

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

Машински факултет

Милица М. Марјановић

**ИСТРАЖИВАЊЕ УТИЦАЈА  
ПРИМЕНЕ НАНОМАТЕРИЈАЛА  
НА ОЈАЧАЊА КОМПОЗИТА  
УГЉЕНИЧНО ВЛАКНО – ЕПОКСИ СМОЛА**

докторска дисертација

Београд, 2022

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Milica M. Marjanović

**INVESTIGATION OF INFLUENCE  
OF THE APPLICATION OF NANOMATERIALS  
FOR THE REINFORCEMENT OF  
CARBON FIBER - EPOXY RESIN  
COMPOSITES**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2022

## ПОДАЦИ О МЕНТОРУ И ЧЛАНОВИМА КОМИСИЈЕ

### Ментори:

др Лидија Матија, редовни професор  
Универзитет у Београду, Машински факултет

---

др Зијах Бурзић, научни саветник  
Војнотехнички институт у Београду

---

### Чланови комисије:

др Александра Васић-Миловановић, редовни професор  
Универзитет у Београду, Машински факултет

---

др Ивана Станковић, доцент  
Универзитет у Београду, Машински факултет

---

др Бранислава Јефтић, доцент,  
Универзитет у Београду, Машински факултет

---

Датум одбране: \_\_\_\_\_

## ЗАХВАЛНОСТ

Ова докторска дисертација је настала као резултат вишегодишњег истраживања и бројних експеримената изведених у лабораторијама Војнотехничког института у Београду.

Пре свега захваљујем се менторима др Зијаху Бурзићу и проф. др Лидији Матији на вођењу, подршци и садржајним сугестијама при коначном формулисању ове тезе.

Захваљујем се Војнотехничком институту на обезбеђеним средствима и материјалима за реализацију ове дисертације. Посебно се захваљујем мојим најближим сарадницима за помоћ у истраживању, изради епрувета и извођењу експерименталних испитивања: др Даници Бајић, Срђи Перковићу, мр Јели Галовић, др Љубици Радовић, Слађану Грги, Милану Симићу, Александру Ковачевићу и Мирјани Мијаиловић. Захваљујем се свим колегама и претпостављенима из Војнотехничког института који су ми на разне начине пружали подршку и помоћ током истраживања.

Највећу захвалност дугујем мојој породици на безрезервној подршци, разумевању и стрпљењу.

# ИСТРАЖИВАЊЕ УТИЦАЈА ПРИМЕНЕ НАНОМАТЕРИЈАЛА НА ОЈЧАЊА КОМПОЗИТА УГЉЕНИЧНО ВЛАКНО – ЕПОКСИ СМОЛА

## САЖЕТАК

У раду се анализира утицај примене мале концентрације наночестица волфрам дисулфида, које су познате по изузетној термичкој, хемијској и механичкој отпорности, на ламинирани композитни материјал на бази угљенично влакно – епокси смола/поли(винил) бутирал. У том циљу су за структурну анализу и механичка испитивања израђени су узорци од нивоа танког филма матрице на бази епокси смоле/поли(винил) бутирала, ПВБ, са и без наночестица до ламинираних структура различитих дебљина од више слојева унидирекционог препрега, од јаких угљеничних влакана и епоксидне смоле, са и без фулеренских наночестица волфрам дисулфида IF-WS<sub>2</sub> и наноцеви INT-WS<sub>2</sub>. ФТИР анализом је доказано да не постоји хемијска реакција између WS<sub>2</sub> и полимерне матрице. Експериментално су испитане физичке особине и радне карактеристике препрега, анализиран квалитет дисперзије наночестица WS<sub>2</sub> и квалитет импрегнације применом скенирајуће електронске микроскопије СЕМ/ЕДС. Ради сагледавања вискоеластичног понашања композита урађена су испитивања на динамичко-механичко-термичком анализатору ДМТА; одређена је затезна чврстоћа, чврстоћа савијања као и интерламинарна чврстоћа на смицање на кидалици, као и енергија удара на Шарпијевом клатну. Резултати испитивања показују да наночестице IF-WS<sub>2</sub> и INT-WS<sub>2</sub> имају повољан утицај на механичке карактеристике композита који је њима модификован. Тиме је отворена могућност њихове примене у разним областима где су потребне боље перформансе композита од постојећих.

**Кључне речи:** Композити, угљенична влакна, епоксидна смола, волфрам дисулфид WS<sub>2</sub>, фулеренске наночестице, наноцеви

**Научна област:** Машинство

**Ужа научна област:** Наноматеријали

**УДК број:** 678.686:62-419.8]:661.878(043.3)

66.017:620.17(043.3)

**INVESTIGATION OF INFLUENCE  
OF THE APPLICATION OF NANOMATERIALS FOR THE REINFORCEMENT OF  
CARBON FIBER - EPOXY RESIN COMPOSITES**

**ABSTRACT**

This work analyses the influence of application of small concentrations of tungsten-disulfide, known for exceptional thermal, chemical and mechanical resistance (stamina), to carbon fiber – epoxy resin multilayer laminated composite material. In order to do that, specimens for structural analysis and mechanical testing were made, starting with thin film specimens of matrix epoxy resin/polyvinilbythural (PVB) with and without nanoparticles, up to various thickness specimens made of laminated structures of unidirectional high strength carbon fiber prepreg and epoxy resin with and without tungsten disulfide fullerene IF-WS<sub>2</sub> nanoparticles and INT-WS<sub>2</sub> nanotubes. FTIR analysis proved that there is no chemical reaction between WS<sub>2</sub> and f matrix (polymer). Physical properties and performance features were obtained by testing, WS<sub>2</sub> nanoparticles dispersion quality and impregnation quality were analyzed using Scanning Electron Microscopy (SEM/EDS). Dynamic Mechanical Thermal Analysis (DMTA) was done to study highly elastic composite behavior; tension strength, bending, interlaminar and shear strength were measured using Universal Tension Machine (UTM); as well as impact toughness that was tested using Charpy pendulum. Test results indicate that IF-WS<sub>2</sub> and INT-WS<sub>2</sub> nanoparticles have beneficial influence on mechanical features (characteristics) of composites that were modified using them. This opens application possibilities in areas where better composite features (characteristics) then current are required

**Key words:** composites, carbon fibers, epoxy resin, tungsten disulfide WS<sub>2</sub>, fullerene nanoparticles, nanotubes

**Scinetific field:** Mechanical engineering

**Specific Scinetific field:** Nanomaterials

**UDC number:** 678.686:62-419.8]:661.878(043.3)

**66.017:620.17(043.3)**

## ПРЕГЛЕД ОЗНАКА КОРИШЋЕНИХ У РАДУ

SiC	- силицијум карбид
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	- алуминијум оксид
B <sub>4</sub> C	- карбид бора
ПВБ	- поли (винил бутирал) (poli[(2-propil-1,3-dioksan-4,6-diil)methilen])
IF	- неоргански фулерен, енг. <i>Inorganic Fullerene</i> ,
INT	- неорганске вишеслојне наноцеви, енг. <i>Inorganic Nanotubes</i> ,
WS <sub>2</sub>	- волфрам дисулфид
ПАН	- поли(акрилонитрил)
КМК	- композити са керамичком матрицом, енг. <i>Ceramic Matrix Composites (CMC)</i>
ММК	- композити са металном матрицом, енг. <i>Metal Matrix Composites (MMC)</i>
ПМК	- композити са полимерном матрицом, енг. <i>Polymer Matrix Composites (PMC)</i>
ТЕМ	- трансмисиона електронска микроскопија, енг. <i>Transmission Electron Spectroscopy (TEM)</i>
ДМТА	- динамичко механичка термална анализа, енг. <i>Dynamic Mechanical Thermal Analysis (DMTA)</i>
ФТИР	- инфрацрвена спектроскопија са Фуријеовом трансформацијом, енг. <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)</i>
АТР	- смањење тоталне рефлексије, енг. <i>Attenuated Total Reflection (ATR)</i>
СЕМ	- скенирајући електронски микроскоп, енг. <i>Scanning Electron Microscope (SEM)</i>
ИР	- инфрацрвено зрачење, енг. <i>Infrared (IR)</i>
ЕДС	- енергетско дисперзивни спектрометар, енг. <i>Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)</i>
ПСА	- димензиона анализа честица, енг. <i>Particle Size Analysis (PSA)</i>
ЛВЕ	- линеарна вискоеластичност, енг. <i>Linear Viscoelastic (LVE)</i>
G'	- модул акумулиране (сачуване) енергије
G''	- модул изгубљене енергије
tg(δ)	- тангенс угла губитка
x <sub>i</sub>	- измерена вредност
n	- број епрувета
$\bar{x}$	- средња вредност мерене величине за групу епрувета
S <sub>n-1</sub>	- стандардно одступање мерене величине
CV	- коефицијент одступања мерене величине
σ	- затезна чврстоћа
ε	- деформација
E	- модул еластичности
τ	- смицајна чврстоћа
γ	- смицајна деформација
G	- модул смицања
ν	- Поасонов коефицијент
P <sub>max</sub>	- максимално оптерећење
b	- ширина епрувете
d	- дебљина епрувете
A	- површина попречног пресека епрувете
ΔL	- прираштај дужине епрувете
Δσ	- промена напона
Δε	- промена деформације
m	- нагиб криве оптерећење - деформација

## САДРЖАЈ

<b>1. УВОД</b> .....	<b>1</b>
<b>2. ТЕОРИЈСКИ ДЕО</b> .....	<b>3</b>
2.1. КОМПОЗИТНИ МАТЕРИЈАЛИ .....	3
2.1.1. ПОДЕЛА КОМПОЗИТНИХ МАТЕРИЈАЛА .....	7
2.1.2. КОМПОЗИТИ УГЉЕНИЧНО ВЛАКНО – ЕПОКСИ СМОЛА.....	11
2.1.2.1. Угљенична влакна.....	12
2.1.2.2. Епокси смола .....	13
2.1.2.3. Препрег и његова фабрикација .....	14
2.2. НАНОМАТЕРИЈАЛИ И КОМПОЗИТИ .....	16
<b>3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДЕО</b> .....	<b>19</b>
3.1. КОРИШЋЕНИ МАТЕРИЈАЛИ.....	19
3.2. ПРИПРЕМА УЗОРАКА ЗА ИСПИТИВАЊА .....	22
3.2.1. УЗОРЦИ ПРЕПРЕГА .....	22
3.2.2. УЗОРЦИ СМОЛЕ.....	23
3.2.3. УЗОРЦИ КОМПОЗИТА .....	24
3.3. КАРАКТЕРИЗАЦИЈА ПРЕПРЕГА.....	34
3.4. ПСА АНАЛИЗА РАСПОДЕЛЕ ВЕЛИЧИНЕ НАНО ЧЕСТИЦА .....	35
3.5. МАКРОСКОПСКА АНАЛИЗА.....	36
3.6. СЕМ/ЕДС АНАЛИЗА .....	37
3.7. ФТИР АНАЛИЗА .....	38
3.8. ДМТА АНАЛИЗА.....	39
3.9. ОДРЕЂИВАЊЕ СТАТИЧКИХ МЕХАНИЧКИХ ОСОБИНА.....	40
3.9.1. ИСПИТИВАЊЕ НА ЗАТЕЗАЊЕ.....	40
3.9.1.1. Испитивање смоле .....	40
3.9.1.2. Испитивање композита.....	43
3.9.2. ОДРЕЂИВАЊЕ ПОАСОНОВОГ КОЕФИЦИЈЕНТА.....	45
3.9.3. ИСПИТИВАЊЕ НА САВИЈАЊЕ.....	47
3.9.4. ИСПИТИВАЊЕ НА ИНТЕРЛАМИНАРНУ ЧВРСТОЋУ И СМИЦАЊЕ .....	48
3.9.5. ИСПИТИВАЊЕ ЕНЕРГИЈЕ УДАРА.....	49
<b>4. РЕЗУЛТАТИ, НУМЕРИЧКА АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА И ДИСКУСИЈА</b> .....	<b>50</b>
4.1. РЕЗУЛТАТИ КАРАКТЕРИЗАЦИЈЕ ПРЕПРЕГА .....	50
4.2. РЕЗУЛТАТИ ПСА АНАЛИЗЕ РАСПОДЕЛЕ ВЕЛИЧИНЕ НАНО ЧЕСТИЦА.....	50
4.3. РЕЗУЛТАТИ МАКРОСКОПСКЕ И СЕМ/ЕДС АНАЛИЗЕ .....	51
4.3.1. СЕМ СНИМЦИ НАНОЧЕСТИЦА IF-WS <sub>2</sub> И INT-WS <sub>2</sub> .....	51
4.3.2. СЕМ СНИМЦИ ПРЕПРЕГА СА IF-WS <sub>2</sub> И INT-WS <sub>2</sub> И ЕДС АНАЛИЗА .....	52
4.3.3. МАКРОСКОПСКИ И СЕМ СНИМЦИ КОМПОЗИТА СА IF-WS <sub>2</sub> И INT-WS <sub>2</sub> .....	55
4.4. РЕЗУЛТАТИ ФТИР КАРАКТЕРИЗАЦИЈЕ.....	58
4.5. РЕЗУЛТАТИ ДМТА АНАЛИЗЕ.....	60



4.6.	РЕЗУЛТАТИ СТАТИЧКИХ МЕХАНИЧКИХ ИСПИТИВАЊА .....	63
4.6.1.	<i>РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА НА ЗАТЕЗАЊЕ</i> .....	63
4.6.1.1.	Резултати испитивања смоле .....	63
4.6.1.2.	Резултати испитивања композита оријентације 0° .....	66
4.6.1.3.	Резултати испитивања композита оријентације 90° .....	70
4.6.1.4.	Резултати испитивања композита оријентације 0°/90° .....	73
4.6.1.5.	Резултати испитивања композита оријентације ±45° .....	77
4.6.2.	<i>РЕЗУЛТАТИ ОДРЕЂИВАЊА ПОАСОНОВОГ КОЕФИЦИЈЕНТА</i> .....	80
4.6.3.	<i>РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА НА САВИЈАЊЕ</i> .....	82
4.6.3.1.	Резултати испитивања композита оријентације 0° .....	82
4.6.3.2.	Резултати испитивања композита оријентације 0°/90° .....	85
4.6.3.3.	Резултати испитивања композита оријентације ±45° .....	89
4.6.4.	<i>РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА НА ИНТЕРЛАМИНАРНУ ЧВРСТОЋУ И СМИЦАЊЕ</i> .....	92
4.6.4.1.	Резултати испитивања композита оријентације 0° .....	92
4.6.4.2.	Резултати испитивања композита оријентације 0°/90° .....	96
4.6.4.3.	Резултати испитивања композита оријентације ±45° .....	99
4.6.5.	<i>РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА ЕНЕРГИЈЕ УДАРА</i> .....	103
4.6.5.1.	Резултати испитивања композита оријентације 0° .....	103
4.6.5.2.	Резултати испитивања композита оријентације 0°/90° .....	107
4.6.5.3.	Резултати испитивања композита оријентације ±45° .....	112
4.7.	НУМЕРИЧКА АНАЛИЗА ДОБИЈЕНИХ РЕЗУЛТАТА .....	117
5.	<b>ЗАКЉУЧАК</b> .....	<b>119</b>
6.	<b>ЛИТЕРАТУРА</b> .....	<b>121</b>

## **БИОГРАФИЈА**

**Изјава о ауторству**

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

**Изјава о коришћењу**

## 1. УВОД

Композитни материјали, захваљујући својим карактеристикама, успевају да испуне све строже захтеве савремених технологија у погледу издржљивости и перформанси које не могу да прате метали, легуре и керамички материјали. Посебно се по све тежим задацима издвајају ваздухопловна, војна, аутомобилска, грађевинска и наутичка индустрија, а ту је и свемирски програм те спортска опрема. Предност композита је у високој чврстоћи, крутости, тврдоћи, малој тежини, могућности израде врло сложених облика, отпорности на више температуре, антикорозивности и радарској невидљивости. Зато се користе у бројним конструкцијама замењујући метале и легуре [1-3].

У инжењерској пракси су најраспрострањенији композити са влакнима стакла, угљеника и арамида, а у далеко мањој мери са влакнима бора, силицијум карбида и алуминијум-оксида. Угљенична влакна се деле на два типа: влакна великог модула и влакна велике чврстоће. Прва имају високу вредност модула еластичности уз малу чврстоћу, а друга супротно – високу чврстоћу уз мањи модул еластичности. Матрице које се користе у овим композитима су најчешће терморективне смоле као што су епокси, фенолне или полиестарске [3-5]. Епокси смола има бројне предности: еластична је, добро приања, лако се обрађује и има добру хемијску отпорност [5, 6]. Ипак композити који су на бази епокси смоле, због њене кртости су осетљиви на ударна оптерећења као и на оптерећења на замор. Због тога се ради повећања дуктилности епокси смоле, а тиме и композита, у њу додају еластомери као што су полиуретан, термопласти или гумени модификатори који мењају њену еластичност [7-10].

Последњих година су покренута бројна истраживања и уложени велики ресурси у унапређење неких карактеристика композита као што су отпорност на старење, отпорност на пламен [6-9, 11]. Проучавани су многи пуниоци од којих се очекивало побољшање својстава епокси смоле, од стаклених и угљеничних влакана до разних микрочестица и наночестица, наноструктура и наноцеви. Обећавајући резултати су постигнути са различитим керамичким пуниоцима као што су:  $\text{SiC}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{B}_4\text{C}$ , наноглина, угљеничне наноцеви, фулерени и неорганске фулеренске наночестице и наноцеви као што је  $\text{WS}_2$  [4,12-16]. Поли(винилбутирал) (ПВБ) се због своје живавости и других добрих особина користи у ламинираним конструкцијама и другим композитима. Он је компатибилан са епокси смолама и добро приања на многе материјале. Проучаван је и доказан његов повољан утицај на еластичност и живавост композита [17-21].

Истраживање у оквиру ове дисертације испитује утицај примене малих концентрација неорганских вишеслојних фулеренских наночестица и наноцеви волфрам дисулфида  $\text{IF-WS}_2$  и  $\text{INT-WS}_2$ , унетих помоћу раствора ПВБ у ламинирани композит од карбон-епоскидног препрега у циљу побољшања механичких карактеристика композита од комерцијално доступног препрега. Ове честице су познате по изузетној термичкој, хемијској и механичкој отпорности на висок притисак и ударце као и примени у сувом подмазивању [21-28]. Хемијски су инертне и компатибилне са многим материјалима. Истраживањима су потврђена изузетна термо-механичка својства полимерних матрица, као и епоксидним и ПВБ, које су ојачане овим наночестицама, [13-15,19-21,28-34]. У овом истраживању размотрена је још једна могућност примене  $\text{IF-WS}_2$  и  $\text{INT-WS}_2$  као ојачања у систему ПВБ/епокси/карбон, практично формирајући тако нови композит.

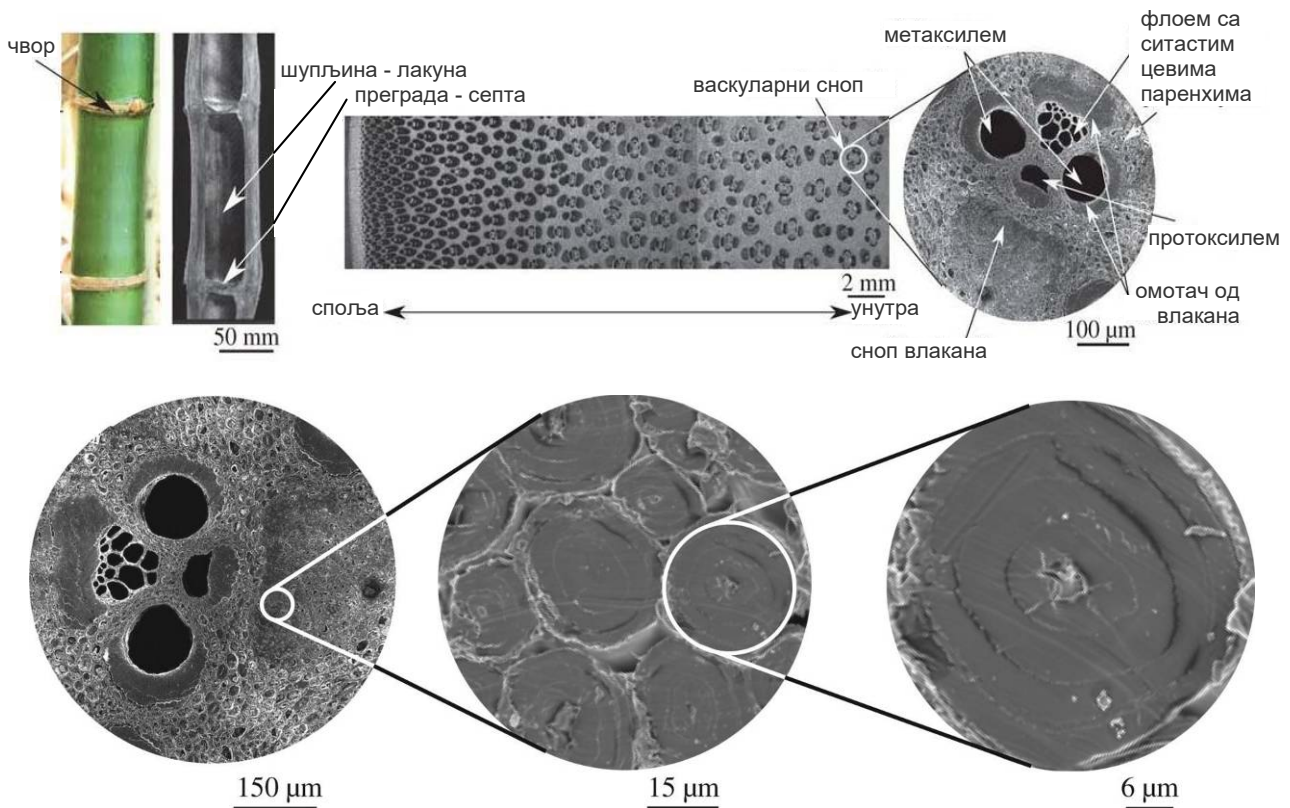
Допринос овог рада представља испитивање новог, лабораторијски обликованог композитног материјала, угљенична влакна – епокси смола – ПВБ – наноструктуре  $WS_2$ . Одређене су механичке карактеристике материјала према одговарајућим стандардима. Изведена је анализа добијених резултата, а на основу изгледа преломних површина узорка, анализиран је настанак и развој оштећења чиме су потврђени сви механизми оштећења карактеристични за овакву врсту материјала.

## 2. ТЕОРИЈСКИ ДЕО

### 2.1. КОМПОЗИТНИ МАТЕРИЈАЛИ

Композити су материјали који се састоје од више компонената које су врло различите по својим физичким особинама. Оне синтетишу материјал у којем су јасне међусобне границе компонената и чије особине зависе од њих, али су истовремено и различите. Тиме се могу задржати повољне особине компонената, а избећи недостаци. Чврстоћу и носивост композиту даје ојачање (пунилац), док матрица (везивно средство) преноси оптерећења на њега, држи ојачања на окупу у одређеној форми и штити их од спољњих утицаја.

Композитни материјали и композитне конструкције нису изум новог доба, већ се они налазе у природи као решење којим лагана конструкција преко влакана велике чврстоће подноси велике силе. Најбољи примери композитних материјала су стабљике биљака: бамбус (слика 1), дрво, лан, конопља... Они су због својих својстава вековима значајни конструкциони материјали за израду кућа, возила, бродова, авиона... У животињском свету се такође налазе примери композитних материјала у структури костију, оклопа, мишића...



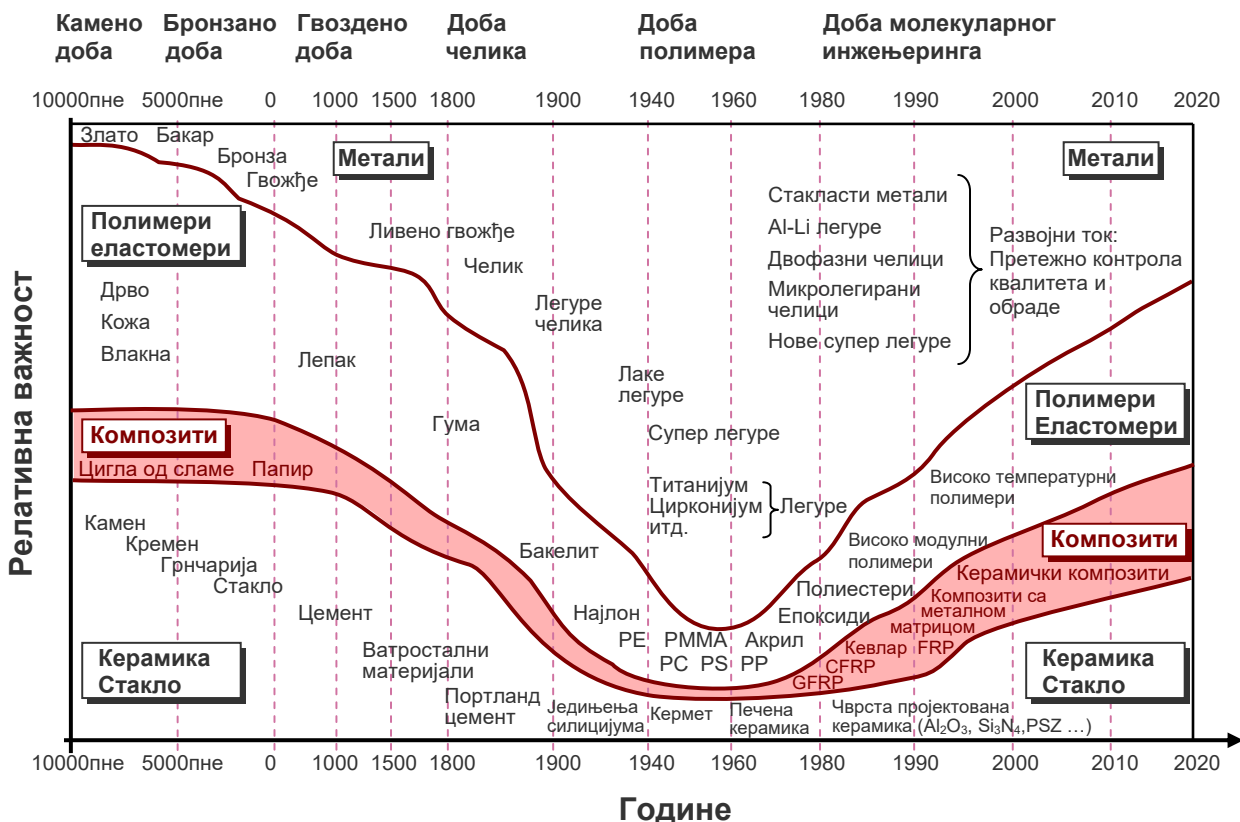
Слика 1. Структура влакна бамбуса [35]

Што се тиче композитних конструкција у природи је најбољи пример птичјег гнезда где се осим гранчица налази и трава, лишће, корење, лишјајеви, перје, паучина, измет, глина, блато који повезују главну конструкцију и повећавају јој стабилност (слика 2).



Слика 2. Птичја гнезда различитих конструкција [36]

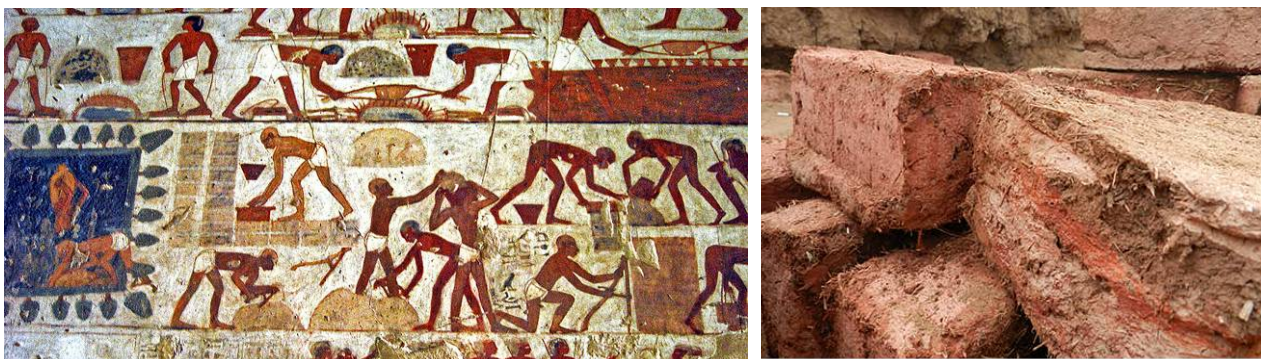
Израда и коришћење композитних материјала од стране људи сеже далеко у историју, а њихов развој је добио велико убрзање 60 година уназад. Ток развоја композита и осталих инжењерских материјала (материјала од којих су израђени технички производи и конструкције), је приказан на слици 3. Временска оса датог дијаграма је нелинеарна што најбоље илуструје брзину промена у овој области.



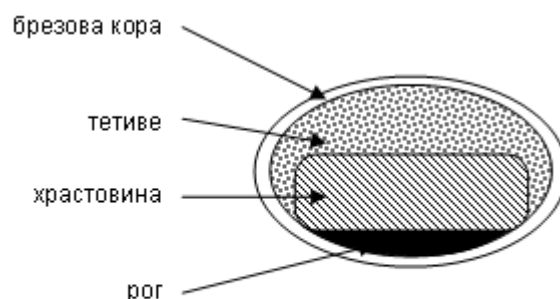
Слика 3. Еволуција инжењерских материјала кроз време [37]

Први композити које је човек направио потичу још из Месопотамије око 3400. године п.н.е. када је израђена прва шперплоча од дрвених трака које су лепљене под различитим угловима. У древној Египту 1500. године п.н.е. су за прављење цигала за градњу издржљивијих кућа помешани вода, блато и слама као ојачање (слика 4). Слама је као ојачавач коришћена и у производњи керамичког посуђа и чамаца. Осим тога у Египту је коришћен гипс ојачан са влакнима лана и папируса за израду ритуалних

посмртних маски. У Тутанкамоновој гробници (1300. година п.н.е) је пронађено 29 композитних лукова који су израђени комбинацијом дрвета, тетива и рогова, повезаних смолом и обложених брезовом кором [38](слика 5).



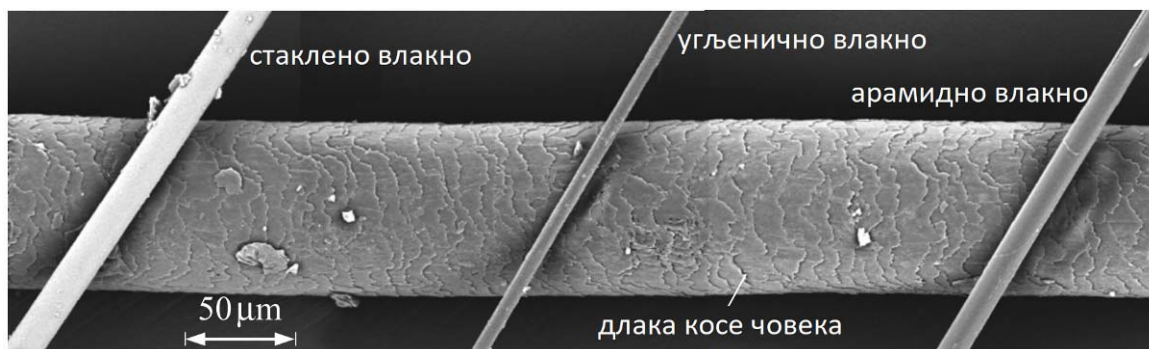
Слика 4. Приказ технике производње цигли из гробнице Рехмир [39]



Слика 5. Композитни лук из Тутанкамонове гробнице [38,40]

Папир је историјски врло значајан композит. Уместо папира од папируса и скупог свиленог папира, Цај Лун је направио 100 година п.н.е. кинески папир од влакана коре дуда, плаве сандаловине, конопље, крпа и рибарских мрежа.

Развојем полимерних материјала (винил, полистирен, фенол и полиестер) почетком 1900. године почиње ново доба композита, јер је омогућена замена природних смола у њима. У сталној потрази за још бољим материјалима 1935. године су презентована прва стаклена влакна – фиберглас. Ова влакна у комбинацији са пластичним полимером су створила невероватно јаку, а лагану структуру. Осим тога уочено је да је овај материјал радарски невидљив. Највећа примена је била у војној индустрији, ваздухопловству, а затим и у бродоградњи. Развијају се нови поступци добијања влакана, нове смоле и нова влакна. Како нови композити имају добра изолациона својства примењују се и у електротехници. За разлику од угљеничних влакана које је 1879. године Едисон користио за сијалице, а која су направљена на бази целулозе памука или бамбуса, нова карбонска влакна направљена 1958. године су на бази нафте. Имају висок модул или отпорност на затезање, али су због поступка добијања врло скупа те су нашла примену у ваздухопловству, свемирској и војној индустрији. Пет година касније је патентиран нови процес производње који је омогућио ширу примену карбонских влакана. 1965. године је добијено араמידно влакно – кевлар, (слика 6) које је и даље стандардан материјал у области балистичке заштите због своје велике затезне чврстоће, а мале тежине.



Слика 6. Упоредни приказ влакана према длаци косе [38]

Композитни материјали имају велики потенцијал у побољшању и оптимизацији њихових особина. Предности су бројне, користе се за израду производа који су јачи, трајнији и ефикаснији, те тиме исплаћују нешто више цене материјала.

Напредни композити се користе у војној, аутомобилској, наутичкој, ваздухопловној и свемирској индустрији (Space Shuttle) као и за спортску опрему. Од њих се израђују лаки а чврсти делови отпорни ка корозију и воду: шлемови и заштитни прслуци, делови летелица, делови ракета, лопатице вентилатора у моторима, ветрогенераторима, лака једра за једрилице, трупови чамаца, шасије тркачких аутомобила, тениски рекети, скије, палице за голф, штапови за пецање...

Као што је приказано на слици 7, композити чине на авионима и преко 50% коришћеног материјала. Данас се беспилотне летелице израђују скоро искључиво од композитних материјала јер они омогућују мањи број делова структуре летелице, тиме и мању масу, за израду захтевних облика, а најважније је што имају мали радарски одраз па могу да се користе у мисијама извиђања као и у борби. При изради се примењују композити карбонско влакно-епокси смола и стаклено влакно-епокси смола. Композити са стакленим влакнима су вишеструко јефтинији и делују као изолатор па се они користе у деловима где се смешта електроника и где нису потребне високе механичке перформансе. У Војнотехничком институту су развијене беспилотне летелице кратког долета - *Врабац*, која је и усвојена у наоружање, средњег долета - *Пегаз*, чије се усвајање у наоружање очекује до краја године, а у току је развој више нових летелица.



Слика 7. Упоредни дијаграм карактеристика материјала и расподела материјала на авиону Боинг 787 [41]

Недостаци композита су у њиховој крхкости, тешком откривању пукотина и оштећења, појави деламинације и одвајања слојева због апсорпције влаге, а у случају хаварије распадају се на ситне делове и лакше се пале, и што имају високу цену производње.

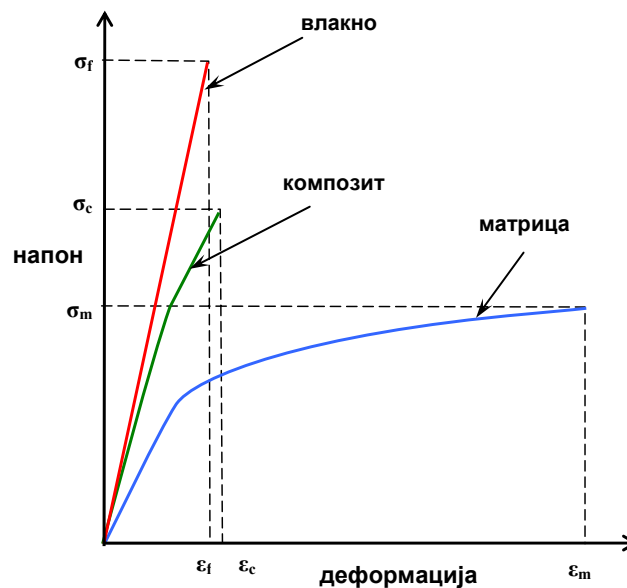
Садашња истраживања композитних материјала се крећу ка области наноматеријала, области полимера на био-бази, одрживим и еколошким процесима добијања карбонских влакана. Области примене се шире на медицину и стоматологију као и на грађевину.

### 2.1.1. ПОДЕЛА КОМПОЗИТНИХ МАТЕРИЈАЛА

Композити се састоје од више компонената које чине матрицу и ојачање (пунилац). Њиховом синтезом се добија материјал – композит, слика 8, чије су особине различите од особина улазних компонената, али које зависе од њих и тиме се могу добрим делом пројектовати. Као што је приказано на слици 9, влакна имају високу чврстоћу а малу еластичност, док матрица има малу чврстоћу и високу еластичност. Добијени композит има релативно високу чврстоћу и нешто вишу еластичност него што је имају влакна.



Слика 8. Основне компоненте композитног материјала [42]



Слика 9. Својства композитног материјала [43]

Иако је композит састављен од више компонената он се може посматрати као хомогени материјал, уколико су димензије скале према којој га посматрамо велике у односу димензије компоненти. Његове механичке особине се обично задају у границама.

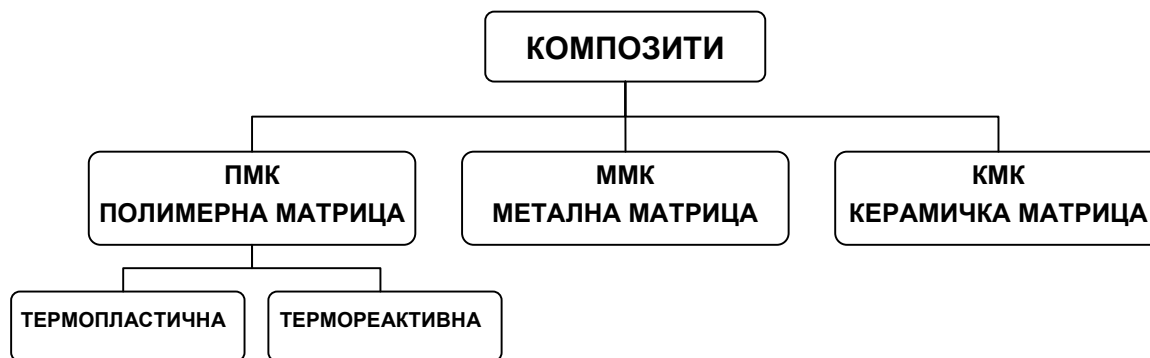
Подела композита се може извршити на више начина: према материјалу матрице, према материјалу ојачања, према облику ојачања, према распореду ојачања, поступку израде, примени ...

Улога матрице је да напрезање композита преноси и распоређује на ојачање, спречава ширење кртог лома тј. ширење прслине, штити површину ојачања од оштећења и



хемијских утицаја, раздваја ојачања у сноповима, одржава их у положају и усмерава их по правцу, даје облик композиту и штити га од атмосферских утицаја. Осим тога важна је и њихова отпорност на температуру. Примена композита у ваздухопловству захтева од матрице и отпорност на гориво, хидрауличке флуиде као и хемикалије које се користе за одржавање. Матрица је та, која је прва изложена атмосферским и хемијским утицајима околине кроз које пролази композит, па њене реакције утичу на карактеристике композита.

Основна подела композита када је у питању материјал матрице је на природне и синтетичке. Природне матрице су лигнин, скроб, желатин, колаген и оне дају класу природних и биокompозита. Синтетичке матрице могу бити керамичке (керамика, стакло, цемент, малтер, бетон), карбонске, металне (алуминијум, магнезијум, кобалт, бакар, титан, гвожђе као и легуре) и полимерне (термопластичне и термореактивне), те оне према томе дају композите: КМК – са керамичком матрицом, ММК – са металном матрицом и ПМК – са полимерном матрицом, слика 10. Термопластичне матрице се могу топити и обликовати више пута (АБС, полиетилен, полистирен и поликарбонат). Термореактивне матрице, једном очврснуте, не могу се вратити у првобитни течни облик (полиестер, винил естар, епоксид, полиуретан и фенолформалдехид).



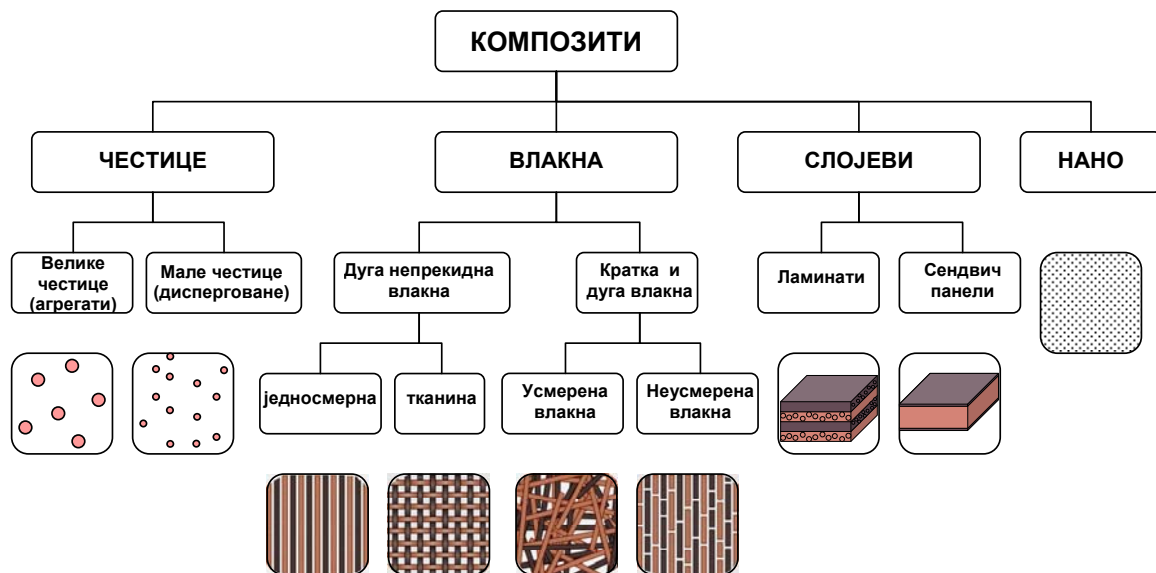
Слика 10. Подела композитних материјала према врсти матрице

Улога ојачања (пуниоца) је да побољша механичке карактеристике композита - чврстоћу, крутост, жилавост и постојаност на високим температурама, јер је он носиви елемент композита, као и да заустави ширење прслине, а у случају металне матрице да снизи густину композита.

Материјал од кога је израђено ојачање може бити природни (памук, вуна, свила, лан, јута, конопља, бамбус, дрво, минерали - азбест) или добијен технолошким поступцима (стаклена влакна, угљенична, арамидна и метална - борна влакна).

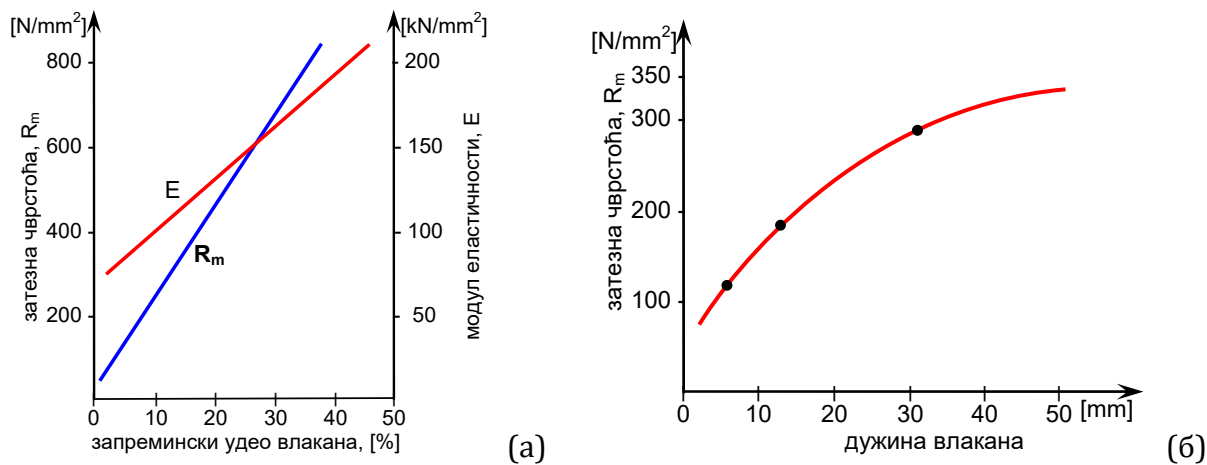
Облик – геометрија ојачања према [43] дели композите на ојачане честицама, влакнима, слојевите и нано композите, слика 11.

Честице могу бити мале (0,01  $\mu\text{m}$  до 0,1  $\mu\text{m}$  тј. 10 nm до 100 nm) и велике (0,1  $\mu\text{m}$  до 1  $\mu\text{m}$ ). Облик честица је обично сферичан, тетрагоналан, плочаст, штапићаст или неправилан, али су димензионо приближно исте у свим правцима. Честице су углавном чвршће од матрице и оне носе део оптерећења које прима композит тако што се супротстављају кретању матрице око њих зависно од јачине међусобне везе која је успостављена. Та веза се формира на атомском нивоу и, практично, она омета кретање дислокација матрице насталих под оптерећењем. Тиме се смањује пластична деформација композита а побољшавају се његове механичке карактеристике. Ови композити се зову честични композити.



Слика 11. Подела композитних материјала према облику ојачања [43]

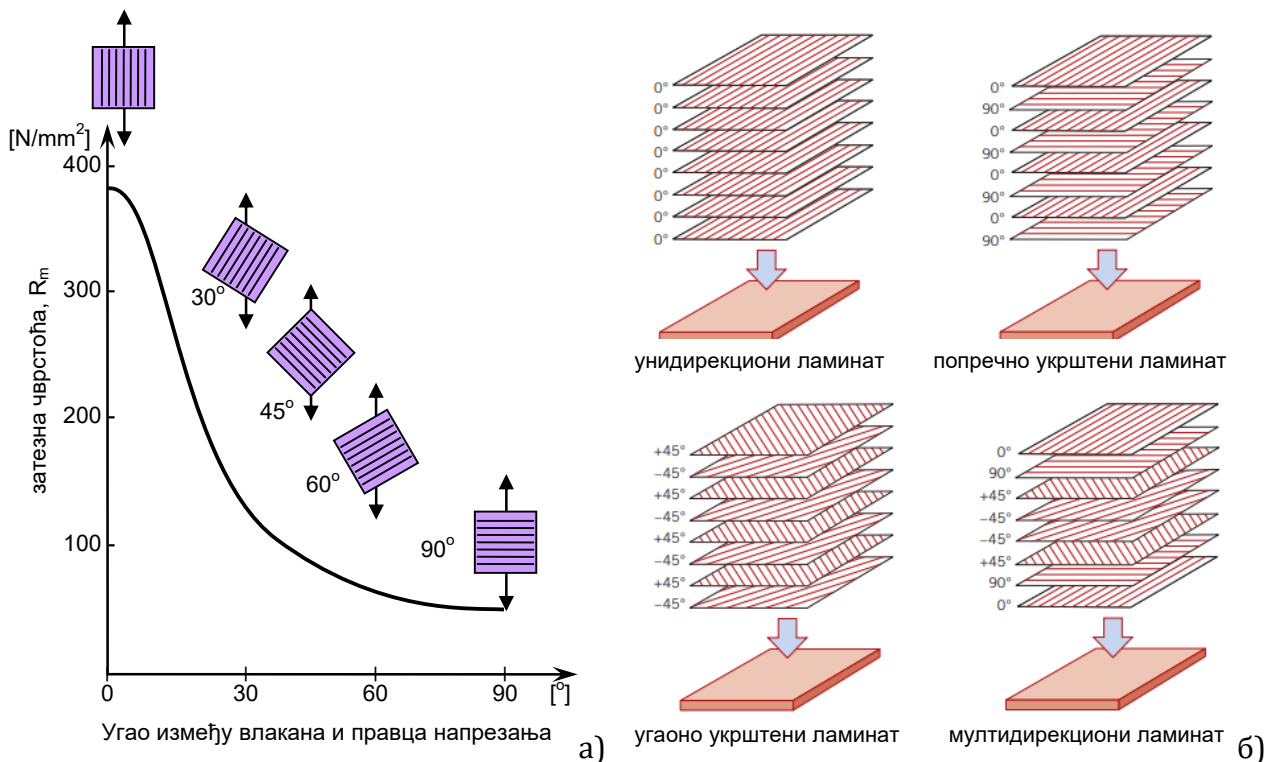
Композити ојачани влакнима су најважнији јер могу да дају високу затезну чврстоћу и крутост у односу на своју тежину. Влакна имају своју геометрију - велики однос дужине према пречнику и могу бити: дуга –непрекидна, дуга од 1-50 mm или кратка 0,1-1 mm. Непрекидна влакна су усмерена, оријентисана у одређеном правцу, док кратка влакна могу бити усмерена и насумична тј. неусмерена. Утицаји дужине влакана и њиховог масеног удела у композиту на затезну чврстоћу композита, приказани су на слици 12.



Слика 12. Утицај на својства композитног материјала: запреминског удела влакана (а) и дужине влакана (б) [44]

Влакна могу осим истог састава бити и хибридна – са додатком честица или влакана друге врсте. Могу се полагати унидирекционо, мотати кружно, ткати у 2D равни или вишеосно у 3D, испреплитати насумично и користити као сплет. За израду влакана обично се користе стакло, угљеник, бор и арамид.

Композити ојачани влакнима се могу прилагодити различитим врстама оптерећења јер, као што се види на слици 13, када су влакна положена у смеру оптерећења – ознака  $0^\circ$  добијамо изузетну чврстоћу и крутост док положај влакана попречно на правац оптерећења – ознака  $90^\circ$ , даје лоше карактеристике. Због ових карактеристика могуће је формирати композит са различитим усмерењима влакана када се тражи добра чврстоћа у два управна правца или у више правца.



Слика 13. а) Утицај оријентације влакана на својства композитног материјала , б) врсте ламината [43, 44]

Постоје две врсте стаклених влакана Е-стакло, које има добру затезну чврстоћу и модул еластичности, и S-стакло које има већу крутост и чврстоћу од Е-стакла, али је и скупље. Израђују се извлачењем растопљеног стакла.

Угљена влакна се израђују на повишеним температурама хемијским процесима и садрже 93-95% угљеника, док графитна влакна садрже 99%. Она имају велику чврстоћу и крутост, а малу густину. Цена им је знатно већа од стаклених влакана.

Борна влакна се израђују напаривањем бора на влакна волфрама. Због тога она имају велику густину, затезну чврстоћу, модул еластичности као и отпорност на високе температуре.

Арамидна влакна, кевлар, имају малу густину, али врло високу чврстоћу, крутост, отпорност на замор. Осетљива су на високе температуре и тада се њихова својства деградирају.

Слојевити - структурни композити су вишеслојни и деле се на ламинате и сендвич панеле. Њихове мехничке особине не зависе само од материјала који су у саставу композита него и од геометрије материјала. Ламинати имају више слојева који су различито оријентисани један према другоме и повезани су у целину. Сендвич панели се састоје од спољњих слојева мале дебљине, а веће чврстоће и унутрашњег слоја веће дебљине који је лаган и пружа деформацијску чврстоћу.

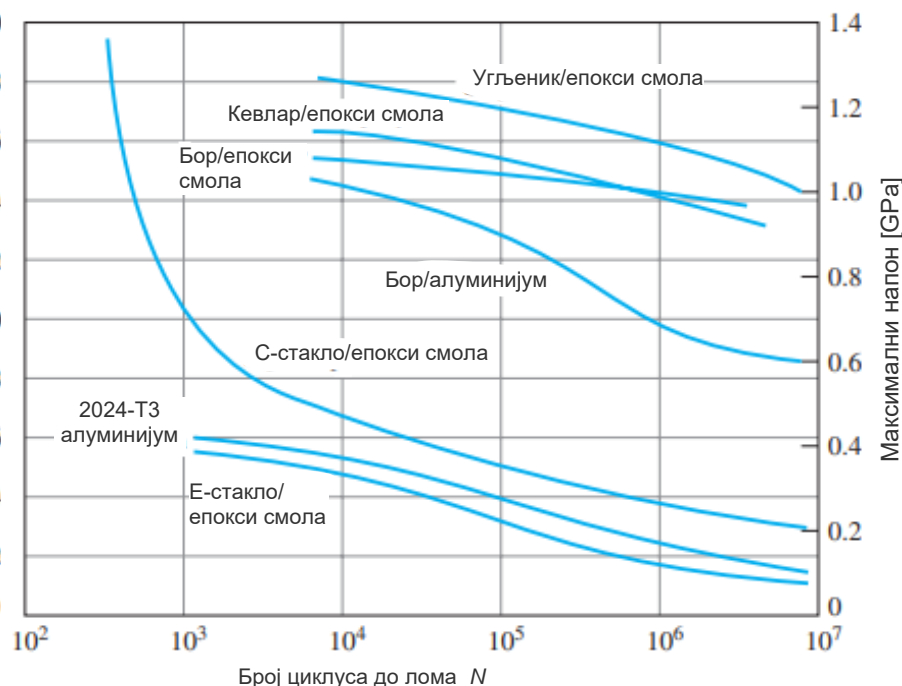
Нано композити имају у себи дисперговане честице величине мање од 100 nm. Додавање мале количине пуниоца у нано величини може приметно утицати на особине композита. Неке нано честице побољшавају електричну и топлотну проводљивост, а друге утичу на отпорност на топлоту или крутост, чврстоћу, магнетизам... Осим тога оне ограничавају померање дислокација матрице при напрезањима.

### 2.1.2. КОМПОЗИТИ УГЉЕНИЧНО ВЛАКНО – ЕПОКСИ СМОЛА

Влакна која се најчешће користе у инжењерској пракси су стакло, карбон, кевлар и бор. Што се тиче карбонских влакана, она се могу поделити на два типа: карбонска влакна великог модула, чија је карактеристика да имају изузетно велику вредност модула еластичности али малу чврстоћу, и карбонска влакна велике чврстоће, која имају мањи модул еластичности и већу чврстоћу.

Матрице које се користе су смоле на бази епокси, полиестра и полиамида. Основне предности епокси смоле су: добро приањају на влакна, смањују заостале напоне, имају добре механичке карактеристике у поређењу са осталим полимерима, термички су стабилне, чине добру баријеру у влажној средини, имају могућност примене на високим температурама. Епокси смоле имају веома добру комбинацију карактеристика које их чине погодним за употребу код напредних композита који имају примену у ваздухопловству.

Предност композита угљенично влакно - епокси смола је у високој специфичној крутости и чврстоћи, радарској невидљивости, доброј електричној проводљивости, малој тежини. Осим тога ови композити су отпорни на топлотно ширење јер се угљенично влакно скупља при загревању односно, има негативан коефицијент топлотног ширења, што у комбинацији са епокси смолом која има позитиван коефицијент даје укупни коефицијент ширења близак нули. Угљеник-епоксид и кевлар-епоксид имају боље перформансе замора (максимални напон у односу на број циклуса до отказа на собној температури) од легуре алуминијума 2024-Т3, слика 14, [45]. Због тога су погодни за примену где су присутни бројни циклуси промене као што су авијација, мостови и апликације на мору. У односу на метале ови композити су једино решење за екстремне захтеве какви се постављају у ваздухопловству, аутомобилској индустрији, наутици, мостоградњи... Осим набројаних добрих карактеристика мане су висока цена и жилавост нижа од композита са стакленим и араמידним влакнима.



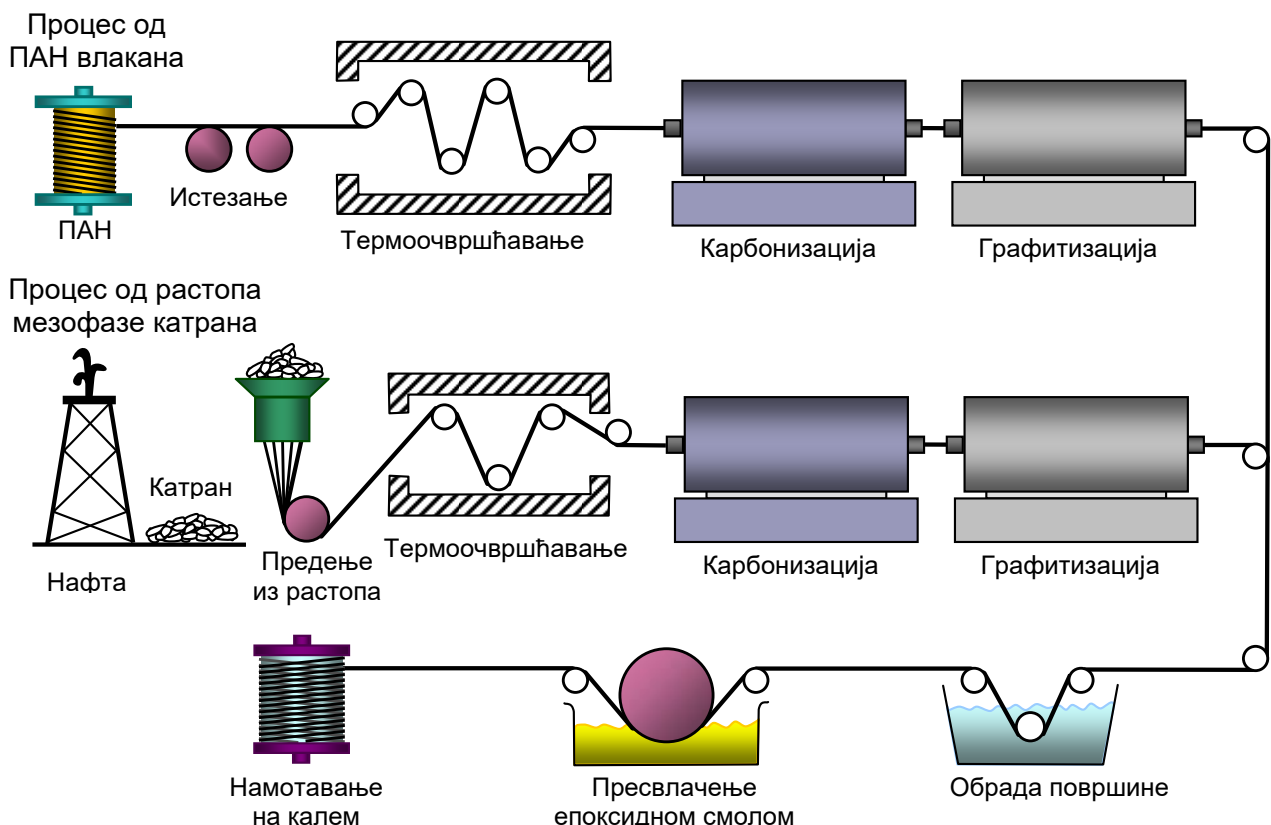
Слика 14. Упоредни дијаграм особина замора композитних материјала са легуром алуминијума [45]

### 2.1.2.1. Угљенична влакна

Постоје два основна начина за добијање угљеничних влакана, слика 15:

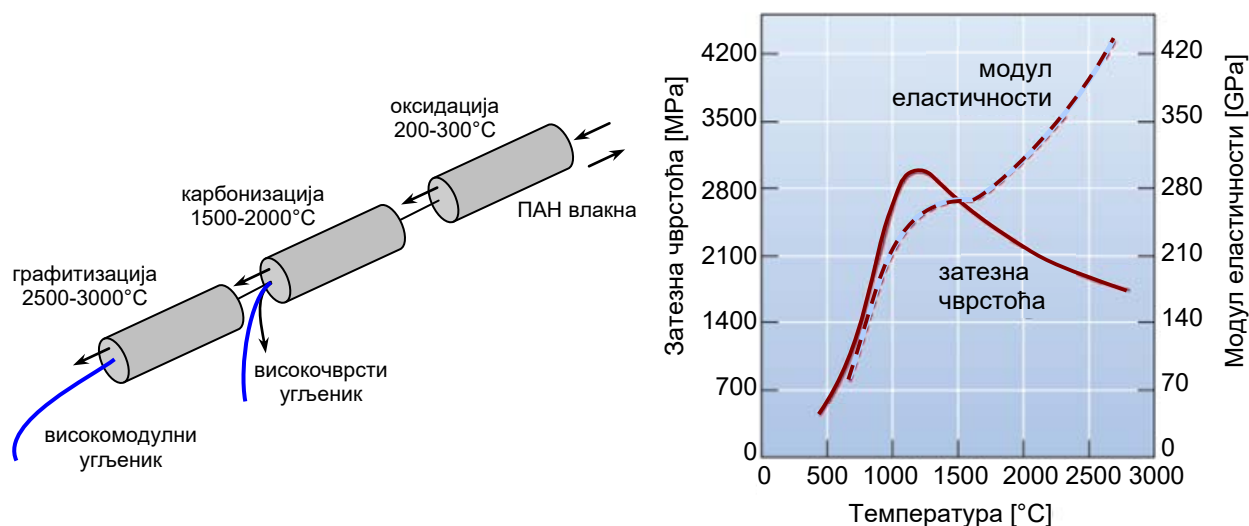
1. Угљенична влакна на бази ПАН-а поли(акрилонитрила), представљају око 90% укупне производње. Влакна се овом методом добијају помоћу перкусора ПАН влакана која се истежу те се врши њихова оксидација на  $200^{\circ}\text{C}$  до  $300^{\circ}\text{C}$ . Влакна се држе затегнута да би се макромолекулски ланци формирали и оријентисали дуж њихове осе. Затим следи карбонизација која траје неколико сати у атмосфери азота на  $1000^{\circ}\text{C}$  до  $1500^{\circ}\text{C}$ . Тим поступком се из влакана ослобађају елементи који нису угљеник (O, N, H), што доводи до смањења пречника влакана, губитка половине тежине и веће концентрације угљеника, обично до 95%. Затим следи графитизација на око  $2500^{\circ}\text{C}$ , чиме се повећава оријентисаност кристалита у правцу осе влакана.
2. Угљенична влакна на бази мезофазе катрана. Влакна се могу добити из две сировине: асфалта или битумена као производа прераде нафте и из катрана који се добија при дестилацији угља. Даљи поступак је сличан претходном, влакна се очвршћавају на  $315^{\circ}\text{C}$ , затим се карбонизују у атмосфери азота на  $1200^{\circ}\text{C}$ .

Процес производње угљеничних влакана користи огромне количине енергије и ствара велику емисију угљеника. Сам ПАН од кога се формирају влакна је високо токсичан, тако да се истражују нови начини добијања угљеничних влакана.



Слика 15. Поступци добијања угљеничних влакана [46]

Варијацијама температура карбонизације (око  $2600^{\circ}\text{C}$ ) и графитизације (око  $3000^{\circ}\text{C}$ ) могу се добити угљенична влакна високе чврстоће или високог модула или комбинација својстава, слика 16.



Слика 16. Утицај температуре термичке обраде ПАН влакана на механичка својства угљеничних влакана [46]

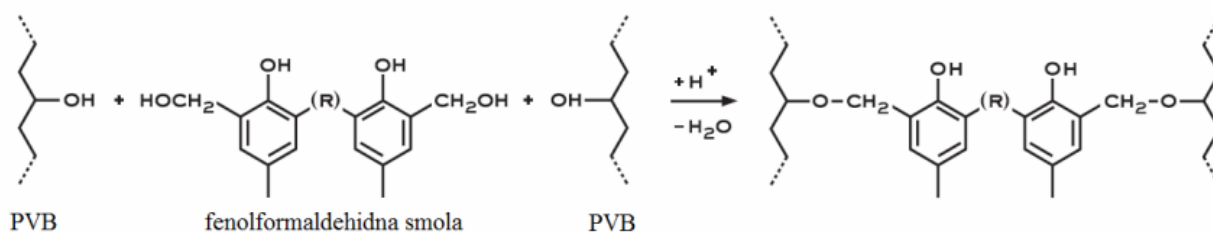
Када су формирана угљенична влакна примењује се површински третман да би се влакна заштитила од оштећења током намотавања и руковања и побољшало везивање матрице. Зависно од произвођача пречник добијених угљеничних влакана се креће од 4,8  $\mu\text{m}$  до 7  $\mu\text{m}$ . Сноп влакана може да садржи од 1000 (1К) до 200К филамената, док се у ваздухопловству користе 3К, 6К, 12К и 16К. Затим се врши димензионисање влакана по дужини: континуална влакна, сецкана, млевена, ткана у тканине, филц ... Континуална влакна се могу мотати на калеме или формирати импрегнацијом термопластичним или термореактивним полимерима у препрег, што се може урадити и са тканим влакнима.

### 2.1.2.2. Епокси смола

Епоксидне матрице су врло заступљене у композитима због: одличних механичких особина, добре стабилности димензија на повишеној температури и влази, доброг приањања (адхезије) на влакна, једноставне примене и лаке обраде и добре хемијске отпорности [5, 6]. Добијају се умрежавањем епоксида и очвршћивача под дејством топлоте у току неколико сати. Зависно од врсте могу очвршћавати на собној или на повишеној температури и тада се добијају високо умрежене структуре. Оне су осетљиве на појаву пукотина, крхке су, на ударна оптерећења као и на оптерећења на замор, нису отпорне на органске киселине и феноле, споро се полимеризују и имају релативно ниску температуру примене, те им се због тога ради побољшања модула и жилавости додају еластомери као што су полиуретан, термопластика или гумени модификатори [7-10]. Предност епоксида је што се може модификовати према захтевима, лако се производи и при производњи ослобађа мале количине штетних материја.

ПВБ, поли(винил бутирал), је термопластични еластомер, компатибилан са многим термореактивним смолама, са добром адхезијом на многе материјале. Испитан је и приказан његов повољан утицај на еластичност и жилавост композита. Познато је да додатак ПВБ у композитне системе изазива повећање дуктилности, флексибилности и жилавости. Често се користи за разне премазе, ламиниране структуре и друге композите јер се добро раствара у алкохолу, ацетону и другим растварачима и брзо се суши [17-21].

