



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ

ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У
НОВОМ САДУ



**ИСТРАЖИВАЊЕ И АНАЛИЗА
УТИЦАЈНИХ ПАРАМЕТАРА НА
ЕКСПЛОАТАЦИОНЕ
КАРАКТЕРИСТИКЕ
ТРАНСПОРТНИХ ТРАКА**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Ментор:
ванр. проф. др Драган Живанић

Кандидат:
Никола Иланковић

Нови Сад, 2024. године

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА¹

Врста рада:	Докторска дисертација
Име и презиме аутора:	Никола Иланковић
Ментор:	др Драган Живанић, ванредни професор, Факултет техничких наука у Новом Саду, Универзитет у Новом Саду
Наслов рада:	Истраживање и анализа утицајних параметара на експлоатационе карактеристике транспортних трака
Језик публикације:	Српски (ћирилица)
Физички опис рада:	Унети број: Страница: 231 Поглавља: 9 Референци: 207 Табела: 39 Слика: 167 Графикона: 0 Прилога: 0
Научна област:	Машинско инжењерство
Ужа научна област:	Пројектовање и испитивање машина и конструкција, транспортна техника и логистика
Кључне речи / предметна одредница:	транспортне траке, текстилни композит, животни век, замор материјала
Резиме на језику рада:	Транспортна трака је по својој структури текстилни композит. Као носећи елемент транспортера са траком, трака подноси променљива оптерећења током свог рада. У циљу испитивања утицаја нивоа и амплитуде оптерећења на век трајања траке, извршена су испитивања на узорцима у лабораторијским условима. За ова испитивања је специјално пројектован и направљен уређај за испитивање који је омогућио прецизну контролу и праћење оптерећења као и броја циклуса оптерећења до лома. Ово истраживање даје преглед утицајних параметара на експлоатационе карактеристике транспортних трака. Објашњена је методологија спроведеног истраживања уз опис важних техничких параметара уређаја за испитивање. Физички експерименти и одговарајуће нумеричке симулације применом <i>FEM</i> методе су спроведене са више нивоа оптерећења узорака траке. На основу добијених резултата донети су одговарајући закључци – транспортне траке при оптерећењима близу 75% прекидне чврстоће имају економски оправдан век трајања, однос оптерећења <i>R</i> утиче на век трајања транспортних трака и врсту лома који настаје, могу се остварити значајне уштеде инвестиционих и експлоатационих трошковима применом добијених резултата.

¹ Аутор докторске дисертације потписао је и приложио следеће Обрасце:

5б – Изјава о ауторству;

5в – Изјава о истоветности штампане и електронске верзије и о личним подацима;

5г – Изјава о коришћењу.

Ове Изјаве се чувају на факултету у штампаном и електронском облику и не кориче се са тезом.

Датум прихватања теме од стране надлежног већа:	21. 09. 2023.
Датум одбране:	
Чланови комисије:	Председник: др Нинослав Зубер, редовни професор, Факултет техничких наука у Новом Саду, Универзитет у Новом Саду Члан: др Радомир Ђокић, ванредни професор, Факултет техничких наука у Новом Саду, Универзитет у Новом Саду Члан: др Небојша Здравковић, ванредни професор, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву, Универзитет у Крагујевцу Члан: др Влада Гашић, ванредни професор, Машински факултет у Београду, Универзитет у Београду Ментор: др Драган Живанић, ванредни професор, Факултет техничких наука у Новом Саду, Универзитет у Новом Саду
Напомена:	

KEY WORD DOCUMENTATION²

Document type:	Doctoral dissertation
Author:	Nikola Ilanković
Supervisor:	PhD Dragan Živanić, associate professor, Faculty of Technical Sciences Novi Sad, Univeristy of Novi Sad
Thesis title:	Research and analysis of influential parameters on the operational characteristics of conveyor belts
Language of text:	Serbian language (cyrillic script)
Physical description:	Number of: Pages: 231 Chapters: 9 References: 207 Tables: 39 Illustrations: 167 Graphs: 0 Appendices: 0
Scientific field:	Mechanical Engineering
Scientific subfield:	Design and testing of machines and constructions, transport and logistics
Subject, Key words:	conveyor belts, textile composites, lifetime, material fatigue
Abstract in English language:	The conveyor belt is by its structure a textile composite. As a load-supporting element of the conveyor, the belt withstands variable loads during its operations. In order to investigate the influence of the level and variability of loading on the life of the belt, tests were carried out on specimens in laboratory conditions. A testing device was specially designed and made for these tests that enabled precise control and monitoring of the loading as well as number of loading cycles up to fracture. This research provides an overview of influential parameters on the operational characteristics of conveyor belts. The methodology of the conducted research is explained with a description of important technical parameters of the testing device. Physical experiments and corresponding numerical simulations using the FEM method were carried out with multiple loading levels of belt specimens. Based on the obtained results, appropriate conclusions were made – conveyor belts at loads close to 75% of the breaking strength have economic justified lifetime, the load ratio R affects the lifetime of conveyor belts and the type of fracture which occurs, significant savings can be achieved in investment and exploitation costs by applying the obtained results.
Accepted on Scientific Board on:	21. 09. 2023.

² The author of doctoral dissertation has signed the following Statements:

56 – Statement on the authority,

5B – Statement that the printed and e-version of doctoral dissertation are identical and about personal data,

5r – Statement on copyright licenses.

The paper and e-versions of Statements are held at the faculty and are not included into the printed thesis.

Defended:	
Thesis Defend Board:	<p>President: PhD Ninoslav Zuber, full professor, Faculty of Technical Sciences Novi Sad, University of Novi Sad</p> <p>Member: PhD Radomir Đokić, associate professor, Faculty of Technical Sciences Novi Sad, University of Novi Sad</p> <p>Member: PhD Nebojša Zdravković, associate professor, Faculty of Mechanical Engineering and Civil Engineering Kraljevo, University of Kragujevac</p> <p>Member: PhD Vlada Gašić, associate professor, Faculty of Mechanical Engineering Belgrade, University of Belgrade</p> <p>Menthor: PhD Dragan Živanić, associate professor, Faculty of Technical Sciences Novi Sad, University of Novi Sad</p>
Note:	

Захвалница

Искрено се захваљујем свом ментору др Драгану Живанићу на свесрдној помоћи и стручном усмеравању, на идејама и искуству које је поделио са мном током израде докторске дисертације, као и на подршци коју ми је пружио.

Велику захвалност дугујем председнику Комисије др Нинославу Зуберу, на пруженим научним и практичним саветима, као и огромној помоћи при реализацији докторске дисертације.

Захвалан сам члановима Комисије др Радомиру Ђокићу и др Небојши Здравковићу на конструктивним саветима и подршци током израде и писања дисертације.

Посебно се захваљујем члану Комисије др Влади Гашићу због кога сам заволео машинство у мери која ми је омогућила да се одлучим за докторске студије.

Хвала свим мојим колегама и пријатељима са Департамана за механизацију и конструкционо машинство који су ми практично или морално пружили велику помоћ при изради тезе.

Захваљујем се својој драгој учитељици Драгици Димитријевић која ме је научила да пишем и читам и тиме ми пружила темељ за даље усавршавање.

Посебну захвалност дугујем мојој разредној старешини Милини Шујици, изврсном наставнику и педагогу, која ме је увек разумела и подстицала да достигнем свој максимум.

Захваљујем се својим пријатељима на подршци коју су ми несебично пружили.

Неизмерну захвалност дугујем својим родитељима, Зденки и Томиславу који су током свих ових година били уз мене, јер без њих не бих био оно што сам данас. Хвала вам за неизмеран труд, разумевање и љубав коју ми пружате. Хвала баки Ружици, диди Томиславу, баби Евици и ђеду Радомиру што су ме слушали и подржавали моју науку.

И на крају, или на почетку свега, захваљујем се супрузи Сари на безграничној љубави и подршци, изузетном стрпљењу, стабилности и миру.



Све би било немогуће без свих вас.

