омогућава даље унапређење структура које користе нове материјале [77].

Први корак у стварању паметне структуре је уградња сензора у саму структуру. Иако постоје бројна решења заснована на мерним тракама, пиезоелектричним филмовима и микросензорима, фиброоптички сензори представљају најбољи избор због многих предности које нуде. То је омогућило

интеграцију ових сензора у различите материјале, укључујући метале, бетон и напредне композитне материјале.

Уградња оптичких влакана у напредне влакнима ојачане полимерне композите представља атрактивну област истраживања, јер у овим композитима настају бројна оштећења које је неопходно детектовати, попут деламинације, пуцања матрице или лома влакана. Предложена су бројна решења заснована на употреби фиброоптичких сензора. Већина савремених решења заснива се на Браговим решеткама [49], [78], [79], [80], полариметарским и интерферометарским сензорима [46], [81], као и интензитетним сензорима [43], [44], [45], [53]. Поред ограничења које поседују, ови сензори су показали могућности праћења различитих параметара структуре и могућност квантитативног одређивања деформације и температуре. Познати су примери који укључују детекцију ударних оштећења [82], [83], [84] и деламинације [85], структуралне деформације [86], [87], ширења прслине [88], [89], детекцију трансверзалних прслина [90] и детекцију оштећења изазваних замором [91], [92].

#### **4.3.1. Интензитетни ФОС и композитни материјали**

Предност интензитетних сензора огледа се у њиховој ниској цени, а испитивање сензора је драстично поједностављено у односу на друга решења. Већина истраживања у овој области омогућила су квалитативну процену стања структуре, иако је било и претходних истраживања у циљу квантификације мерних резултата [93], [94].

Интензитетни оптички сензори представљају историјски прву и најосновнију групу фиброоптичких сензора који су коришћени за праћење стања структуре. Концепт употребе интензитетних сензора за праћење стања структуре развили су пре више деценија независно *Lees* [95] и *Hale* [96]. У овим истраживањима, праћен је интензитет оптичког сигнала у 125  $\mu\text{m}$  мултимодном оптичком влакну. Већи број интензитетних сензора постављан је паралелно и лепљен епоксидом на критичне делове челичне структуре. У случају појаве пукотине у делу структуре на коме су била налепљена оптичка влакна, долазило је до напрезања и пуцања оптичких влакана што се огледало у губитку оптичког сигнала. Сензори које је развио *Hale* тестирани су под екстремним временским

условима и утврђена је њихова робусност и могућност употребе у хазардним срединама.

Употребу интензитетних сензора за процену нивоа оштећења у напредним композитним материјалима први пут је истраживао *Crane* [97]. У овом раду два скупа ортогонално постављених оптичких влакана уграђени су у унидирекциони композит са епоксидном матрицом и графитним или стакленим влакнима. Показано је да област ударног оштећења добро кореспондира месту лома оптичког влакна, указујући на могућност употребе оваквих сензора ради детекције и локализације оштећења у композитним материјалима.

Ако се претпостави да је напрезање на оптичком влакну било равномерно распоређено пре оштећења материјала и да је влакно целом дужином чврсто везано за околни материјал, појава оштећења у материјалу ће довести до делимичног одвајања оптичког влакна од материјала и то ствара одређену врсту микросавијања, што је приказано у истраживањима које су спровели *Rippert* и *Wevers* [98], [99]. Континуално слабљење оптичког сигнала настаје као последица појаве савијања и микросавијања оптичког влакна што се повећава са повећањем напрезања и оштећења материјала. Приликом настанка пукотина, деламинације и лома унутар материјала јављају се и механички таласи који се простиру кроз материјал. Када такав талас дође до оптичког влакна, он га локално савија, притиска и долази до краткотрајног слабљења светлосног интензитета.

Ако оштећење у материјалу после престанка деловања оптерећења није довело до значајног савијања, микросавијања, напрезања или оштећења оптичког влакна, интензитет оптичког сигнала вратиће се на ниво пре примене оптерећења. У супротном, слабљење сигнала ће бити трајно и зависно од нивоа оштећења. Разлика у одзиву постоји и при статичком и динамичком оптерећивању материјала истом силом [17].

#### **4.3.2. Брагове решетке и композитни материјали**

Употреба фиброоптичких сензора на бази Брагових решетки за праћење стања структуре заснована је на открићу фотосензитивности германијумом допираних оптичких влакана [100], [101]. Традиционално, ови сензори се користе за мерење деформације, иако је демонстрирана и могућност њихове употребе у

циљу детекције оштећења. Када се користе за одређивање деформације унутар структуре, сензори засновани на Браговим решеткама пружају могућност мултиплексирања и квази-дистрибуираног мерења. Ова могућност се може искористити на тај начин што се постави мрежа Брагових решетки било лепљењем на површину материјала или уграђивањем у структуру. Брагове решетки се могу употребити и за карактеризацију структуралног напрезања приликом праћења стања спојева, као и за праћење резидуалног напрезања након процесирања композитних материјала [49].

Први пример употребе Брагових решетки уграђених у композитни материјал било је истраживање које је спровео *Dunphy* [102], где је овај сензор уграђен у влакном ојачани епоксидни композит у циљу праћења процесирања и стања материјала. Накнадно је и у истраживању које је спровео *Simonsen* [103] приказана употреба сензора на бази Брагових решетки за праћење деформација у стакленим влакнима ојачаном полиестер композиту. Резултати ових истраживања показали су добру линеарност, осетљивост, поновљивост резултата мерења и робусност при употреби ових уграђених сензора.

Способност Брагових решетки да врше детекцију и мерење неуниформних деформација примењена је на праћење стања спојева материјала [104]. Аутори наведеног истраживања показали су могућност примене ових сензора за праћење појаве деламинације и пропагације пукотине помоћу промена у рефлектованом спектру оптичког сигнала.

Вршена су и истраживања у циљу испитивања употребе Брагових решетки као сензора за детекцију ударних оштећења [105], [106]. У првом истраживању, три сензора су уграђена у стакленим влакнима ојачан епоксидни композитни материјал и вршени су поновљени удари енергијама до 20 џула. Резултати су показали способност сензора да мери трајну деформацију на месту удара до одређеног броја поновљених удара. У другом истраживању Брагове решетки уграђене су у карбонским влакнима ојачан епоксидни композит. Ово истраживање је показало да сензор може да мери деформацију током удара, а резултати су упоређени са оним добијеним класичним сензорима за мерење силе.



### **4.3.3. Остали ФОС и композитни материјали**

Способност интерферометарског сензора да мери деформацију први пут су приказали *Butter* и *Hocker* [107]. У овом истраживању мерена је фазна разлика оптичког сигнала под утицајем примењене деформације. Употреба Фабри-Пероовог сензора успешно је демонстрирана од стране више аутора [108], [109] и показано је да се могу користити за праћење стања структуре због могућности квази-дистрибуираног мерења и високе осетљивости. Показано је и да је овај сензор погодан за комбиновање са другим интерферометарским сензорима за мерење дводимензионалних деформација или за мерење више величина попут температуре и истезања или истезања у више праваца.

Испитивана је и могућност коришћења уграђених полариметарских сензора за детекцију деламинације у композитним материјалима [110], [111]. Ова истраживања су показала да је сензор у могућности да детектује случај када настаје деламинација, као и да његова осетљивост зависи од места постављања.

### **4.4. Утицај уграђеног оптичког влакна на карактеристике композитног материјала**

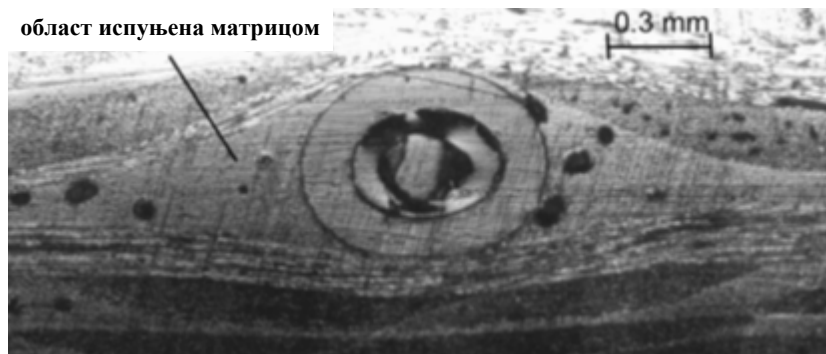
Приликом уграђивања оптичких влакана у композитне материјале важно је не само извршити одабир одговарајућег сензора за праћење стања структуре већ и уградити сензор на тај начин да његово присуство у композиту не доведе до значајне деградације механичких перформанси материјала [112].

Пример паметних материјала који се користе у авиоиндустрији су карбонским влакнима ојачани ламинати високих перформанси са уграђеним оптичким влакнима. Ове структуре, поред своје технолошке једноставности, имају и ту предност да представљају одличну симбиозу између композитних материјала и оптичких влакана [113], [114]. Једноставност позиционирања оптичког сензора приликом израде композита постаје на тај начин јако важан параметар у процесирању материјала.

Уграђени сензор у композитном материјалу представља дефект унутар материјала и уноси концентрисано напрезање које може да деградира особине материјала и његову трајност. Типичне димензије пречника оптичких влакана са

заштитом су пар редова величине веће од пречника влакнастог ојачања. На тај начин, уграђено оптичко влакно представља еластични уметак унутар материјала чији утицај зависи од његове величине, позиције на којој се налази и оријентације, механичких карактеристика влакна, врсте превлаке, особина композита и врсте оптерећења којој ће композит бити изложен [114], [115].

Поставља се и питање шта заправо мери оптичко влакно, једном када се угради у композитни материјал. Оно се током процеса уградње у одређеној мери само деформише, због утицаја температуре или притиска у процесу израде композита. Приликом излагања композита различитим врстама оптерећења, оно што се добија као одзив сензора заправо представља збирни утицај истезања, савијања, термичког напрезања самог оптичког влакна, а не композитног материјала. Напрезања у композитном материјалу и оптичког влакну су повезана, посебно ако је остварена добра адхезија између влакна и материјала, али се не може заобићи ни чињеница да се оно понаша нешто другачије у односу на композит у коме је уграђено [17].



**Слика 4.5.** Мултимодно оптичко влакно са акрилном превлаком (пречника 600  $\mu\text{m}$ ) уграђено ортогонално на карбонско влакнасто ојачање у епоксидном композиту [49]

Истраживања која су вршена [114], [115], [116], [117] показала су да геометријска оријентација у односу на суседне ламине код ламинарних композита представља важан фактор и да постављање ових влакана ортогонално на суседна карбонска влакна у унидирекционим композитима ствара области богате матрицом и без влакнастог ојачања, као што је приказано на слици 4.5. Ове области представљају интерламинарни дисконтинуитет и могу да доведу до

оштећења материјала код примене статичког или динамичког оптерећења. Такође је показано да нема већег утицаја оптичког влакна на тип оштећења материјала и чврстоћу приликом аксијалног напрезања уколико се она поставе паралелно ојачању [116]. Одсуство већег утицаја показано је и у случају да су димензије пречника уграђеног оптичког влакна испод 160  $\mu\text{m}$ , а превлака полиамидна [118].

Истраживања која су спроводили *Chang* [119] и *Sirkis* [120] разматрала су утицај ударних оптерећења на епоксидне композите ојачане карбонским влакнима са уграђеним оптичким влакнима пречника између 100  $\mu\text{m}$  и 600  $\mu\text{m}$  и различитим структурама композита: укрштеним, квази-изотропним и унидирекционим. Аутори ових студија су показали да оптичка влакна малог пречника (100  $\mu\text{m}$ ) не утичу у већој мери на пропагацију оштећења када је влакно централно уграђено у танким ламинатима и при ниским енергијама удара.

Студија коју је извео *Silva* [112] разматрала је утицај уградње мултимодних оптичких влакана на ламинарне композите изложене различитим врстама статичког и динамичког оптерећења. Влакна су уграђивана на различитим позицијама у односу на место удара - близу места удара, на средини ламината и супротно од места удара, као и паралелно и ортогонално на влакнасто ојачање. Ова студија је показала да влакна постављена близу места удара утичу на бржу пропагацију пукотине и последично веће ударно оштећење, док влакна постављена супротно од места удара утичу на појачану деламинацију испод слоја који садржи оптичко влакно, а која је последица интеракције механичког ударног таласа и локалног напрезања у околини оптичког влакна.

#### **4.5. Припрема оптичког влакна за уградњу у композитни материјал**

Приликом уградње оптичких влакана важно је да она остану неоштећена. Материјал не треба да представља хемијски агресивну средину за уграђено влакно било да је скинута примарна заштита или не [17].

Оптичка влакна са уклоњеном примарном заштитом имају повећану осетљивост у односу на оптичка влакна чија заштита није уклоњена. Међутим, овако обрађена оптичка влакна нису погодна за уграђивање јер су лако ломљива, а и сам процес уклањања примарне заштите механичким или хемијским поступком

може да изазове мања оштећења на влакну која га могу механички ослабити. Због тога, уграђивање „огољених“ оптичких влакана ограничено је на лабораторијске услове и мање дужине влакана.

Приликом уградње стандардних телекомуникационих влакана са акрилном превлаком потребно је водити рачуна да температура и притисак у процесу уградње и припреме композита не доведу до топљења или деформације самог влакна. Акрилатна превлака на високим температурама и притисцима може да промени облик или да се на одређеним местима одвоји од омотача оптичког влакна.

У том смислу, погодније је користити оптичка влакна са тањом полиимидном или металном превлаком (сребрном, златном или алуминијумском), јер она могу да издрже веће температуре у поступку уградње и хемијски су отпорнија, али су и знатно скупља.

За добро функционисање уграђеног фиброоптичког сензора од највеће важности је остварена адхезија између оптичког влакна и околног материјала. У случају да се значајно промене услови адхезије између оптичког влакна и материјала, уграђени сензор неће бити у могућности да даље исправно функционише [53]. Због тога је неопходно добро опрати и осушити оптичко влакно пре поступка уградње.

Посебна пажња приликом поступка уградње мора се посветити заштити излазних крајева, припреми крајева оптичких влакана за повезивање са другим деловима фиброоптичких сензора, тј. светлосним изворима и фотодетекторима, као и постављању излазних крајева на такав начин да се омогући финална обрада композитног елемента и његово повезивање са другим елементима.

Оптичка влакна су најосетљивија на својим излазним крајевима, јер су ту најлакше ломљива, посебно приликом излагања високим притисцима и већим савијањима на ивици калупа који служи за припрему материјала. Важно је и да се обрати пажња на вишак матрице који може да исцури у процесу припреме материјала, јер тај вишак чини влакна изузетно подложним оштећењима [121].

Једно од решења проблема заштите је поставка термопластичних цевчица на излазним крајевима, тако да један део цевчице улази у материјал, а други излази из композита у довољној дужини да се заштити критичан део влакна на излазу.

Оваква заштита није погодна за индустријску примену. У реалним условима, неопходно је употребити конекторе који су уграђени у композит и који омогућавају повезивање уграђеног оптичког влакна са мерним системом.

## 5. Поставка експерименталног рада

Циљеви истраживања спроведених у оквиру ове докторске дисертације су били у испитивању и утврђивању корелације између модулације светлости, типа композитног материјала и оштећења до којих долази у композитном материјалу услед динамичког оптерећења проузрокованог ударом контролисане енергије. Поред тога циљ је био и одабрати оптимално оптичко влакно, таласну дужину светлости и технику модулације за одређени композитни материјал.

С тим у вези, спроведени су експерименти на различитим композитним материјалима и са различитим врстама фиброоптичких сензора уграђеним у композитне материјале у поступку њихове производње. У термопластични композит на бази рециклираног полиетилена са ојачањем у виду стакленог мата уграђивани су интензитетни сензор у виду стандардног телекомуникационог оптичког влакна, као и оптичко влакно са уграђеном решетком са дугим периодом. У термореактивни епоксидни композит са ојачањем у виду стаклених влакана уграђивани су стандардно телекомуникационо влакно, као и пластично оптичко влакно као интензитетни сензор, како би се тестирао утицај различитих таласних дужина светлости на рад сензора, као и утицај различите врсте употребљеног оптичког влакна.

За већину уграђених сензора коришћени су системи за испитивање посебно развијени за потребе експерименталног рада. У наставку ће, поред начина припреме узорака и њихових својстава, бити приказане и карактеристике инструментације која је коришћена у експериментима, како за испитивање сензора, тако и за тестирање ударних својстава материјала.

### 5.1. Полазне хипотезе

Претходна истраживања и статичка и динамичка мерења на композитним материјалима са уграђеним фиброоптичким сензорима, у условима који нису били строго контролисани, показала су да постоји корелација између интензитета светлости у фиброоптичком влакну и оптерећења у материјалу. Уочено је да до слабљења интензитета светлости, током делујућег динамичког напрезања, у уграђеним оптичким влакнима долази услед савијања, микросавијања и промене

индекса преламања језгра и омотача оптичког влакна због еласто-оптичког ефекта.

Истраживања су показала и да се оптичка влакна могу користити као интензитетни сензори за праћење инфраструктурних промена у реалном времену. Ова истраживања међутим најчешће нису улазила у квантитативну анализу прикупљених података, већ су углавном била квалитативна.

Полазне хипотезе које су искоришћене при изради ове тезе биле су:

1. Промена интензитета светлости оптичког сигнала је у корелацији са енергијом удара и положајем оптичких влакана у односу на место удара.
2. Временски облик оптичког сигнала је у корелацији са временом трајања удара, енергијом апсорбованом од стране материјала, отпорном силом и позицијом удара.
3. Уграђено оптичко влакно због малих димензија и мале масе не пертурбује значајно особине материјала. Другим речима особине материјала са уграђеним влакном могу бити само незнатно слабије у односу на полазни материјал.

## **5.2. Припрема узорка**

У оквиру овог поглавља биће приказан поступак израде узорка коришћених у поступку истраживања, као и нека физичко-механичка својства употребљених материјала.

Највећи број узорка, њих 15, са уграђеним оптичким влакном направљен је од рециклираног полиетилена са стакленим матом као ојачањем. Овај материјал је изабран из више разлога за испитивање. Најпре, узорци од овог материјала се праве релативно једноставно, што омогућава израду већег броја узорка и њихово тестирање. Даље, стандардна телекомуникациона оптичка влакна се могу прецизно позиционирати у оквиру узорка у поступку уградње, што омогућава анализу утицаја растојања од места удара на промену интензитета оптичког сигнала. Могуће је извршити заштиту излазних крајева на једноставан начин. Коначно, овај материјал показује јако добра ударна својства, иако користи матрицу која је добијена у поступку рециклирања. Ниска цена и једноставност

употребљеног материјала повлачи за собом и потребу да се искористи сензор ниске цене, као и једноставни систем за испитивање сензора.

Исти тип композитног материјала употребљен је и за уградњу оптичког влакна са решетком са дугом периодом.

Један број узорака који је анализиран добијен је на основу епоксидном смолом преимпрегнирих стаклених влакана. Ови узорци добијени су са Универзитета у Болоњи, Италија, а материјал има примену у ауто-индустрији.

Коначно, један тип узорака који је испитиван направљен је такође коришћењем стаклених влакана као ојачања, епоксидне смоле као матрице и картонског слоја за очвршћавање. Овај материјал користи се у формули „Друмска стрела“, такмичарском производу студената Универзита у Београду [122].

### **5.2.1. ПЕВГ-СМ узорак - рециклирани полиетилен високе густине, стаклени мат и стандардно телекомуникационо влакно**

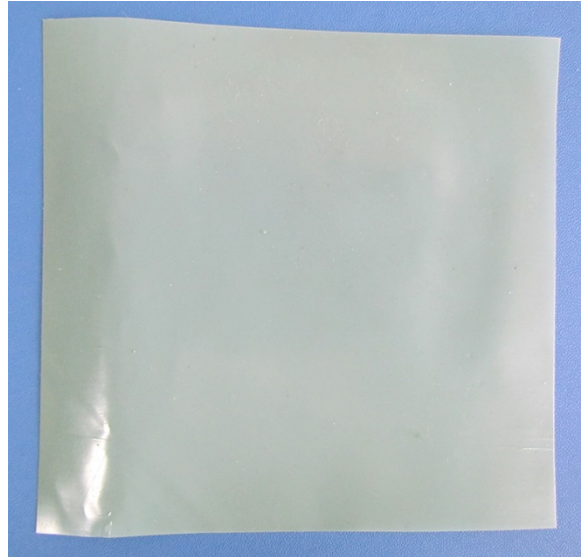
Као полимерна матрица за израду узорака (ПЕВГ-СМ) коришћена је ватростална фолија од рециклираног полиетилена високе густине, чији је произвођач Рециклажни центар Брзан пласт Србија.

Физичко механичка својства рециклираног полиетилена високе густине дата су у табели 5.1, а изглед једног слоја приказан је на слици 5.1.

**Табела 5.1.** Физичко-механичка својства рециклираног ПЕВГ

Својство	Вредност
Густина [ $\text{kg/m}^3$ ]	922
Температура омекшавања /топљења [ $^{\circ}\text{C}$ ]	98/120
Температура прераде [ $^{\circ}\text{C}$ ]	130-200
Прекидна чврстоћа [МПа]	23-26
Граница развлачења [МПа]	11
Деформација до лома [%]	700





**Слика 5.1.** Слој рециклираног полиетилена високе густине - матрица

Као ојачање коришћен је мат од стаклених влакана, произвођача „ИЗОЛМА“ Рача. Мат је произведен од стаклених влакана израђених од А-стакла, а као полимерно везиво коришћена је уреа-формалдехидна смола. Мат је коришћен у облику траке намотане на картонски котур.

**Табела 5.2.** Физичко-механичка својства стакленог мата

Својство	Вредност		
Стандардни типови [ $\text{g/m}^2$ ]	50	60	125
Средњи пречник влакана [ $\mu\text{m}$ ]	13	13	13
Удео стаклених влакана у стварној површинској тежини [%]	70 - 80	70 - 80	80
Нормална површинска тежина [ $\text{g/m}^2$ ]	45 - 54	60 - 74	120-135
Отпор на кидање подужно [ $\text{N}/50\text{mm}$ ]	150	180	300
Отпор на кидање попречно [ $\text{N}/50\text{mm}$ ]	100	120	200
Основа везива	уреа формалдехидна смола		

Физичко-механичка својства стакленог мата дата су у табели 5.2, а његов изглед је приказан на слици 5.2.



**Слика 5.2.** Слој стакленог мата - ојачање

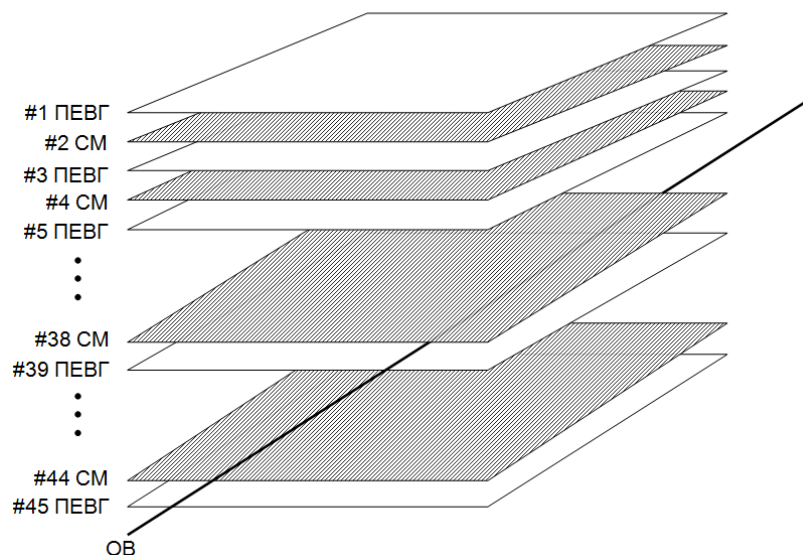
У зависности од величине узорка који је неопходно направити, врши се исецање стакленог мата, односно фолија полиетилена на одговарајуће димензије, с тим што се први и последњи слој матрице увек исецају тако да буду нешто већих димензија како би се обезбедило да се она приликом топлљења распореди равномерно и по бочним ивицама узорка.