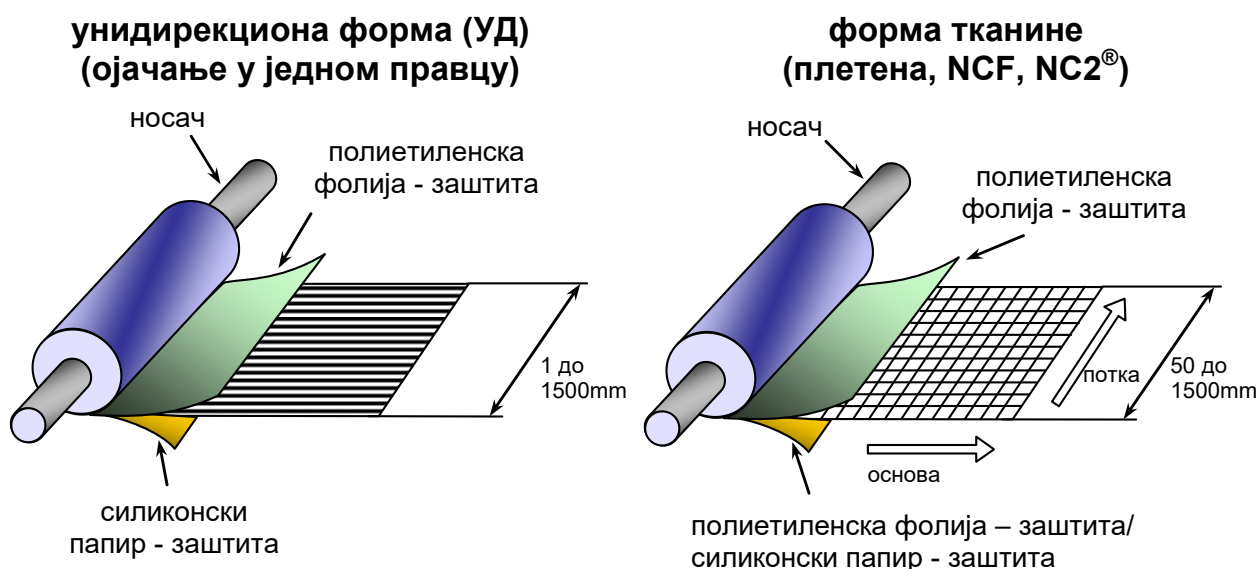
Епоксидна смола и ПВБ нису само меша јер се међу њима, под повишеним температурама, одвија хемијска реакција дата на слици 17.



Слика 17. Хемијска реакција ПVB и епоксидне смоле [47]

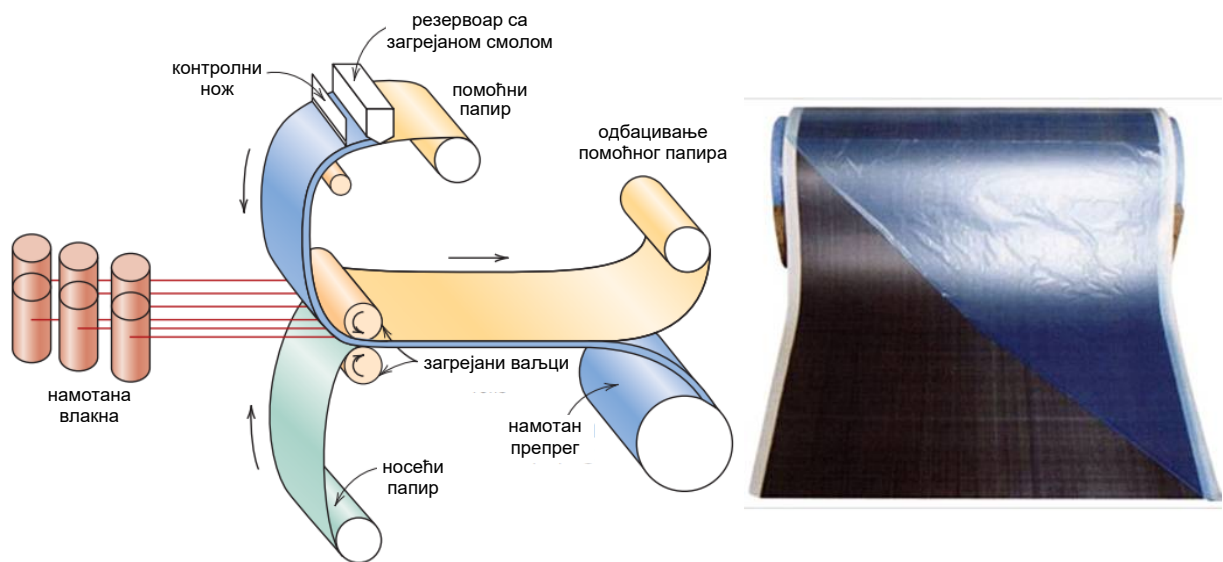
### 2.1.2.3. Препрег и његова фабрикација

Ради прецизније и једноставније израде делова од композита произведена је форма, трака влакана импрегнираних делимично полимеризованом смолом (епоксидном, фенолном) која се назива препрег. Препрег може бити од неусмерених, унидирекционо усмерених влакана (угљеничних, стаклених или араמידних) као и тканина од њих, слика 18. Једносмерни (УД) препрег је онај у коме је 90% влакана у једном правцу. Он може да садржи и друга влакна која имају улогу да примарна влакна држе у структурном положају.



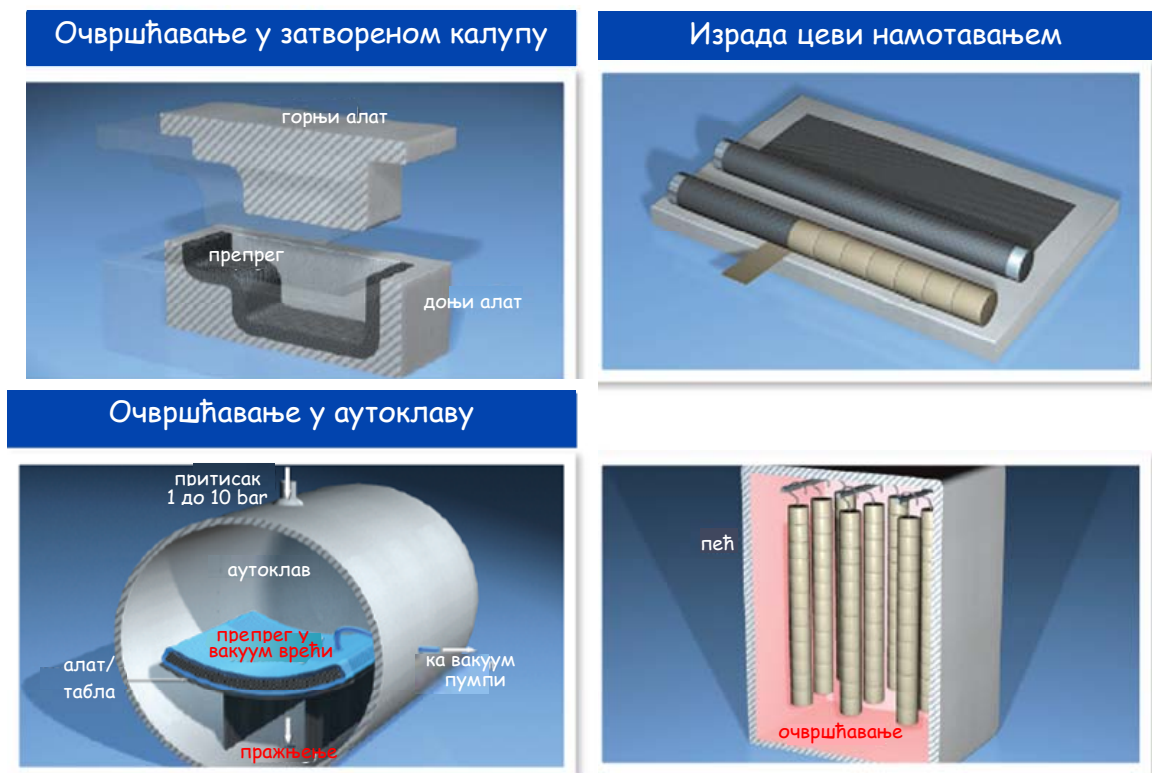
Слика 18. Врсте препрега [48]

Континуална влакна која су намотана на калемове се облажу танким слојем смоле која је делимично полимеризована. Посебан алат као нож шири врућу смолу у филм који добро импрегнира влакна. Формира се трака поравнатих влакана која је одређене ширине и дебљине која се затим облаже, провлачењем између ваљака пластичном фолијом и импрегнираним папиром, слика 19. Ширине препрега су од 25 mm до 1525 mm, а дебљине од 0,1 mm до 0,4 mm. Садржај смоле је обично 35% до 45% запремине. Влакна могу бити постављена уздужно, 0° (дуж ролне) и попречно, под углом од 90° у односу на дужину ролне. Тако формиран препрег се намотава у тубе које се морају чувати на ниским температурама да не би дошло до даље полимеризације смоле, али и под тим условима постоји рок трајања препрега. За препрег са епоксидном смолом тај рок је 6 месеци на -18°C, а на собној температури свега 14 дана.



Слика 19. Поступак добијања препрега [43]

Уз препрег се добија упутство за циклус умрежавања смоле, профил температура – време са потребним притиском за формирање композита. Поступак добијања композита се одвија полагањем трака препрега у калуп, после уклањања заштитних фолија, у више слојева до жељене дебљине, без додавања нове смоле. Траке препрега се могу полагати једносмерно или попречно или угаоно укрштено (слика 13.б). Очвршћавање композита се постиже врућим пресовањем препрега по задатој процедури. Поступак се може извести у термо пресима, аутоклавима и вакуум врећама, слика 20.



Слика 20. Поступци фабрикации композита [48]

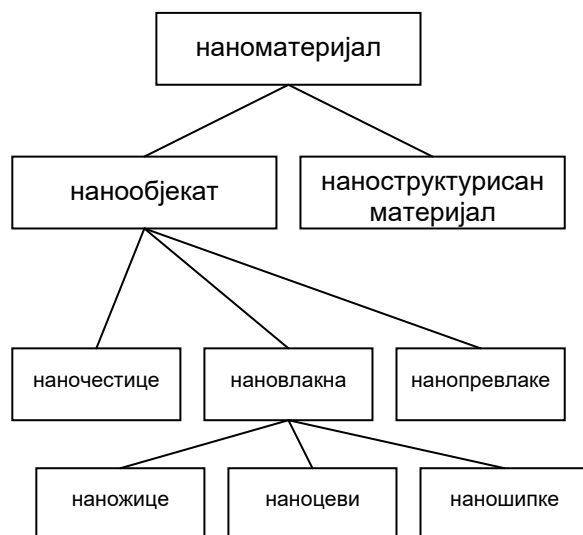


Сечење и полагање трака препрега може бити ручно или делимично аутоматизовано (машинско намотавање и убризгавање) чиме се смањују трошкови производње композита [49].

Значајан број конструкција и ваздухоплова је изложен дејству различитих динамичких оптерећења на основу којих се, према доминантним вредностима оптерећења, дефинишу шеме слагања препрега ради постизања захтеване крутости и чврстоће структуралних елемената, уз истовремено значајно смањену масу композитне конструкције. Када се посматра макроскопски овако добијен композитни материјал, иако је ортотропан он је хомоген. Микроскопским приступом слојеви се састоје од влакана и матрице те нису хомогени. Води се рачуна да у сваком слоју максимална деформација не пређе дозвољену вредност, да слојеви буду симетрични тј. баласирани, како би се код овако добијених композита спречила деламинација. Уколико се деси отказ – лом једног слоја не значи да ће се он проширити на цео ламинат, али такву ситуацију треба избегавати јер се не може предвидети даље понашање ламината.

## 2.2. НАНОМАТЕРИЈАЛИ И КОМПОЗИТИ

Наноматеријали су по дефиницији материјали који имају пречник честица, величину зрна, дебљину слоја, мање од 100 nm или унутрашњу или површинску структуру са нано својствима и слично, [45]. Овај термин обухвата и нанообјекте и наноструктурисане материјале тј. материјале који се састоје од различитих саставних делова од којих је макар један у нано димензијама: нанокompозит, нанопорозни материјал, течна нанодисперзија и чврста нанопена, слика 21. Нанокompозит је материјал који је мешавина два или више материјала од којих је бар један у нанофази. Према [50] приликом припреме ISO дефиниција установљено је да материјал не мора припадати стриктно једној категорији материјала већ може бити мешавина као што су нанокompозити, који имају као један од саставних делова наноматеријал.

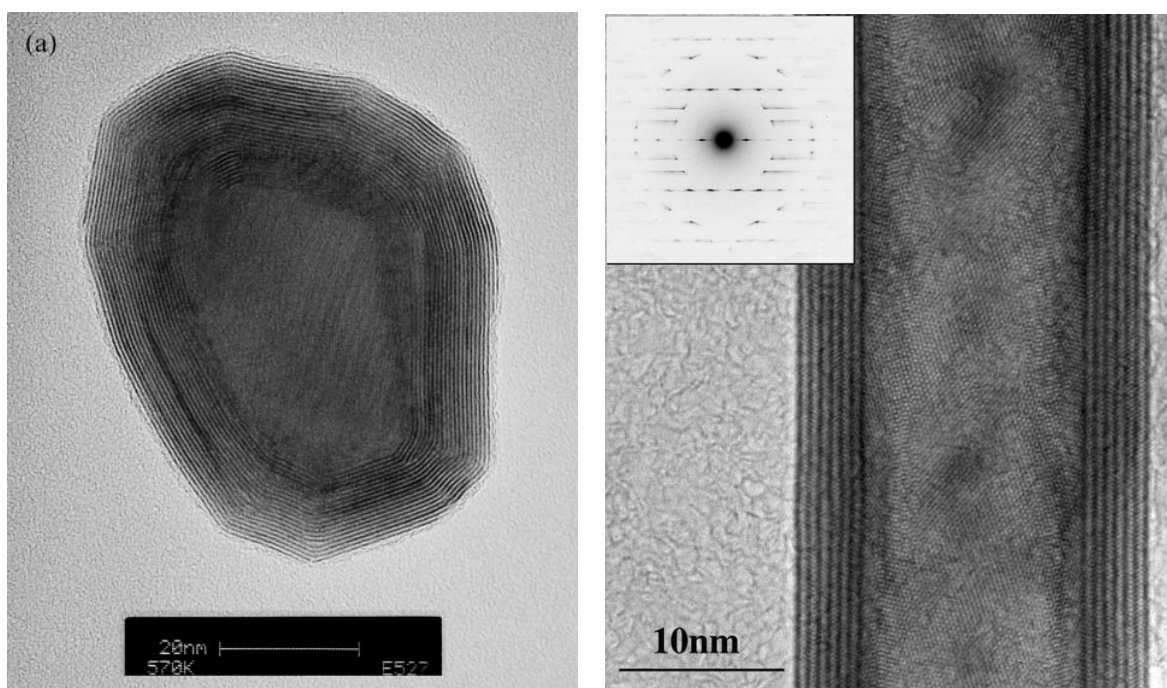


Слика 21 Хијерархија речи и израза о наноматеријалима [50]

Нанокompозити су најчешће материјали код којих су честице нано величине уграђене у матрицу у малим концентрацијама. Највећи изазов у примени наночестица је њихово равномерно и хомогено дисперговање у матрици јер су склони агломерацији.

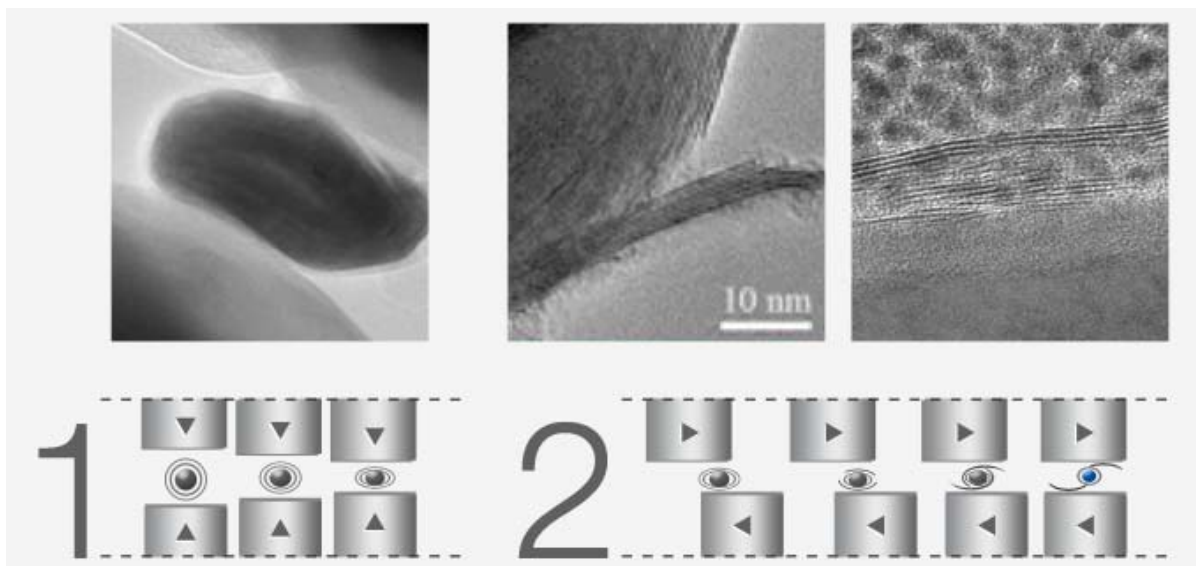
Проучавани су многи пуниоци од којих се очекивало побољшање својстава епокси смоле, од влакана стакла и угљеника до разних микрочестица и наночестица, наноструктура и наноцеви. Обећавајући резултати су постигнути са различитим керамичким пуниоцима као што су: SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и B<sub>4</sub>C, наноглина, угљеничне наноцеви, фулерени и неорганске фулеренске наночестице и наноцеви као што је WS<sub>2</sub> [4,12-16].

Неорганске вишеслојне фулеренске наночестице и наноцеви волфрам дисулфида IF-WS<sub>2</sub> и INT-WS<sub>2</sub> честице, слика 22, су познате по изузетној термичкој (-270°C до +450°C), хемијској и механичкој отпорности на висок притисак и ударце, на велике брзине ротације, отпорности на зрачење и корозију, као и сувом подмазивању - трење и хабање [21-28]. Хемијски су инертне и компатибилне са многим материјалима. Због јединствене морфологије фулеренских наночестица волфрам дисулфида IF-WS<sub>2</sub> и наноцеви волфрам дисулфида INT-WS<sub>2</sub> са сферичном затвореном и отвореном структуром оне су веома еластичне. Истраживањима су потврђена изузетна термо-механичка својства полимерних матрица, као и епоксидним и ПВБ, које су ојачане овим наночестицама [13-15,19-21,28-34, 51].



Слика 22. ТЕМ слике структура наночестица IF-WS<sub>2</sub> и INT-WS<sub>2</sub> [52]

Ове честице садрже од 20 до 100 концентрично распоређених слојева. Под екстремним притиском и кретањем- трењем спољни слојеви IF-WS<sub>2</sub> се љуспају као слојеви главице лука, те тада ослобађају трибофилмове који се везују за радне површине, слика 23. На тај начин оне стално обнављају радне површине.



Слика 23. Понашање IF-WS<sub>2</sub> под притиском (1) и притиском и кретањем (2) [53]

Осим овог механизма кретања постоје још клизање и котрљање наночестица које се одвијају при мањим притисцима [54].

### 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДЕО

У овој дисертацији су истраживани нови композитни материјали, настали удруженим дејством ојачавања волфрам дисулфидних наноструктура са поли(винил бутиралом), ПВБ, на комерцијални препрег угљенично влакно – епокси смола. Истраживање је спроведено у циљу превазилажења проблема кртог лома и побољшања термомеханичке отпорности, жилавости и затезне чврстоће, чврстоће савијања и смицања. Претходним истраживањима је одређен оптимални растварач за ПВБ, изабрана је техника деагломерације и дисперзије наночестица IF-WS<sub>2</sub> и INT-WS<sub>2</sub>, испитана је компатибилност свих компонената [20]. Изабрани растварач је етанол јер је испарљив, јефтин и неће оштетити епоксидну смолу препрега а лако ће растворити ПВБ.

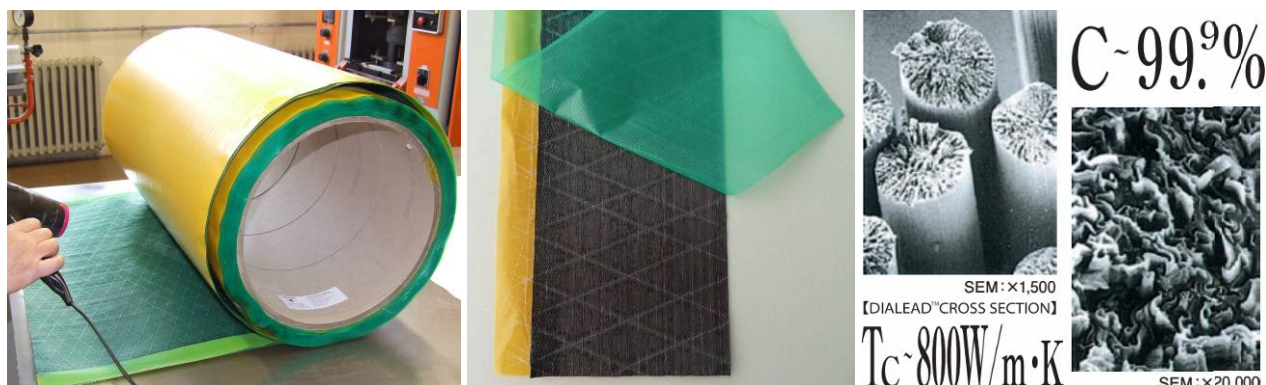
Прво су израђени узорци на бази епокси смоле и ПВБ и то: без наночестица, са наночестицама IF-WS<sub>2</sub> (концентрације 1mas.%) и са наноцевима INT-WS<sub>2</sub> (концентрације 0,3mas.%). Затим су израђени узорци од нивоа танког филма ПВБ са и без наночестица, дебљих фолија од епоксидне смоле и ПВБ са и без наночестица до ламинарних структура различитих дебљина од више слојева угљеничног унидирекционог препрега техником врућег пресовања у калупу, на које је наносен ПВБ раствор без WS<sub>2</sub>, као и ПВБ раствор са IF-WS<sub>2</sub> и са INT-WS<sub>2</sub> за структурну анализу и механичка испитивања. Добијени узорци су исечени у епрувете у складу са стандардима: ASTM D3039/D3039M-17 *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials* – затезање, ASTM D7264/D7264M-21 *Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials* и ASTM D790-17 *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials* – савијање, ASTM D2344/D2344M-22 *Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates* – интерламинарно смицање, ASTM D256-10 *Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics* и ASTM D6110-18 *Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics* – енергија удара и ASTM D3518/D3518M-18 *Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a ±45° Laminate* - смицање [55-62].

#### 3.1. КОРИШЋЕНИ МАТЕРИЈАЛИ

За израду узорака смола и композита коришћене су следеће сировине и материјали:

- препрег угљенична влакна – епокси матрица са једносмерном оријентацијом *Ultra-high-modulus Carbon fiber/Epoxy UD prepreg areal density 450 g/m<sup>2</sup>, non-crimp fabric, Dialead K63712 (HAUFLER)*, слика 24,
- волфрам дисулфид као фулеренске наночестице IF-WS<sub>2</sub> са декларисаним просечним пречником 40-100 nm, слика 25.а), и наноцеви INT-WS<sub>2</sub> са декларисаном спољном пречником наноцеви 80-100 nm и дужине 10-20 μm (*NanoLub™, ApNano Materials Inc., Israel*), слика 25.б),
- поливинилбутирал у праху *Mowital B45H (Kuraray, GMBH)*, слика 25.в),
- епокси смола *Epicote™ Resin MGS<sup>R</sup> LR 385*, аеро типа, компонента А, са својим учвршћивачем *Epicure™ CuringAgent MGS<sup>R</sup> LH 385* компонента Б (*HEXION*),
- етанол 96% (*Зорка, Шабац*),

- стаклена тканина *Fiberglass woven roving EWR300C-125 (JUSHI GROUP CO LTD)*
- епокси смола *Epon™ Resin 828* компонента А, са својим учвршћивачем компонента Б *Episure Curing Agent 3140, (HEXION)*,
- епокси лепак *Araldite<sup>R</sup> AW 106* компонента А, са својим учвршћивачем компонента Б *Hardener HV 953U (HUNTSMAN)*,
- ацетон (*БЕТАНЕМ доо, Београд*).



Слика 24. Препрег Carbon fiber/Епоxy UD prepreg 450 g/m<sup>2</sup>, HAUFLER и изглед влакна Dialead K63712 [63]

Подаци о коришћеним сировинама дати су у табелама 1-6.1.

Табела 1. Карактеристике препрега Carbon fiber/Епоxy UD 450 g/m<sup>2</sup>, HAUFLER [64]

Тежина препрега, [g/m <sup>2</sup> ]	688
Дебљина слоја, [mm]	0,5
Ширина препрега, [cm]	63,5
Влакна	Dialead K63712
Маса влакана, [g/m <sup>2</sup> ]	450
Модул еластичности влакна, [GPa]	640
Затезна чврстоћа влакна, [MPa]	2600
Издужење влакна, [%]	0,4
Модул еластичности препрега 0°, [GPa]	370
Затезна чврстоћа препрега 0°, [MPa]	1500
Модул еластичности препрега 90°, [GPa]	5,5
Затезна чврстоћа препрега 90°, [MPa]	35
Импрегнација	Harzsystem CP003
Садржај смоле, [mas.%]	36
Минимална вискозност смоле, [mPa·s]	325
Температура умрежавања, [°C]	125
Тип ткања	Унидирекциони, неткани ПЕС потпорна влакна
складиштење	45 дана на 20°C 12 месеци на -18°C
фабрикација	1h загревање 20-120°C 2h на 120°C 0,5h хлађење 120-20°C притисак 3bar



Слика 25. Узорци: а) ПББ, б) IF-WS<sub>2</sub> и в) INT-WS<sub>2</sub>

Табела 2. Карактеристике наночестица IF-WS<sub>2</sub> (NanoLub™, ApNano Materials Inc.)

Чистоћа, %	> 99,0
Честична густина на 25°C, [g/cm <sup>3</sup> ]	7,5
Привидна густина, [g/cm <sup>3</sup> ]	0,7 – 1,1
Моларна маса, [g/mol]	247,98
Типична величина честица, [nm]	40 - 300
Температура декомпозиције, [°C]	1250
Оксидациона стабилност у ваздуху, [°C]	>350
Оксидациона стабилност у инерту, [°C]	>1000

Табела 3. Карактеристике наноцеви INT-WS<sub>2</sub> (NanoLub™, ApNano Materials Inc.)

Чистоћа, [%]	> 99,0
Честична густина на 25°C, [g/cm <sup>3</sup> ]	7
Привидна густина, [g/cm <sup>3</sup> ]	1,7-3,5
Моларна маса, [g/mol]	247,98
Спољашњи пречник наноцеви, [nm]	80-100
Дужина наноцеви, [µm]	10-20
Оксидациона стабилност у ваздуху, [°C]	>350
Оксидациона стабилност у инерту, [°C]	>1000
Отпорност на ударни талас, [GPa]	>21
Максимално издужење, [%]	14
Јунгов модул еластичности, [GPa]	170

Табела 4. Карактеристике ПББ Mowital B45H (Kuraray, GMBH) [65]

Чистоћа, %	≥ 97,5
Специфична густина, [g/cm <sup>3</sup> ]	0,24
Средња моларна маса, [g/mol]	35000 – 45000
Апсорпција воде (на 20°C у току 24h), [mas.%]	4 – 6
Температура остакљивања, [°C]	69
Температура омекшавања, [°C]	60-65
Садржај поливинил алкохола, [mas.%]	18-21
Садржај поливинил ацетата, [mas.%]	1-4
Динамичка вискозност 10% раствора у 95% етанолу на 20°C, [mPa·s]	60-90

Табела 5. Карактеристике епокси система Epicote™ Resin MGS<sup>R</sup> LR 385+ LH 385 [66]

Специфична густина (на 25°C), [g/cm <sup>3</sup> ]	1,16 – 1,20
Вискозност (на 25°C), [mPa·s]	700 – 1050
Индекс рефракције (на 25°C)	1,535 – 1,545
Затезна чврстоћа, [МПа]	75 – 85
Модул еластичности препрега, [Гра]	3,3 – 3,6
Издужење, [%]	6 – 8
Фабрикација - делови масени 100:35 (75%+25%)	24h на 23°C 15h на 60°C

Табела 6. Карактеристике епокси система Epon™ Resin 828 + Epicure 3140 [67]

Специфична густина (на 25°C), [g/cm <sup>3</sup> ]	1,6
Вискозност (на 25°C), [mPa·s]	72
Фабрикација - делови масени 4,18:1 (75%+25%)	10h на 25°C додир 48h на 25°C за тест 1,5h на 60°C за тест

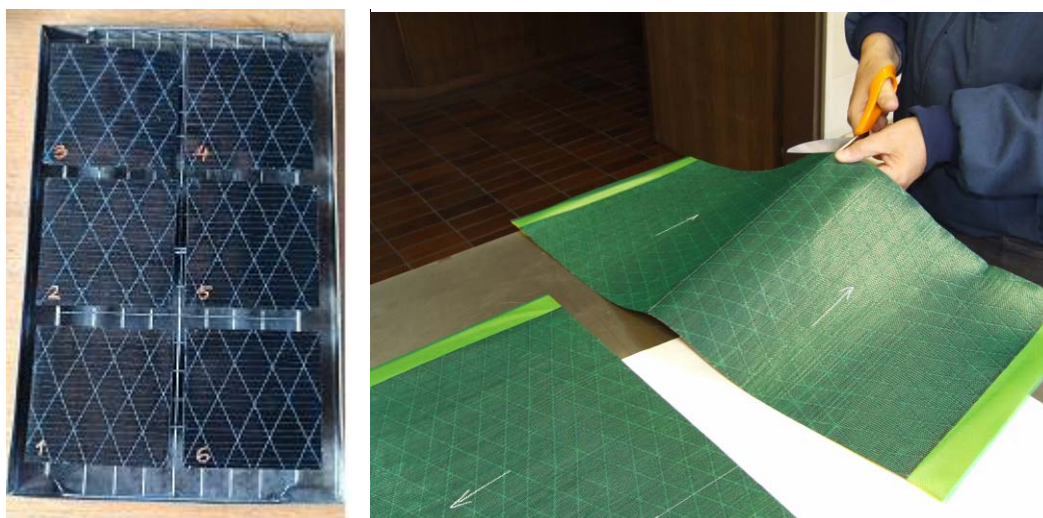
Табела 6.1 Карактеристике епокси Araldite<sup>R</sup> AW 106+Hardener HV 953U [68]

Специфична густина (на 25°C), [g/cm <sup>3</sup> ]	1,05
Вискозност (на 25°C), [mPa·s]	30-45
Фабрикација делови масени 100:80 (55%+45%)	7h на 23°C додир 10h на 23°C за тест 3h на 40°C за тест

## 3.2. ПРИПРЕМА УЗОРАКА ЗА ИСПИТИВАЊА

### 3.2.1. УЗОРЦИ ПРЕПРЕГА

Да би се провериле карактеристике препрега угљенично влакно – епокси смола, дате од стране произвођача (*HAUFLER*) према стандардима ASTM D2584, ASTM D2734 и ASTM D3171 [70-72] израђени су узорци препрега, 6 узорака, димензија 100 mm x 100 mm, слика 26.



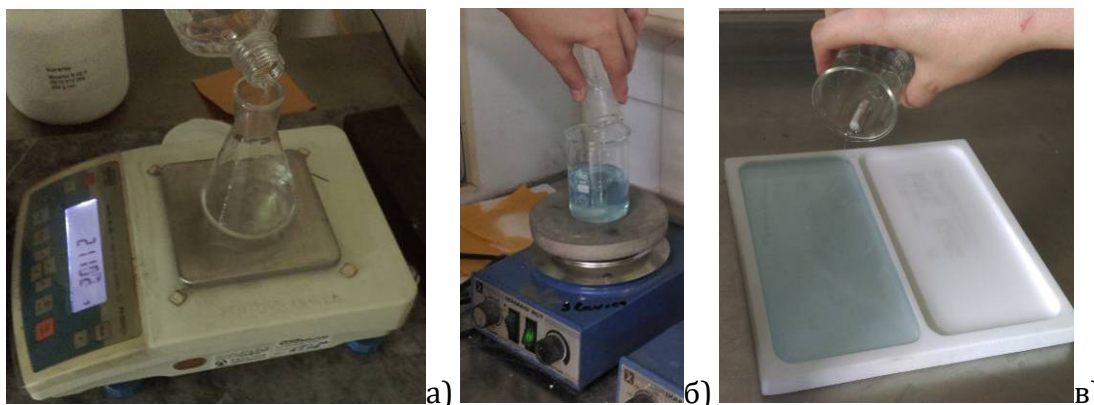
Слика 26. Израда узорака препрега

### 3.2.2. УЗОРЦИ СМОЛЕ

Ради испитивања утицаја наночестица на матрицу композита израђени су узорци на бази епокси смоле аеро типа *Epicote™ Resin MGS<sup>R</sup> LR 385* са учвршћивачем *Epicure™ CuringAgent MGS<sup>R</sup> LH 385* и ПВБ у праху *Mowital B45H*:

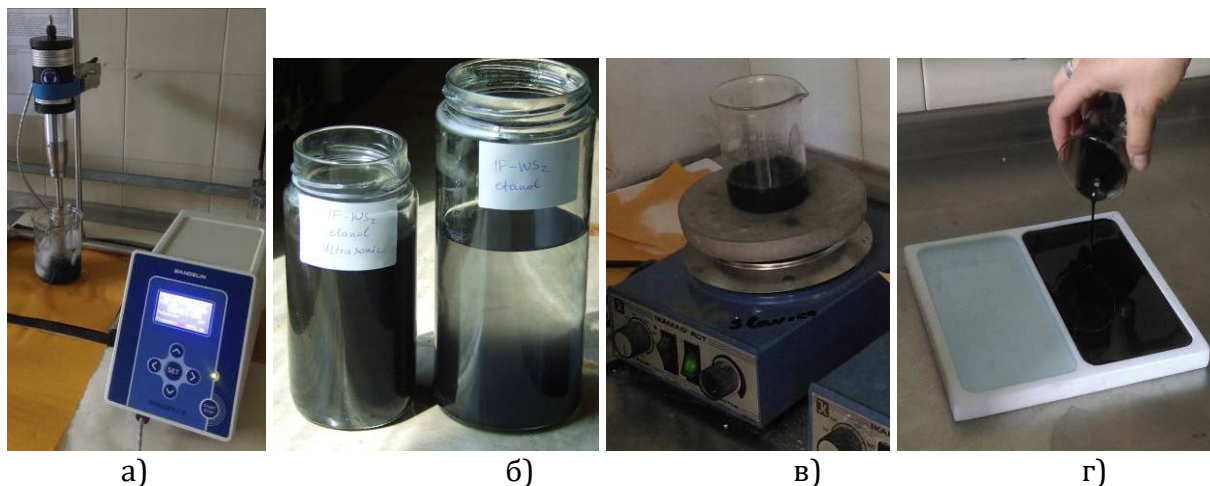
- без наночестица,
- са наночестицама IF-WS<sub>2</sub> у концентрацији 1 мас. % на масу полимера и
- са наноцевима INT-WS<sub>2</sub> у концентрацији 0,3 мас. % на масу полимера.

Полимер без наночестица је добијен мешањем ПВБ у праху са етанолом, слика 27.а), и епокси смоле аеро типа са учвршћивачем, према прорачунатим концентрацијама, на магнетној мешалици ради хомогенизације смеше, слика 27.б). Узорци су израђени изливањем из растварача, тзв. *solvent-casting* техником, у тefлонске таве на собној температури, слика 27.в).



Слика 27. Израда узорака чврсте смоле без наночестица

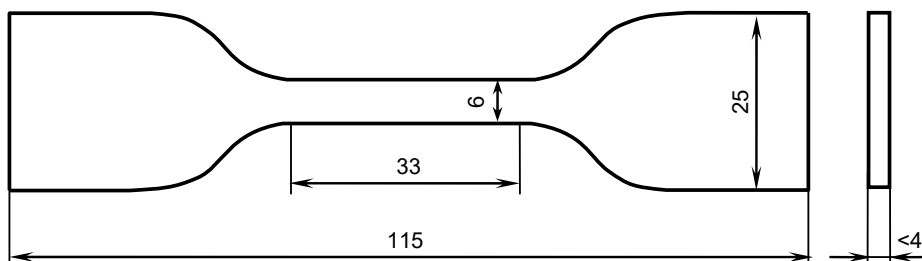
Наночестице IF-WS<sub>2</sub> и INT-WS<sub>2</sub> су ултразвучно дисперговане и деагломерисане у етанолу помоћу ултразвучне сонде *Badelin SonoPuls* на 50 W, без пулсација, фреквенција 20 kHz током 30 min, у леденом купатилу да би се спречило прегревање, слика 28.а). На слици 28.б) су приказане посуде са наночестицама у етанолу пре и после ултразвучне деагломерације. Након тога је посуда у којој се налазио етанол са волфрам дисулфидом премештена на магнетну мешалицу и током мешања је постепено додата одговарајућа количина ПВБ у праху, а затим је додата и епокси смола са учвршћивачем, слика 28.в). Добијене хомогенизоване смеше са и без наноструктура WS<sub>2</sub> су изливане у тefлонске таве, слика 28.г).



Слика 28. Израда узорака чврсте смоле са наночестицама



Након испаравања растварача таве су остављене у вакуум сушници на 300 mbar на собној температури 24 сата, а потом у пећи пола сата на 120°C и даље 7,5 сати на 80°C где се на повишеној температури одиграва реакција умрежавања епокси смоле са ПВБ. Према одговарајућем ASTM D638-22 *Standard test method for tensile properties of plastics* стандарду за затезање [74], слика 29, након очвршћавања композита исечено је по 7 епрувета, слика 30.



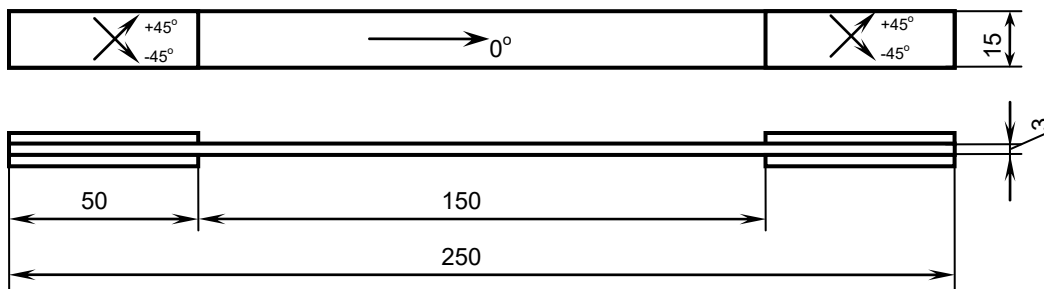
Слика 29. Епрувета чврсте смоле за испитивање на затезање према стандарду [74] тип IV<sup>B</sup>



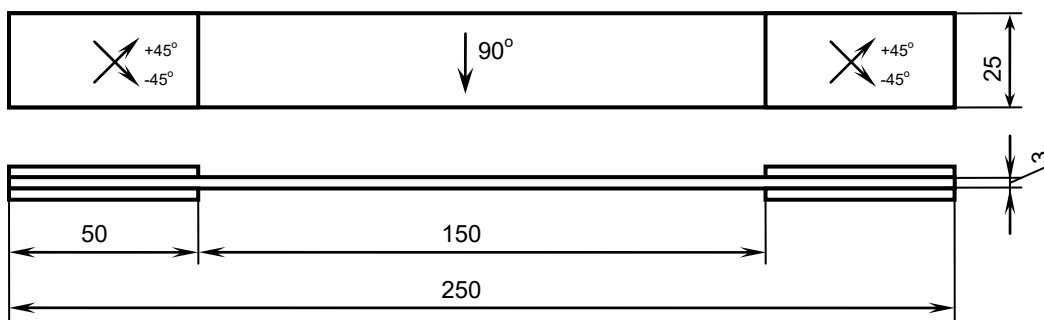
Слика 30. Израда епрувета чврсте смоле са и без наночестица

### 3.2.3. УЗОРЦИ КОМПОЗИТА

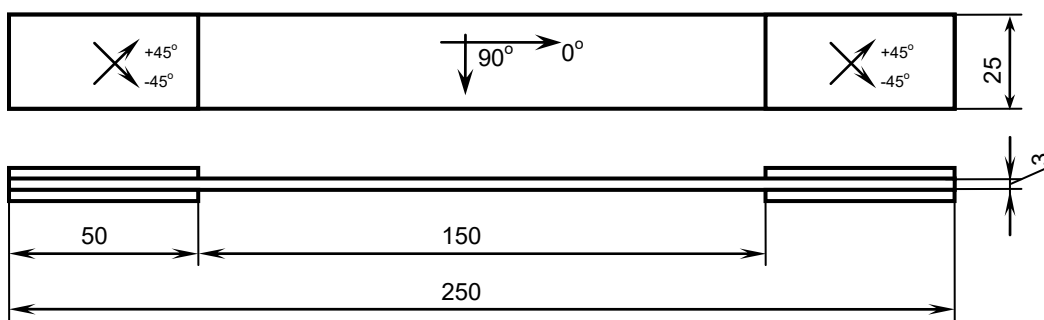
Пре израде узорака од композита приступило се брижљивом планирању целог процеса. Према постојећим стандардима за испитивање механичких карактеристика композита одређене су врсте, димензије и број епрувета. Оријентација нити унидирекционог карбонског препрега у стандардизованим узорцима је 0° (уздужна), 90° (попречна), 0°/90° (попречно укрштена) и ±45° (угаоно укрштена), што је дефинисано одговарајућим ASTM стандардима [55-62], слике 31-39.



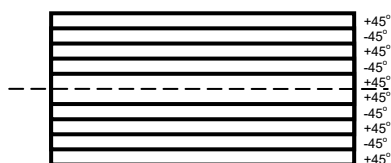
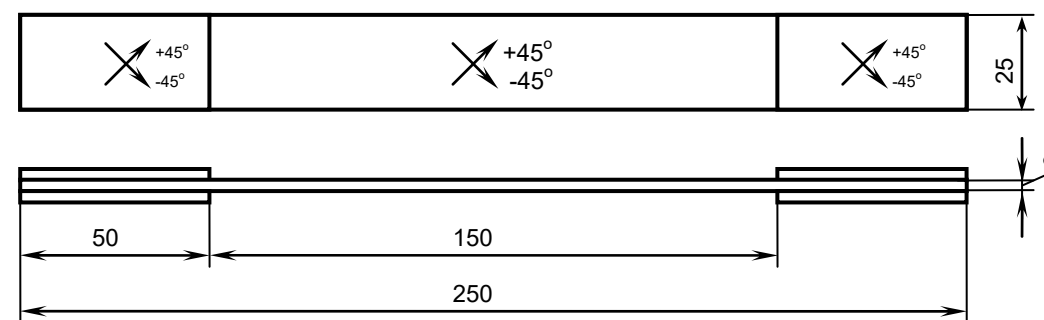
Слика 31. Композитна епрувета за испитивање на затезање са усмерењем  $0^\circ$  према стандарду [55]



Слика 32. Композитна епрувета за испитивање на затезање са усмерењем  $90^\circ$  према стандарду [55]

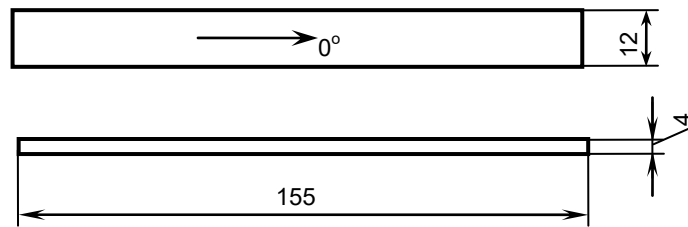


Слика 33. Композитна епрувета за испитивање на затезање са усмерењем  $0^\circ/90^\circ$  према стандарду [55]

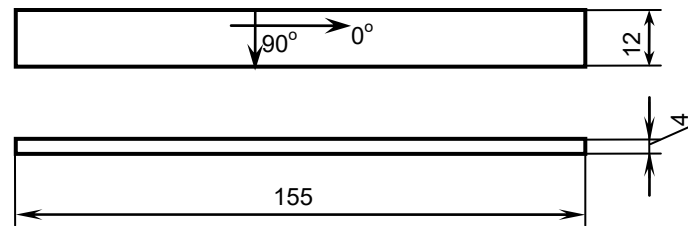


НАПОМЕНА:  
 ПРИМЕР ШЕМЕ СЛАГАЊА  
 СЛАЖЕ СЕ ОКО СРЕДЊЕ РАВНИ, КАО У ОГЛЕДАЛУ  
 СПОЉНИ СЛОЈЕВИ СУ УСМЕРЕЊА  $+45^\circ$   
 УКУПАН БРОЈ СЛОЈЕВА ЈЕ ПАРАН

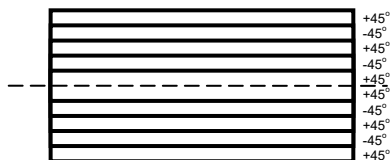
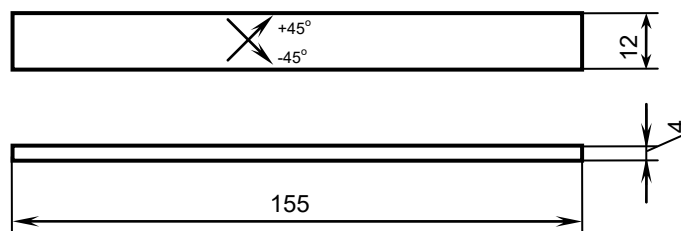
Слика 34. Композитна епрувета за испитивање на затезање са усмерењем  $\pm 45^\circ$  према стандарду [55]



Слика 35. Композитна епрувета за испитивање на савијање са усмерењем  $0^\circ$  према стандарду [56]



Слика 36. Композитна епрувета за испитивање на савијање са усмерењем  $0^\circ/90^\circ$  према стандарду [56]



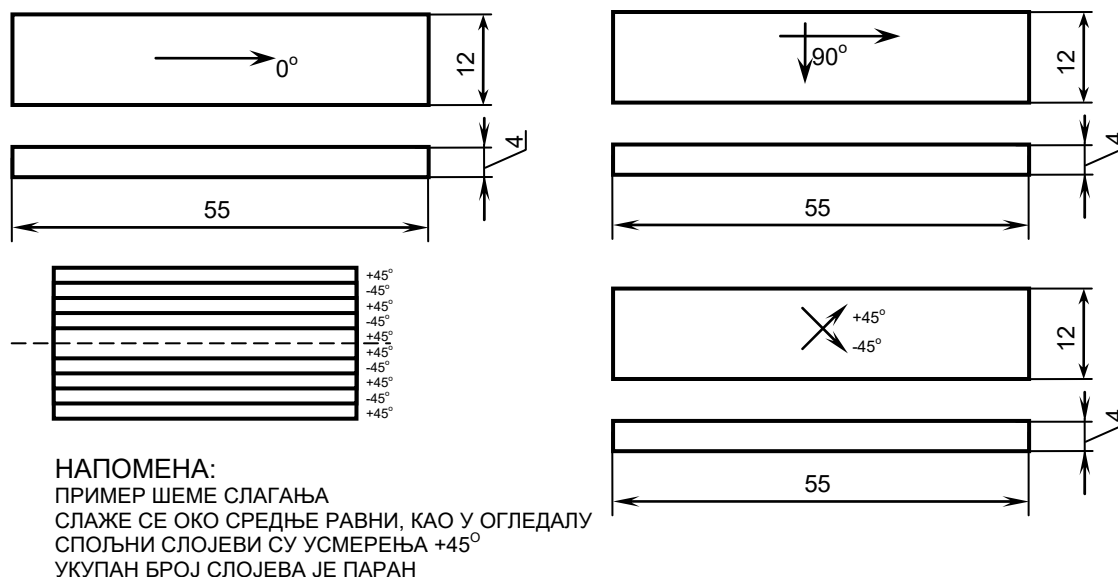
НАПОМЕНА:  
 ПРИМЕР ШЕМЕ СЛАГАЊА  
 СЛАЖЕ СЕ ОКО СРЕДЊЕ РАВНИ, КАО У ОГЛЕДАЛУ  
 СПОЉНИ СЛОЈЕВИ СУ УСМЕРЕЊА  $+45^\circ$   
 УКУПАН БРОЈ СЛОЈЕВА ЈЕ ПАРАН

Слика 37. Композитна епрувета за испитивање на савијање са усмерењем  $\pm 45^\circ$  према стандарду [56]



НАПОМЕНА:  
 ПРИМЕР ШЕМЕ СЛАГАЊА  
 СЛАЖЕ СЕ ОКО СРЕДЊЕ РАВНИ, КАО У ОГЛЕДАЛУ  
 СПОЉНИ СЛОЈЕВИ СУ УСМЕРЕЊА  $+45^\circ$   
 УКУПАН БРОЈ СЛОЈЕВА ЈЕ ПАРАН

Слика 38. Епрувете композита за испитивање на интерламинарно смицање са усмерењима  $0^\circ$ ,  $0^\circ/90^\circ$  и  $\pm 45^\circ$  према стандарду [59]



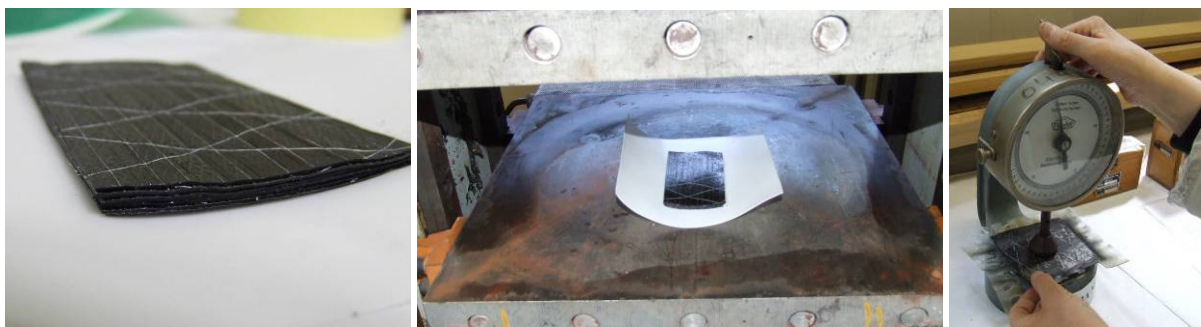
Слика 39. Епрувете композита за испитивање енергије удара са усмерењима 0°, 0°/90° и ±45° према стандарду [61]

Планирана је израда и испитивање 390 епрувета од композитних материјала, табела 7.

Табела 7. Преглед потребног броја епрувета са димензијама према ASTM стандардима [55-62]

		Карбон препрег				
		без нано	нано куглице	нано штапићи		
		В	К	С		
Затезање	ZØ	0°	10	10	10	250*15*1
			10	10	10	250*15*3
	Z9	90°	10	10	10	250*25*3
	ZØ9	0/90°	10	10	10	250*25*3
	Z45	±45°	8	8	8	250*25*3
Савијање	SØ	0°	10	10	10	155*12*4
	SØ9	0/90°	10	10	10	155*12*4
	S45	±45°	10	10	10	155*12*4
Интерламинарно смицање	IØ	0°	10	10	10	27*12*4
	IØ9	0/90°	10	10	10	27*12*4
	I45	±45°	10	10	10	27*12*4
Енергија удара	SØ	0°	10	10	10	55*12*4
	SØ9	0/90°	10	10	10	55*12*4
	S45	±45°	10	10	10	55*12*4
Смицање	SM	±45°	2	2	2	250*25*3

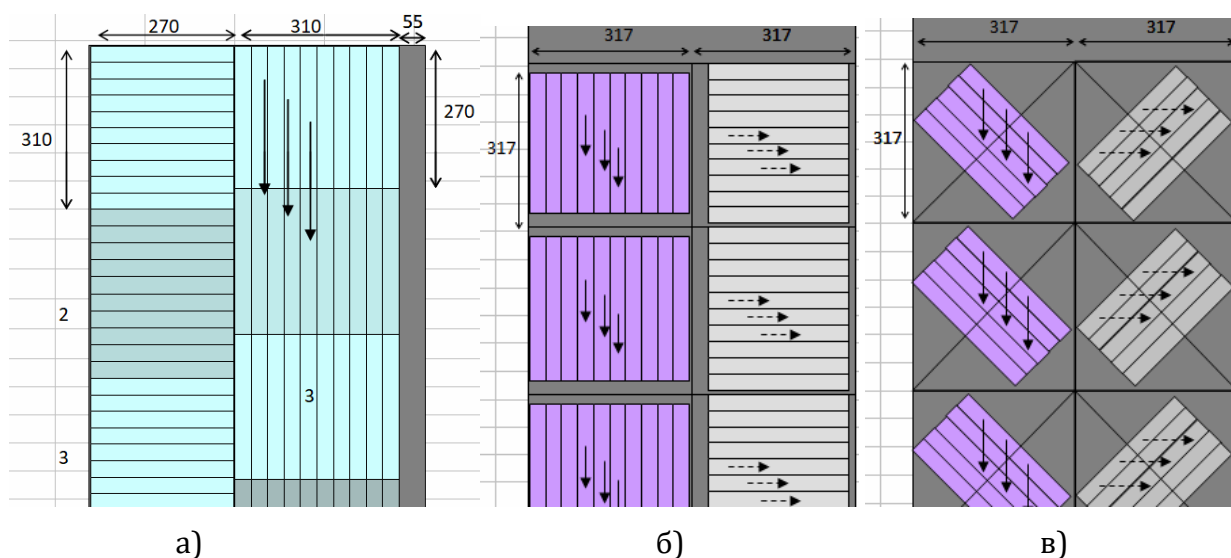
Урађено је више пробних пресовања композита од 2, 3, 6, 8, 10 и 12 слојева препрега. На основу њих је утврђено да је ради постизања захтеваних дебљина епрувета потребно радити узорке од 3, 8 и 10 слојева препрега, слика 40.



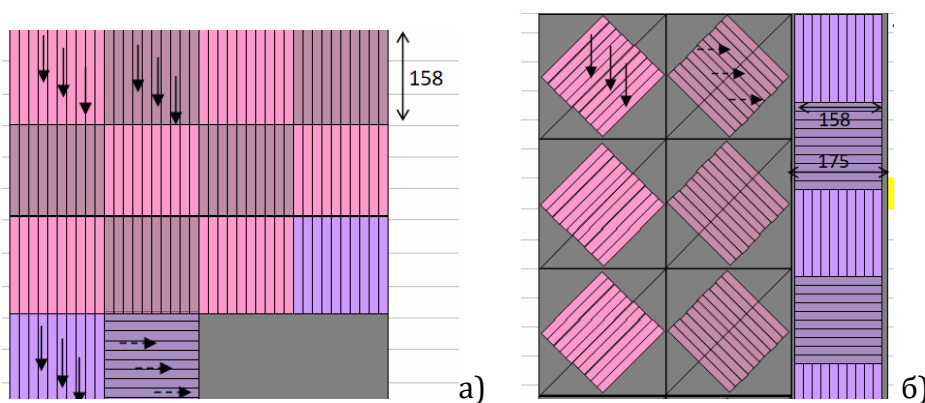
Слика 40. Израда пробних композитних епрувета

Да би се оптимално искористио препрег направљена је кројна листа (слике 41 и 42) према димензијама епрувета и према димензијама плоча пресе у којој ће се радити фабрикација композита. Препрег је сечен тако да се обезбеди довољан број слојева у узорцима:

- 9 плоча од 10 слојева препрега (дебљина после фабрикације око 4 mm),
- 15 плоча од 8 слојева препрега (дебљина после фабрикације око 3 mm) и
- 4 плоче од 3 слоја препрега (дебљина после фабрикације око 1 mm).

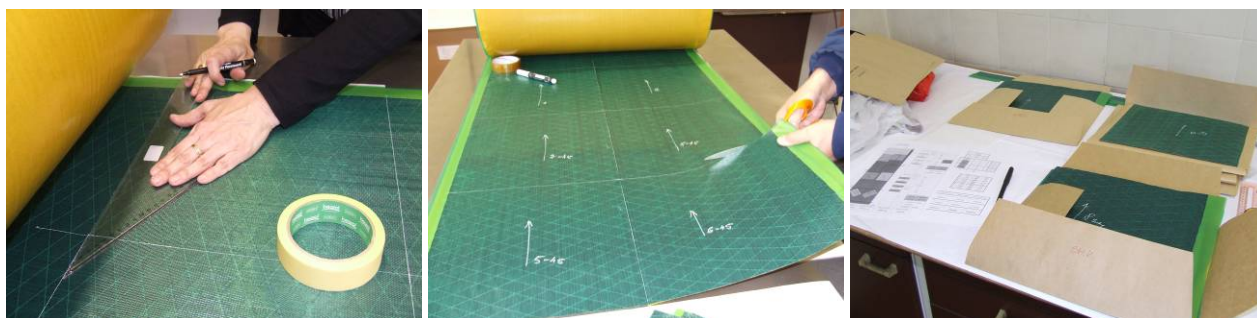


Слика 41. Кројне листе препрега за епрувете за затезање са усмерењима:  
а)  $0^\circ$  и  $90^\circ$ , б)  $0^\circ/90^\circ$  и в)  $\pm 45^\circ$



Слика 42. Кројне листе препрега за епрувете за савијање са усмерењима:  
а)  $0^\circ$ , б)  $0^\circ/90^\circ$  и  $\pm 45^\circ$

При кројењу и сечењу препрега се стриктно водило рачуна о правцу простирања нити и смеру одмотавања препрега. Све ламине су означаване и одвајане по групама према плану слика 43.



Слика 43. Сечење препрега и сортирање ламина према типу епрувета

Искројени су узорци од препрега у ролни у дужини око 35 м. Укупна површина искројених узорака је око 23 м<sup>2</sup>.

Затим се приступило премазивању ламина са ПВБ без нано честица, ПВБ са нано честицама IF-WS<sub>2</sub> 1 мас.%, и ПВБ са наноцевима INT-WS<sub>2</sub> 0,3 мас.%. Сваки премаз је покривао око 7,7 м<sup>2</sup>.

Поступак формирања премаза је исти по процедури као и поступак добијања узорака чврсте смоле. Да би се наночестице нанеле на препрег угљенично влакно – епокси смола коришћен је раствор ПВБ у етанолу - оптималном органском растварачу [20].

Направљени су 10% раствори ПВБ у етанолу, на магнетној мешалици, па је потребна количина раствора наносена на карбонски препрег, рачуната тако да маса ПВБ присутна у нанетој количини раствора одговара 5% масе епокси смоле која се налази у третираној површини препрега. За један тип узорака наносен је ПВБ раствор без волфрам дисулфида, а за друга два типа узорака, наночестице IF-WS<sub>2</sub> и наноцеви INT-WS<sub>2</sub> дисперговане су ултразвучном сондом у етанолу, пре растварања ПВБ. Количина волфрам дисулфида је рачуната према укупној маси епокси смоле у препрегу и ПВБ који ће бити нанет на препрег. IF-WS<sub>2</sub> је додат у концентрацији 1 мас.%, а INT-WS<sub>2</sub> је додат у концентрацији 0,3 мас.%



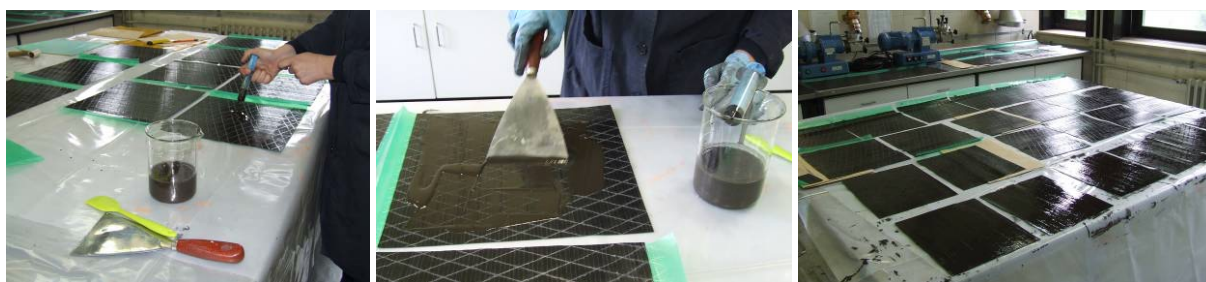
Слика 44. Припремање раствора без наночестица и са наночестицама

Наночестице IF-WS<sub>2</sub> и INT-WS<sub>2</sub> су ултразвучно дисперговане и деагломерисане у етанолу помоћу ултразвучне сонде *Badelin SonoPuls* на 60 W, без пулсација, фреквенција 20 kHz током 30 min. Након тога је посуда у којој се налазио етанол са волфрам дисулфидом премештена на магнетну мешалицу, и током мешања је постепено додата одговарајућа количина ПВБ у праху. После хомогенизације раствора на магнетној мешалици, због тога што су припремане веће количине, раствор је још једном на кратко подвргнут дисперзији ултразвучном сондом слика 44.

За ламине дефинисаних димензија коришћена је одговарајућа маса, односно одговарајућа прерачуната запремина раствора ПВБ. У табели 8. су дате вредности количине раствора према површинама ламина. Раствор је одмераван и равномерно наносен на препрег са равним лопатицама. Након наношења раствора ламинати су остављени на собној температури 24h да би етанол потпуно испарио, слика 45.

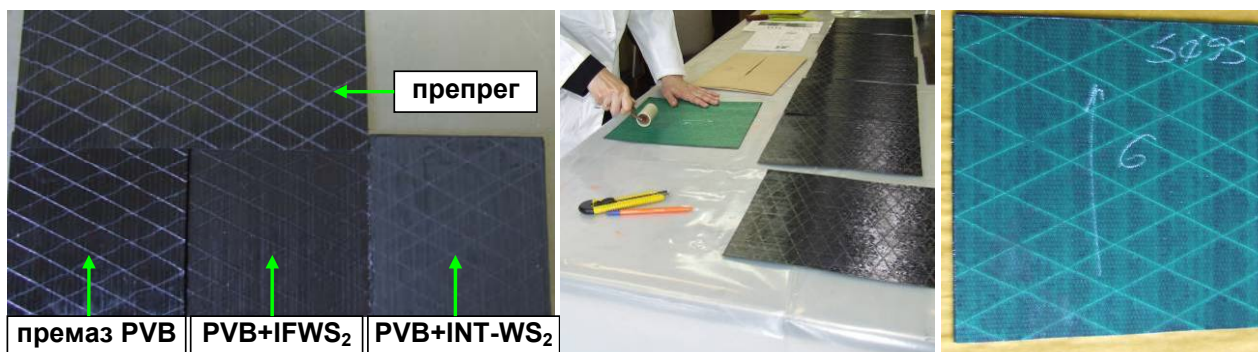
Табела 8. Маса и запремина наносених премаза на препрег

	димензије ламине [mm]	маса раствора [g]	запремина раствора [cm <sup>3</sup> ], [ml]
1	270 x 310	10,40	12,10
2	317 x 317	12,42	14,40
3	230 x 230	6,57	7,64
4	158 x 158	3,11	3,62



Слика 45. Наношење раствора са наночестицама

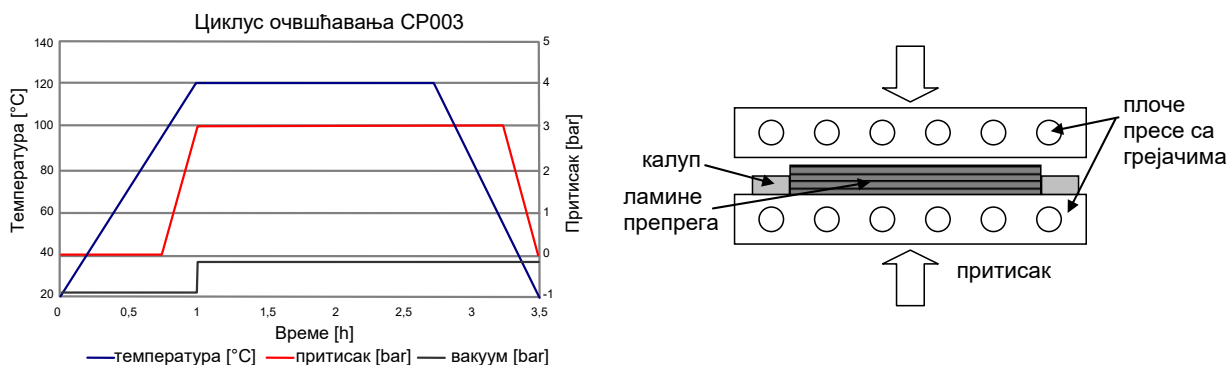
Након тога су ламине слагане и спајане слој по слој под ручним притиском, водећи рачуна о оријентацији нити полагањем 8 или 10 слојева. Оријентације су 0°, 90°, 0°/90°, а ±45° је специфична оријентација код које се морало водити рачуна о симетричном "огледало" слагању. На тај начин су добијене плоче сложених ламина спремних за даљу фабрикацију, слика 46.