Садржај

1.	Увод.....	1
1.1	Предмет истраживања	8
1.2	Циљ истраживања.....	9
1.3	Основне хипотезе	9
1.4	Очекивана примена резултата	10
2.	Транспортне траке транспортера са траком	11
2.1	Опште о транспортерима са траком.....	11
2.2	Основни елементи и делови.....	14
2.2.1	Елементи за ослањање и центрирање траке.....	14
2.2.2	Бубњевеи.....	15
2.2.3	Погонски уређаји.....	16
2.2.4	Затезни уређаји	18
2.2.5	Утоварни уређаји.....	19
2.2.6	Истоварни уређаји.....	20
2.2.7	Уређаји за чишћење.....	20
2.2.8	Носећа конструкција	21
2.3	Транспортне траке	22
2.3.1	Текстилни носећи слојеви (каркаса).....	22
2.3.2	Додатни конструкциони елементи.....	28
2.3.3	Заштитни слој.....	29
2.3.4	Процес производње траке.....	31
2.3.5	Карактеристике траке.....	32
2.3.6	Спајање крајева траке.....	35
2.4	Стандарди у вези са транспортним тракама.....	41
2.4.1	Аксијална испитивања.....	42
2.4.2	Преглед осталих стандарда	49
2.5	Актуелно стање у области.....	54
2.5.1	Одржавање траке.....	55
2.5.2	Испитивање траке.....	61
3.	Аналитички и микромех. модели понашања транспортне траке.....	84

3.1	Формирање јединичне ћелије.....	85
3.2	Аналитички модел - Конститутивно моделирање	87
3.2.1	Конститутивно модел. полимера и композита у нелин. области	89
3.2.2	Конститутивне једначине нелинеарне области	90
3.2.3	Нумеричка имплементација конститутивних једначина	98
3.3	Микромеханички модел.....	100
3.3.1	Нормални напони и деформације.....	103
3.3.2	Тангенцијални напони и деформације у равни 1-2.....	105
3.3.3	Трансверзални танг. напони и деформације: раван 1-3	106
3.3.4	Трансверзални танг. напони и деформације: раван 2-3	107
3.3.5	Ефективне нееластичне деформације	107
3.3.6	Нумеричка имплементација микромеханичких једначина.....	109
3.4	Модел отказа.....	110
3.5	Понашање текстилног композита после момента отказа.....	112
3.5.1	Еволуција оштећења матрице композита	112
3.5.2	Еволуција оштећења влакана композита	113
4.	Замор текстилних композита	115
4.1	Замор при истезању текстилних влакана	118
4.1.1	Карактеристике отказа услед затезања и замора	120
4.1.2	Оптерећење при којем долази до отказа услед замора	123
4.1.3	Механизми укључени у замор влакана	125
4.1.4	Зависност отказа услед замора од температуре.....	128
4.2	Заморна оштећења код текстилних композита.....	130
4.2.1	Методе испитивања	130
4.2.2	Испитивање замора на затезање/затезање.....	132
4.2.3	Типична оштећења услед замора код текстилних композита ...	135
4.3	Модел понашања текстилних композита услед замора	137
4.3.1	Основе замора материјала.....	138
4.3.2	Општа разматрања при модел. заморног понашања тек. комп.	145
4.3.3	Преглед постојећих модела замора код текст. композита.....	146
4.4	Стандарди у вези са испитивањем на замор текст. композита.....	165
4.4.1	ISO 13003 2003	165

4.4.2	ASTM D 3479/D 3479M 2019.....	169
5.	Уређај за испитивање узорака транспорт. трака УЗИТТ МКМ 5000....	173
5.1	Модул А.....	173
5.2	Модул Б.....	176
5.3	Управљање уређајем.....	176
5.4	Калибрација уређаја.....	177
6.	Испитивање узорака транспортних трака.....	178
6.1	Рачунска подлога.....	179
6.1.1	Амплитуда оптерећења узорка.....	180
6.1.2	Фреквенција испитивања.....	183
6.2	Избор траке.....	184
6.3	Узорковање траке.....	185
6.4	Верификација квалитета изабране транспортне траке.....	187
6.5	Примена Рамасвами-Стоуф. мат. модела понашања транс. траке..	189
6.6	Први тип експ. – F-N дијаграм.....	191
6.6.1	План испитивања.....	192
6.6.2	МКЕ модел узорка транспортне траке.....	192
6.7	Други тип експ. – Модел преостале чврстоће.....	195
6.8	Трећи тип експ. – Утицај односа опт. на животни век траке.....	196
6.9	Четврти тип експ. – Упоредна анал. потр. снаге за погон трансп..	197
7.	Резултати испитивања и дискусија.....	198
7.1	Први тип експ. – F-N дијаграм.....	198
7.2	Други тип експ. – Модел преостале чврстоће.....	203
7.3	Трећи тип експ. – Утицај односа опт. на животни век траке.....	204
7.4	Четврти тип експ. – Упоредна анал. потр. снаге за погон трансп..	207
7.5	Предлог допуне методологије за прорачун и избор трансп. трака	207
8.	Закључак.....	211
9.	Литература.....	215

1. Увод

Руковање материјалом представља важан фактор у економији и индустрији. Ниједно модерно производно постројење попут текстилне фабрике, фабрике машина и алатки или рудника угља не би било ефикасно без адекватно организованог транспорта. Конкретно, фабрика машина и алатки не би могла да функционише без редовног прилива сировина и полуфабриката, али ни без редовног одлива готових производа и отпадног материјала. Такође, за правилно функционисање, неопходно је кретање производа кроз фабрику током производње. За све ове кретње је задужен транспорт материјала који се може класификовати као спољашњи и унутрашњи транспорт, слика 1.1.

У ужем смислу, под транспортом се подразумева преношење, односно превозење предмета са једне локације на другу. Појам транспорта у ширем смислу, поред превоза предмета, подразумева чување и обезбеђивање материјала током процеса транспорта.



Слика 1.1. Класификација транспортних средстава

Спољашњи транспорт служи за транспорт сировина, полуфабриката, горива и сл. до места производње и за транспорт готових производа и отпадних материјала са места производње. Видови спољашњег транспорта су железнички, друмски, водени и ваздушни транспорт.

Унутрашњи транспорт служи за дистрибуцију сировина и полуфабриката у самом производном постројењу – између повезаних производних фаза, као и за транспорт отпадних материјала који настају као последица производње. Такође, унутрашњи транспорт служи за транспорт материјала између пријемних

складишних капацитета и производње и између производње и излазних складишних капацитета. Видови унутрашњег транспорта су уређаји прекидног и непрекидног транспорта. У уређаје прекидног транспорта спадају дизалице, виљушкари, аутоматски вођена возила, роботи и сл. У уређаје непрекидног транспорта спадају транспортери са траком, плочасти транспортери и сл.

Карактеристика машина и уређаја са непрекидним радом је премештање материјала без заустављања ради прихватања и одлагања материјала, за разлику од машина са прекидним радом где се премештање терета врши у циклусима који се састоје из више различитих операција – вешање терета, померање дизалице са теретом, остављање терета и враћање празног захватног средства у почетни положај новог циклуса. Захваљујући овоме, машине непрекидног транспорта омогућују остваривање изузетно великих капацитета.

Машине и уређаји непрекидног транспорта се примењују у свим подручјима привредне делатности, почев од администрације до рада у рударству, како за транспорт материјала, тако и за пренос људи, а заузимају и значајно место у технолошким процесима. При томе, овакви уређаји могу да раде независно од неког синхронизованог технолошког процеса или могу бити директно укључени у одвијање таквог процеса, било само у смислу континуалног снабдевања или као део уређаја високог производног тока. Захваљујући оваквим могућностима комбиновања, омогућен је висок степен аутоматизације оваквих процеса уз практично неограничено повећање обима производње, у смислу задовољења транспортних захтева. Транспортрани материјал може бити у расутом стању или у коадима, а његове особине ближе дефинишу конструктивне карактеристике транспортног средства. У зависности од материјала, транспортни ток материјала може бити непрекидан у облику струјања или у одређеним порцијама, односно паковањима.

Основне предности машина и уређаја са непрекидним радом су:

- велики и постојан капацитет који не зависи од дужине транспортног пута;
- мали трошкови по тони претранспортованог материјала;
- равномеран ток транспортованог материјала;
- претежно стационаран уређаја (ретко заустављање и покретање);
- релативно мали габарити и једноставна уградња;
- велика поузданост у раду и лако одржавање;
- у току транспортовања се могу вршити одређене технолошке операције (монтажа, бојење, прање).

Основни недостаци машина и уређаја са непрекидним радом су:

- ограничена флексибилност;
- углавном нису погодни за остваривање просторне трасе;
- мала рентабилност при непотпуном коришћењу техничких параметара;
- непогодни за транспорт терета већих димензија и тежине.