**Слика 5.3.** Хидрауличка топла преса за припрему узорка

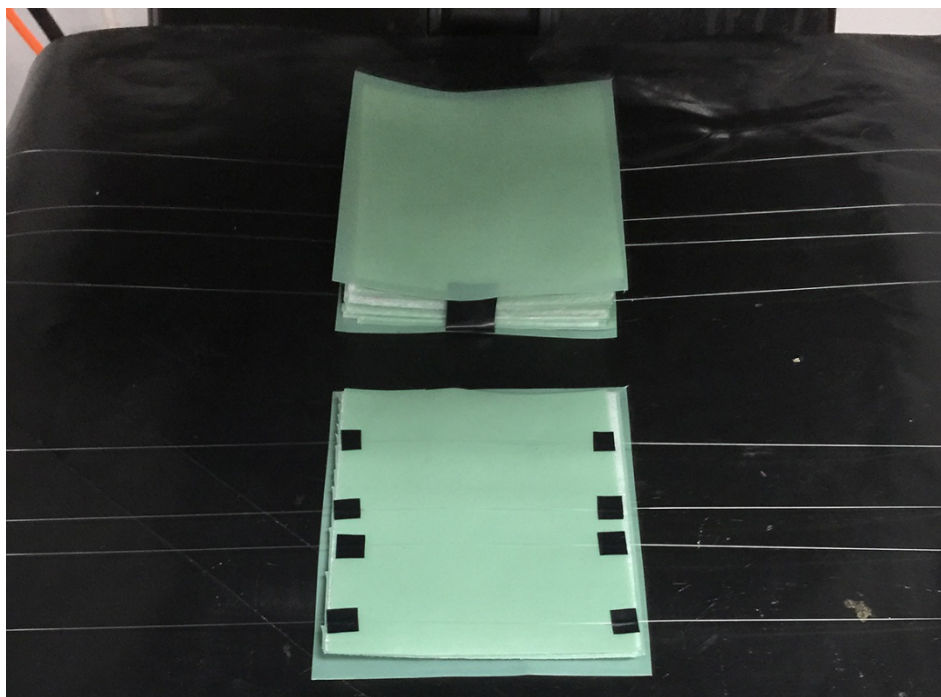
На слици 5.3 приказана је хидрауличка топла преса која је употребљена за припрему композита са рециклираним полиетиленом високе густине и стакленим матом као ојачањем. Приликом израде узорака у овој преси неопходно је подесити температуру, притисак и време припреме узорка. Узорци се пре пресовања постављају у тefлонску фолију која служи за заштиту грејних плоча пресе од матрице приликом њеног топљења и која омогућава лакше вађење узорака након њихове израде.

Композит са рециклираним полиетиленом високе густине и стакленим матом (ПЕВГ-СМ) направљен је наизменичним ређањем 23 слоја фолије матрице и 22 слоја стакленог ојачања. Структура добијеног композита приказана је на слици 5.4.



**Слика 5.4.** Структура ПЕВГ-СМ композита

Оптимални параметри припреме узорака су температура од 135 °С, притисак од 0.35 МПа и време пресовања од 33.3 минута. Како је максимално време пресовања на самој преси ограничено на 999 секунди, након једног циклуса загревања, ради равномернијег загревања обе стране узорака, неопходно је брзо окренути тefлонску фолију и поново је поставити у пресу на још један циклус загревања под истим условима. Током загревања, неопходно је водити рачуна о регулацији притиска и по потреби ручним подешавањем обезбедити константност притиска у процесу израде материјала.



**Слика 5.5.** Позиционирање и уградња оптичких влакана у ПЕВГ-СМ композит

Стандардна телекомуникациона оптичка влакна, димензија  $62,5/125 \mu\text{m}$  уграђивана су у поступку израде композита, као што је приказано на слици 5.5. У узорке су постављана 2 до 4 оптичка влакна, паралелно бочним ивицама узорка, на различитим растојањима у односу на средиште узорка, између 38. и 39. слоја композита, односно између слоја ПЕВГ и стакленог мата, на супротној страни од места удара, имајући у виду резултате истраживања и препоруке које је изнео *Silva* [112]. Приликом уградње оптичких влакана са истих није уклањана примарна заштита.

Излазни крајеви оптичких влакана заштићени су *PVC* лепљивом траком. Ова трака истовремено омогућава да се оптичка влакна исправе и исправно позиционирају, односно да се обезбеди да растојање између оптичких влакана буде прецизно одређено, а оптичка влакна да буду равномерно затегнута. Да би се то постигло, додатно су *PVC* траком оптичка влакна фиксирана и на тефлонску фолију.

У табели 5.3 приказане су карактеристике уграђених стандардних телекомуникационих оптичких влакана.

**Табела 5.3.** Карактеристике оптичког влакна произвођача Искра Оптиелектроника

Својство	Вредност
Опсег радних таласних дужина [nm]	850 – 1300
Слабљење сигнала [dB/km]	2.87 – 3.66
Пропусни опсег [MHz/km]	522 – 748
NA	0.27
Пречник језгра/омотача/заштите [ $\mu\text{m}$ ]	62.5 / 125 / 250
Омотач	A
Ознака влакна	H2E103EB

На овај начин уграђена оптичка влакна представљају унутрашњи интензитетни фиброоптички сензор. Неправилности у структури слоја стакленог мата омогућавају формирање микробендерске структуре, као што је претходно објашњено у поглављу 4.2.1. Међутим, добијени уграђени сензор није право микробендерског типа, јер резултујућа структура није периодична, услед чега свако уграђено влакно представља јединствени апериодични микробендер са својим посебним својствима, односно другачијом осетљивошћу.

Важно је напоменути да једном остварена структура микробендера остаје очувана све док се значајно не промене услови адхезије између уграђеног оптичког влакна и околног материјала. Начини праћења стања адхезије, као и третирање проблема различите осетљивости сензора овиме постају важан део истраживања и потребно их је посебно коментарисати.

### **5.2.2. ЕП-СВ-И узорак - епоксидна матрица са преимпрегнираним стакленим влакнима и стандардно телекомуникационо влакно**

Одређен број узорака са епоксидном матрицом, ојачањем у виду стаклених влакана (ЕП-СВ-И) и са уграђеним стандардним телекомуникационим влакнима добијен је са Универзитета у Болоњи, Италија. Ови узорци су припремани

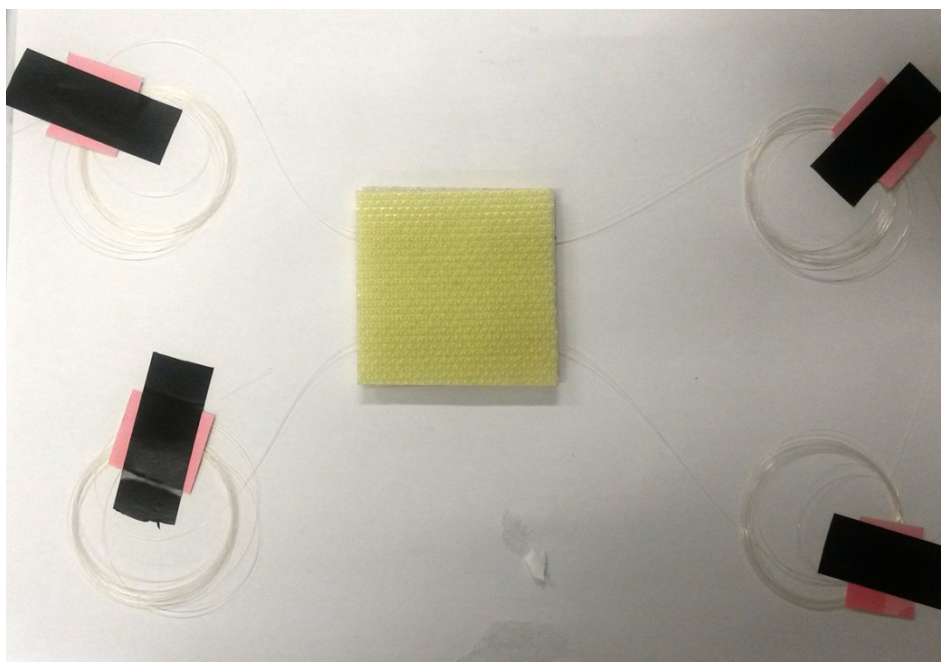


коришћењем епоксидном смолом преимпрегнираних дугих стаклених влакана израђених од Е-стакла и оријентације 0-90°.

Сваки узорак садржао је осам слојева преимпрегнираних стаклених влакана, а по узорку су уграђивана два стандардна телекомуникациона оптичка влакна, симетрично у односу на средиште узорка, паралелно бочним ивицама и на различитим растојањима (20-40 mm) и између различитих слојева (4-5, 6-7).

Узорци су загревани у аутоклаву на температури од 110°C и у трајању од 2 сата. Да би могли да се одвоје након печења у аутоклаву, пре аутоклавирања узорцима је са обе стране додат танак слој тефлона, након чега су вакумирани.

Заштита излазних крајева обезбеђена је постављањем термопластичних бужира. На слици 5.6 приказан је изглед једног узорка пре аутоклавирања.



**Слика 5.6.** Узорак са преимпрегнираним стакленим влакнима и уграђеним стандардним телекомуникационим влакнима

У табели 5.4 су приказане карактеристике употребљене епоксидне матрице, а у табели 5.5 стаклених влакана. Наведена модификована епоксидна матрица користи се у аутоиндустрији, као и за израду спортске опреме.

**Табела 5.4.** Физичко-механичка својства модификоване епоксидне матрице (ИМР 530R)

Својство	Вредност
Густина [g/cm <sup>3</sup> ]	1,18
Температура преласка у стакласто стање $T_g$ [°C]	120-170
Чврстоћа при савијању [МПа]	148-170
Затезна чврстоћа [МПа]	68-78
Деформација до лома [%]	2-3

**Табела 5.5.** Карактеристике стаклених влакана (VV - 770 Н4)

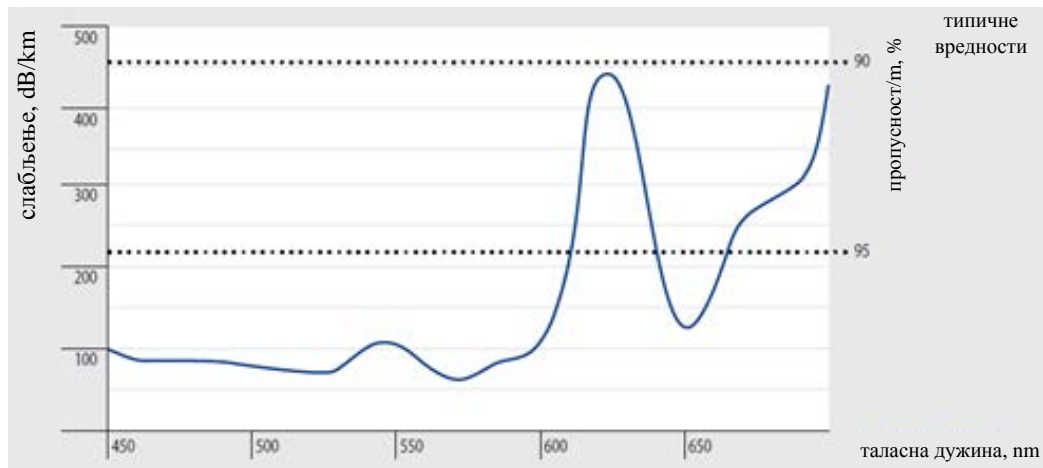
Својство	Вредност
Маса по јединици површине [g/m <sup>2</sup> ]	770
Ткање	<i>4H Satin</i>
Стандардна ширина [mm]	1200
Дебљина слоја [mm]	0,75

Већи број добијених узорака имао је оштећена или поломљена оптичка влакна, што је била последица недостатака у процесу производње. Због тога, као и због немогућности даље набавке ових узорака, на овим узорцима није спроведена детаљна анализа, попут оне која је спроведена на ПЕВГ-СМ композиту.

### **5.2.3. ЕП-СВ-К узорак - епоксидна матрица, стаклена влакна и пластично оптичко влакно**

Да би се испитало понашање интензитетних сензора на другим таласним дужинама искоришћен је композитни материјал са стакленим влакнима, епоксидном матрицом и картонским ојачањем (ЕП-СВ-К) и у њега уграђено пластично оптичко влакно које може да проводи светлост у спектру видљиве

светлости. Језгро овог влакна, пречника 0,98 mm, направљено је од ПММА, а омотач, пречника 1 mm, од флуоризованог полимера. Са степенастим је индексом преламања, нумеричке апертуре 0,5, а има типично слабљење од 425 db/km на таласној дужини од 625 nm за ласерску светлост. На слици 5.7 приказан је дијаграм слабљења у зависности од таласне дужине.



**Слика 5.7.** Слабљење пластичног оптичког влакна у зависности од таласне дужине светлости [123]

ЕП-СВ-К композит се користи као дно кабине у формули Стрела. Разлог за употребу овог материјала огледа се у чињеници да би пластично оптичко влакно извесно било оштећено у поступку топлог пресовања, па га је у практичном смислу немогуће уградити у ПЕВГ-СМ композит.



**Слика 5.8.** Слој ребрастог картона у ЕП-СВ-К композиту



На слици 5.8 приказан је слој ребрастог картона, произвођача Пан-Пак, који је употребљен за израду композита ЕП-СВ-К. Специфична тежина овог картона је  $260 \text{ g/m}^2$ , а дебљина  $1,5 \text{ mm}$ . Ради уградње пластичног оптичког влакна, извршена је перфорација са задње стране картона на једном од ребара. Пластично оптичко влакно уграђено је на растојању  $1 \text{ cm}$  од средишта узорка.

Изнад и испод слоја картона постављена су по два слоја стаклених влакана оријентације  $0-90^\circ$ , ознаке ЕЕ163, које увози фирма Ги-Ни, а чији је изглед приказан на слици 5.9. Спецификације ових влакана дате су у табели 5.6.



**Слика 5.9.** Слој стаклених влакана у ЕП-СВ-К композиту

**Табела 5.6.** Карактеристике ЕЕ163 стаклених влакана

Својство	Вредност
Маса по јединици површине [ $\text{g/m}^2$ ]	166
Ткање	Кепер 2/2
Стандардна ширина [mm]	1000
Дебљина слоја [mm]	0,16

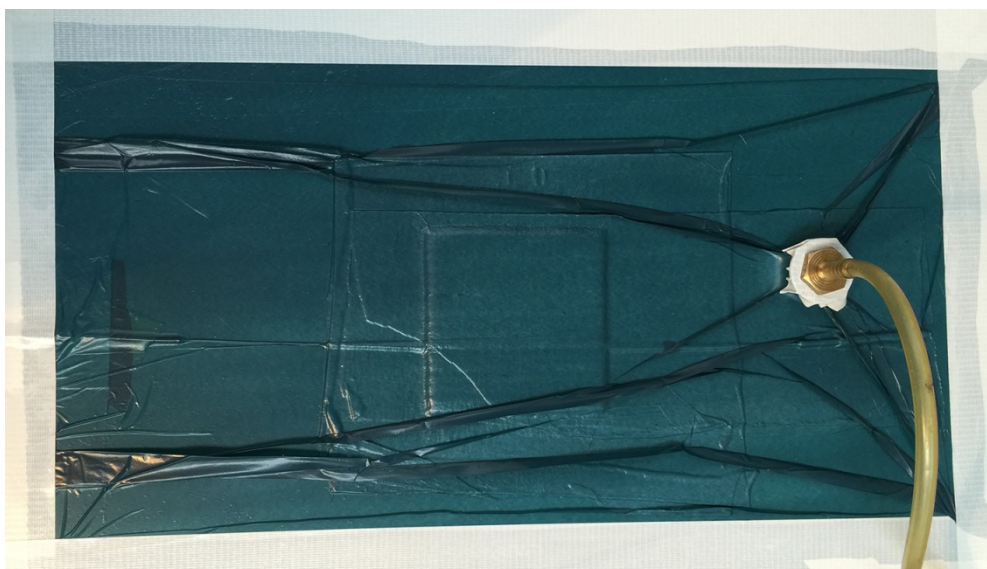
За повезивање стаклених влакана и картона, као матрица, искоришћена је епоксидна смола ЕС 152, произвођача *ELANTAS*, са одговарајућим учвршћивачем W152 MR, чије су карактеристике приказане у табели 5.7. ЕС 152 епоксидна

смола користи се за производњу структуралних делова за бродове, ваздухопловно моделарство, тркачке аутомобиле и спортске компоненте. Масени однос смола-катализатор у смеши износио је 100:30, а масени однос матрица-стаклена влакна 1:1.

Додавање матрице извршено је премазивањем површине картона и сваког од слојева стаклених влакана смешом епоксида и катализатора. Додатно је извршено и премазивање перфорираног канала у картону, у који је положено пластично оптичко влакно, а да би се обезбедила добра адхезија између влакна и матрице.

**Табела 5.7.** Физичко-механичка својства епоксидне смоле EC 152 са W152 MR

Својство	Вредност
Густина [ $\text{g/cm}^3$ ]	1,13 - 1,17
Температура преласка у стакласто стање $T_g$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	85-90
Чврстоћа при савијању [MPa]	120-130
Затезна чврстоћа [MPa]	65-75
Деформација до лома [%]	6-8



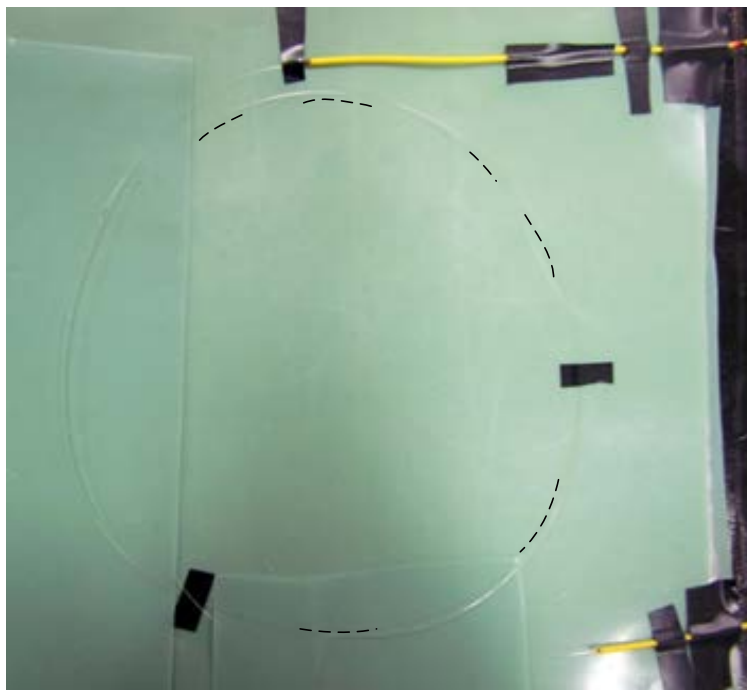
**Слика 5.10.** Вакуумирање узорка ЕП-СВ-К

Припрема узорка завршена је вакумирањем унутар пластичне кесе на притиску од приближно 5 kPa, у трајању од 5 сати, на собној температури. На слици 5.10 је приказан изглед вакумираног узорка. Узорак је остављен да сазри 19 сати, пре него што је распакован из пластичне фолије.

#### **5.2.4. ПЕВГ-СМ-ЛПГ узорак - рециклирани полиетилен високе густине, стаклени мат и оптичко влакно са решетком са дугом периодом**

Последњи тип узорка који је припремљен исте је структуре као и ПЕВГ-СМ композит, с тим изузетком што је уместо стандардног телекомуникационог влакна у узорак уграђено оптичко влакно са решетком са дугом периодом. Влакно је уграђено између 38. и 39. слоја у узорак димензија 140x140 mm. Услови топлог пресовања узорка били су исти као за ПЕВГ-СМ композит.

На слици 5.11 приказан је начин позиционирања овог оптичког влакна у оквиру ПЕВГ-СМ-ЛПГ композита у поступку уградње, а испрекидана помоћна линија олакшава праћење позиције влакна.



**Слика 5.11.** Позиционирање влакна са решетком са дугом периодом у ПЕВГ-СМ-ЛПГ композиту

Са слике се може приметити да је оптичко влакно постављено кружно у оквиру одговарајућег слоја узорка, тако да полупречник круга није већи од 5 cm, због ограничења носача узорака на инструменту за тестирање ударом. На месту на коме један сегмент оптичког влакна прелази преко другог постављен је мали исечак *PVC* траке, а на овај начин је извршено и фиксирање влакна на још пар места унутар узорка и заштићени излазни крајеви. Додатно је због позиционирања на два места додат исечак полиетилена високе густине. На тај начин је спречено померање оптичког влакна пре топлог пресовања.

### **5.3. Инструментација**

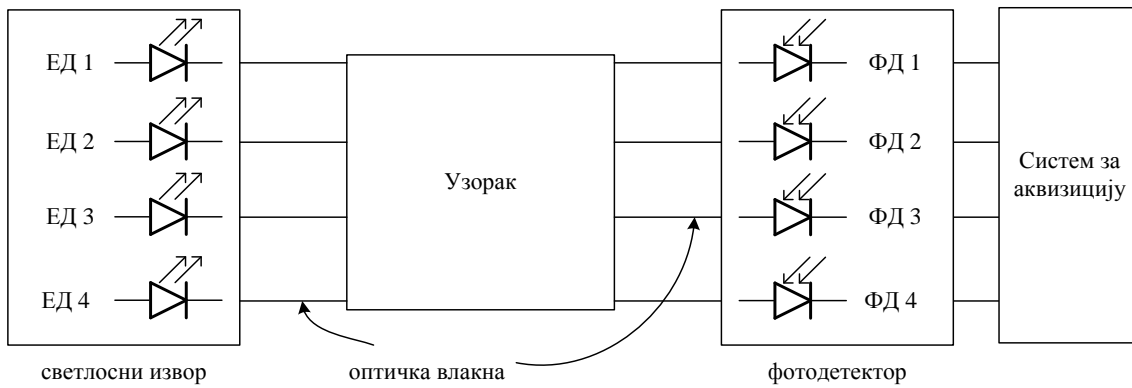
У наставку ће бити приказане карактеристике оптоелектронског система за испитивање интензитетних сензора, који је развијен за потребе експерименталног рада, као и карактеристике уређаја за тестирање ударима контролисане енергије, који је коришћен у експериментима.

За испитивање сензора на бази пластичних оптичких влакана коришћен је уређај добијен са Катедре за микроелектронику и техничку физику, Електротехничког факултета, Универзитета у Београду. Основне карактеристике овог система дате су такође у наставку овог поглавља.

Испитивање сензора на бази решетке са дугом периодом рађено је у сарадњи са Институтом за нуклеарне науке „Винча“, где је вршено снимање спектра оптичког сигнала пре и након уградње оптичког влакна, као и при статичком оптерећењу.

#### **5.3.1. Оптоелектронски систем за испитивање интензитетних сензора у ПЕВГ-СМ композитима**

Оптоелектронски систем за испитивање интензитетних сензора састоји се из извора светлости, фотодетектора и система за аквизицију. На слици 5.12 приказана је блок шема овог система.