Слика 46. Упоредни приказ премазаних ламина, формирање плоча ламината

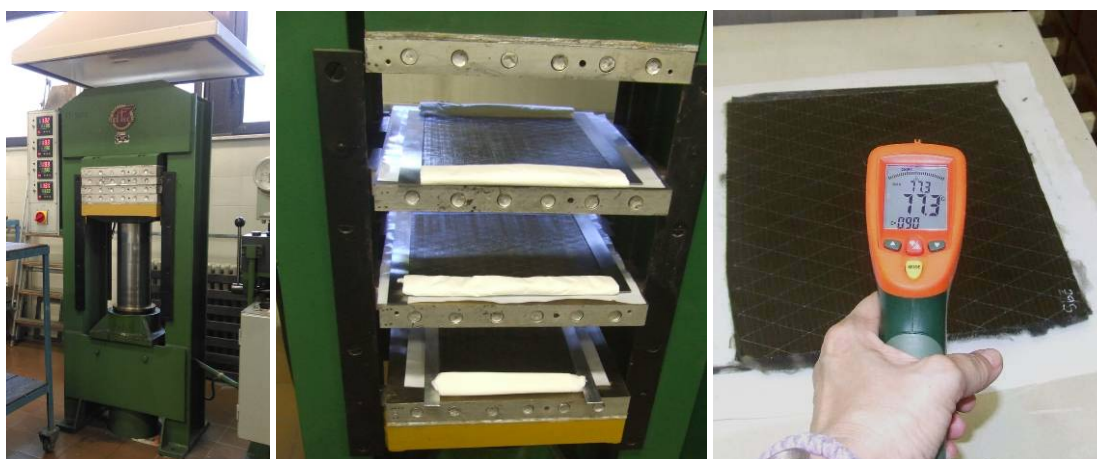
Техником врућег пресовања препрега у калулу на хидрауличкој преси Белишће (максимални радни притисак до 600 bar и температура до 300°C) израђени су компактни узорци композита. Према циклусу умрежавања епокси смоле који је дао

произвођач препрега, узорци су загревани до температуре 130°C у току 60 min, затим су држани на тој температури 90 min под притиском 5 bar, а потом су хлађени 45 min и лагано отпуштани од притиска [64], слика 47.

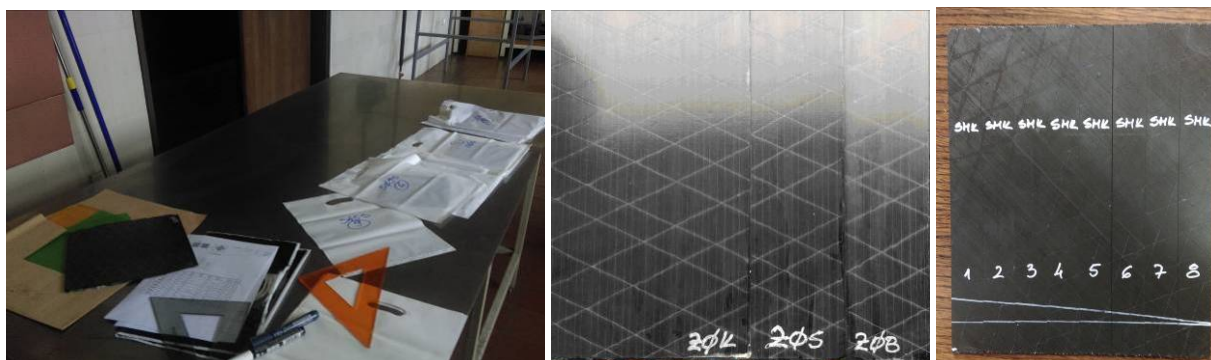


Слика 47. Циклус умрежавања смоле препрега [64], шематски приказ формирања плоча ламината у преси

Коришћени су челични граничници дебљине 1 mm, 3 mm и 4 mm као калуп који је обезбедио меру дебљине узорака. Да се узорци не би залепили за плоче пресе коришћена је тефлон фолија. Температура композитних плоча при хлађењу је контролисана инфрацрвеним термометром, слика 48.



Слика 48. Преса Белишће са плочама ламината у калупу, контрола температуре ламината



Слика 49. Изглед и означавање плоча композита са контролним линијама и скраћеним ознакама



На овај начин израђено је 9 плоча дебљине 4 mm, 15 плоча дебљине 3 mm и 4 плоче дебљине 1 mm. Све плоче су обележаване према врсти премаза као што је дато у табели 9. Затим је на плоче композита преношен кројни лист за сечење са контролним линијама које су биле показатељ за означавање броја епрувета, слика 49.

Табела 9. Ознаке плоча композита према саставу и оријентацији влакана

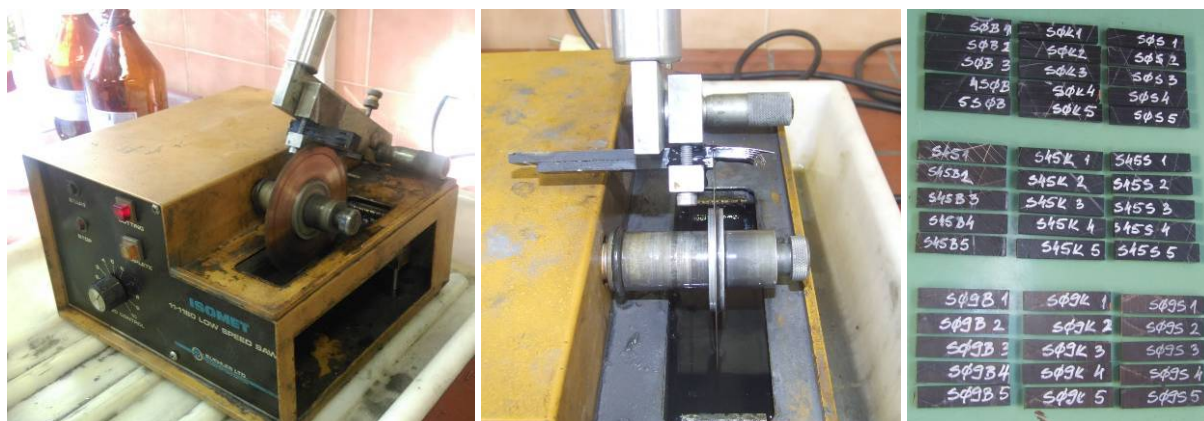
Композит угљенично влакно - епокси смола	без нано	нано куглице	нано штапићи
	<b>B</b>	<b>K</b>	<b>S</b>
<b>Затезање</b>	ZØB-	ZØK-	ZØS-
	Z9B-	Z9K-	Z9S-
	ZØ9B-	ZØ9K-	ZØ9S-
	Z45B-	Z45K-	Z45S-
<b>Савијање</b>	SØB-	SØK-	SØS-
	SØ9B-	SØ9K-	SØ9S-
	S45B-	S45K-	S45S-
<b>Смицање - Поасон</b>	SMB-	SMK-	SMS-
<b>Интерламинарно смицање</b>	IØB-	IØK-	IØS-
	IØ9B-	IØ9K-	IØ9S-
	I45B-	I45K-	I45S-
<b>Енергија удара</b>	SØB-	SØK-	SØS-
	SØ9B-	SØ9K-	SØ9S-
	S45B-	S45K-	S45S-

Добијени узорци су исечени на вертикалној кружној тестери Првомајска. Да се не би оштетиле ивице композита при сечењу, узорци су полагани и стезани између плоча алуминијума дебљине 6 mm и сечени су заједно. Након сечења, епруветама је урађена пажљива површинска обрада бочних ивица мокрим брусним папиром на платну према стандардима, да би се одстранили трагови сечења, слика 50.



Слика 50. Сечење композита на тестери између плоча алуминијума и површинска обрада

За епрувете малих димензија, интерламинарно смицање и енергија удара, коришћена је тестера мале брзине BUEHLER ISOMET. Брзина обртања тестере је 300 об/мин те је тако смањена топлота која се развија као последица сечења великом брзином. Резање се врши помоћу гравитационог оптерећења системом подесивих тегова. Додатно хлађење узорка се врши помоћу емулзије кроз коју пролази ротирајуће сечиво, слика 51. На истој тестери су исечени репрезентативни узорци прелома за структурну анализу на оптичком и СЕМ микроскопу.



Слика 51. Сечење епрувета на BUEHLER ISOMET тестери

Како свака епрувета за затезање и смицање (слике 31-34) има на себи по 4 подметача која омогућавају прихват епрувете у чељустима кидалице, уследило је више пробних кидања епрувета ради одређивања материјала за подметаче. Испробани су разни материјали и њихове дебљине као и начини лепљења подметача на епрувете, слика 52. На основу ових проба закључено је да је најпогоднији материјал за подметаче на епруветама композит од тканине стаклених влакана дебљине око 3 mm, а лепљење у танком филму на обрађеним површинама контакта.



Слика 52. Пробна кидања епрувета са различитим подметачима и начинима лепљења

После пројектовања кројне листе за подметаче приступило се изради новог композита од стаклене тканине *Fiberglass woven roving EWR300C-125* и епокси смоле *Epon™ Resin 828* са учвршћивачем *Epicure Curing Agent 3140*. Површина за премазивање је износила око 14 m<sup>2</sup> па је према томе одређена количина смоле и учвршћивача према задатој пропорцији, табела 6, смола је наносена равном лопатицом а сваки слој је ручно притискан ваљком. Израђено је 8 плоча од 11 слојева стакленог платна, што је обезбедило дебљину овог композита 3 mm. Композит је очвршћавао 48h на собној температури од 25°C. Након тога плоче су сечене на меру на вертикалној кружној тестери Првомајска и обрађене су им контактне површине брусним папиром, слика 53.



Слика 53. Фазе израде подметача за епрувете од стакленог платна

Припремљене су за лепљење 183 епрувете, благим шмирглањем и одмашћивањем ацетоном, а потом су залепљени подметачи епокси лепком *Araldit* добијеним мешањем смоле и учвршћивача према задатој пропорцији, табела 6.1. Лепак је наносен равном лопатицом у танком слоју и свака страна епрувете је сушена уз контролу температуре, слика 54. Овако припремљени узорци су спремни за даља испитивања.

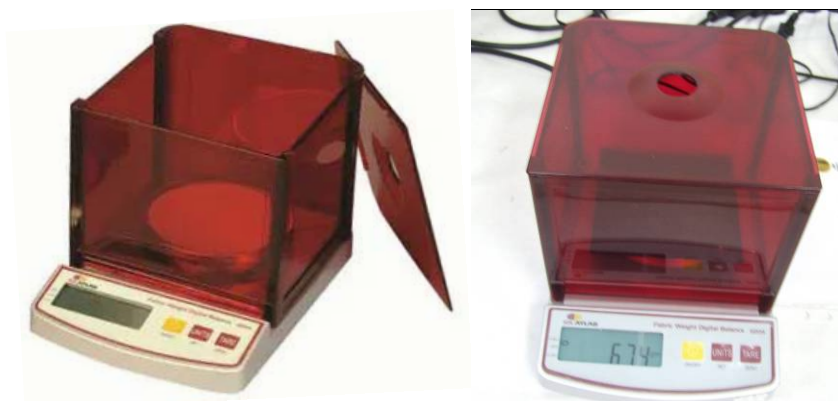


Слика 54. Фазе лепљења подметача на епрувете

### 3.3. КАРАКТЕРИЗАЦИЈА ПРЕПРЕГА

Узорци препрега су кондиционирани на собној температури, према стандардима ASTM D3776/D3776M-20 *Standard Test Method for Mass Per Unit Area (Weight) of Fabric*, ASTM D2584-18 *Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins*, ASTM D2734-16 *Standard Test Methods for Void Content of Reinforced Plastics* и ASTM D3171-22 *Standard Test*

*Methods for Constituent Content of Composite Materials* [69-72], измерена im je површинска маса на Уређају за одређивање површинске масе тканине M236/1 (*Fabric yield package system model M236/1*) слика 55. Дебљина узорка је мерена помоћу микрометра Орион.



Слика 55. Уређај M236/1 без узорка и у току мерења са узорком

Ради одређивања садржаја испарљивих састојака у препрегу ови узорци су жарени у пећи Електон, Бања Ковиљача, снаге 5,3 kW. Према стандарду пећ се загревала 80 min од 25°C до 400°C, затим је радила 120 min на 400°C па је тада угашена, а врата су отворена после 120 min, слика 56. Узорци су затим поново мерени на истом уређају. На овај начин је садржај смоле у препрегу изгорео, и огледа се у губитку масе узорка (остала су само графитна влакна). Узорци су затим поново мерени на Уређају за одређивање површинске масе тканине M236/1. Садржај испарљивих састојака се даје као % масе полазног препрега.



Слика 56. Пећ ELP-15 са узорцима и узорци после жарења

### 3.4. ПСА АНАЛИЗА РАСПОДЕЛЕ ВЕЛИЧИНЕ НАНО ЧЕСТИЦА

Узроци наночестица IF-WS<sub>2</sub> су карактерисане помоћу ласерског дифракционог анализатора *PSA 1190 LD, Anton Paar*, са софтвером *Kalliope*, Слика 57. Овај анализатор помоћу три ласера ради на принципу мерења ласерске дифракције која зависи од расподеле величине честица. Опсег мерења за узорке течности је од 40 nm до 2500 μm.



Слика 57. Ласерски дифракциони анализатор PSA 1190 LD, Anton Paar

Резултати мерења су дати графиком који показује која је вероватноћа проналажења честица пречника  $D$  у узорку и графиком који је кумулативна крива, која даје проценат честица мањих или већих од пречника  $D$ . Најчешће се посматрају пречници  $D_{10}$ ,  $D_{50}$ , и  $D_{90}$ . Како је тешко одредити величину сувих наночестица јер су оне склоне агломерацији, наночестице су пре анализе кратко дисперговане у алкохолу, 10 минута, помоћу ултразвучне сонде *Badelin SonoPuls*. Ова анализа није могла да се примени на наноцеви INT-WS<sub>2</sub>, због њиховог облика. Њихов просечан пречник ће се проценити на основу слика са СЕМ микроскопа.

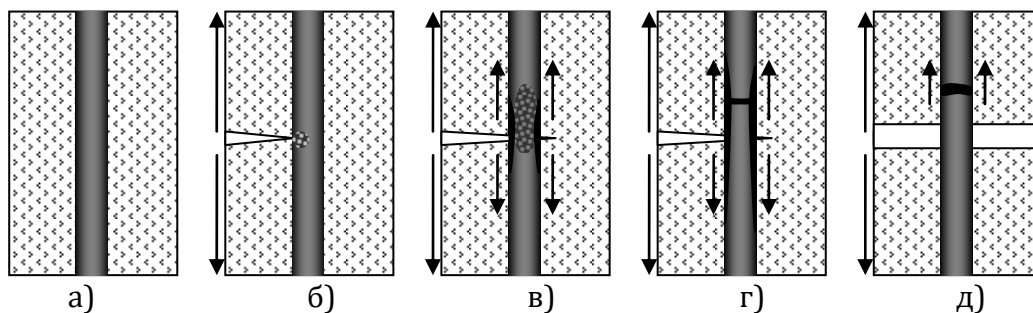
### 3.5. МАКРОСКОПСКА АНАЛИЗА

Помоћу стерео микроскопа *Leica* (камера *Leica DFC295, Metalloplan, Germany*) су посматране површине епрувета, квалитет импрегнације и површине карактеристичних прелома епрувета након испитивања, ради анализе механике лома.

Лом и разарање у композитима који су ојачани влакнима је често компликован процес због анизотропије и нехомогености материјала. Оштећења у оваквим композитима се развијају поступно од микролома до губитка носивости или разарања. Микрооштећења се шире кроз епрувете композита на више места али због велике жилавости то простирање није линеарно, па су оне способне да поднесу велика оштећења пре него што изгубе носивост оптерећења. Када оштећење достигне критични ниво почиње разарање које се одвија кроз ширење прслине, али је и тај процес комплексан јер постоји интеракција на нивоу влакно-матрица тј. микроскопском нивоу, али и на макроскопском нивоу – на међуповршинама између ламина у ламинату. Осим разарања које представља прекид влакана и пуцање матрице постоји и разарање које је скретање прслине дуж међуповршина слојева или између влакана и матрице па долази до раслојавања ламината. Композити ојачани влакнима врло ретко имају потпуни прекид епрувете – катастрофалан лом [73].

Када су у питању епрувете  $0^\circ$  - уздужно оријентисана влакна – затезање је у правцу влакана, почетак прслине је најчешће у матрици и то на површини епрувете или око дефеката у самој епрувети: поре, зарези, нечистоће и места где је настало разарање везе влакно-матрица. За епрувете  $90^\circ$  - попречно оријентисана влакна - затезање је попречно на правац влакана, почетак прслине и разарање је увек кроз матрицу. Код епрувета  $0^\circ/90^\circ$  - попречно укрштена влакна и  $\pm 45^\circ$  - угаоно укрштена влакна прслина се простире кроз ламинат прво кроз матрицу праволинијски па затим кроз влакна. Постоји више врста прелома и они зависе од јачине везе влакно - смола: крти лом кроз матрицу (слика 58.б), заустављање прслине на влакну (слика 58.б), разарање везе влакно-матрица (слика 58.в), крти прелом влакана (слика 58.г) и извлачење влакана

(слика 58.д). На слици 58.а) је приказано влакно у матрици пре оптерећивања – пре прслине.



Слика 58. Простирање прслине кроз ламинат [73]

### 3.6. СЕМ/ЕДС АНАЛИЗА

Скенирајући електронски микроскоп *SEM JEOL JSM 6610LV* је коришћен за посматрање изгледа и степена агломерације наночестица и наноцеви у стању у којем су добијене пре наношења на препрег, затим за посматрање дисперзије честица у матрици композита као и за анализу карактеристичних прелома епрувета. Овај микроскоп може да достигне увећање до 300.000x, а опремљен је и са ЕДС енергетско дисперзивним спектрометром *OXFORD X-Max* који ради са софтвером *Aztec*, слика 59. Помоћу спектрометра ЕДС је извршена хемијска анализа честица, квалитативна и семиквантитативна анализа.

Потребно је обезбедити проводност материјала како се на његовој површини не би нагомилало наелектрисање што би довело до загревања материјала. Ако материјал не испуњава овај услов, узорак се напарава танким слојем злата или угљеника у зависности од анализе.



Слика 59. Скенирајући електронски микроскоп *SEM JEOL JSM 6610LV* са енергетско дисперзивним спектрометром *OXFORD X-Max*

Узорци композита су напаравани златом у уређају *Quorum Q150R ES* па су затим помоћу двострано лепљиве карбонске траке постављани на алуминијумски носач у микроскопу, слика 60. Узорци су посматрани и сликани под различитим увећањима, под напоном 10-15 kV.



Слика 60. Уређај *Quorum Q150R ES* и стављање узорка на носач

### 3.7. ФТИР АНАЛИЗА

Инфрацрвена спектроскопија Фуријеове трансформације (ФТИР) спада у најважније аналитичке технике јер може да анализира скоро све врсте материјала у свим стањима, од гасова, преко течности, до прахова и паста. Ова метода је недеструктивна и може открити присуство карактеристичних органских и неорганских једињења као и њихову концентрацију. На тај начин се може утврдити да ли је дошло до неке хемијске реакције ако она произведе нове, специфичне функционалне групе. Коришћењем апсорпције или рефлексије инфрацрвеног зрачења које је усмерено на узорак, снима се спектар који Фуријеовом трансформацијом прелази из домена времена у фреквенцију те се на тај начин добија комплетан ИЦ спектар узорка. Анализи се приступа корак по корак – прво се анализирају компоненте које улазе у смешу па затим и сама смеша те се тако утврђују узрочно - последичне везе између структуре и својстава материјала.

У овом истраживању коришћен је ФТИР уређај *Nicolet iS10* са АТР техником узорковања слика 61. Како су у коришћеном препрегу угљенична влакна структурни елемент са ограниченом могућношћу хемијских интеракција, анализирани су интеракције између осталих састојака. Помоћу ФТИР смо испитивали да ли постоји хемијска реакција између ПВБ и епокси смоле, као и да се утврди компатибилност  $WS_2$  са системом ПВБ/епокси. Зато су анализирани узорци смола са и без наночестица.



Слика 61. ФТИР уређај *Nicolet iS10* са АТР

### 3.8. ДМТА АНАЛИЗА

Динамичко механичка термална анализа (ДМТА) је ефикасна техника за проучавање механичког понашања материјала (преко вискоеластичног одзива) који је изложен цикличном напрезању деформацијом увијањем. Метода је врло погодна за карактеризацију различитих полимера, мешавина полимера и различитих композитних материјала. Да би се анализа применила морају се узорци прво испитати на константној фреквенцији деформације са повећањем амплитуде деформације, јер се тиме налази област линеарне вискоеластичности (ЛВЕ) у којој је вискоеластични одзив материјала независан од амплитуде. Овај тест се зове и *amplitude sweep* тест. Испитивања су извршена на ДМТА уређају *Modular Compact Rheometer MCR-302, Anton Paar*, слика 62. Епрувете композита за испитивање су приближних димензија 54 x 12 x 4 mm (слика 39) и израђене су епрувете (са IF-WS<sub>2</sub>, INT-WS<sub>2</sub> и без нано честица), са усмерењима влакана 0°, 0°/90° и 45°, слика 62.

Динамичко-механичка мерења вршена су у следећим условима:

- програмирана брзина загревања узорка 5°C/min,
- фреквенција 1 Hz,
- амплитуда деформације 0,01%,
- температурни опсег од 30°C до 170°C.



Слика 62. ДМТА уређај *MCR-302* са узорком у клеммама и део узорака за испитивање

Избор температурног опсега испитивања извршен је тако да на најнижој температури испитивани узорак буде у стаклом стању. Бележене су следеће величине:

- $G'$ - модул акумулиране (сачуване) енергије при смицању,
- $G''$ - модул изгубљене енергије при смицању,
- $\text{tg}(\delta)$  – тангенс угла губитка.

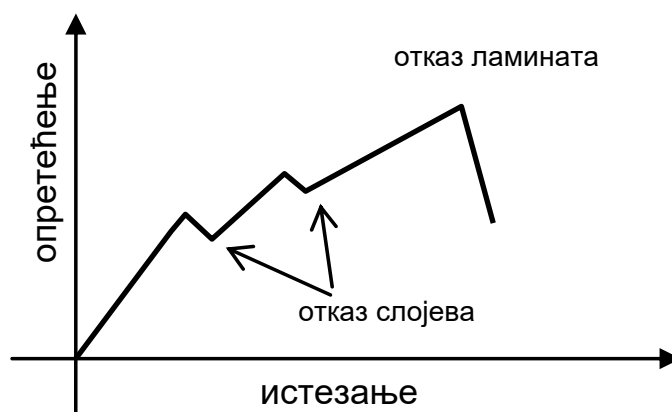
Вредност тачке остакљавања, тј. температуре стаклог прелаза  $T_g$  узета је из тачке максимума  $\text{tg}(\delta)$ . Ова се тачка односи на полимерну матрицу епокси/ПВБ са и без нанојачања.



### 3.9. ОДРЕЂИВАЊЕ СТАТИЧКИХ МЕХАНИЧКИХ ОСОБИНА

У циљу што тачнијег сагледавања утицаја наночестица IF-WS<sub>2</sub> и INT-WS<sub>2</sub> на композит угљенично влакно-епокси матрица, спроведена су темељна испитивања механичких особина материјала. Испитивања су вршена по одговарајућим стандардним методама које су прописане за композите јер се они битно разликују од осталих конструкционих материјала по грађи и природи.

У вишеслојним композитним структурама предвиђање отказа зависи од карактеристика влакана и матрице, шеме слагања слојева, типа оптерећења и утицаја околине. Постоји више врста отказа у ламинату: почетни – иницијални отказ се јавља или на нивоу матрице – споју између слојева или на нивоу једног слоја композита; прогресивни лом – лом који се шири кроз слојеве све до отказа целог ламината и раслојавање - одвајање слојева у ламинату. На слици 63. је приказан механизам отказа ламината. Као што је већ напоменуто, на посматрање композита примењује се макроскопски приступ тј. материјал се сматра хомогеним, јер би микроскопским приступом било врло компликовано питање критеријума лоба. Зато се приликом конструисања ламината захтева да напон у сваком слоју не пређе дозвољену вредност чврстоће, као и да слојеви композита буду симетрични и балансирани да би се спречила деламинација.



Слика 63. Механизам отказа ламината

#### 3.9.1. ИСПИТИВАЊЕ НА ЗАТЕЗАЊЕ

##### 3.9.1.1. Испитивање смоле

Затезна својства чврсте смоле система ПББ/епокси смола са наночестицама IF-WS<sub>2</sub> и INT-WS<sub>2</sub> и без њих, испитане су према одговарајућем ASTM D638-22 [74] на кидалици *INSTRON 1122*, слика 64. Испитивања су рађена на собној температури (~25°C) при брзини затезања  $v = 5 \text{ mm/min}$ . Димензије епрувета, слика 29, су мерене дигиталним помичним кљунастим мерилом *ORION*.

Затезна чврстоћа, напон затезања и деформације се рачунају као:

$$\sigma_M = \frac{P_{\max}}{A} \quad (1)$$

$$\sigma_i = \frac{P_i}{A} = \frac{P_i}{b \cdot d} \quad (2)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100\% \quad (3)$$

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (4)$$

где је:

$\sigma_m$  - затезна чврстоћа, [МПа]

$P_{max}$  - максимално оптерећење које подноси узорак, [N]

$A$  - површина попречног пресека епрувете, [mm<sup>2</sup>]

$\sigma_i$  - напон затезања, [МПа]

$P_i$  - оптерећење, [N]

$b$  - ширина епрувете, средња вредност од три мерења радног дела, [mm]

$d$  - дебљина епрувете, средња вредност од три мерења радног дела, [mm]

$\varepsilon_i$  - деформација затезања, [%]

$L_o$  - почетна дужина радног дела екстензометра, [mm]

$\Delta L$  - прираштај дужине епрувете при истезању екстензометра, [mm]

$E$  - модул еластичности, [GPa]

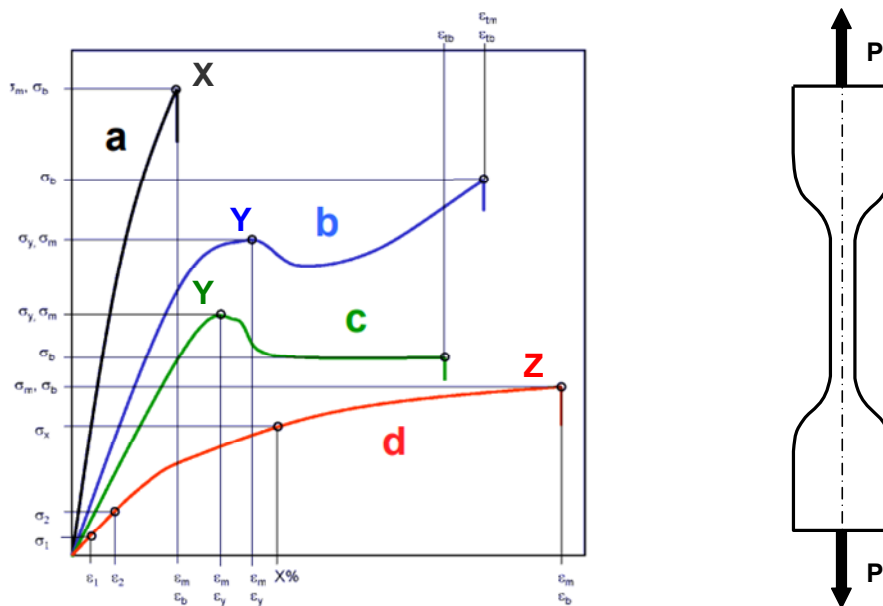
$\Delta\sigma$  - промена напона између две тачке линеарног дела дијаграма, [МПа]

$\Delta\varepsilon$  - промена деформације између две тачке линеарног дела дијаграма, [%]



Слика 64. Кидалица *INSTRON 1122* са узорком у чељустима

На дијаграмима напон - деформација при затезању епрувета чврсте смоле разликујемо више области, слика 65: 1) област линеарне еластичности, 2) област нелинеарне еластичне деформације до тачке кидања (крива *a* - тачка *X*) или до тачке попуштања (криве *b* и *c* - тачка *Y*), 3) област сталне или пластичне деформације. Крива *d* нема попуштање све до тачке кидања *Z*). Крива *a* је карактеристична за термореактивне смоле, *b* и *c* су карактеристичне за дуктилне пластике са тачком попуштања, а крива *d* је карактеристична за дуктилну пластику без тачке попуштања.



Слика 65. Дијаграм напон – деформација при затезању епрувета смоле и шема експеримента [57]

Статистичка обрада података је прописана у сваком ASTM стандарду. После сваке серије испитивања одређеног типа епрувета, мереној величини се рачуна средња вредност, стандардно одступање - девијација и коефицијент одступања - варијације [%]. Средња вредност мерене величине за групу епрувета се рачуна према:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (5)$$

Стандардно одступање сваке групе епрувета, за узорак мањи од 30, се одређује према:

$$s_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2}{n-1}} \quad (6)$$

Коефицијент одступања мерене величине је:

$$CV = 100 \cdot \frac{s_{n-1}}{\bar{x}} \quad (7)$$

где је:

$\bar{x}$  - средња вредност мерене величине групе епрувета

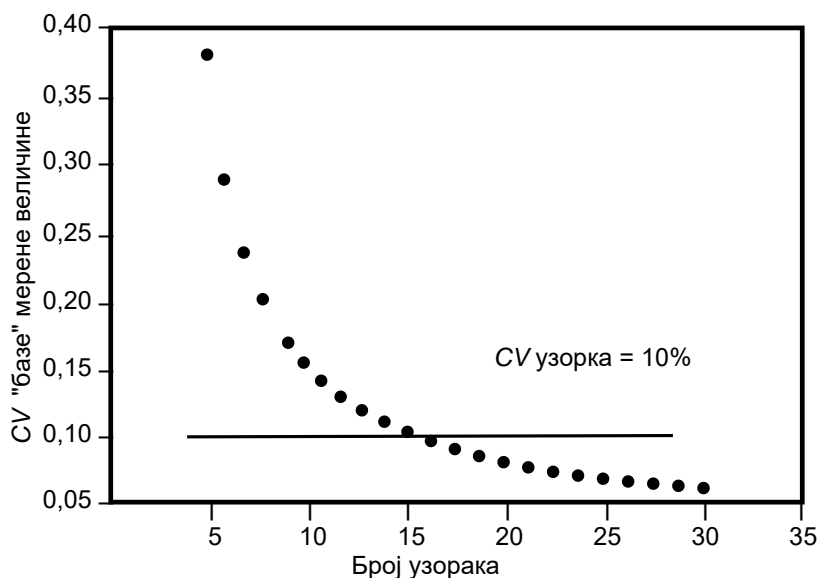
$s_{n-1}$  - стандардно одступање мерене величине

$CV$  - коефицијент одступања мерене величине, [%]

$n$  - број епрувета

$x_i$  - измерена вредност

Према [75] када се анализира мали број узорака од композитних материјала мора се усвојити проширена "база" у којој ће се налазити резултати мерења са поверењем 95%. Према томе, уместо да границу коефицијента одступања мерене величине епрувете држимо на 10%, прихватићемо сва мерења где су одступања и до 20%, зависно од броја испитаних епрувета, слика 66.



Слика 66. Дијаграм коефицијента одступања мерене величине – број епрувета [75]

### 3.9.1.2. Испитивање композита

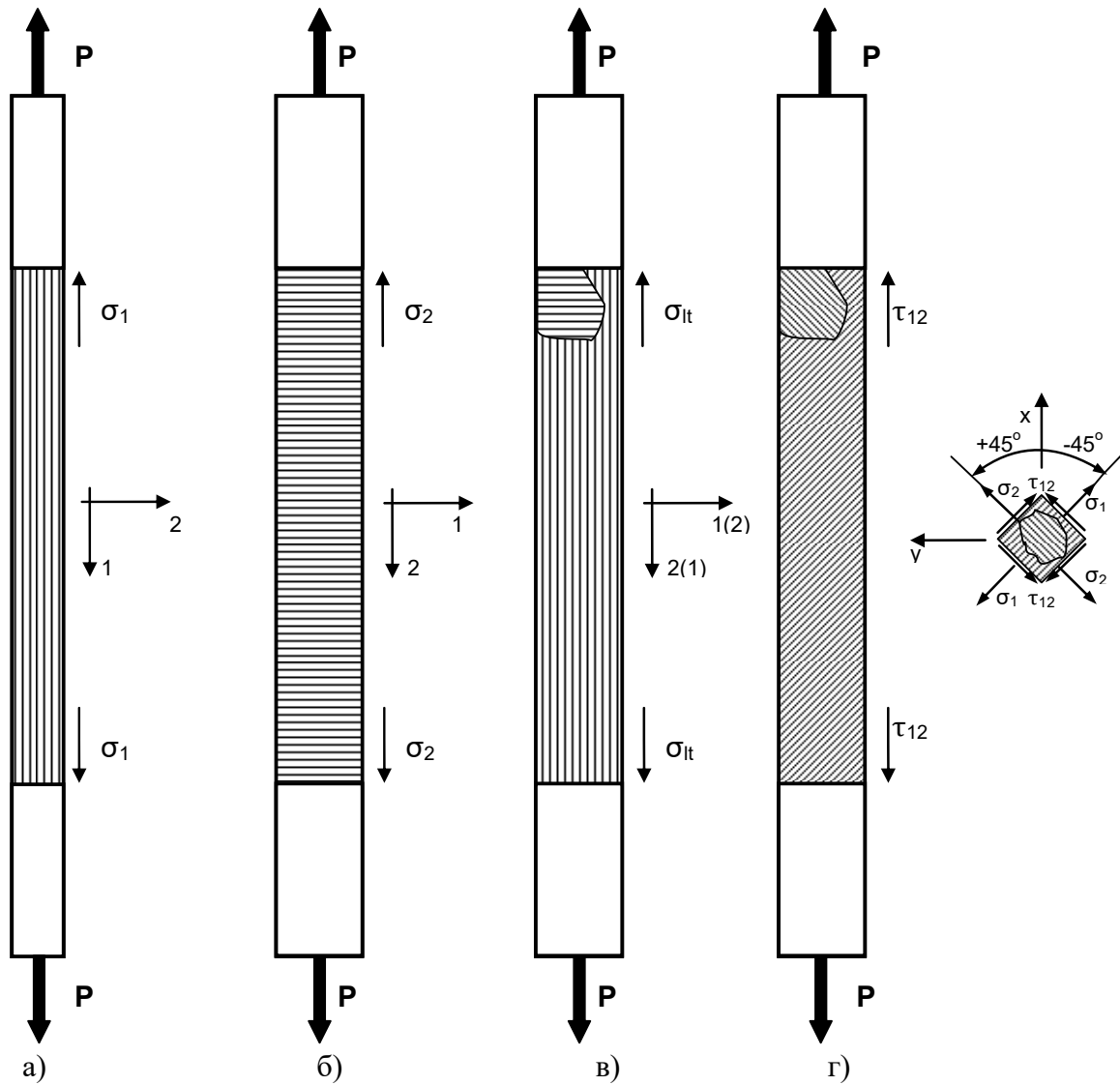
Испитивања затезних карактеристика композита према ASTM D3039 [55] су вршена на сервохидрауличкој кидалици *SHIMADZU SERVO PULSER* (слика 67). Брзина затезања је износила 1 mm/min, а притисак у хидрауличкој чељусти је био 9 bar. Деформација је мерена екстензометром *SHIMADZU SG 50-100* са радним делом 50 mm, класе тачности 0,05. Мерење је извршено само у правцу дејства оптерећења на температури 22°C. Шема испитивања према ASTM стандарду за најмање 5 епрувета у групи [55, 62] је дата на слици 68. Аквизиција је радила брзином 5 S/sec. Димензије епрувета су мерене дигиталним помичним кљунастим мерилом *ORION*. Испитане су композитне епрувете три типа композита од унидирекционог карбонског препрега на бази епокси смоле и поли(винил бутирала), ПББ: без наночестица, са наночестицама IF-WS<sub>2</sub> и са наноцевима INT-WS<sub>2</sub>. Оријентација нити унидирекционог карбонског препрега у стандардизованим узорцима је: 0° (уздужна), 90° (попречна), 0°/90° (попречно укрштена) и ±45° (угаоно укрштена), слике 31-34.



Слика 67. Испитивања на кидалици *SHIMADZU SERVO PULSER*

Испитивањем композита на затезање се одређују следеће карактеристике:

- $\sigma_1$  - затезна чврстоћа у правцу влакана, [MPa], слика 68.а),
- $\sigma_2$  - затезна чврстоћа попречно на правац влакана, [MPa], слика 68.б),
- $\sigma_{lt}$  - затезна чврстоћа укрштених праваца влакана, [MPa], слика 68.в),
- $\tau_{12}$  - смицајна чврстоћа, [MPa], слика 68.г),
- $\varepsilon_1$  - деформација у правцу влакана, [%],
- $\varepsilon_2$  - деформација попречно на правац влакана, [%],
- $\varepsilon_{lt}$  - деформација укрштених праваца влакана, [%].
- $\gamma_{12}$  - смицајна деформација, [%],
- $E_1$  - модул еластичности у правцу влакана, [GPa],
- $E_2$  - модул еластичности попречно на правац влакана, [GPa],
- $E_{lt}$  - модул еластичности укрштених праваца влакана, [GPa],
- $G_{12}$  - модул смицања, [GPa].



Слика 68. Шеме испитивања композитних епрувета на затезање на кидалици  
*SCHENK TREBEL RM 100*

Затезна чврстоћа, напон затезања и деформације се рачунају као:

$$\sigma_{1(2)} = \frac{P_{\max}}{A} = \frac{P_{\max}}{b \cdot d} \quad (8)$$

$$\varepsilon_{1(2)} = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100\% \quad (9)$$

$$E_{1(2)} = \frac{\Delta \sigma_{1(2)}}{\Delta \varepsilon_{1(2)}} \quad (10)$$

$$\tau_{12} = \frac{P_{\max}}{2 \cdot A} = \frac{P_{\max}}{2 \cdot b \cdot d} \quad (11)$$

$$\gamma_{12} = \varepsilon_x - \varepsilon_y \quad (12)$$

$$G_{12} = \frac{\Delta \tau_{xy}}{\Delta \gamma_{xy}} \quad (13)$$

где је:

$P_{\max}$  - максимално оптерећење које подноси узорак, [N]

$A$  - површина попречног пресека епрувете, [mm<sup>2</sup>]

$b$  - ширина епрувете, средња вредност од три мерења радног дела, [mm]

$d$  - дебљина епрувете, средња вредност од три мерења радног дела, [mm]

$\Delta L$  - прираштај дужине епрувете при истезању екстензометра, [mm]

$\Delta \sigma$  - промена напона између две тачке линеарног дела дијаграма, [MPa]

$\Delta \varepsilon$  - промена деформације између две тачке линеарног дела дијаграма, [%]

### 3.9.2. ОДРЕЂИВАЊЕ ПОАСОНОВОГ КОЕФИЦИЈЕНТА

Испитивања су вршена на кидалици *SCHENK TREBEL RM 100*. На епрувете су налепљене мерне розете од две траке за мерење деформације у оба смера – у правцу оптерећења и попречно на њега, слика 69.а). Епрувете су према стандарду [62] са усмерењем влакана  $\pm 45^\circ$ , слика 34. Испитане су три епрувете са нано честицама и без њих, на температури 22°C. Мерне траке региструју деформације на бази промене дужине проводника и термогеног отпора. Слика 69.б) приказује мерну розету на епрувети пре заливања заштитном смолом и повезивања на проводнике према шеми, слика 69.в), као и финални изглед слика 69.г). Деформације које се мере мерним тракама, слика 69.а), су издужење епрувете  $\varepsilon_x$  и сужење  $\varepsilon_y$ . Осетљивост мерних трака се изражава односом релативне промене отпора  $\Delta R/R$  и релативне промене издужења (скраћења)  $\Delta L/L$ .

Поасонов коефицијент се рачуна као:

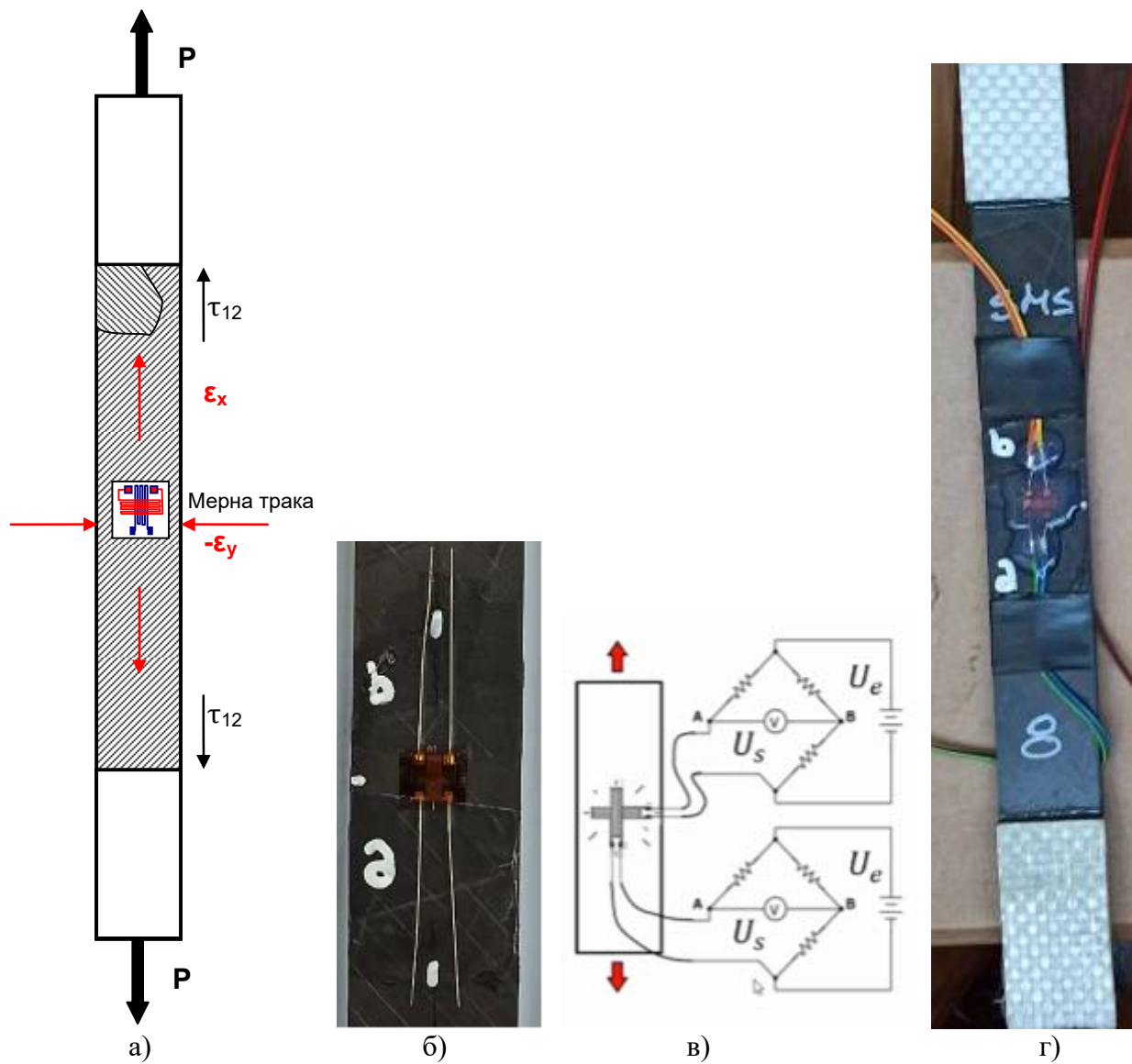
$\nu_{12}$  - Поасонов коефицијент у правцу влакана,

$\nu_{21}$  - Поасонов коефицијент попречно на правац влакана,

$$\nu_{xy} = -\frac{\Delta \varepsilon_y}{\Delta \varepsilon_x} \quad (14)$$

$\Delta \varepsilon_y$  - промена деформације између две тачке линеарног дела дијаграма у затезања у попречном правцу у односу на оптерећење, [%]

$\Delta \varepsilon_x$  - промена деформације између две тачке линеарног дела дијаграма у затезања у уздужном правцу у односу на оптерећење, [%].



Слика 69. Шематски приказ мерења и мерне траке на епруветама



Слика 70. Уређај MGCplus HBM

Сигнали су обрађени на уређају MGCplus HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik, Germany), слика 70). Аквизиција на овом уређају је радила брзином 50 S/sec, а на кидалици је била 5S/sec. Мерне розете су Т - типа 6/120XY 91 произвођача HBM.

### 3.9.3. ИСПИТИВАЊЕ НА САВИЈАЊЕ

Испитивања су вршена на електромеханичкој кидалици *SCHENK TREBEL RM 100*. (слика 71) на температури 22°C. Брзина савијања је износила 1÷3 mm/min, распон између ослонаца је по стандарду 32 x дебљина узорка = 128 mm. Епрувета мора да буде дужа од распона ослонаца 20% што је за испитиване епрувете од 155 mm коректно. Полупречник ослонаца и алата за притискање је 3 mm. Шема испитивања према ASTM стандарду за најмање 5 епрувета у групи [56,58] је дата на слици 72. Аквизиција је радила брзином 5 S/сек. Димензије епрувета су мерене дигиталним помичним кљунастим мерилом *ORION*. Испитане су композитне епрувете три типа композита од унидирекционог карбонског препрега на бази епокси смоле и поли(винил бутирала), ПВБ: без наночестица, са наночестицама IF-WS<sub>2</sub> и са наноцевима INT-WS<sub>2</sub>. Оријентација нити унидирекционог карбонског препрега у стандардизованим узорцима је 0° (уздужна), 90° (попречна), 0°/90° (попречно укрштена) и ±45° (угаоно укрштена), слике 35-37. Брзина савијања за епрувете ±45° је повећана на 3 mm/min због дужине трајања испитивања. Након испитивања су исечени репрезентативни узорци прелома за анализу на микроскопу и СЕМ-у.



Слика 71. Испитивања на савијање на кидалици *SCHENK TREBEL RM 100*

Методe за одређивање карактеристика савијања у три тачке за влакнима ојачане композите и чврсте смоле су исте, али параметри за извођење теста су различити. Пошто овај тест служи за упоређивање карактеристика материјала а не за рачунање вредности неке карактеристике, то нас упућује да резултати испитивања смоле немају значаја те их онда и не спроводимо.

Савојна чврстоћа епрувета се добија на основу једначине:

$$\sigma = \frac{3}{2} \cdot \frac{P \cdot L}{b \cdot d^2} \text{ [MPa]} \quad (15)$$

где је:

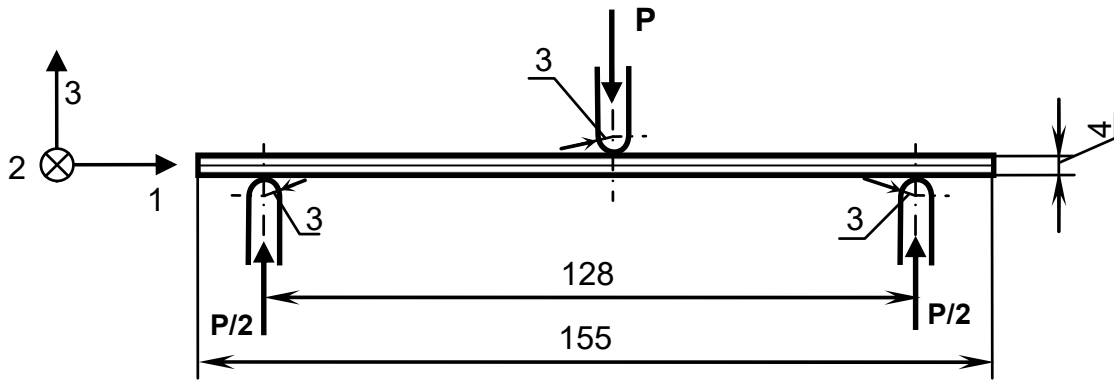
$P$  - оптерећење, [N],

$L$  - растојање између ослонаца, [mm],

$b$  - ширина епрувете, средња вредност од три мерења радног дела, [mm],



$d$  - дебелина епрувете, средња вредност од три мерења радног дела, [mm].



Слика 72. Испитивања на савијање у три тачке према ASTM [56,58]

Модул еластичности савијања се добија на основу једначине:

$$E_f = \frac{L^3 \cdot m}{4 \cdot b \cdot d^3} \text{ [MPa]} \quad (16)$$

где је:

$m$  - нагиб криве оптерећење - деформација, [N/mm].

Савојна деформација или угиб се рачуна на основу једначине:

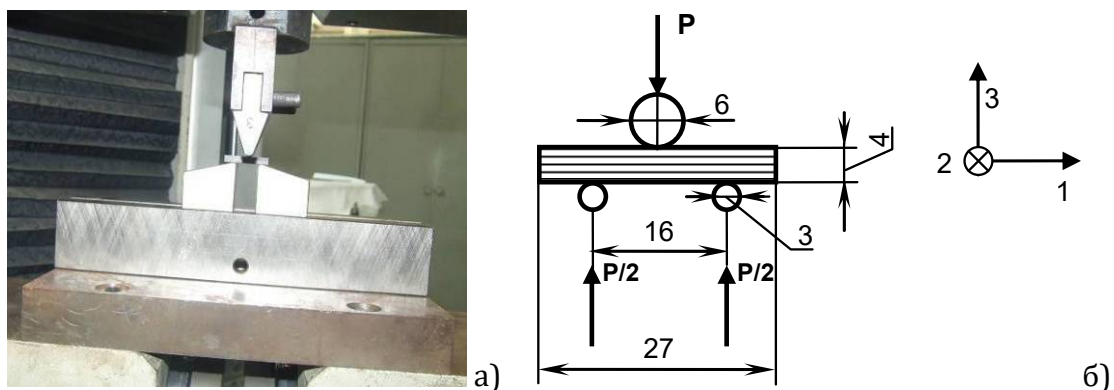
$$\varepsilon = \frac{6 \cdot D \cdot d}{L^2} \text{ [mm/mm]} \quad (17)$$

где је:

$D$  - ход притискивача, [mm].

### 3.9.4. ИСПИТИВАЊЕ НА ИНТЕРЛАМИНАРНУ ЧВРСТОЋУ И СМИЦАЊЕ

Испитивања су вршена на електромеханичкој кидалици *SCHENK TREBEL RM 100* према стандарду ASTM [59] на температури 22°C. Примењена брзина испитивања је 1 mm/min, распон између ослонаца је по стандарду 4 x дебелина узорка = 16 mm, пречник ослонаца је 3 mm, а пречник алата за притискање 6 mm (слика 73.а). Аквизиција је радила брзином 5 S/sec. Шема испитивања према ASTM стандарду и положај равни смицања дате су на слици 73.б). Испитане су епрувете према стандарду са усмерењима влакана 0°, 0°/90° и ±45°, (са и без нано честица), слика 38.



Слика 73. Испитивање на интерламинарно смицање у три тачке према ASTM  
а) испитивање, б) шема теста [59]

Интерламинарна чврстоћа на смицање се добија на основу формуле:

$$\tau_{13} = \frac{3}{4} \cdot \frac{P}{b \cdot d} \quad [\text{MPa}] \quad (18)$$

где је:

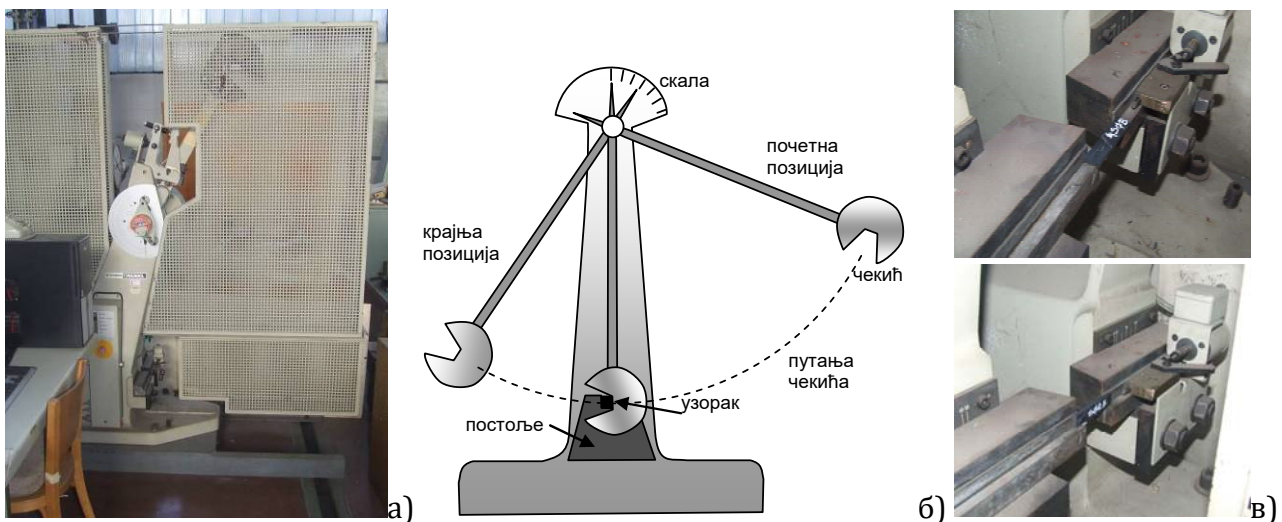
$P$  - оптерећење, [N]

$b$  - ширина епрувете, средња вредност од три мерења радног дела, [mm],

$d$  - дебљина епрувете, средња вредност од три мерења радног дела, [mm].

### 3.9.5. ИСПИТИВАЊЕ ЕНЕРГИЈЕ УДАРА

Испитане су епрувете на енергију удара на Шарпијевом клатну *SCHENK TREBEL* (слика 74.а). Уређај има форму физичког клатна чија се енергија делом троши на разарање епрувете, а делом на отклон клатна (слика 74.б). Рад утрошен на разарање епрувете се читава на скали. Тежина клатна је подешена на 150 J потенцијалне енергије. Епрувете су биле са и без нано честица, са усмерењима влакана  $0^\circ$ ,  $0^\circ/90^\circ$  и  $\pm 45^\circ$ , слика 39. Аквизиција је радила брзином  $10^5$  S/sec, на температури  $22^\circ\text{C}$ . Свака серија је бројала 5 епрувета и окретане су у два смера (3 хоризонтално + 2 вертикално), слика 74.в). Програм Vuhi-charpy је након уношења димензија епрувета приказивао дијаграм оптерећење [kN] - време [ms] и давао апсорбовану енергију удара,  $E$  [J].



Слика 74. Испитивања на Шарпијевом клатну ASTM [61]

## 4. РЕЗУЛТАТИ, НУМЕРИЧКА АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА И ДИСКУСИЈА

Узорци и епрувете израђени у циљу истраживања утицаја примене наноматеријала на ојачања композита угљенично влакно – епокси смола су испитани у ВТИ Београд у Лабораторији за експерименталну чврстоћу, Лабораторији за конструкционе и техничке материјале и Лабораторији за текстил, кожу и обућу.

### 4.1. РЕЗУЛТАТИ КАРАКТЕРИЗАЦИЈЕ ПРЕПРЕГА

Дебљина узорака препрега као и њихове димензије су мерене на 4 места. У табели 10. су дате средње вредности мерених величина.

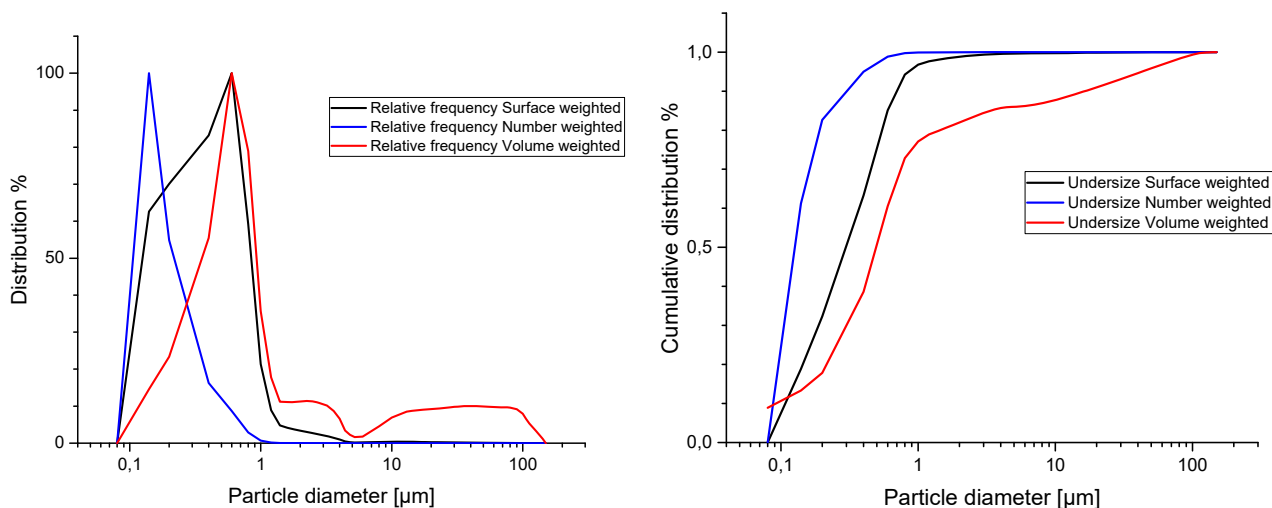
Табела 10. Мерене вредности при карактеризацији препрега Carbon fiber/Ероху UD 450 g/m<sup>2</sup>, HAUFLEER [64]

узорак	Препрег						после жарења		смола	
	дебљина [mm]	ширина [mm]	дужина [mm]	пов. маса мерена [g/m <sup>2</sup> ]	површина [mm <sup>2</sup> ]	пов. маса коригована [g/m <sup>2</sup> ]	пов. маса мерена [g/m <sup>2</sup> ]	пов. маса коригована [g/m <sup>2</sup> ]	пов. маса [g/m <sup>2</sup> ]	садржај [mas.%]
1	0,49	9,90	10,10	682,00	0,068	682,07	446,0	445,96	236,11	34,62
2	0,44	9,90	10,10	676,00	0,0687	676,07	420,0	419,71	256,36	37,92
3	0,47	10,00	10,10	685,00	0,068	678,22	435,0	439,56	238,66	35,19
4	0,48	10,00	10,15	687,00	0,068	676,85	440,0	446,93	229,91	33,97
5	0,47	9,90	10,15	686,00	0,068	682,69	432,0	434,17	248,52	36,40
6	0,45	10,00	10,00	681,00	0,068	681,00	461,0	460,53	220,47	32,37
$\bar{x}$	<b>0,47</b>			<b>682,83</b>		<b>679,48</b>	<b>435,98</b>	<b>438,128</b>	<b>238,34</b>	<b>35,08</b>

Дебљина је 0,47 mm и она се практично поклапа са каталошком од 0,5 mm. Узорци су затим мерени на Уређају за одређивање површинске масе тканине M236/1 пре и после жарења. Површинска маса препрега је коригована према мереној површини епрувета. Маса препрега је по каталогу 688 g што је блиско мереној вредности од 680 g, грешка је 1%. Садржај испарљивих састојака – смоле је 35,08 mas.% препрега, што је приближно податку датом од стране произвођача 36%.

### 4.2. РЕЗУЛТАТИ ПСА АНАЛИЗЕ РАСПОДЕЛЕ ВЕЛИЧИНЕ НАНО ЧЕСТИЦА

На слици 75. је дат дијаграм расподеле величине наночестица IF-WS<sub>2</sub> у алкохолу добијен помоћу ласерског дифракционог анализатора PSA 1190 LD, Anton Paar. Приказана је расподела густине вероватноће проналажења честица пречника D по броју, површини и запремини, као и кумулативне криве које указују на проценат честица мањих или већих од пречника D. У табели 11. су дате вредности дистрибуције по запремини, броју и површини.



Слика 75. Релативна и кумулативна расподела величине честица и кумулативна дистрибуција

Табела 11. Расподела величине честица IF-WS<sub>2</sub>

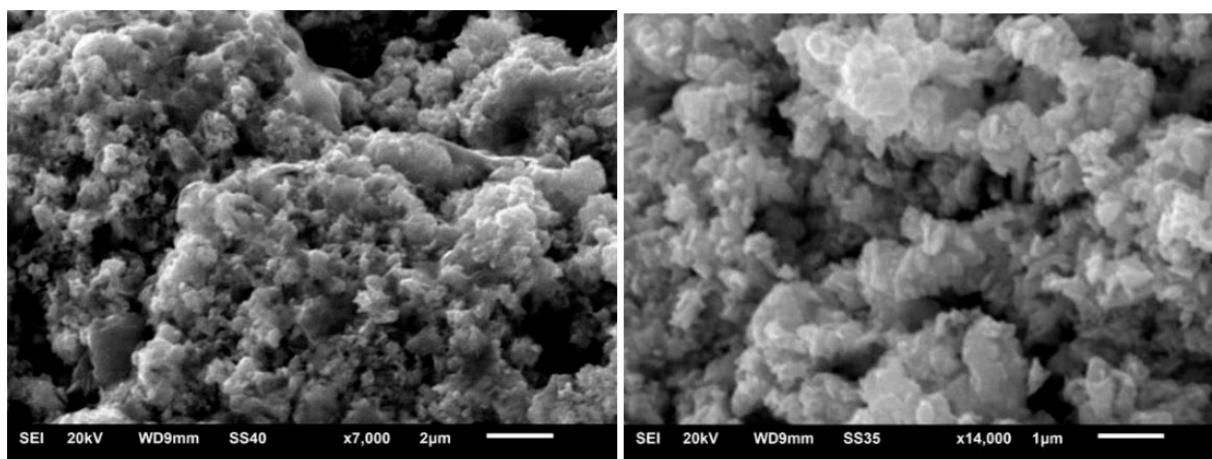
	D10 [μm]	D50 [μm]	D90 [μm]	Средња вредност [μm]
запремина	0,04617	0,24690	8,19600	3,45300
број	0,04383	0,06317	0,15112	0,10557
површина	0,05384	0,14861	0,35010	0,27160

На основу дијаграма закључујемо да иако је већина честица нано величине, постоје и агломерати микрометарских величина. С обзиром да овај анализатор има опсег изнад 40 nm сигурно је да постоји и значајан број честица испод те границе. Овај дијаграм нам показује важност добре деагломерације ултразвучном сондом.

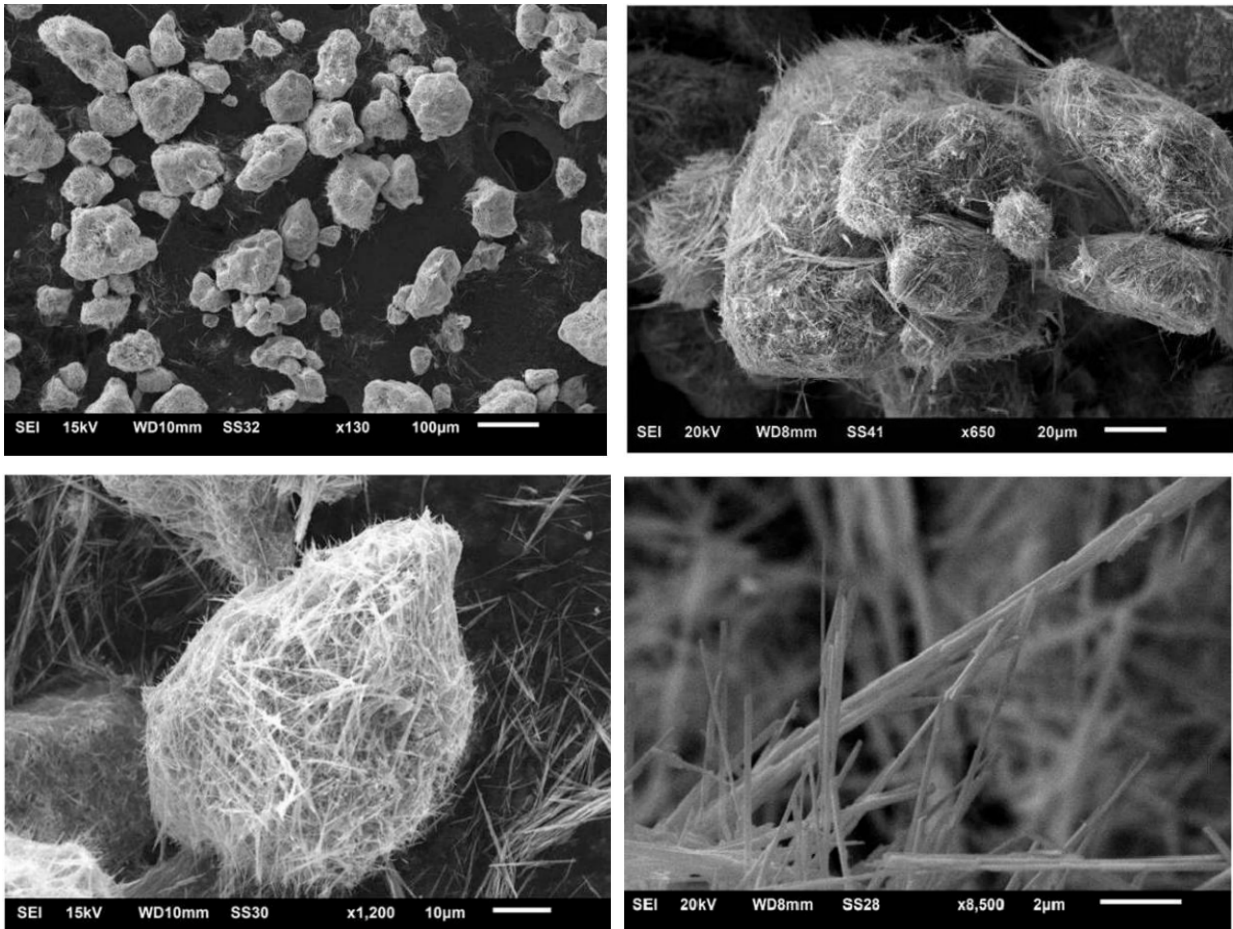
### 4.3. РЕЗУЛТАТИ МАКРОСКОПСКЕ И СЕМ/ЕДС АНАЛИЗЕ

#### 4.3.1. СЕМ СНИМЦИ НАНОЧЕСТИЦА IF-WS<sub>2</sub> И INT-WS<sub>2</sub>

Снимци IF-WS<sub>2</sub> урађени пре дисперговања помоћу СЕМ показују изражену агломерацију, слика 76.