Врста материјала којим се рукује и његове физичке и механичке особине су основни фактори који одређују тип и врсту транспортног уређаја. Транспортни материјали се деле у две врсте – комадни и расути материјал.

Комадни материјал обухвата материјале који се могу пребројати попут машинских елемената, материјале који представљају извагана добра попут буради, кутија, палета и сл, као и све остале материјале који имају дефинисан облик – цигле, дебла, живина итд. Комадни материјал карактеришу његова укупна димензија, облик, маса комада, могућност слагања и специјалне особине попут запаљивости ако их поседује.

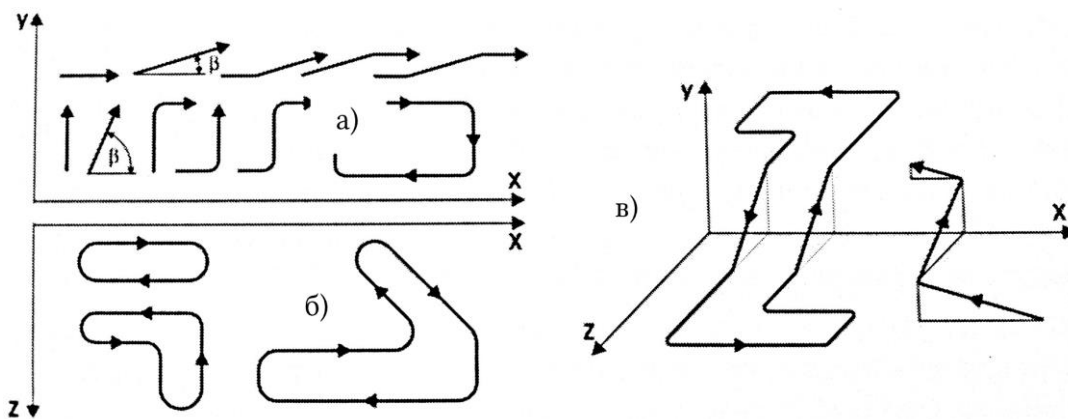
Расути материјал обухвата различите комадасте, зрнасте и прашкасте материјале који се јављају у великим количинама са основном карактеристиком да се могу сипати и грабити – руда, угаљ, камен, житарице, песак, цемент. По својим особинама налазе се између чврстих и течних материјала због тога што поседују ограничену покретљивост између честица што им омогућава транспортовање у слободно насутом стању. Ови материјали се одликују углом природног пада или углом унутрашњег трења, запреминском густином, крупноћом односно гранулометријским саставом, хабајућим дејством, хидроскопношћу, запаљивошћу, агресивношћу итд.

На слици 1.2. су приказани неки од расутих материјала.



Слика 1.2. Примери расутих материјала

Високи захтеви савремене производње условили су развој и примену великог броја различитих типова транспортних уређаја тако да је практично немогуће дати универзалну и довољно детаљну класификацију која би обухватила све меродавне карактеристике уређаја. Машине и уређаје непрекидног транспорта или тзв. транспортере могуће је поделити нпр. према врсти терета који преносе, на транспортере за комадни и расути материјал. Затим, ако се као критеријум одабере облик трасе, разликују се транспортери са праволинијском трасом и трасом у вертикалној, слика 1.3.а), у хоризонталној равни, слика 1.3.б) и транспортери са просторним обликом трасе, слика 1.3.в). Такође, могуће је поделити транспортере према могућности преношења са једног на друго место, тј. на стационарне и мобилне.

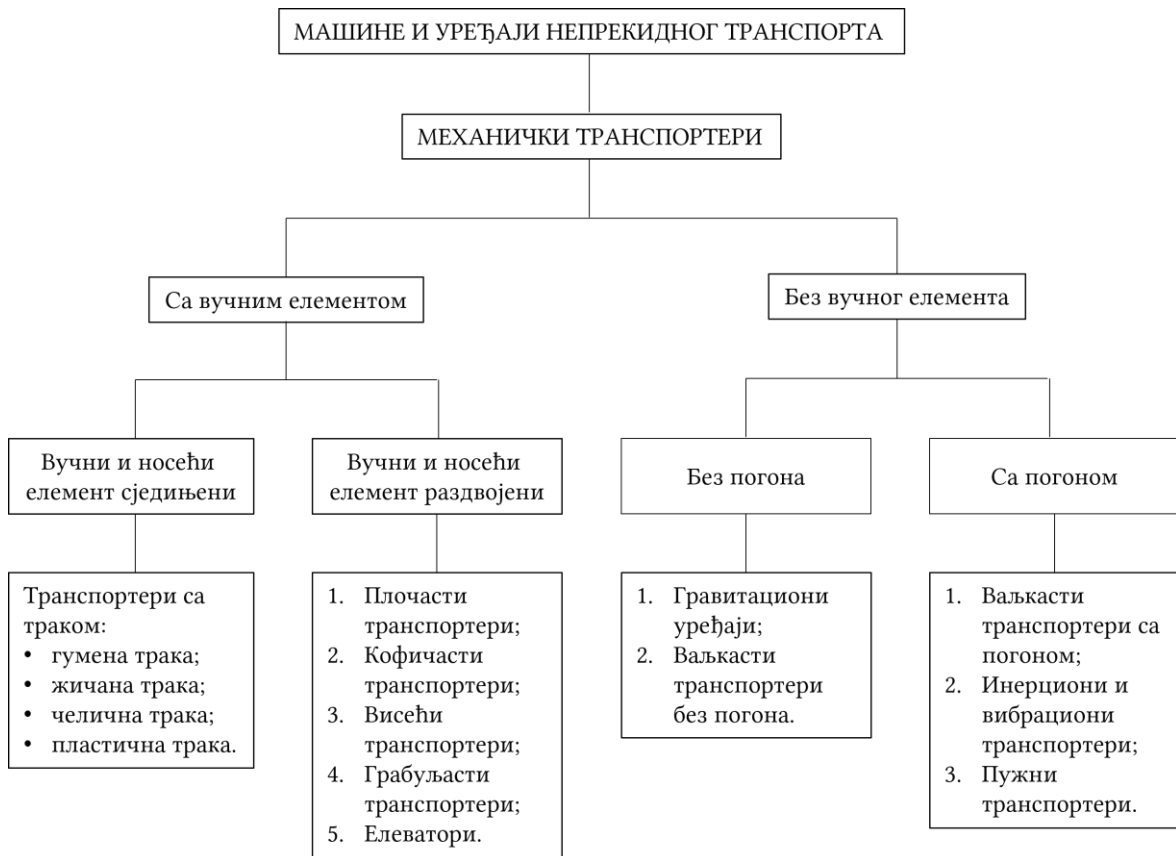


Слика 1.3. Шеме транспортних траса

У руској [1], америчкој [2], немачкој [3] и домаћој [4] литератури најчешће се среће подела ових уређаја према конструктивним карактеристикама и начину њиховог функционисања. На слици 1.4. је приказана основна подела уређаја непрекидног транспорта – механичких транспортера. Осим механичких, развили су се и специфични уређаји непрекидног транспорта у које се убрајају пнеуматски транспортери, уређаји за транспорт људи (покретне степенице, жичаре), специфични уређаји за претовар (вишекабински подизачи, вагонски превртачи). Да би се створила одговарајућа синхронизована веза између места прихватања и предаје материјала, развијени су помоћни уређаји у које спадају дозатори, аутоматске ваге, као и бункери са разним типовима затварача.

Због великог броја транспортера, јавља се проблем правилног избора транспортера за одређени задатак. Генерално говорећи, избор адекватног транспортера зависи од неколико фактора.

Први фактор који утиче на избор транспортера јесте природа и карактеристике материјала који ће се транспортовати. Потребна је детаљна анализа физичких и механичких особина материјала како би се сузио избор.



Слика 1.3. Класификација машина и уређаја непрекидног транспорта – механичких транспортера

Други фактор јесте потребан капацитет транспортера. Уколико се захтева висок капацитет, потребно је изабрати транспортер који је у могућности да транспортује материјал као континуални ток материјала великом брзином. Треба узети у обзир да повећање брзине транспорта доводи до смањења линијске масе материјала што повољно утиче на компактност конструкције транспортера. Због тога је капацитет транспортера са траком много већи него код нпр. плочастог или пужног транспортера због брзине транспорта која је неколико пута већа него код поменутих плочастих или пужних.