**Слика 5.12.** Блок шема система за испитивање сензора



**Слика 5.13.** Уређај са уграђеним емитерским диодама - светлосни извор

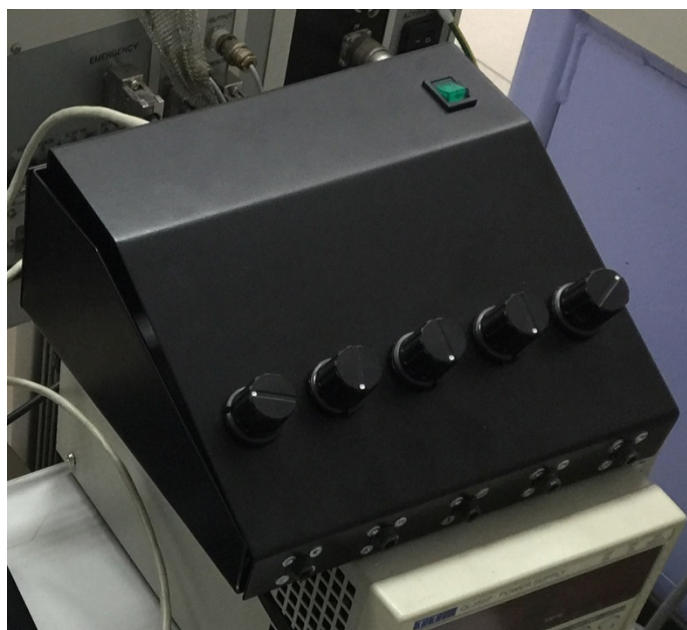
На слици 5.13 приказан је уређај који служи као извор светлости за оптичка влакна. Извор светлости реализован је помоћу струјно-контролисаних емитерских диода типа 1A212, произвођача Mitel Semiconductors, чија је максимална предајна оптичка снага типично на таласној дужини 880 nm, а ширина спектра након које предајна снага опада на половину 50 nm [124]. Укупна предајна оптичка снага која се уноси у оптичко влакно може се контролисати помоћу потенциометра, а којим се подешава струја кроз емитерске диоде. Ово подешавање могуће је спровести за сваки канал појединачно избором одговарајућег канала помоћу преклопника. Дисплеј приказује интензитет струје којом се побуђује одговарајућа емитерска диода изабрана преклопником. Уређај поседује укупно четири

емитерске диоде на које се могу повезати оптичка влакна, док је на петом каналу постављена светлећа диода као индикатор исправности рада уређаја.

Интензитет струје којим се побуђује емиторска диода треба подесити тако да се обезбеди низак ниво шума на каналу, истовремено водећи рачуна о томе и да се емиторске диоде не загревају превише. Експериментално је утврђено да те потребе задовољава интензитет струје који је приближно једнак 40 mA.

За повезивање уређаја и оптичких влакана се не користе стандардни налепљени телекомуникациони конектори јер би они неоправдано поскупели израду узорака. Због тога, приликом повезивања оптичких влакана на уређај потребно је на одговарајућем крају оптичког влакна уклонити примарну заштиту у дужини од приближно 10 mm, а да би влакно могло да се убаци и фиксира унутар одговарајућег конектора за вишеструку употребу. Потребно је водити рачуна и о томе како се врши исецање крајева оптичког влакна. Уколико приликом исецања дође до значајне деформације кружног попречног пресека оптичког влакна, биће отежано увођење светлости у влакно. Процес обраде крајева оптичких влакана осетљив је и временски захтеван.

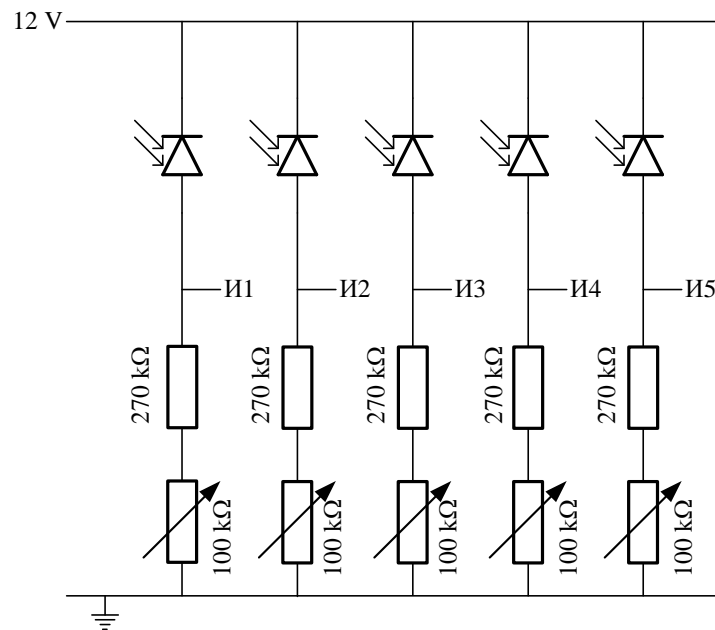
На слици 5.14 приказан је уређај у који су уграђене фотодиоде, а који се користи као фотодетектор. На слици 5.15 приказана је електрична шема тог уређаја.



Слика 5.14. Уређај са уграђеним фотодиодама - фотодетектор

Фотодиоде које су коришћене су силицијумске PIN фотодиоде n-типа, ознаке FD08N, које производи Институт за хемију, технологију и металургију Универзитета у Београду - ИХТМ. Ове фотодиоде су оптимизоване за пријем светлости на таласној дужини од 900 nm, раде у фотокондуктивном режиму, односно инверзно су поларисане, а карактерише их мала капацитивност око 4 pF остварена коришћењем екстремно чистог високоотпорног силицијума у I области диоде [125]. Већи инверзни напони поларизације смањују капацитивност диоде, односно последично њено време одзива.

Приликом повезивања оптичких влакана на фотодиоде користе се такође посебни конектори за вишеструку употребу, али је овде проблем са обрадом излазних крајева оптичких влакана мање изражен. На сваком од пет канала пријемника могуће је помоћу подесивих отпорника независно фино подешавање нивоа излазног напона, чиме се омогућава да они буду уравнотежени приликом испитивања сензора.



**Слика 5.15.** Електрична шема фотодетектора са пет пријемних канала

Картица за аквизицију NI PCI-6221 [ 126 ], ниске цене и солидних перформанси, произвођача National Instruments, употребљена је за аутоматизацију читавања напона на пријемним каналима, односно повезана је на излазе И1-И4 фотодетектора. Имајући у виду да се излазни напон читава на редној вези отпорника велике отпорности (у опсегу 270-370 kΩ), да би се обезбедило добро

појачање сигнала, било је неопходно решити питање преслушавања између канала аквизиционе картице, односно немогућности картице да довољно брзо изврши исправно читавање напона на суседним мултиплексираним каналима. Због тога су на излазе И1-И4 постављени јединични бафери реализовани коришћењем операционих појачавача из интегрисаних кола MAX44248 произвођача Maxim Integrated [127]. Пети излаз И5 фотодетектора није коришћен.

Јединични бафери уносе додатну паразитну капацитивност у мерни систем и у одређеној мери успоравају његову брзину одзива. На основу карактеристика употребљених елемената може се утврдити да је најмања вредност времена семпловања која омогућава исправно читавање излазних напона 20  $\mu$ s.

### **5.3.2. Оптиелектронски систем за испитивање интензитетног сензора у ЕП-СВ-К композитима**

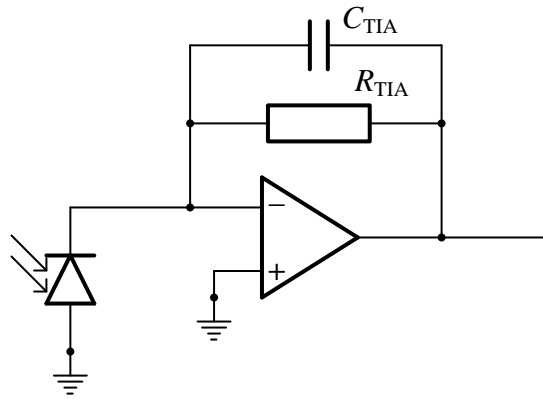
Блок шема система за испитивање сензора у ЕП-СВ-К композитима слична је оној приказаној на слици 5.12, с тим што се уместо четири канала, користи само један.

Као предајник, уређај користи температурно стабилисане емиторске диоде произвођача Omicron и ознаке LEDMOD625 [128]. Ове емиторске диоде оптимизоване су за рад на таласној дужини 625 nm (црвена светлост у видљивом спектру) и оптичка влакна са великом нумеричком апертуром.

Пријемник уређаја је фотодиода за пластична влакна произвођача Infineon Technologies и ознаке SFH250 [129]. Ова фотодиода ради у фотонапонском режиму. Максималну осетљивост има на таласној дужини од 850 nm, а опсег таласних дужина у којима може да детектује светлост је од 400 до 1100 nm. На таласној дужини 625 nm, њена осетљивост износи око 75% максималне вредности. Поседује малу капацитивност вредности 2-11 pF у зависности од напона поларизације.

Између фотодиоде и аквизиционе картице NI PCI-6221, која се и у овом случају користи за аутоматизацију читавања напона, постављен је трансимпенданси појачавач чија је електрична шема приказана на слици 5.16.





**Слика 5.16.** Коло трансимпендансног појачавача

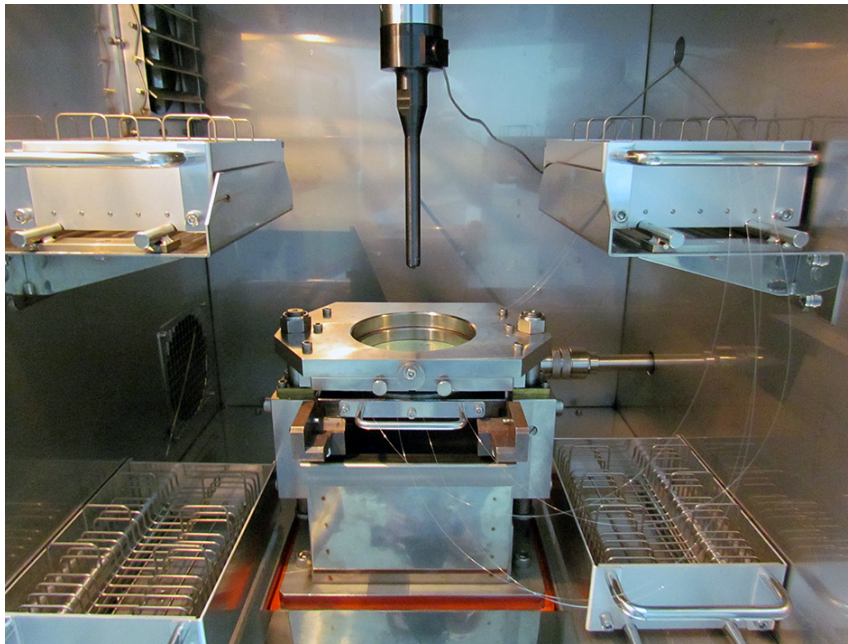
Трансимпедансни појачавач има неколико предности у односу на шему са слике 5.15: смањује потребу за коришћењем великих отпорности у циљу постизања доброг појачања, има малу улазну отпорност што обезбеђује брзи одзив, има добар пропусни опсег, има малу излазну отпорност и др. Појачање кола постиже се избором отпорника  $R_{TIA}$ , а кондензатор  $C_{TIA}$  спречава осциловање кола појачавача.

### **5.3.3. Инструмент за тестирање узорака ударима контролисане енергије**

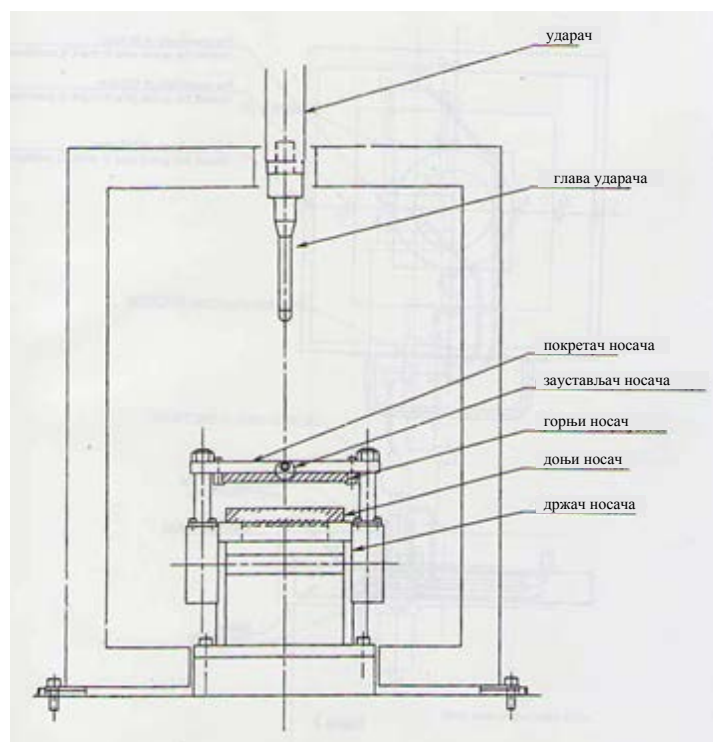
Тестирање ударима контролисане енергије вршено је помоћу уређаја Shimadzu Hydroshot HITS-P10. У питању је уређај на коме може да се подеси брзина у тренутку удара у опсегу од 0.001 m/s (удари веома ниске брзине) до 20 m/s (удари високе брзине), што последично омогућава и јако прецизну контролну енергије удара. На слици 5.17 приказана је унутрашњост коморе импакт тестера са постављеним узорком.

Врх ударача је полусферичан, пречника 12.7 mm и поседује уграђени сензор силе. Уређај је повезан са рачунаром који врши контролу рада импакт тестера и који има своју А/Д картицу. Време семпловања уређаја може се подесити у опсегу од 500 ns до 500 s, а број прикупљених одбирака на 4000, 8000 или 12000 одбирака. Импакт тестер истовремено мери више различитих параметара - време, позицију ударача, тј. посредно аксијалну деформацију узорка, отпорну силу и

температуру, а на основу измерених параметара прорачунава и бележи и енергију удара и брзину ударача.



Слика 5.17. Унутрашњост коморе импакт тестера Shimadzu Hydroshot HITS-P10



Слика 5.18. Технички цртеж унутрашњости коморе импакт тестера Shimadzu Hydroshot HITS-P10 [130]

Стандардизоване величине узорка које се могу тестирати су ограничене на следеће вредности: 60x60 mm, 100x100 mm и 140x140 mm, а дебљина узорка не може бити већа од 8 mm, односно мања од 2 mm. Пре тестирања, узорак је неопходно поставити на одговарајући доњи носач и притиснути га помичним горњим носачем. Носачи врше сталну силу од приближно 3,5 kN на ивице узорка које се налазе испод носача. На овај начин, један део узорка постаје практично фиксиран (статичан), а само један део узорка, онај који одговара отвореној површини носача, односно који је одређен унутрашњим пречником носача, ће се деформисати у поступку удара. Носачи такође могу имати различите унутрашње пречнике. За узорак најмањих димензија, пречник слободне површине носача је 40 mm, док је за узорак највећих димензија пречник слободне површине носача могуће подесити на највише 100 mm.

Експериментално је утврђено да у уграђеним оптичким влакнима постављеним на таквим растојањима да се у потпуности налазе између два носача неће бити промене у интензитету светлости током трајања удара. Због тога је максимално растојање на коме се може уградити влакно у односу на средиште узорка ограничено на 50 mm за узорке највећих димензија, односно 20 mm за узорке најмањих димензија.



**Слика 5.19.** Термостатичка комора (лево) и спољашњост импакт тестера

Уређај за тестирање ударима опремљен је и термостатичком комором која је приказана на слици 5.19. Термостатичка комора омогућава тестирање узорака на различитим константним температурама у опсегу од  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+150^{\circ}\text{C}$ , захваљујући уграђеним грејачима и хладњацима којима се врши постизање жељене температуре и њено одржавање на тој вредности у дужем временском интервалу. Тако је могуће тестирати утицај хлађења и загревања на ударна својства материјала. Истовремено, наведена могућност пружа прилику и да се добије увид у понашање уграђених сензора на различитим температурама.

## 6. Резултати и дискусија

У наставку ће бити приказани и анализирани карактеристичним резултати добијени у поступку спровођења експеримената на узорцима са уграђеним интензитетним и спектроскопским фиброоптичким сензорима.

### 6.1. Временски одзив интензитетног сензора

Да би се проверила почетна хипотеза да је временски одзив интензитетног сензора у корелацији са силом удара тестирани су узорци два различита типа - ПЕВГ-СМ и ЕП-СВ-И, на две различите температуре - собној температури од 27°C и сниженој температури од -5°C.

#### 6.1.1. Тестирање ударом на собној температури

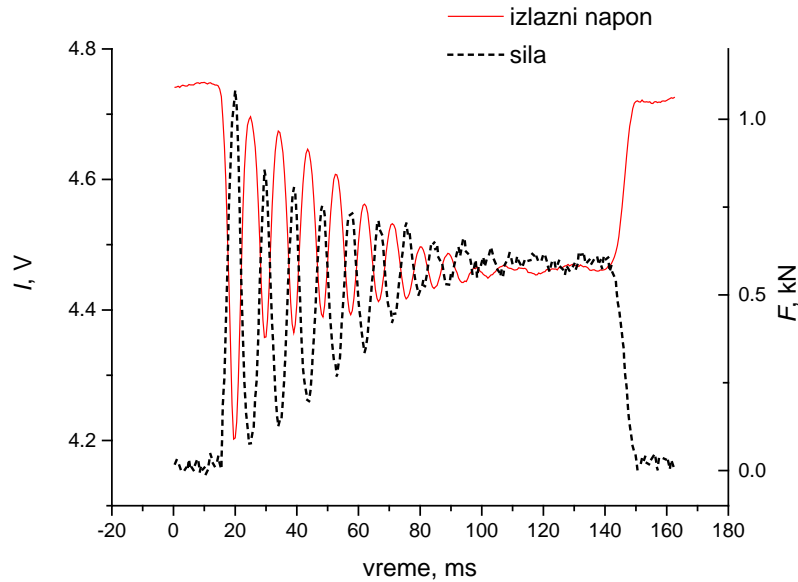
На слици 6.1 приказан је ПЕВГ-СМ-1 узорак величине 60x60 mm и дебљине 3,8 mm са два уграђена оптичка влакна на растојањима 11 mm (прво влакно) и 9 mm (друго влакно) у односу на средиште узорка (место удара).



Слика 6.1. Узорак ПЕВГ-СМ-1 пре удара

Услови тестирања су били следећи: пет поновљених удара у исти узорак, брзина удара од 1 m/s, дубина пенетрације узорка 2,5 mm и време семпловања 500  $\mu$ s на обе аквизиционе картице.

На слици 6.2 приказан је временски дијаграм силе коју мери импакт тестер и излазног напона  $I$ , који је пропорционалан интензитету светлости у другом оптичком влакну, мерено на фотодетектору током трајања првог удара.



**Слика 6.2.** Временски дијаграм силе и излазног напона на другом влакну током првог удара брзином 1 m/s - узорак ПЕВГ-СМ-1

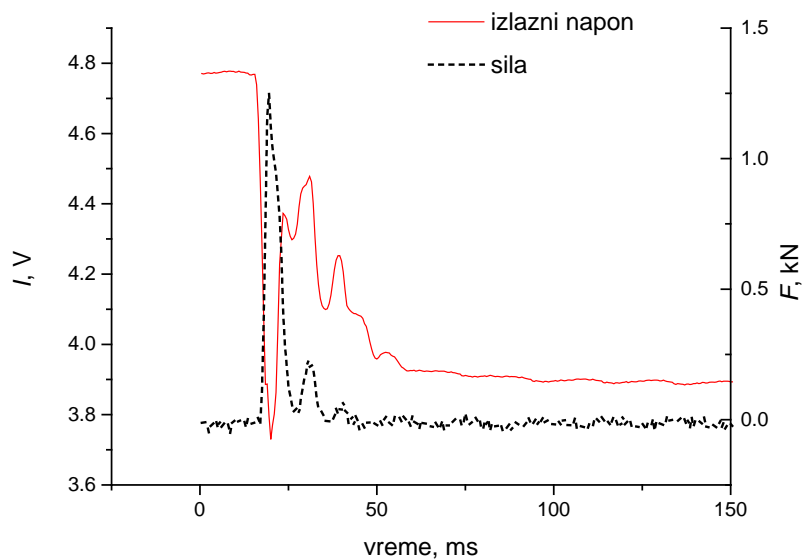
Анализом дијаграма приказаног на претходној слици може се уочити следеће:

1. зависност силе од времена представља пригушену осцилацију,
2. излазни напон је у противфази са силом на импакт тестеру,
3. пригушене осцилације пружају велики број интерполационих тачака на основу којих је могуће наћи везу између силе на импакт тестеру и излазног напона.

Карактеристике осцилаторног одзива зависе од тестираног материјала и система ударач-узорак који су у контакту током удара. Брзина удара од 1 m/s изабрана је као брзина на којој је минимални утицај импакт тестера на резултате мерења, на основу препорука које је изнео *Trubshaw* [131]. Поновљени удари (2-5) на истом узорку дају временске дијаграме који су слични претходно приказаном и не мењају валидност изнетих обсервација.

На слици 6.3 је приказан временски дијаграм силе са импакт тестера и излазног напона  $I$  са другог оптичког влакна након удара брзином од 2 m/s.





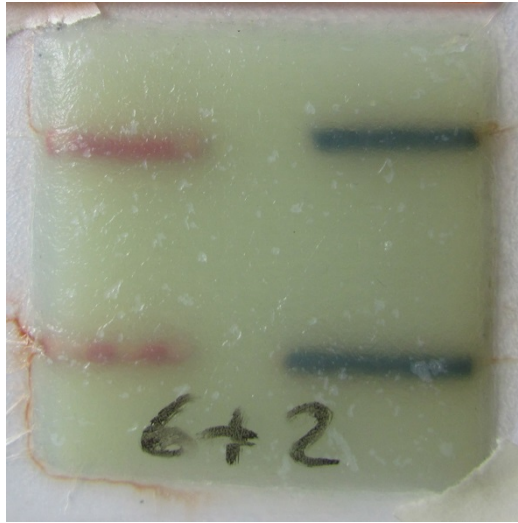
**Слика 6.3.** Временски дијаграм силе и излазног напона на другом влакну током удара брзином 2 m/s - узорак ПЕВГ-СМ-1

Са дијаграма се може приметити да је излазни напон и даље у противфазу у односу на силу импакт тестера. Визуелном инспекцијом места удара уочена је појава пукотине на површини узорка. Дијаграм са слике 6.3 потврђује да је након удара брзином од 2 m/s дошло до промене услова адхезије између уграђеног оптичког влакна и околног материјала, а што се огледа у значајној промени средње вредности напона након удара у односу на вредност пре удара. Даља читавања са овог влакна тиме престају да буду валидна.