Слика 76. СЕМ слике IF-WS<sub>2</sub>, сликано при повећањима x7000 и x14000

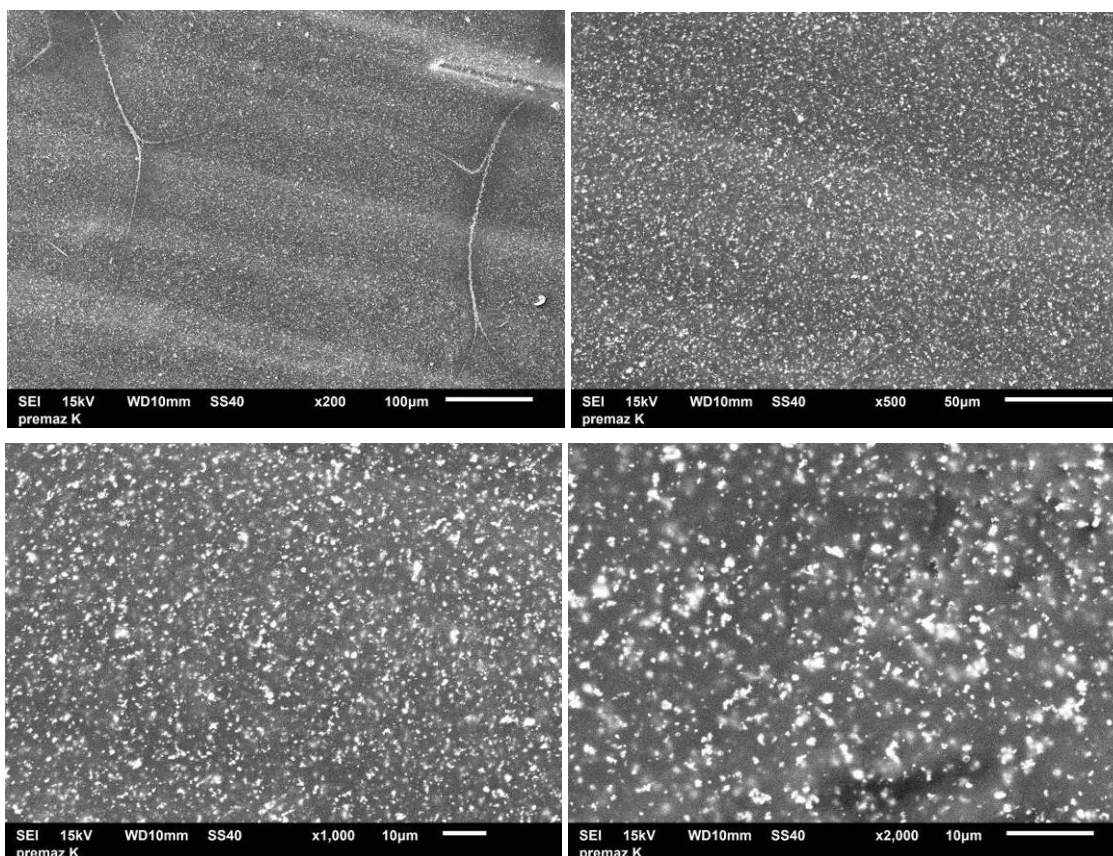


Слика 77. СЕМ слике INT-WS<sub>2</sub>, сликано при повећањима x130, x650, x1200 и x8500

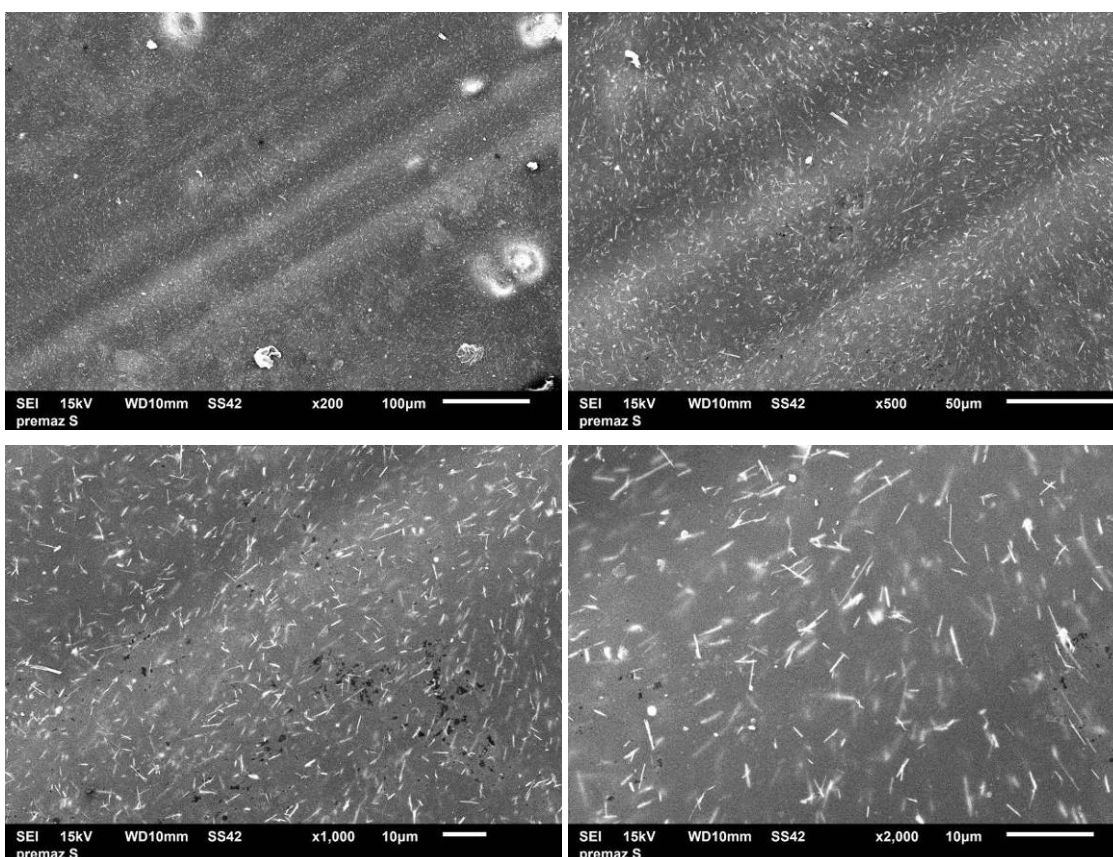
Снимци INT-WS<sub>2</sub> урађени пре дисперговања помоћу СЕМ са различитим увећањима показују да и ове наночестице имају изражену агломерацију, слика 77.

#### 4.3.2. СЕМ СНИМЦИ ПРЕПРЕГА СА IF-WS<sub>2</sub> И INT-WS<sub>2</sub> И ЕДС АНАЛИЗА

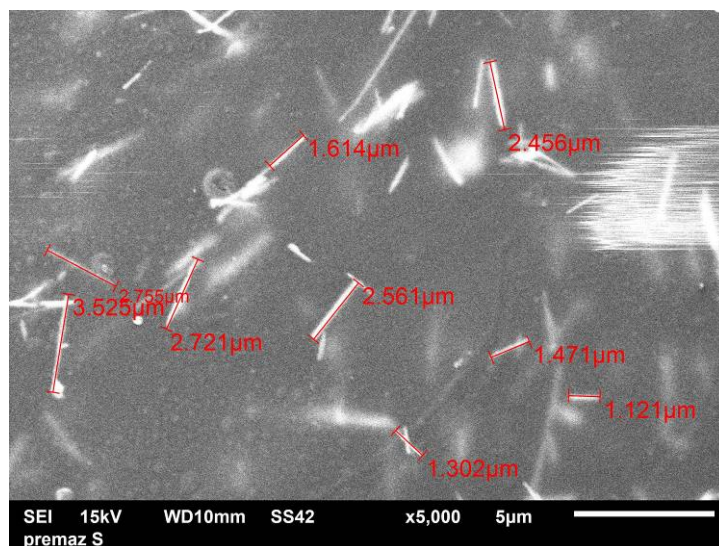
На сликама 78. и 79. су приказани снимци неумреженог ПББ са ултразвучно деагломерисаним честицама 1 mas.% IF-WS<sub>2</sub> и 0,3 mas.% INT-WS<sub>2</sub> под различитим увећањима од x200 до x2000. На сликама се види да је урађена добра деагломерација и дисперзија честица у раствору. Слике су мутне јер су честице покривене слојем ПББ, те се облик честица и изглед агломерата не уочавају јасно, али види се да постоји изврстан број агломерата. Под увећањем x5000 су могли да се измере највећи агломерати и њихове дужине су се кретале од 1,121  $\mu\text{m}$  до 3,525  $\mu\text{m}$ , слика 80.



Слика 78. СЕМ слике сировог премаза ПВБ/ИФ -WS<sub>2</sub> на препрегу, сликано при повећањима: x200, x500, x1000 и x2000

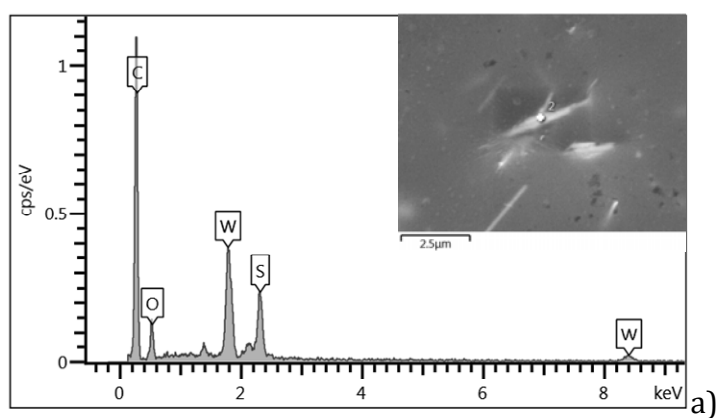


Слика 79. СЕМ слике сировог премаза ПВБ/ИИТ -WS<sub>2</sub> на препрегу, сликано при повећањима: x200, x500, x1000 и x2000

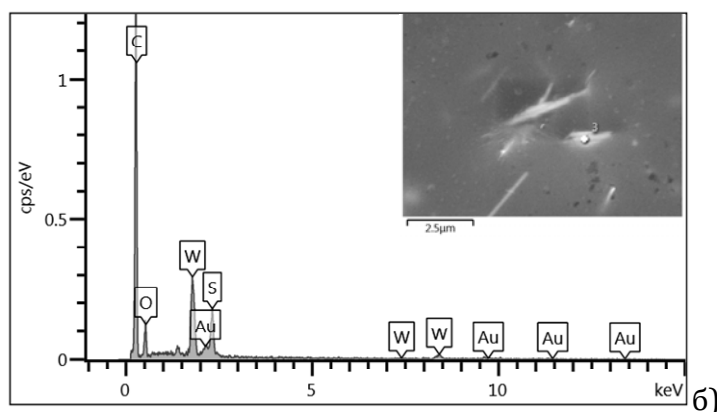


Слика 80. СЕМ слика сировог премаза ПВБ/INT -WS<sub>2</sub> на препрегу, сликано при повећањима x5000

ЕДС анализом је показано присуство наночестица на препрегу композита и угљеничних влакана. На сликама 81. а) и б) се види присуство 0,3 mas.% INT -WS<sub>2</sub> а у припадајућим табелама се читавају проценти присуства хемијских елемената. Како се ПВБ ((C<sub>8</sub>H<sub>14</sub>O<sub>2</sub>)<sub>n</sub>) састоји од С, Н и О, као и епкси смола, резултати су збирни са хемијском структуром карбонских влакана и наночестица.

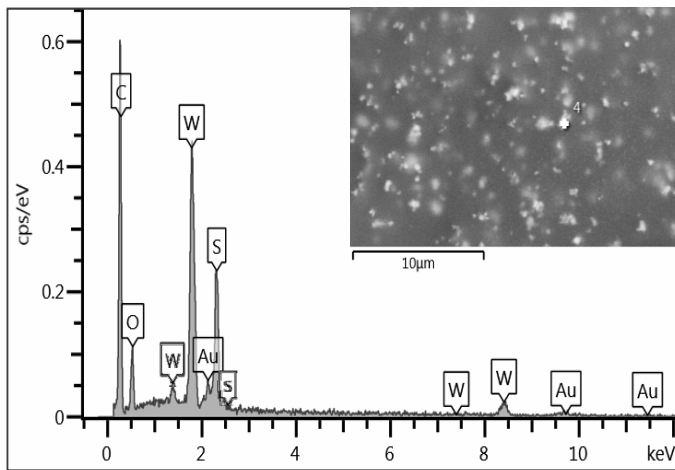


Element	Wt%	Atomic %
C	70.40	88.09
O	8.89	8.35
S	4.81	2.26
W	15.89	1.30
Total:	100.00	100.00



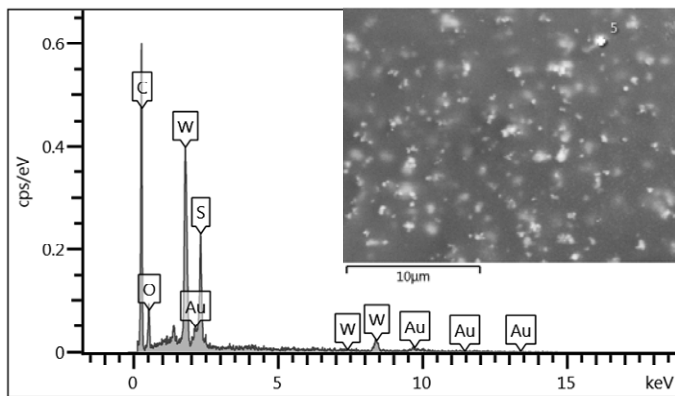
Element	Wt%	Atomic %
C	75.11	89.62
O	8.70	7.79
S	3.59	1.61
W	12.59	0.98
Total:	100.00	100.00

Слика 81. СЕМ слике сировог премаза и ЕДС анализа премаза ПВБ/INT -WS<sub>2</sub> на препрегу



Element	Wt%	Atomic %
C	61.89	85.60
O	8.59	8.92
S	6.56	3.40
W	22.96	2.07
Total:	100.00	100.00

а)



Element	Wt%	Atomic %
C	63.16	86.93
O	7.53	7.78
S	6.25	3.22
W	23.07	2.07
Total:	100.00	100.00

б)

Слика 82. СЕМ слике сировог премаза и ЕДС анализа премаза ПVB/IF -WS<sub>2</sub> на препрегу

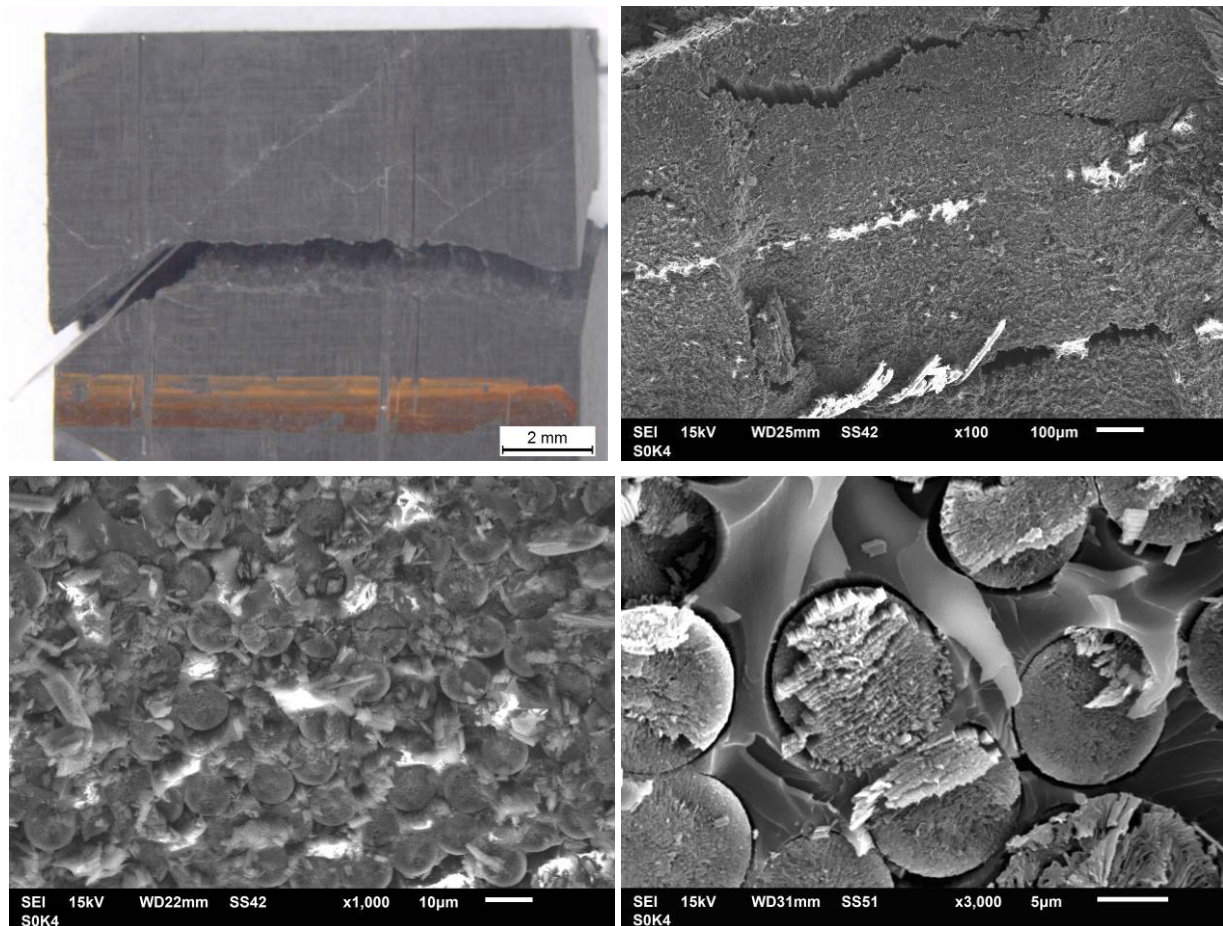
На сликама 82. а) и б) се види присуство 1 мас. % IF -WS<sub>2</sub> а у припадајућим табелама се читавају проценти присуства хемијских елемената.

#### 4.3.3. МАКРОСКОПСКИ И СЕМ СНИМЦИ КОМПОЗИТА СА IF-WS<sub>2</sub> И INT-WS<sub>2</sub>

Посматране су и снимане површине епрувета и површине карактеристичних прелома епрувета након испитивања ради анализе механике лома.

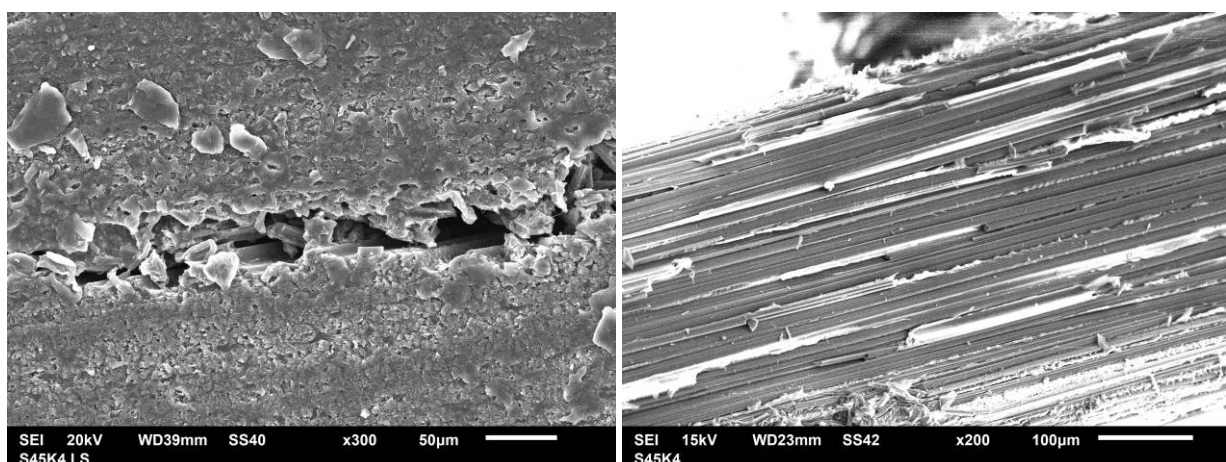
На слици 83. приказан је најпростији случај лома који се шири кроз композит скоро праволинијски прво кроз матрицу а затим кроз влакна. Овај прелом се још зове и крти лом и карактеристичан је за јаку везу влакно – смола. На слици се уочавају лонгитудиналне прслине кроз површину влакно-матрица, крти лом влакана и крти лом матрице.





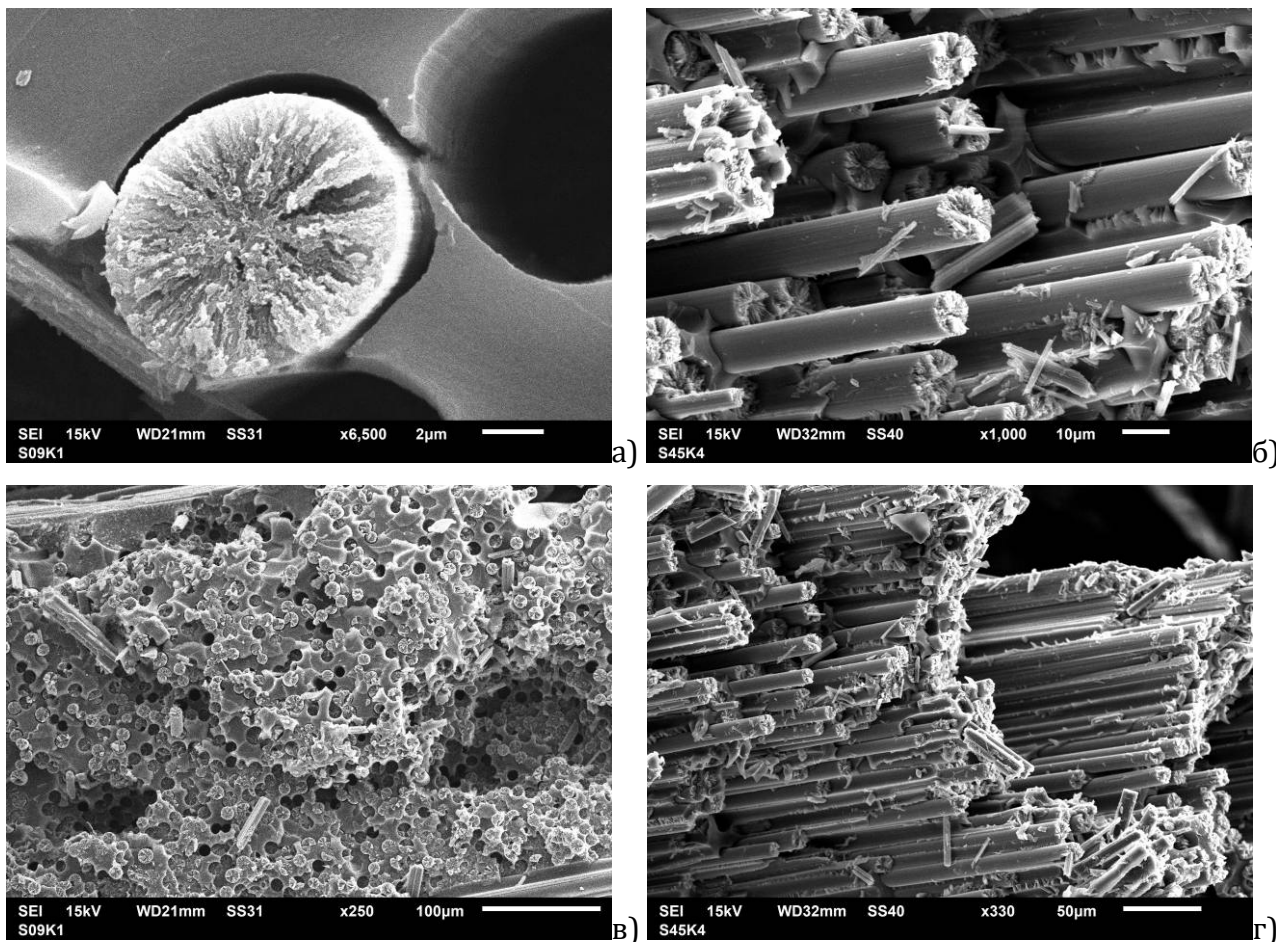
Слика 83. Макроскопска и СЕМ слике кртог лома усмерења влакана  $0^\circ$  увећања су  $\times 8$ ,  $\times 100$ ,  $\times 1000$  и  $\times 3000$

На слици 84. је приказан механизма разарања *Debonding*. Ова појава настаје када се раздвајају влакна од матрице и прлина се простире кроз међуповршину влакно-смола. Појава је израженија када је мања јачина међуповршинске везе влакно-матрица. На овај начин може доћи до скретања врха прлине дуж влакана и тиме практично до заустављања прлине.



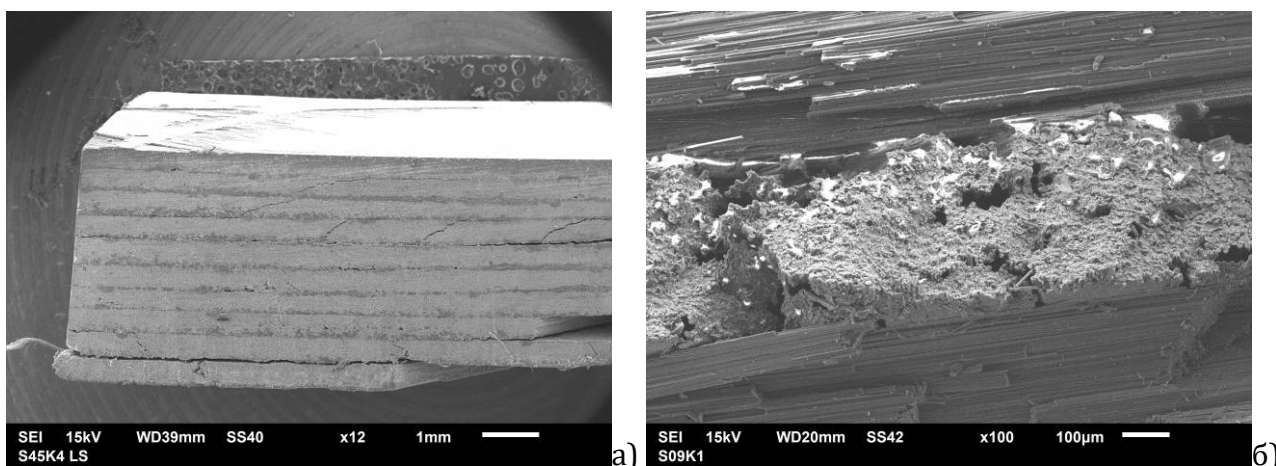
Слика 84. СЕМ слике *Debonding*-а усмерења влакана  $\pm 45^\circ$  оптерећења попречно и уздужно на влакна, увећања су  $\times 300$ ,  $\times 200$

Лом влакана и матрице може бити крт, слика 85.а), а може доћи и до извлачења влакана, слика 85.б), в). Уочава се и степенаст попречни лом влакана слика 85.г).



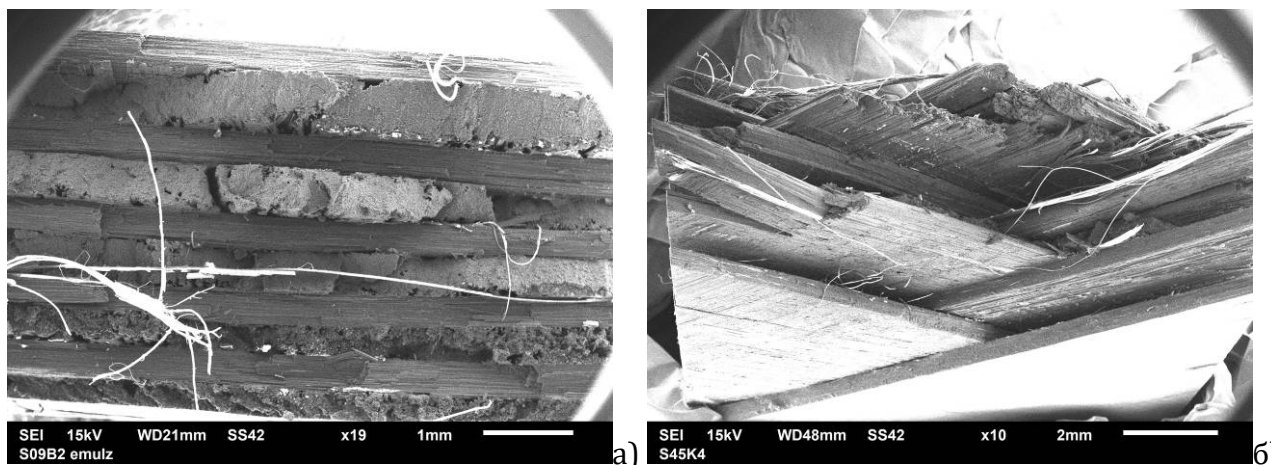
Слика 85. СЕМ слике: а) кртог лома влакана и матрице, б), в) извлачења влакана, г) степенаст попречни лом влакана

Вишеструко попречно пуцање кроз слојеве оријентације попречне на правац затезања, слика 86.



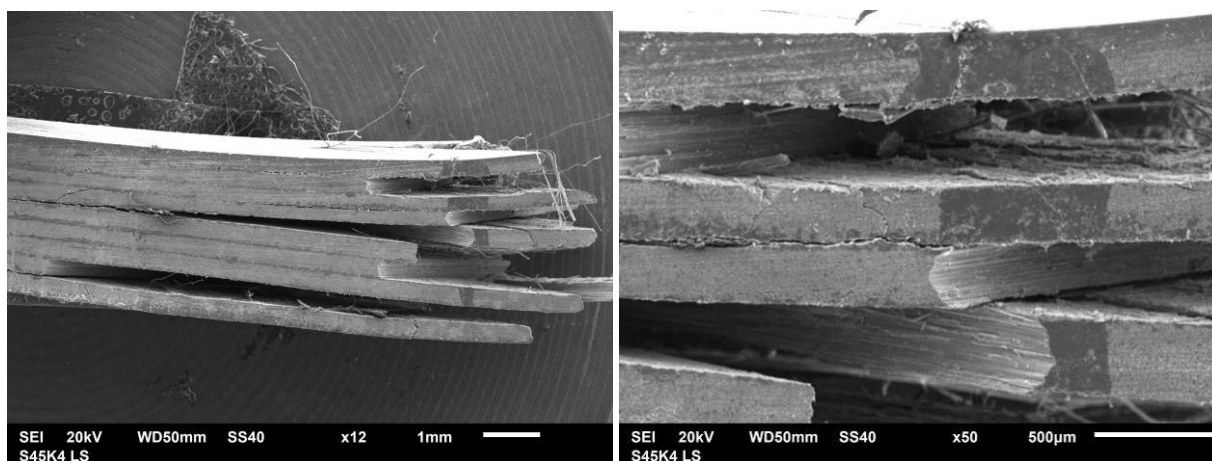
Слика 86. СЕМ слике попречне прслине кроз композит усмерења влакана: а)  $\pm 45^\circ$ , б)  $0^\circ/90^\circ$

Декохезије кроз међуслојеве између ламина различите оријентације влакана су једно од главних облика разарања, слика 87. Осим тога, на слици 87.б) се види и попречно разарање кроз слојеве.



Слика 87. СЕМ слике декохезије композита усмерења влакана:  
а)  $0^{\circ}/90^{\circ}$ , б)  $\pm 45^{\circ}$

При оптерећењу композита настају и раслојавања - деламинације слојева што је нарочито изражено при савијању, слика 88.

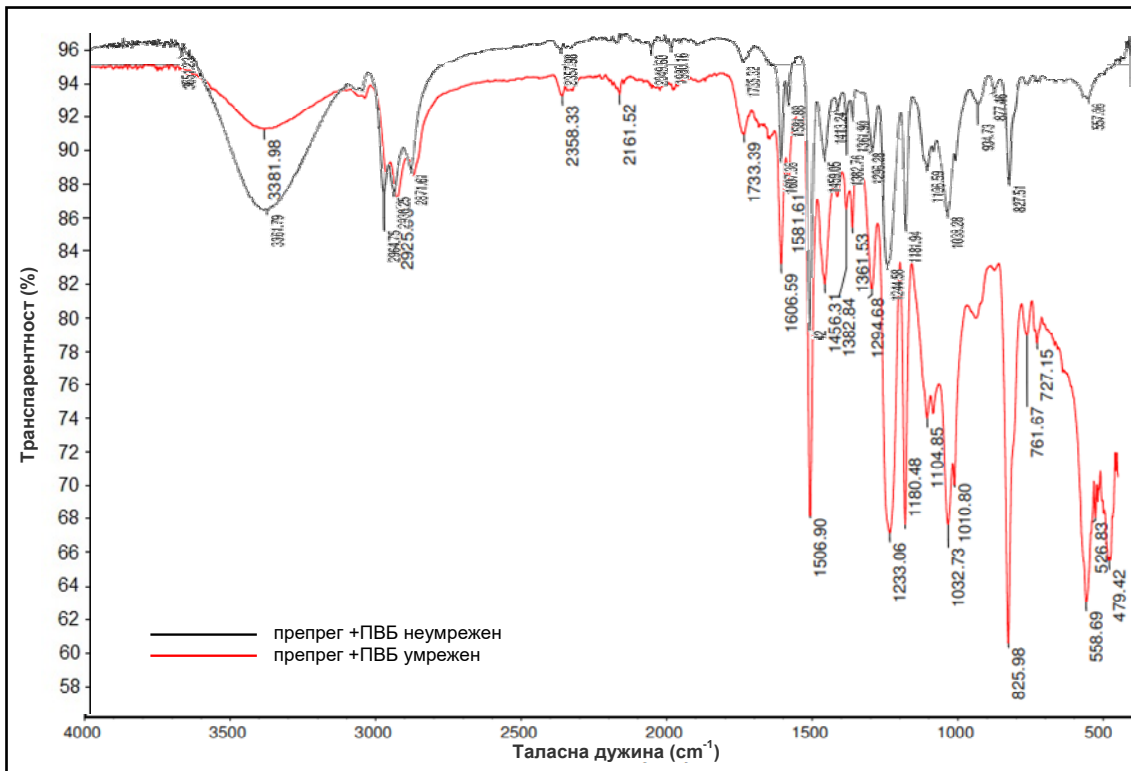


Слика 88. СЕМ слике деламинације композита усмерења влакана  $\pm 45^{\circ}$

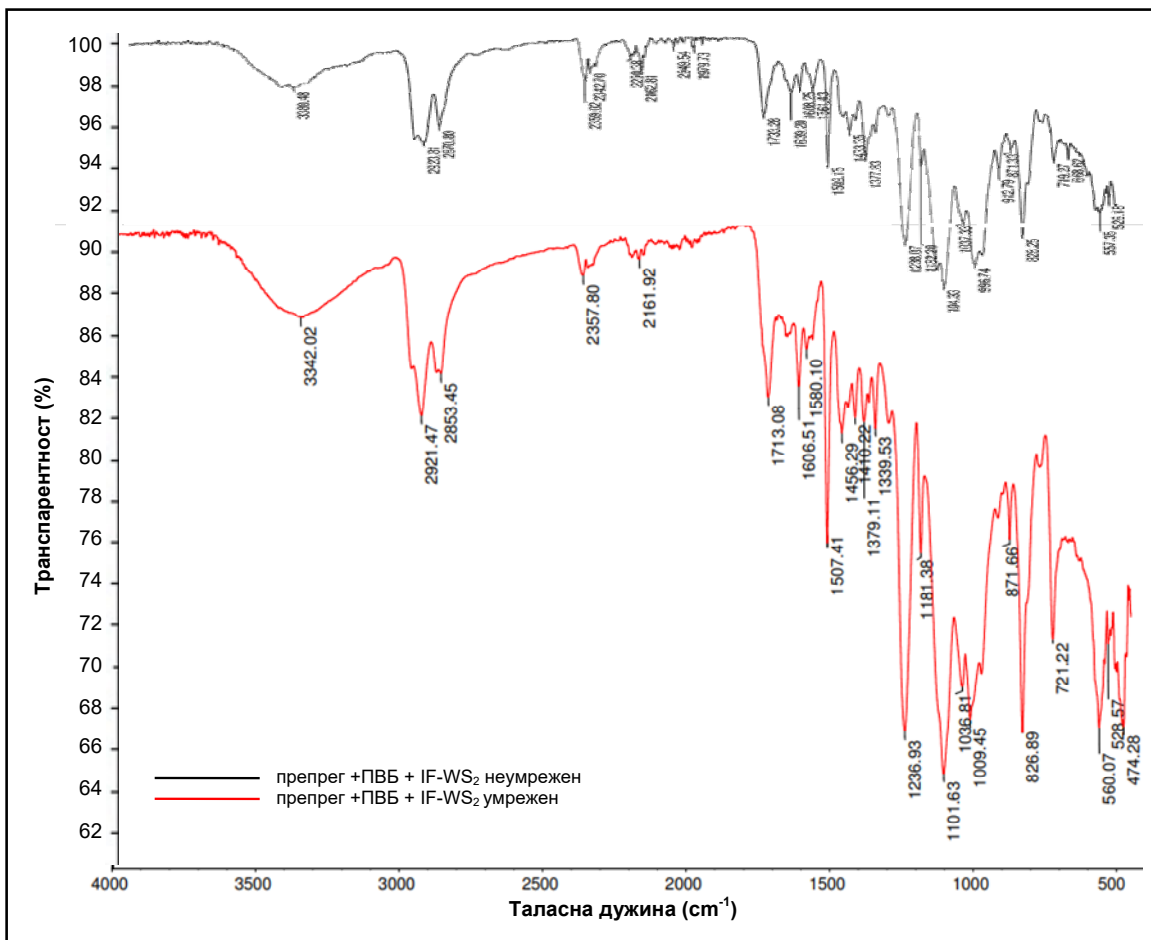
#### 4.4. РЕЗУЛТАТИ ФТИР КАРАКТЕРИЗАЦИЈЕ

ФТИР спектри за узорке: препрега премазаног са ПВБ пре пресовања и после пресовања дати су на слици 89, препрега премазаног са ПВБ + 1 mas.% IF-WS<sub>2</sub> пре пресовања и после пресовања дати су на слици 90. и препрега премазаног са ПВБ + 0,3 mas.% INT-WS<sub>2</sub> пре пресовања и после пресовања дати су на слици 91.

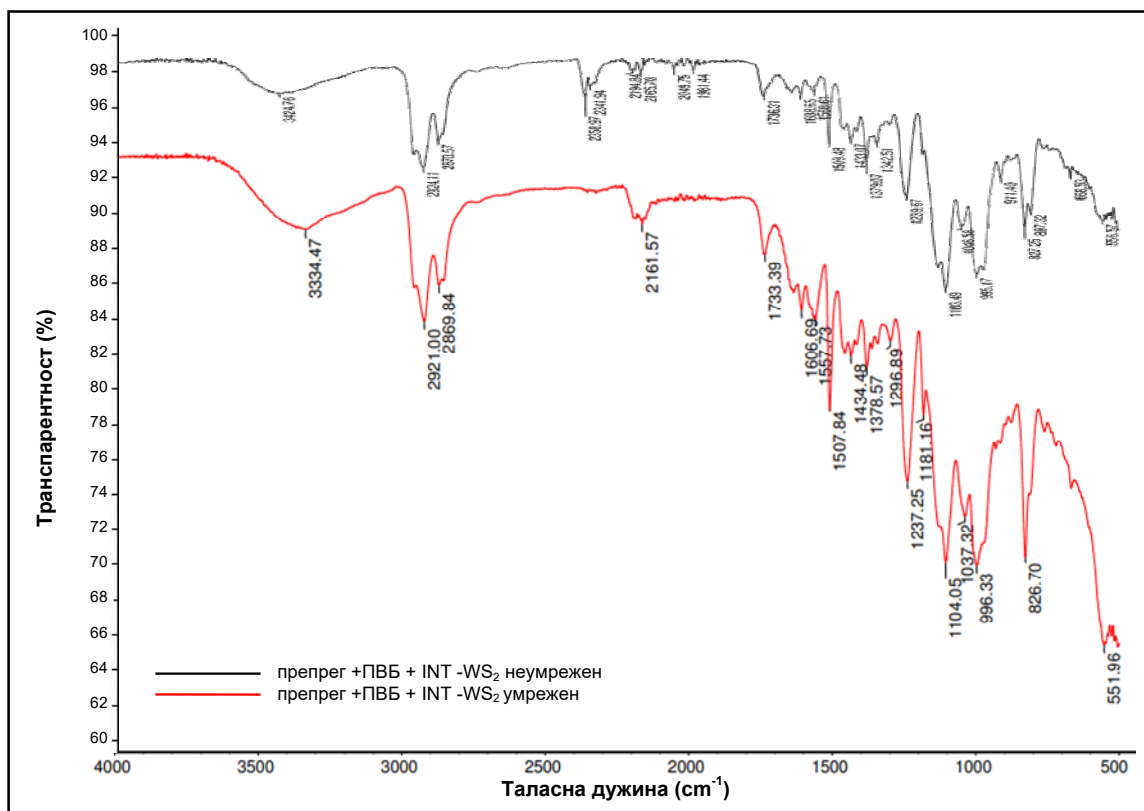
Упоредном анализом закључујемо да нема хемијске реакције између WS<sub>2</sub>, ПВБ и епокси смоле јер нема нових пикова у дијаграму, а потврђена је хемијска реакција између ПВБ и епокси смоле. Карактеристични пикови за епокси смолу су на:  $\sim 1730 \text{ cm}^{-1}$  од растезања карбонила естра и  $\sim 3330 \text{ cm}^{-1}$  од секундарних хидроксилних група. Уочавају се и пикови за ПВБ који су бројни. Спектар умреженог композита показује да је пик ОН групе значајно редукован што нас доводи до закључка да се одиграла реакција између ПВБ и епокси смоле. Спектри препрега без и са WS<sub>2</sub> показују исти облик и исте пикове што нас доводи до закључка да су WS<sub>2</sub> хемијски инертне.



Слика 89. ФТИР спектри препрег + ПВБ



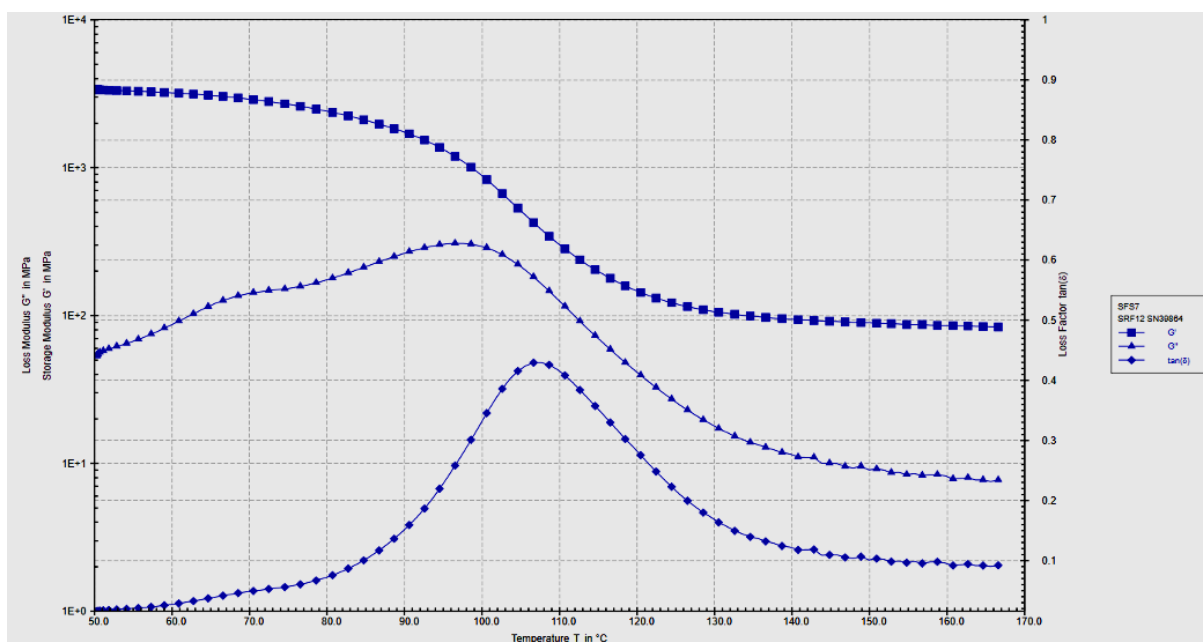
Слика 90. ФТИР спектри препрег + ПВБ + 1 mas.% IF-WS<sub>2</sub>



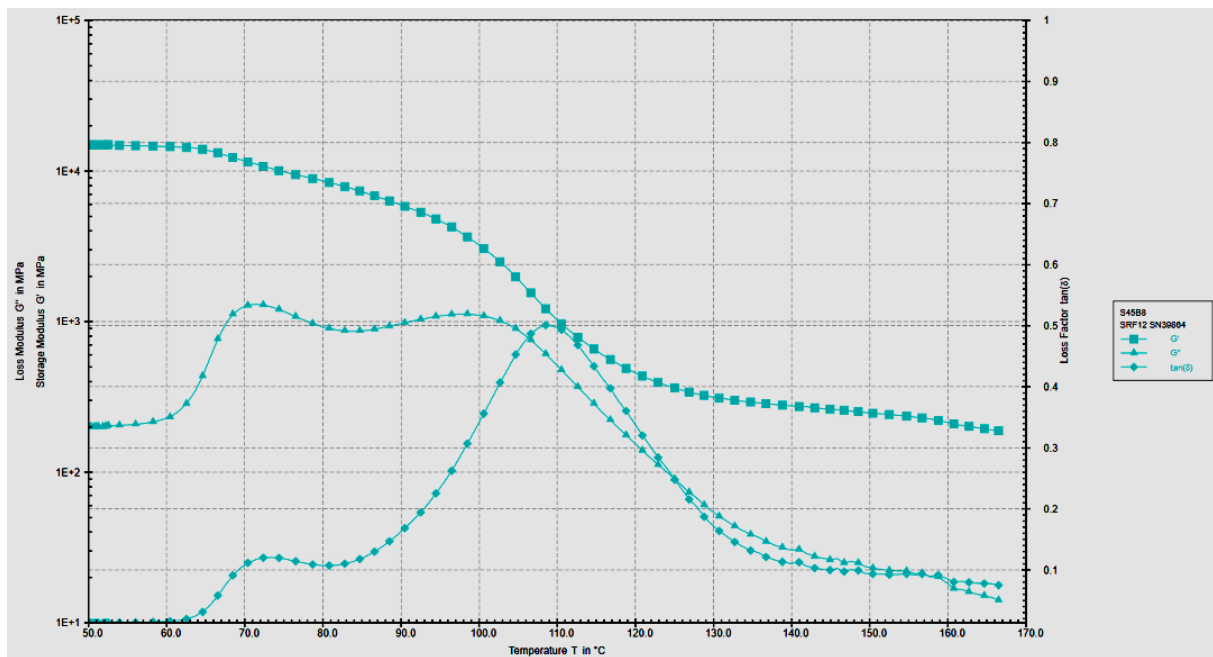
Слика 91. ФТИР спектри препрег + ПВБ + 0,3 mas.% INT-WS<sub>2</sub>

#### 4.5. РЕЗУЛТАТИ ДМТА АНАЛИЗЕ

Типичан изглед кривих за посматране величине  $G'$ ,  $G''$  и  $\text{tg}(\delta)$  ( $\tan(\delta)$ ) приказан је на сликама 92. и 93.



Слика 92. ФТИР спектри препрег + ПВБ + 0,3 mas.% INT-WS<sub>2</sub> са усмерењем 0°



Слика 93. ФТИР спектри препрег + ПБВ са усмерењем 45°

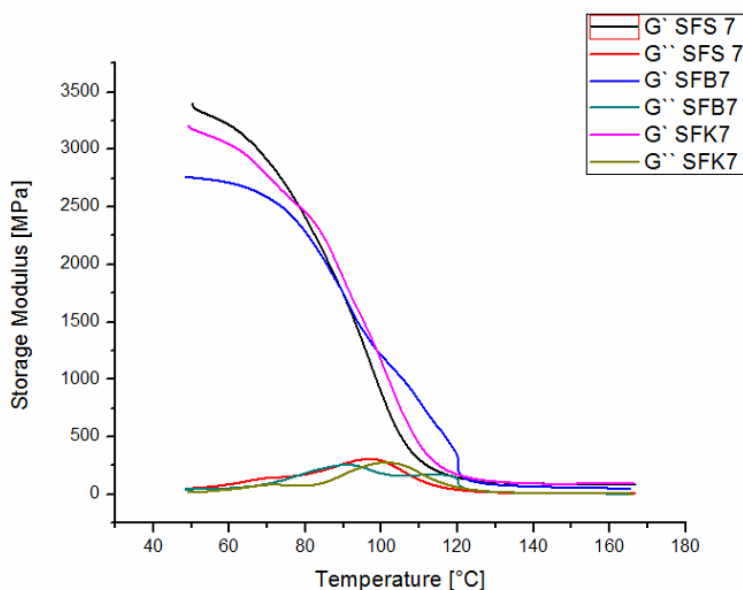
На издвојеним дијаграмима може се уочити изражени максимум криве  $\tan(\delta)$  у области око 110°C, која се посматра као температура стакластог прелаза, али и један благи локални максимум у областима око 70°C. Први, нижи прелаз на кривој везује се за тачку стакластог прелаза ПБВ, док се други везује за епокси компоненту полимерне матрице. У истим температурним областима уочавају се и промене на кривим модулима  $G'$  и  $G''$ , углавном веома благе, с обзиром на масени удео ПБВ у целокупној матрици.

Лево од тачке максимума  $\tan(\delta)$  полимерна матрица се налази у стакластом стању. У овој области, са повећањем температуре, вредности  $G'$  остају готово константне, док се  $G''$  вредности благо повећавају у региону у близини и око  $T_g$ . Порастом температуре изнад  $T_g$ , односно десно од максимума  $\tan(\delta)$ , уочава се смањење оба модула  $G'$  и  $G''$ . Овакво понашање је типично за сличне полимере у прелазној области. Како температура расте,  $G'$  опада, што је последица повећања молекуларне покретљивости загрејаних полимерних ланаца.  $G'$  је еластична компонента, мера крутости материјала и енергије која се враћа када престане дејство напона. Представља меру енергије деформације која се складишти у композитном материјалу током поступка торзионог смицања при овом испитивању и показује потпуно реверзибилно понашање деформације. С друге стране, модул  $G''$  је вискозна компонента, и представља изгубљену енергију кроз трење и молекуларне кретње.

Повећање вредности  $G''$  указује на повећан део енергије деформације који се користи пре него што дође до коначног распада унутрашње структуре. То се може догодити услед кретања између молекула, покретних појединачних честица, агломерата или структура које нису повезане или на други начин фиксиране у мрежи полимерне матрице.  $G'$  и  $G''$  смањују се с повећањем температуре, што је изазвано омекшавањем матрице на вишим температурама.

$T_g$  узорака са оријентацијом влакана таквим да матрица подноси напон ком су узорци при испитивању изложени, и који садрже  $WS_2$  наноојачање су померени према вишим температурама. Померање је настало услед ограничене покретљивости молекула полимера на интерфејсу полимерне матрице - наноојачања.

Слика 94. приказује зависност модула  $G'$  и  $G''$  за узорке с карбонским влакнима оријентисаним у правцу  $0^\circ$  са и без наноојачања.



Слика 94. ФТИР спектри препрег + ПВБ са усмерењем  $45^\circ$

Вредности температуре стакластог прелаза за тестиране узорке, узете на максимуму  $\tan (d)$ , дате су у табели 12.

Табела 12. Температуре стакластог прелаза

узорак	дужина [mm]	ширина [mm]	дебљина [mm]	$\tan (d)_{\max}$	$T_g$ [°C]
SØB 7	45,80	11,92	4,05	0,443	120,24
SØK 7	42,82	11,90	4,03	0,446	111,72
SØK 8	43,43	12,06	4,00	0,430	113,59
SØS 7	41,38	12,15	4,03	0,429	107,65
SØS 7	39,67	12,09	4,02	0,443	107,46
SØ9B 7	42,59	12,02	3,97	0,432	112,66
SØ9K 6	40,57	11,95	3,98	0,435	111,67
SØ9S 8	41,27	12,04	3,97	0,445	112,71
S45B 8	42,46	11,93	3,99	0,501	108,52
S45K 8	38,61	12,12	4,03	0,448	109,34
S45S 8	42,15	12,19	4,00	0,466	109,58

У групи узорака S45 уочава се благи пораст  $T_g$  захваљујући наноојачању, које делимично подноси напон увијања при овој оријентацији влакана, те се остварује побољшање термичке отпорности као у узорцима самих полимера [29, 76]

У групи узорака SØ9 напрезање у значајној мери трпе карбонска влакна те овде наноструктуре немају значајан утицај. Фулеренске наночестице су чак допринеле умањењу термичке отпорности, што је вероватно последица њиховог дејства као сувог

лубриканта – смањујући трење међу карбонским влакнима олакшавају њихову међусобну покретљивост при торзионом напрезању, што за последицу има благо смањење  $T_g$  код ових узорака.

Карбонска влакна носе оптерећење код узорака групе  $S\emptyset$ , полимерна матрица; тако да је овде израженија разлика у  $T_g$  последица смањења интерламинарног трења у композиту о олакшаној покретљивости карбонских влакана.

#### 4.6. РЕЗУЛТАТИ СТАТИЧКИХ МЕХАНИЧКИХ ИСПИТИВАЊА

##### 4.6.1. РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА НА ЗАТЕЗАЊЕ

##### 4.6.1.1. Резултати испитивања смоле

У табелама 13-15. дати су резултати испитивања затезних својстава три врсте епрувета чврсте смоле, а на сликама 95-97. дати су дијаграми напон - деформација испитаних епрувета. Табела 16. приказује упоредне резултате све три врсте епрувета. Слика 98. приказује упоредно средње вредности деформација по групама епрувета и изглед епрувета након кидања. Резултати испитивања су обрађени у програму *OriginPro 2016*.

Табела 13. Резултати испитивања епрувета ПВБ/епокси смола без наночестица

uzorak	d	b	$\delta$	Pmax	$\sigma_M$	E	$\epsilon$
	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[GPa]	[%]
B 1	1,70	6,00	6,98	188,50	18,48	65,08	13,96
B 2	1,85	6,00	9,37	173,00	15,58	47,90	18,73
B 3	2,00	6,00	4,85	167,50	13,96	47,46	9,70
B 4	1,90	6,00	5,35	171,50	15,04	50,76	10,69
B 5	1,90	6,00	7,88	169,00	14,83	48,01	15,76
B 6	1,80	6,00	9,10	159,00	14,72	37,75	18,19
srednja	1,86	6,00	7,25	171,42	15,44	49,49	14,51
odstupanje			1,88	9,69	1,58	8,85	3,77
% varijacije			25,97	5,65	10,24	17,87	25,97

Табела 14. Резултати испитивања епрувета ПВБ/епокси смола + 1 mas.% IF-WS<sub>2</sub>

uzorak	d	b	$\delta$	Pmax	$\sigma_M$	E	$\epsilon$
	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[GPa]	[%]
IF 1	2,30	6,00	17,54	156,00	11,31	15,18	35,08
IF 2	2,50	6,00	8,39	131,50	8,77	16,85	16,78
IF 3	2,20	6,00	11,47	120,00	9,09	12,76	22,94
IF 4	2,10	6,00	9,38	123,00	9,76	15,59	18,76
IF 5	2,10	6,00	7,46	118,50	9,40	18,95	14,92
IF 6	2,00	6,00	9,77	98,00	8,17	16,70	19,54
srednja	2,20	6,00	10,67	124,50	9,42	16,00	21,34
odstupanje			3,63	18,98	1,59	2,06	7,26
% varijacije			34,01	15,25	16,94	12,89	34,01

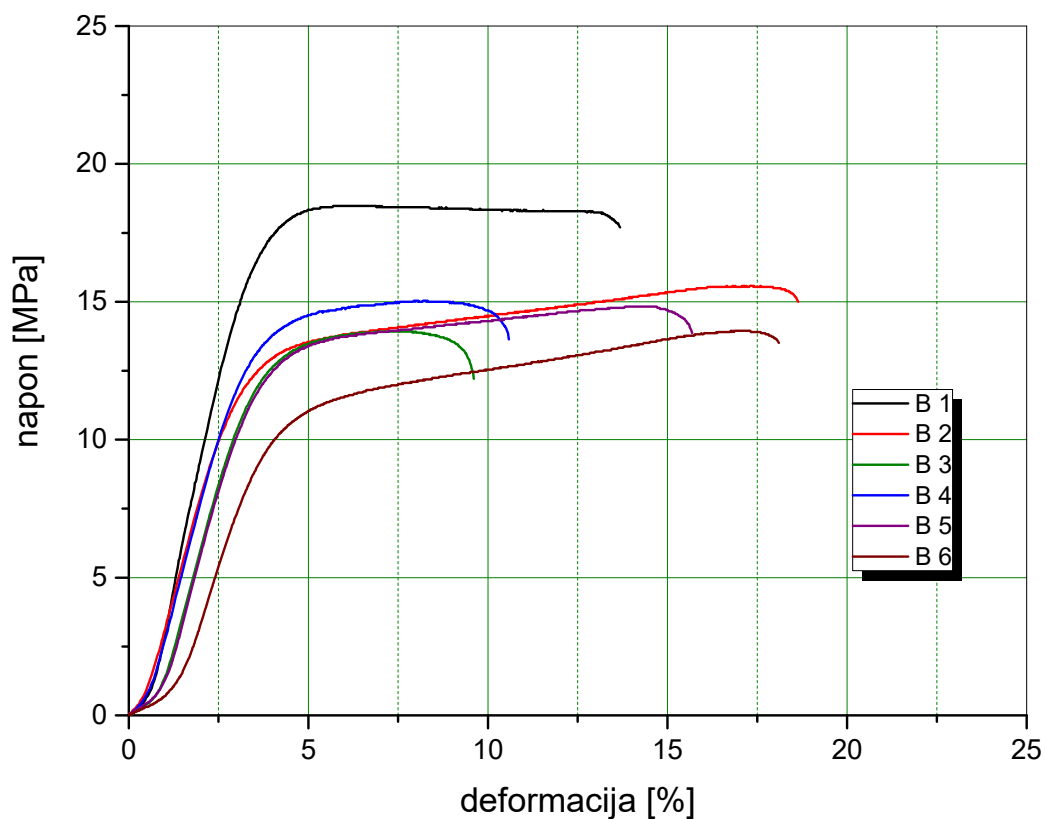


Табела 15. Резултати испитивања епрувета ПВБ/епокси смола + 0,3 мас.% INT-WS<sub>2</sub>

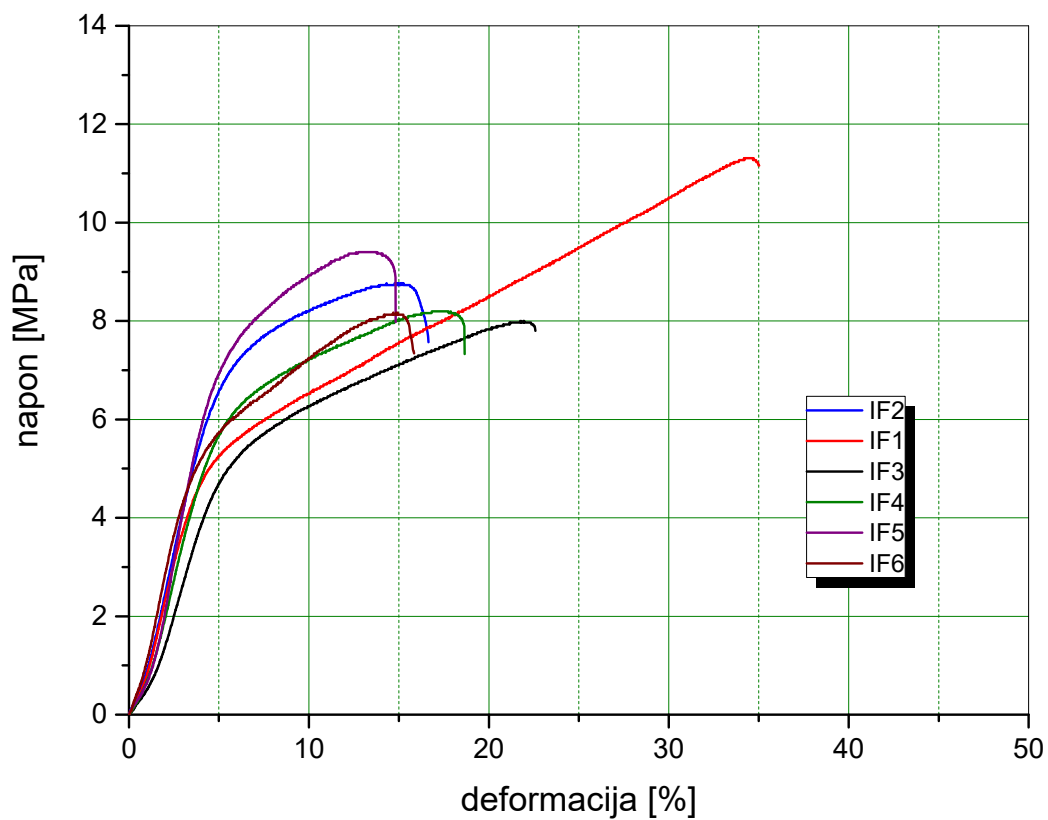
uzorak	d	b	δ	Pmax	σ <sub>M</sub>	E	ε
	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[MPa]	[GPa]	[%]
INT 1	2,10	6,00	13,13	139,50	11,07	19,92	26,26
INT 2	2,20	6,00	10,81	130,00	9,85	20,50	21,62
INT 3	2,20	6,00	13,15	121,00	9,16	14,88	26,30
INT 4	2,30	6,00	15,41	140,50	10,19	14,15	30,82
INT 5	2,30	6,00	12,86	126,00	9,13	14,99	25,72
INT 6	2,30	6,00	12,80	114,00	8,26	12,65	25,60
srednja	<b>2,23</b>	<b>6,00</b>	<b>13,03</b>	<b>128,50</b>	<b>9,61</b>	<b>16,18</b>	<b>26,05</b>
odstupanje			<b>1,46</b>	<b>10,39</b>	<b>0,98</b>	<b>3,24</b>	<b>2,93</b>
% varijacije			<b>11,22</b>	<b>8,09</b>	<b>10,18</b>	<b>20,00</b>	<b>11,23</b>

Табела 16. Упоредни резултати испитивања епрувета без и са наночестицама

ПВБ/епокси	δ	Pmax	σ <sub>M</sub>	E	ε
IF/B [%]	47,07	-27,37	-38,99	<b>-67,66</b>	<b>47,07</b>
INT/B [%]	79,60	-25,04	-37,74	<b>-67,31</b>	<b>79,59</b>

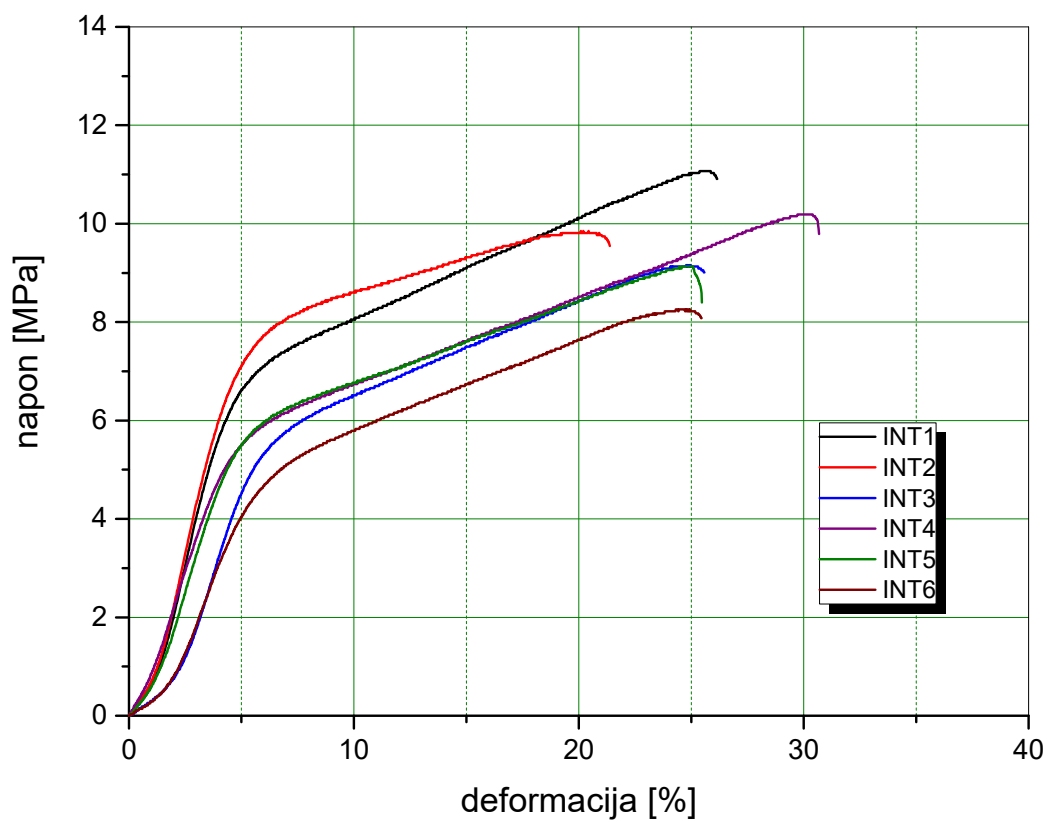


Слика 95. Дијаграм напон – деформација епрувета ПВБ/епокси смола без наночестица

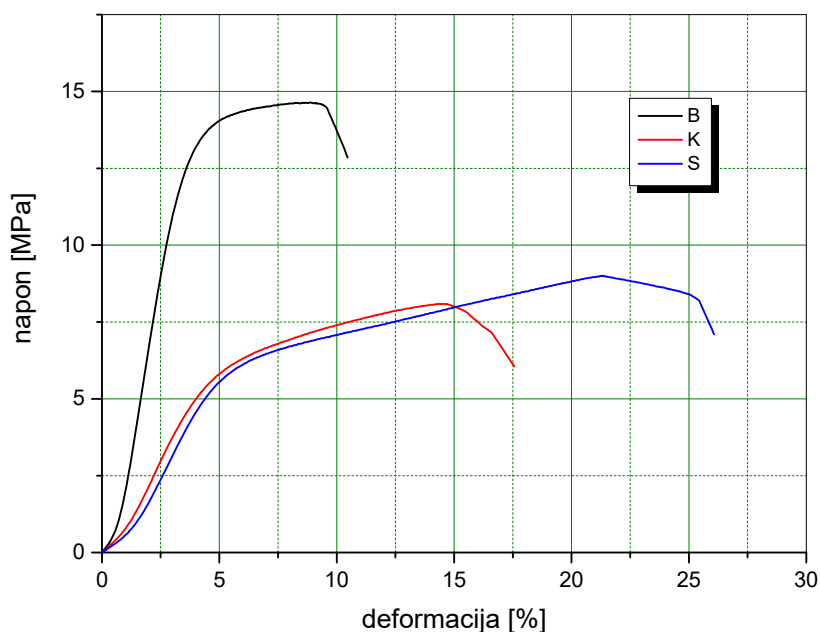


Слика 96. Дијаграм напон – деформација епрувета ПВБ/епокси +  
mas.% IF-WS<sub>2</sub>

1



Слика 97. Дијаграм напон – деформација епрувета ПВБ/епокси +  
0,3 mas.% INT-WS<sub>2</sub>



Слика 98. Упоредни дијаграм напон – деформација епрувета ПВБ/епокси смола са и без наночестица и епрувете после испитивања

Испитивање на затезање епрувета чврсте смоле према ASTM стандарду за затезање [74] показала су да додатак мале количине наночестица узрокује пад максималне силе  $25\div 27\%$  а према томе и затезне чврстоће  $38\div 39\%$ , као и пад модула еластичности  $67\div 68\%$ . Истовремено је побољшана дуктилност за смолу са IF-WS<sub>2</sub> од 47% а за смолу са INT-WS<sub>2</sub> чак 79%. Сличне ефекте имају WS<sub>2</sub> наноструктуре и у другим полимерима [77-79].