Трећи фактор јесте правац транспорта и дужина транспортног пута. Битно је познавати трасу коју транспортер треба да покрије из разлога што одређени транспортери нису погодни за одређени тип трасе – класичан транспортер са траком не може да савлада просторну трасу. Са друге стране, одређени транспортери нису економични за транспорт на дугачком растојању – плочасти транспортер нпр. захтева огромну количину енергије за погон за дугачке трасе што се на крају покаже некономичним. Такође, важна ставка коју сваки транспортер треба да испуни јесте да материјал треба да буде транспортован са што мање претоварних позиција. Претоварне позиције смањују поузданост система, компликују ток материјала и чак могу да утичу на квалитет одређених материјала који се транспортују.

Четврти фактор који утиче на избор транспортера јесте могућност утовара и истовара материјала са транспортера. Неки транспортери немају потребу за специјалним уређајима за утовар и истовар, док неки транспортери захтевају специјалне уређаје попут дозатора и сл. Потребно је тежити да утовар и истовар буду самостални – попут утоварних бункера или истовара преко чеоних бубњева.

Пети фактор јесте уклапање транспортера у производну линију. Основни елемент сваке производне линије јесте непрекидни транспорт између обрадних станица. Транспортер треба да одговори на задатак производње – да у адекватно време преузме полуфабрикат са претходне станице и да га у адекватно време преда у следећу станицу. Такође, често се од транспортера захтева да учествује у самом производном процесу – транспорт полуфабриката кроз сушару и сл.

Шести фактор јесу специфични услови околине. Они укључују област и облик доступне локације, њену топографију, врсту и тип објекта, распоред производних машина укључених у ток материјала, влажност ваздуха, доступност погонске енергије, температуру итд. Кључно је знати да ли ће транспортер бити постављен унутра или споља. Уколико је предвиђено да транспортер ради у спољним условима, климатски услови морају бити узети у обзир приликом планирања активности одржавања.

На крају, на избор транспортера утиче и циљ да транспортна опрема буде унифицирана до крајњих могућности како би одржавање било што једноставније. Потребно је водити рачуна и о будућим плановима који се тичу ширења производње или транспортних капацитета.

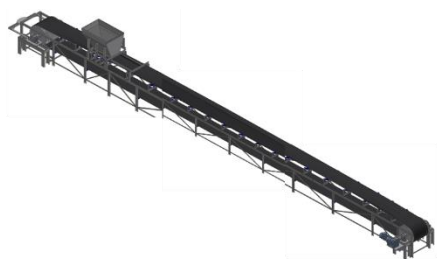
Након што су на основу техничких фактора изабране машине које ће најбоље служити сврси, детаљно се упоређују њихове предности са техничког и економског становишта.

Економска процена одговарајућих карактеристика различитих врста транспортера врши се проценом почетних улагања и текућих трошкова. Капитална улагања укључују почетне трошкове набавке опреме, трошкове у вези са њеном испоруком и изградњом, као и грађевинске радове везане за њену инсталацију и рад. Када се упореде капитални издаци, треба узети у обзир цену објеката за различите варијанте.

Оперативни трошкови укључују накнаде особља за одржавање, трошкове енергије, материјала (подмазивање, чишћење, монтажу итд.), као и трошкове средњих и текућих поправки. Општи трошкови везани за одржавање транспортних машина укључују годишње одбитке и амортизацију који чине фонд за обнову почетних трошкова за машинску опрему и конструкције и средства за њихову капиталну поправку.

Оптималне су врсте транспортних машина које испуњавају све захтеве транспорта, обезбеђују висок степен аутоматизације и најповољније услове рада. Таква опрема ће дугорочно осигурати минималне трошкове руковања по јединици и надокнадиће почетне издатке у најкраћем могућем року.

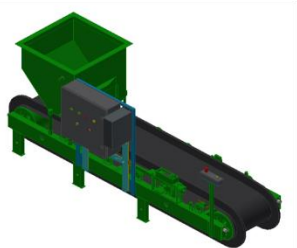
На слици 1.4. су приказани различити типови транспортера.



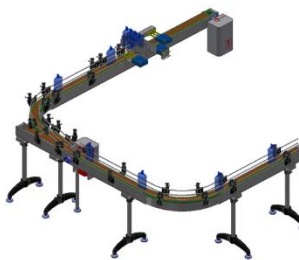
Хоризонтални транспортер са траком



Транспортер са траком под нагибом



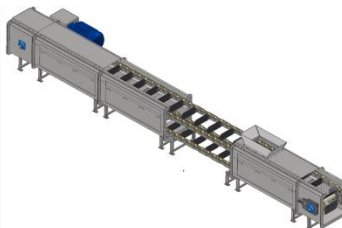
Дозатор



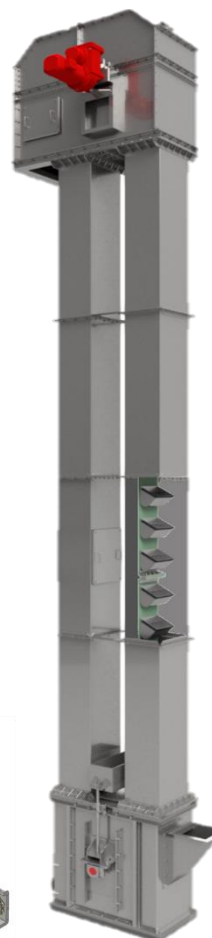
Плочасти транспортер за транспорт амбалаже



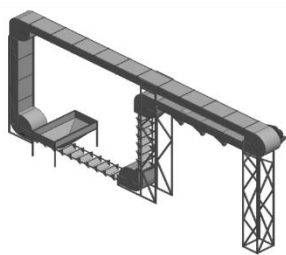
Грабуљаста транспортер са ниским повлакачима



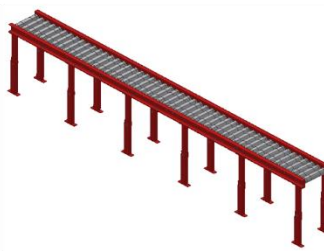
Грабуљаста транспортер са високим повлакачима



Елеватор



Кофичасто-грабуљаста транспортер



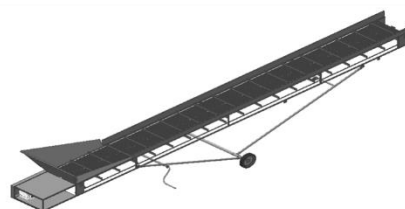
Гравитациони ваљкасти транспортер



Пужни транспортер



Ваљкасто-тракасти сортер кромпира



Елеватор за кукуруз

Слика 1.4. Типови транспортера

1.1 Предмет истраживања

Предмет ове дисертације јесу транспортне траке првенствено из разлога што транспортер са траком спада у најраспрострањеније транспортно средство непрекидног транспорта. Разлози тога су:

- високи капацитети које ови уређаји могу да остваре, у новије време чак и до 50.000 t/č;
- дужине транспортера од по неколико хиљада метара, с тим што постоје системи транспортера са траком који се надовезују и укупно имају дужину преко 100 km;
- нагиб транспорта где могу савладају успоне до 18° и падове до 16°, а са специјалним елементима на носећој површини транспортних трака попут ребара и бочних преграда и до 60°.

Улога транспортних трака јесте да изврше транспорт материјала, да прихвате енергију удара на месту утовара материјала, да издрже температурне и хемијске ефекте којима транспортни материјал утиче на њих и да током читавог радног века издрже пројектовано, радно оптерећење.

Потребе за истраживањем и анализом утицајних параметара на експлоатационе карактеристике транспортних трака базирају се на више чињеница:

- транспортна трака достиже висок удео у инвестиционом трошку транспортера са траком – до 30%;
- током једног циклуса који транспортна трака направи током транспорта материјала, силе које се јављају у траци често се крећу у великом опсегу, променљива оптерећења доводе до појаве микропукотина у материјалу које се временом повећавају и сједињују стварајући критичне зоне које могу да доведу до превременог кидања траке;
- анализом више релевантних стандарда и препорука који се тичу прорачуна транспортера са траком и избором траке (DIN, GOST и СЕМА), утврђено је да се разликују у методологији и да занемарују чињенице да се оптерећење не распоређује униформно кроз све носеће слојеве и да се услед променљивог оптерећења појављује замор који доводи до превременог кидања траке;
- степен сигурности, који представља однос силе кидања и рачунске максималне силе у траци и који се користи приликом избора траке, веома је висок и креће се у распону 9÷11, што указује да актуелни прорачуни не узимају многе утицајне параметре у обзир;
- појавом економских и енергетских криза у свету долази до изражаја оптималнији избор траке са аспекта инвестиционог и експлоатационог трошка.