**Слика 6.4.** Узорак ПЕВГ-СМ-1 након седмог удара брзином од 3 m/s

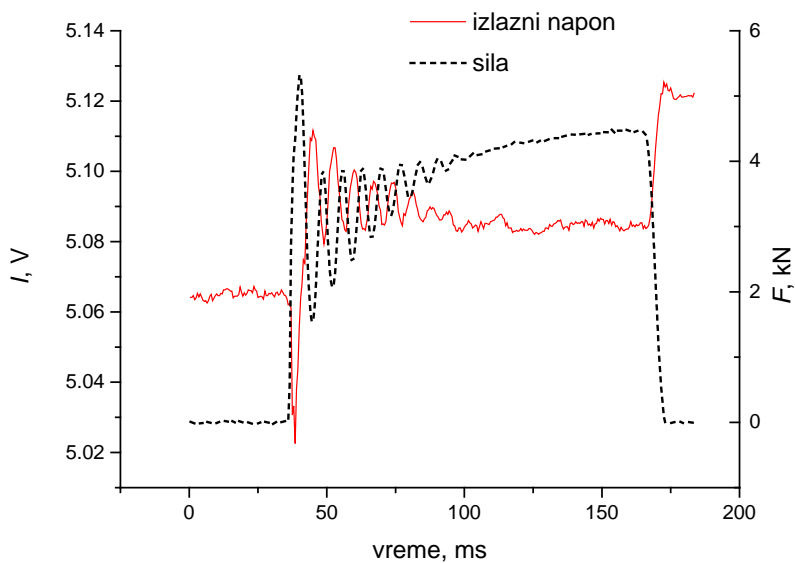
На слици 6.4 приказан је ПЕВГ-СМ-1 узорак након додатног удара брзином од 3 m/s. Удар брзином од 3 m/s довео је до пробоја материјала.



Слика 6.5. Узорак ЕП-СВ-И-1 пре удара

На слици 6.5 приказан је ЕП-СВ-И-1 узорак величине 60x60 mm и дебљине 4,2 mm са два уграђена оптичка влакна између слојева 6 и 7 ламината, на растојањима 15 mm са обе стране у односу на средиште узорка (место удара).

Услови тестирања су били: брзина удара од 1 m/s, дубина пенетрације узорка 2,8 mm и време семпловања 500  $\mu$ s на обе аквизиционе картице.



Слика 6.6. Временски дијаграм силе и излазног напона на другом влакну током првог удара брзином 1 m/s - узорак ЕП-СВ-И-1

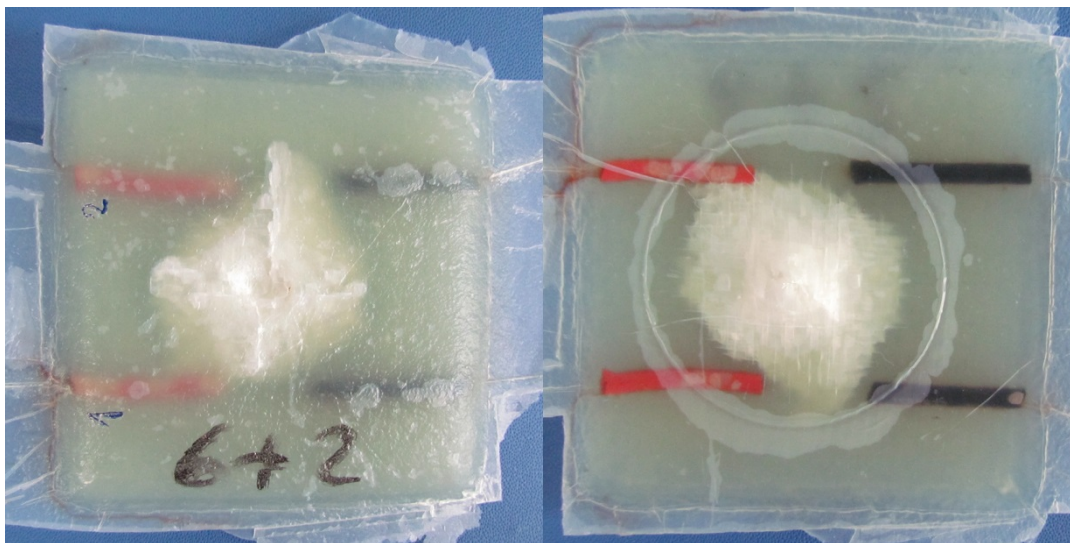


На слици 6.6 приказан је временски дијаграм силе коју мери импакт тестер и излазног напона  $I$  у другом оптичком влакну током трајања првог удара. Са овог дијаграма се може закључити да зависност силе од времена такође представља пригушену осцилацију, као и код узорка ПЕВГ-СМ-1, да је излазни напон у противфази са силом, али и да је у овом случају већ након првог удара дошло до промене средње вредности напона, услед делимичног ослобађања односно одвајања оптичког влакна од епоксидне матрице. Како су услови адхезије промењени, наредна мерења на овом оптичком влакну не би могла да се на адекватан начин корелишу са силом мереном на импакт тестеру.

Период осцилација приказаних на дијаграму са слике 6.6 је другачији у односу на период осцилација узорка ПЕВГ-СМ-1, што потврђује тезу да карактеристике осцилаторног одзива зависе од тестираног материјала.

Распон промене напона на посматраном узорку мањи је у односу на узорак ПЕВГ-СМ-1. Ово се може објаснити чињеницом да су термопластични бужири приликом уградње заклонили већи део оптичког влакна и учинили сензор мање осетљивим, а што практично представља недостатак у процесу уградње.

Узорак ЕП-СВ-И-1 показује боља ударна својства у односу на узорак ПЕВГ-СМ-1, имајући у виду пре свега максималну отпорну силу, односно апсорбовану енергију. На слици 6.7 приказан је изглед узорка након седмог удара, пратећи исти редослед удара као и код узорка ПЕВГ-СМ-1.



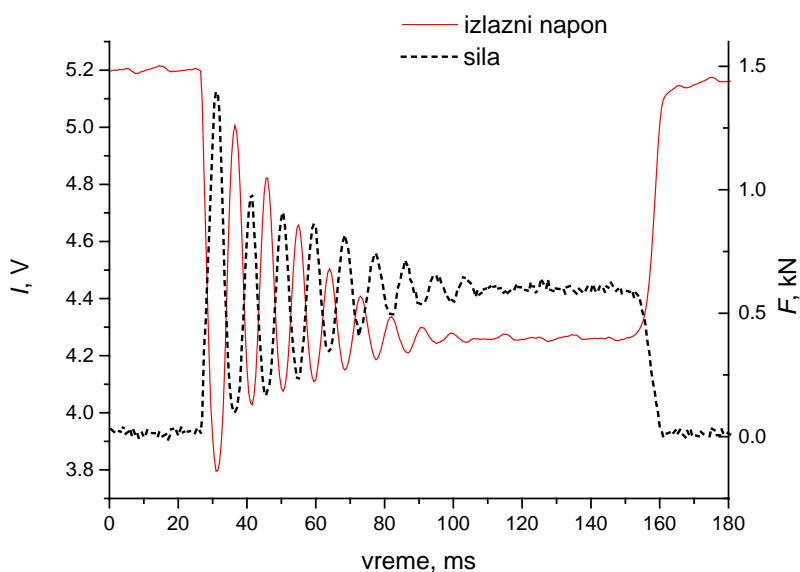
**Слика 6.7.** Узорак ЕП-СВ-И-1 након седмог удара брзином од 3 m/s

И у овом случају, до настанка видљивог оштећења дошло је након шестог удара брзином од 2 m/s, а до пробоја након седмог удара брзином од 3 m/s.

### 6.1.2. Тестирање ударом на сниженој температури

ПЕВГ-СМ-2 представља узорак величине 60x60 mm и дебљине 3,5 mm са два уграђена оптичка влакна на растојањима 8 mm (прво влакно) и 7 mm (друго влакно) у односу на средиште узорка (место удара). Услови тестирања су били следећи: пет поновљених удара у исти узорак, брзина удара од 1 m/s, дубина пенетрације узорка 2,5 mm и време семпловања 500  $\mu$ s на обе аквизиционе картице. Пре удара, узорак је хлађен око 30 min до температуре од -5 °C и потом држан на тој константној температури око 45 min због тестирања.

На слици 6.8 приказан је временски дијаграм силе коју мери импакт тестер и излазног напона  $I$  у другом оптичком влакну током трајања првог удара.

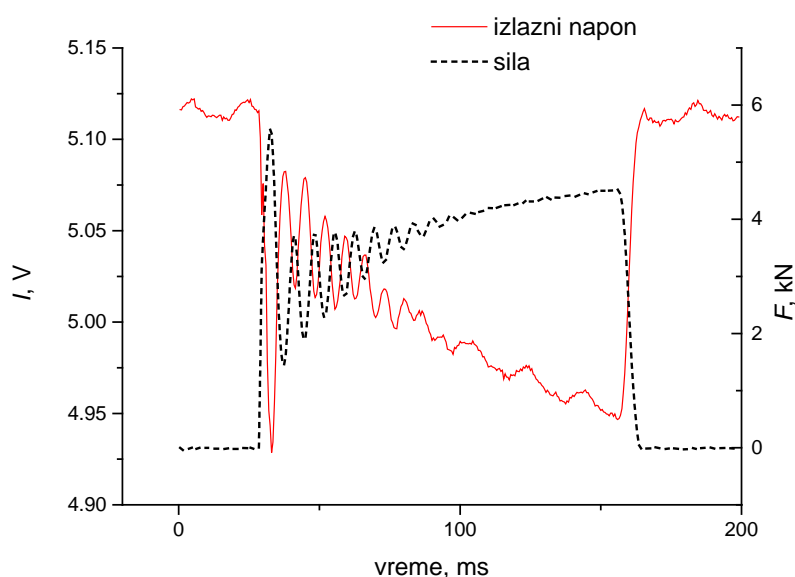


**Слика 6.8.** Временски дијаграм силе и излазног напона на другом влакну током трајања првог удара - узорак ПЕВГ-СМ-2

Хлађење узорка на температуру од -5 °C довело је до незнатног побољшања ударних својстава материјала, односно до повећања максималне отпорне силе материјала. Истовремено, може се приметити да посматрани интензитетни сензор исправно функционише и на сниженој температури. Опсег промене излазног напона је већи у односу на ПЕВГ-СМ-1, на шта су могли утицати: већа отпорна

сила, мање растојање посматраног влакна у односу на место удара, различита структура микробендера у узорку која резултира другачијом осетљивости сензора, као и температура. Неки од ових различитих утицаја биће раздвојени у наставку поглавља, док је раздвајање утицаја температуре остављено за будућа истраживања.

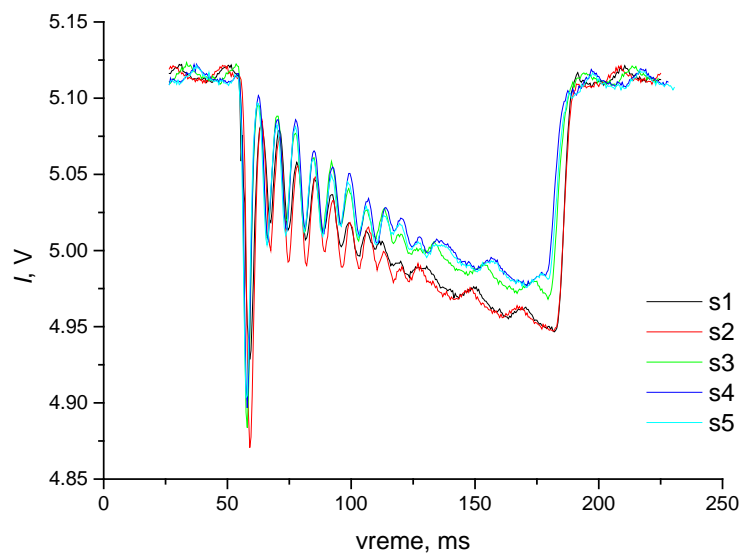
ЕП-СВ-И-2 представља узорак величине 60x60 mm и дебљине 4,2 mm са два уграђена оптичка влакна на растојањима 10 mm (прво влакно) и 10 mm (друго влакно) у односу на средиште узорка (место удара). Услови тестирања су били исти као за узорак ПЕВГ-СМ-2.



**Слика 6.9.** Временски дијаграм снаге и излазног напона на првом влакну током трајања првог удара - узорак ЕП-СВ-И-2

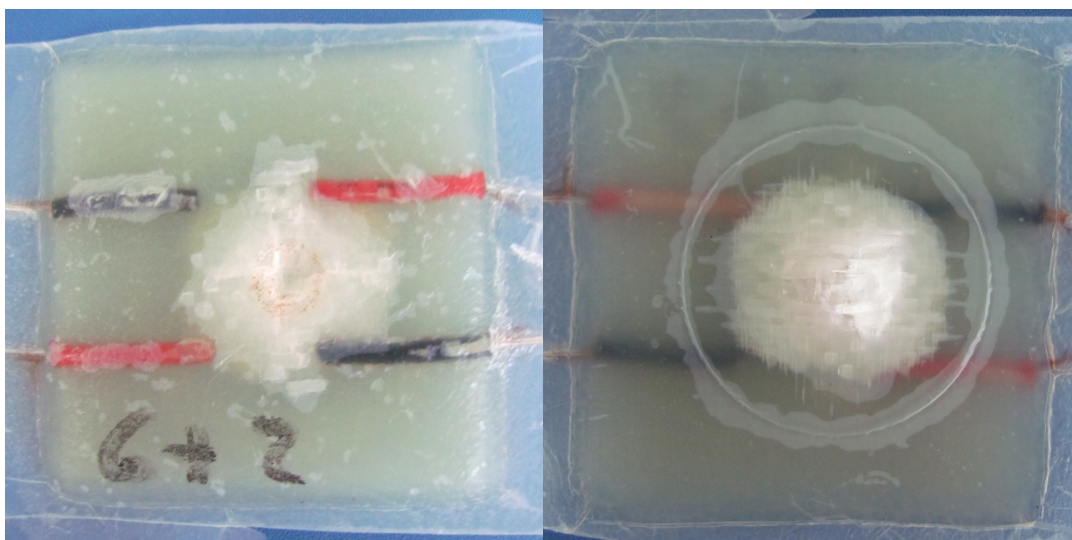
Временски дијаграми снаге и излазног напона на првом влакну током трајања првог удара на узорку ЕП-СВ-И-2 приказани су на слици 6.9. И у случају овог узорка могу се извести слични закључци као и код узорка ПЕВГ-СМ-2.

У односу на узорак ЕП-СВ-И-1, може се приметити да након првог удара није дошло до промене средње вредности излазног напона, што омогућава и анализу одзива сензора у поновљеним ударима (2-5). На слици 6.10 приказан је временски дијаграм излазног напона на првом влакну за првих пет поновљених удара брзине 1 m/s.



**Слика 6.10.** Временски дијаграм излазног напона за прво оптичко влакно и првих пет поновљених удара брзином од 1 m/s на узорку ЕП-СВ-И-2

Са претходне слике могуће је приметити да и након пет узастопних удара није дошло до промене средње вредности излазног напона, односно да је оптички сензор употребљив за даља мерења. Разлика у распону промене излазног напона приликом поновљених удара тумачи се различитим отпорним силама измереним на импакт тестеру.



**Слика 6.11.** Узорак ЕП-СВ-И-2 након седмог удара брзином од 3 m/s

На слици 6.11 приказан је изглед узорка ЕП-СВ-И-2 након седмог удара брзином од 3 m/s. До пробијања узорка је дошло тек након овог удара, а оптичко влакно се не може сматрати поузданим након спроведеног шестог удара брзином од 2 m/s јер је у том случају дошло до значајне промене средње вредности напона.

### 6.1.3. Закључци на основу посматрања временског одзива сензора

Претходна посматрања временског одзива интензитетног сензора, укључујући и додатне узорке који до сада нису били приказани, како на собној, тако и на сниженој температури, омогућавају нам да изведемо следеће закључке:

1. временски одзив излазног напона интензитетног сензора у корелацији је са силом измереном на импакт тестеру и на собној температури и на сниженој температури,
2. временски одзив зависи од више фактора: силе, растојања оптичког влакна од места удара, употребљеног материјала и температуре,
3. стање адхезије између уграђеног оптичког влакна и околног материјала може се пратити на основу средње вредности излазног напона,
4. када дође до веће релативне промене средње вредности излазног напона, а та промена је износила најмање 10% у свим експериментима на ПЕВГ-СМ узорцима, стање адхезије између материјала и оптичког влакна неповратно је промењено и одзив сензора више није могуће корелисати са отпорном силом,
5. промена средње вредности излазног напона не може се погрешно придодати другим факторима попут термичког шума при мерењу или благим одступањима у интензитету светлости (*drift*).

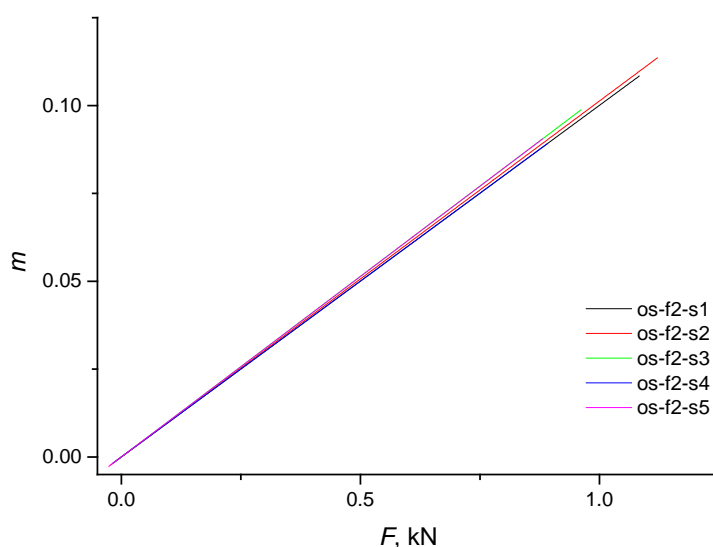
Уместо посматрања излазног напона, на даље ће бити коришћена модулациона дубина интензитета светлости. Модулациона дубина  $m$  представља инвертован излазни напон, тако да буде у фази са силом на импакт тестеру, нормализован на средњу вредност излазног напона пре удара  $I_{mean}$ . Одатле је:

$$m = 1 - I / I_{mean} \quad (6.1)$$

Наведена нормализација компензује промене у ирадијанси светлосног извора, као и блага одступања у оптоелектронској ефикасности.

## 6.2. Одређивање преносне функције интензитетног сензора

За узорак ПЕВГ-СМ-1 извршено је одређивање дубине модулације на основу вредности излазног напона на основу релације (6.1) за пет поновљених удара. Потом је одређена промена дубине модулације у односу на отпорну силу. Тачке добијене повезивањем ова два скупа вредности указују на линеарност везе између ударне силе и дубине модулације, па је у софтверском пакету *Origin* израчуната линеарна регресија (извршено фитовање) за добијене податке.



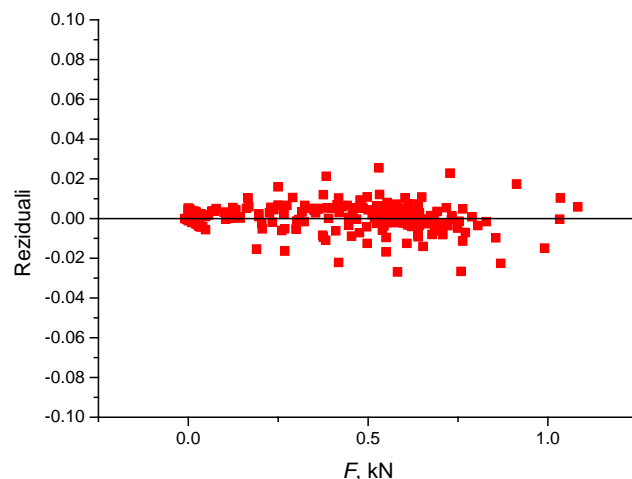
**Слика 6.12.** Линеарна регресија за пет поновљених удара за оптичко влакно на растојању 9 mm за узорак ПЕВГ-СМ-1

На слици 6.12 приказани су резултати фитовања за пет поновљених удара. Приликом фитовања захтевано је да вредност слободног члана линеарне везе буде једнака нули, јер није очекивано да постоји дубина модулације у одсуству побуде, односно удара.

**Табела 6.1.** Нагиб линеарне регресије за влакно на растојању 9 mm за узорак ПЕВГ-СМ-1 при поновљеним ударима

Број удара	1	2	3	4	5
Нагиб	0.10007	0.10131	0.10276	0.10006	0.10274

У табели 6.1 приказане су вредности нагиба линеарне регресије за пет поновљених удара на узорку ПЕВГ-СМ-1 за оптичко влакно на растојању 9 mm у односу на место удара.



**Слика 6.13.** Грешка фитовања за линеарну регресију за друго влакно приликом првог удара

На слици 6.13 приказан је дијаграм грешке фитовања за друго влакно приликом првог удара. На основу овог дијаграма може се закључити да су грешке случајно расподељене у односу на средњу вредност. Овој линеарној регресији одговара и параметар  $R^2=0,98798$ , што уз случајну расподелу грешака потврђује статистички јако подударане линеарне регресије и измерених података. Остали дијаграми грешке фитовања имају сличне карактеристике.

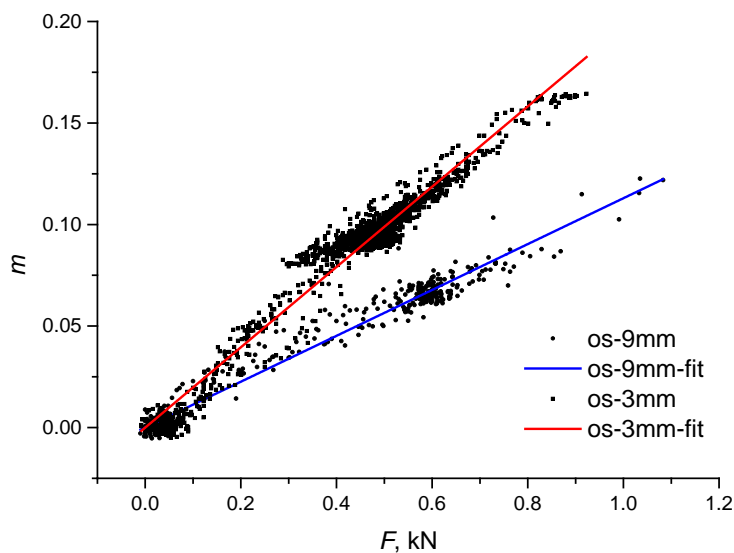
Дијаграми са слике 6.12 и подаци из табеле 6.1 указују на то да при поновљеним ударима не долази до значајне промене нагиба линеарне регресије. Другим речима, све док су услови адхезије између уграђеног влакна и околног композитног материјала исти, нагиб преносне функције се неће мењати при поновљеним ударима.

Да би се одредило на који начин растојање оптичког влакна у односу на место удара утиче на дубину модулације, извршено је тестирање додатног узорка ПЕВГ-СМ-3, димензија 100x100 mm, дебљине 5,1 mm са четири уграђена влакна на растојањима 3 mm, 12 mm, 33 mm и 42 mm у односу на средишта узорка. На слици 6.14 приказан је узорак ПЕВГ-СМ-3 пре удара.



**Слика 6.14.** Узорак ПЕВГ-СМ-3 са четири уграђена оптичка влакна

Услови тестирања су били: пет поновљених удара у исти узорак, брзина удара 1 m/s, дубина пенетрације узорка 6,8 mm, унутрашњи пречник носача узорка 60 mm и време семпловања 100  $\mu$ s на обе аквизиционе картице.