#### 4.6.1.2. Резултати испитивања композита оријентације 0°

У табелама 17-19. дати су резултати испитивања затезних својстава три врсте композитних епрувета без и са наночестицама, а на сликама 99-101. дати су дијаграми напон - деформација испитаних епрувета. Табела 20. приказује упоредне резултате све три врсте епрувета. Слика 102. приказује упоредно средње вредности деформација по групама епрувета и изглед епрувета након кидања. Резултати испитивања су обрађени у програму *OriginPro 2016*.

Табела 17. Резултати испитивања епрувета препрег + ПВБ, оријентације 0°

uzorak	b	d	δ	Pmax	σ <sub>1</sub>	E <sub>1</sub>	ε <sub>1</sub>
	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[GPa]	[%]
ZOB 01	15,42	3,06	0,59	22,72	481,40	206,36	0,24
ZOB 02	15,47	3,04	1,35	34,12	725,55	274,41	0,25
ZOB 03	15,48	3,03	1,51	36,21	772,06	301,30	0,26
ZOB 04	15,45	3,04	0,96	28,86	614,36	296,11	0,21
ZOB 05	15,45	3,03	1,35	31,70	677,16	310,45	0,22
srednja	15,45	3,04	30,72	654,11	277,73	0,24	1,15
odstupanje			5,25	112,87	42,04	0,02	0,38
% varijacije			17,09	17,25	15,14	9,71	32,57

Табела 18. Резултати испитивања епрувета препрег + ПВБ + 1 мас.% IF-WS<sub>2</sub>, оријентације 0°

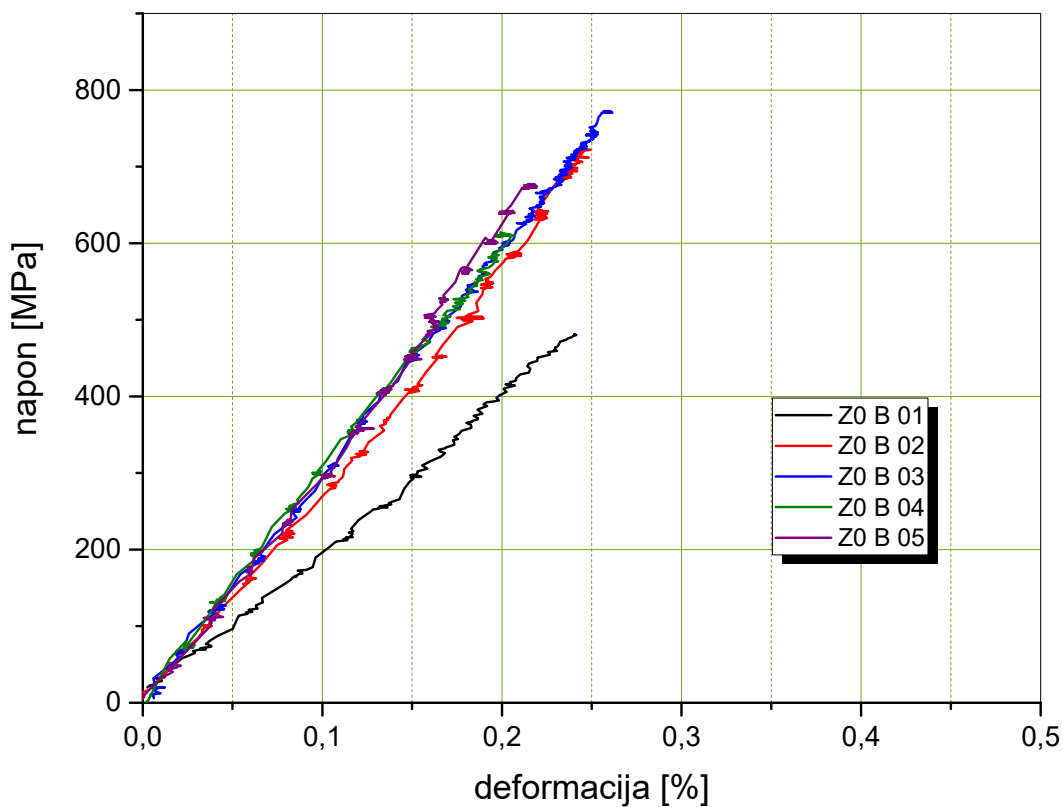
uzorak	b	d	δ	Pmax	σ <sub>1</sub>	E <sub>1</sub>	ε <sub>1</sub>
	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[GPa]	[%]
ZOK 01	15,46	3,21	6,00	40,15	808,97	295,41	0,29
ZOK 02	15,53	3,19	3,66	43,06	869,09	311,61	0,27
ZOK 03	15,44	3,19	1,05	31,16	632,69	300,13	0,21
ZOK 04	15,43	3,18	2,64	43,33	883,16	319,40	0,27
ZOK 05	15,47	3,18	2,35	42,76	869,17	301,44	0,27
<b>srednja</b>	<b>15,47</b>	<b>3,19</b>	<b>40,09</b>	<b>812,62</b>	<b>305,60</b>	<b>0,26</b>	<b>3,14</b>
<b>odstupanje</b>			<b>5,15</b>	<b>104,58</b>	<b>9,71</b>	<b>0,03</b>	<b>1,85</b>
<b>% varijacije</b>			<b>12,85</b>	<b>12,87</b>	<b>3,18</b>	<b>11,51</b>	<b>58,92</b>

Табела 19. Резултати испитивања епрувета препрег + ПВБ + 0,3 мас.% INT-WS<sub>2</sub>, оријентације 0°

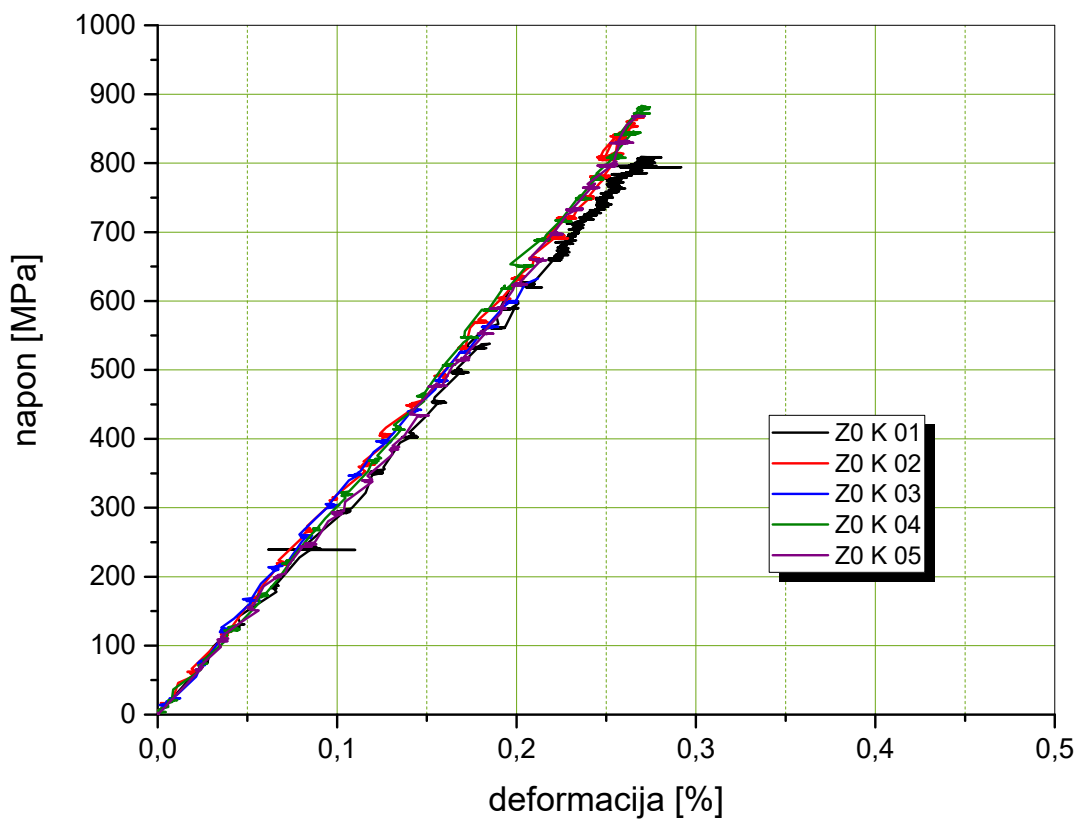
uzorak	b	d	δ	Pmax	σ <sub>1</sub>	E <sub>1</sub>	ε <sub>1</sub>
	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[GPa]	[%]
ZOS 01	15,49	3,01	1,85	36,42	781,10	291,94	0,27
ZOS 02	15,51	3,01	3,19	45,29	970,07	330,59	0,30
ZOS 03	15,50	2,99	1,77	34,21	738,06	301,26	0,22
ZOS 04	15,46	3,01	2,38	39,76	854,40	326,44	0,27
ZOS 05	15,62	2,99	2,75	39,15	838,18	329,11	0,25
<b>srednja</b>	<b>15,52</b>	<b>3,00</b>	<b>38,96</b>	<b>836,36</b>	<b>315,87</b>	<b>0,26</b>	<b>2,39</b>
<b>odstupanje</b>			<b>4,18</b>	<b>87,93</b>	<b>17,96</b>	<b>0,03</b>	<b>0,60</b>
<b>% varijacije</b>			<b>10,72</b>	<b>10,51</b>	<b>5,69</b>	<b>10,97</b>	<b>25,24</b>

Табела 20. Упоредни резултати испитивања епрувета без и са наночестицама, оријентације 0°

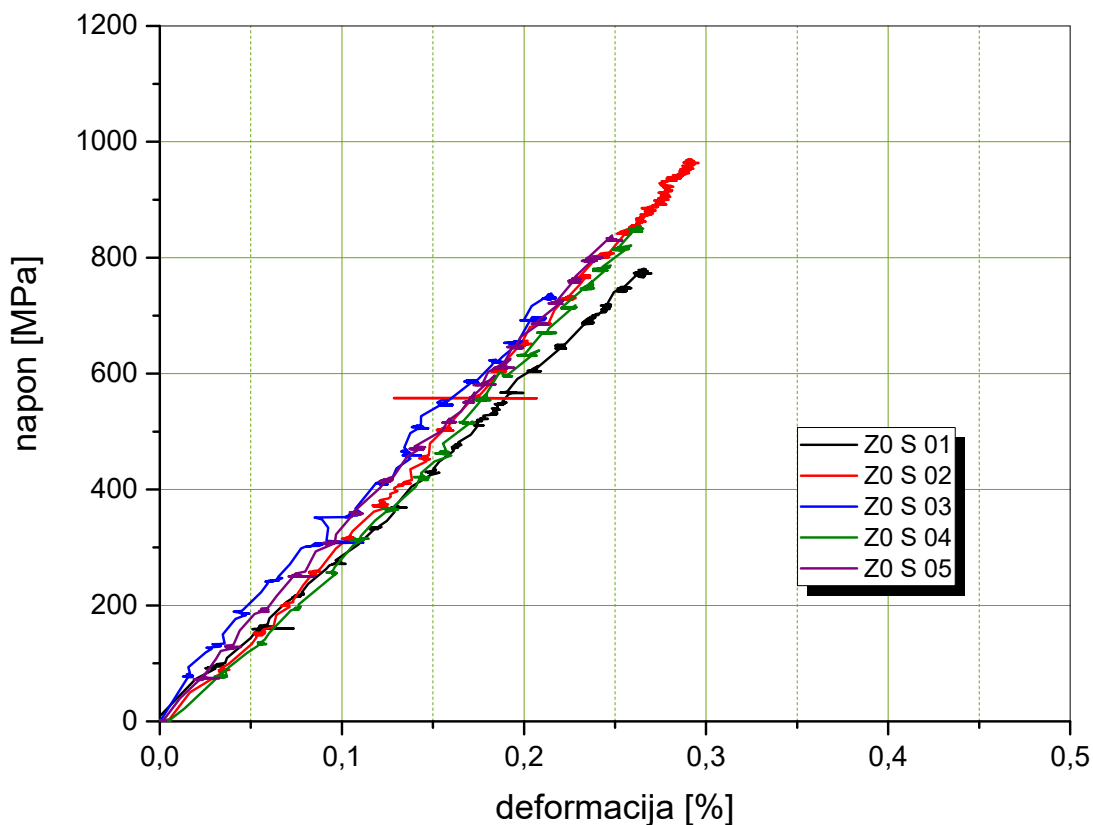
Z0	δ	Pmax	σ <sub>1</sub>	E <sub>1</sub>	ε <sub>1</sub>
IF/B [%]	<b>172,09</b>	30,50	24,23	<b>10,04</b>	<b>11,93</b>
INT/B [%]	<b>107,05</b>	26,83	27,86	<b>13,73</b>	<b>10,39</b>



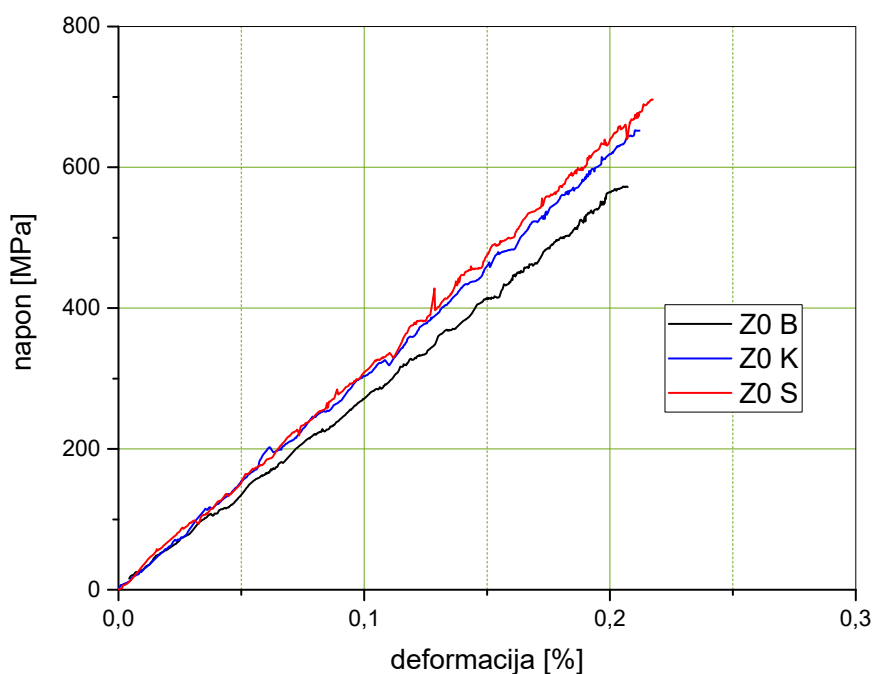
Слика 99. Дијаграм напон – деформација епрувета препрег + ПВБ без наночестица, оријентације 0°



Слика 100. Дијаграм напон – деформација епрувета препрег + ПВБ + 1 mas.% IF-WS<sub>2</sub>, оријентације 0°



Слика 101. Дијаграм напон – деформација епрувета препрег + ПВБ + 0,3 мас.% INT-WS<sub>2</sub>, оријентације 0°



Слика 102. Упоредни дијаграм напон – деформација препрег + ПВБ са и без наночестица оријентације 0° и епрувете после испитивања

Испитивање на затезање епрувета оријентације 0° према ASTM стандарду за затезање [55] показала су да додаток мале количине наночестица узрокује пораст максималне

силе 27÷30%, затезне чврстоће 24÷29% и раст модула еластичности са IF-WS<sub>2</sub> 10% а са INT-WS<sub>2</sub> 13,7%. Истовремено је побољшана дуктилност 10÷12%. С обзиром да је ово препрег изузетно високог модула еластичности ово су одлични резултати. Приметно и је знатно мање расипање резултата код композита са наночестицама [80].

#### 4.6.1.3. Резултати испитивања композита оријентације 90°

У табелама 21-23. дати су резултати испитивања затезних својстава три врсте композитних епрувета без и са наночестицама, а на сликама 103-105. дати су дијаграми напон - деформација испитаних епрувета. Табела 24. приказује упоредне резултате све три врсте епрувета. Слика 106. приказује упоредно средње вредности деформација по групама епрувета и изглед епрувета након кидања. Резултати испитивања су обрађени у програму *OriginPro 2016*.

Табела 21. Резултати испитивања епрувета препрег + ПББ, оријентације 90°

uzorak	b	d	δ	Pmax	σ <sub>2</sub>	E <sub>2</sub>	ε <sub>2</sub>
	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[GPa]	[%]
Z9B 01	25,20	3,21	0,38	0,74	9,14	4,99	0,19
Z9B 02	25,33	3,19	0,33	0,68	8,42	4,29	0,21
Z9B 03	25,28	3,20	0,29	0,63	7,78	4,29	0,20
<del>Z9B 04</del>	<del>25,35</del>	<del>3,17</del>	<del>0,24</del>	<del>0,51</del>	<del>6,28</del>	<del>6,47</del>	<del>0,12</del>
Z9B 05	25,27	3,17	0,36	0,75	9,36	4,35	0,29
srednja	<b>25,27</b>	<b>3,19</b>	<b>0,34</b>	<b>0,70</b>	<b>8,67</b>	<b>4,48</b>	<b>0,22</b>
odstupanje			<b>0,04</b>	<b>0,06</b>	<b>0,72</b>	<b>0,34</b>	<b>0,04</b>
% varijacije			<b>11,13</b>	<b>8,00</b>	<b>8,29</b>	<b>7,68</b>	<b>20,12</b>

Табела 22. Резултати испитивања епрувета препрег + ПББ + 1 mas.% IF-WS<sub>2</sub>, оријентације 90°

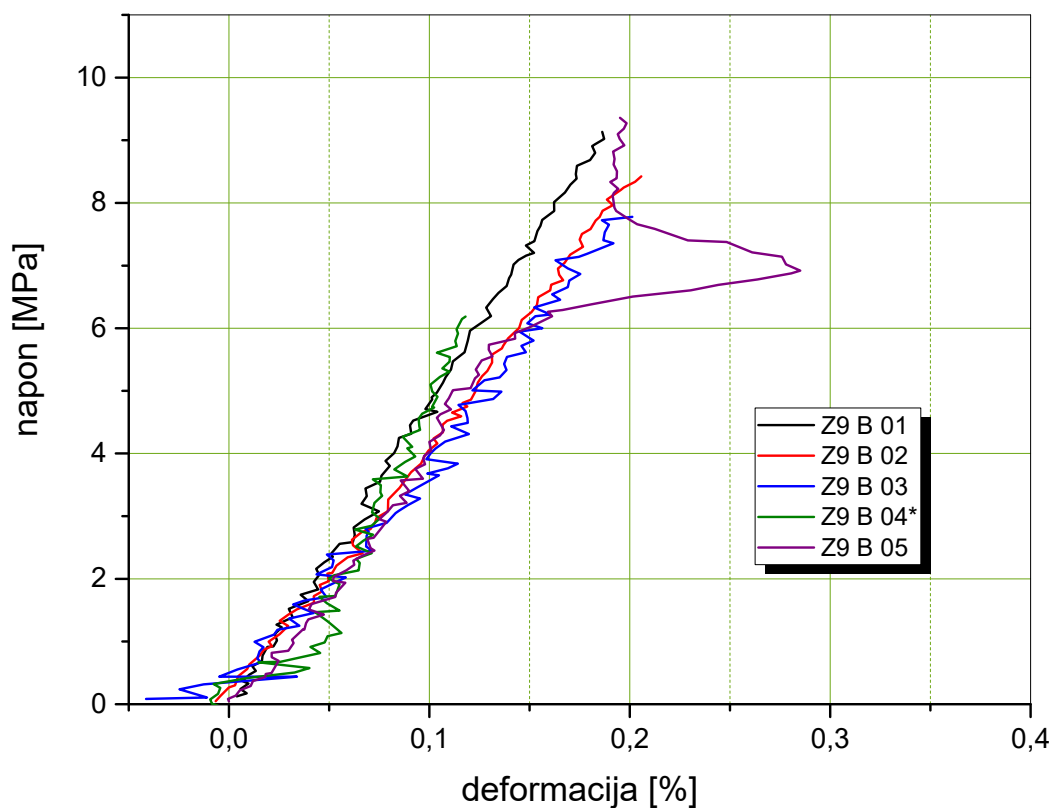
uzorak	b	d	δ	Pmax	σ <sub>2</sub>	E <sub>2</sub>	ε <sub>2</sub>
	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[GPa]	[%]
Z9K 01	25,27	3,19	0,34	0,72	8,93	4,75	0,19
<del>Z9K 02</del>	<del>25,36</del>	<del>3,18</del>	<del>0,32</del>	<del>0,72</del>	<del>8,94</del>	<del>4,12</del>	<del>0,18</del>
Z9K 03	25,40	3,17	0,56	1,26	15,67	4,60	0,33
Z9K 04	25,30	3,17	0,57	1,18	14,69	4,41	0,32
Z9K 05	25,31	3,16	0,44	0,89	11,14	5,16	0,23
srednja	<b>25,32</b>	<b>3,17</b>	<b>0,48</b>	<b>1,01</b>	<b>12,61</b>	<b>4,73</b>	<b>0,27</b>
odstupanje			<b>0,11</b>	<b>0,25</b>	<b>3,13</b>	<b>0,32</b>	<b>0,07</b>
% varijacije			<b>22,62</b>	<b>24,83</b>	<b>24,80</b>	<b>6,70</b>	<b>26,25</b>

Табела 23. Резултати испитивања епрувета препрег + ПББ + 0,3 мас.% INT-WS<sub>2</sub>, оријентације 90°

uzorak	b	d	δ	Pmax	σ <sub>2</sub>	E <sub>2</sub>	ε <sub>2</sub>
	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[GPa]	[%]
Z9S 01	25,27	3,10	0,47	0,93	11,87	4,41	0,27
Z9S 02	25,28	3,09	0,70	1,48	18,95	4,96	0,38
Z9S 03	25,40	3,11	0,58	0,95	11,97	5,03	0,24
<del>Z9S 04</del>	<del>25,28</del>	<del>3,09</del>	<del>0,50</del>	<del>1,11</del>	<del>14,17</del>	<del>6,38</del>	<del>0,23</del>
Z9S 05	25,33	3,10	0,44	0,91	11,52	5,13	0,22
srednja	<b>25,32</b>	<b>3,10</b>	<b>0,55</b>	<b>1,07</b>	<b>13,58</b>	<b>4,88</b>	<b>0,28</b>
odstupanje			<b>0,12</b>	<b>0,28</b>	<b>3,59</b>	<b>0,32</b>	<b>0,07</b>
% varijacije			<b>22,08</b>	<b>26,04</b>	<b>26,42</b>	<b>6,64</b>	<b>26,45</b>

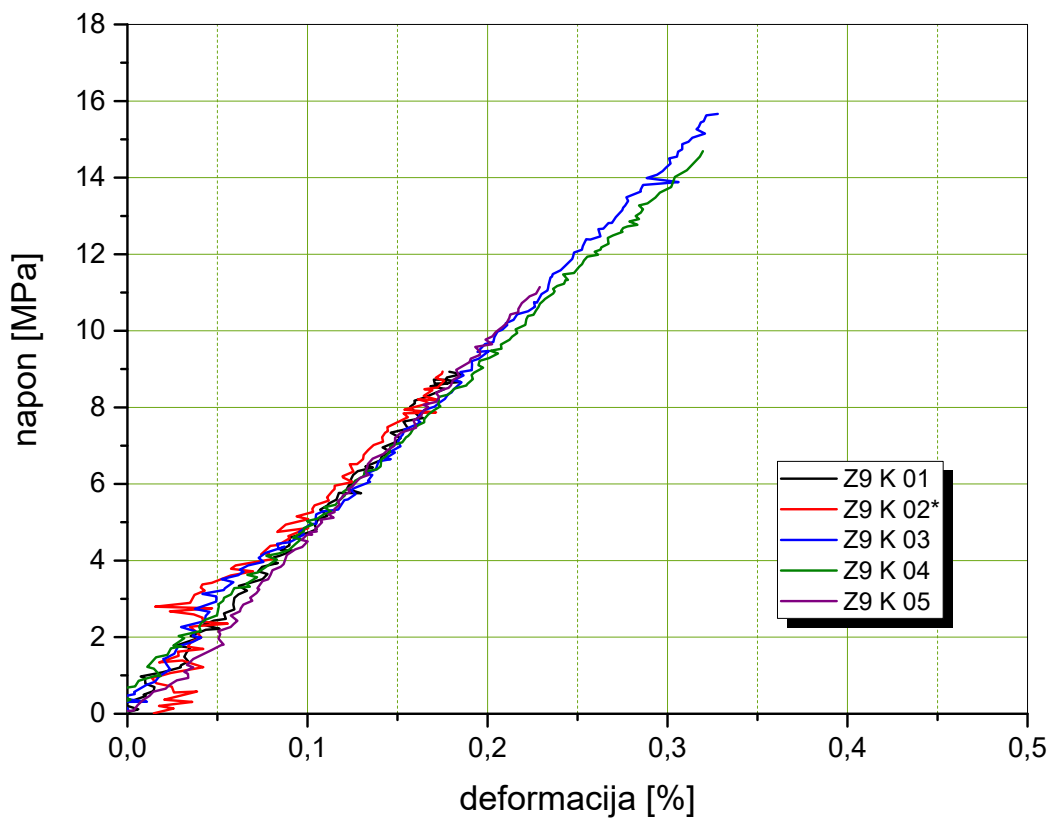
Табела 24. Упоредни резултати испитивања епрувета препрег + ПББ без и са наночестицама, оријентације 90°

Z9	δ	Pmax	σ <sub>2</sub>	E <sub>2</sub>	ε <sub>2</sub>
IF/B [%]	41,56	44,75	45,35	<b>5,61</b>	20,78
INT/B [%]	60,67	52,25	56,55	<b>8,99</b>	26,21

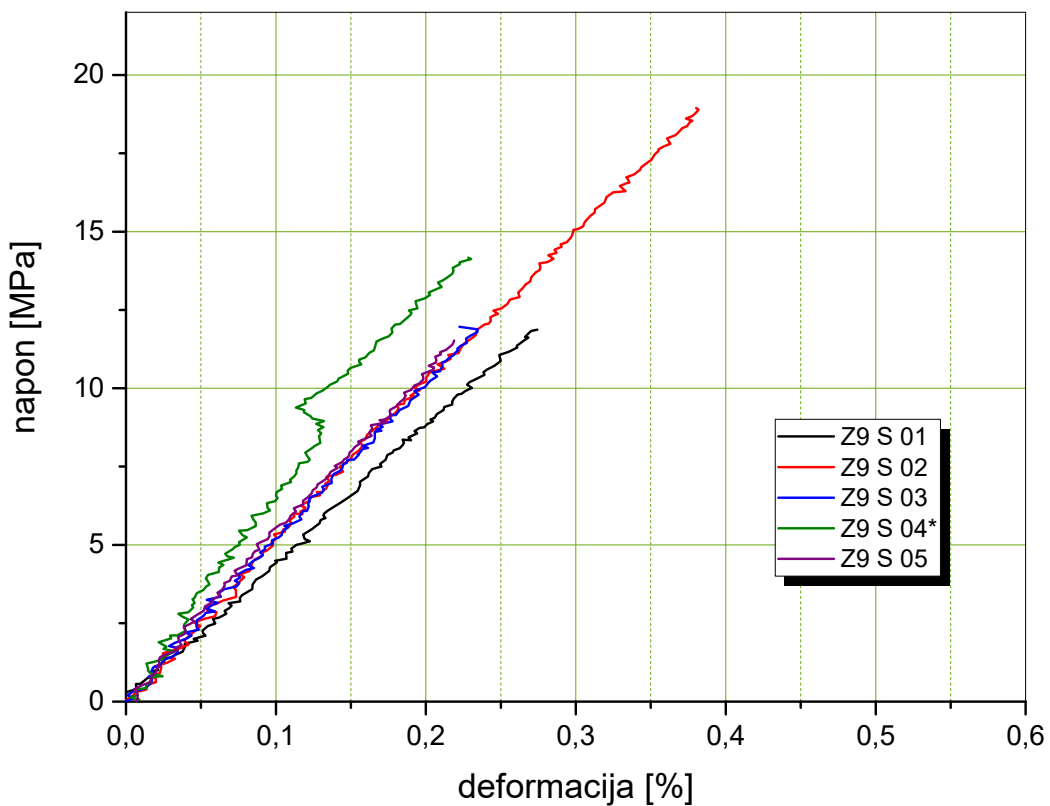


Слика 103. Дијаграм напон – деформација епрувета препрег + ПББ без наночестица, оријентације 90°

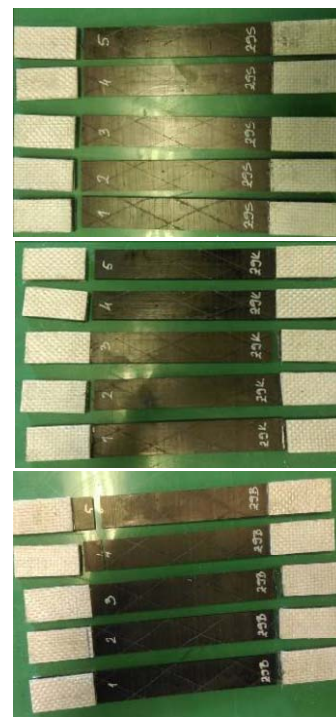
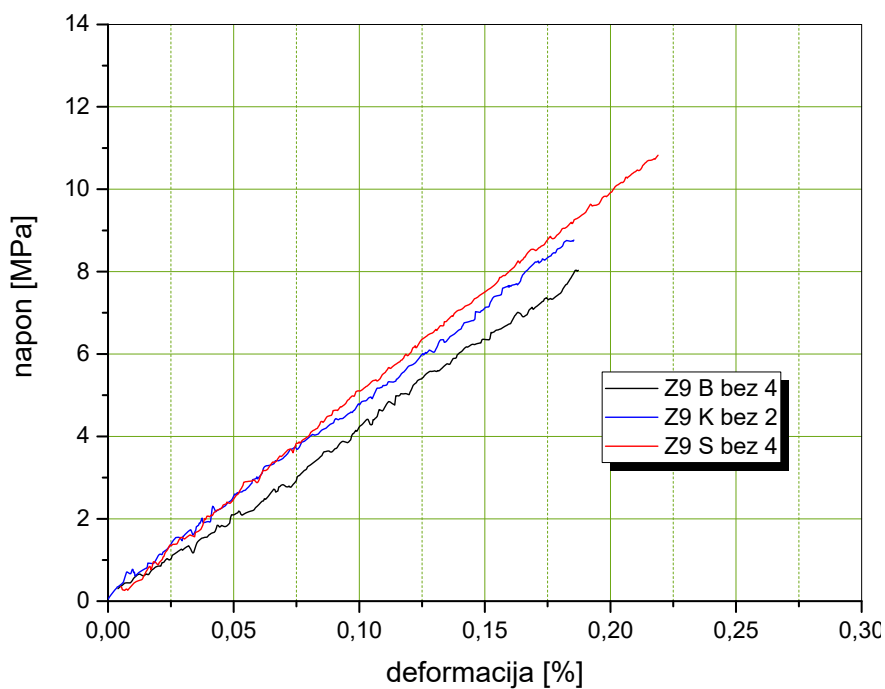




Слика 104. Дијаграм напон – деформација епрувета препрег + ПВБ + 1 мас.% IF-WS<sub>2</sub>, оријентације 90°



Слика 105. Дијаграм напон – деформација епрувета препрег + ПВБ + 0,3 мас.% INT-WS<sub>2</sub>, оријентације 90°



Слика 106. Упоредни дијаграм напон – деформација препрег + ПВБ са и без наночестица оријентације  $90^\circ$  и епрувете после испитивања

Испитивање композитних епрувета оријентације  $90^\circ$  је било скопчано са низом проблема јер су се епрувете увијале у чељустима кидалице под тежином екстензометра. Зато су и дијаграми пуни осцилација и у свакој серији је по неко испитивање морало бити одбачено због нерегуларности мерења. Утицај присутних наночестица и наноцеви волфрам дисулфида на еластичност композита је најизраженији код епрувета са слагањем нити  $90^\circ$  (попречна) јер се ту пре свега огледају карактеристике саме смоле. Приметно је да је дошло до повећања силе кидања као и затезне чврстоће од 45% са додатком IF-WS<sub>2</sub> (модул 5,6%). Додатком INT-WS<sub>2</sub> је дошло до повећања силе кидања 52% као и затезне чврстоће од 56,5% (модул 9%). Осим тога повећала се и дуктилност од 21% до 26%.

#### 4.6.1.4. Резултати испитивања композита оријентације $0^\circ/90^\circ$

У табелама 25-27. дати су резултати испитивања затезних својстава три врсте композитних епрувета без и са наночестицама, а на сликама 107-109. дати су дијаграми напон - деформација испитаних епрувета. Табела 28. приказује упоредне резултате све три врсте епрувета. Слика 110. приказује упоредно средње вредности деформација по групама епрувета и изглед епрувета након кидања. Резултати испитивања су обрађени у програму *OriginPro 2016*.

Табела 25. Резултати испитивања епрувета препрег + ПВБ, оријентације 0°/90°

uzorak	b	d	$\delta$	Pmax	$\sigma_{lt}$	$E_{lt}$	$\epsilon_{lt}$
	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[GPa]	[%]
Z09B 01	25,40	3,10	1,12	41,58	528,00	172,00	0,31
Z09B 02	25,38	3,08	0,38	47,16	603,34	166,59	0,38
Z09B 03	25,42	3,09	1,22	39,87	507,62	174,54	0,30
Z09B 04	25,42	3,09	3,79	45,21	575,59	187,39	0,32
Z09B 05	25,35	3,06	1,18	38,57	497,20	175,41	0,29
srednja	<b>25,39</b>	<b>3,08</b>	<b>1,54</b>	<b>42,48</b>	<b>542,35</b>	<b>175,19</b>	<b>0,32</b>
odstupanje			<b>1,31</b>	<b>3,62</b>	<b>45,48</b>	<b>7,64</b>	<b>0,03</b>
% varijacije			<b>85,11</b>	<b>8,51</b>	<b>8,39</b>	<b>4,36</b>	<b>10,75</b>

Табела 26. Резултати испитивања епрувета препрег + ПВБ + 1 mas.% IF-WS<sub>2</sub>, оријентације 0°/90°

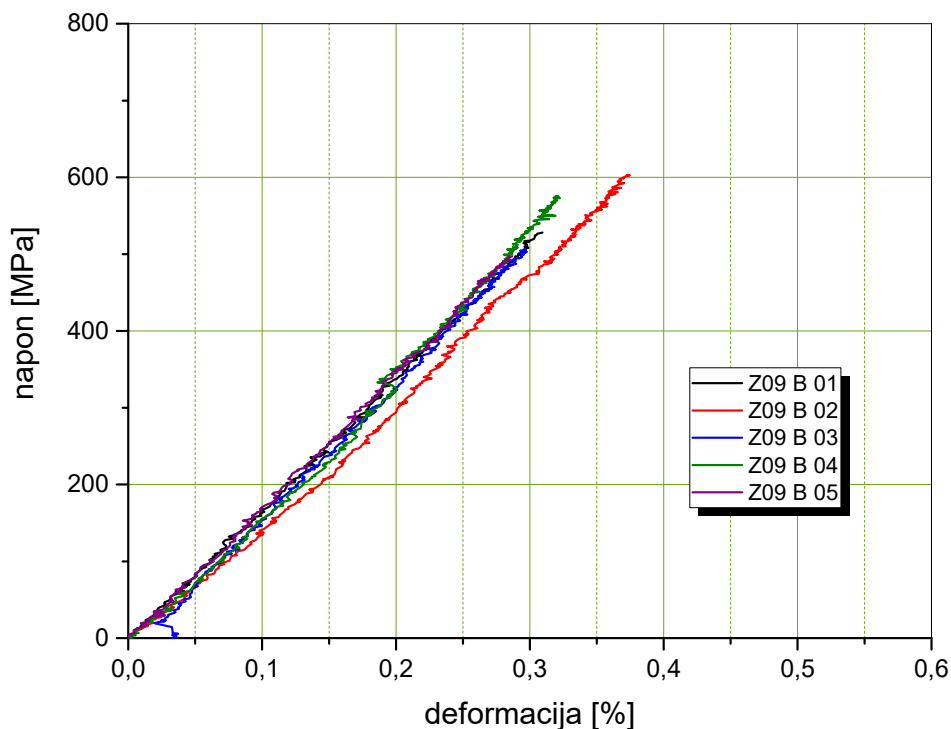
uzorak	b	d	$\delta$	Pmax	$\sigma_{lt}$	$E_{lt}$	$\epsilon_{lt}$
	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[GPa]	[%]
Z09K 01	25,44	2,90	1,04	33,06	448,13	168,64	0,27
Z09K 02	25,40	2,90	1,42	41,55	564,01	187,44	0,31
Z09K 03	25,41	2,93	2,86	44,17	593,21	194,03	0,27
Z09K 04	25,45	2,94	1,42	38,37	512,80	162,67	0,32
Z09K 05	24,76	2,93	1,46	36,35	501,01	159,72	0,31
srednja	<b>25,29</b>	<b>2,92</b>	<b>1,64</b>	<b>38,70</b>	<b>523,83</b>	<b>174,50</b>	<b>0,30</b>
odstupanje			<b>0,70</b>	<b>4,34</b>	<b>56,57</b>	<b>15,34</b>	<b>0,02</b>
% varijacije			<b>42,79</b>	<b>11,22</b>	<b>10,80</b>	<b>8,79</b>	<b>8,25</b>

Табела 27. Резултати испитивања епрувета препрег + ПВБ + 0,3 mas.% INT-WS<sub>2</sub>, оријентације 0°/90°

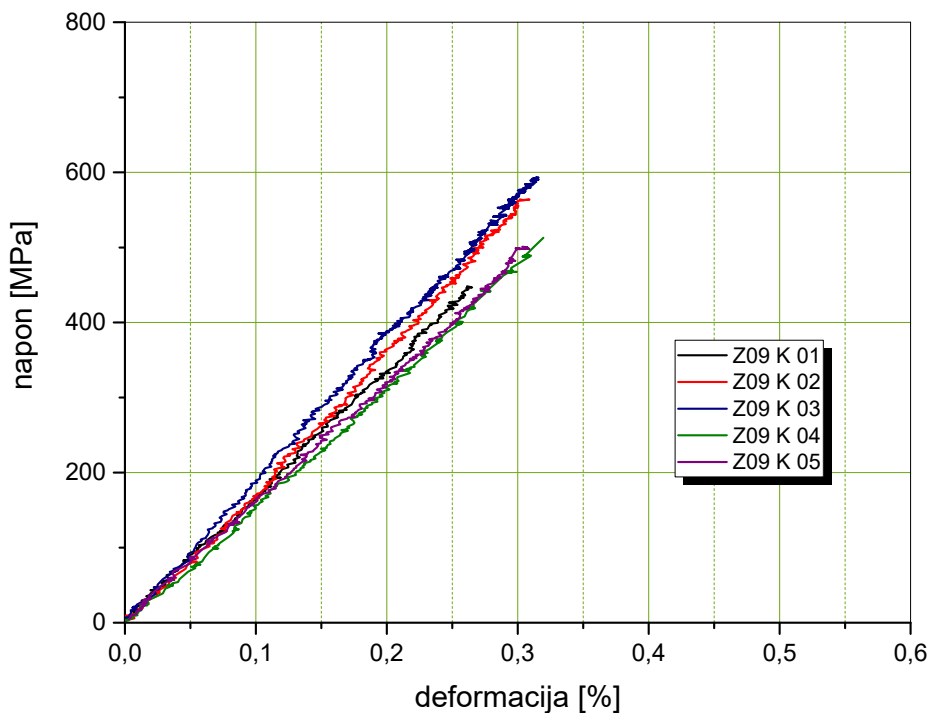
uzorak	b	d	$\delta$	Pmax	$\sigma_{lt}$	$E_{lt}$	$\epsilon_{lt}$
	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[GPa]	[%]
Z09S 01	25,40	3,02	1,49	39,95	520,85	151,96	0,34
Z09S 02	25,35	3,02	1,36	42,20	551,24	162,67	0,34
Z09S 03	25,42	3,01	1,63	43,95	574,44	172,78	0,33
Z09S 04	25,40	3,00	2,02	48,58	637,54	170,11	0,38
Z09S 05	25,30	3,02	1,25	40,77	533,56	172,44	0,21
srednja	<b>25,393</b>	<b>3,013</b>	<b>1,62</b>	<b>43,67</b>	<b>571,02</b>	<b>164,38</b>	<b>0,35</b>
odstupanje			<b>0,29</b>	<b>3,66</b>	<b>49,48</b>	<b>9,32</b>	<b>0,02</b>
% varijacije			<b>17,73</b>	<b>8,38</b>	<b>8,67</b>	<b>5,67</b>	<b>5,42</b>

Табела 28. Упоредни резултати испитивања епрувета без и са наночестицама, оријентације 0°/90°

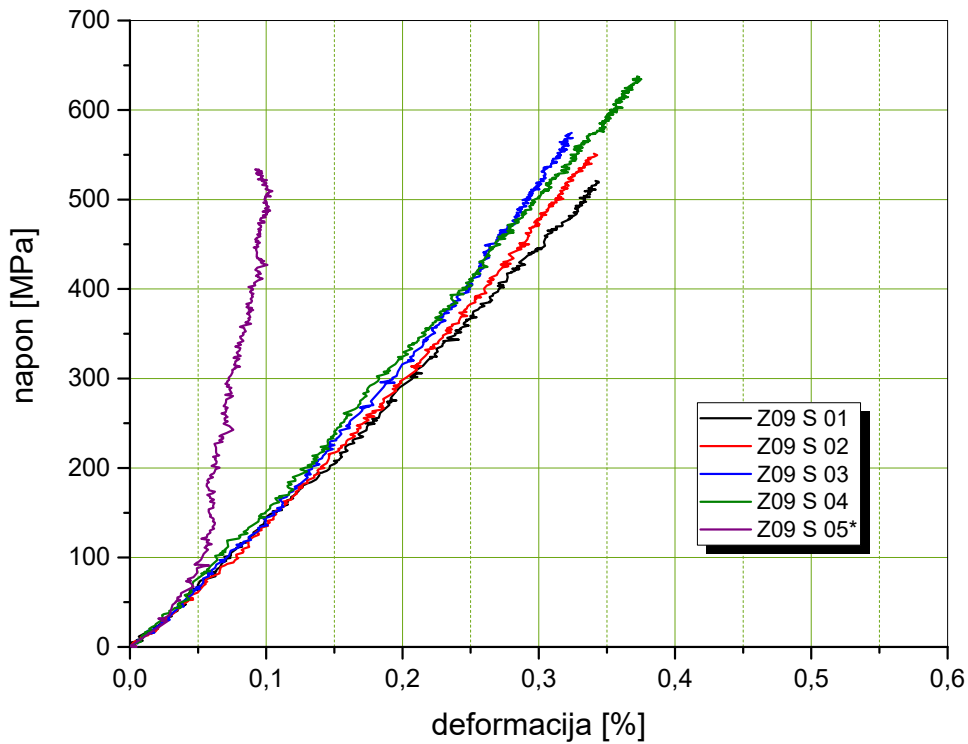
Z09	$\delta$	Pmax	$\sigma_{lt}$	$E_{lt}$	$\epsilon_{lt}$
IF/B [%]	6,69	-8,90	-3,41	-0,39	-7,33
INT/B [%]	5,76	2,81	5,29	-6,17	9,68



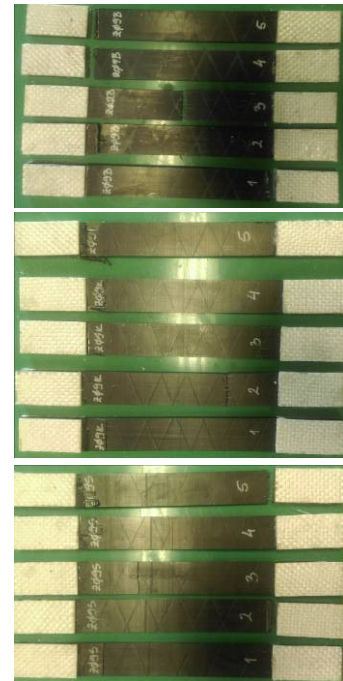
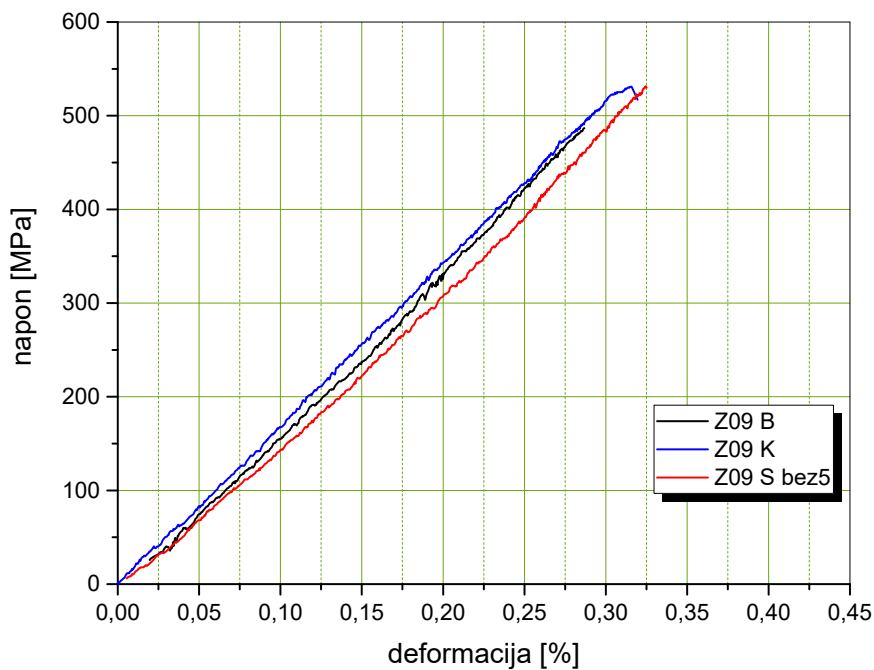
Слика 107. Дијаграм напон – деформација епрувета препрег + ПВБ без наночестица, оријентације 0°/90°



Слика 108. Дијаграм напон – деформација епрувета препрег + ПВБ + 1 mas.% IF-WS<sub>2</sub>, оријентације 0°/90°



Слика 109. Дијаграм напон – деформација епрувета препрег + ПВБ + 0,3 мас.% INT-WS<sub>2</sub>, оријентације 0°/90°



Слика 110. Упоредни дијаграм напон – деформација препрег + ПВБ са и без наночестица оријентације 0°/90° и епрувете после испитивања

Из резултата се може закључити да IF-WS<sub>2</sub> снижава све параметре: максималну силу за 9%, затезну чврстоћу за 3,4%, дуктилност за 7%, а модуо еластичности је практично исти. Наночестице INT-WS<sub>2</sub> повећавају максималну силу за 2,8%, затезну чврстоћу за 5,3% и дуктилност за 9,7%, али снижавају модуо еластичности за 6%.

#### 4.6.1.5. Резултати испитивања композита оријентације $\pm 45^\circ$

У табелама 29-31. дати су резултати испитивања затезних својстава три врсте композитних епрувета без и са наночестицама, а на сликама 111-113. дати су дијаграми напон - деформација испитаних епрувета. Табела 32. приказује упоредне резултате све три врсте епрувета. Слика 114. приказује упоредно средње вредности деформација по групама епрувета и изглед епрувета након кидања. Резултати испитивања су обрађени у програму *OriginPro 2016*.

Табела 29. Резултати испитивања епрувета препрег + ПББ, оријентације  $\pm 45^\circ$

uzorak	b	d	$\delta$	Pmax	$\sigma_x$	$\tau_{12}$	$E_x$	$\epsilon_x$
	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[GPa]	[%]
Z45B 01	25,06	2,96	10,88	7,69	103,60	51,80	13,68	5,87
Z45B 02	25,07	2,95	10,84	7,78	105,14	52,57	12,84	9,52
Z45B 03	25,09	2,94	14,25	8,11	109,99	54,99	12,77	11,54
Z45B 04	25,04	2,92	12,88	7,73	105,77	52,89	12,91	8,33
srednja	<b>25,07</b>	<b>2,94</b>	<b>12,21</b>	<b>7,83</b>	<b>106,13</b>	<b>53,06</b>	<b>13,05</b>	<b>8,82</b>
odstupanje			<b>1,66</b>	<b>0,19</b>	<b>2,73</b>	<b>1,37</b>	<b>0,42</b>	<b>2,37</b>
% varijacije			<b>13,61</b>	<b>2,48</b>	<b>2,58</b>	<b>2,57</b>	<b>3,24</b>	<b>26,86</b>

Табела 30. Резултати испитивања епрувета препрег + ПББ + 1 mas.% IF-WS<sub>2</sub>, оријентације  $\pm 45^\circ$

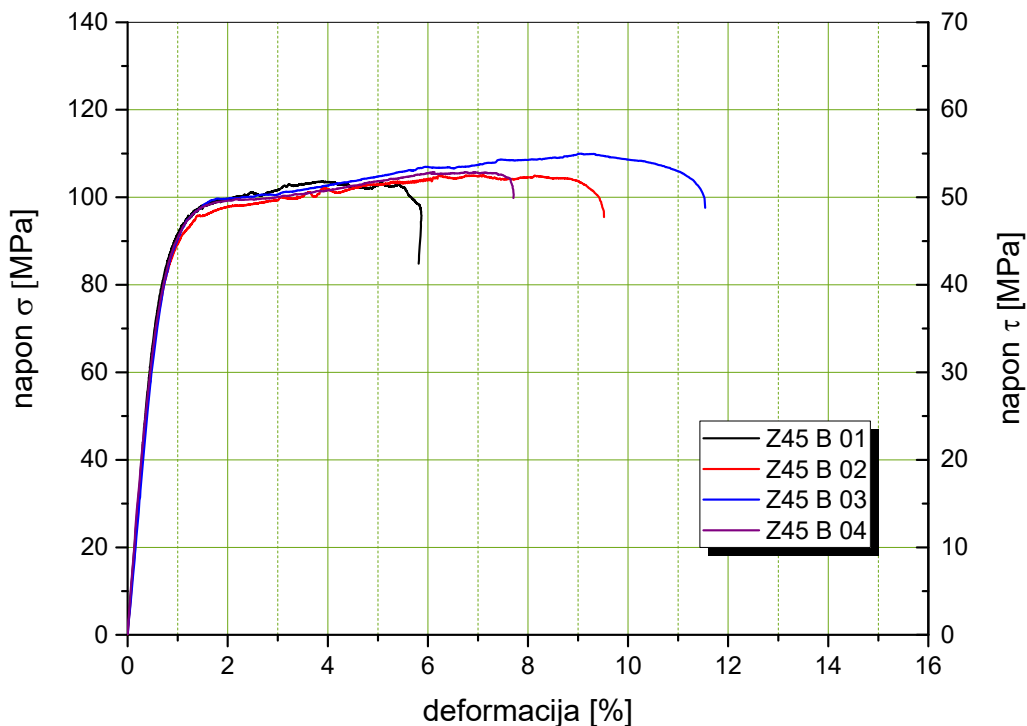
uzorak	b	d	$\delta$	Pmax	$\sigma_x$	$\tau_{12}$	$E_x$	$\epsilon_x$
	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[GPa]	[%]
Z45K 01	24,99	2,87	9,09	7,39	103,01	51,50	13,10	4,80
Z45K 02	24,89	2,81	6,58	7,18	102,69	51,35	12,61	3,01
Z45K 03	25,06	2,82	10,48	7,25	102,56	51,28	12,64	6,93
Z45K 04	25,04	2,83	8,42	7,22	101,87	50,93	12,84	5,30
srednja	<b>24,99</b>	<b>2,83</b>	<b>8,64</b>	<b>7,26</b>	<b>102,53</b>	<b>51,27</b>	<b>12,80</b>	<b>5,01</b>
odstupanje			<b>1,62</b>	<b>0,09</b>	<b>0,48</b>	<b>0,24</b>	<b>0,23</b>	<b>1,61</b>
% varijacije			<b>18,76</b>	<b>1,24</b>	<b>0,47</b>	<b>0,47</b>	<b>1,77</b>	<b>32,22</b>

Табела 31. Резултати испитивања епрувета препрег + ПББ + 0,3 mas.% INT-WS<sub>2</sub>, оријентације  $\pm 45^\circ$

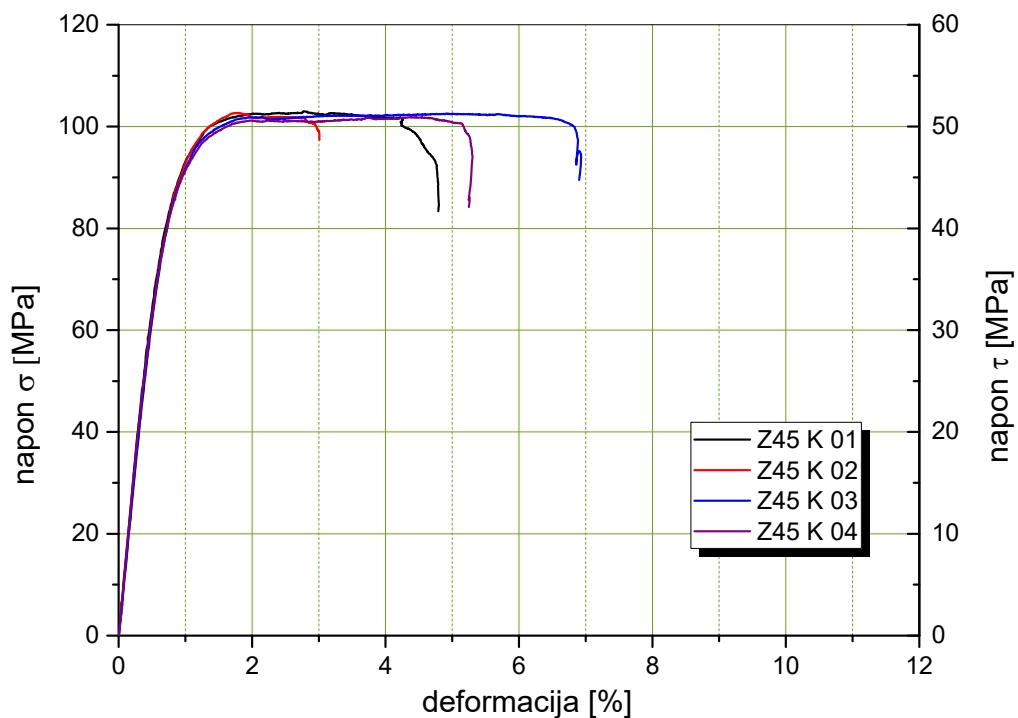
uzorak	b	d	$\delta$	Pmax	$\sigma_x$	$\tau_{12}$	$E_x$	$\epsilon_x$
	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[GPa]	[%]
Z45S 01	25,05	2,85	10,56	7,68	107,55	53,77	13,29	9,06
Z45S 02	24,96	2,82	9,02	7,25	103,00	51,50	12,35	4,77
Z45S 03	25,01	2,79	12,06	7,06	101,21	50,61	13,10	7,93
Z45S 04	25,04	2,79	8,99	6,96	99,58	49,79	12,58	5,02
srednja	<b>25,02</b>	<b>2,81</b>	<b>10,16</b>	<b>7,24</b>	<b>102,84</b>	<b>51,42</b>	<b>12,83</b>	<b>6,70</b>
odstupanje			<b>1,47</b>	<b>0,32</b>	<b>3,44</b>	<b>1,72</b>	<b>0,44</b>	<b>2,13</b>
% varijacije			<b>14,45</b>	<b>4,40</b>	<b>3,34</b>	<b>3,34</b>	<b>3,41</b>	<b>31,82</b>

Табела 32. Упоредни резултати испитивања епрувета без и са наночестицама, оријентације  $\pm 45^\circ$

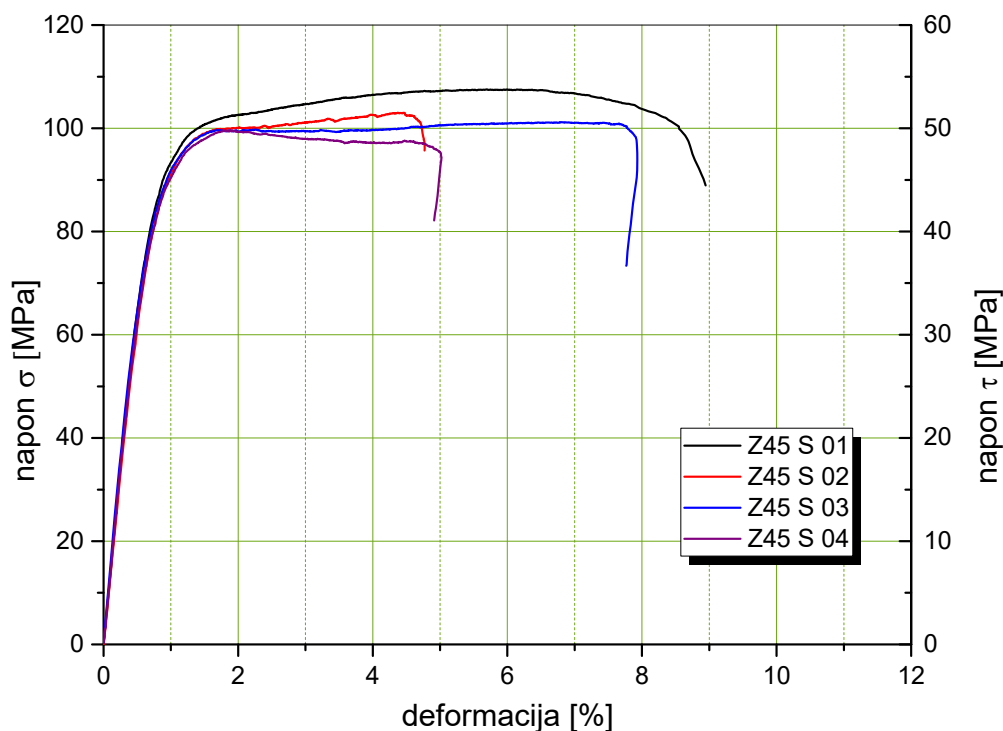
Z45	$\delta$	Pmax	$\sigma_x$	$\tau_{12}$	$E_x$	$\epsilon_x$
IF/B [%]	-29,23	-7,25	-3,39	-3,39	-1,93	-43,16
INT/B [%]	-16,84	-7,54	-3,10	-3,10	-1,67	-24,05



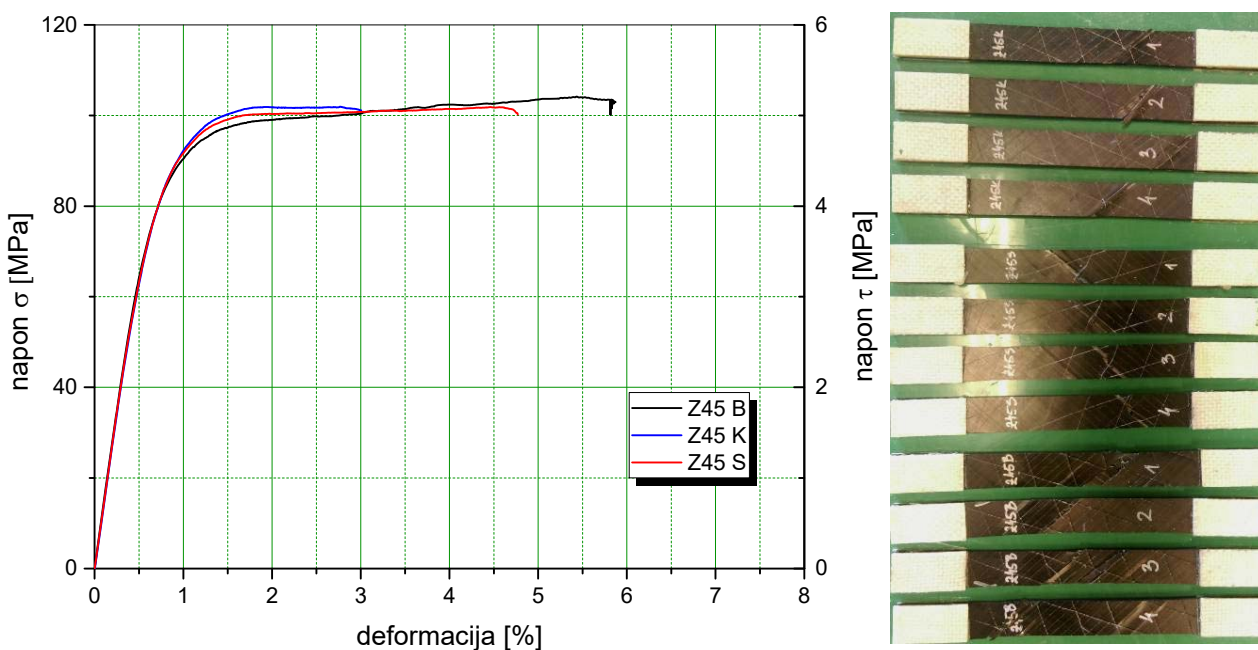
Слика 111. Дијаграм напон – деформација епрувета препрег + ПВБ без наночестица, оријентације  $\pm 45^\circ$



Слика 112. Дијаграм напон – деформација епрувета препрег + ПВБ + 1 mas.% IF-WS<sub>2</sub>, оријентације  $\pm 45^\circ$



Слика 113. Дијаграм напон – деформација епрувета препрег + ПВБ + 0,3 мас.% INT-WS<sub>2</sub>, оријентације ±45°



Слика 114. Упоредни дијаграм напон – деформација препрег + ПВБ са и без наночестица оријентације ±45° и епрувете после испитивања

Из резултата се може закључити да IF-WS<sub>2</sub> снижава све параметре: максималну силу за 7%, затезну и смицајну чврстоћу за 3,4%, моду еластичности за 2% а дуктилност чак за 43%. Наночестице INT-WS<sub>2</sub> смањују максималну силу за 7,5%, затезну и смицајну чврстоћу за 3,1%, моду еластичности за 1,7%, а дуктилност за 24%. На преломима су приметне деламинације и истезања, слојеви клизају један преко другог [81].

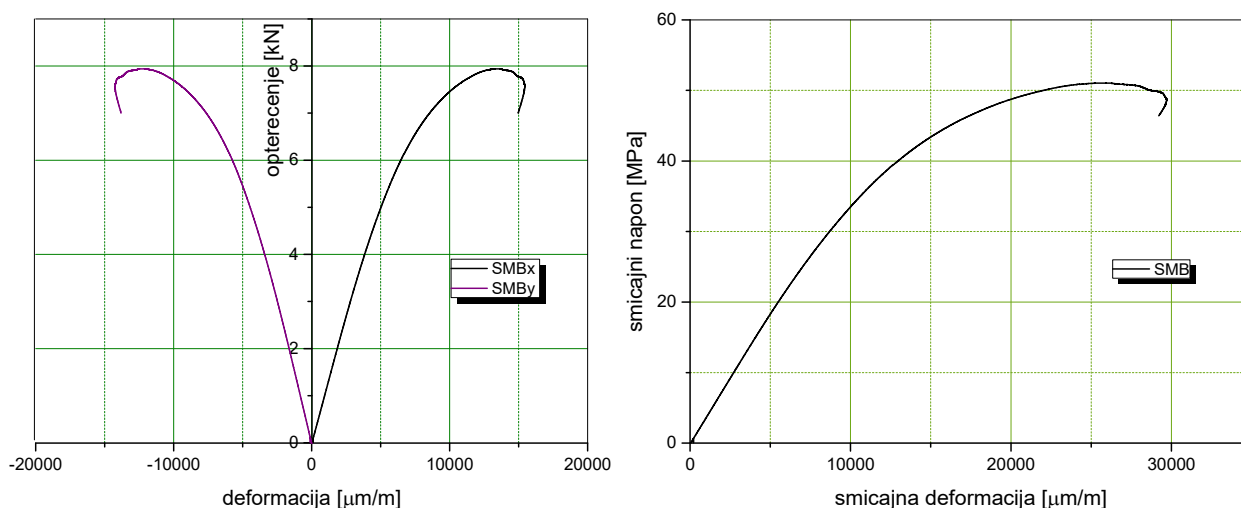


#### 4.6.2. РЕЗУЛТАТИ ОДРЕЂИВАЊА ПОАСОНОВОГ КОЕФИЦИЈЕНТА

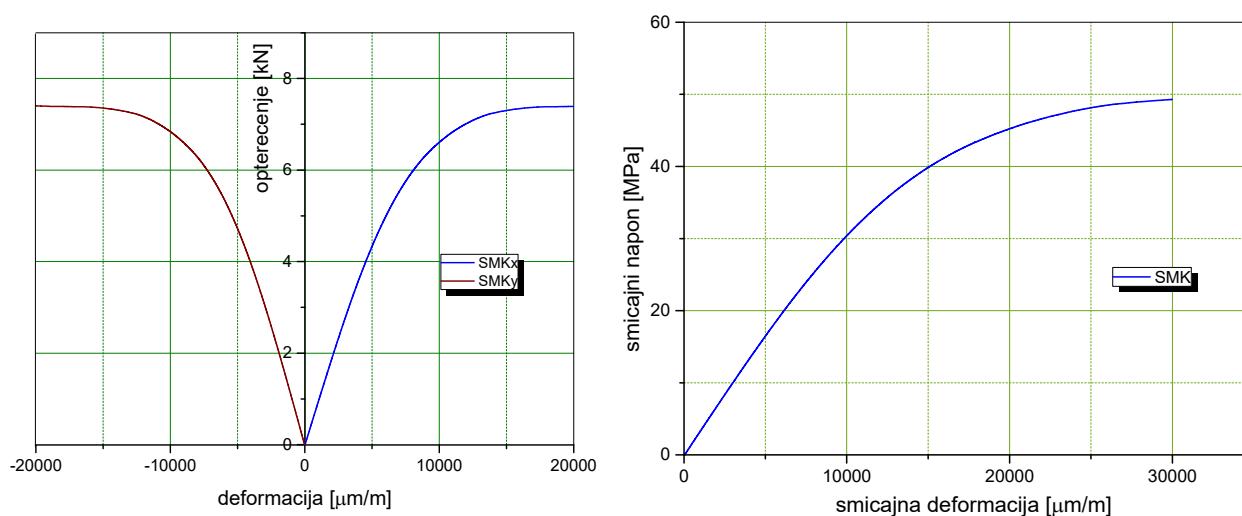
У табели 33. дати су резултати испитивања затезних својстава три врсте композитних епрувета без и са наночестицама, а на сликама 115-117. дати су дијаграми оптерећење - деформација испитаних епрувета. Слика 118. приказује упоредно вредности деформација три врсте епрувета и изглед епрувета после испитивања. Резултати испитивања су обрађени у програму *OriginPro 2016*.