Да би се могао предвидети радни век траке при дефинисаним вредностима променљивог оптерећења, неопходно је урадити исцрпна експериментална

истраживања симулирајући услове блиске радним условима. Стога, истраживање обухвата експерименте на посебно конструисаном уређају како би се транспортна трака испитивала у условима блиским радним, али на већим фреквенцијама како би се за краће време симулирао потенцијални радни век (један радни циклус у експерименту представљен једном периодом).

1.2 Циљ истраживања

Дефинисано је неколико циљева истраживања. Основни циљ истраживања је боље разумевање понашања и промена експлоатационих карактеристика транспортних трака, при различитим нивоима оптерећења, у сврху добијања математичке зависности броја циклуса до отказа, односно радног века и нивоа и амплитуде оптерећења, кроз одговарајуће једначине и дијаграме. Такође, циљ је верификовати добијене експерименталне резултате методом коначних елемената у софтверу *Autodesk Inventor Nastran* како би се указало на могућности рачунарских експеримената који би могли да убрзају процедуру испитивања.

Циљ је дефинисати модел преостале чврстоће транспортне траке после дефинисаног броја циклуса оптерећења. Овим се постиже бољи увид у могућности примене коришћених транспортних трака уз услов да се познају радни услови и оптерећења током њихових експлоатација.

Даље, циљ је да се анализира утицај различитих односа напона R , тј. односа оптерећења на понашање транспортне траке.

Следећи циљ јесте утврђивање могућности уштеде погонске енергије избором траке оптималних карактеристика за конкретне услове рада и оптерећења применом резултата добијених из претходно наведених истраживања.

Крајњи циљ је да се оформи процедура којом је могуће проценити интегритет и преостали радни век транспортне траке, као и допуна и/или корекција методологије за прорачун и избор транспортних трака.

1.3 Основне хипотезе

Основне хипотезе су:

- на радни век транспортне траке утичу нивои радних оптерећења у односу на јачину на кидање траке, материјал и број носећих слојева, као и амплитуда оптерећења;
- при максималним нивоима оптерећења, блиским носивости транспортне траке, радни век је изузетно кратак и значајна оштећења носећих слојева се јављају након веома малог броја циклуса;
- при одређеном нижем нивоу максималног оптерећења у односу на јачину кидања траке, може се закључити да постоји економска оправданост употребе одређене транспортне траке која се огледа кроз дужину радног века.

1.4 Очекивана примена резултата

Очекивања су да ће се резултати спроведених истраживања применити за формирање процедуре за процену интегритета и преосталог радног века транспортне траке, као и за корекцију методологије избора транспортне траке, тиме што ће иста узети у обзир већи број параметара. У досадашњој методологији, избор траке се врши само на основу максималне радне силе која се добија прорачуном, узимањем одређеног степена сигурности који зависи само од броја слојева траке и креће се у доста великим границама (9-11).

Очекивања су да ће резултати спроведених истраживања довести до тога да избор траке обухвати утицај односа максималне и минималне силе у траци, што зависи пре свега од трасе транспортера.

Такође, очекује се да спроведена истраживања дају бољи увид у утицај средњег радног оптерећења на век трајања траке, као и детаљнији приказ утицаја броја слојева траке.

На овај начин би се избор траке могао вршити за конкретну трасу и радне услове транспортера, а не само на основу максималне силе добијене прорачуном. Такође, за конкретне случајеве, избор траке би се могао вршити према захтеваном радном веку, што би свакако довело до инвестиционих уштеда у смислу одабира траке оптималних карактеристика.

Бољим увидом у утицајне параметре, могао би се дефинисати преостали радни век коришћених трака. На тај начин би се, у одређеним случајевима, могле употребити и коришћене траке, које би на неким другим транспортерима, са другачијом трасом, нивоом оптерећења и максималном силом, могле бити употребљене одређено време које одговара преосталом радном веку обрачунатом за другачије радне услове.

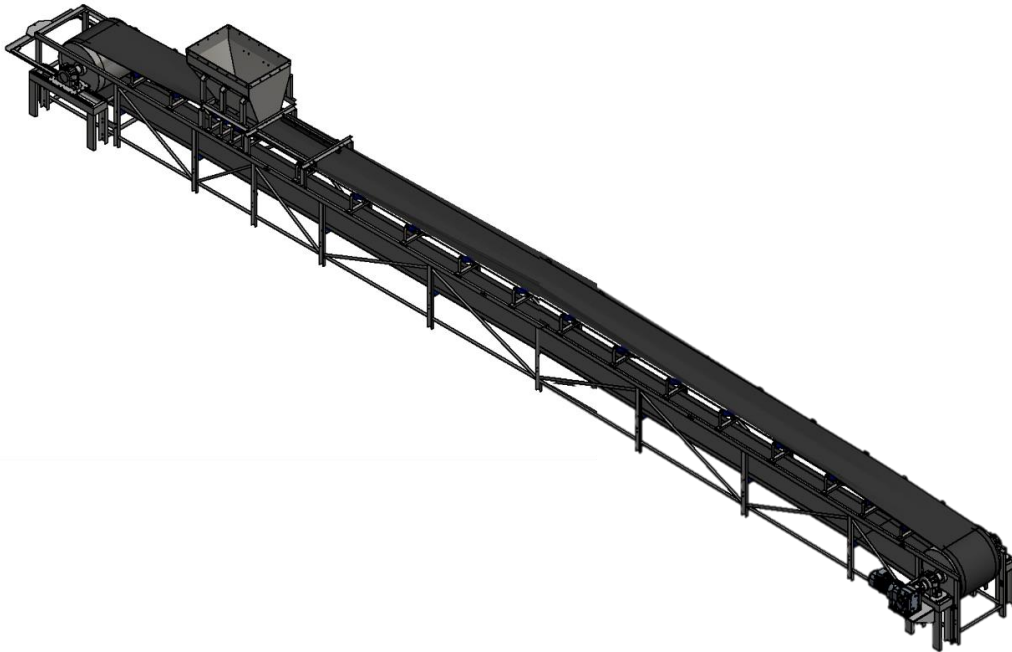
Са друге стране, бољим разумевањем понашања транспортне траке током експлоатације, одржавање се може учинити ефикаснијим што би довело до смањења неочекиваних застоја у транспорту и производњи. Такође, са избором оптималније траке, могле би се остварити уштеде енергије потребне за погон транспортера са траком.

2. Транспортне траке транспортера са траком

У овом поглављу ће бити на почетку дат приказ основних карактеристика транспортера са траком, затим ће бити приказани елементи и делови и потом ће акценат бити на транспортним тракама које су предмет истраживања ове дисертације.

2.1 Опште о транспортерима са траком

Транспортери са траком, сл. 2.1, веома су битан фактор у савременој индустрији. Користе се заједно са другом транспортном и машинском опремом, за транспорт различитих материјала. Важност транспортера са траком често је занемарена, јер се они уобичајено посматрају као део машинске опреме који не ствара проблеме у раду и који ради дуго времена без квара.