**Слика 6.15.** Зависност дубине модулације и силе за два оптичка влакна

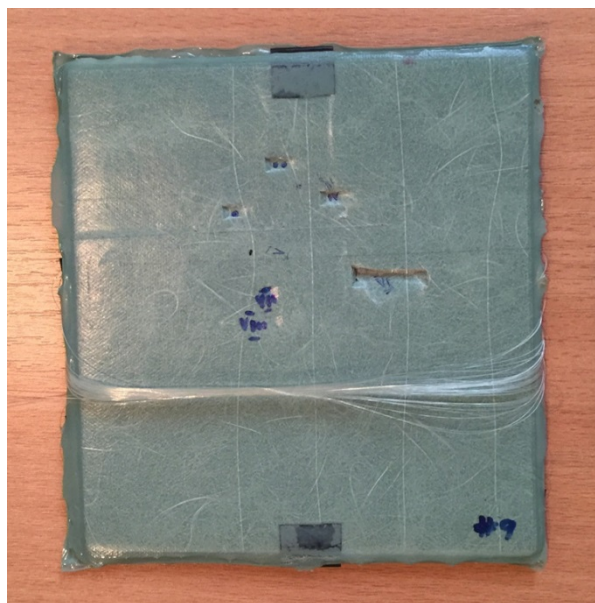
Потом је за овај узорак израчуната дубина модулације на основу вредности излазног напона и извршено повезивање дубине модулације и отпорне силе за



vlakno на растојању 3 mm у односу на место удара. И у овом случају је потврђена линеарност везе између дубине модулације и отпорне силе, па је као и за узорак ПЕВГ-СМ-1 одређена линеарна регресија за добијене податке. Мерни резултати, као и резултати фитовања добијени приликом првог удара у овом случају, као и приликом првог удара на узорку ПЕВГ-СМ-1 приказани су заједно на слици 6.15.

На основу добијених резултата може се уочити да је нагиб линеарне регресије већи у случају узорка ПЕВГ-СМ-3, што се може објаснити чињеницом да је оптичко влакно било постављено ближе месту удара у односу на посматрано оптичко влакно на узорку ПЕВГ-СМ-1, односно да је веза између дубине модулације и отпорне силе веома зависна од растојања оптичког влакна у односу на место удара.

Да би могла да се одреди веза између дубине модулације и растојања оптичког влакна у односу на место удара, неопходно је било спровести додатне експерименте. Имајући у виду ограничења импакт тестера, односно величину унутрашњег пречника носача која дефинише активну површину узорка, додатни експерименти спроведени су помоћу металне куглице која је пуштена да слободно пада на узорак који није био ограничен носачем.

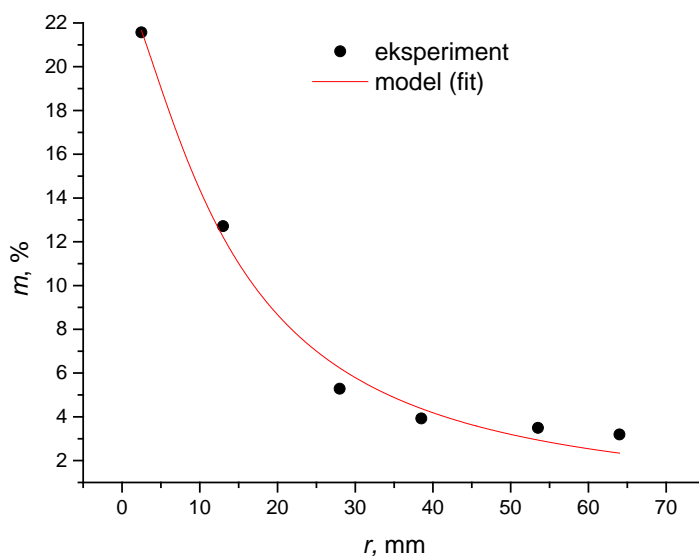


**Слика 6.16.** Узорак ПЕВГ-СМ-4 након удара

На слици 6.16 приказан је узорак ПЕВГ-СМ-4 са четири уграђена оптичка влакна након спроведених удара металном куглицом. Димензије овог узорка су 140x150 mm и дебљина 4,8 mm. Током трајања сваког од поновљених удара мерен

је излазни напон на фотодетекторима, а време семпловања износило је 100  $\mu$ s. Након сваког појединачног удара, место удара је обележено на узорку, а на крају је одређено растојање између свих места удара и оптичких влакана.

Комбинујући резултате добијене на овај начин, као и резултате са импакт тестера, под претпоставком да се може одвојити зависност модулационе дубине од отпорне силе и од растојања, добијен је следећи дијаграм зависности модулационе дубине од растојања и приказан на слици 6.17.



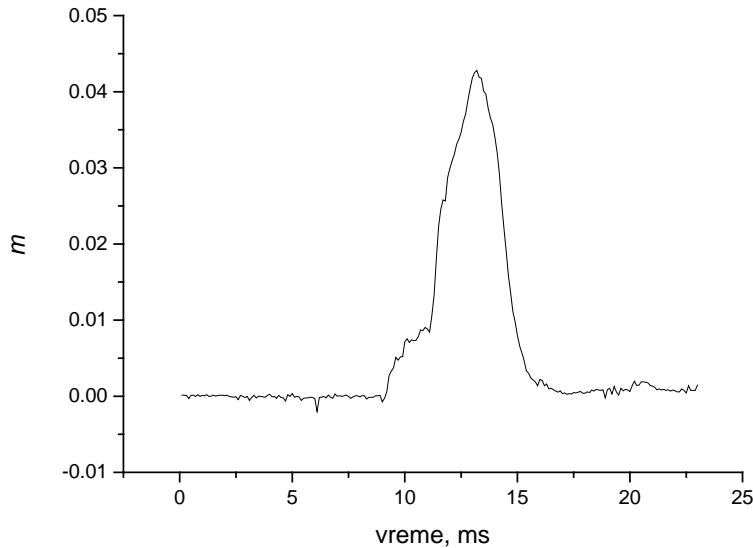
**Слика 6.17.** Зависност модулационе дубине од растојања од места удара и модел зависности

За модел модулационе дубине у функцији растојања, након тестирања различитих других функција, узета је следећа релација, при чему је  $r$  је изражено у милиметрима:

$$m(r) = \frac{e}{b + r^\alpha} = \frac{9,95}{42,3 + r^{1,43}} \quad (6.2)$$

Статистички показатељи модела указују на случајну расподелу грешака и  $R^2=0,98533$ , што потврђује оправданост овог модела. Иако је за одређивање модела узет релативно мали број тачака, чињеница да модел одговара и импакт тестеру и металној куглици која слободно пада иде у прилог његовој валидности.

Функција растојања  $m(r)$  не зависи од оптичког влакна, његове уградње и ударне силе, већ од материјала у који је влакно уграђено.



**Слика 6.18.** Модулативна дубина за један од удара металном куглицом на узорку ПЕВГ-СМ-4

Експерименти спроведени помоћу металне куглице која слободно пада добро моделују реалне ударе у којима учествују мали пројектили који неће изазвати пригушене осцилације у отпорној сили и одзиву сензора, а што се може видети у примеру са слике 6.18, док импакт тестер добро моделује ситуације у којима масивни објект удара структуру чије је стање неопходно пратити.

Ако се повеже нагиб линеарне регресије добијен за узорак ПЕВГ-СМ-1 и функција растојања дата у релацији (6.2) тада се може одредити укупна преносна функција сензора за узорак ПЕВГ-СМ-1 и она гласи:

$$m(F, r) = \frac{a \cdot F}{b + r^\alpha} = \frac{7,393 \cdot F}{42,3 + r^{1,43}} \quad (6.3)$$

У претходној релацији сила  $F$  изражена је у kN, растојање  $r$  у mm, док коефицијент  $a$  у преносној функцији зависи од локалне структуре микробендера.

Провера преносне функције одређене за узорак ПЕВГ-СМ-1 извршена је на узорку ПЕВГ-СМ-3. На основу измерене модулативне дубине извршен је прорачун процењене вредности отпорне силе. У табели 6.2 приказани су

результати верификације преносне функције, односно максимална вредност отпорне силе и промена импулса ударача на импакт тестеру и те исте вредности одређене на основу мерења сензора. Ове вредности су упоређене, односно прорачуната је апсолутна и релативна грешка, узимајући вредности измерене на импакт тестеру као тачне.

**Табела 6.2.** Верификација преносне функције - максимална отпорна сила и промена импулса измерене на импакт тестеру и упоређене са преносном функцијом сензора

	ФОС	ИТ	апсолутна грешка	релативна грешка
$F_{max}$ , kN	1,047	0,923	0,124	13,43%
$\Delta p_{max}$ , kgm/s	8,83	7,19	1,64	22,8%

Вредност промене импулса израчуната је на основу релације:

$$\Delta p_{max} = \sum_i F_i \cdot \Delta t_i = \Delta t \cdot \sum_i F_i \quad (6.4)$$

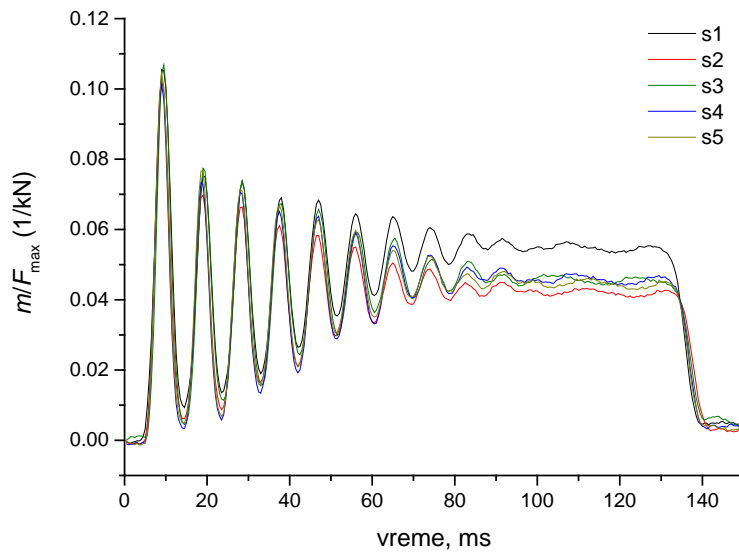
У претходној релацији, сумирање се завршава након што сила достигне свој први минимум, како би се моделовала промена импулса малог пројектила, а  $\Delta t_i = \Delta t = 100 \mu s$  представља време семпловања.

Резултати приказани у табели 6.2 указују на значајна одступања преносне функције када је примењена на другом узорку, односно на доводи до закључка да је сваку структуру са уграђеним интензитетним сензорима потребно одвојено калибрисати.

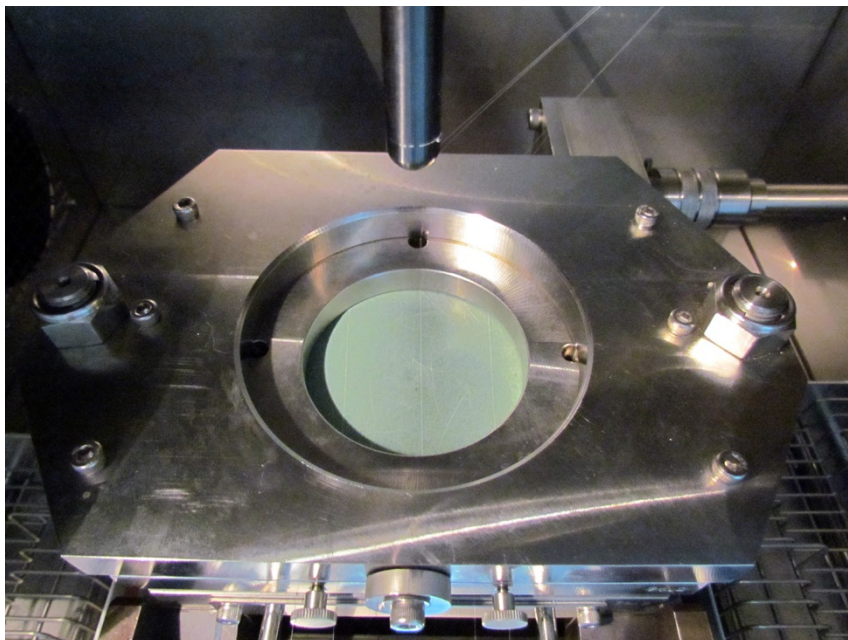
### 6.3. Провера испуњености услова за калибрацију интензитетног сензора

Да би се утврдило да поновљени удари брзином од 1 m/s не утичу на осетљивост сензора и да не доводе до значајних оштећења структуре, потребно је посматрати нормализовану модулативну дубину у зависности од времена. Овај дијаграм за узорак ПЕВГ-СМ-1 приказан је на слици 6.19. Нормализација

модуляционе дубине извршена је у односу на максимум отпорне силе забележен у сваком од удара, респективно. На слици 6.20 приказан је изглед посматраног узорка након петог удара.



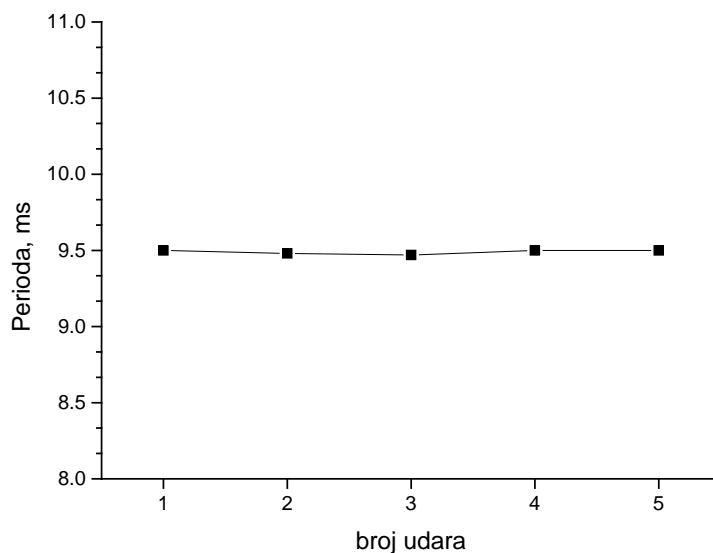
**Слика 6.19.** Модуляциона дубина нормализована на максимум отпорне силе за пет поновљених удара брзине 1 m/s



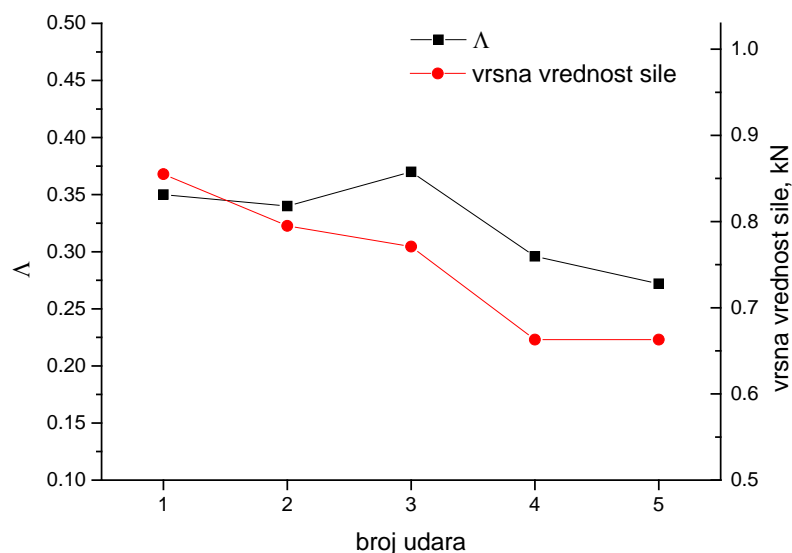
**Слика 6.20.** Узорак ПЕВГ-СМ-1 након пет удара

На основу претходне две слике можемо закључити да поновљени удари брзином од 1 m/s нису довели до видљивог оштећења материјала, као и да

осетљивост сензора у поновљеним ударима изгледа непромењено. У одзиву сензора се при поновљеним ударима, у одсуству оштећења материјала, сваки пут јавља пригушена осцилација. Детаљнију анализу пригушених осцилација можемо извршити праћењем периоде и логаритамског декремента ових осцилација.



**Слика 6.21.** Периода пригушених осцилација у поновљеним ударима на ПЕВГ-СМ-1



**Слика 6.22.** Логаритамски декремент пригушених осцилација и вршна вредности отпорне силе у поновљеним ударима на ПЕВГ-СМ-1

На слици 6.21 приказана је промена периоде осцилација у претходно приказаним поновљеним ударима. Може се приметити са дијаграма да је релативна промена измереног периода осцилација мања од 1%.

Логаритамски декремент,  $\Lambda$ , и побудна сила приказани су на слици 6.22. Како су сви удари извршени под истим условима на импакт тестеру и како побудна отпорна сила опада у поновљеним ударима, промена у логаритамском декременту осцилација је пре последица замора материјала него промене у одзиву сензора.

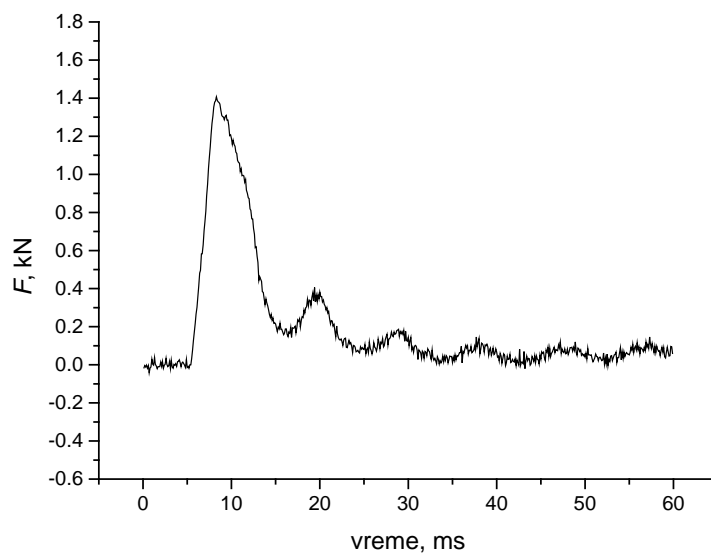
На основу претходног се може закључити да калибрациони удари:

1. не изазивају значајна оштећења материјала,
2. не мењају осетљивост сензора,
3. могу се извести брзо и поуздано у циљу одређивања коефицијента  $a$  у преносној функцији сензора из релације (6.3).

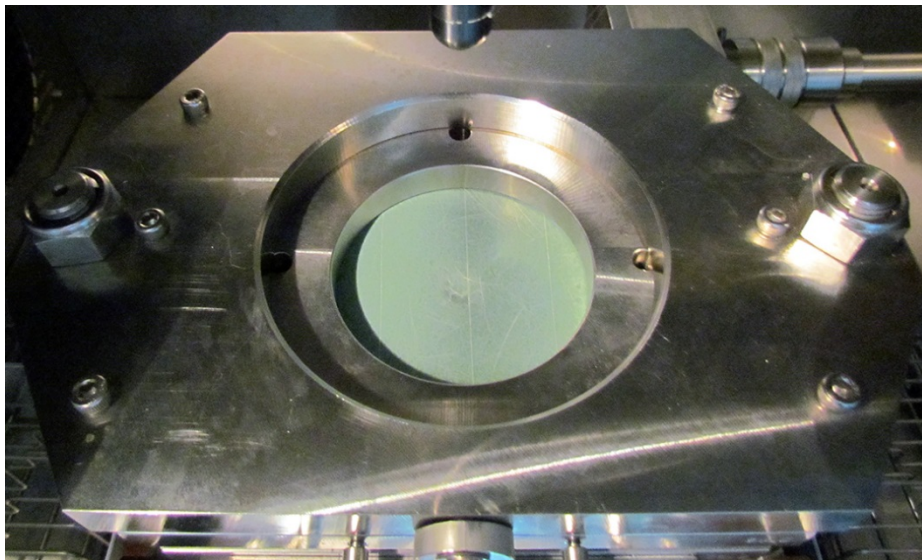
#### **6.4. Праћење стања структуре**

У циљу праћења стања структуре, потребно је одредити механизам алармирања у случају да је на структуру деловала сила која је изазвала видљиво оштећење материјала, а није довела до пробијања структуре. Аларм који би се генерисао у овој ситуацији пружио би могућност поправке структуре пре него што настала оштећења у већој мери угрозе безбедност саме структуре. Гранична вредност силе која наноси ову врсту оштећења зависи од ударних својстава материјала и одређује се тестирањем на импакт тестеру за сваки материјал понаособ.

ПЕВГ-СМ-1 узорак тестиран је при брзинама удара од 2 m/s и 3 m/s, након чега су одређене максималне вредности отпорне силе при тим ударима и уочен тип оштећења настао на површини узорка. На слици 6.23 приказан је временски дијаграм силе мерене на импакт тестеру, а на слици 6.24 фотографија узорка након удара брзином од 2 m/s. На основу претходних слика може се закључити да је настало видљиво оштећење при максималној вредности отпорне силе која је једнака 1,41 kN.



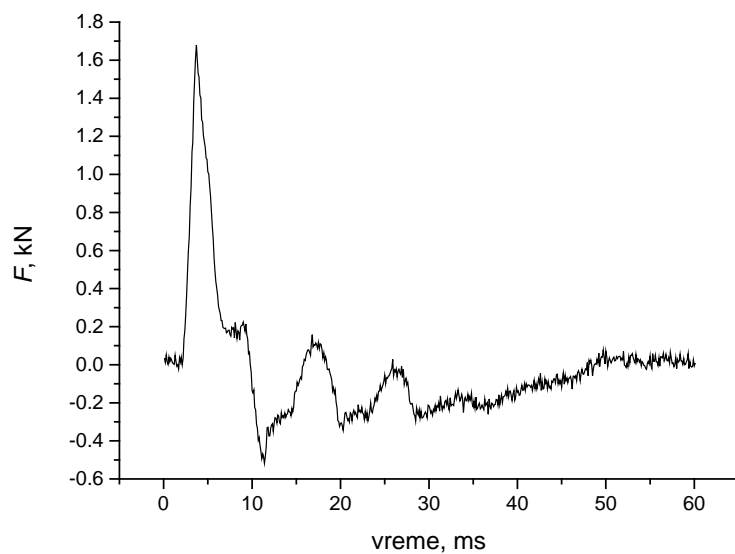
**Слика 6.23.** Дијаграм силе током удара брзином од 2 m/s на узорку ПЕВГ-СМ-1



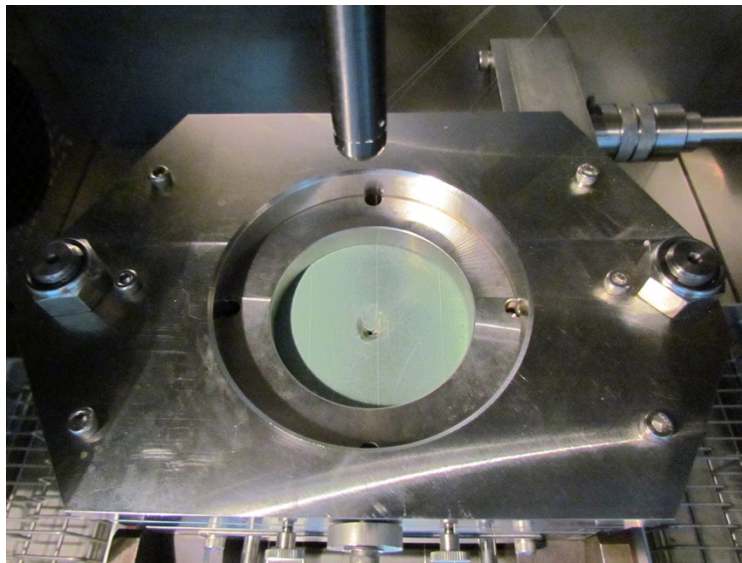
**Слика 6.24.** Фотографија узорка ПЕВГ-СМ-1 након удара брзином од 2 m/s

На слици 6.25 приказан је временски дијаграм силе мерене на импакт тестеру, а на слици 6.26 изглед истог узорка ПЕВГ-СМ-1 након удара брзином од 3 m/s. Негативне вредности силе очитане на импакт тестеру говоре да је дошло до пробоја материјала, а то потврђује и визуелна инспекција површине узорка на којој се види пукотина у узорку. Максимална вредност отпорне силе у овом случају била је већа и износила је 1,68 kN.