Табела 33. Резултати испитивања епрувета препрег + ПВБ са и без наночестица, оријентације  $\pm 45^\circ$

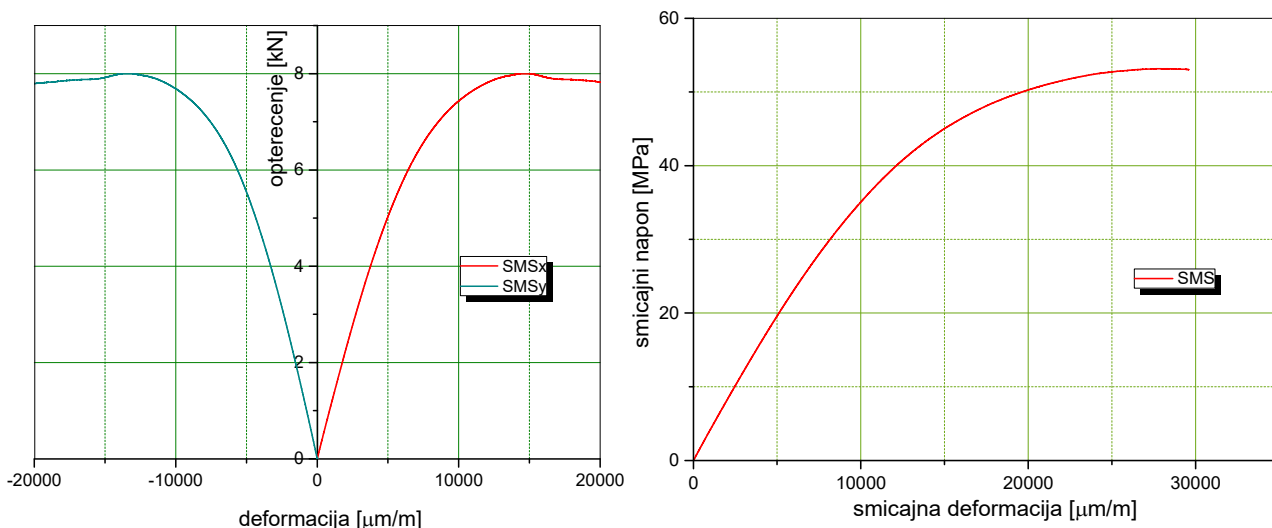
uzorak	b	d	$\Delta\epsilon_x$	$\Delta\epsilon_y$	Pmax	$\tau_{12}$	$G_{12}$	$\nu$
	[mm]	[mm]	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	[kN]	[MPa]	[GPa]	
SMB	25,03	3,11	1960,78	-1732,79	7,94	51,06	<b>3,53</b>	<b>0,98</b>
SMK	24,89	3,02	2325,58	-2106,70	7,47	50,20	<b>3,15</b>	<b>0,89</b>
SMS	25,01	2,97	1915,18	-1751,03	7,99	53,14	<b>3,80</b>	<b>0,90</b>



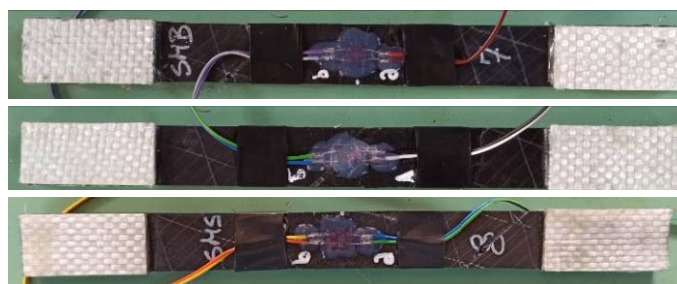
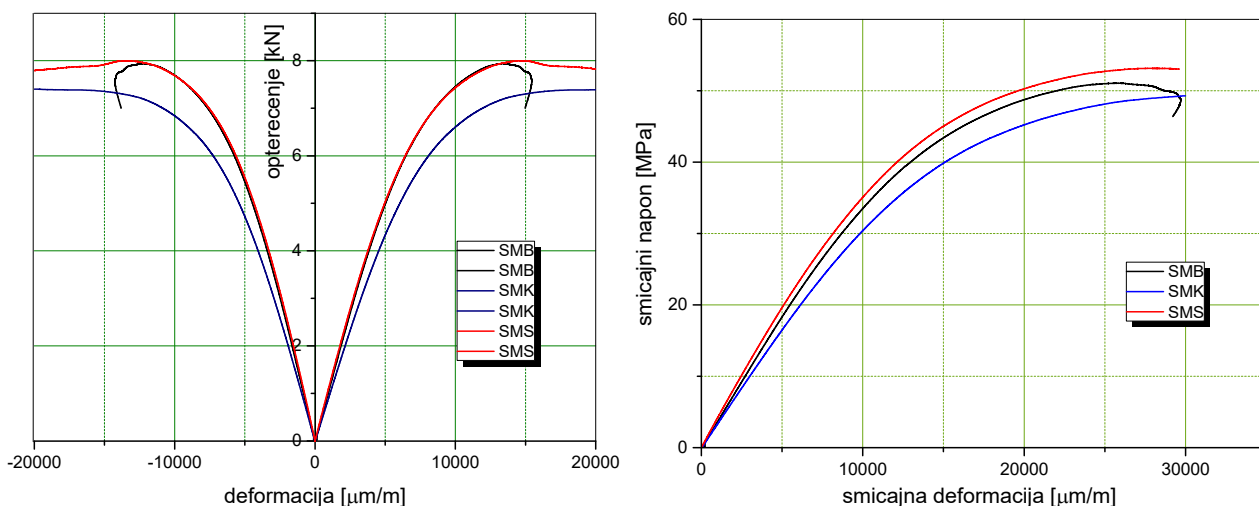
Слика 115. Дијаграм оптерећење - деформација и смицајни напон - смицајна деформација епрувета препрег + ПВБ без наночестица, оријентације  $\pm 45^\circ$



Слика 116. Дијаграм оптерећење - деформација и смицајни напон - смицајна деформација епрувета препрег + ПВБ + 1 mas.% IF-WS<sub>2</sub>, оријентације  $\pm 45^\circ$



Слика 117. Дијаграм оптерећење - деформација и смицајни напон - смицајна деформација епрувета препрег + ПВБ + 0,3 мас.% INT-WS<sub>2</sub>, оријентације ±45°



Слика 118. Упоредни дијаграми оптерећење - деформација и смицајни напон - смицајна деформација епрувета препрег + ПВБ са и без наночестица оријентације ±45° и епрувете после испитивања

На основу података из табеле 33. закључујемо да се Поасонов коефицијент није мењао са додатком наночестица, јер су одступања око 1%. Композит са IF-WS<sub>2</sub> има пад смицајне чврстоће за 2% и модула смицања за 10%. Композит са INT-WS<sub>2</sub> има пораст смицајне чврстоће за 4% и модула смицања за 7,8%.

#### 4.6.3. РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА НА САВИЈАЊЕ

##### 4.6.3.1. Резултати испитивања композита оријентације 0°

У табелама 34-36. дати су резултати испитивања савојних својстава три врсте композитних епрувета без и са наночестицама, а на сликама 119-121. дати су дијаграми напон - деформација испитаних епрувета. Табела 37. приказује упоредне резултате све три врсте епрувета. Слика 122. приказује упоредно средње вредности деформација по групама епрувета и изглед епрувета након савијања. Резултати испитивања су обрађени у програму *OriginPro 2016*.

Табела 34. Резултати испитивања епрувета препрег + ПВБ, оријентације 0°

uzorak	d	b	Pmax	$\delta$	m	E <sub>f</sub>	$\sigma$	$\epsilon$
	[mm]	[mm]	[kN]	[mm]	[N/mm]	[GPa]	[MPa]	[%]
<b>SOB 01</b>	11,89	4,01	0,43	2,35	328,69	224,83	433,04	0,34
<b>SOB 02</b>	11,82	4,00	0,39	2,59	294,78	204,76	393,44	0,38
<b>SOB 03</b>	11,90	4,00	0,42	2,64	322,46	221,37	417,17	0,39
<b>SOB 04</b>	11,96	4,01	0,38	2,61	324,43	220,62	376,88	0,38
<b>SOB 05</b>	11,90	4,01	0,36	2,85	304,40	207,47	359,42	0,42
<b>SOB 01</b>	11,89	4,01	0,43	2,35	328,69	224,83	433,04	0,35
<b>srednja</b>	<b>11,89</b>	<b>4,01</b>	<b>0,39</b>	<b>2,61</b>	<b>314,95</b>	<b>215,81</b>	<b>395,99</b>	<b>0,38</b>
<b>odstupanje</b>			<b>0,03</b>	<b>0,18</b>	<b>14,60</b>	<b>9,04</b>	<b>29,71</b>	<b>0,03</b>
<b>% varijacije</b>			<b>7,36</b>	<b>6,84</b>	<b>4,64</b>	<b>4,19</b>	<b>7,50</b>	<b>6,88</b>

Табела 35. Резултати испитивања епрувета препрег + ПВБ + 1 mas.% IF-WS<sub>2</sub>, оријентације 0°

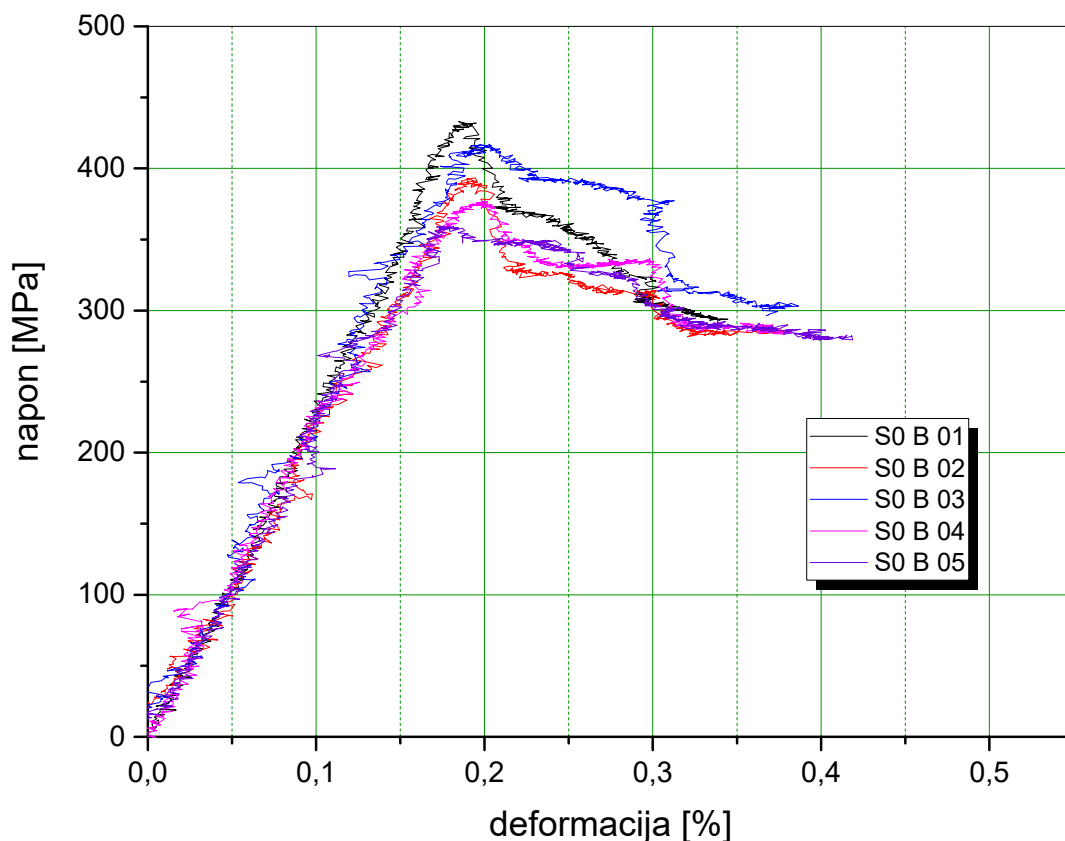
uzorak	d	b	Pmax	$\delta$	m	E <sub>f</sub>	$\sigma$	$\epsilon$
	[mm]	[mm]	[kN]	[mm]	[N/mm]	[GPa]	[MPa]	[%]
<b>SOK 01</b>	11,95	4,04	0,39	2,59	316,64	211,26	386,63	0,38
<b>SOK 02</b>	11,87	4,05	0,39	3,15	305,36	203,48	388,97	0,47
<b>SOK 03</b>	11,94	4,03	0,40	2,66	334,09	223,52	391,82	0,39
<b>SOK 04</b>	11,90	4,02	0,40	2,36	328,91	223,06	400,96	0,35
<b>SOK 05</b>	11,99	4,02	0,38	2,84	322,18	216,86	378,23	0,42
<b>SOK 01</b>	11,95	4,04	0,39	2,59	316,64	211,26	386,63	0,38
<b>srednja</b>	<b>11,93</b>	<b>4,03</b>	<b>0,39</b>	<b>2,72</b>	<b>321,44</b>	<b>215,63</b>	<b>389,32</b>	<b>0,40</b>
<b>odstupanje</b>			<b>0,01</b>	<b>0,29</b>	<b>11,16</b>	<b>8,45</b>	<b>8,25</b>	<b>0,04</b>
<b>% varijacije</b>			<b>1,87</b>	<b>10,84</b>	<b>3,47</b>	<b>3,92</b>	<b>2,12</b>	<b>11,03</b>

Табела 36. Резултати испитивања епрувета препрег + ПВБ + 0,3 мас.% INT-WS<sub>2</sub>, оријентације 0°

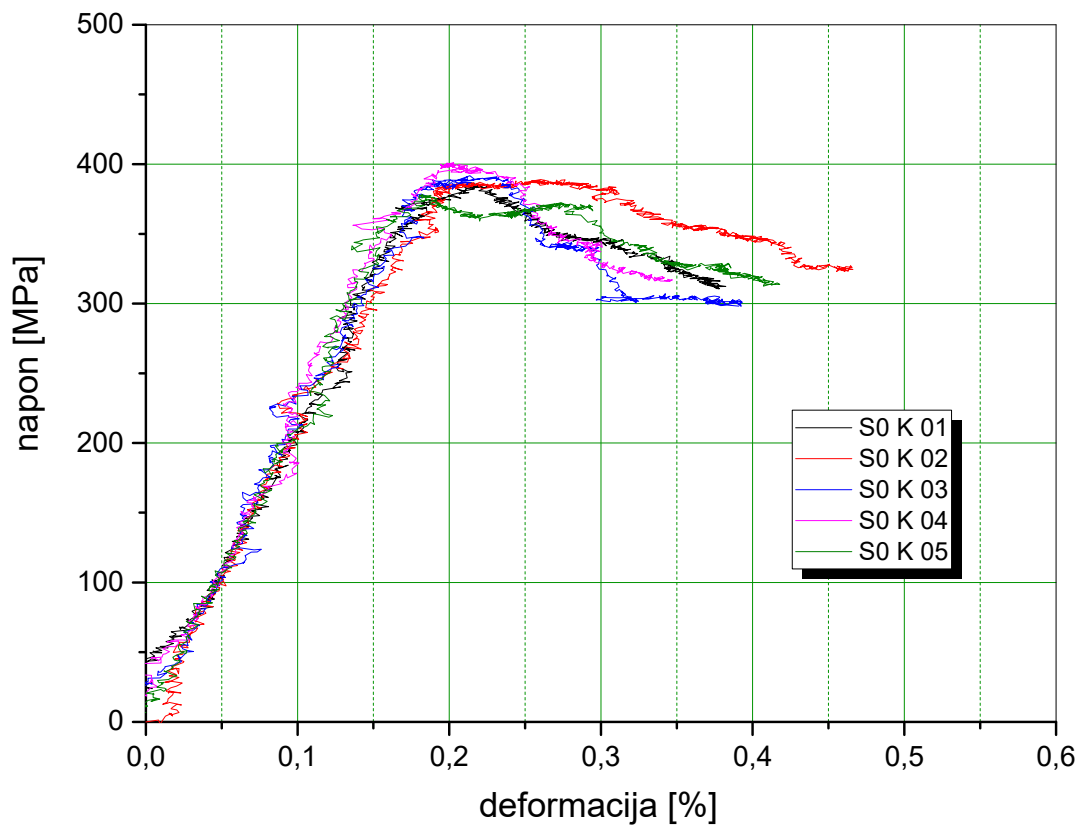
uzorak	d	b	Pmax	δ	m	E <sub>f</sub>	σ	ε
	[mm]	[mm]	[kN]	[mm]	[N/mm]	[GPa]	[MPa]	[%]
SOS 01	11,90	4,01	0,39	2,41	312,05	212,74	390,48	0,36
SOS 02	11,95	4,01	0,41	2,43	305,51	207,87	407,77	0,36
SOS 03	11,90	4,01	0,39	3,03	306,46	208,93	388,87	0,45
SOS 04	11,95	4,02	0,40	2,43	314,85	213,10	399,43	0,36
SOS 05	11,97	4,01	0,40	2,70	314,36	213,60	400,31	0,40
SOS 01	11,90	4,01	0,39	2,41	312,05	212,74	390,48	0,36
<b>srednja</b>	<b>11,93</b>	<b>4,01</b>	<b>0,40</b>	<b>2,60</b>	<b>310,65</b>	<b>211,25</b>	<b>397,37</b>	<b>0,38</b>
<b>odstupanje</b>			<b>0,01</b>	<b>0,27</b>	<b>4,40</b>	<b>2,65</b>	<b>7,76</b>	<b>0,04</b>
<b>% varijacije</b>			<b>2,14</b>	<b>10,22</b>	<b>1,42</b>	<b>1,25</b>	<b>1,95</b>	<b>10,21</b>

Табела 37. Упоредни резултати испитивања епрувета без и са наночестицама, оријентације 0°

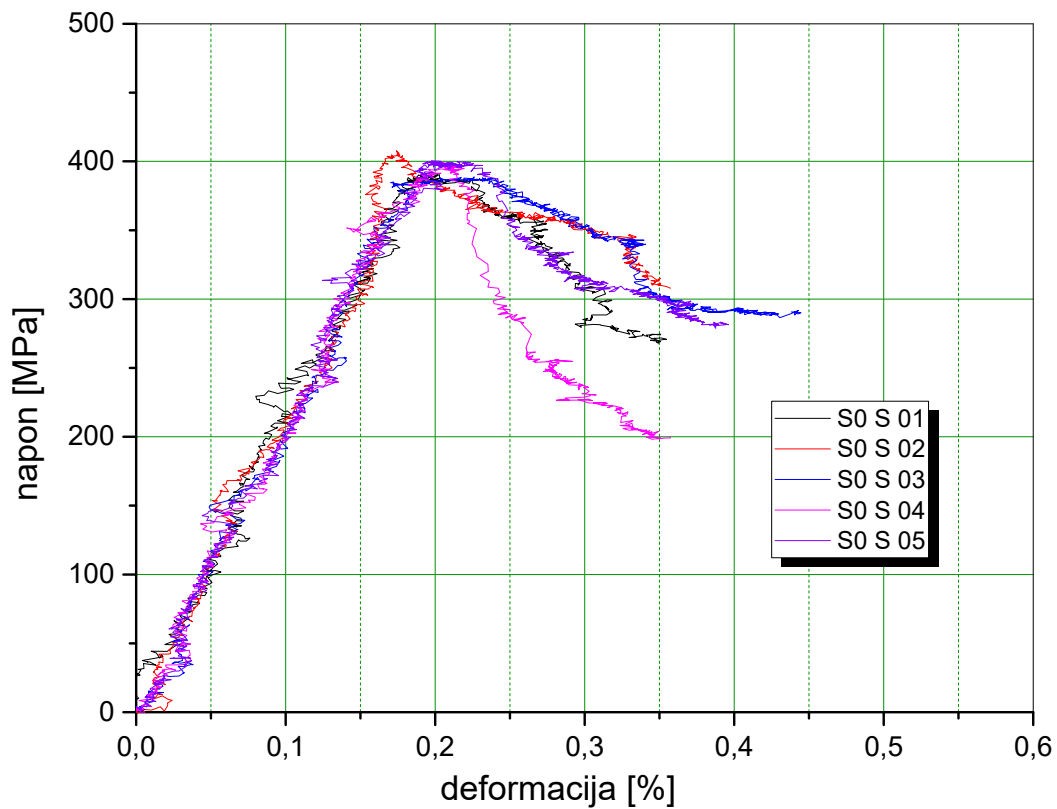
S0	Pmax	δ	m	E <sub>f</sub>	σ	ε
IF/B [%]	-0,16	4,28	2,06	-0,08	-1,68	4,94
INT/B [%]	0,99	-0,27	-1,37	-2,11	0,35	-0,12



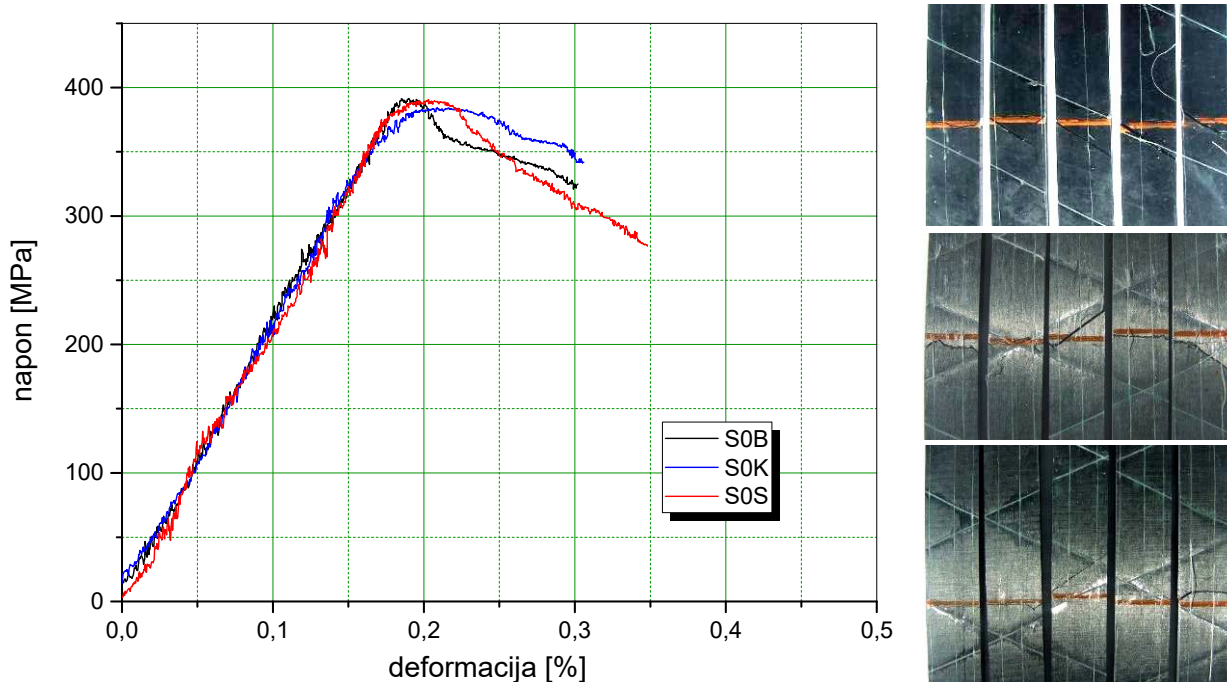
Слика 119. Дијаграм напон - деформација епрувета препрег + ПВБ без наночестица, оријентације 0°



Слика 120. Дијаграм напон - деформација епрувета препрег + ПВБ + 1 мас.% IF-WS<sub>2</sub>, оријентације 0°



Слика 121. Дијаграм напон - деформација епрувета препрег + ПВБ + 0,3 мас.% INT-WS<sub>2</sub>, оријентације 0°



Слика 122. Упоредни дијаграм напон - деформација препрег + ПВБ са и без наночестица оријентације  $0^\circ$  и епрувете после испитивања

На основу података из табеле 37. закључујемо да се својне карактеристике композита при оријентацији влакана  $0^\circ$  занемарљиво мењају јер су одступања око  $1\div 2\%$ .

#### 4.6.3.2. Резултати испитивања композита оријентације $0^\circ/90^\circ$

У табелама 38-40. дати су резултати испитивања својних својстава три врсте композитних епрувета без и са наночестицама, а на сликама 123.-125. дати су дијаграми напон - деформација испитаних епрувета. Табела 41. приказује упоредне резултате све три врсте епрувета. Слика 126. приказује упоредно средње вредности деформација по групама епрувета и изглед епрувета након савијања. Резултати испитивања су обрађени у програму *OriginPro 2016*.

Табела 38. Резултати испитивања епрувета препрег + ПВБ, оријентације  $0^\circ/90^\circ$

uzorak	d [mm]	b [mm]	Pmax [kN]	$\delta$ [mm]	m [N/mm]	$E_f$ [GPa]	$\sigma$ [MPa]	$\epsilon$ [%]
S09B 01	11,95	3,99	0,26	3,23	133,10	91,72	264,96	0,47
S09B 02	12,03	3,99	0,26	3,04	136,93	93,95	259,65	0,44
S09B 03	12,07	3,99	0,27	3,49	138,36	94,83	269,66	0,51
S09B 04	12,00	3,99	0,28	3,16	141,39	97,25	278,19	0,46
S09B 05	11,99	3,98	0,27	3,65	142,76	98,99	273,88	0,53
S09B 01	11,95	3,99	0,26	3,23	133,10	91,72	264,96	0,47
<b>srednja</b>	<b>12,01</b>	<b>3,99</b>	<b>0,27</b>	<b>3,31</b>	<b>138,51</b>	<b>95,35</b>	<b>269,27</b>	<b>0,48</b>
<b>odstupanje</b>			<b>0,01</b>	<b>0,25</b>	<b>3,81</b>	<b>2,84</b>	<b>7,28</b>	<b>0,04</b>
<b>% varijacije</b>			<b>2,61</b>	<b>7,54</b>	<b>2,75</b>	<b>2,98</b>	<b>2,70</b>	<b>7,43</b>

Табела 39. Резултати испитивања епрувета препрег + ПББ + 1 мас.% IF-WS<sub>2</sub>, оријентације 0°/90°

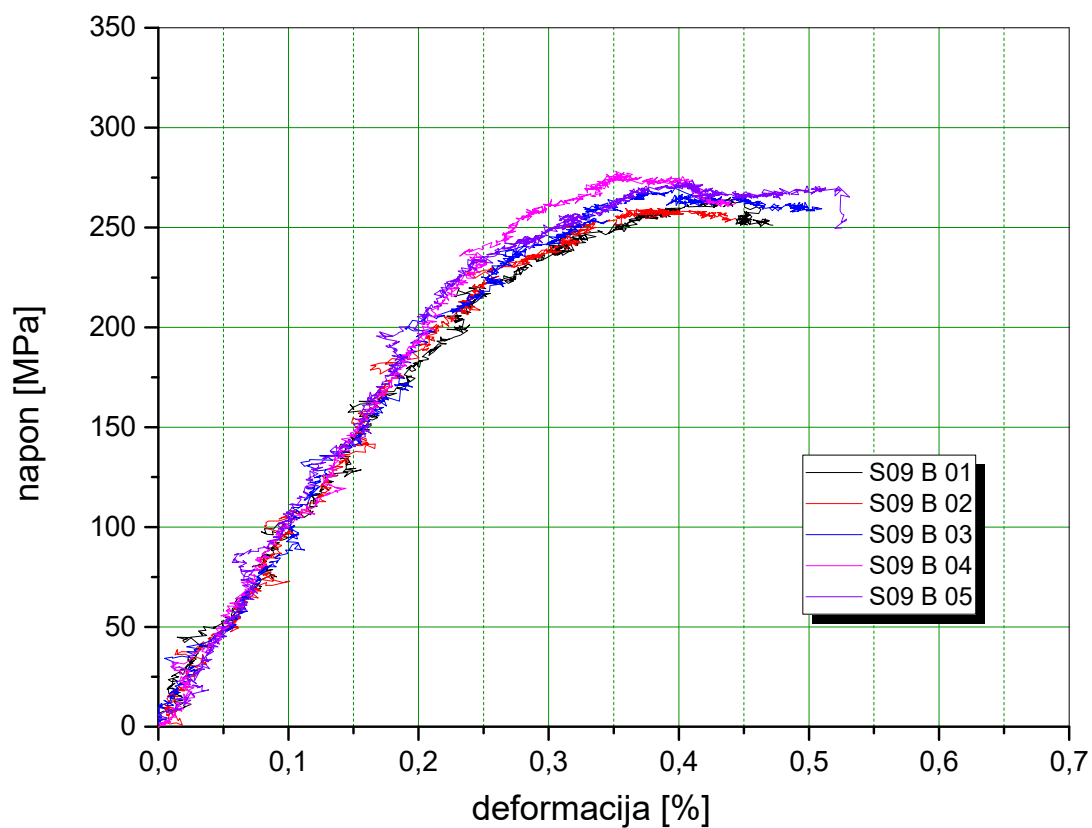
uzorak	d	b	Pmax	δ	m	E <sub>f</sub>	σ	ε
	[mm]	[mm]	[kN]	[mm]	[N/mm]	[GPa]	[MPa]	[%]
S09K 01	11,96	4,00	0,30	4,11	156,08	106,64	298,10	0,60
S09K 02	12,01	4,00	0,29	5,78	156,01	106,42	292,86	0,85
S09K 03	12,10	4,01	0,28	4,10	150,78	101,35	272,33	0,60
S09K 04	12,02	4,00	0,27	2,89	150,59	102,60	264,49	0,42
S09K 05	12,03	3,99	0,28	3,37	149,83	102,51	277,56	0,49
S09K 01	11,96	4,00	0,30	4,11	156,08	106,64	298,10	0,60
<b>srednja</b>	<b>12,03</b>	<b>4,00</b>	<b>0,28</b>	<b>4,05</b>	<b>152,66</b>	<b>103,90</b>	<b>281,07</b>	<b>0,59</b>
<b>odstupanje</b>			<b>0,013</b>	<b>1,10</b>	<b>3,11</b>	<b>2,45</b>	<b>14,08</b>	<b>0,16</b>
<b>% varijacije</b>			<b>4,74</b>	<b>27,05</b>	<b>2,04</b>	<b>2,36</b>	<b>5,01</b>	<b>27,06</b>

Табела 40. Резултати испитивања епрувета препрег + ПББ + 0,3 мас.% INT-WS<sub>2</sub>, оријентације 0°/90°

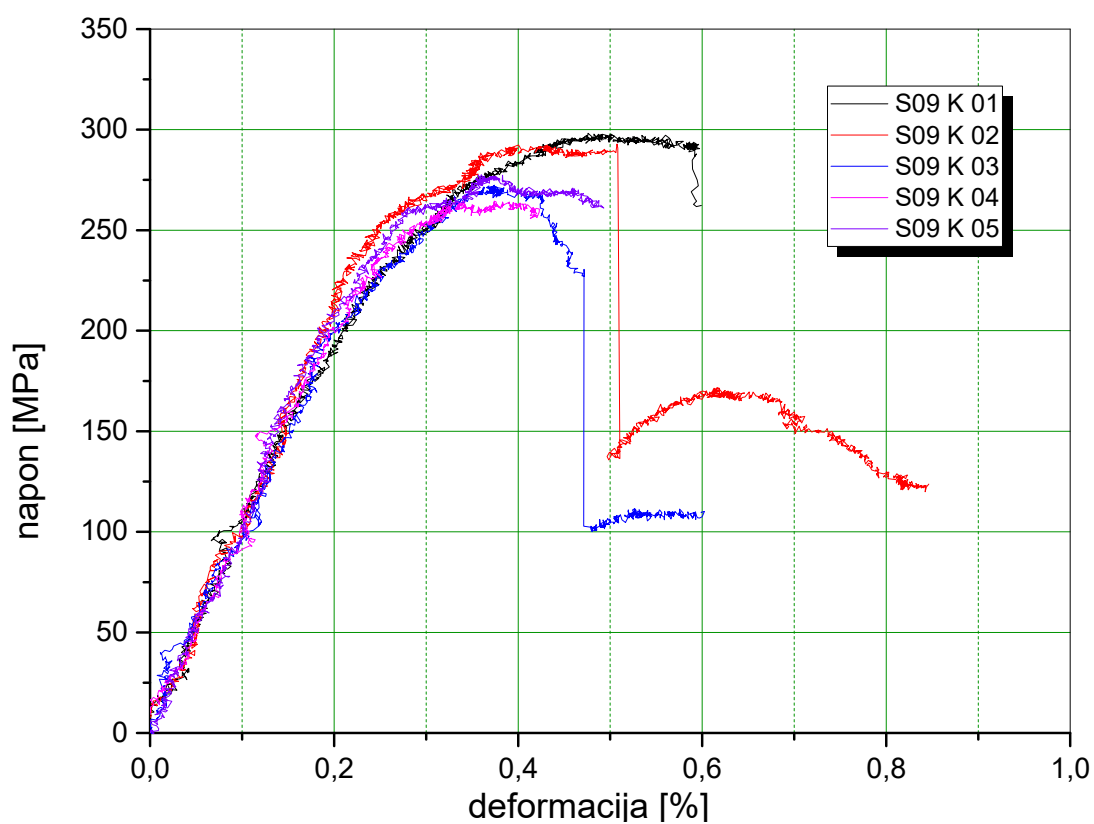
uzorak	d	b	Pmax	δ	m	E <sub>f</sub>	σ	ε
	[mm]	[mm]	[kN]	[mm]	[N/mm]	[GPa]	[MPa]	[%]
S09S 01	11,92	3,99	0,31	3,79	149,28	103,59	311,96	0,55
S09S 02	12,00	3,98	0,29	3,42	152,30	105,84	290,76	0,50
S09S 03	12,11	3,97	0,30	3,48	157,08	108,66	298,69	0,51
S09S 04	12,03	3,97	0,30	3,18	156,07	109,01	299,62	0,46
S09S 05	12,00	3,97	0,31	3,26	169,69	118,82	312,37	0,47
S09S 01	11,92	3,99	0,31	3,79	149,28	103,59	311,96	0,55
<b>srednja</b>	<b>12,01</b>	<b>3,97</b>	<b>0,30</b>	<b>3,43</b>	<b>156,88</b>	<b>109,18</b>	<b>302,68</b>	<b>0,50</b>
<b>odstupanje</b>			<b>0,01</b>	<b>0,24</b>	<b>7,81</b>	<b>5,82</b>	<b>9,32</b>	<b>0,04</b>
<b>% varijacije</b>			<b>2,89</b>	<b>6,93</b>	<b>4,98</b>	<b>5,33</b>	<b>3,08</b>	<b>7,13</b>

Табела 41. Упоредни резултати испитивања епрувета без и са наночестицама, оријентације 0°/90°

S09	Pmax	δ	m	E <sub>f</sub>	σ	ε
IF/B [%]	<b>5,21</b>	<b>22,26</b>	<b>10,22</b>	<b>8,97</b>	<b>4,38</b>	<b>22,70</b>
INT/B [%]	<b>11,60</b>	<b>3,40</b>	<b>13,27</b>	<b>14,51</b>	<b>12,41</b>	<b>3,03</b>

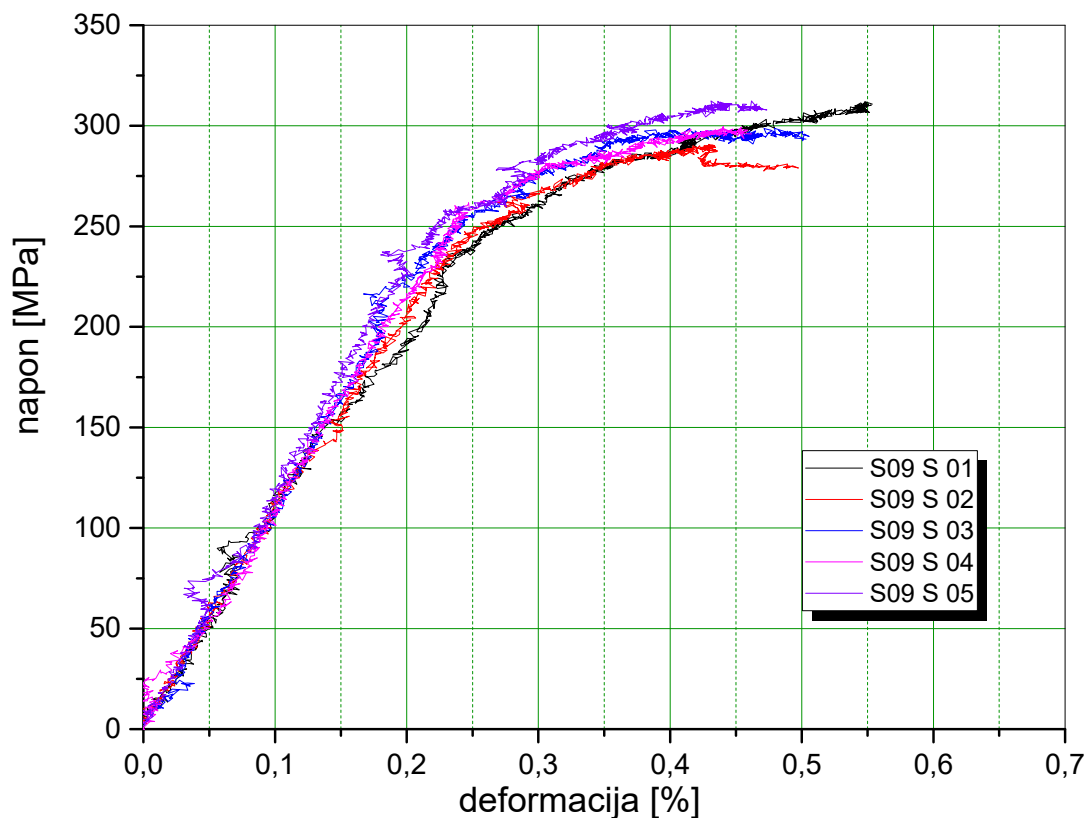


Слика 123. Дијаграм напон - деформација епрувета препрег + ПВБ без наночестица, оријентације  $0^{\circ}/90^{\circ}$

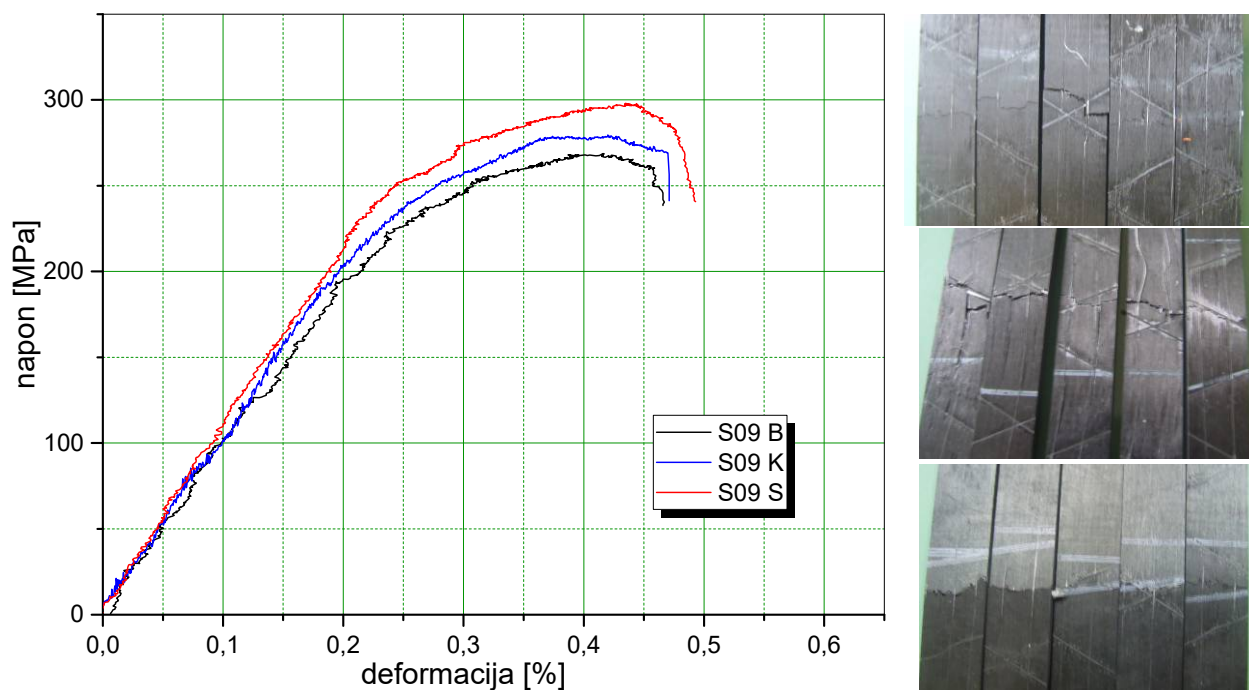


Слика 124. Дијаграм напон - деформација епрувета препрег + ПВБ + 1 mas.% IF-WS<sub>2</sub>, оријентације  $0^{\circ}/90^{\circ}$





Слика 125. Дијаграм напон - деформација епрувета препрег + ПВБ + 0,3 mas.% INT-WS<sub>2</sub>, оријентације 0°/90°



Слика 126. Упоредни дијаграм напон - деформација препрег + ПВБ са и без наночестица оријентације 0°/90° и епрувете после испитивања

Код ове врсте епрувета је приметно побољшање карактеристика препрега са наночестицама. Додатак IF-WS<sub>2</sub> је повећао савојну чврстоћу за 4%, модуо савијања за 9% и савојну деформацију 22,7%. Додатак INT-WS<sub>2</sub> је дао још боље резултате: повећао је

савојну чврстоћу 12,4%, модуо савијања 14,5% а савојну деформацију за 3%. Код ових епрувета су била приметне деламинације и нагњечења на месту притиска.

#### 4.6.3.3. Резултати испитивања композита оријентације $\pm 45^\circ$

У табелама 42-44. дати су резултати испитивања савојних својстава три врсте композитних епрувета без и са наночестицама, а на сликама 126-128. дати су дијаграми напон - деформација испитаних епрувета. Табела 45. приказује упоредне резултате све три врсте епрувета. Слика 129. приказује упоредно средње вредности деформација по групама епрувета и изглед епрувета након савијања. Резултати испитивања су обрађени у програму *OriginPro 2016*.

Табела 42. Резултати испитивања епрувета препрег + ПВБ, оријентације  $\pm 45^\circ$

uzorak	d	b	Pmax	$\delta$	m	$E_f$	$\sigma$	$\epsilon$
	[mm]	[mm]	[kN]	[mm]	[N/mm]	[GPa]	[MPa]	[%]
S45B 01	12,04	4,01	0,13	26,79	17,83	12,04	130,65	3,93
S45B 02	12,05	3,99	0,13	27,04	17,16	11,78	130,33	3,95
S45B 03	11,96	4,00	0,13	27,09	17,16	11,75	133,34	3,97
S45B 04	12,02	4,02	0,13	27,14	16,75	11,22	131,93	4,00
S45B 05	12,01	3,99	0,13	27,06	16,75	11,48	127,18	3,96
S45B 01	12,04	4,01	0,13	26,79	17,83	12,04	130,65	3,93
srednja	12,02	4,00	0,13	27,02	17,13	11,66	130,69	3,96
odstupanje			0,003	0,14	0,44	0,32	2,29	0,03
% varijacije			2,06	0,51	2,59	2,72	1,75	0,62

Табела 43. Резултати испитивања епрувета препрег + ПВБ + 1 mas.% IF-WS<sub>2</sub>, оријентације  $\pm 45^\circ$

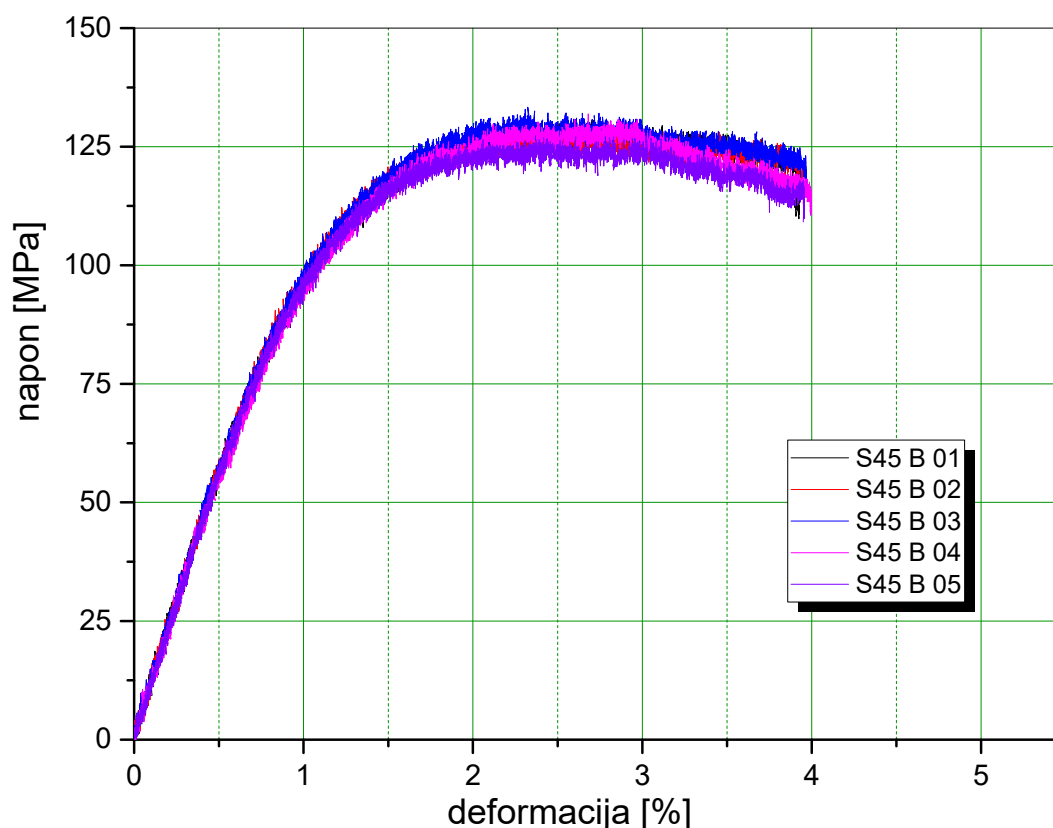
uzorak	d	b	Pmax	$\delta$	m	$E_f$	$\sigma$	$\epsilon$
	[mm]	[mm]	[kN]	[mm]	[N/mm]	[GPa]	[MPa]	[%]
S45K 01	12,01	4,01	0,15	25,20	17,65	11,92	147,83	3,70
S45K 02	12,04	4,02	0,15	25,06	17,56	11,77	143,18	3,69
S45K 03	12,01	4,02	0,14	22,19	17,51	11,80	137,48	3,26
S45K 04	12,02	4,01	0,14	23,46	17,18	11,62	135,53	3,45
S45K 05	12,03	4,01	0,14	23,02	17,18	11,64	137,96	3,38
S45K 01	12,01	4,01	0,15	25,20	17,65	11,92	147,83	3,70
srednja	12,02	4,01	0,14	23,79	17,42	11,75	140,40	3,50
odstupanje			0,01	1,31	0,22	0,13	5,03	0,19
% varijacije			3,68	5,50	1,28	1,06	3,58	5,55

Табела 44. Резултати испитивања епрувета препрег + ПВБ + 0,3 мас.% INT-WS<sub>2</sub>, оријентације ±45°

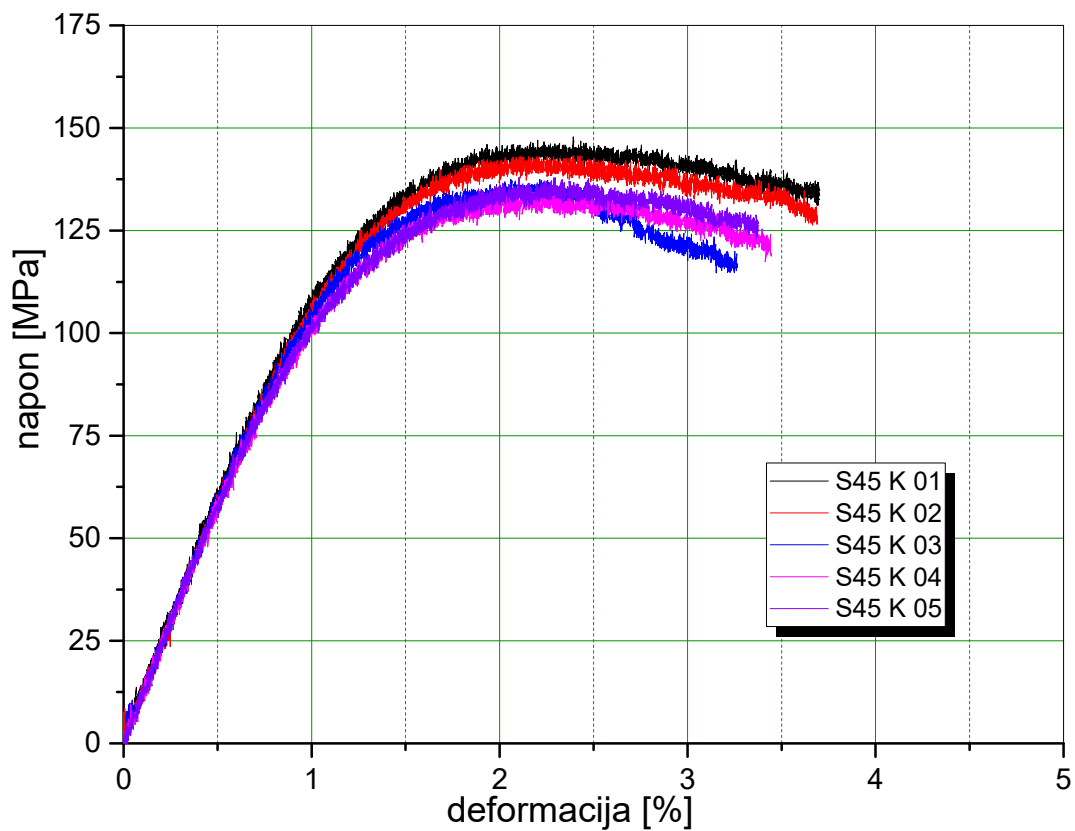
uzorak	d	b	Pmax	δ	m	E <sub>f</sub>	σ	ε
	[mm]	[mm]	[kN]	[mm]	[N/mm]	[GPa]	[MPa]	[%]
S45S 01	12,03	4,01	0,15	24,05	17,43	11,78	144,45	3,53
S45S 02	12,07	3,99	0,14	23,42	17,38	11,89	138,43	3,42
S45S 03	12,05	3,99	0,14	23,51	17,15	11,71	141,05	3,44
S45S 04	12,01	4,00	0,13	23,31	16,84	11,49	132,73	3,41
S45S 05	12,05	4,00	0,13	23,12	16,55	11,28	128,48	3,38
S45S 01	12,03	4,01	0,15	24,05	17,43	11,78	144,45	3,53
srednja	<b>12,04</b>	<b>4,00</b>	<b>0,14</b>	<b>23,48</b>	<b>17,07</b>	<b>11,63</b>	<b>137,03</b>	<b>3,44</b>
odstupanje			<b>0,01</b>	<b>0,35</b>	<b>0,37</b>	<b>0,24</b>	<b>6,42</b>	<b>0,06</b>
% varijacije			<b>4,83</b>	<b>1,49</b>	<b>2,18</b>	<b>2,10</b>	<b>4,69</b>	<b>1,63</b>

Табела 45. Упоредни резултати испитивања епрувета без и са наночестицама, оријентације ±45°

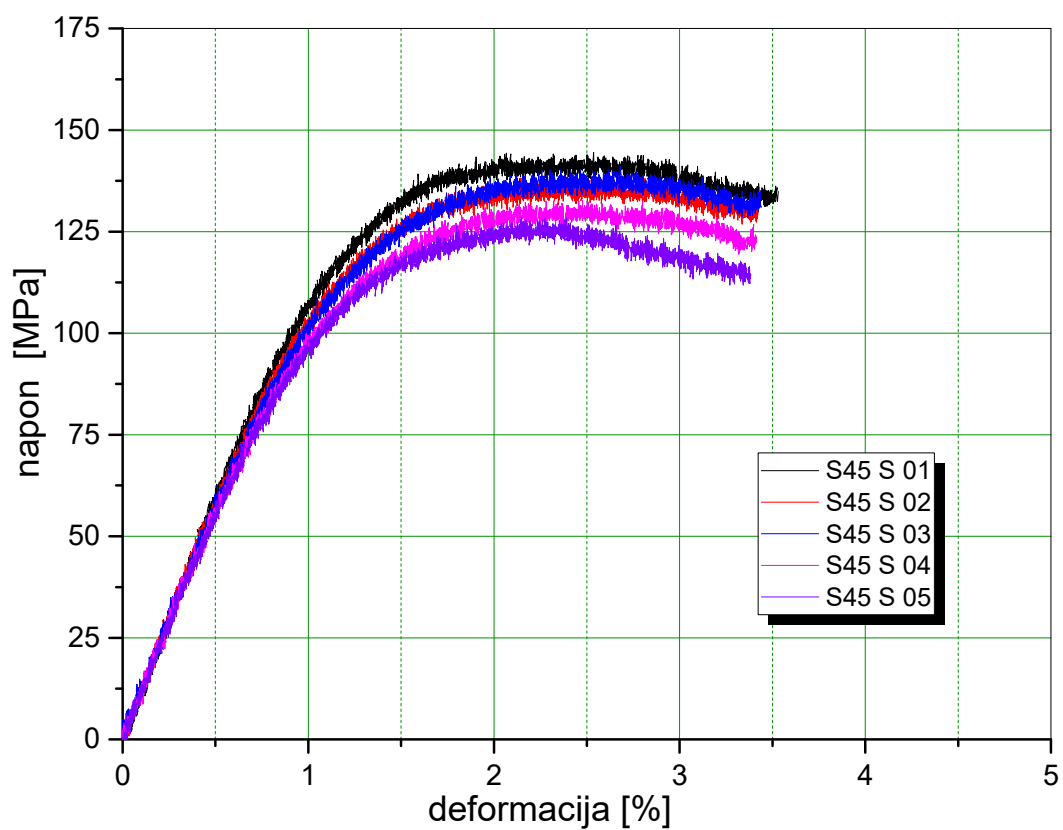
S45	Pmax	δ	m	E <sub>f</sub>	σ	ε
IF/B [%]	<b>8,04</b>	-11,97	1,67	<b>0,82</b>	<b>7,43</b>	-11,74
INT/B [%]	<b>4,82</b>	-13,11	-0,35	<b>-0,21</b>	<b>4,85</b>	-13,21



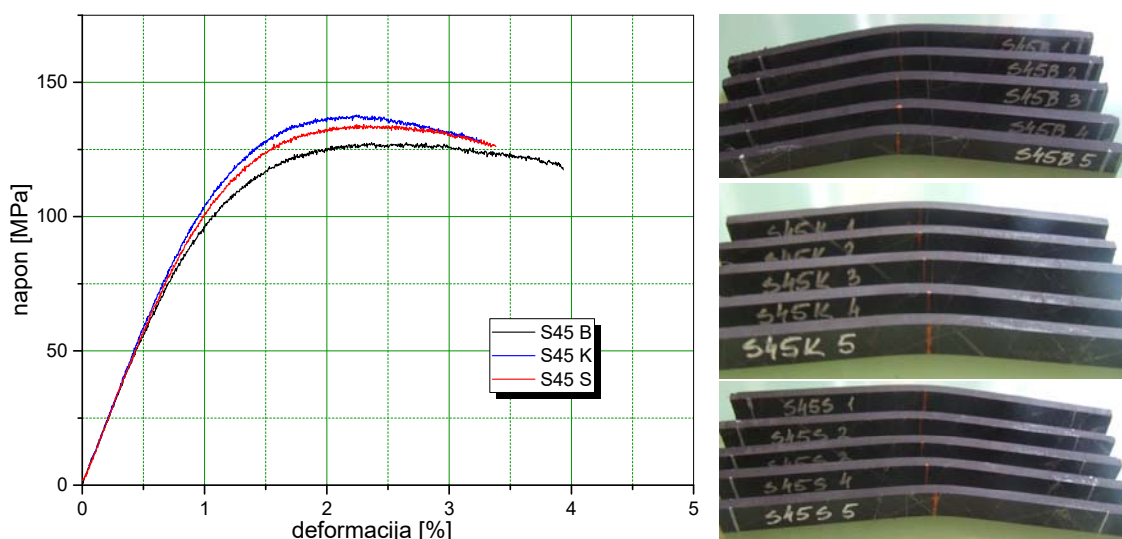
Слика 126. Дијаграм напон - деформација епрувета препрег + ПВБ без наночестица, оријентације ±45°



Слика 127. Дијаграм напон - деформација епрувета препрег + ПВБ + 1 мас.% IF-WS<sub>2</sub>, оријентације ±45°



Слика 128. Дијаграм напон - деформација епрувета препрег + ПВБ + 0,3 мас.% INT-WS<sub>2</sub>, оријентације ±45°



Слика 129. Упоредни дијаграм напон - деформација препрег + ПВБ са и без наночестица оријентације  $\pm 45^\circ$  и епрувете после испитивања

Код епрувета оријентације  $\pm 45^\circ$  је приметно побољшање савојне чврстоће и то за IF-WS<sub>2</sub> 7,4% а за INT-WS<sub>2</sub> 4,8%. Модуло савијања је остао практично исти, а угиб се смањило за IF-WS<sub>2</sub> 11,7% а за INT-WS<sub>2</sub> 13,2%. Код ових епрувета је било карактеристично еластично понашање - савијеност без макроскопског лома.

#### 4.6.4. РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА НА ИНТЕРЛАМИНАРНУ ЧВРСТОЋУ И СМИЦАЊЕ

##### 4.6.4.1. Резултати испитивања композита оријентације $0^\circ$

У табелама 46-48. дати су резултати испитивања интерламинарних својстава три врсте композитних епрувета без и са наночестицама, а на сликама 130-132. дати су дијаграми оптерећење - угиб испитаних епрувета. Табела 49. приказује упоредне резултате све три врсте епрувета. Слика 133. приказује упоредно средње вредности деформација по групама епрувета и изглед епрувета након испитивања. Резултати испитивања су обрађени у програму *OriginPro 2016*.