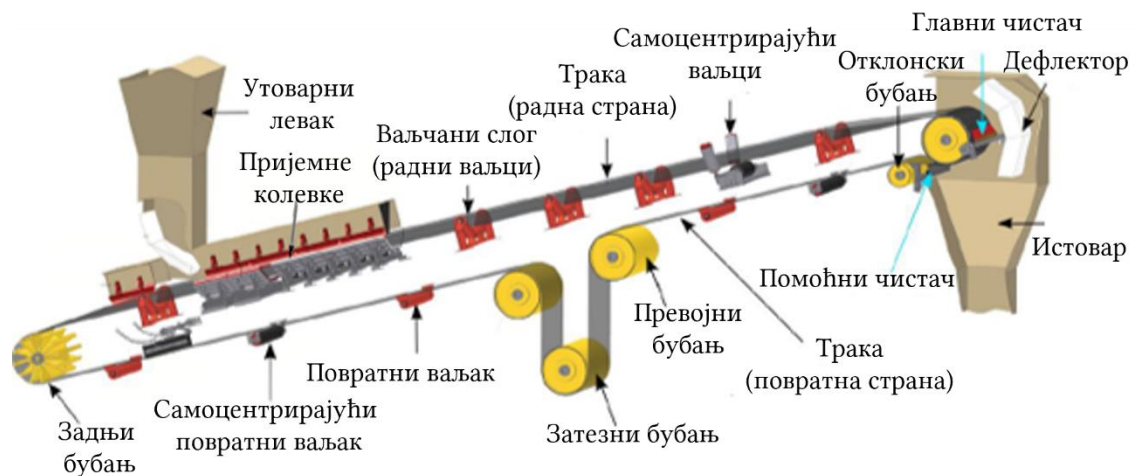
Слика 2.1. Транспортер са траком

Историја транспортера са траком почела је у другој половини XVII века и од тада су они неизбежни и саставни део транспорта материјала. Најранији транспортери са траком били су врло примитивни и састојали су се од кожне или платнене траке која је путовала преко равне дрвене платформе или преко дрвених ваљака. Прва употреба металних ослоних ваљака забележена је 1891. године у Едисоновим производним погонима у Њу Џерзију и Пенсилванији. У компанији Сандвик 1901. године је изумљена и почела да се производи челична транспортна трака. Од тада се истражују нови, лакши и јефтинији материјали и због тога су многи делови данас израђени од пластике. Међутим, употреба пластике није увек могућа као код радних услова где владају високе температуре и при тешким радним условима. Хенри Форд је у свом погону у Дирборну 1913. године увео

монтажну линију на бази транспортне траке за монтажу аутомобила што је довело до великог повећања капацитета производње. Изум електричних мотора је омогућио израду транспортера са траком великих дужина. Прекретница у развоју транспортера са траком била је увођење синтетичких трака, што је почело током II светског рата, понајвише због несташнице природних материјала попут памука, гуме и платна.

Данас се у производњи транспортних трака обично користе памук, платно, кожа, неопрен, најлон, полиестер, полиуретан, ПВЦ, гума, силикон и челик. Избор материјала је условљен конкретном применом транспортне траке. Најдужи линијски транспортер са траком на свету (састављен од већег броја појединачних транспортера са траком који су постављени један иза другог) налази се у Западној Сахари. Дуг је 100 km и протеже се од рудника фосфата Бо Крајун до обале Атлантског океана и луке Ел Ајун. Најдужи појединачни транспортер са траком превози кречњак и шкриљац од Мегхалаје у Индији до Силхерта у Бангладешу и дуг је 17 km.

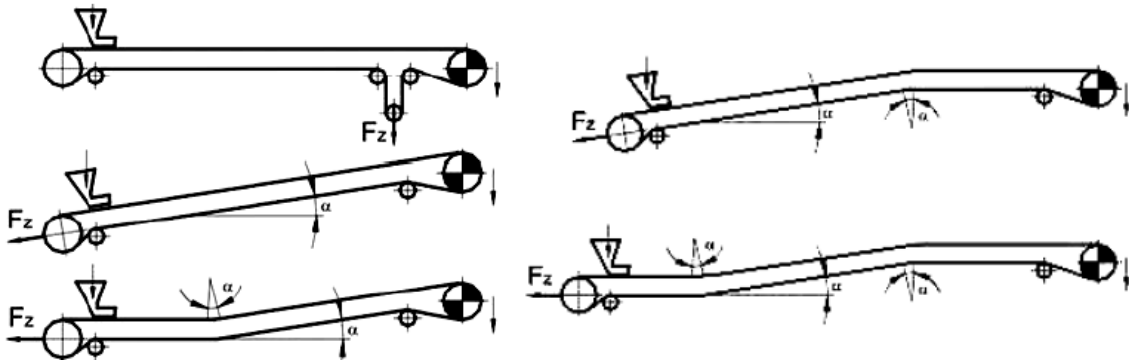
Транспортери са траком се користе за транспорт расутог и комадног терета претежно у хоризонталном или мало нагнутом правцу (до 25°) помоћу траке као вучног и носећег елемента. Због својих изузетно повољних техноекономских карактеристика представљају најраспрострањеније уређаје непрекидног транспорта у експлоатацији. Транспортери са траком се користе у многим индустријама: аутомобилској, рачунарској и електронској индустрији, пољопривреди, производњи хране и пића, авионској, фармацеутској и хемијској индустрији, као и за штампу новина и паковање. Према везаности за место где се користе, изводе се као стационарни (непокретни), преносиви или покретни (мобилни) који имају свој погон за кретање. Постоји велики број варијанти транспортера са траком опште намене, пројектованих зависно од капацитета и услова експлоатације. Типичан транспортер са траком је приказан на слици 2.2.



Слика 2.2. Транспортер са траком са основним елементима

Материјал се преко утоварног уређаја утовара на бескрајну траку која представља носећи и вучни елемент уређаја. Испод места утовара се налазе пријемне колевке које ублажују удар материјала. Да не би дошло до превеликих угиба траке под сопственом тежином и тежином материјала који би довели до расипања материјала, трака је ослоњена на носеће (горња, радна страна) и повратне (доња, нерадна страна) ваљке. На крајевима транспортера налазе се бубњеви – предњи, најчешће погонски, и задњи који може бити и затезни. Помоћу бубњева се остварује кретање траке. Ради компактности конструкције и повећања обухватног угла, користе се отклонски бубњеви који се налазе на повратној страни траке. Материјал се истовара на чеоном бубњу или помоћу специјалног истоварног уређаја при чему се, због правилног усмеравања тока материјала и заштите, унутар конструкције истоварног уређаја могу поставити дефлектори. Затезање траке, ради омогућавања преноса снаге са погонског на траку, остварује се помоћу затезног уређаја који може да буде у облику затезног тега постављеног на повратној страни транспортера. Код одређених врста транспортног материјала, неопходно је чишћење траке након истовара, које се врши помоћу чистача. Сви ови елементи су постављени на носећу конструкцију која је ослоњена на подлогу.

Због тешкоћа остваривања кривина у хоризонталној равни, трасе стандардних транспортера са траком се обично изводе само у вертикалној равни. На слици 2.3. су приказани неки облици траса стандардних транспортера са траком у вертикалној равни.



Слика 2.3. Шематски прикази траса стандардних транспортера са траком

Основни технички подаци транспортера са траком су:

- капацитет од 50 до 25.000 t/h, а постоје реализована постројења са капацитетом до 50.000 t/h;
- дужина транспортера се креће од неколико метара па до 15 и више километара са могућношћу неограниченог настављања;
- брзина транспортера је до 8 m/s, а у посебним условима и до 15 m/s.

Основне предности транспортера са траком су:

- велики капацитети, велике дужине транспортера, релативно мали отпори кретања, тј. мала потрошња енергије;

- једноставна и лака конструкција која заузима мало простора, висока рентабилност, мали експлоатациони трошкови и лако одржавање;
- велика поузданост у раду и бешуман рад, могућност потпуне аутоматизације.

Недостаци транспортера са траком су:

- ограничен нагиб транспортовања са стандардним тракама, осетљивост на повишене температуре и хемијске утицаје, непогодни за просторне трасе.

2.2 Основни елементи и делови

2.2.1 Елементи за ослањање и центрирање траке

Као елементи за ослањање траке између погонског и затезног бубња користе се ваљци, а знатно ређе равне површине од лима или дрвета. Ваљци се примењују углавном при транспортовању расутог материјала, а ређе за комадне терете веће масе, док се равне површине користе код транспортера малих дужина и брзина кретања, при транспорту лаког комадног материјала. Код транспортера се разликују носећи ваљци, који служе за ослањање радне стране траке са материјалом, и повратни ваљци који служе за ослањање празне траке. Уопште, ваљци се према њиховој намени могу поделити на носеће, повратне, амортизационе, центрирајуће и ваљке за чишћење. При транспортовању расутих материјала у зависности од капацитета, односно ширине траке, користи се различит број ваљака на једном ослоном месту радне стране траке. Већи број ваљака омогућава добијање олучастог облика траке чиме се повећава површина попречног пресека материјала, односно капацитет транспортера.

С обзиром на то да ваљци, поред траке, представљају најзначајније елементе транспортера са траком јер од квалитета њихове израде зависе укупни отпори кретању, посебна пажња се мора посветити правилном решавању њиховог улежиштења. Улежиштење се код савремених конструкција транспортера искључиво остварује путем котрљајућих лежајева. Основни проблем се јавља како заштитити лежај од продора прашине и осталих нечистоћа, с обзиром на то да транспортери често раде под веома неповољним условима. Најбоља решења се добијају применом лабиринтских заштивања.