**Слика 6.25.** Дијаграм силе током удара брзином од 3 m/s на узорку ПЕВГ-СМ-1



**Слика 6.26.** Фотографија узорка ПЕВГ-СМ-1 након удара брзином од 3 m/s

Уграђени фиброоптички сензор за праћење стања структуре мора бити у стању да детектује вредности силе које су мање од неке вредности  $F_{min}$ , при чему је  $F_{min}$  она вредност која не изазива видљива оштећења на структури. Доња граница за  $F_{min}$  истовремено одређује и максимално растојање на коме ће уграђени сензор забележити дубину модулације коју ће бити могуће разликовати од шума. Уколико се изабере већа вредност за  $F_{min}$ , тада ће и растојање на коме је могуће детектовати такву силу бити веће, јер већа сила доводи до веће дубине

модулације. Са друге стране,  $F_{min}$  је лимитирано максималном вредношћу отпорне силе која изазива видљива оштећења на структури. Иако је за ПЕВГ-СМ утврђено да сила од 1,41 kN при удару брзином од 2 m/s прави видљиво оштећење, гранична вредност која доводи до видљивих оштећења је мања, подложна варијацијама за различите узорке композитног материјала, па  $F_{min}$  треба поставити на нижу вредност од граничне.

Имајући у виду претходно наведено, за ПЕВГ-СМ композитни материјал усвојено је  $F_{min}$  тако да буде једнако 1 kN. Ова вредност омогућава сигурну детекцију свих опасних удара на овом типу материјала. За дату вредност  $F_{min}$ , може се прорачунати максимално растојање од места удара на коме ће бити могуће детектовати удар, уз додатно ограничење да је однос сигнал-шум једнак 1. Како је измерена стандардна девијација модулационе дубине у одсуству удара за дати фотодетектор једнака  $7.28 \cdot 10^{-4}$ , постављајући  $F_{min}$  у релацију (6.3) добија се да је максимално дозвољено растојање уграђеног оптичког влакна од места удара које гарантује детекцију опасних удара једнако  $d_{max} = 63$  cm.

#### 6.4.1. Одређивање растојања од места удара

Претходна анализа наводи на закључак да преносна функција интензитетног сензора може под одређеним условима да обезбеди одређивање растојања влакна од места удара.

Посматрајмо два паралелна, калибрисана, уграђена влакна у истој структури за које су одређене преносне функције, у складу са претходно дефинисаном процедуром, а затим измерене вредности дубина модулације  $m_1$  и  $m_2$  при неком удару, који је настао на непознатим растојањима  $r_1$  и  $r_2$  од места удара. Преносне функције за ова два влакна разликују се једино у вредности коефицијента  $a$ , који зависи од локалне структуре микробендера, док су коефицијенти  $b$  и  $\alpha$  исти за оба влакна, јер су добијени на основу функције растојања. У том случају, може се одредити однос модулационих дубина  $k$  и он је једнак:

$$m_1 = \frac{a_1 \cdot F}{b + r_1^\alpha} \quad (6.5)$$

$$m_2 = \frac{a_2 \cdot F}{b + r_2^\alpha} \quad (6.6)$$

$$k = m_2 / m_1 = (a_2 / a_1) \cdot ((b + r_1^\alpha) / (b + r_2^\alpha)) \quad (6.7)$$

Ако претпоставимо да је растојање између уграђених влакана једнако  $d$ , а удар је настао између два посматрана влакна, тада растојања влакана од места удара задовољавају релацију:

$$d = r_1 + r_2 \quad (6.8)$$

На основу релација (6.7) и (6.8), а имајући у виду да су однос модулационих дубина  $k$  и растојање  $d$  познате величине, могу се одредити непозната растојања  $r_1$  и  $r_2$  од места удара. Решење овог система једначина може се наћи нумерички. Дефинишимо функцију  $g(r_1)$  на следећи начин:

$$g(r_1) = b + r_1^\alpha - k \cdot a_1 \cdot b / a_2 - k \cdot a_1 \cdot (d - r_1^\alpha) / a_2 \quad (6.9)$$

Нуле ове функције налазе се итеративно, коришћењем Њутновог метода, на основу следеће релације:

$$r_{1,i} = r_{1,i-1} - g(r_{1,i-1}) / g'(r_{1,i-1}) \quad (6.10)$$

Заменом вредности функције  $g(r_1)$  у релацију (6.10) добија се:

$$r_{1,i} = r_{1,i-1} - \frac{b + r_{1,i-1}^\alpha - k \cdot b \cdot a_1 / a_2 - k \cdot a_1 \cdot (d - r_{1,i-1}^\alpha) / a_2}{\alpha \cdot r_{1,i-1}^{\alpha-1} + k \cdot a_1 \cdot \alpha \cdot (d - r_{1,i-1}^\alpha)^{\alpha-1} / a_2} \quad (6.11)$$

За почетну вредност растојања може се узети половина растојања између оптичких влакана:

$$r_{1,0} = d / 2 \quad (6.12)$$

Приказани алгоритам проналази решење за растојање  $r_1$  након  $i$  корака, под условом да је  $|r_{1,i} - r_{1,i-1}| < \varepsilon$ , за неко мало  $\varepsilon$ . У практичном смислу се може усвојити вредност која одговара величини омотача оптичког влакна, односно  $\varepsilon = 125 \mu\text{m}$ .

Конвергентност алгоритма је тестирана софтверски за различите вредности односа модулационих дубина  $k$  и утврђено је да у односу на задато  $\varepsilon$  конвергира брзо, сем за оне односе који се очекују када је место удара на растојању мањем од

1 mm од једног од два посматрана влакна. У том случају, може се, уз уношење грешке не веће од 0,16%, а када је растојање  $d$  једнако  $d_{max}$ , претпоставити да место удара одговара позицији оптичког влакна. Постављање ограничења да је однос сигнал-шум једнак 1, а што је условило вредност  $d_{max}$ , постаје оправдано у односу на ситуацију у којој у структури постоји више уграђених оптичких влакана. Удари који би довели до тог односа сигнал-шум на једном влакну, произвели би максимални однос сигнал-шум на суседном паралелном влакну на коме је и био удар.

Верификација предложеног алгоритма за одређивање места удара извршена је на узорку ПЕВГ-СМ-1, имајући у виду да су код њега позната растојања од места удара  $r_1 = 9$  mm и  $r_2 = 11$  mm. Верификацији овог алгоритма претходила је калибрација и првог влакна. Први удар на овом узорку искоришћен је за калибрацију, док је алгоритам тестиран на другом удару.

**Табела 6.3.** Потврђивање модела - максимална отпорна сила и промена импулса на основу мерења импакт тестера и поређење са израчунатим вредностима на основу сензора и на растојању које је добијено применом алгоритма

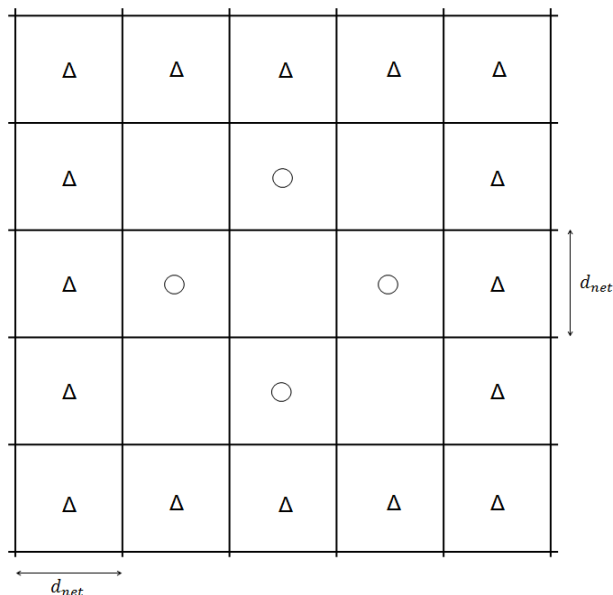
	ФОС	ИТ	апсолутна грешка	релативна грешка
$r_1$ , mm	8,36	9	0,64	7,11 %
$F_{max}$ , kN	1,043	1,121	0,078	6,96 %
$\Delta p_{max}$ , kgm/s	5,04	4,66	0,38	8,15 %

У табели 6.3 приказни су резултати поређења тачних вредности максималне отпорне силе и промене импулса, утврђених мерењем на импакт тестеру на месту удара, и прорачунатих вредности на основу мерења сензора на растојању које је добијено применом алгоритма. Релативна грешка мања од 10 %, посебно у случају промене импулса, јер она обухвата више мерних тачака модуларне дубине, говори о добром поклапању процењених и стварних вредности ових величина, односно потврђује да се калибрисани сензор може користити за одређивање

растојања од места удара, максималне отпорне силе и промене импулса ударача. Величину релативне грешке би требало тумачити и у односу на чињеницу да је реч о веома једноставном решењу ниске цене.

#### 6.4.2. Мрежа уграђених оптичких влакана за праћење стања структуре

На основу претходно приказаног, може се закључити да би калибрисана ортогонална мрежа оптичких влакана уграђених у структуру чије је стање неопходно пратити, била у стању да, поред свега претходно наведеног, одреди и место удара, на основу одређивања растојања места удара од четири суседна оптичка влакна у оба правца мреже.



Слика 6.27. Пример 6x6 ортогоналне мреже уграђених оптичких влакана - троуглови и кругови означавају калибрационе тачке

Ако је неопходно пратити стање структуре квадратне површине  $S$ , потребно је најпре израчунати растојање између оптичких влакана у мрежи  $d_{net}$ . Ово растојање не може бити веће од  $d_{max}$ , односно одређује се на основу релације:

$$d_{net} = \sqrt{S} / n_{SQ} \leq d_{max} \quad (6.13)$$

У претходној релацији је са  $n_{SQ}$  означен број квадратних секција у сваком од правца квадратне мреже и он износи:

$$n_{SQ} = \min \{ n \in N \mid n \geq \sqrt{S} / d_{\max} \} \quad (6.14)$$

На слици 6.27 приказан је пример 6x6 ортогоналне мреже уграђених оптичких влакана са обележеним местима на којима би требало спровести калибрационе ударе. Сваки калибрациони удар калибрише суседна четири сегмента влакна који припадају истој квадратној секцији. Троугловима су обележени калибрациони удари на ивицама структуре. Свака квадратна секција на ивици мора се засебно калибрисати због влакана који се налазе на ивици структуре. Додатно, круговима су обележене калибрационе тачке унутар структуре које су неопходне због влакана која су на растојањима већим од  $d_{\max}$  од претходних калибрационих тачака. Број калибрационих удара  $n_{CAL}$  се, имајући претходно у виду, може одредити као:

$$n_{CAL} = \begin{cases} 1 & , n_{SQ} = 1 \\ 4 \cdot (n_{SQ} - 1) + \max \{ n \in N \mid n \leq (n_{SQ} - 2)^2 / 2 \} & , n_{SQ} > 1 \end{cases} \quad (6.15)$$

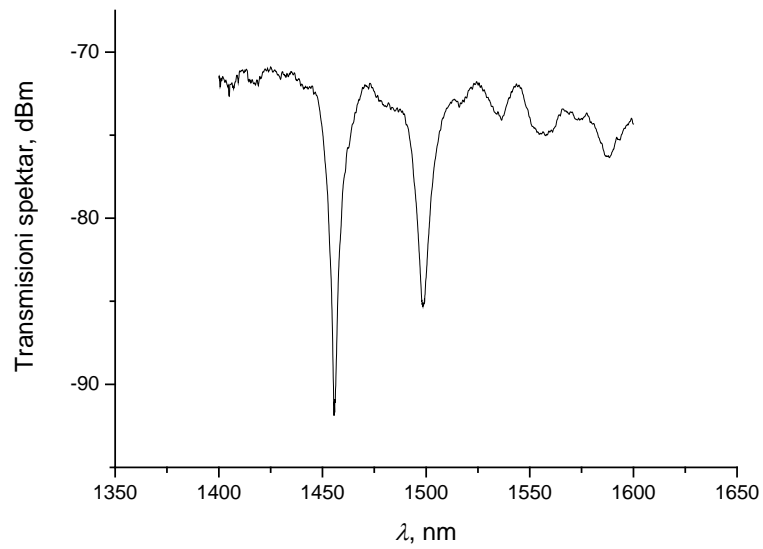
Мрежа уграђених влакана и број калибрационих удара могу се прилагодити облику и величини структуре чије је стање неопходно пратити.

Када се мрежа пусти у употребу, након што структура истрпи удар, најмање четири оптичка влакна регистроваће удар. На основу четири највеће модуларне дубине одређује се најпре квадратна секција у којој се десио удар. Након тога, коришћењем одговарајућих преносних функција за сегменте влакана које одговарају наведеној квадратној секцији, може се прорачунати тачно место удара, ударна сила и промена импулса, на начин који је претходно приказан.

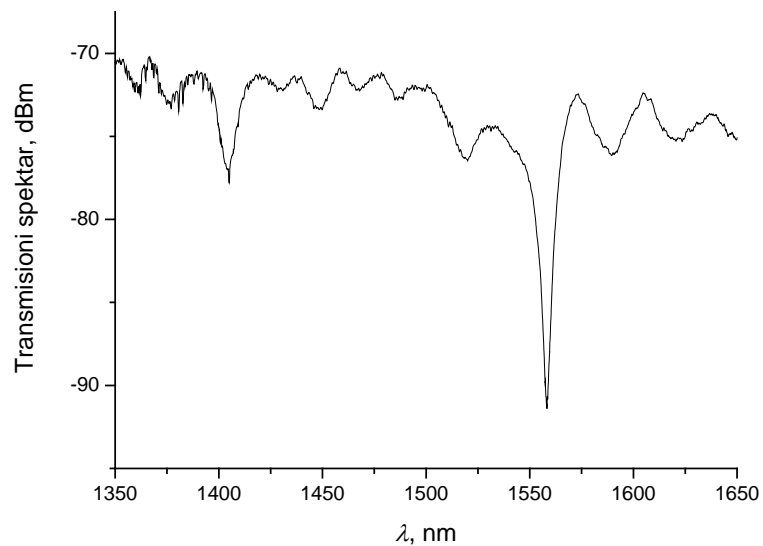
## **6.5. Испитивање спектра оптичког сигнала у сензору на бази решетке са дугом периодом**

У поступку истраживања, на располагању су била два оптичка влакна са уграђеним решеткама са дугом периодом - T4 и T5. На слици 6.28 приказан је трансмисиони спектар оптичког влакна T4, а на слици 6.29 оптичког влакна T5. Снимање спектра сигнала извршено је на Институту Винча, коришћењем Yokogawa оптичког спектралног анализатора AQ6370C. Добијени дијаграми одговарају карактеристичним спектрима за влакна са решетком са дугом периодом, с тим што су изражена слабљења у трансмисионом спектру на T4 на

таласним дужинама 1455,6 nm и 1498,5 nm, а на влакну T5 на таласним дужинама 1405 nm и 1558,3 nm.



**Слика 6.28.** Трансмисиони спектар оптичког влакна T4 са решетком са дугом периодом пре уградње

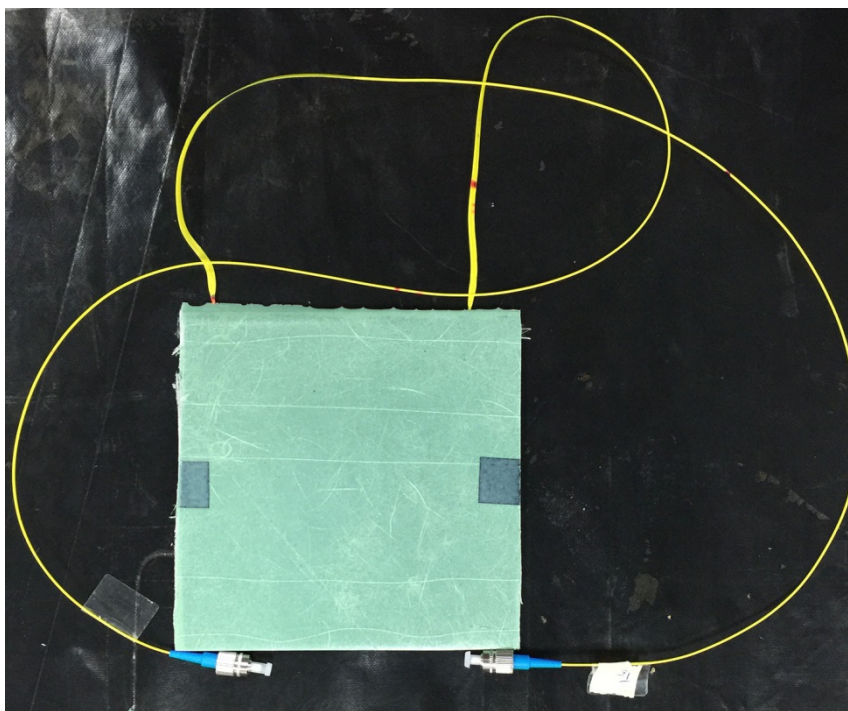


**Слика 6.29.** Трансмисиони спектар оптичког влакна T5 са решетком са дугом периодом пре уградње

Оптичка влакна су била са скинутом заштитом у дужини од око 50 cm у делу у коме се налази решетка са дугом периодом, с тим што је дужина саме решетке износила око 5 cm, а тачна позиција решетке на добијеним влакнима није била забележена.

У циљу планирања уградње оптичког влакна у одговарајући узорак, оптичка влакна T4 и T5 су испитивана на оптичком микроскопу и увођењем ласерске светлости високе ирадијансе, како би се лоцирала област са промењеним индексом преламања. Током испитивања на микроскопу, дошло је до пуцања оптичког влакна T4, па оно није могло да се користи на даље у поступку уградње.

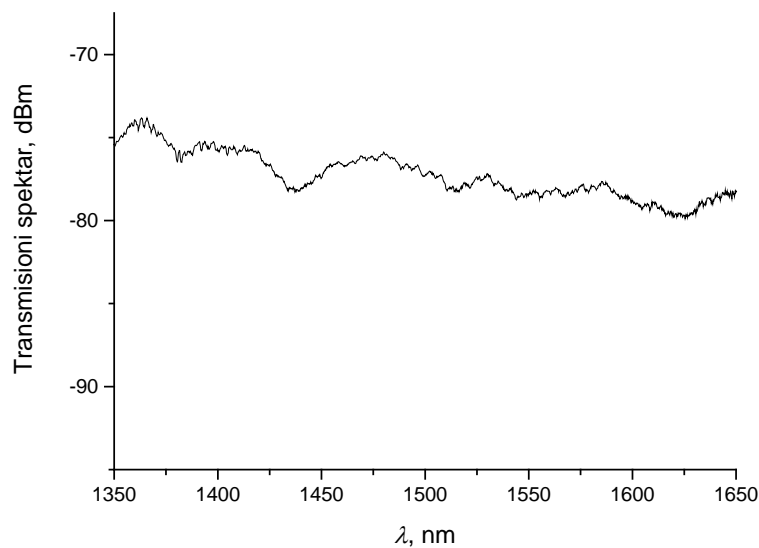
Влакно T5 уграђено је у ПЕВГ-СМ-ЛПГ композит, на начин који је претходно приказан. На слици 6.30 приказан је изглед узорка ПЕВГ-СМ-ЛПГ-1 након уградње овог влакна.



**Слика 6.30.** ПЕВГ-СМ-ЛПГ-1 узорак након уградње влакна са решетком са дугом периодом

Након уградње, узорак ПЕВГ-СМ-ЛПГ-1 у Институту Винча поново је извршено снимање спектра на истом уређају. На слици 6.31 приказан је трансмисиони спектар за влакно T5 након уградње.

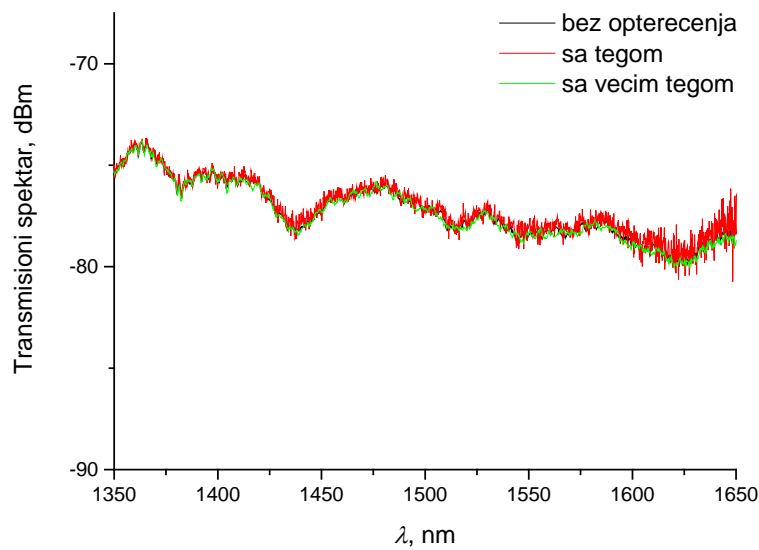




**Слика 6.31.** Трансмисиони спектар оптичког влакна T5 са решетком са дугом периодом пре уградње

Услед повећаног притиска приликом уградње, очекивано је да ће доћи до издуживања решетке и померања таласних дужина на којима је максимално слабљење. Међутим, посматрањем спектра са претходне слике и поређењем са оним приказаним на слици 6.29 може се приметити да не постоје подједнако изражена слабљења на претходно забележеним таласним дужинама, нити у њиховој непосредној околини. Односно, током поступка уградње дошло је до хомогенизације оптичког влакна. Истовремено, оптичко влакно је функционално, а што се огледа у незнатном повећању слабљења у односу на трансмисиони спектар пре уградње.

Додатно су извршена снимања трансмисионог спектра при примени статичког оптерећења узорка ПЕВГ-СМ-ЛПГ-1 са две различите врсте тега, а упоредни резултати су приказани на слици 6.32. На основу приказаног дијаграма, може се утврдити да статичко оптерећење не производи никакву врсту модулације трансмисионог спектра, чак и када је примењено оптерећење велико. Односно, у сва три случаја, трансмисиони спектар изгледа готово идентитично, уз очекиване варијације које су последица шума. Ово додатно потврђује тезу да уграђена решетка са дугом периодом није издржала поступак уградње у посматрани композитни материјал.



**Слика 6.32.** Трансмисиони спектар оптичког влакна Т5 без оптерећења и при статичком оптерећењу узорка ПЕВГ-СМ-ЛПГ-1 са две врсте тега

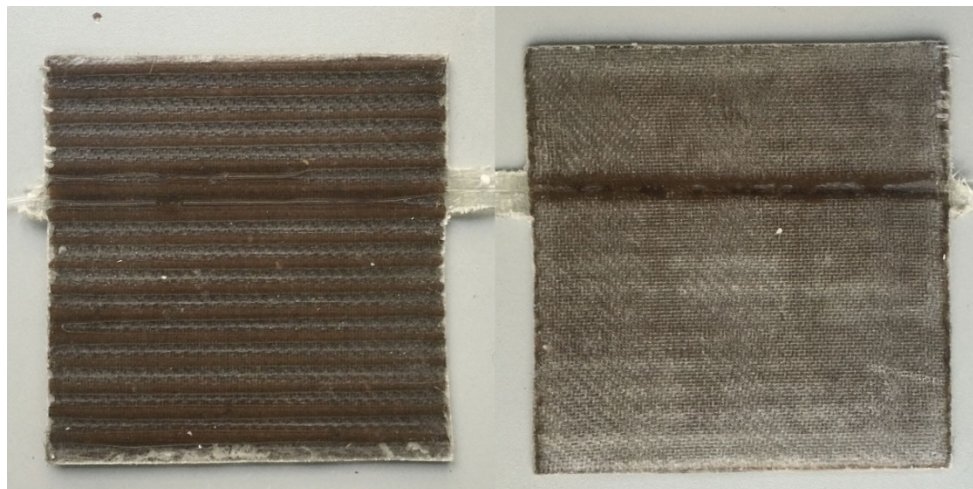
Имајући у виду претходно наведено, узорак ПЕВГ-СМ-ЛПГ-1 није било потребе тестирати ударом, нити је извршено снимање спектра након удара.