Табела 46. Резултати испитивања епрувета препрег + ПВБ, оријентације  $0^\circ$

uzorak	b	d	Pmax	$\delta_{max}$	$\tau_{13}$
	[mm]	[mm]	[kN]	[mm]	[MPa]
IOB 1	11,92	3,96	2,78	0,79	44,20
IOB 1.1	11,98	3,97	2,83	0,72	44,96
IOB 2	11,99	3,99	3,05	0,74	48,43
IOB 2.1	12,05	3,98	3,11	0,74	49,34
IOB 3	11,93	3,99	3,10	0,70	49,31
IOB 3.1	12,07	3,98	3,08	0,77	48,96
IOB 4	11,88	3,98	2,98	0,68	47,32
IOB 4.1	11,99	3,98	3,17	0,67	50,29
<b>srednja</b>	<b>11,98</b>	<b>3,98</b>	<b>3,01</b>	<b>0,73</b>	<b>47,85</b>
<b>odstupanje</b>			<b>0,14</b>	<b>0,04</b>	<b>2,20</b>
<b>% varijacije</b>			<b>4,60</b>	<b>5,63</b>	<b>4,60</b>

Табела 47. Резултати испитивања епрувета препрег + ПББ + 1 мас.% IF-WS<sub>2</sub>, оријентације 0°

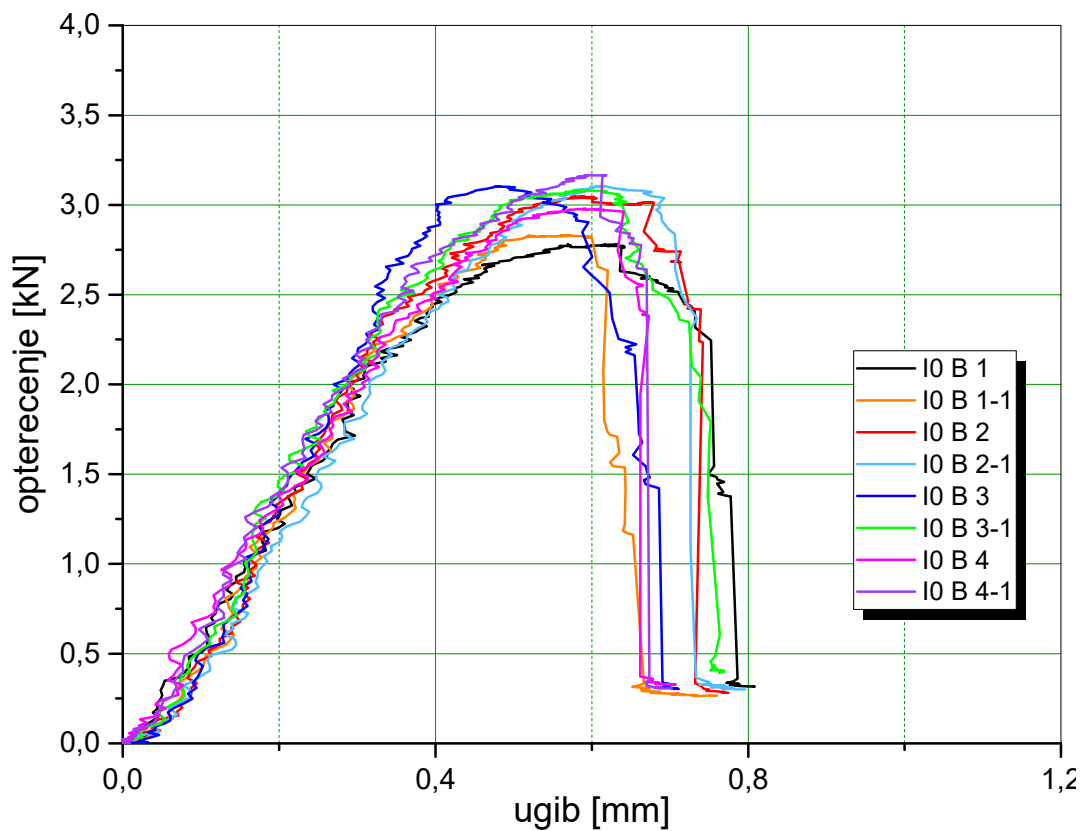
uzorak	b	d	Pmax	δmax	τ <sub>13</sub>
	[mm]	[mm]	[kN]	[mm]	[MPa]
IOK 1	11,86	3,99	3,18	0,73	50,37
IOK 1.1	11,89	4,01	2,93	0,81	46,11
IOK 2	11,74	4,00	3,20	0,72	51,03
IOK 2.1	11,79	3,99	2,96	0,68	47,18
IOK 3	11,90	4,02	2,96	0,70	46,38
IOK 3.1	11,87	4,00	3,14	0,81	49,64
IOK 4	11,63	4,02	2,95	0,83	47,38
IOK 4.1	11,74	4,01	3,07	0,84	48,84
IOK 5	11,84	4,00	3,36	0,63	53,16
IOK 5.1	11,88	4,00	3,35	0,65	52,94
<b>srednja</b>	<b>11,81</b>	<b>4,00</b>	<b>3,11</b>	<b>0,74</b>	<b>49,30</b>
<b>odstupanje</b>			<b>0,16</b>	<b>0,08</b>	<b>2,57</b>
<b>% varijacije</b>			<b>5,22</b>	<b>10,43</b>	<b>5,21</b>

Табела 48. Резултати испитивања епрувета препрег + ПББ + 0,3 мас.% INT-WS<sub>2</sub>, оријентације 0°

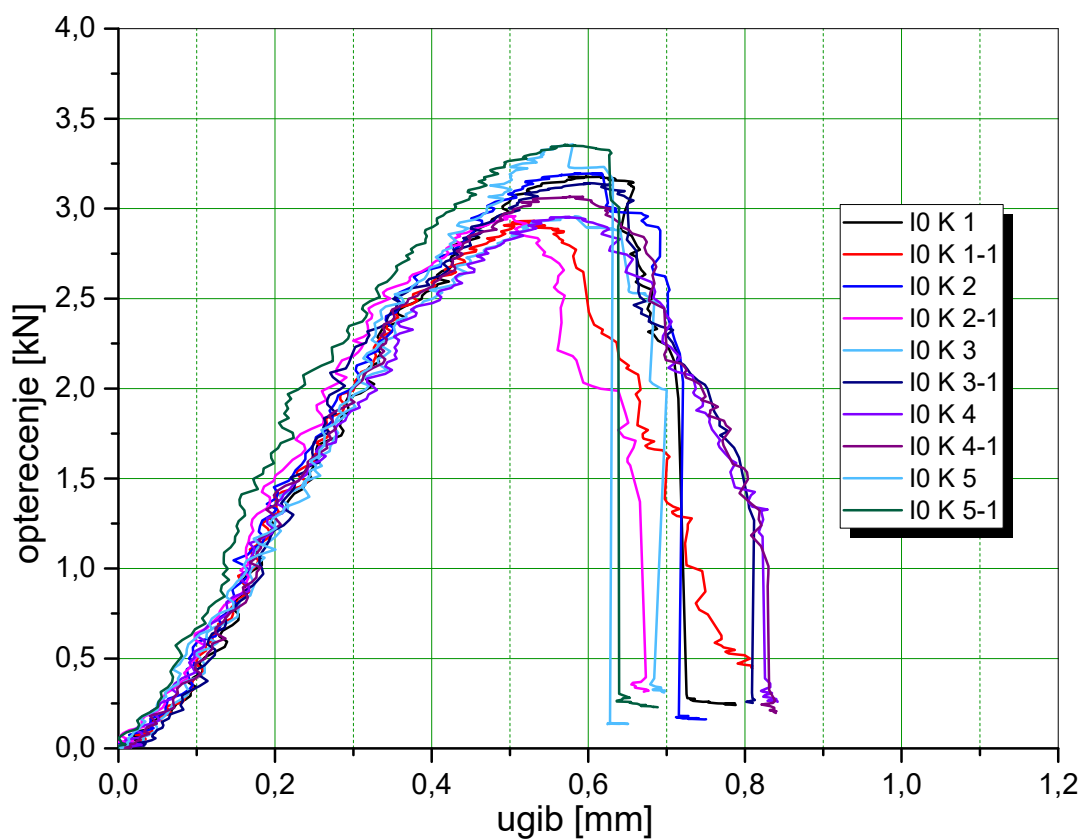
uzorak	b	d	Pmax	δmax	τ <sub>13</sub>
	[mm]	[mm]	[kN]	[mm]	[MPa]
IOS 1	11,91	3,98	3,16	0,71	49,99
IOS 1.1	11,90	3,98	3,26	0,62	51,63
IOS 2	11,88	3,99	3,07	0,72	48,60
IOS 2.1	11,78	4,00	3,20	0,68	50,87
IOS 3	11,89	3,99	3,11	0,64	49,17
IOS 3.1	11,79	3,98	3,06	0,65	48,85
IOS 4	11,94	3,98	3,34	0,69	52,67
IOS 4.1	11,88	3,99	3,43	0,77	54,23
IOS 5	11,79	3,99	3,29	0,72	52,44
IOS 5.1	11,74	3,98	3,23	0,66	51,82
<b>srednja</b>	<b>11,85</b>	<b>3,99</b>	<b>3,21</b>	<b>0,68</b>	<b>51,03</b>
<b>odstupanje</b>			<b>0,12</b>	<b>0,04</b>	<b>1,86</b>
<b>% varijacije</b>			<b>3,71</b>	<b>6,55</b>	<b>3,65</b>

Табела 49. Упоредни резултати испитивања епрувета без и са наночестицама, оријентације 0°

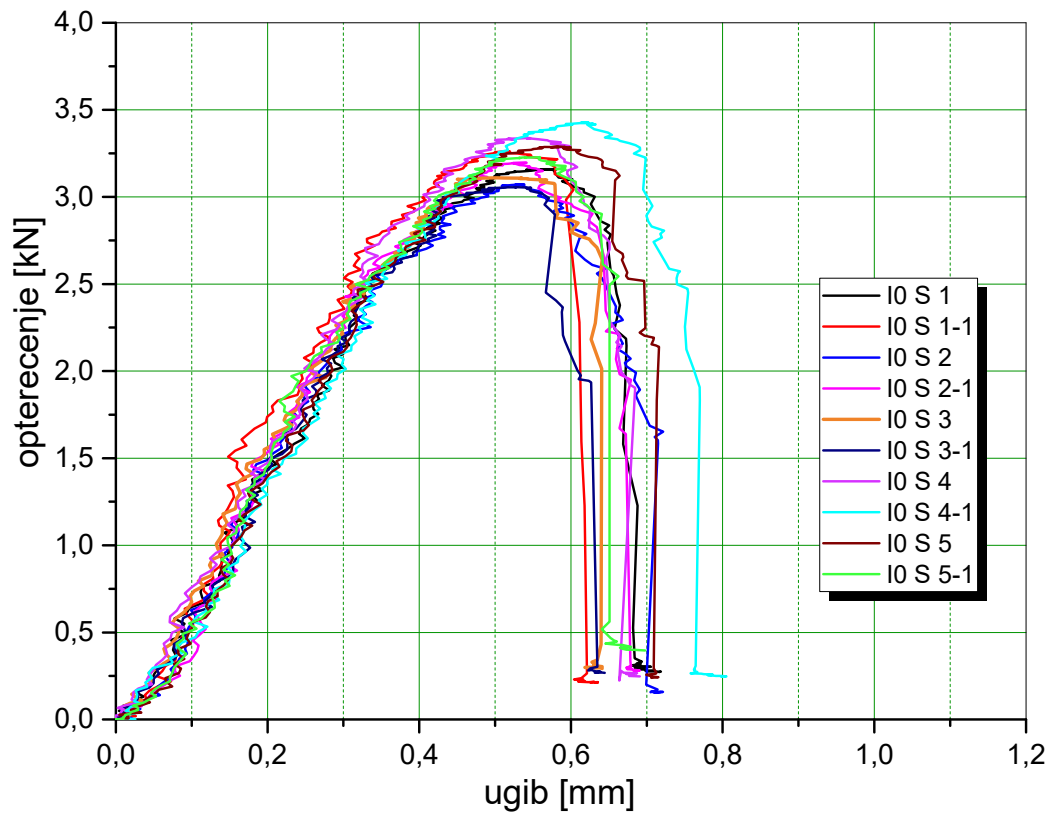
IO	Pmax	δmax	τ <sub>13</sub>
IF/B [%]	3,25	1,84	3,03
INT/B [%]	6,71	-5,78	6,64



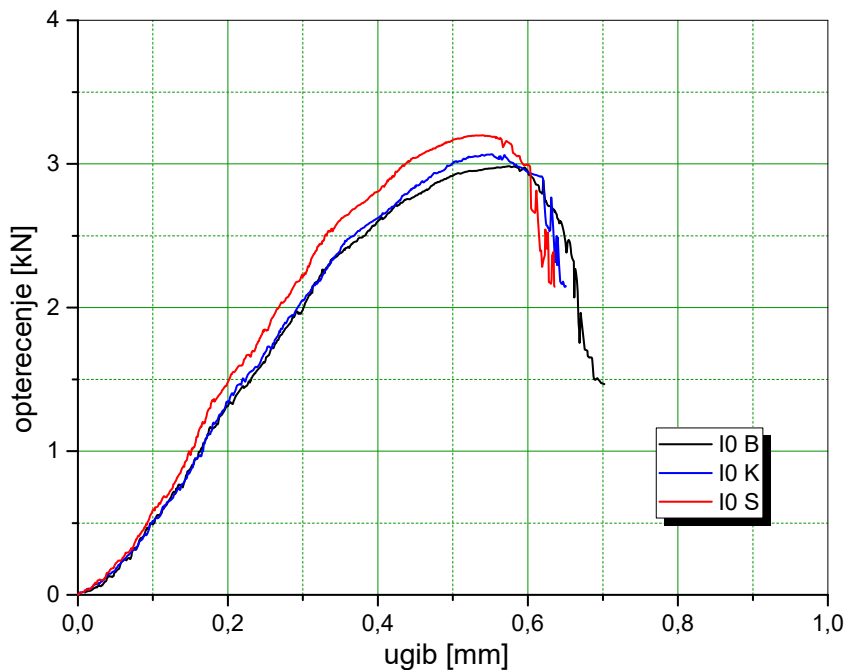
Слика 130. Дијаграм оптерећење-угиб епрувета препрег + ПВБ без наночестица, оријентације  $0^\circ$



Слика 131. Дијаграм оптерећење-угиб епрувета препрег + ПВБ + 1 mas.% IF-WS<sub>2</sub>, оријентације  $0^\circ$



Слика 132. Дијаграм оптерећење-угиб епрувета препрег + ПВБ + 0,3 мас.% INT-WS<sub>2</sub>, оријентације 0°



Слика 133. Упоредни дијаграм оптерећење-угиб препрег + ПВБ са и без наночестица оријентације 0° и епрувете после испитивања

Код епрувета оријентације 0° је остварено побољшање интерламинарне чврстоће и то за IF-WS<sub>2</sub> 3% а за INT-WS<sub>2</sub> 6,6%, колико се повећало и максимално оптерећење. Интерламинарна деформација је порасла за IF-WS<sub>2</sub> 1,8% а за INT-WS<sub>2</sub> опала 5,77%. Код ових епрувета је било карактеристично еластично понашање - савијеност без макроскопског лома.



#### 4.6.4.2. Резултати испитивања композита оријентације 0°/90°

У табелама 50-52. дати су резултати испитивања интерламинарних својстава три врсте композитних епрувета без и са наночестицама, а на сликама 134-136. дати су дијаграми оптерећење-угиб испитаних епрувета. Табела 53. приказује упоредне резултате све три врсте епрувета. Слика 137. приказује упоредно средње вредности деформација по групама епрувета и изглед епрувета након испитивања. Резултати испитивања су обрађени у програму *OriginPro 2016*.

Табела 50. Резултати испитивања епрувета препрег + ПВБ, оријентације 0°/90°

uzorak	b	d	Pmax	δmax	τ <sub>13</sub>
	[mm]	[mm]	[kN]	[mm]	[MPa]
I09B 1	11,84	3,96	1,66	0,61	26,61
I09B 1.1	11,93	3,95	1,72	0,64	27,36
I09B 2	11,89	3,95	1,84	0,70	29,33
I09B 2.1	11,96	3,97	1,92	0,54	30,38
I09B 3	11,96	3,96	1,85	0,67	29,32
I09B 3.1	12,03	3,95	1,91	0,63	30,06
I09B 4	11,91	3,95	1,89	0,61	30,16
I09B 4.1	11,94	3,96	1,84	0,61	29,23
I09B 5	11,89	3,95	1,84	0,63	29,45
I09B 5.1	11,90	3,95	<b>1,92</b>	<b>0,66</b>	<b>30,68</b>
srednja	<b>11,93</b>	<b>3,96</b>	<b>1,84</b>	<b>0,63</b>	<b>29,26</b>
odstupanje			<b>0,09</b>	<b>0,04</b>	<b>1,31</b>
% varijacije			<b>4,68</b>	<b>6,82</b>	<b>4,48</b>

Табела 51. Резултати испитивања епрувета препрег + ПВБ + 1 mas.% IF-WS<sub>2</sub>, оријентације 0°/90°

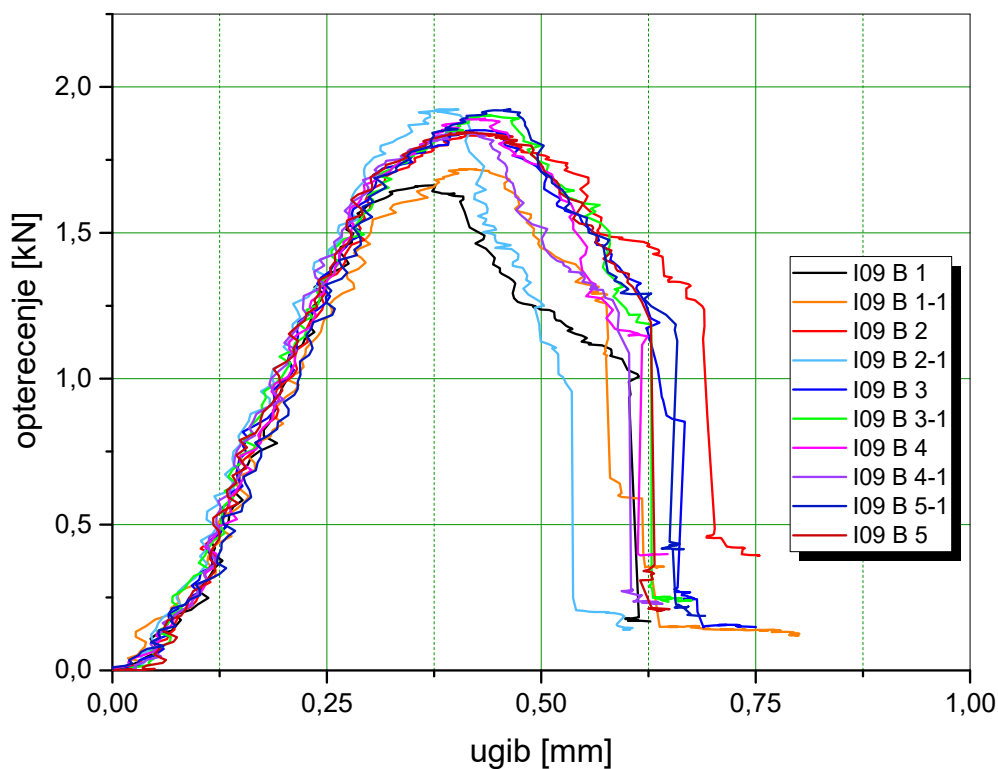
uzorak	b	d	Pmax	δmax	τ <sub>13</sub>
	[mm]	[mm]	[kN]	[mm]	[MPa]
I09K 1	11,87	3,98	2,20	0,46	34,93
I09K 1.1	11,92	3,96	2,01	0,53	31,98
I09K 2	11,88	3,95	2,03	0,62	32,42
I09K 2.1	11,94	3,96	2,14	0,57	33,94
I09K 3	11,99	3,99	2,06	0,56	32,22
I09K 3.1	12,01	3,95	1,86	0,59	29,45
I09K 4	11,87	3,94	1,98	0,55	31,73
I09K 4.1	11,94	3,96	2,08	0,54	32,91
I09K 5	11,91	3,97	2,43	0,54	38,58
I09K 5.1	11,95	3,94	2,18	0,60	34,70
srednja	<b>11,93</b>	<b>3,96</b>	<b>2,10</b>	<b>0,56</b>	<b>33,29</b>
odstupanje			<b>0,15</b>	<b>0,04</b>	<b>2,45</b>
% varijacije			<b>7,36</b>	<b>7,97</b>	<b>7,36</b>

Табела 52. Резултати испитивања епрувета препрег + ПВБ + 0,3 мас.% INT-WS<sub>2</sub>, оријентације 0°/90°

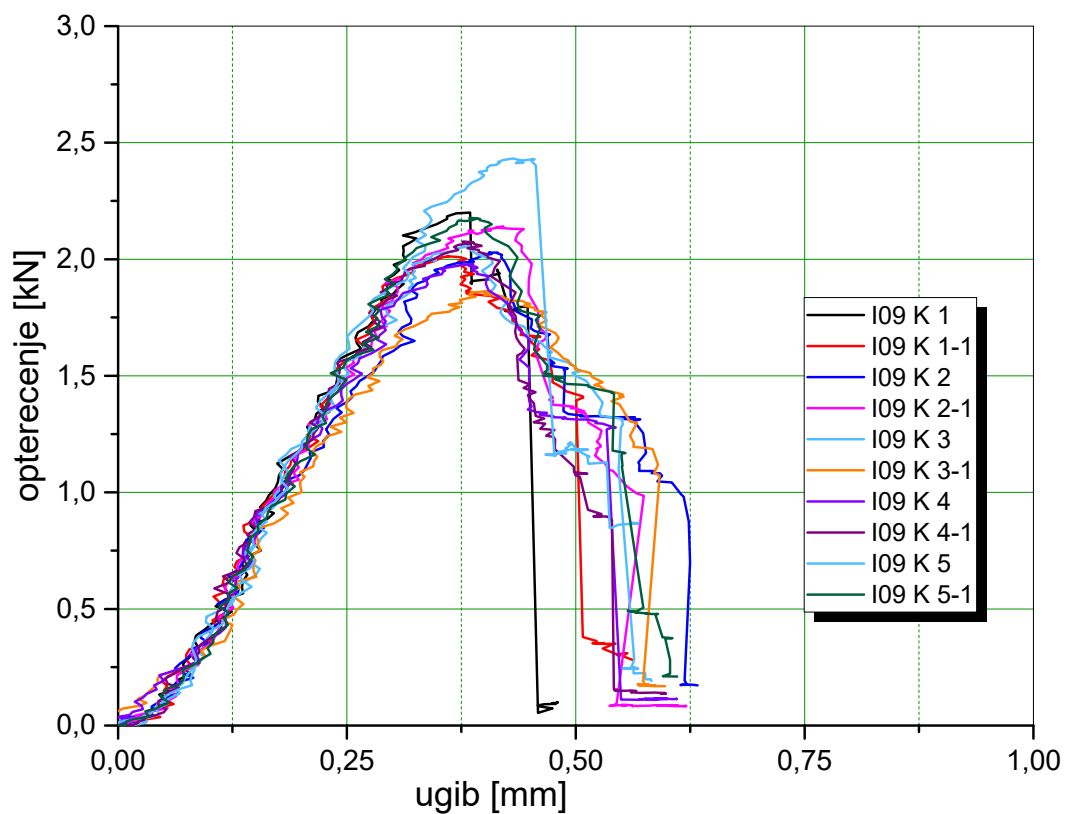
uzorak	b	d	Pmax	δmax	τ <sub>13</sub>
	[mm]	[mm]	[kN]	[mm]	[MPa]
I09S 1	12,00	3,91	2,04	0,47	32,59
I09S 1.1	11,87	3,96	2,42	0,51	38,56
I09S 2	11,89	3,98	1,99	0,50	31,54
I09S 2.1	11,97	3,94	2,35	0,52	37,39
I09S 3	12,01	3,95	2,23	0,52	35,26
I09S 3.1	12,05	3,95	2,28	0,49	35,98
I09S 4	11,87	3,94	1,99	0,60	31,94
I09S 4.1	11,92	3,96	2,26	0,65	35,92
I09S 5	11,92	3,95	2,01	0,54	32,08
I09S 5.1	11,86	3,98	2,14	0,52	33,93
<b>srednja</b>	<b>11,94</b>	<b>3,95</b>	<b>2,17</b>	<b>0,53</b>	<b>34,52</b>
<b>odstupanje</b>			<b>0,16</b>	<b>0,05</b>	<b>2,47</b>
<b>% varijacije</b>			<b>7,29</b>	<b>10,33</b>	<b>7,15</b>

Табела 53. Упоредни резултати испитивања епрувета без и са наночестицама, оријентације 0°/90°

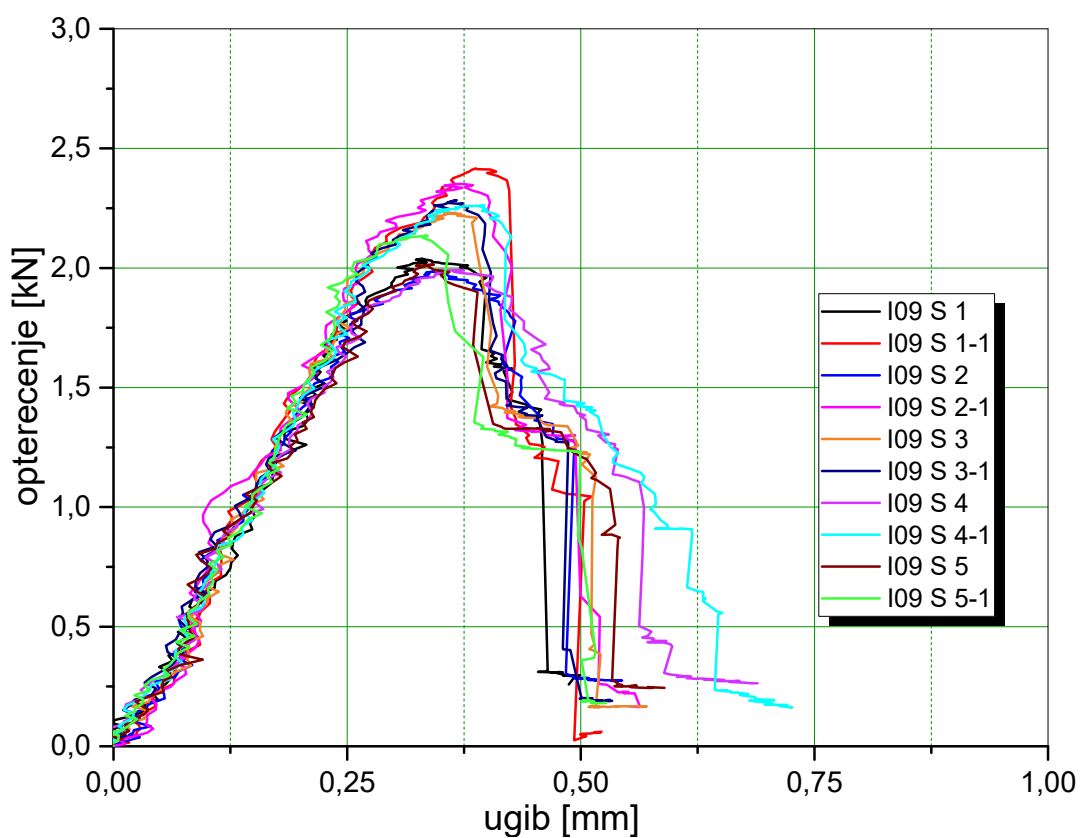
I09	Pmax	δmax	τ <sub>13</sub>
IF/B [%]	13,93	-11,78	13,77
INT/B [%]	18,01	-15,84	17,99



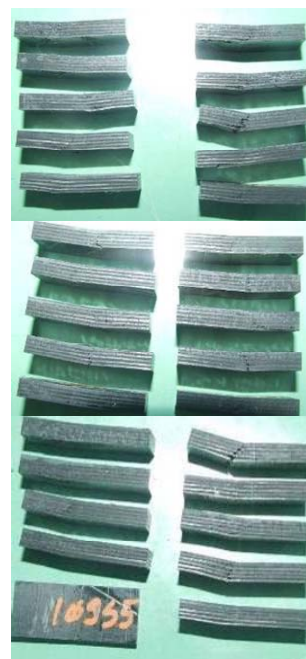
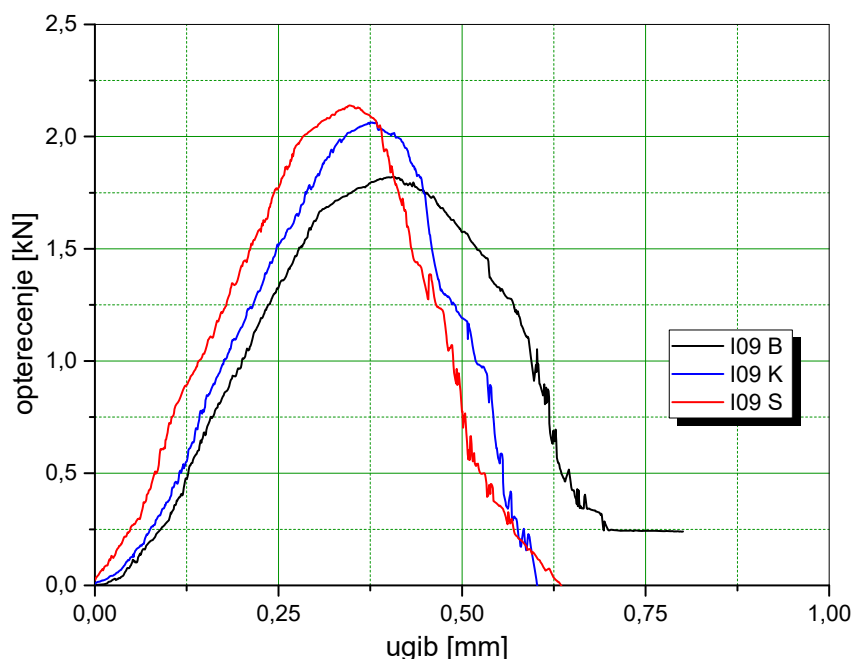
Слика 134. Дијаграм оптерећење-угиб епрувета препрег + ПВБ без наночестица, оријентације 0°/90°



Слика 135. Дијаграм оптерећење-угиб епрувета препрег + ПВБ + 1 mas.% IF-WS<sub>2</sub>, оријентације 0°/90°



Слика 136. Дијаграм оптерећење-угиб епрувета препрег + ПВБ + 0,3 mas.% INT-WS<sub>2</sub>, оријентације 0°/90°



Слика 137. Упоредни дијаграм оптерећење-угиб препрег + ПВБ са и без наночестица оријентације  $0^{\circ}/90^{\circ}$  и епрувете после испитивања

Код епрувета оријентације  $0^{\circ}/90^{\circ}$  је приметно побољшање интерламинарне чврстоће и то за IF-WS<sub>2</sub> 13,8% а за INT-WS<sub>2</sub> 18%, колико се повећало и максимално оптерећење. Угиб је зато опао за IF-WS<sub>2</sub> 11,8% а за INT-WS<sub>2</sub> 15,8%.

#### 4.6.4.3. Резултати испитивања композита оријентације $\pm 45^{\circ}$

У табелама 54-56. дати су резултати испитивања интерламинарних својстава три врсте композитних епрувета без и са наночестицама, а на сликама 138-140. дати су дијаграми оптерећење - угиб испитаних епрувета. Табела 57. приказује упоредне резултате све три врсте епрувета. Слика 141. приказује упоредно средње вредности деформација по групама епрувета и изглед епрувета након испитивања. Резултати испитивања су обрађени у програму *OriginPro 2016*.

Табела 54. Резултати испитивања епрувета препрег + ПВБ, оријентације  $\pm 45^{\circ}$

uzorak	b	d	Pmax	$\delta_{max}$	$\tau_{13}$
	[mm]	[mm]	[kN]	[mm]	[MPa]
I45B 1	12,02	3,96	1,87	1,11	29,42
I45B 1.1	12,03	3,97	1,80	1,07	28,23
I45B 2	11,88	3,96	1,72	1,46	27,46
I45B 2.1	11,96	3,98	1,89	1,37	29,78
I45B 3	11,92	3,96	1,97	1,32	31,26
I45B 3.1	11,94	3,96	2,03	1,18	32,13
I45B 4	12,05	3,94	1,99	1,39	31,41
I45B 4.1	12,05	3,97	1,94	1,14	30,44
I45B 5	11,91	3,96	1,89	1,16	30,09
I45B 5.1	11,85	3,97	1,91	1,31	30,47
srednja	11,96	3,96	1,90	1,25	30,07
odstupanje			0,09	0,13	1,43
% varijacije			4,75	10,70	4,76

Табела 55. Резултати испитивања епрувета препрег + ПББ + 1 мас.% IF-WS<sub>2</sub>, оријентације ±45°

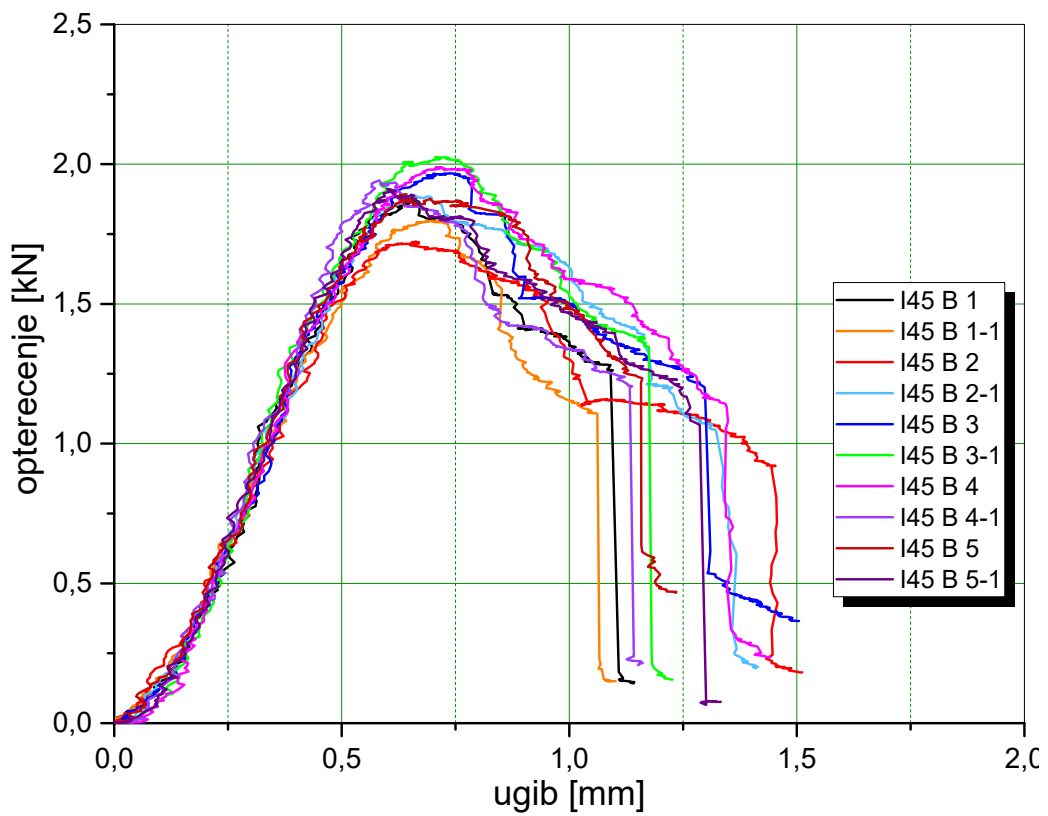
uzorak	b	d	Pmax	δmax	τ <sub>13</sub>
	[mm]	[mm]	[kN]	[mm]	[MPa]
I45K 1	11,80	3,99	1,70	0,94	27,03
I45K 1.1	11,98	3,98	1,71	1,04	26,89
I45K 2	11,82	3,99	1,85	1,06	29,46
I45K 2.1	11,92	3,99	1,62	1,11	25,60
I45K 3	11,86	3,98	1,73	1,03	27,55
I45K 3.1	11,95	3,98	1,84	0,98	28,94
I45K 4	11,92	3,99	1,70	1,04	26,79
I45K 4.1	11,98	3,98	1,68	1,00	26,40
I45K 5	11,88	3,98	1,66	1,12	26,31
I45K 5.1	11,95	3,96	1,64	1,08	26,06
srednja	<b>11,91</b>	<b>3,98</b>	<b>1,71</b>	<b>1,04</b>	<b>27,10</b>
odstupanje			<b>0,08</b>	<b>0,06</b>	<b>1,24</b>
% varijacije			<b>4,44</b>	<b>5,43</b>	<b>4,56</b>

Табела 56. Резултати испитивања епрувета препрег + ПББ + 0,3 мас.% INT-WS<sub>2</sub>, оријентације ±45°

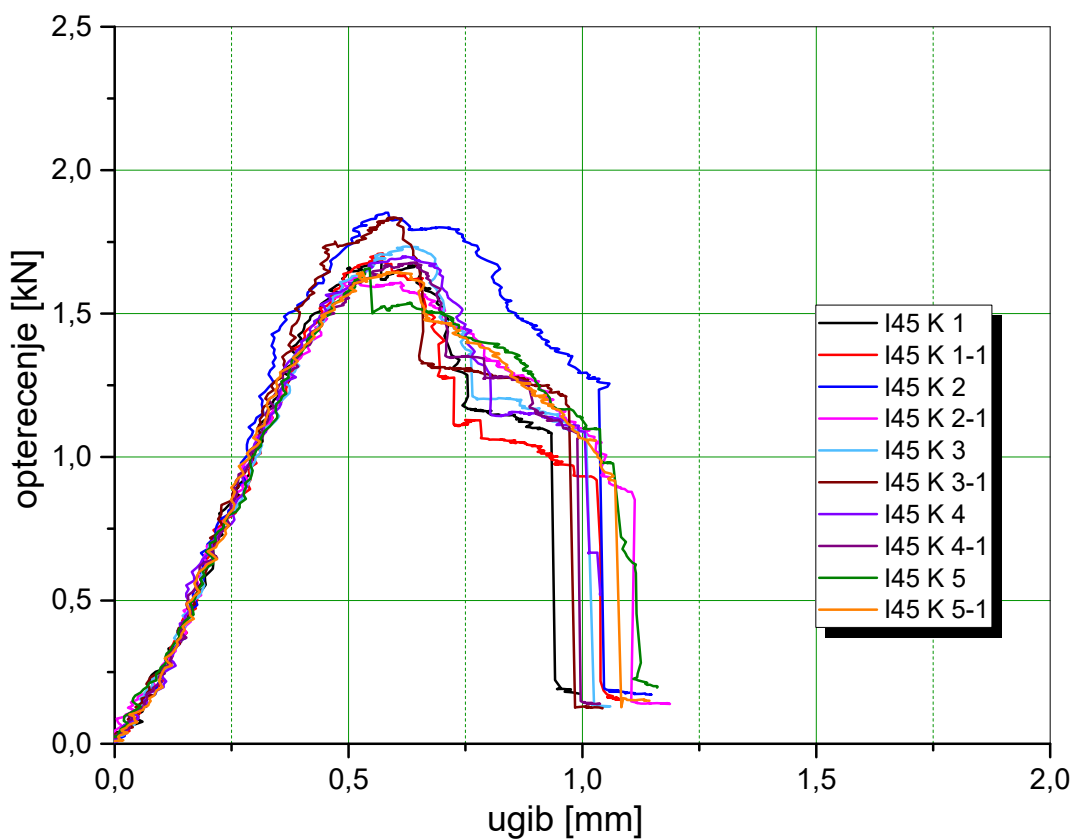
uzorak	b	d	Pmax	δmax	τ <sub>13</sub>
	[mm]	[mm]	[kN]	[mm]	[MPa]
I45S 1	11,98	3,95	1,89	1,01	29,91
I45S 1.1	11,87	3,96	1,80	1,03	28,73
I45S 2	11,79	3,98	1,61	1,09	25,79
I45S 2.1	11,88	3,95	1,85	0,22	29,61
I45S 3	11,98	3,96	1,65	1,13	26,05
I45S 3.1	11,93	3,94	1,71	1,01	27,20
I45S 4	11,97	3,96	1,83	1,22	28,95
I45S 4.1	11,98	3,97	1,59	1,22	25,10
I45S 5	11,96	3,96	1,96	1,43	30,98
I45S 5.1	11,88	3,97	1,68	1,37	26,65
srednja	<b>11,92</b>	<b>3,96</b>	<b>1,76</b>	<b>1,07</b>	<b>27,90</b>
odstupanje			<b>0,13</b>	<b>0,33</b>	<b>2,00</b>
% varijacije			<b>7,16</b>	<b>31,07</b>	<b>7,17</b>

Табела 57. Упоредни резултати испитивања епрувета без и са наночестицама, оријентације ±45°

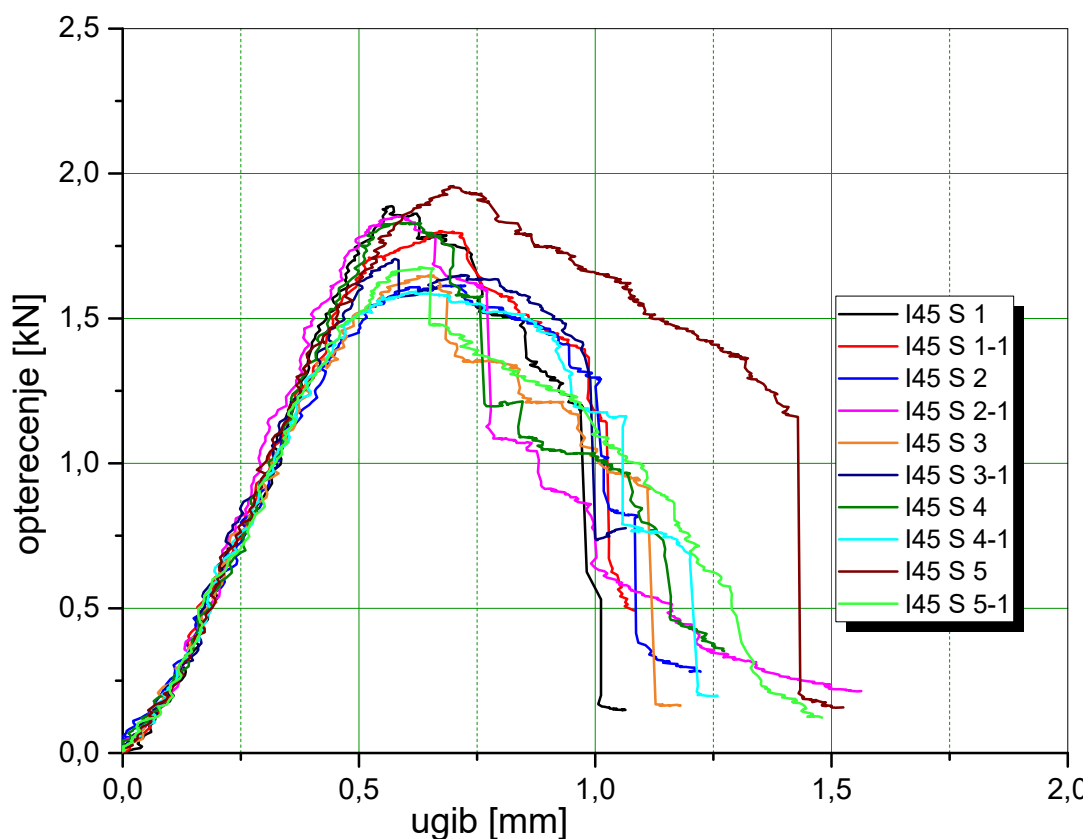
I45	Pmax	δmax	τ <sub>13</sub>
IF/B [%]	-9,85	-16,88	-9,87
INT/B [%]	-7,60	-14,22	-7,23



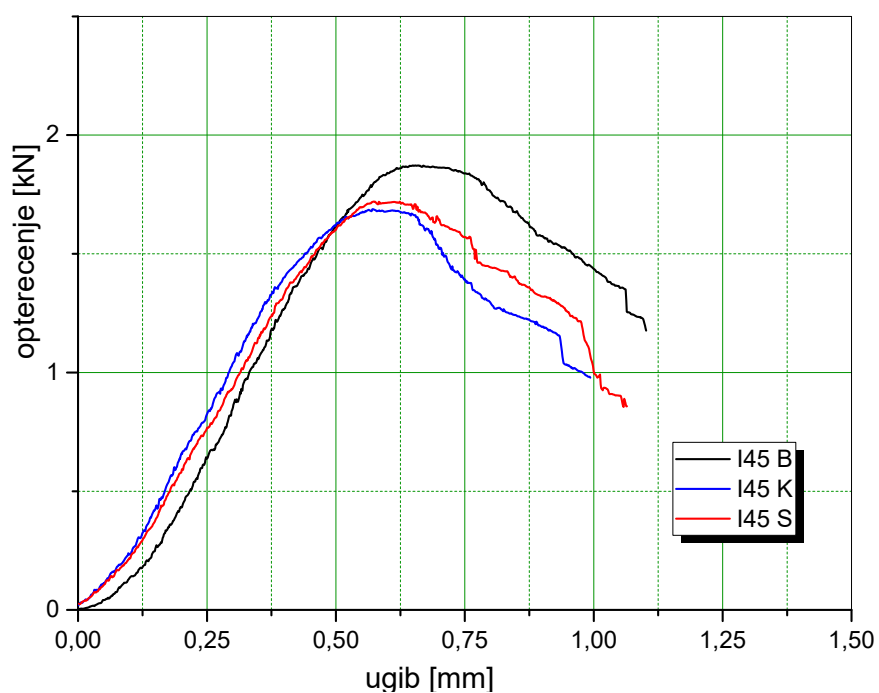
Слика 138. Дијаграм оптерећење-угиб епрувета препрег + ПВБ без наночестица, оријентације  $\pm 45^\circ$



Слика 139. Дијаграм оптерећење-угиб епрувета препрег + ПВБ + 1 mas.% IF-WS<sub>2</sub>, оријентације  $\pm 45^\circ$



Слика 140. Дијаграм оптерећење-угиб епрувета препрег + ПВБ + 0,3 мас.% INT-WS<sub>2</sub>, оријентације ±45°



Слика 141. Упоредни дијаграм оптерећење-угиб препрег + ПВБ са и без наночестица оријентације ±45° и епрувете после испитивања

Епрувете оријентације ±45° са наночестицама су смањиле интерламинарну чврстоћу и то за IF-WS<sub>2</sub> 9,9% а за INT-WS<sub>2</sub> 7,22%, колико се смањило и максимално оптерећење. Угиб је опао за IF-WS<sub>2</sub> 16,8% а за INT-WS<sub>2</sub> 14,22%.

#### 4.6.5. РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА ЕНЕРГИЈЕ УДАРА

##### 4.6.5.1. Резултати испитивања композита оријентације 0°

У табелама 58-63. дати су резултати испитивања енергије удара три врсте композитних епрувета без и са наночестицама, а на сликама 142-147. дати су дијаграми оптерећење-време и енергија-време испитаних епрувета. Табеле 64. и 65. приказују упоредне резултате све три врсте епрувета. Слика 148. приказује упоредно средње вредности енергија по групама епрувета, а слика 149. приказује изглед епрувете након лома. Резултати испитивања су обрађени у програму *OriginPro 2016*.

Табела 58. Резултати испитивања епрувета препрег + ПВБ, оријентације 0°, усправно

Ch0B us	b	d	Pmax	E
	[mm]	[mm]	[kN]	[J]
S0B 01	11,77	4,00	5,60	2,58
S0B 02	11,90	3,99	4,43	2,34
S0B 03	12,00	3,97	5,10	2,40
srednja	<b>11,89</b>	<b>3,99</b>	<b>5,04</b>	<b>2,44</b>
odstupanje			<b>0,59</b>	<b>0,12</b>
% varijacije			<b>11,59</b>	<b>5,06</b>

Табела 59. Резултати испитивања епрувета препрег + ПВБ, оријентације 0°, положено

Ch0B pol	b	d	Pmax	E
	[mm]	[mm]	[kN]	[J]
S0B 04	3,96	11,88	3,22	10,66
S0B 05	3,98	11,81	3,71	8,82
S0B 06	3,95	12,04	3,19	8,71
srednja	<b>3,970</b>	<b>11,85</b>	<b>3,37</b>	<b>9,40</b>
odstupanje			<b>0,29</b>	<b>1,09</b>
% varijacije			<b>8,72</b>	<b>11,64</b>

Табела 60. Резултати испитивања епрувета препрег + ПВБ + 1 mas.% IF-WS<sub>2</sub>, оријентације 0°, усправно

Ch0K us	b	d	Pmax	E
	[mm]	[mm]	[kN]	[J]
S0K 01	11,97	3,97	5,90	2,72
S0K 02	11,94	4,00	5,18	2,78
S0K 03	11,98	3,98	5,69	2,73
srednja	<b>11,96</b>	<b>3,98</b>	<b>5,59</b>	<b>2,74</b>
odstupanje			<b>0,37</b>	<b>0,03</b>
% varijacije			<b>6,62</b>	<b>1,18</b>



Табела 61. Резултати испитивања епрувета препрег + ПББ + 1 мас.% IF-WS<sub>2</sub>, оријентације 0°, положено

Ch0K pol	b	d	Pmax	E
	[mm]	[mm]	[kN]	[J]
S0K 04	3,98	11,93	2,90	10,27
S0K 05	3,96	12,00	3,25	10,71
<b>srednja</b>	<b>3,97</b>	<b>11,97</b>	<b>3,08</b>	<b>10,49</b>
<b>odstupanje</b>			<b>0,25</b>	<b>0,31</b>
<b>% varijacije</b>			<b>8,06</b>	<b>3,00</b>

Табела 62. Резултати испитивања епрувета препрег + ПББ + 0,3 мас.% INT-WS<sub>2</sub>, оријентације 0°, усправно

Ch0S us	b	d	Pmax	E
	[mm]	[mm]	[kN]	[J]
S0S 01	11,96	3,97	5,74	2,74
S0S 02	11,98	3,99	5,20	2,74
S0S 03	11,92	3,98	5,02	2,70
<b>srednja</b>	<b>11,95</b>	<b>3,98</b>	<b>5,32</b>	<b>2,73</b>
<b>odstupanje</b>			<b>0,38</b>	<b>0,02</b>
<b>% varijacije</b>			<b>7,06</b>	<b>0,90</b>

Табела 63. Резултати испитивања епрувета препрег + ПББ + 0,3 мас.% INT-WS<sub>2</sub>, оријентације 0°, положено

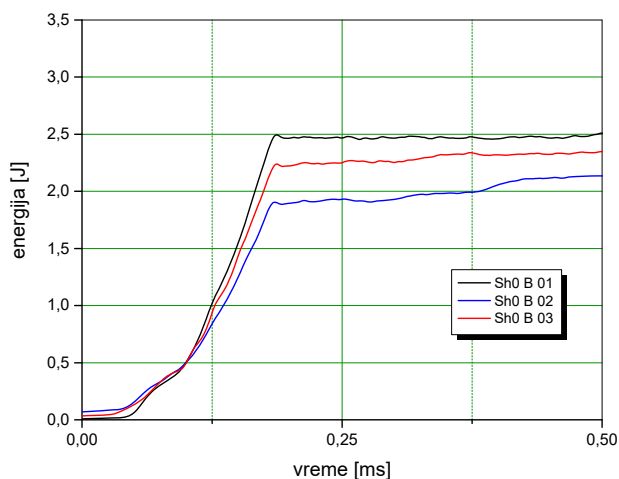
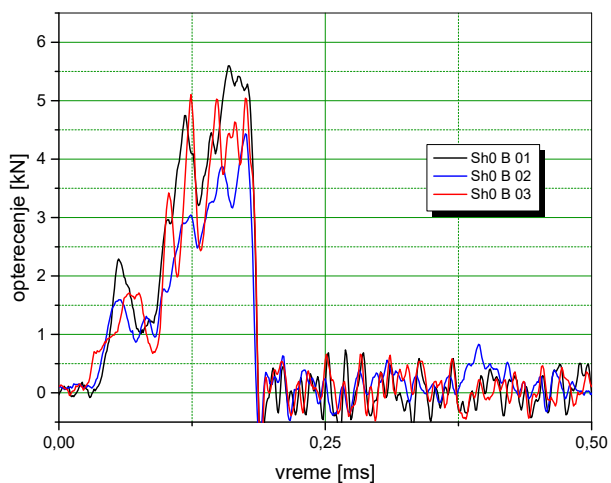
Ch0S pol	b	d	Pmax	E
	[mm]	[mm]	[kN]	[J]
S0S 04	3,98	11,99	3,41	9,93
S0S 05	3,98	11,99	3,14	9,35
<b>srednja</b>	<b>3,98</b>	<b>11,99</b>	<b>3,28</b>	<b>9,64</b>
<b>odstupanje</b>			<b>0,19</b>	<b>0,42</b>
<b>% varijacije</b>			<b>5,82</b>	<b>4,32</b>

Табела 64. Упоредни резултати испитивања епрувета без и са наночестицама, оријентације 0°, усправно

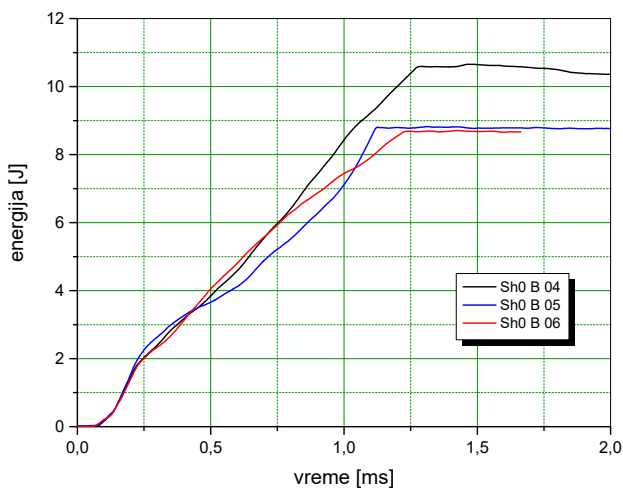
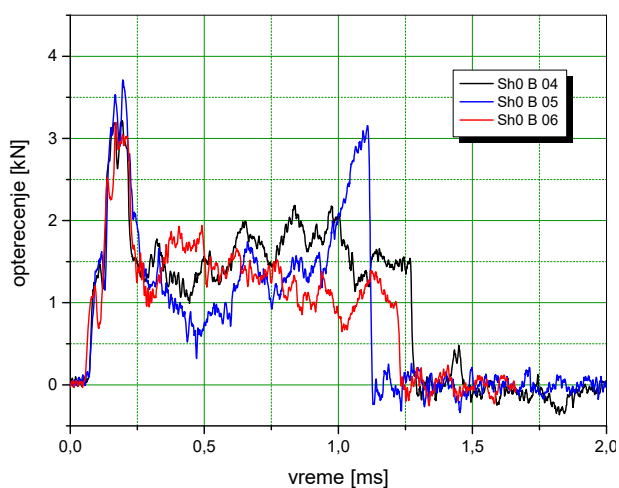
Ch0 us	E
IF/B [%]	<b>12,43</b>
INT/B [%]	<b>11,86</b>

Табела 65. Упоредни резултати испитивања епрувета без и са наночестицама, оријентације 0°, положено

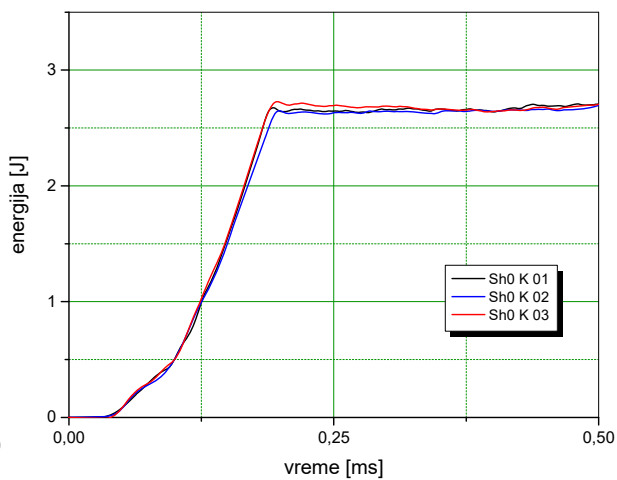
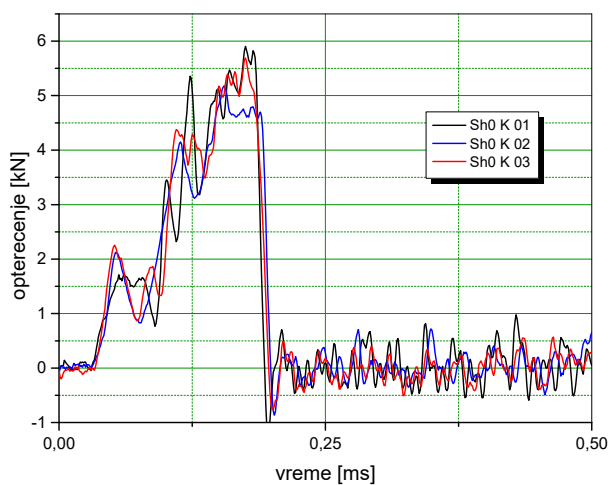
Ch0 pol	E
IF/B [%]	<b>11,64</b>
INT/B [%]	<b>2,60</b>



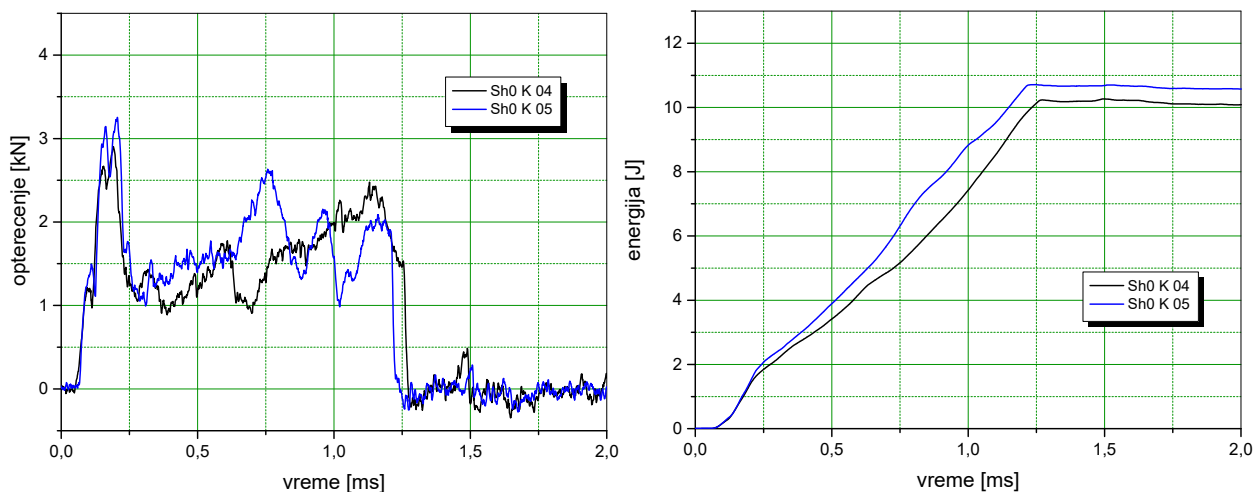
Слика 142. Дијаграми оптерећење-време и енергија-време епрувета препрег + ПВБ без наночестица, оријентације 0°, усправно



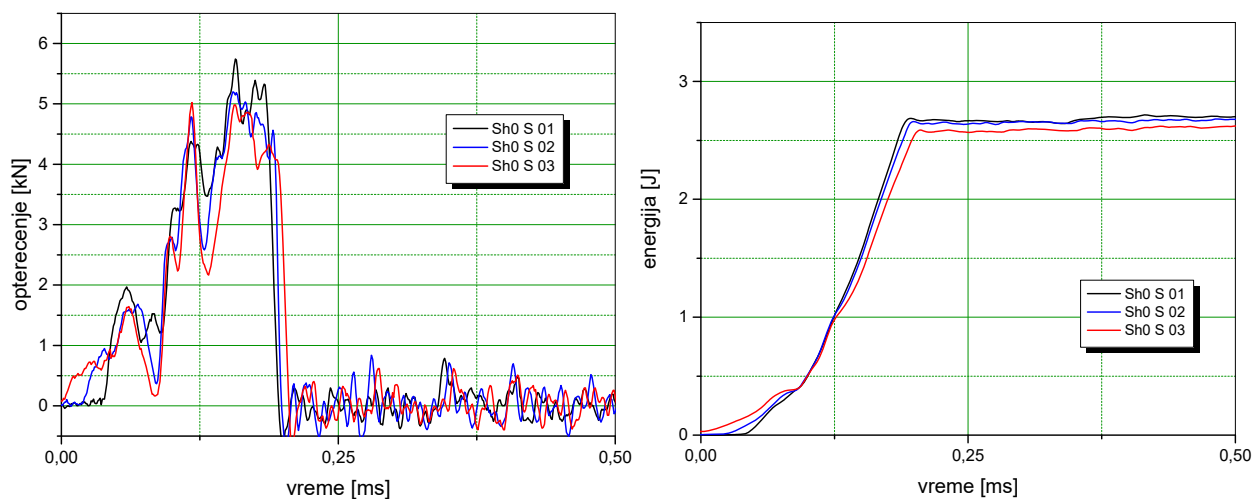
Слика 143. Дијаграми оптерећење-време и енергија-време епрувета препрег + ПВБ без наночестица, оријентације 0°, положено



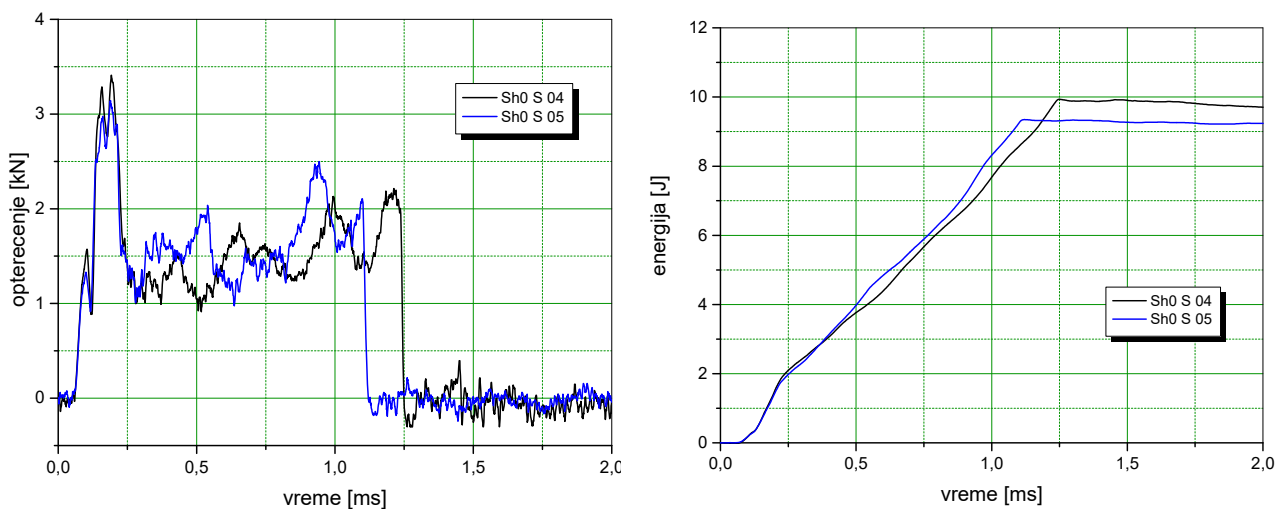
Слика 144. Дијаграми оптерећење-време и енергија-време епрувета препрег + ПВБ + 1 mas.% IF-WS<sub>2</sub>, оријентације 0°, усправно



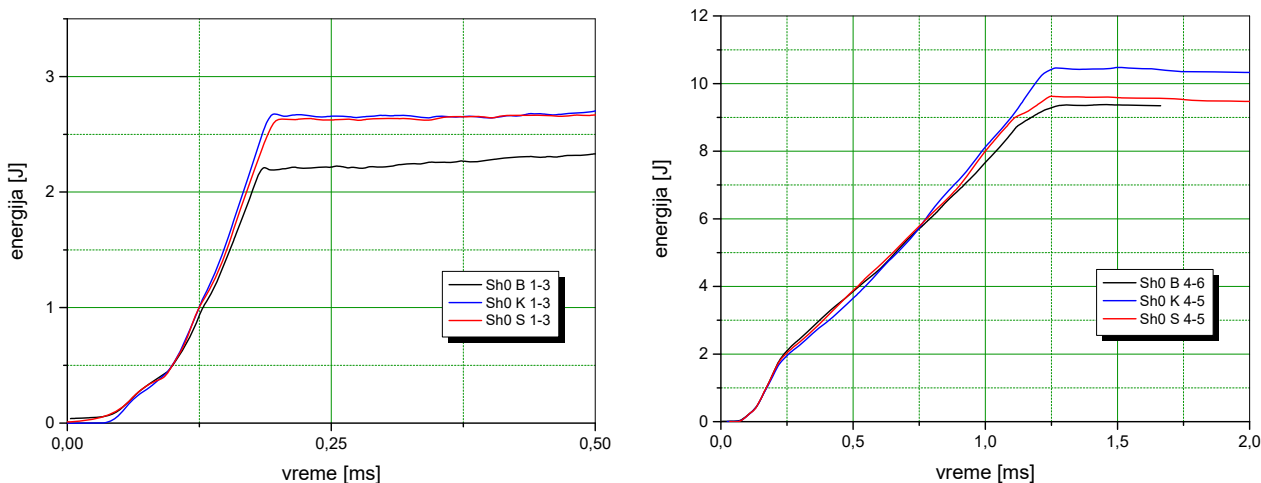
Слика 145. Дијаграми оптерећење-време и енергија-време епрувета препрег + ПВБ + 1 mas.% IF-WS<sub>2</sub>, оријентације 0°, положено



Слика 146. Дијаграми оптерећење-време и енергија-време епрувета препрег + ПВБ + 0,3 mas.% INT-WS<sub>2</sub>, оријентације 0°, усправно



Слика 147. Дијаграми оптерећење-време и енергија-време епрувета препрег + ПВБ + 0,3 mas.% INT-WS<sub>2</sub>, оријентације 0°, положено



Слика 148. Упоредни дијаграми енергија-време за препрег + ПВБ са и без наночестица оријентације  $0^\circ$ , усправно и положено



Слика 149. Епрувете препрег + ПВБ са и без наночестица оријентације  $0^\circ$  усправно и положено, после испитивања

Код епрувета оријентације  $0^\circ$  је приметно повећање енергије удара и то за IF-WS<sub>2</sub> у оба положаја епрувета за 10,9÷11,8%, а за INT-WS<sub>2</sub> је побољшање за усправни положај 11,4%, а за положени свега 1,5%. Код епрувета се види велика разлика у разарању зависно од њихове оријентације при испитивању.

#### 4.6.5.2. Резултати испитивања композита оријентације $0^\circ/90^\circ$

У табелама 66-81. дати су резултати испитивања енергије удара три врсте композитних епрувета без и са наночестицама, а на сликама 150-155. дати су дијаграми оптерећење-време и енергија-време испитаних епрувета. Табеле 82. и 83. приказују упоредне резултате све три врсте епрувета. Слика 156. приказује упоредно средње вредности енергија по групама епрувета, а слика 157. изглед епрувета након лома. Резултати испитивања су обрађени у програму *OriginPro 2016*.