Размак између ваљчаних слогова утиче на карактеристике транспортера, посебно на величину отпора односно утрошак енергије за кретање. Повећањем размака ваљчаних слогова повећава се оптерећење лежајева и скраћује век њиховог трајања, а са друге стране се смањује њихов број и цена. На основу овога, може се уочити да је за сваки конкретан случај могуће одредити оптималан размак између ваљака. Како је у фази пројектовања одређивање оптималног размака ваљчаних слогова отежано због недостатка података, размак између ваљака на радној страни траке се одређује у зависности од ширине траке и карактеристика транспортованог материјала.

Размак између ваљака утиче и на величину сила у траци с обзиром на то да је на основу експеримената утврђено да угиб траке услед сопствене тежине и тежине материјала не треба да буде већи од (2.1) јер у супротном долази до недозвољеног расипања материјала:

$$f_{DOZ} = 0,025 \cdot t [\text{mm}] \quad (2.1)$$

На слици 2.4. приказан је угиб траке под сопственом тежином q_0 и тежином материјала q . Угиб траке се може изразити релацијом:

$$f = \frac{(q + q_0) \cdot t^2}{8 \cdot S} [\text{mm}] \quad (2.2)$$

Ако се (2.1) замени у (2.2), добија се израз за минималну потребну силу на радној страни траке:

$$S_{MIN} = 5 \cdot (q + q_0) \cdot t [\text{N}] \quad (2.3)$$

Померања траке из осе транспортера је појава која се не дозвољава у раду и она може изазвати хаварије и веће застоје у раду, посебно код дугачких транспортера. Да би се ово избегло, примењују се центрирајући ваљчани слојеви.

На радној страни транспортера са олучастом траком у близини бубњева потребно је предвидети прелазну зону I_A са смањеним угловима нагиба бочних ваљака како би се трака што мање оштетила. Дужина прелазне зоне се може одредити из следећег израза:

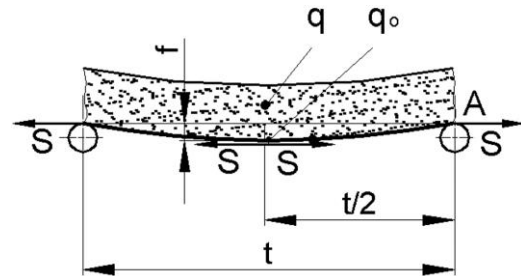
$$I_A \geq k_v \cdot B \cdot \sqrt{1 - \cos \beta} [\text{m}] \quad (2.4)$$

где је:

- k_v - коефицијент прелаза који зависи од материјала носећих слојева, за природни текстил има вредност 10, за синтетику 11,5, док за челичну ужад има вредност 22,5.

2.2.2 Бубњеви

Бубњеви се према намени могу поделити на: погонске, затезне, превојне и отклонске. Погонски бубњеви имају задатак да омогуће пренос снаге путем трења на траку транспортера. Превојни и отклонски бубњеви омогућују промену правца траке, а затезни поред промене правца врше и затезање траке. Правилан избор пречника бубња има велики значај за рад транспортера са траком. Повећањем пречника бубњева побољшавају се услови рада траке али се овим, нпр. код погонских бубњева, повећава преносни однос редуктора, односно димензије и маса



Слика 2.4. Угиб траке на радној страни транспортера са траком

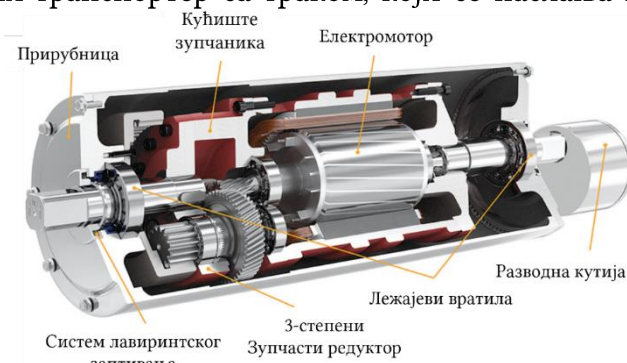
целог погонског механизма. При избору пречника бубња треба узимати у обзир следеће факторе:

- број и врста материјала носећих слојева траке (дебљина траке) јер од овог параметра зависе напони на савијање траке при њеном преласку преко бубњева, односно век трајања траке;
- специфични притисак између бубња и траке не сме прелазити дозвољену вредност;
- број савијања траке, који зависи од шеме њеног премотавања и броја обртаја бубњева;
- врста и место уградње транспортера.

2.2.3 Погонски уређаји

Покретање траке транспортера се врши помоћу погонског механизма који се састоји из електромотора, спојница, редуктора и погонског бубња. У случају већих снага и вишебубањског погона, користи се више погонских мотора везаних хидродинамичким спојницама. Постоји и могућност да се на повратној страни транспортера постави додатни краћи транспортер са траком, који се наслања на повратну страну основног транспортера и врши додатни погон.

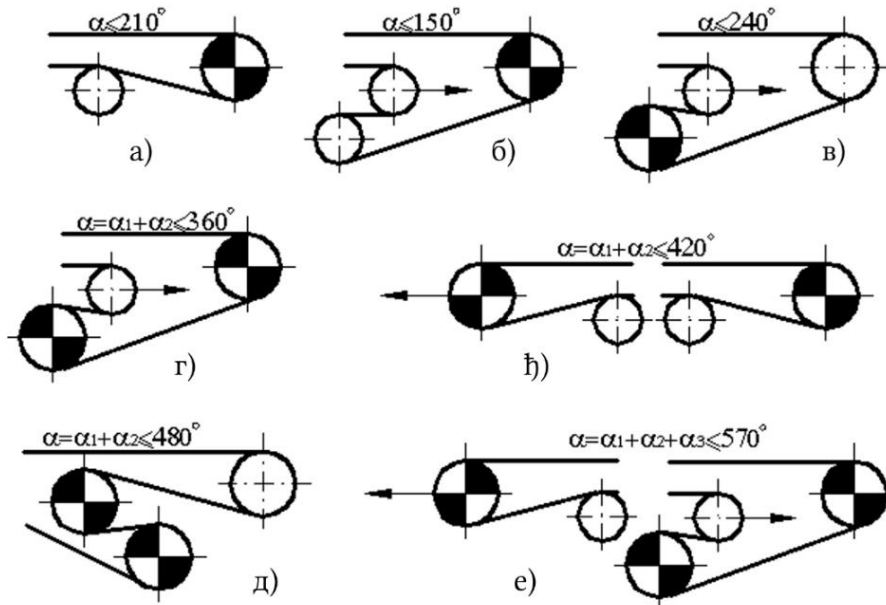
На слици 2.5. је приказана компактна конструкција погонског механизма мање снаге (до 25 kW), где су погонски мотор и редуктор смештени у бубњу. Предност оваквог решења је компактност и заузимање мало простора, а недостатак је отежано хлађење.



Слика 2.5. Компактна конструкција погонског механизма

Уколико се захтева регулисано заустављање транспортера или се ради о транспортеру са косим деоницама неопходно је уградити и кочницу. Најчешће је то стандардна кочница са две папуче која се поставља између мотора и редуктора у случају већих кочионих момената или, код транспортера са малом висином издизања материјала, између редуктора и погонског бубња. Код кратких косих транспортера се може уместо кочнице применити устављач у облику ролни или скакавице, а врло једноставно решење је употреба уметка од траке. Уметак је постављен на силазној страни траке тако да услед своје еластичности или деловањем додатне опруге има сталну тенденцију увлачења између траке и бубња. При раду транспортера смер обртања је такав да бубањ и трака стално одбијају тракасти уметак. Међутим, након искључења погона, трака са материјалом има тенденцију обрнутог кретања што доводи до увлачења уметка од траке између бубња и траке и заустављања даљег кретања.

У зависности од капацитета и дужине транспортера са траком, примењују се различити начини погона транспортера. На слици 2.6. су приказане неке основне шеме и могућности погона транспортера.



Слика 2.6. Шеме размештаја погона

Шеме на слици 2.6. а), б) и в) приказују транспортер са једнобубањским погоном при чему се погонски механизам, уколико је могуће, због повољнијег оптерећења и преноса снаге, ставља на предњи (чеони) део транспортера. Шеме на слици. 2.6. г), д) и ж) представљају различите варијанте двобубањског погона. Погон са три бубња, слика 2.6. е), се примењује само у изузетним случајевима при преносу великих снага. Код свих вишебубањских погона јавља се значајан проблем синхронизације рада и прерасподеле снаге између погонских бубњева.