На основу извршених експеримената, може се извести закључак да је оптичко влакно са решетком са дугом периодом неупотребљиво за мерење силе којој је подвргнут композит ПЕВГ-СМ-ЛПГ. Индекс преламања композита износи приближно 1,5 што је веома блиско индексу преламања стакла. Модови омотача су стога веома слабо вођени и принцип рада влакна са решетком са дугом периодом је нарушен. Додатни проблем представља процес уградње влакна при коме је оно изложено притиску од 0.35 МПа и температури од 135°C. При тим условима, индекс преламања се хомогенизује дуж влакна.

## **6.6. Испитивање интензитетног сензора на бази пластичног оптичког влакна**

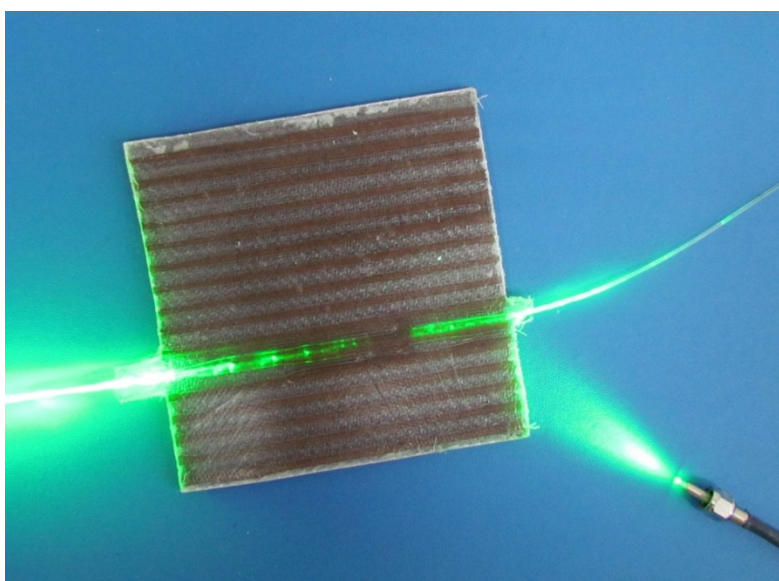
ЕП-СВ-К-1 представља узорак димензија 100x100 mm и дебљине 3,5 mm. На слици 6.33 приказан је изглед узорка ЕП-СВ-К-1 након уградње пластичног оптичког влакна. Са слике се види да је у делу узорка који одговара месту у картону на коме је извршена перфорација незнатно повећана количина епоксидне

матрице у односу на остатак узорка, што је и очекивано за овакав начин уградње влакна.



**Слика 6.33.** Узорак ЕП-СВ-К-1 пре удара

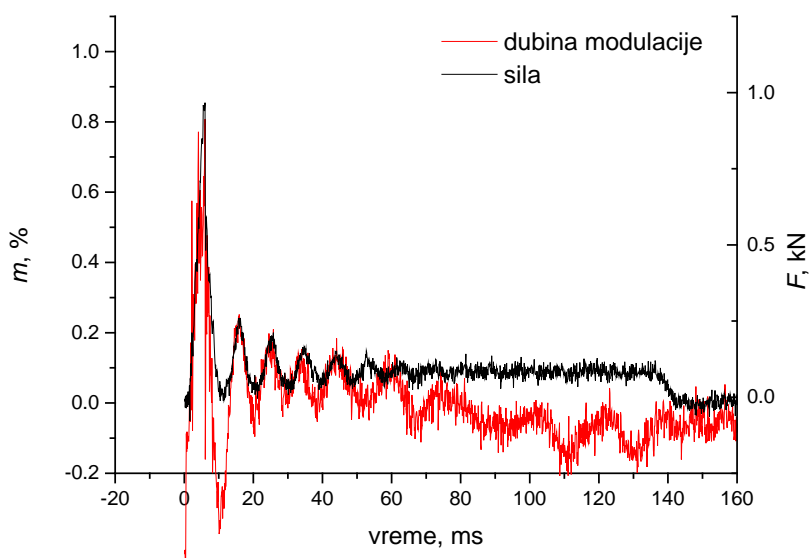
Пре тестирања ударом, извршена је провера да ли пластично влакно уграђено у узорак проводи светло у спектру видљиве светлости, убацивањем светлости из ласерског предајника, а имајући у виду да је омотач пластичног влакно јако осетљив на различите врсте хемијских супстанци, те да у поступку уграђивања може доћи до оштећења влакна. На слици 6.34 приказан је изглед узорка при провођењу светлости. Ова слика потврђује исправност функционисања посматраног оптичког влакна.



**Слика 6.34.** Провођење светлости кроз уграђено пластично оптичко влакно у ЕП-СВ-К-1

Узорак ЕП-СВ-К-1 тестиран је под следећим условима: пет поновљених удара брзином од 1 m/s и дужином пенетрације од 2 mm, а потом удари брзинама од 2 m/s и 3 m/s, респективно. Време семпловања на обе аквизиционе картице износило је 100  $\mu$ s.

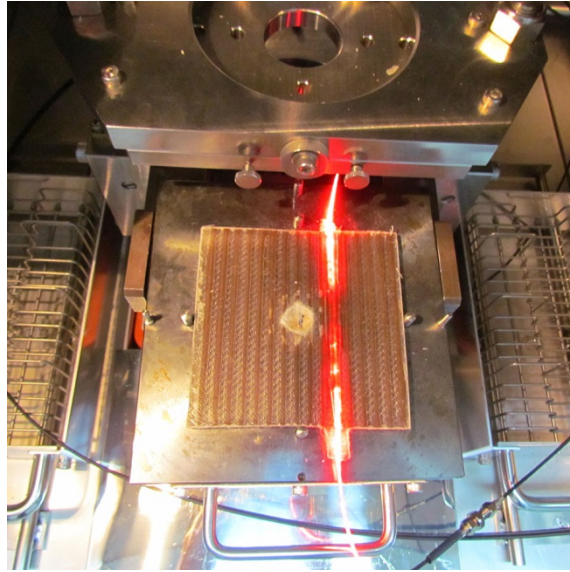
На слици 6.35 приказан је временски дијаграм дубине модулације и силе измерене на импакт тестеру током трајања првог удара.



**Слика 6.35.** Временски дијаграм модулационе дубине и силе мерене на импакт тестеру за узорак ЕП-СВ-К-1 током трајања првог удара

На основу претходно приказаног временског дијаграма може се закључити више ствари. Модулациона дубина у извесној мери прати силу мерену на импакт тестеру, али је у значајној мери изражен шум који утиче на мерне резултате. Максимална вредност модулационе дубине је инфериорна у односу на стандардно телекомуникационо оптичко влакно при силама приближног интензитета, а што је последица димензија пластичног влакна и чињенице да слабљење у овом влакну настаје само због савијања, а не и микросавијања.

Имајући у виду претходно, може се закључити да је стандардно стаклено телекомуникационо влакно погодније за уградњу у композитне материјале од пластичног. Преостале ударе због наведеног није било могуће анализирати.

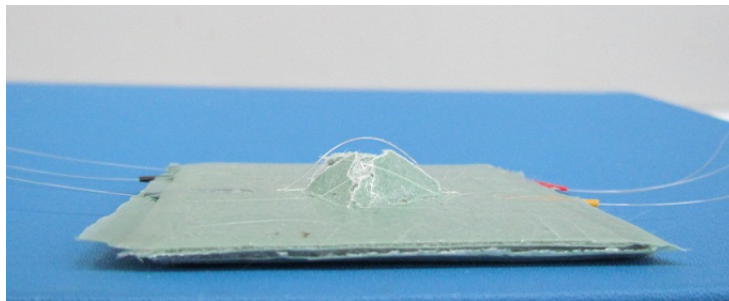


**Слика 6.36.** Изглед узорка ЕП-СВ-К-1 након удара брзином од 3 m/s

Пластично оптичко влакно показало се као издржљиво и при поновљеним ударима већих брзина. На слици 6.36 приказан је изглед узорка унутар кабине импакт тестера после удара брзином од 3 m/s, при чему је настало видљиво оштећење на узорку услед пробијање. Оптичко влакно и даље проводи светлост, што се може закључити са слике.

### **6.7. Отпорност оптичких влакана на ударе**

Уграђена оптичка влакна показала су се током експерименталног рада веома издржљивим на ударе. Ни у једном од мерења није дошло до лома уграђеног оптичког влакна и престанка вођења светлости.



**Слика 6.37.** Уграђено оптичко влакно на месту удара које је преживело пробијање материјала

На слици 6.37 приказан је изглед једног од ПЕВГ-СМ узорака након удара брзином од 3 m/s. Овај пример илуструје отпорност оптичког влакна на ударе, иако је влакно било постављено 3 mm од средишта узорка, односно места удара. Приликом пробијања узорка дошло је до истезања оптичког влакна и његовог извлачења из узорка, али је влакно наставило да проводи светлост. Релативна промена средње вредности излазног напона у овом случају била је већа од 85%, што указује на то да даља мерења овим влакном нису могућа.

## 7. Закључак

У оквиру ове тезе испитивана је употреба фиброоптичких сензора за карактеризацију удара у композитним материјалима. Извршено је испитивање и квантификовање корелације између модулације интензитета светлости са једне стране и силе приликом удара и растојања влакна од места удара са друге стране.

Експерименти су вршени са:

- (1) стандардним телекомуникационим влакном уграђеним у композитни материјал са полиетиленском матрицом и ојачањем у виду стакленог мата (ПЕВГ-СМ) и материјал са епоксидном матрицом и ојачањем у виду стаклених влакана (ЕП-СВ-И),
- (2) оптичким влакном са решетком са дугом периодом уграђеним у композитни материјал са полиетиленском матрицом и стакленим матом (ПЕВГ-СМ-ЛПГ),
- (3) пластичним оптичким влакном уграђеним у композитни материјал са епоксидном матрицом и стакленим влакнима (ЕП-СВ-К).

Експерименти са стандардним телекомуникационим влакном вршени су на собној и сниженој температури. Уређај за тестирање ударима високе енергије употребљен је као калибрациони инструмент. Утврђено је да постоји корелација између дубине модулације интензитета светлости и отпорне силе коју мери импакт тестер, без обзира на температуру на којој се налазе узорак и уграђено оптичко влакно.

Тестирање након уградње оптичког влакна са решетком са дугом периодом у композит са полиетиленском матрицом и стакленим матом показало је да током поступка уградње на високим притисцима и температурама долази до хомогенизације оптичког влакна, да је нарушен принцип рада влакна са решетком са дугом периодом и да нема промене у спектру сензора при статичком оптерећењу. Закључено је да се овај сензор не може користити у ПЕВГ-СМ композитима у поступку уградње.

Уградња и испитивање пластичног оптичког влакна у композитни материјал са епоксидном матрицом и стакленим влакнима, у видљивом спектру светлости, показала је да је пластично оптичко влакно инфериорно по питању осетљивости у

односу на стандардно телекомуникационо и да је овај сензор мање погодан за уградњу у композитне материјале.

Додатни експерименти на композиту са полиетиленском матрицом и стакленим матом, помоћу металне куглице која слободно пада, омогућили су одређивање одзива сензора у функцији растојања места удара од уграђеног оптичког влакна.

За случај (1) моделована је преносна функција. Дубина модулације интензитета светлости у зависности од отпорне силе и растојања калибрисана је на узорку ПЕВГ-СМ-1. Микросавијања која се формирају приликом уградње оптичког влакна нису периодична и зависе од стакленог мата. Зато је осетљивост преносне функције у односу на силу различита на различитим узорцима. Предложени сензор се једноставно испитује, има ниску цену, али је за практичну примену неопходна сложена калибрациона процедура.

Извршена је провера услова под којим се недеструктивним ударима може извршити калибрација сензора, мерењем пригушених осцилација у одзиву сензора и импакт тестера. Гранична вредност силе након које настају видљива оштећења на материјалу мора се одредити пре калибрације.

Предложен је алгоритам за одређивање места удара унутар мреже ортогонално постављених оптичких влакана. Одређено је максимално растојање између влакана у мрежи на основу преносне функције сензора. Предложена мрежа оптичких влакана ће детектовати сваки опасан удар у структуру.

Мрежа уграђених оптичких влакана може пружити информацију о времену и месту удара, временској зависности ударне силе и промени импулса пројектила. Истовремено, мрежа може генерисати алармни сигнал уколико је ударна сила већа од граничне вредности која проузрокује видљива оштећења на материјалу.

Утврђено је да се средња вредност интензитета светлости може користити као индикатор функционалности оптичког канала. Може се умерено мењати током времена, али без утицаја на преносну функцију, јер дубина модулације представља нормализовану вредност оптичког сигнала. Уколико, приликом удара, дође до значајне промене интензитета светлости, адхезија између уграђеног оптичког влакна и композитног материјала неповратно је промењена и посматрани оптички канал више није функционалан.



Значај спроведеног истраживања очекује се у побољшању дијагностике удара у композитне материјале. Праћење стања структура у реалном времену и за различите типове композитних материјала, омогућиће правовремено реаговање на оштећења настала на структурама у току удара.

## Литература

- 
- [1] W. D. Callister, "Materials science and engineering: an introduction", 7th edition, *John Wiley & Sons*, New York, 2007
- [2] Р. Алексић, „Композитни материјали“, *Свет хемије*, 10, 1997
- [3] B. S. Mitchell, "An Introduction to Materials Engineering and Science for Chemical and Materials Engineers", *John Wiley & Sons*, New York, 2004
- [4] ISO 472:2013, Plastics, <http://www.iso.org/>
- [5] M. D. Jackson, E. N. Landis, P. F. Brune, M. Vitti, H. Chen, Q. Li, M. Kunz, H. Wenk, P. J. M. Monteiro, A. R. Ingraffea, "Mechanical resilience and cementitious processes in Imperial Roman architectural mortar", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111 (52), 2014, pp. 18484-18489
- [6] O. Yerro, V. Radojevic, I. Radovic, **M. Petrovic**, P. S. Uskokovic, D. B. Stojanovic, R. Aleksic, "Thermoplastic acrylic resin with self-healing properties", *Polymer Engineering & Science*, 56(3), 2016, pp. 251-257
- [7] V. Obradovic, D. B. Stojanovic, R. Jancic–Heinemann, I. Zivkovic, V. Radojevic, P.S. Uskokovic, R. Aleksic, "Ballistic Properties of Hybrid Thermoplastic Composites with Silica Nanoparticles", *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 9(4), 2014
- [8] П. Ускоковић, Р. Алексић, „Оптичка влакна као сензори за детекцију механичких оштећења у композитним материјалима“, *Технолошко-металуришки факултет*, Београд, 2005
- [9] C. Y. Park, B. W. Jang, J. H. Kim, C. G. Kim, S. M. Jun, "Bird strike event monitoring in a composite UAV wing using high speed optical fiber sensing system", *Composites Science and Technology*, 72, 2012, pp. 498-505
- [10] R. Ruzek, P. Kudrna, M. Kadlec, V. Karachalios, K. I. Tserpes, "Strain and damage monitoring in CFRP fuselage panels using fiber Bragg grating sensors. Part II: Mechanical testing and validation", *Composite Structures*, 107, 2014, pp. 737–744
- [11] "Modern Plastics Encyclopedia", Vol 62, No 10A, *McGraw-Hill*, 1985-1986

- [12] M. Perisic, V. Radojevic, P.S. Uskokovic, D. Stojanovic, B. Jokic, R. Aleksic, "Wood–Thermoplastic Composites Based on Industrial Waste and Virgin High-Density Polyethylene (HDPE)", *Materials and Manufacturing Processes*, 24 (10-11), 2009, pp. 1207-1213.
- [13] П. С. Ускоковић, „Карактеризација механичких својстава једноосних хибридних композитних материјала”, докторска дисертација, *Технолошко-металуришки факултет*, Београд, 1999
- [14] Multi-purpose resin Araldite M with HY 956 or HY 5162, Product information, <http://www.lindberg-lund.no/files/Tekniske%20datablad/VAN-956-H-TD.pdf>
- [15] F. P. La Mantia, M. Morreale, “Green composites: A brief review”, *Composites: Part A*, 42, 2011, pp. 579-588
- [16] G. Koronis, A. Silva, M. Fontul, “Green composites: A review of adequate materials for automotive applications”, *Composites: Part B*, 44, 2013, pp. 120-127
- [17] Љ. М. Брајовић, „Детекција оштећења услед замора једноосних композитних материјала применом оптичких влакана”, докторска дисертација, *Технолошко-металуришки факултет*, Београд, 2004
- [18] D. R. Askeland, “The Science and Engineering of Materials”, 3rd edition, *Brooks/Cole Publishing Co.*, Pacific Grove, 1994
- [19] С. Путић, Р. Алексић, „Механизам оштећења у влакнима ојачаним композитним материјалима услед деловања променљивог оптерећења“, *Научно Технички Преглед ВТИ Ков*, 46(2), 1996, pp. 17-20
- [20] И. Живковић, С. Максимовић, С. Алексић, Љ. Брајовић, А. Којовић, Р. Алексић, „Анализа понашања смарт балистичких композита током статичког оптерећивања: поређење експерименталних резултата и нумеричке симулације“, *Нова дијагностика*, III(2), 2004, pp. 3-12
- [21] J. M. Duell, “Impact Testing of Advanced Composites”, *Advanced Topics in Characterization of Composites*, 2004, pp. 97–112

- [22] P. R. Mantena, R. Mann, C. Nori, "Low-velocity impact response and dynamic characteristics of glass-resin composites", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 20, 2001, pp 513-533
- [23] ASTM D 3763, "High Speed Puncture Properties of Plastics Using Load and Displacement Sensors", <http://www.astm.org/Standards/D3763.htm>, 2015
- [24] B. P. Jang, C. T. Huang, C. Y. Hsieh, W. Kowbel, B.Z. Jang, "Repeated impact failure of continuous fiber reinforced thermoplastic and thermoset composites", *Journal of Composite Materials*, 25, 1991, pp 1171-1203
- [25] D. R. Carroll, R. B. Stone, A. M. Siringano, R. M. Saindon, S. C. Gose, M. A. Friedman, "Structural properties of recycled plastic/sawdust lumber decking planks", *Resources, conservation and recycling*, 31(3), 2001, pp. 241–251
- [26] A. Маринчић, „Основи оптоелектронских телекомуникација“, *Грађевинска књига*, Београд, 1986
- [27] А. Којовић, „Анализа сигнала у оптичким влакнима уграђеним у термопластични композитни материјал при механичким напрезањима“, докторска дисертација, *Електротехнички факултет*, Београд, 2006
- [28] J. M. Lopez-Higuera, "Handbook of Optical Fibre Sensing Technology", *John Wiley & Sons*, New York, 2002
- [29] T. Kaino, K. Jinguji, S. Nara, "Low loss poly (methyl methacrylate-d5) core optical fibers", *Applied Physics Letters*, 41(9), 1982, pp. 802-804
- [30] I. Möllers, D. Jäger, R. Gaudino, A. Nocivelli, H. Kragl, O. Ziemann, N. Weber, T. Koonen, C. Lezzi, A. Bluschke, S. Randel, "Plastic optical fiber technology for reliable home networking: overview and results of the EU project pof-all.", *IEEE Communications Magazine*, 47(8), 2009, pp. 58-68
- [31] M. S. Alfiad, D. van den Borne, T. Wuth, M. Kuschnerov, B. Lankl, C. Weiske, E. de Man, A. Napoli, H. de Waardt, "111-Gb/s POLMUX-RZ-DQPSK Transmission over 1140 km of SSMF with 10.7-Gb/s NRZ-OOK Neighbours", *Proceedings of the European Conference on Optical Communications, ECOC'08*, 2008

- [32] N. Bozinovic, Y. Yue, Y. Ren, M. Tur, P. Kristensen, H. Huang, S. Ramachandran, “Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers”, *Science*, 340(6140), 2013, pp. 1545-1548
- [33] B. Culshaw, J. Dakin, “Optical fiber sensors: Principles and Components, Volume 1”, *Artech house*, Norwood, 1988
- [34] S. B. Poole, D. N. Payne, “Special Optical Fibers”, *Proceedings of Fifth International Conference on Fiber Optics and Opto-Electronics, SPIE Fibre Optics 87*, pp. 92-103
- [35] B. Y. Kim, J. N. Blake, S. Y. Huang, H. J. Shaw, “Use of Highly Elliptical Core Fibers for Two-mode Fiber Devices“, *Optics Letters*, 12, 198, pp. 729-731
- [36] W. W. Morey, G. Meltz, W. H. Glenn, „Fiber optic Bragg grating sensors“, *Proceedings of Fiber Optic and Laser Sensors VII, SPIE*, 1169, 1989, pp. 98-107
- [37] W. Zhao, R. O. Claus, “Optical fibers grating sensors in multimode fibers”, *Smart Materials and Structures*, 9, 2000, pp. 212-214
- [38] K. Kalli, “Femtosecond Laser Inscription of Bragg and Complex Gratings in Low-Loss Polymer and Silica Optical Fibers”, *Workshop on Specialty Optical Fibers and their Applications, Optical Society of America*, 2015, pp. WF4A-4
- [39] D. Kowal, G. Statkiewicz-Barabach, P. Mergo, W. Urbanczyk, “Inscription of long period gratings using an ultraviolet laser beam in the diffusion-doped microstructured polymer optical fiber”, *Applied optics*, 54(20), 2015, pp. 6327-6333
- [40] F. K. Brunner, “Fibre Optic Sensors: An Overview”, *1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering*, Nottingham, United Kingdom, 2004
- [41] D. Kinet, P. Mégret, K. W. Goossen, L. Qiu, D. Heider, C. Caucheteur, “Fiber Bragg Grating Sensors toward Structural Health Monitoring in Composite Materials: Challenges and Solutions”, *Sensors*, 14, 2014
- [42] K. T. V. Grattan, T. Sun, “Fiber optic sensor technology: an overview”, *Sensors and Actuators*, 82, 2000, pp. 40–61

- [43] C. Y. Huang, W. C. Wang, W. J. Wu, W. R. Ledoux, "Composite optical bend loss sensor for pressure and shear measurement", *IEEE Sensors Journal*, 7(11), 2007, pp. 1554-1565
- [44] Y. Ge, K. S. Kuang, S. T. Quek, "Development of a low-cost bi-axial intensity-based optical fibre accelerometer for wind turbine blades", *Sensors and Actuators, Part A-Physical*, 197, 2013, pp. 126-135
- [45] L. Bilro, N. Alberto, J. L. Pinto, R. Nogueira, "Optical sensors based on plastic fibers", *Sensors*, 12(9), 2012, pp. 12184-12207
- [46] Y. Xu, "Delamination detection at web/flange junction of I-section composite beam with fiber optical interferometer sensor", *Composites Part B-Engineering*, 58, 2014, pp. 140-146
- [47] A. D. Kersey, M. A. Davis, M. J. Marrone, "Differential polarimetric fiber-optic sensor configuration with dual wavelength operation". *Applied optics*, 28(2), 1989, pp. 204-206
- [48] G. Frosio, R. Dändliker, "Reciprocal reflection interferometer for a fiber-optic Faraday current sensor", *Applied Optics*, 33(25), 1994, pp. 6111-6122
- [49] K. S. C. Kuang, W. J. Cantwell, "Use of conventional optical fibers and fiber Bragg gratings for damage detection in advanced composite structures: A review", *Applied Mechanical Review*, 56 (5), 2003, pp. 493-513
- [50] J. M. López-Higuera, L. R. Cobo, A. Q. Incera, A. Cobo, "Fiber optic sensors in structural health monitoring", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 29(4), 2011, pp. 587-608
- [51] J. W. Berthold III, "Historical review of microbend fiber-optic sensors", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 13(7), 1995, pp. 1193-1199
- [52] A. J. Rogers, "Distributed optical - fibre sensors", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 19 (12), 1986, pp. 2237.
- [53] **M. Petrovic**, P. Mihailovic, Lj. Brajovic, S. Petricevic, I. Zivkovic, A. Kojovic, V. Radojevic, "Intensity Fiber-optic Sensor for Structural Health Monitoring Calibrated by Impact Tester", *IEEE Sensors Journal*, DOI: 10.1109/JSEN.2016.2524045, accepted for publication, 2016