Табела 66. Резултати испитивања епрувета препрег + ПВБ, оријентације 0°/90°, усправно

Ch09B us	b	d	Pmax	E
	[mm]	[mm]	[kN]	[J]
S09B 01	12,02	3,97	3,23	2,37
S09B 02	12,09	3,96	3,82	2,47
S09B 03	12,17	3,96	3,61	2,56
<b>srednja</b>	<b>12,09</b>	<b>3,96</b>	<b>3,55</b>	<b>2,47</b>
<b>odstupanje</b>			<b>0,30</b>	<b>0,10</b>
<b>% varijacije</b>			<b>8,46</b>	<b>3,91</b>

Табела 67. Резултати испитивања епрувета препрег + ПВБ, оријентације 0°/90°, положено

Ch09B pol	b	d	Pmax	E
	[mm]	[mm]	[kN]	[J]
S09B 04	3,93	12,03	2,71	7,30
S09B 05	3,92	11,94	2,52	7,33
<b>srednja</b>	<b>3,93</b>	<b>11,99</b>	<b>2,62</b>	<b>7,31</b>
<b>odstupanje</b>			<b>0,14</b>	<b>0,02</b>
<b>% varijacije</b>			<b>5,18</b>	<b>0,32</b>

Табела 68. Резултати испитивања епрувета препрег + ПВБ + 1 mas.% IF-WS<sub>2</sub>, оријентације 0°/90°, усправно

Ch09K us	b	d	Pmax	E
	[mm]	[mm]	[kN]	[J]
S09K 01	12,14	3,96	5,17	2,75
S09K 02	12,07	3,94	4,16	2,40
S09K 03	12,00	3,93	4,82	2,24
<b>srednja</b>	<b>12,07</b>	<b>3,94</b>	<b>4,72</b>	<b>2,46</b>
<b>odstupanje</b>			<b>0,51</b>	<b>0,26</b>
<b>% varijacije</b>			<b>10,82</b>	<b>10,59</b>

Табела 69. Резултати испитивања епрувета препрег + ПВБ + 1 mas.% IF-WS<sub>2</sub>, оријентације 0°/90°, положено

Ch09K pol	b	d	Pmax	E
	[mm]	[mm]	[kN]	[J]
S09K 04	11,86	3,94	3,16	7,46
S09K 05	11,88	3,96	2,69	6,46
<b>srednja</b>	<b>11,87</b>	<b>3,95</b>	<b>2,93</b>	<b>6,96</b>
<b>odstupanje</b>			<b>0,33</b>	<b>0,70</b>
<b>% varijacije</b>			<b>11,25</b>	<b>10,08</b>

Табела 70. Резултати испитивања епрувета препрег + ПББ + 0,3 мас.% INT-WS<sub>2</sub>, оријентације 0°/90°, усправно

Ch09S us	b	d	Pmax	E
	[mm]	[mm]	[kN]	[J]
S09S 01	12,06	3,94	2,82	2,37
S09S 02	12,16	3,93	3,91	2,34
S09S 03	12,08	3,91	4,97	1,95
<b>srednja</b>	<b>12,10</b>	<b>3,93</b>	<b>3,90</b>	<b>2,22</b>
<b>odstupanje</b>			<b>1,08</b>	<b>0,23</b>
<b>% varijacije</b>			<b>27,60</b>	<b>10,47</b>

Табела 81. Резултати испитивања епрувета препрег + ПББ + 0,3 мас.% INT-WS<sub>2</sub>, оријентације 0°/90°, положено

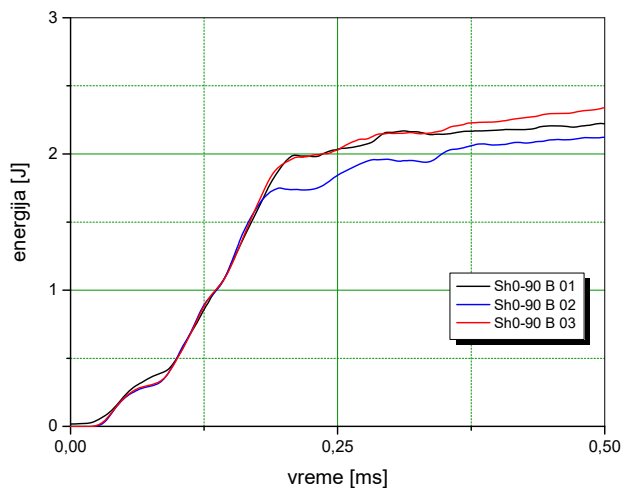
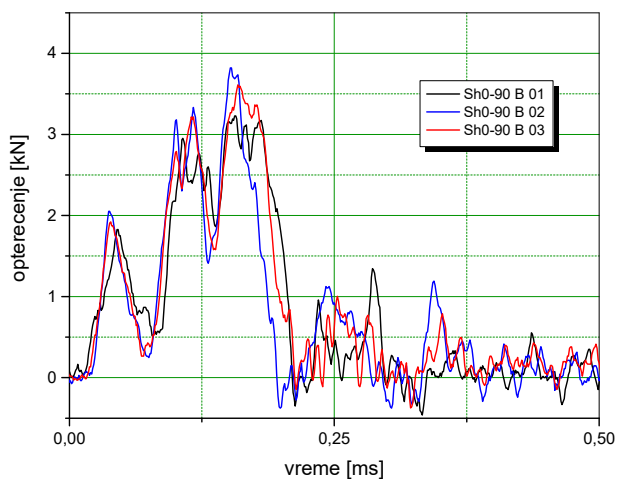
Ch09S pol	b	d	Pmax	E
	[mm]	[mm]	[kN]	[J]
S09S 04	12,02	3,93	3,14	7,81
S09S 05	11,82	3,91	4,56	6,89
<b>srednja</b>	<b>11,92</b>	<b>3,92</b>	<b>3,85</b>	<b>7,35</b>
<b>odstupanje</b>			<b>1,01</b>	<b>0,65</b>
<b>% varijacije</b>			<b>26,11</b>	<b>8,79</b>

Табела 82. Упоредни резултати испитивања епрувета без и са наночестицама, оријентације 0°/90°, усправно

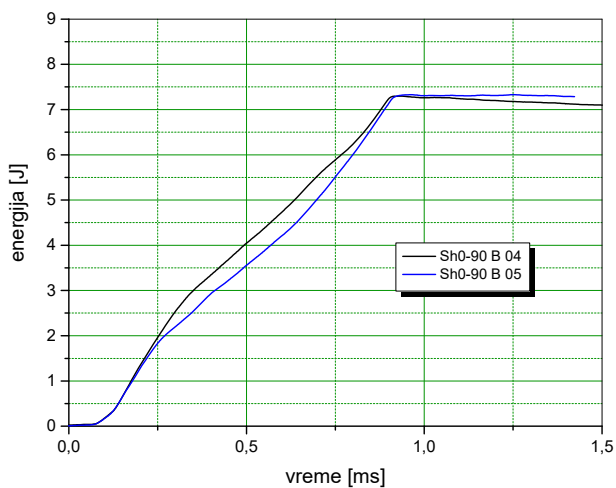
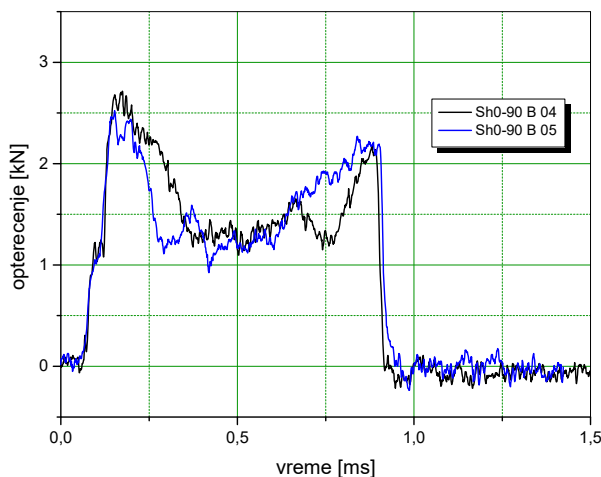
Ch09 us	E
IF/B [%]	-0,06
INT/B [%]	-10,05

Табела 83. Упоредни резултати испитивања епрувета без и са наночестицама, оријентације 0°/90°, положено

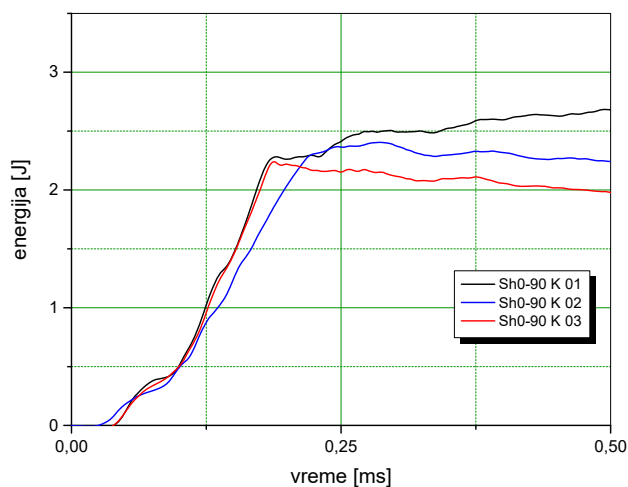
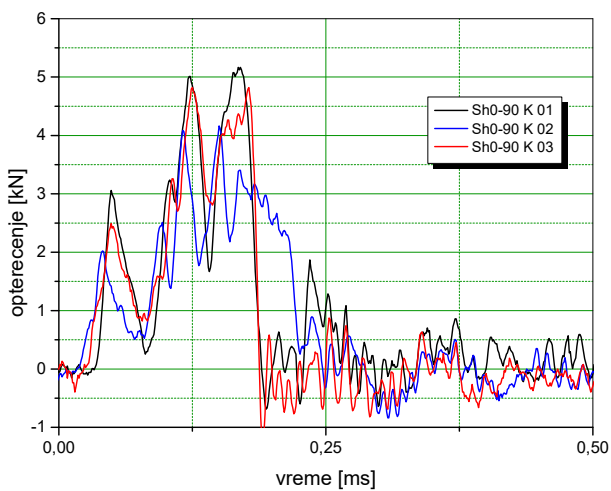
Ch09 pol	E
IF/B [%]	-4,82
INT/B [%]	0,51



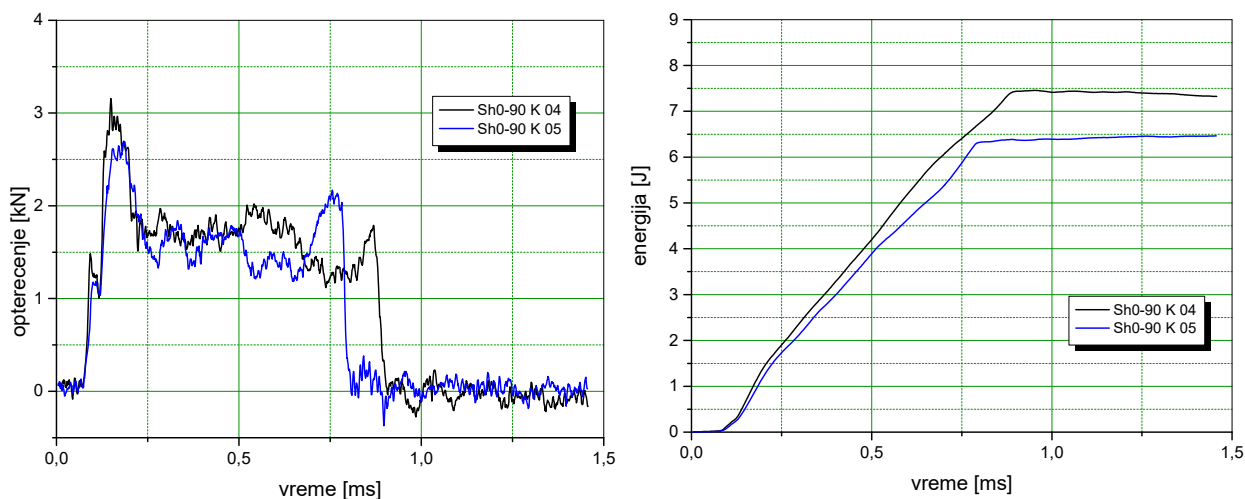
Слика 150. Дијаграми оптерећење-време и енергија-време епрувета препрег + ПВБ без наночестица, оријентације 0°/90°, усправно



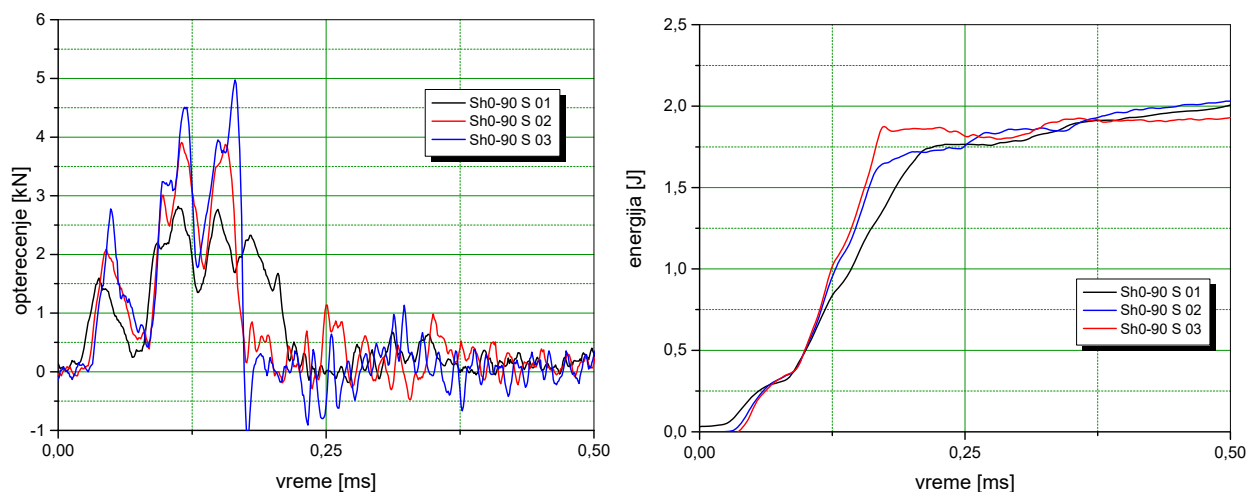
Слика 151. Дијаграми оптерећење-време и енергија-време епрувета препрег + ПВБ без наночестица, оријентације 0°/90°, положено



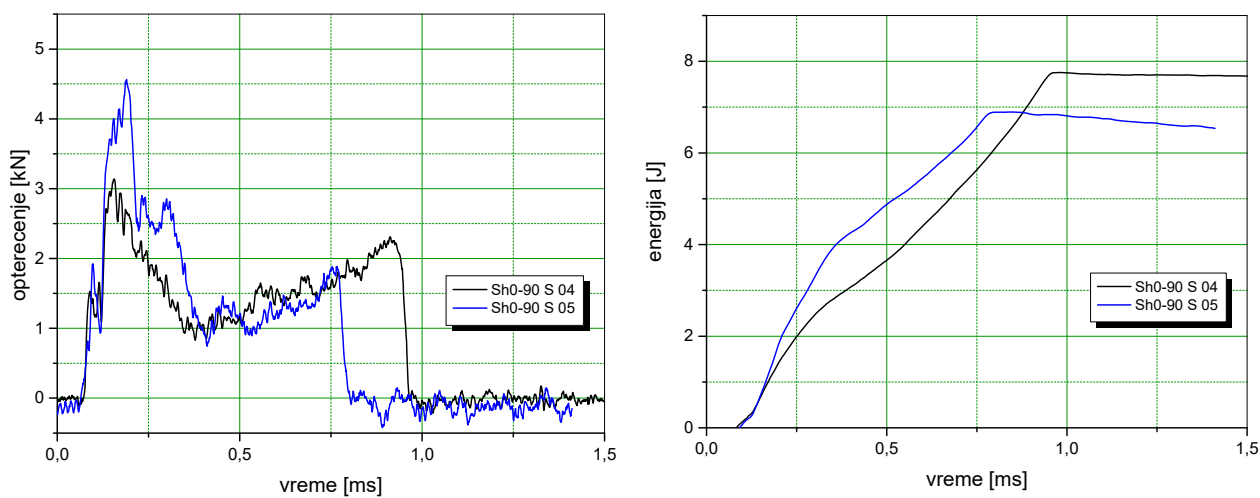
Слика 152. Дијаграми оптерећење-време и енергија-време епрувета препрег + ПВБ + 1 mas.% IF-WS<sub>2</sub>, оријентације 0°/90°, усправно



Слика 153. Дијаграми оптерећење-време и енергија-време епрувета препрег + ПВБ + 1 мас.% IF-WS<sub>2</sub>, оријентације 0°/90°, положено

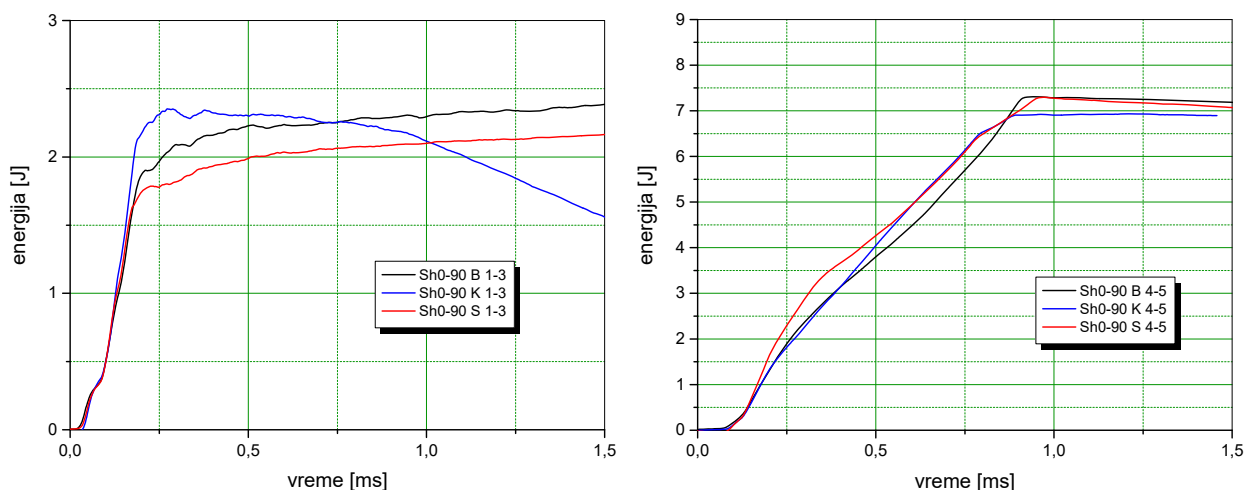


Слика 154. Дијаграми оптерећење-време и енергија-време епрувета препрег + ПВБ + 0,3 мас.% INT-WS<sub>2</sub>, оријентације 0°/90°, усправно



Слика 155. Дијаграми оптерећење-време и енергија-време епрувета препрег + ПВБ + 0,3 мас.% INT-WS<sub>2</sub>, оријентације 0°/90°, положено





Слика 156. Упоредни дијаграми енергија-време за препрег + ПВБ са и без наночестица оријентације 0°/90°, усправно и положено



Слика 157. Епрувете препрег + ПВБ са и без наночестица оријентације 0°/90°, усправно и положено после испитивања

Код епрувета оријентације 0°/90° је приметно смањење енергије удара и то за IF-WS<sub>2</sub> у положеном положају за 4,48%, а за INT-WS<sub>2</sub> је смањење за усправни положај 9,28%. У осталим случајевима практично нема утицаја наночестица на енергију удара.

#### 4.6.5.3. Резултати испитивања композита оријентације ±45°

У табелама 84-89. дати су резултати испитивања енергије удара три врсте композитних епрувета без и са наночестицама, а на сликама 158-163. дати су дијаграми оптерећење-време и енергија-време испитаних епрувета. Табеле 90. и 91. приказују упоредне резултате све три врсте епрувета. Слика 164. приказује упоредно средње вредности енергија по групама епрувета, а слика 165. изглед епрувета након лома. Резултати испитивања су обрађени у програму *OriginPro 2016*.

Табела 84. Резултати испитивања епрувета препрег + ПВБ, оријентације ±45°, усправно

Ch45B us	b	d	Pmax	E
	[mm]	[mm]	[kN]	[J]
S45B 01	11,92	3,97	1,47	3,88
S45B 02	12,15	4,00	1,97	3,92
S45B 03	11,97	4,01	1,65	4,61
<b>srednja</b>	<b>12,01</b>	<b>3,99</b>	<b>1,70</b>	<b>4,13</b>
<b>odstupanje</b>			<b>0,25</b>	<b>0,41</b>
<b>% varijacije</b>			<b>14,85</b>	<b>9,91</b>

Табела 85. Резултати испитивања епрувета препрег + ПББ, оријентације  $\pm 45^\circ$ , положено

Ch45B pol	b	d	Pmax	E
	[mm]	[mm]	[kN]	[J]
S45B 04	11,89	3,93	5,65	7,13
S45B 05	12,05	3,96	6,51	7,70
<b>srednja</b>	<b>11,97</b>	<b>3,95</b>	<b>6,08</b>	<b>7,41</b>
<b>odstupanje</b>			<b>0,61</b>	<b>0,41</b>
<b>% varijacije</b>			<b>10,01</b>	<b>5,48</b>

Табела 86. Резултати испитивања епрувета препрег + ПББ + 1 mas.% IF-WS<sub>2</sub>, оријентације  $\pm 45^\circ$ , усправно

Ch45K us	b	d	Pmax	E
	[mm]	[mm]	[kN]	[J]
S45K 01	12,13	3,97	1,43	3,26
S45K 02	12,06	3,96	1,36	3,26
S45K 03	12,01	3,96	1,62	3,33
<b>srednja</b>	<b>12,07</b>	<b>3,96</b>	<b>1,47</b>	<b>3,28</b>
<b>odstupanje</b>			<b>0,14</b>	<b>0,04</b>
<b>% varijacije</b>			<b>9,30</b>	<b>1,19</b>

Табела 87. Резултати испитивања епрувета препрег + ПББ + 1 mas.% IF-WS<sub>2</sub>, оријентације  $\pm 45^\circ$ , положено

Ch45K pol	b	d	Pmax	E
	[mm]	[mm]	[kN]	[J]
S45K 04	12,06	3,95	4,53	4,26
S45K 05	12,06	3,97	5,08	5,40
<b>srednja</b>	<b>12,06</b>	<b>3,96</b>	<b>4,80</b>	<b>4,83</b>
<b>odstupanje</b>			<b>0,39</b>	<b>0,80</b>
<b>% varijacije</b>			<b>8,20</b>	<b>16,65</b>

Табела 88. Резултати испитивања епрувета препрег + ПББ + 0,3 mas.% INT-WS<sub>2</sub>, оријентације  $\pm 45^\circ$ , усправно

Ch45S us	b	d	Pmax	E <sub>max</sub>
	[mm]	[mm]	[kN]	[J]
S45S 01	12,02	3,98	1,77	4,81
S45S 02	12,04	3,93	2,63	4,35
S45S 03	12,13	3,95	4,35	5,85
<b>srednja</b>	<b>12,06</b>	<b>3,95</b>	<b>2,92</b>	<b>5,00</b>
<b>odstupanje</b>			<b>1,31</b>	<b>0,77</b>
<b>% varijacije</b>			<b>44,90</b>	<b>15,37</b>

Табела 89. Резултати испитивања епрувета препрег + ПВБ + 0,3 мас.% INT-WS<sub>2</sub>, оријентације ±45°, положено

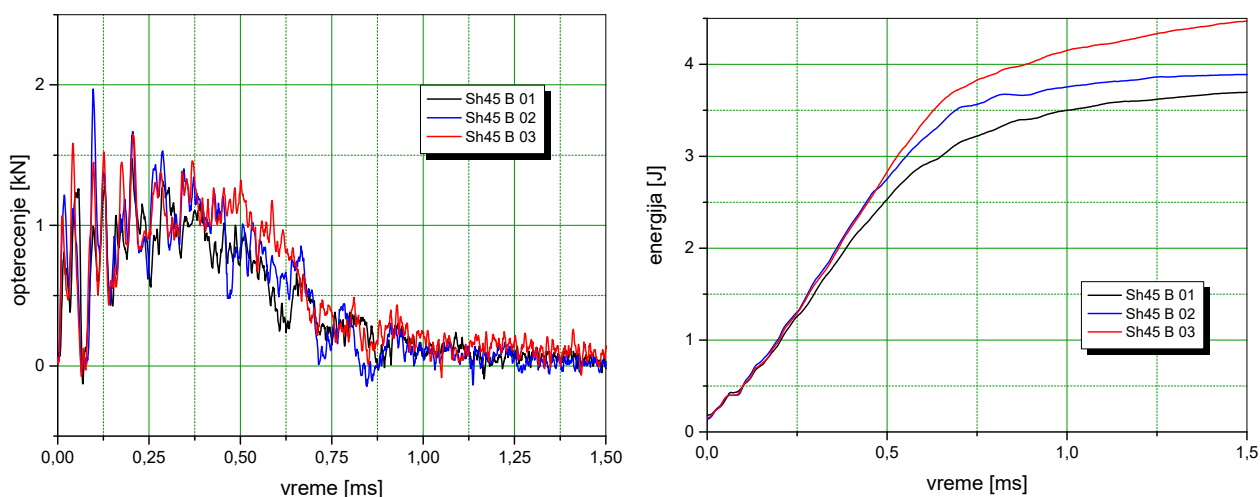
Ch45S pol	b	d	Pmax	E
	[mm]	[mm]	[kN]	[J]
S45S 04	12,02	3,99	4,27	5,73
S45S 05	12,01	3,94	4,51	6,60
<b>srednja</b>	<b>12,02</b>	<b>3,97</b>	<b>4,39</b>	<b>6,17</b>
<b>odstupanje</b>			<b>0,17</b>	<b>0,61</b>
<b>% varijacije</b>			<b>3,97</b>	<b>9,96</b>

Табела 90. Упоредни резултати испитивања епрувета без и са наночестицама, оријентације ±45°, усправно

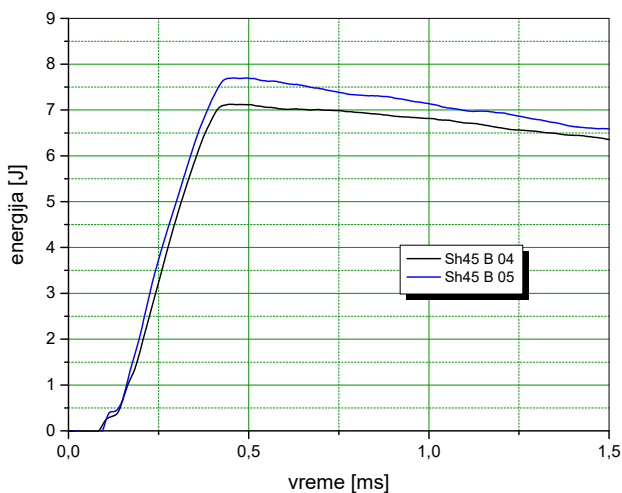
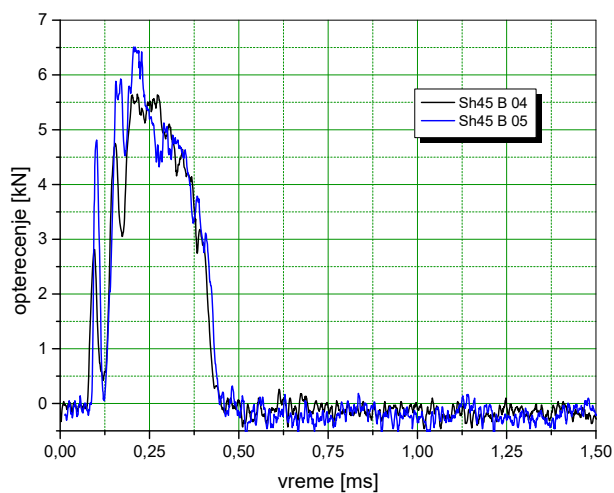
Ch45 us	E
IF/B [%]	<b>-20,63</b>
INT/B [%]	<b>21,09</b>

Табела 91. Упоредни резултати испитивања епрувета без и са наночестицама, оријентације ±45°, положено

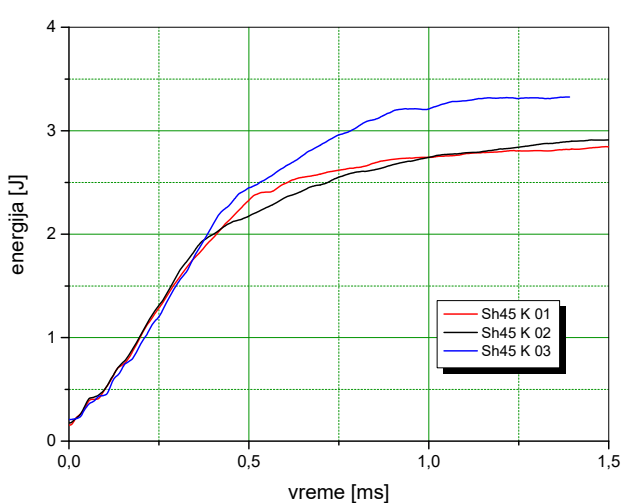
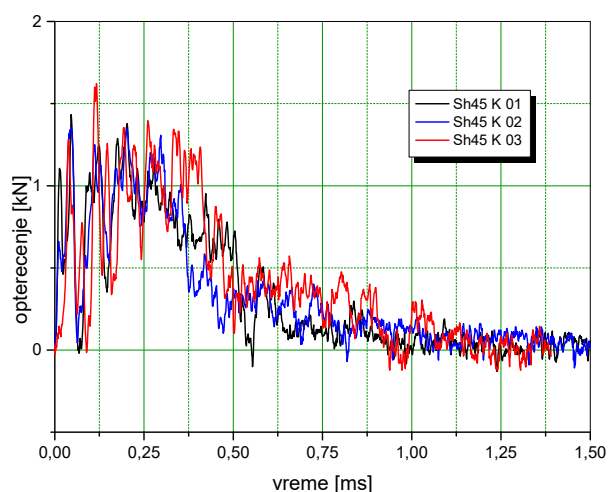
Ch45 pol	E
IF/B [%]	<b>-34,82</b>
INT/B [%]	<b>-16,81</b>



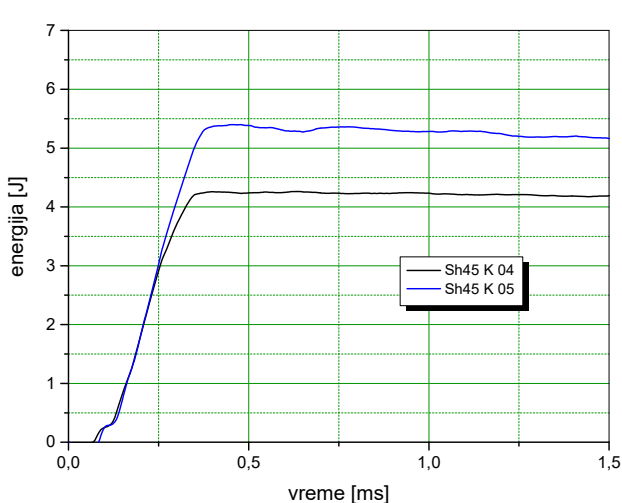
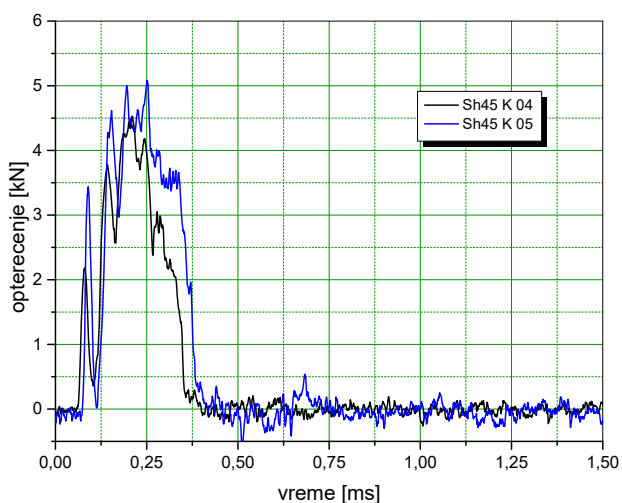
Слика 158. Дијаграми оптерећење-време и енергија-време епрувета препрег + ПВБ без наночестица, оријентације ±45°, усправно



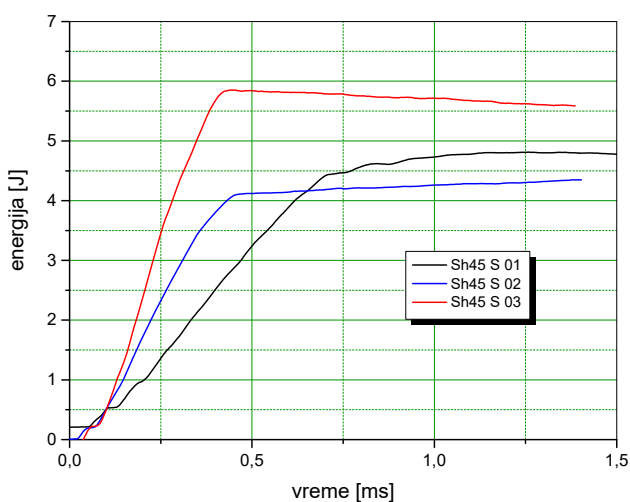
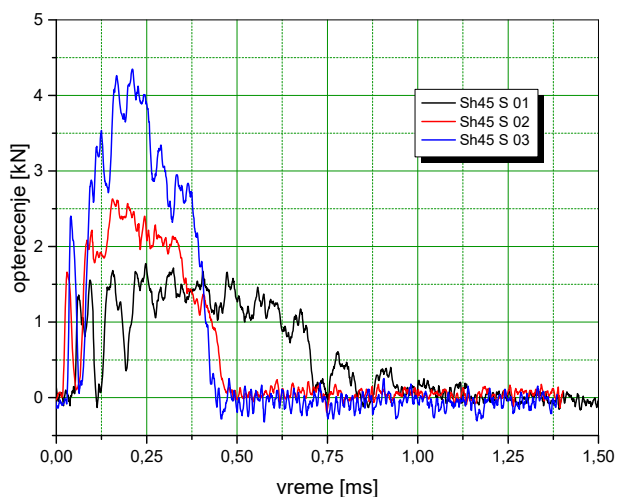
Слика 159. Дијаграми оптерећење-време и енергија-време епрувета препрег + ПВБ без наночестица, оријентације  $\pm 45^\circ$ , положено



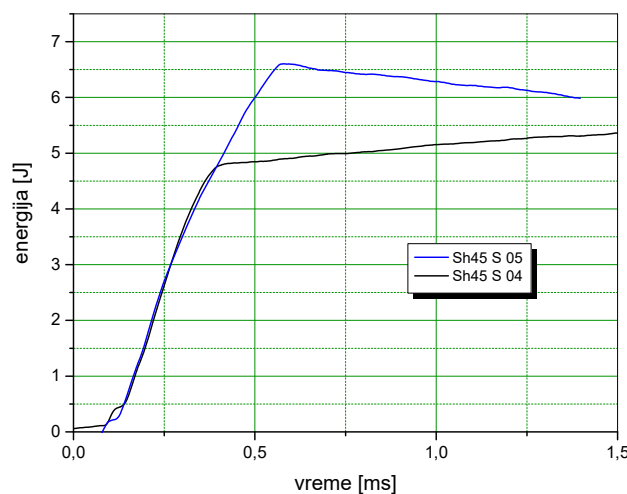
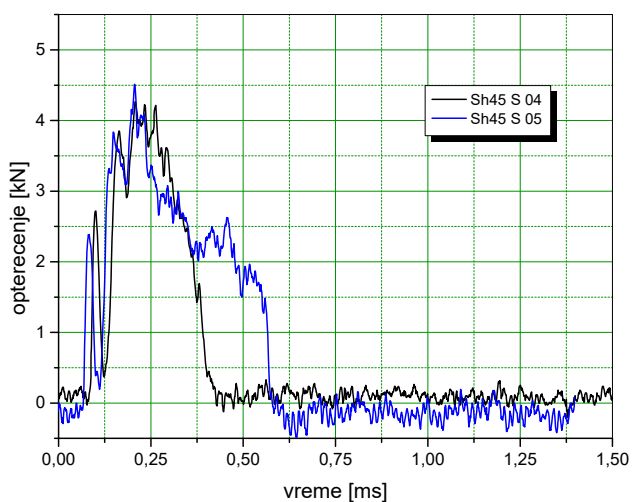
Слика 160. Дијаграми оптерећење-време и енергија-време епрувета препрег + ПВБ + 1 mas.% IF-WS<sub>2</sub>, оријентације  $\pm 45^\circ$ , усправно



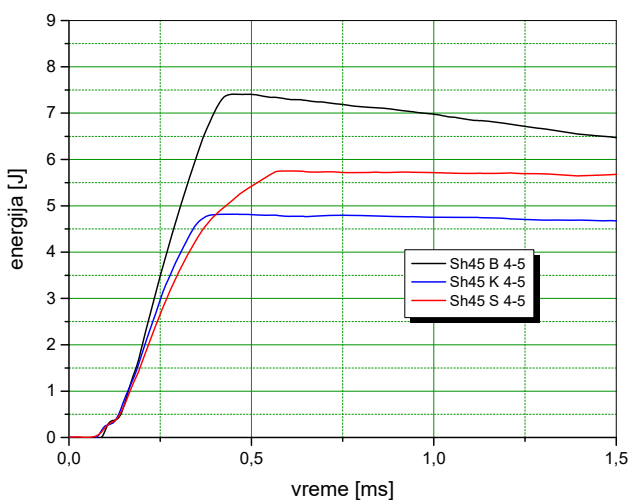
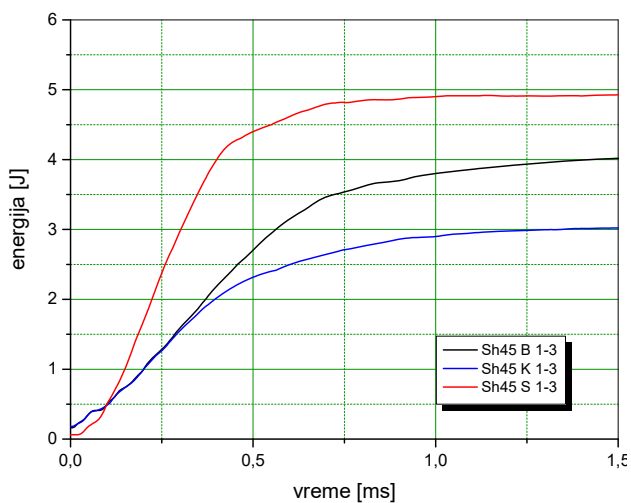
Слика 161. Дијаграми оптерећење-време и енергија-време епрувета препрег + ПВБ + 1 mas.% IF-WS<sub>2</sub>, оријентације  $\pm 45^\circ$ , положено



Слика 162. Дијаграми оптерећење-време и енергија-време епрувета препрег + ПВБ + 0,3 мас.% INT-WS<sub>2</sub>, оријентације ±45°, усправно



Слика 163. Дијаграми оптерећење-време и енергија-време епрувета препрег + ПВБ + 0,3 мас.% INT-WS<sub>2</sub>, оријентације ±45°, положено



Слика 164. Упоредни дијаграми енергија-време за препрег + ПВБ са и без наночестица оријентације ±45°, усправно и положено



Слика 165. Епрувете препрег + ПВБ са и без наночестица оријентације  $\pm 45^\circ$ , усправно и положено, после испитивања

Код епрувета оријентације  $45^\circ$  је приметно повећање енергије удара само у усправном положају са INT-WS<sub>2</sub> за 21,7%, док је у положеном случају пад од 17,4%. Што се тиче IF-WS<sub>2</sub> у оба положаја епрувета пад енергије је 20,4% за усправан и 35,6% за положен. Код епрувета се не види велика разлика у разарању зависно од њихове оријентације при испитивању.

#### 4.7. НУМЕРИЧКА АНАЛИЗА ДОБИЈЕНИХ РЕЗУЛТАТА

Уколико саберемо резултате према усмерењу влакана,  $0^\circ$  - уздужно оријентисана влакна,  $90^\circ$  - попречно оријентисана влакна,  $0^\circ/90^\circ$  - попречно укрштена влакна и  $\pm 45^\circ$  - угаоно укрштена влакна, можемо ближе сагледати утицај наночестица WS<sub>2</sub> на композит угљенична влакна/епокси смола [81].

Табеле 92-94. нам дају процентуално увећање или умањење главних карактеристика композита. Мора се напоменути, још једном, да је испитивани композит високо модулни те су његове карактеристике највишег нивоа. Може се закључити да се најповољнији утицај наночестица WS<sub>2</sub> огледа на повећању дуктилности матрице што се види по резултатима испитивања ПВБ/епокси смоле и композита са попречно оријентисаним влакнима. Побољшане су и карактеристике затезне чврстоће, модула еластичности, смицајне чврстоће и енергије удара код композита са уздужно оријентисаним влакнима. Његове карактеристике испитиване на савијање су практично неизмењене, табела 92.

Табела 92. Упоредни резултати испитивања епрувета без и са наночестицама, оријентације  $0^\circ$

	Z0			S0			I0	Ch0 us	Ch0 pol
	$\sigma_1$	$E_1$	$\epsilon_1$	$E_f$	$\sigma$	$\epsilon$	$\tau_{13}$	E	E
	[MPa]	[GPa]	[%]	[GPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[J]	[J]
<b>B</b>	654,11	277,73	0,24	215,80	395,99	0,38	47,85	2,44	9,4
<b>IF-WS<sub>2</sub></b>	812,62	305,60	0,26	215,63	389,32	0,40	49,30	2,74	10,49
<b>INT-WS<sub>2</sub></b>	836,36	315,87	0,26	211,25	397,37	0,38	51,03	2,73	9,64
<b>IF/B [%]</b>	24,23	10,04	11,93	-0,08	-1,68	4,94	3,03	12,43	11,64
<b>INT/B [%]</b>	27,86	13,73	10,39	-2,11	0,35	-0,12	6,64	11,86	2,60

Са друге стране за композитне узорке са попречно укрштеним влакнима, табела 93, приметно је побољшање у смицајним и карактеристикама на савијање, док се остале карактеристике већином у паду или неизмењене. Ово се може тумачити као последица клизања између попречно укрштених ламина при затезању и удару, јер су честице WS<sub>2</sub> олакшале трење. Код угаоно укрштених композита, табела 94, су практично све карактеристике неизмењене или у паду, а понајвише сама дуктилност, што се као и у претходном случају може тумачити "подмазивањем" наночестица. Мора се узети у обзир и ред величине посматраних особина и напоменути да је приликом израде узорака велики утицај и људског фактора на хомогеност и квалитет израђеног композита, јер су све операције фабрикације ручно рађене.

Табела 93. Упоредни резултати испитивања епрувета без и са наночестицама, оријентације 0°/90°

	Z09			S09			I09	Ch09 us	Ch09 pol
	$\sigma_{lt}$	$E_{lt}$	$\epsilon_{lt}$	$E_f$	$\sigma$	$\epsilon$	$\tau_{13}$	E	E
	[MPa]	[GPa]	[%]	[GPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[J]	[J]
<b>B</b>	542,35	175,19	0,32	95,35	269,27	0,50	29,26	2,47	7,3
<b>IF-WS<sub>2</sub></b>	523,83	174,50	0,30	103,90	281,07	0,60	33,29	2,46	6,96
<b>INT-WS<sub>2</sub></b>	571,02	164,38	0,35	109,18	302,68	0,50	34,52	2,22	7,35
<b>IF/B [%]</b>	-3,41	-0,39	-7,33	8,97	4,38	22,70	13,77	-0,06	-4,82
<b>INT/B [%]</b>	5,29	-6,17	9,68	14,51	12,41	3,03	17,99	-10,05	0,51

Табела 94. Упоредни резултати испитивања епрувета без и са наночестицама, оријентације ±45°

	Z45					S45			I45	Ch45 us	Ch45 pol
	$\tau_{12}$	$E_x$	$\epsilon_x$	$G_{12}$	$\nu$	$E_f$	$\sigma$	$\epsilon$	$\tau_{13}$	E	E
	[MPa]	[GPa]	[%]	[GPa]		[GPa]	[MPa]	[%]	[J/mm <sup>2</sup> ]	[J]	[MPa]
<b>B</b>	53,06	13,05	8,82	3,53	0,90	11,66	130,70	4,00	30,07	4,13	7,41
<b>IF-WS<sub>2</sub></b>	51,27	12,80	5,01	3,15	0,89	11,75	140,40	3,50	27,10	3,28	4,83
<b>INT-WS<sub>2</sub></b>	51,42	12,83	6,70	3,80	0,90	11,63	137,03	3,40	27,90	5,00	6,17
<b>IF/B [%]</b>	-3,39	-1,93	-43,2	-0,10	0	0,82	7,43	-11,74	-9,87	-20,63	-34,82
<b>INT/B [%]</b>	-3,10	-1,67	-24,1	0,10	0	-0,21	4,85	-13,21	-7,23	21,09	-16,81

## 5. ЗАКЉУЧАК

Савремене технологије имају све теже задатке које намећу захтеви пре свега ваздухопловне, војне и аутомобилске индустрије. Композитни материјали успевају да надмаше својим карактеристикама метале и легуре пре свега високом чврстоћом, тврдоћом, а малом тежином и давањем могућности да се од њих праве најразличитији облици који су отпорни на високе температуре, корозију и радарски су невидљиви. Нова истраживања су усмерена у правцу пројектовања материјала са траженим особинама применом различитих наночестичних ојачања.

Дизајниран је нови ламинирани композит са додавањем ПББ и две врсте наночестица – облика фулерена, IF-WS<sub>2</sub> и облика наноцеви INT-WS<sub>2</sub>, на комерцијално произведен препрег угљенично влакно/епокси смола.

Припремљени су нанокомпозити ручним премазивањем препрега са ПББ и ПББ који је ојачан додавањем WS<sub>2</sub> посебном техником деагломерације и дисперзије. Испитане су три врсте композитних материјала:

- ламинат препрега угљенично влакно/епокси смола са ПББ,
- ламинат препрега угљенично влакно/епокси смола са ПББ и IF-WS<sub>2</sub>,
- ламинат препрега угљенично влакно/епокси смола са ПББ и INT-WS<sub>2</sub>.

Композит је произведен са различитим оријентацијама влакана према АСТМ прописима за механичка испитивања. Реализована су следећа испитивања:

- испитивање на затезање у циљу одређивања затезне чврстоће, модула еластичности при затезању, Поасоновог коефицијента, смицајне чврстоће и модула смицања:
  - епрувете дебеле смоле ПББ, ПББ и IF-WS<sub>2</sub>, ПББ и INT-WS<sub>2</sub>,
  - епрувете композита са уздужном, попречном, попречно укрштеном и угаоно укрштеном оријентацијом влакана, ПББ, ПББ и IF-WS<sub>2</sub>, ПББ и INT-WS<sub>2</sub>,
- испитивање на савијање у циљу одређивања савојне чврстоће, модула савијања и угиба композитних епрувета са уздужном, попречно укрштеном и угаоно укрштеном оријентацијом влакана, ПББ, ПББ и IF-WS<sub>2</sub>, ПББ и INT-WS<sub>2</sub>,
- испитивање интерламинарне чврстоће на смицање композитних епрувета са уздужном, попречно укрштеном и угаоно укрштеном оријентацијом влакана, ПББ, ПББ и IF-WS<sub>2</sub>, ПББ и INT-WS<sub>2</sub>,
- испитивање енергије удара композитних епрувета са уздужном, попречно укрштеном и угаоно укрштеном оријентацијом влакана, у усправном и положеном положају епрувета ПББ, ПББ и IF-WS<sub>2</sub>, ПББ и INT-WS<sub>2</sub>.

Након експерименталног дела са квалитетном аквизицијом података мерења урађена је добра обрада резултата испитивања и упоредна анализа затезних, савојних, инерламинарних и ударних карактеристика материјала. Како композити генерално имају већа одступања резултата при механичким испитивањима, уз мањи број испитаних епрувета, при анализи резултата мора се проширити граница поверења у узорак. Сама техника израде композита примењена у овом истраживању би могла бити



унапређена тако што би се у производњи препрега наночестице уградиле у смолу пре њеног наношења на влакна. Тиме би се избегла неравномерност у ручном наношењу премаза на препрег и смањило расипање резултата испитивања.

Посматрањем на СЕМ микроскопу и по урађеној ПСА анализи, утврђено је да постоје агломерати наночестица и поред урађеног третмана деагломерације и дисперзије. ФРИР спектроскопија је показала да постоји реакција ПВБ – епокси смола али да нема реакције са  $WS_2$ .

Додавање малих концентрација IF- $WS_2$  и INT- $WS_2$  повољно утиче на механичке карактеристике композитног материјала угљенична влакна-епокси смола. Побољшане су механичке карактеристике композита у неким правцима оријентације нити, као и термичке отпорности што је потврђено ДМТА анализом.

Ово истраживање је дало обећавајуће резултате и може се наставити на другим композитним материјалима и са другим – још нижим концентрацијама наночестица. Како се овакви композити користе у изради летелица, свака промена која би повољно утицала на апсорпцију удара и акцидената у лету и на слетању, је добро дошла.

## 6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Smith, W. F., Hashemi, J., *Foundations of Materials Science and Engineering*, 6th ed., McGraw Hill, 2019.
- [2] Jones, R. M., *Mechanics of Composite Materials*, 2nd ed., Taylor & Francis Inc.: USA, 1999.
- [3] Baker, A., Dutton, S., Kelly, D., *Composite Materials for Aircraft Structures*, 2nd ed., American Institute of Aeronautics and Astronautics. Inc: Reston, VA, 2004.
- [4] Rahaman, A., Imran, M., *Epoxy-Carbon Nanotubes as Matrix in Glass Fiber Reinforced Laminated Composites*, *Fullerens, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 2017, 25, 559–562, DOI: 10.1080/1536383X.2017.1330264.
- [5] Soutis, C. *Carbon Fiber Reinforced Plastics in Aircraft Construction*. *Mat. Sci. Eng. A-Struct.* 2005, 412, 171–176. DOI: 10.1016/j.msea.2005.08.064.
- [6] Kausar, A. *Estimation of Thermo-Mechanical and Fire Resistance Profile of Epoxy Coated Polyurethane/Fullerene Composite Films*. *Fullerens, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 2016, 24, 391–399. DOI: 10.1080/1536383X.2016.1172067.
- [7] Brantseva, T. V., Solodilov, V. I., Antonov, S. V., Gorbunova, I. Y., Korohin, R. A., Shapagin, A. V., Smirnova, N. M., *Epoxy Modification with Poly(Vinyl Acetate) and Poly(Vinyl Butyral). I. Structure, Thermal, and Mechanical Characteristics*, *J. Appl. Polym. Sci.* 2016, 133, 44081 DOI: 10.1002/app.44081.
- [8] Huang, Y., Kinloch, A. J., *Modelling of the Toughening Mechanisms in Rubber-Modified Epoxy Polymers Part I Finite Element Analysis Studies*, *J. Mater. Sci.* 1992, 27, 2753–2762, DOI: 10.1007/BF00540702.
- [9] Shaw, S. J., *Rubber Modified Epoxy Resins*. In: *Rubber Toughened Engineering Plastics*, Collyer A.A., Eds., Springer: Dordrecht, 1994
- [10] Mallick, P. K., *Fiber-Reinforced Composites: materials, Manufacturing, and Design*, CRC press: Boca Raton, FL 2007, Chapter 1.
- [11] Ismail, I. N., Ishak, Z. A. M., Jaafar, M. F., Omar, S., Zainal Abidin, M. F., Ahmad Marzuki, H. F., *Thermomechanical Properties of Toughened Phenolic Resol Resin*, *Solid State Sci. Technol.* 2009, 17, 155–165.
- [12] Ozsoy, I., Demirkol, A., Mimaroglu, A., Unal, H., Demir, Z., *The Influence of Micro- and Nano-Filler Content on the Mechanical Properties of Epoxy Composites*, *SV-JME* 2015, 61, 601–609. DOI: 10.5545/sv-jme.2015.2632.
- [13] Blokhin, A. N., Dyachkova, T. P., Maksimkin, A. V., Stolyarov, R. A., Suhorukov, A. K., Burmistrov, I. N., Kharitonov, A. P., *Polymer Composites Based on Epoxy Resin with Added Carbon Nanotubes*, *Fullerens, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 2020, 28, 45–49. DOI: 10.1080/1536383X.2019.1671364.
- [14] Sidhu, J. S., Lathkar, G. S., Sharma, S. B., *Development of Epoxy Composite Filled with Micro Tungsten Disulphide Particles and Its Mechanical Properties*, *AMR* 2014, 875-877, 288–294. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.875-877.288.
- [15] Shneider, M., Dodiuk, H., Kenig, S., Tenne, R., *The Effect of Tungsten Sulfide Fullerene-Like Nanoparticles on the Toughness of Epoxy Adhesives*, *J. Adhes. Sci. Technol.* 2010, 24, 1083–1095. DOI: 10.1163/016942409X12584625925268.
- [16] Elad, Z., Sharon, B., Mark, S., Hanna, D., Samuel, K., Reshef, T., Wagner, H. D., *The Effect of WS<sub>2</sub> Nanotubes on the Properties of Epoxy-Based Nanocomposites*, *J. Adhes. Sci. Technol.* 2011, 25, 1603–1617. DOI: 10.1163/016942410X524138.
- [17] Sônego, M., Costa, L. C., Ambrósio, J. D., *Flexible Thermoplastic Composite of Polyvinyl Butyral (PVB) and Waste of Rigid Polyurethane Foam*, *Polímeros* 2015, 25, 175–180. DOI: 10.1590/0104-1428.1944.

- [18] Kumar, P., Khan, N., Kumar, D., *Polyvinyl Butyral (PVB), Versatile Template for Designing Nanocomposite/Composite Materials: A Review*, Gctl. 2016, 2, 185–194. DOI: 10.18510/gctl.2016.244.
- [19] Samolov A., Simic D., Totovski Lj., *Spectrophotometric properties of PVB/WS<sub>2</sub> thin films*, 8<sup>th</sup> International Scientific Conference on Defensive Technologies OTEH 2018, Belgrade, 11-12 October 2018. Proceedings, ISBN 978-8681123-88-1, pp. 416–420.
- [20] Simić, D. M., Stojanović, D. B., Dimić, M., Totovski, L., Brzić, S., Uskoković, P. S., Aleksić, R. R., *Preliminary Analysis of the Possibility of Preparing PVB/IF-WS<sub>2</sub> Composites. Effect of Nanoparticles Addition on Thermal and Rheological Behavior of PVB*, Sci. Tech. Rev. 2016, 66, 15–21. No DOI: 10.5937/STR1604015S.
- [21] Simić, D. M., Stojanović, D. B., Kojović, A., Dimić, M., Totovski, L., Brzić, S., Uskoković, P. S., Aleksić, R., *Inorganic Fullerene-Like IF-WS<sub>2</sub>/PVB Nanocomposites of Improved Thermo-Mechanical and Tribological Properties*, Mater. Chem. Phys. 2016, 184, 335– 344. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2016.09.060.
- [22] Tenne, R., Redlich, M., *Recent Progress in the Research of Inorganic Fullerene-like Nanoparticles and Inorganic Nanotubes*, Chem. Soc. Rev. 2010, 39, 1423–1434. DOI: 10.1039/b901466g.
- [23] Tenne, R., *Inorganic Nanotubes and Fullerene-like Nanoparticles*, Nat. Nanotechnol. 2006, 1, 103–111. DOI: 10.1038/nnano.2006.62.
- [24] Tevet, O., *Mechanical and Tribological Properties of Inorganic Fullerene-like (IF) Nanoparticles*, Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel, 2011
- [25] Kaplan-Ashiri, I., Tenne, R., *Mechanical Properties of WS<sub>2</sub> Nanotubes*, J. Clust. Sci. 2007, 18, 549–563. DOI: 10.1007/s10876-007-0118-9.
- [26] Zak, A., Sallacan-Ecker, L., Margolin, A., Feldman, Y., Popovitz-Biro, R., Albu-Yaron, A., Genut, M., Tenne, R., *Scaling up of the WS<sub>2</sub> Nanotubes Synthesis*, Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures, 2010, 19, 18–26. DOI: 10.1080/1536383X.2010.488594.
- [27] Kaplan-Ashiri, I., Cohen, S. R., Gartsman, K., Ivanovskaya, V., Heine, T., Seifert, G., Wiesel, I., Wagner, H. D., Tenne, R., *On the Mechanical Behavior of WS<sub>2</sub> Nanotubes under Axial Tension and Compression*, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 2006, 103, 523–528. DOI: 10.1073/pnas.0505640103.
- [28] Xu, F., *Large Scale Manufacturing of IF-WS<sub>2</sub> Nanomaterials and Their Application in Polymer Nanocomposites*; University of Exeter: Devon, UK, 2013
- [29] Simic, D. M., Stojanovic, D. B., Dimic, M., Miskovic, K., Marjanovic, M., Burzic, Z., Uskokovic, P. S., Zak, A., Tenne, R., *Impact Resistant Hybrid Composites Reinforced with Inorganic Nanoparticles and Nanotubes of WS<sub>2</sub>*, Composites Part B 2019, 176, 107222. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107222.
- [30] Lazić, D. S., Simić, D. M., Samolov, A. D., Jovanović, D., *Properties of Standard Polymeric and Water-Based Coatings for Military Camouflage Protection with Addition of Inorganic Fullerene-like Tungsten Disulphide (IF-WS<sub>2</sub>) Nanoparticles*, Sci. Tech. Rev. 2017, 67, 38–44. NoDOI: 10.5937/STR1701038L.
- [31] Lazić, D. S., Simić, D. M., Samolov, A. D., *Effect of IF-WS<sub>2</sub> nanoparticles addition on physical-mechanical and rheological properties and on chemical resistance of polymeric coating and polyurethane paint*, 7<sup>th</sup> International Scientific Conference on Defensive Technologies OTEH 2016, Belgrade, 6-7 October 2016. Proceedings, ISBN 978-86-81123-82-9, pp. 609–613.
- [32] Golbang, A., Harkin-Jones, E., Wegrzyn, M., Campbell, G., Archer, E., McIlhagger, A., *Production and characterization of PEEK/IF-WS<sub>2</sub> nanocomposites for additive manufacturing: Simultaneous improvement in processing characteristics and material properties*, Additive Manuf. 2020, 31, 100920, DOI: 10.1016/j.addma.2019.100920.

- [33] Hou, X., Shan, C. X., Choy, K. L., *Microstructures and Tribological Properties of PEEK Based Nanocomposite Coatings Incorporating Inorganic Fullerene-like Nanoparticles*, Surf. Coat. Technol. 2008, 202, 2287–2291. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2007.08.010.
- [34] Obradović, V., Simić, D., Zrilić, M., Stojanović, D. B., Uskoković, P. S., *Novel Hybrid Nanostructures of Carbon Nanotube/Fullerene-like Tungsten Disulfide as Reinforcement for Aramid Fabric Composites*, Fibers Polym. 2021, 22, 528–539. DOI: 10.1007/s12221-021-0278-5.
- [35] Mannan S., Paul Knox J., Basu S., *Correlations between axial stiffness and microstructure of a species of bamboo*, R. Soc. open sci. 4: 160412 , 2017., DOI:10.1098/rsos.160412
- [36] <https://www.istockphoto.com/photos/birds-nest-with-eggs>
- [37] Ashby, M. F., *Materials Selection in Mechanical Design*, 2<sup>nd</sup> edition, Butterworth-Heinemann, 2000.
- [38] Schürmann H., *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*, 2 Auflage, Springer Berlin Heidelberg New York, 2007.
- [39] [https://ferrelljenkins.files.wordpress.com/2020/03/brick-making-tomb-of-rekhmire\\_fjenkins012009\\_1418sm.jpg](https://ferrelljenkins.files.wordpress.com/2020/03/brick-making-tomb-of-rekhmire_fjenkins012009_1418sm.jpg)
- [40] <https://www.flickr.com/photos/mharrsch/32685799858>
- [41] Ashby M., Shercliff H., Cebon D., *Materials*, 4<sup>th</sup> Edition Butterworth-Heinemann, 2018.
- [42] <https://romeorim.com/what-are-composites/>
- [43] Callister W., Rethwisch D., *Materials Science and Engineering*, 8th International edition (2010)
- [44] Askeland D., Fulay P., Wright W., *The Science and Engineering of Materials*, Sixth Edition, 2010. Cengage Learning
- [45] Smith W., Hashemi J., Presuel-Moreno F., *Foundations of Materials Science and Engineering*, 6<sup>th</sup> Edition, McGraw-Hill Education, 2019.
- [46] *ASM Handbook, Vol. 21, Composites*, 2001., ASM International
- [47] Christian C., Amine B., Caroline P., *Polyvinyl Butyral*, Handbook of Thermoplastics, 2<sup>nd</sup> ed., Olabisi O., Adewale K., Eds. CRC Press: Boca Raton, FL, 2016., DOI: 10.1201/b19190-4.
- [48] *HexPly® Prepreg Technology*, Hexcel Corporation, January 2013
- [49] Campbell F. C., *Manufacturing Processes For Advanced Composites*, Elsevier Ltd, Oxford, Reprinted 2004
- [50] Hatto P., *ISO consensus definitions relevant to nanomaterials and nanotechnologies*, International Organization for Standardization, in: 4th Annual Nano Safety for Success Dialogue, no. March, Brussels, 2011, pp. 1–12.
- [51] Kharat W., Sidhu J., *Development of Epoxy Based Composites Filled With Boron Carbide (B<sub>4</sub>C), Tungsten Disulphide (WS<sub>2</sub>) and Evaluation of its Mechanical Properties*, International Journal of Mechanical Engineering Research. ISSN 2249-0019 Volume 6, Number 1 (2016), pp. 19-30
- [52] Rapoport L., Fleischer N. and Tenne R., *Applications of WS<sub>2</sub> (MoS<sub>2</sub>) inorganic nanotubes and fullerene-like nanoparticles for solid lubrication and for structural nanocomposites*, Journal of Materials Chemistry, May 2005
- [53] <http://www.apnano.com/>
- [54] Tevet O., *Mechanical and tribological properties of inorganic fullerene-like (IF) nanoparticles*, Weizmann Institute of science, Rehovot, Israel, 2011
- [55] ASTM D3039/D3039M–17 *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, ASTM International: West Conshohocken, PA, 2017
- [56] ASTM D7264/D7264M–21 *Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, ASTM International: West Conshohocken, PA, 2021
- [57] [https://www.zwickroell.com/fileadmin/content/Files/PDF/testXpo/Vortraege/2018/ZwickRoell\\_Helmut\\_Fahrenheit\\_ISO527\\_en.pdf](https://www.zwickroell.com/fileadmin/content/Files/PDF/testXpo/Vortraege/2018/ZwickRoell_Helmut_Fahrenheit_ISO527_en.pdf)

- [58] ASTM D790-17 *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*, ASTM International: West Conshohocken, PA, 2017
- [59] ASTM D2344/D2344M-22 *Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates*, ASTM International: West Conshohocken, PA, 2022
- [60] ASTM D256-10, *Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics*, ASTM International: West Conshohocken, PA, 2018
- [61] ASTM D6110-18, *Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics*, ASTM International: West Conshohocken, PA, 2018
- [62] ASTM D3518/D3518M-18, *Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a  $\pm 45^\circ$  Laminate*, ASTM International: West Conshohocken, PA, 2018
- [63] [https://makesat.com/uploads/product\\_document/37/DIALEAD\\_EN201609.pdf](https://makesat.com/uploads/product_document/37/DIALEAD_EN201609.pdf)
- [64] [https://www.compositeshop.de/xoshop/files/CP003\\_1802.pdf](https://www.compositeshop.de/xoshop/files/CP003_1802.pdf)
- [65] [https://www.kuraray.com/uploads/5c4fa65dbe70f/160812\\_TDS\\_Mowital\\_B\\_EN.pdf](https://www.kuraray.com/uploads/5c4fa65dbe70f/160812_TDS_Mowital_B_EN.pdf)
- [66] <https://www.hexion.com/CustomServices/PDFDownloader.aspx?type=recipe&pid=c311c63d-5814-6fe3-ae8a-ff0300fcd525>
- [67] <https://www.hexion.com/CustomServices/PDFDownloader.aspx?type=tds&pid=6a45c83d-5814-6fe3-ae8a-ff0300fcd525>
- [68] <https://www.generaladhesivos.com/proveedor-pegamento/885hoja-tecnica-AW%20106-HV%20953%20U.pdf>
- [69] ASTM D3776/D3776M-20, *Standard Test Method for Mass Per Unit Area (Weight) of Fabric*, ASTM International: West Conshohocken, PA, 2020
- [70] ASTM D2584-18, *Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins*, ASTM International: West Conshohocken, PA, 2018
- [71] ASTM D2734-16, *Standard Test Methods for Void Content of Reinforced Plastics*, ASTM International: West Conshohocken, PA, 2016
- [72] ASTM D3171-22, *Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials*, ASTM International: West Conshohocken, PA, 2022
- [73] Burzić Z., Čurović J., *Oštećenja kompozitnih materijala na sredstvima NVO usled dinamičkih opterećenja*, NTI vol. 39 br. 6, VTI Beograd, 2005, ISSN 1820-3418
- [74] ASTM D638-22 *Standard test method for tensile properties of plastics*, ASTM International: West Conshohocken, PA, 2022
- [75] *MIL-HDBK-17-1F, Volume 1 of 5, Composite Materials Handbook, Volume 1. Polymer Matrix Composites Guidelines For Characterization Of Structural Materials*, Department Of Defense, USA, 2002
- [76] Zohar E. et al, *The Effect of WS2 Nanotubes on the Properties of Epoxy-Based Nanocomposites*, Journal of Adhesion Science and Technology, 2012; DOI:10.1163/016942410X524138]
- [77] Xu F., Yan C., Shyng Y., Chang H., Xia Y., Zhu Y., *Ultra-toughened nylon 12 nanocomposites reinforced with IF-WS2.*, Nanotechnology 25, 2014, 25:325701-11
- [78] Reddy C., Zak A., Zussman E., *WS2 nanotubes embedded in P MMA nanofibers as energy absorptive material*, J Mater Chem, 2011;21:16086-93
- [79] Ma T., Zhang T., Gao PG., Zhang JC., *Synthesis and properties of ultrahigh molecular weight polyethylene/WS2 Nanoparticle fiber for bullet-proof materials.* Chin Sci Bull, 2013, 58:945-8.
- [80] Marjanović M., Simić D., Perković S., Galović J., Burzić Z., Tasić A., Grga S., *Analysis of use of carbon-epoxy composites reinforced with nano-structures of tungsten disulfide for aircraft structures*, 8<sup>th</sup> International Scientific Conference on Defensive Technologies OTEH 2018, Belgrade, 11-12.10.2018., pp. 468-472, ISBN 978-8681123-88-1

- [81] Marjanović M., Bajić D., Perković S., Fidanovski B., Burzić Z., Matija L., Bekrić D., *Inorganic fullerene-like nanoparticles and nanotubes of tungsten disulfide as reinforcement of carbon-epoxy composites*, Fullerenes Nanotubes and Carbon Nanostructures, (Published online May 2021), <https://doi.org/10.1080/1536383X.2021.1928644>

## БИОГРАФИЈА

Милица М. Марјановић (девојачко Драгојевић), дипломирани машински инжењер, рођена је 01. 03. 1963. године у Београду где је завршила основну школу а потом и Девету београдску гимназију. Дипломирала је, као редован студент у предвиђеном року, 1986. године на Машинском факултету Универзитета у Београду на Катедри за аутоматско управљање са просечном оценом 9,68. У току студија је сваке школске године добијала награду за изузетан успех. Докторске академске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду уписала је школске 2009/10. године на Модулу за Биомедицинско инжењерство. Одлуком Министра одбране, 2009. године додељена јој је стипендија за школовање на докторским академским студијама. Испите предвиђене програмом докторских студија положила је са просечном оценом 9,93.

Од априла 1987. године запослена је у Војнотехничком институту (тада Ваздухопловно-техничком институту) на месту водећег истраживача у Сектору за ваздухоплове. Ангажована је на истраживачким задацима: "Истраживање утицаја примене наноматеријала на средствима НВО", "Истраживање могућности употребе дрона за потребе ЕД као и критично беспосадно снабдевање", а као сарадник ангажована је и на другим истраживачким, функционалним и развојним задацима у Војнотехничком институту. У области нанотехнологија ангажована је на истраживањима у области примене наноматеријала на механичке карактеристике конструкционих композитних материјала за израду летелица. Била је члан више радних тимова на задацима пројектовања система за управљање летелицама. Ради на програмима за математичко моделирање, симулацију објеката и процеса и синтезу система управљања (ADSIM језик за симулацију у реалном времену; Matlab Simulink, LabView, Mathematica, Origin. GOM Correlate...). Била је у периоду 2011-2014. године члан радног тима пројекта МНТР ТР 36050 "Истраживање и развој система беспилотних летелица у функцији надзора саобраћајне инфраструктуре". Изабрана је у научно звање истраживач сарадник 11.1.2012. године на 112. седници НВ ВТИ, а потом и реизабрана 12.05.2015. године на 143. седници НВ ВТИ.

Као аутор или коаутор до сада је учествовала у изради и публикацији у часописима или на међународним научним скуповима укупно 12 радова (категорије: М13, М21, М23, М33, М51); члан је тимова за 2 техничка и развојна решења (М81, М85). Аутор или коаутор је десетак интерних извештаја и елабората у Војнотехничком институту.

Говори руски и енглески језик.

Удата је, мајка двоје деце.

## Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Милица Марјановић

Број индекса Д 18/09

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

#### **Истраживање утицаја примене наноматеријала на ојачања композита угљенично влакно – епокси смола**

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршила ауторска права и користила интелектуалну својину других лица.

**Потпис аутора**

У Београду, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



# Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Милица Марјановић

Број индекса Д 18/09

Студијски програм докторске студије

**Наслов рада "Истраживање утицаја примене наноматеријала на ојачања композита угљенично влакно – епокси смола"**

Ментори проф. др Лидија Матија и др Зијах Бурзић, научни саветник

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предала ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива 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 аутора**

У Београду, \_\_\_\_\_

## Изјава о коришћењу

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

"Истраживање утицаја примене наноматеријала на ојачања композита угљенично влакно – епокси смола"

која је моје ауторско дело.

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

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучила.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
- ③ Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци. Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

**Потпис аутора**

У Београду, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

1. **Ауторство.** Дозвољаваате 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.** Дозвољаваате 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 прерада.** Дозвољаваате 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.** Дозвољаваате 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 прерада.** Дозвољаваате 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.** Дозвољаваате 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.