- [54] A. Othonos, K. Kalli, “Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing”, *Artech House*, New York, 1999
- [55] A. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. Leblanc, “Fiber grating sensors”, *Journal of Lightwave Technology*, 15, 1997, pp. 1442–1463
- [56] R. Kashyap, “Fiber Bragg Gratings”, *Academic Press*, San Diego, USA, 1999
- [57] B. Culshaw, J. Dakin, “Optical fiber sensors: Systems and Applications Volume 2”, *Artech house*, Norwood, USA, 1988
- [58] Y. Sasaki, “Long-length low-loss polarization-maintaining fibers”, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 5(9), 1987, pp. 1139-1146
- [59] S. W. James, R. P. Tatam, “Optical fiber long-period grating sensors: characteristics and application”, *Measurement Science and Technology*, 14(5), 2003, pp. R49-R61
- [60] A. Barlow, D. Payne, “The stress-optic effect in optical fibers”, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 19, 1983, pp. 834–839
- [61] L. A. Ferreira, A. B. L. Ribeiro, J. L. Santos, F. Farahi, “Simultaneous displacement and temperature sensing using a white light interrogated low finesse cavity in line with a fiber Bragg grating”, *Smart Materials and Structures*, 7, 1998, pp. 248-256
- [62] Y. J. Rao, “In-fibre Bragg grating sensors”, *Measurement science and technology*, 8(4), 1997, pp. 355–375
- [63] P. M. Cavaleiro, A. B. L. Ribeiro, J. L. Santos, “Referencing technique for intensity-based sensors using fibre optic Bragg gratings”, *Electronic Letters*, 31(5), 1995, pp. 392-294
- [64] S. Huang, M. M. Ohn, M. LeBlanc, R. M. Measures, “Continuous arbitrary strain profile measurements with fiber Bragg gratings”, *Smart Materials and Structures*, 7, 1998, pp. 248-256
- [65] S. Yashiro, T. Okabe, N. Takeda, “Damage identification in a holed CFRP laminate using a chirped fiber Bragg grating sensor”, *Composites Science and Technology*, 67, 2007, pp. 286–295

- [66] C. Y. Park, B. Jang, J. H. Kim, C. Kim, S. Jun, "Bird strike event monitoring in a composite UAV wing using high speed optical fiber sensing system", *Composite Science and Technology*, 72, 2012, pp. 498-505
- [67] J. Gomez, I. Jorge, G. Durana, J. Arrue, J. Zubia, G. Aranguren, A. Montero, I. Lopez, "Proof of Concept of Impact Detection in Composites Using Fiber Bragg Grating Arrays", *Sensors*, 13, 2013, pp. 11998-12011
- [68] W. Zhang, D. J. Webb, G. D. Peng, "Enhancing the sensitivity of poly (methyl methacrylate) based optical fiber Bragg grating temperature sensors", *Optics letters*, 40(17), 2015, pp. 4046-4049
- [69] C. A. F. Marques, A. Pospori, D. Sáez-Rodríguez, K. Nielsen, O. Bang, D. J. Webb, "Fiber optic liquid level monitoring system using microstructured polymer fiber Bragg grating array sensors: performance analysis", *International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS24)*, 2015, pp. 96345V-96345V
- [70] A. Arie, M. Tur, S. Goldsmith, "Measurement and analysis of a modified cladding optical fiber with various input illuminations", *Cambridge Symposium-Fiber/LASE'86*, 1987, pp. 160-167
- [71] Љ. М. Јанковић, „Интерферометарски фиброоптички сензори за истовремено мерење температуре и истегања“, магистарски рад, *Електротехнички факултет*, Београд, 1994
- [72] K. A. Murphy, M. F. Gunther, A. M. Vengsarkar, R. O. Claus, "Quadrature phase-shifted extrinsic Fabry-Perot optical fiber sensors", *Optics Letters*, 16, 1991, pp. 273-275
- [73] B. G. Grossman, L. Huang, "Fiber optic sensor array for multi-dimensional strain measurement", *Smart Materials and Structures*, 7, 1998, pp. 159-165
- [74] E.J. Friebele, C. G. Askins, A. B. Bosse, A. D. Kersey, H. J. Patrick, W. R. Pogue, M. A. Putnam, W. R. Simon, F. A. Tasker, W. S. Vincent, S. T. Vohra, "Optical fiber sensors for spacecraft applications", *Smart Materials and Structures*, 8, 1999, pp. 813-838



- [75] R. Bronnimann, P.M. Nellen, U. Sennhauser, “Application and reliability of fiber optical surveillance system for a stay cable bridge”, *Smart Materials and Structures*, 7, 1998, pp. 229–236
- [76] K. Kageyama, I. Kimpara, T. Suzuki, I. Ohsawa, H. Murayama, K. Ito, “Smart material structure marine structures: an approach to the monitoring of ship structures with fiber-optics sensors”, *Smart Materials and Structures*, 7, 1998, pp. 472–478
- [77] C. K. Leung, K. T. Wan, D. Inaudi, X. Bao, W. Habel,, Z. Zhou, J. Ou, M. Ghandehari, H. C. Wu, M. Imai, “Review: optical fiber sensors for civil engineering applications”, *Materials and Structures*, 48(4), 2015, pp. 871-906
- [78] P. J. Schubel, R. J. Crossley, E. K. G. Boateng, J. R. Hutchinson, “Review of structural health and cure monitoring techniques for large wind turbine blades”, *Renewable Energy*, 51, 2013, pp. 113-123
- [79] A. S. Paterno, V. De Oliveira, T. S. Figueredo, H. J. Kalinowski, “Multiplexed fiber Bragg grating interrogation system using a modulated fiber Bragg grating and the tunable-filter method”, *IEEE Sensors Journal*, 6(6), 2006, pp. 1662-1668
- [80] M. W. Nielsen, J. W. Schmidt, J. H. Høgh, J. P. Waldbjørn, J. H. Hattel, T. L. Andersen, C. M. Markussen, “Life cycle strain monitoring in glass fibre reinforced polymer laminates using embedded fibre Bragg grating sensors from manufacturing to failure”, *Journal of Composite Materials*, 48(3), 2014, pp. 365-381
- [81] A. Arifin, A. M. Hatta, M. S. Muntini, A. Rubiyanto, “Long-Range Displacement Sensor Based on SMS Fiber Structure and OTDR”, *Photonic Sensors*, 5(2), 2015, pp. 166-171
- [82] M. LeBlanc, R. M. Measures, “Impact damage assessment in composite materials with embedded fiber-optic sensors”, *Composites Engineering*, 2, 1992, pp. 573–596
- [83] C. C, Chang, J. S. Sirkis, “Design of fiber optic sensor systems for low velocity impact detection”, *Smart Materials and Structures*, 7, 1998, pp. 166–177

- [84] R. M. Measures, N. D. W. Glossop, J. Lymer, M. LeBlanc, S. Dubois, W. Tsaw, R. C. Tennyson, "Structurally integrated fiber optic damage assessment system for composite materials", *Applied Optics*, 28, 1989, pp. 2626–2633
- [85] N. Elvin, C. Leung, "Feasibility study of delamination detection with embedded optical fibers", *Journal of intelligent material systems and structures*, 8(10), 1997, pp. 824-828
- [86] W. J. Rowe, E. O. Rausch, P. D. Dean, "Embedded optical fiber strain sensor for composite structure applications", *Cambridge Symposium-Fiber/LASE'86*, 1987, pp. 266–273
- [87] L. Everall, A. Gallon, D. Roberts, "Optical fiber strain sensing for practical structural load monitoring", *Sensor Review*, 20, 2000, pp. 113–119
- [88] I. McKenzie, R. Jones, I. H. Marshall, S. Galea, "Optical fiber sensors for health-monitoring of bonded repair systems", *Composite Structures*, 50, 2000, pp. 405–416
- [89] W. K. Chiu, Y. L. Koh, S. C. Galea, N. Rajic, "Smart structure application in bonded repairs", *Composite Structures*, 50, 2000, pp. 433–444
- [90] Y. Okabe, S. Yashiro, T. Kosaka, N. Takeda, "Detection of transverse cracks in CFRP composites using embedded fiber Bragg grating sensors", *Smart Materials and Structures*, 9, 2000, pp. 832–838
- [91] R. A. Badcock, G. F. Fernando, "An intensity-based optical fiber sensor for fatigue damage detection in advanced fiber-reinforced composites", *Smart Materials and Structures*, 4, 1995, pp. 223–230
- [92] D. C. Lee, J. J. Lee, I. B. Kwon, D. C. Seo, "Monitoring of fatigue damage of composite structures by using embedded intensity-based optical fiber sensors", *Smart Materials and Structures*, 10, 2001, pp. 285–292
- [93] N. Lagakos, J. H. Cole, J. A. Bucaro, "Microbend fiberoptic sensor", *Applied Optics*, 26, 1987, pp. 2171–2180
- [94] A. Kojović, I. Živković, Lj. Brajović, D. Mitraković, R. Aleksić, "Low Energy Impact Damage Detection in Laminar Thermoplastic Composite Materials by

- Means of Embedded Optical Fibers”, *Materials Science Forum*, 494, 2005, pp. 481-486
- [95] J. Lees, STL Ltd, Harlow, UK, unpublished report, 1976
- [96] K. F. Hale, B. S. Hockenhull, G. Christodoulou, “The application of optical fibers as witness devices for the detection of plastic strain and cracking”, *Strain*, 16, 1980, pp. 150–154
- [97] R. M. Crane, A. B. Macander, J. Gagoric, “Fiber optics for a damage assessment system for fiber reinforced plastic composite structures”, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 1982, pp. 1419–1430
- [98] L. Rippert, M. Wevers, “Optical fibers for in situ monitoring the damage development in composites”, *Proceedings of 15th WCNDT*, Rome, 2000
- [99] L. Rippert, M. Wevers, S. Van Huffel, “Optical and acoustic damage in laminated CFRP composite materials”, *Composite Science and Technology*, 60, 2000, pp. 2713-2724
- [100] K. O. Hill, Y. Fuji, D. C. Johnson, B. S. Kawasaki, “Photosensitivity in optical fiber waveguides, application to reflection filter fabrication”, *Applied Physics Letters*, 32, 1978, pp. 647–649
- [101] G. Meltz, G. G. Morey, W. H. Glenn, “Formation of Bragg grating in optical fibers by a transverse holographic method”, *Optics Letters*, 14(15), 1989, pp. 823–825
- [102] J. R. Dunphy, G. Meltz, F. P. Lamm, W. W. Morey, “Multi-function, distributed optical-fiber sensor for composite cure and response monitoring”, *San Jose-DL tentative*, 1990, 116–118
- [103] H. D. Simonsen, R. Paetsch R, J. R. Dunphy, “Fiber Bragg grating sensor demonstration in glass-fiber reinforced polyester composite”, *Proceedings of the INT Conference*, Glasgow, 1992, pp. 73–76
- [104] I. McKenzie, R. Jones, I. H. Marshall, S. Galea, “Optical fiber sensor health-monitoring of bonded repair systems”, *Composite Structures*, 50, 2000, pp. 405–416

- [105] E. Bocherens, S. Bourasseau, V. Dewynter-Marty, S. Pys, M. Dupont, P. Ferdinand, H. Berenger, “Damage detection in a radome sandwich material with embedded fiber optic sensors”, *Smart Materials and Structures*, 9, 2000, pp. 310–315
- [106] N. D. Dykes, M. O. O’Dwyer, S. W. James, R. P. Tatam , P. E. Irving, “Mechanical and sensing performance of embedded in-fiber Bragg grating devices during impact testing of carbon fiber reinforced polymer composite”, *Proceedings of 4th ESSM and 2nd MIMR Conference*, 1998, pp. 449-456
- [107] C. D. Butter, G. B. Hocker, “Fiber optics strain gauge”, *Applied Optics*, 17, 1978, pp. 2867–2869
- [108] C. E. Lee, J. J. Alcoz, Y. Yeh, W. N. Gibler, R. A. Atkins, H. F. Taylor, “Optical fiber Fabry-Perot sensors for smart structures”, *Smart Materials and Structures*, 1, 1992, pp. 123–127
- [109] T. Liu, M. Wu, Y. Rao, D. A. Jackson, G. F. Fernando, “A multiplexed optical fiber-based extrinsic Fabry-Perot sensor system for in-situ strain monitoring in composites”, *Smart Materials and Structures*, 7, 1998, pp. 550–556
- [110] V. M. Murukeshan, P. Y. Chan, O. L. Seng, A. Asundi, “On-line health monitoring of smart composite structures using fiber polarimetric sensor”, *Smart materials and structures*, 8(5), 1999, pp. 544-548
- [111] J. Ma, A. Asundi, “Structural health monitoring using a fiber optic polarimetric sensor and a fiber optic curvature sensor-static and dynamic test”, *Smart materials and structures*, 10(2), 2001, pp. 181-188
- [112] J. M. Silva, T. C. Devezas, A. P. Silva, J. A. Ferreira, “Mechanical characterization of composites with embedded optical fibers”, *Journal of composite materials*, 39(14), 2005, pp. 1261-1281
- [113] R. M. Measures, “Smart Structures with Nerves of Glass”, *Progress in Aerospace Sciences*, 26(4), 1989, pp. 289–351
- [114] E. Udd, “Fiber Optic Smart Structures”, *John Wiley & Sons*, New York, NY

- [115] J. Sirkis, A. Dasgupta, “The Role of Local Interaction Mechanics in Fiber Optic Smart Structures”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 4, 1993, pp. 260–271
- [116] G. Carman, G. Sendeckyj, “Review of the Mechanics of Embedded Optical Sensors”, *Journal of Composites Technology & Research*, 17, 1995, pp. 183-193
- [117] N. Eaton, M. Curran, J. Dakin, H. Geiger, “Factors Affecting the Embedding of Optical Fiber Sensors in Advanced Composite Structures”, *Proc. 75th Meeting of the AGARD Structures and Materials*, Paper 20.
- [118] S. Roberts, R. Davidson, “Mechanical Properties of Composite Materials Containing Embedded Fiber Optic Sensors”, *Fiber Optic Smart Structures and Skins IV – SPIE*, 1588, 1991, pp. 326–341
- [119] C. C. Chang, “Low Velocity Impact of Laminated Graphite/Epoxy Panels with Embedded Optical Fibers”, MS Thesis, *University of Maryland*, 1991
- [120] J. S. Sirkis, C. C. Chang, B. T. Smith, “Low Velocity Impact of Optical Fiber Embedded Laminated Graphite/Epoxy Panels. Part I: Macro-Scale”, *Journal of Composite Materials*, 28(14), 1994, pp. 1347–1370
- [121] R. P. Beukema, “Embedding technologies of FBG sensors in composites: Technologies, applications and practical use”, *Proceedings of the 6th European Workshop on Structural Health Monitoring*, Dresden, Germany, 2012
- [122] Интернет презентација пројекта „Друмска стрела“, <http://www.stt.org.rs/>
- [123] Fiber Optic Cables, Assemblies, Connectors and Accessories, *LEONI Fiber Optics GmbH*, [http://i-fiberoptics.com/pdf/leoni\\_fo\\_cables.pdf](http://i-fiberoptics.com/pdf/leoni_fo_cables.pdf)
- [124] 880 nm 1A212 High-Performance DUPLEX diode, Data sheet, *Mitel Semiconductors*, [http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheets/208/139759\\_DS.pdf](http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheets/208/139759_DS.pdf)
- [125] N-TYPE SILICON PIN PHOTODIODE FD08N, Data sheet, *IHTM*, <http://nanosys.ihtm.bg.ac.rs/catalog/fd08n.pdf>
- [126] Low-Cost M Series Multifunction Data Acquisition, Data sheet, *National Instruments*, <http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-15>

- [127] MAX44244/MAX44245/MAX44248 36V, Precision, Low-Power, 90 $\mu$ A, Single/Quad/Dual Op Amps, Data sheet, *Maxim Integrated*, <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX44244-MAX44248.pdf>
- [128] Light Sources, Product Catalogue, *Omicron-Laserage Laserprodukte GmbH*, <http://vgphotonics.eu/wp-content/uploads/2015/05/Omicron-Product-Catalog.pdf>
- [129] Plastic Fiber Optic Photodiode Detector, Data sheet, *Infineon Technologies*, [http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/infineon/1-SFH250\\_040319-1426.pdf](http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/infineon/1-SFH250_040319-1426.pdf)
- [130] High-speed Puncture Impact Testing Machine HYDROSHOT HITS-P10, Instruction manual, *Shimadzu Corporation*, Japan
- [131] R. N. Trubshaw, "Resonance and signal conditioning in instrumented impact testing", *Polymer Testing*, 6(5), 1986, pp 387–401

## Биографија

мр Милош Петровић, дипл.инж. рођен је 23.1.1980. године у Београд. Основну школу завршио је у Београду, као и Математичку гимназију. Студије на Електротехничком факултету, Универзитета у Београду, започео је 1998. године, а дипломирао је на смеру за телекомуникације 2003. године са просечном оценом 9,21. Дипломски рад под називом „Препорука V.42“ одбранио је са оценом 10 код проф. др. Душана Драјића. Током основних студија био је стипендиста Републичке фондације за развој научног и уметничког подмлатка, као и стипендиста Владе Републике Србије.

Магистарске студије уписао је на Електротехничком факултету, Универзитета у Београду, 2003. године, а магистрирао је 2006. године на смеру за телекомуникационе и рачунарске мреже - комутација и протоколи, са просечном оценом 10. Магистарску тезу под називом „Дизајн и имплементација контролера пакетског комутатора високог капацитета“, чији је ментор била проф. др Александра Смиљанић, одбранио је са оценом 10. За своју магистарску тезу добио је награду Привредне коморе Београда за најбољу магистарску тезу у 2006. години. Више радова у вези са темом магистарске тезе објављени су на конференцијама ТЕЛФОР, ЕТРАН, IEEE HPSR 2006, IEEE ICCAS 2006, као и у часопису IEEE Communications Letters 2007. године.

Докторску дисертацију под менторством проф. др Пеђе Михаиловића и називом „Испитивање композитних материјала помоћу уграђених фиброоптичких сензора приликом удара контролисаном енергијом“ пријавио је на Електротехничком факултету, Универзитета у Београду, у јулу 2015. године. Објавио је један рад у вези са темом докторске дисертације у часопису IEEE Sensors Journal у фебруару 2016. године, као и више радова у којима су анализирана својства материјала приликом удара на конференцијама YUCOMAT

и International Conference on Bioinspired and Biobased Chemistry & Materials у 2014. години и у часопису Polymer Engineering and Science у 2015. години.

Од 2004. године до 2005. године радио је као инжењер у развоју у Пупин Телеком ДКТС. Од 2005. године до 2007. године радио је као стручни сарадник на Електротехничком факултету у Београду, а потом као истраживач приправник у Иновационом центру Електротехничког факултета у Београду. Од 2008. године запослен је на Технолошко-металуршком факултету као стручни сарадник у оквиру Лабораторије за електротехнику – Катедре за опште техничке науке. Ангажован је на рачунским и лабораторијским вежбама на предмету друге године „Електротехника са електроником“, као и на лабораторијским вежбама на предметима прве године „Техничка физика 1“ и „Техничка физика 2“.

Радио је на више пројеката технолошког развоја које је финансирало Министарство за науку и технолошки развој, укључујући пројекте „Имплементација контролера IP рутера“ (2005-2007), „Ethernet over SDH“ (2005-2007), „Системска интеграција Интернет рутера“ (2008-2010), „Развој технологије и полуиндустријских постројења за добијање стаклених, полимерних и хибридних композитних светловодних каблова“ (2008-2010), „Развој сервиса и безбедности интернет рутера високог капацитета“ (2010-2011), „Развој опреме и процеса добијања полимерних композитних материјала са унапред дефинисаним функционалним својствима“ (2010-данас), као и на међународним пројектима „Development, validation, and modeling of a novel bioreactor system for cartilage tissue engineering“ (Swiss National Science Foundation (SNSF) grant IB73B0-111016/1, 2005-2008) и „Biomimetic bioreactor system for biomedical application“ (Biomimetika, E!6749, 2011-2014). Учествовао је у организацији Конференције о ФП7 (оквирном програму ЕУ за финансирање научних истраживања и технолошког развоја), као део тима Министарства за телекомуникације и информатичко друштво Републике Србије.

мр Милош Петровић је био рецезент за међународне часописе IEEE Communication Letters и OSA Journal of Optical Networking, као и за међународне конференције IEEE Workshop on High Performance Switching and Routing (HPSR) и IEEE International Conference on Information Technology: Research and Education (ITRE).



Аутор је универзитетског уџбеника „Програмирање Алтериних FPGA чипова“ (Академска мисао, 2008), више издања практикума за лабораторијске вежбе, укључујући и „Електротехника са електроником“ (Технолошко-металуршки факултет, 2016). Такође је аутор и коаутор пет радова у међународним часописима, 11 радова на међународним конференцијама, три рада на домаћим конференцијама и више техничких и развојних решења.

Говори енглески и шпански језик.

## Изјава о ауторству

Потписани Милош Петровић

број индекса (по старом програму)

### Изјављујем

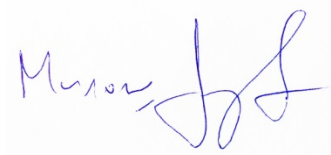
да је докторска дисертација под насловом

„Испитивање композитних материјала помоћу уграђених фиброоптичких сензора приликом удара контролисаном енергијом“

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

У Београду, 8. 3. 2016. године

**Потпис докторанда**



## **Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада**

Име и презиме аутора	Милош Петровић
Број индекса	(по старом програму)
Студијски програм	наноелектроника и фотоника
Наслов рада	„Испитивање композитних материјала помоћу уграђених фиброоптичких сензора приликом удара контролисаном енергијом“
Ментор	др Пеђа Михаиловић, ванредни професор Универзитет у Београду, Електротехнички факултет
Потписани	Милош Петровић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предала за објављивање на порталу Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

**Потпис докторанда**

У Београду, 8. 3. 2016. године



## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

**„Испитивање композитних материјала помоћу уграђених фиброоптичких сензора приликом удара контролисаном енергијом“**

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио.

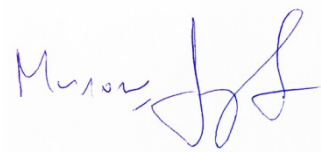
1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство - некомерцијално - без прераде

**4. Ауторство - некомерцијално - делити под истим условима**

5. Ауторство - без прераде
6. Ауторство - делити под истим условима

У Београду, 8. 3. 2016. године

**Потпис докторанда**



1. Ауторство - Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. Ауторство – без прераде. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.