Теорија преноса оптерећења путем трења између бубња и траке заснива се на Ојлеровом обрасцу, који дефинише однос сила у наилазном и силазном краку траке у тренутку почетка њеног проклизавања по бубњу:

$$S_{1M} = S_2 \cdot e^{\mu \cdot \alpha} \quad (2.5)$$

где је:

- S_{1M} - максимална сила у наилазном краку траке;
- S_2 - сила у силазном краку траке;
- μ - коефицијент трења између траке и бубња;
- α - обухватни угао траке на бубњу.

Међутим, како се у раду транспортера не сме дозволити клизање траке по бубњу, јер долази до интензивног трошења, загревања и евентуалног паљења траке са несавладивим последицама, дефинише се степен сигурности против проклизавања φ у облику:

$$\varphi = \frac{U_{MAX}}{U} \geq 1,25 \quad (2.6)$$

где је:

- $U_{MAX} = S_{1M} - S_2 = S_2 \cdot (e^{\mu\alpha} - 1)$ - максимално могућа обимна сила;
- $U = S_1 - S_2$ - радна обимна сила.

Ако се претходна релација уврсти у израз (2.6), добија се:

$$\varphi = \frac{S_2 \cdot (e^{\mu\alpha} - 1)}{S_1 - S_2} \quad (2.7)$$

Обухватни угао траке на погонском бубњу се састоји из угла на коме се јавља релативно мало померање траке по површини бубња, као последица еластичних деформација траке, који се зове угао еластичног клизања α_k и угла где нема релативног померања контактне површине траке и бубња, који се зове угао релативног мировања α_0 . На делу угла еластичног клизања меродаван је Ојлеров образац. Сила се мења од S_2 до S_1 (Архимедова спирала), тако да на углу релативног мировања нема промене силе. У суштини угао релативног мировања представља зону сигурности јер при повећању силе S_1 долази до смањења угла релативног мировања све до тренутка када је $S_1 = S_{1M}$ односно када долази до клизања траке као целине по бубњу.

Ако се анализира израз за максималну могућу обимну силу, може се констатовати да се пренос снаге путем бубња може повећати на следеће начине:

- повећањем обухватног угла α - на слици 2.6. су дате шеме погона са максималним вредностима обухватних углова за једнобубањски и вишебубањски погон;
- повећањем коефицијента трења између бубња и траке μ , и то облагањем погонског бубња фриксионим материјалима;
- повећањем затезања транспортера са траком, чиме се повећава и сила у силазном краку траке, односно могућност преноса снаге.

2.2.4 Затезни уређаји

Два основна задатка затезних уређаја транспортера са траком су:

- да обезбеде довољну силу у силазном краку траке са погонског бубња, неопходну за пренос снаге без клизања траке по бубњу;
- да одржавају прописан угиб траке на радној страни између ваљака како не би дошло до спадања материјала са траке.

Постоји више могућности затезања траке транспортера. Најједноставнији начин затезања траке, који се може применити само код врло кратких транспортера са траком и малих затезних сила, подразумева ручно померање затезног бубња. Могуће је затезање помоћу навојног вретена, тзв. круто затезање. Мана овог начина затезања је опадање силе у траци због њеног издужења, што може довести до

проклизавања траке по погонском бубњу, тако да се мора често контролисати и према потреби дотезати. Користи се само за транспортере мањих дужина. Нешто повољније особине овог уређаја се добијају ако се убаци опруга између навојног вретена и носача вођице затезног бубња. Могуће је затезање помоћу затезног тега. Ово је уједно и најчешће примењено затезање због своје једноставности и одржавања константне силе у траци. Положај затезног механизма треба бирати у зони најмањих сила, јер је тада затезна сила, а тиме и конструкција механизма јефтинија. Ово је обично испуњено на повратној страни траке или на крајевима транспортера.

2.2.5 Утоварни уређаји

Задатак утоварног уређаја је да прихвати материјал, пренесе га и распореди равномерно на траку. При паду материјала са висине, трака прима ударно оптерећење, а настаје и релативно кретање материјала и траке – зато је битно да уређај буде тако конструисан да минимализује хабање траке и отпоре кретања. Начин утовара материјала на траку има велики значај за век трајања траке. Облик овог уређаја зависи од врсте материјала који се транспортује, првенствено од његовог гранулометријског састава, густине и абразивности.

За утовар расутог материјала користи се утоварни левак. Левак се састоји од лимова са нагнутим бочним странама под углом који је за $5^\circ \div 10^\circ$ већи од угла трења материјала по челику, тако да успоравају материјал који клизи, али с друге стране, никако не сме доћи до његовог заустављања. Ширина отвора левка се оријентационо узима $B_L = (0,6 \div 0,65) \cdot b$, а дужина отвора најчешће износи око 1 m. Компонента брзине материјала у правцу кретања траке, у тренутку пада на траку, треба да буде приближно једнака брзини траке, $v_O \approx v$.

Утоварни уређај може бити и покретан, што се остварује колицима који се крећу по шинама фиксираним за носећу конструкцију транспортера.

Да би се материјал правилно распоредио по траци, постављају се вертикалне вођице дужине 1 до 2 m са висином од 100 ÷ 150 mm и проширењем у правцу кретања траке. Да би се спречило брзо трошење траке при утовару тешких и абразивних материјала, поставља се коса решеткаста раван тако да пропушта ситан материјал који образује заштитни слој на кога падају крупнији комади.

При утовару тежих комада са веће висине, на утоварном месту се постављају амортизациони ваљци, који омогућавају апсорбовање енергије удара и тиме штите траку од пробијања. Уколико је потребно мењати положај утоварног места на транспортеру, користи се утоварни левак који се поставља на колица која се могу кретати дуж транспортера.

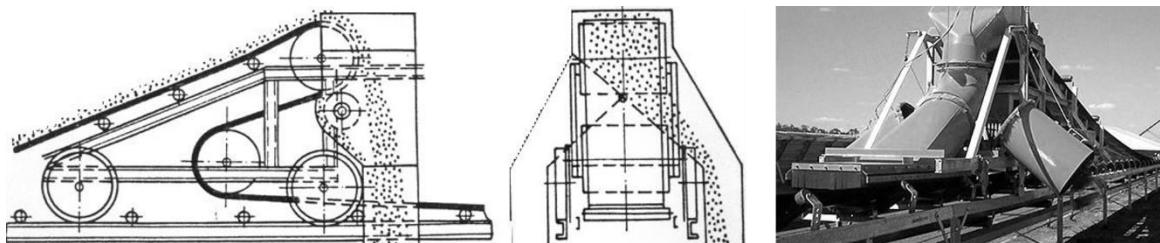
У случају претовара материјала користе се гравитационе клизнице (стрма раван) тако обликоване да ублаже вертикални удар материјала о траку, смањујући му брзину и усмеравајући га у правцу кретања траке.

2.2.6 Истоварни уређаји

Постоји више могућности истовара материјала са траке. Најједноставнији истовар је преко чеоног бубња. При томе је неопходно познавати трајекторију кретања материјала због исправног постављања усмеривача код претовара материјала, тачног одређивања места истовара и због избегавања клизања материјала по траци на чеоном бубњу код транспортера са малим брзинама.

Истовар лаких и неабразивних материјала се може вршити помоћу плужног истоваривача, који може бити једностран или двострани. Овај уређај је обложен гумом и треба да је у додиру са траком да не би дошло до заглављивања материјала. Мана ових истоварних уређаја је што изазивају релативно велике отпоре, хабање траке и захтевају примену равних ваљака (равна трака) на месту истовара, а једносмерни плужни истоваривачи изазивају додатну тенденцију бочног померања траке. Због ових недостатака ови истоварни уређаји се примењују само при транспорту лаких неабразивних материјала са малим брзинама кретања.

Највише распрострањен истоварни уређај, врло високе ефективности, су истоварна колица са бубњевима, слика 2.7, смештен на покретна колица, тако да се може кретати дуж транспортера. Састоји се од два бубња и истоварног левка, помоћу кога се материјал истовара на једну или другу страну, у зависности од положаја преклопника. За транспортере мањег капацитета, примењују се колица која добијају погон од саме траке, а код дужих транспортера користе се самоходна колица са сопственим погоном.



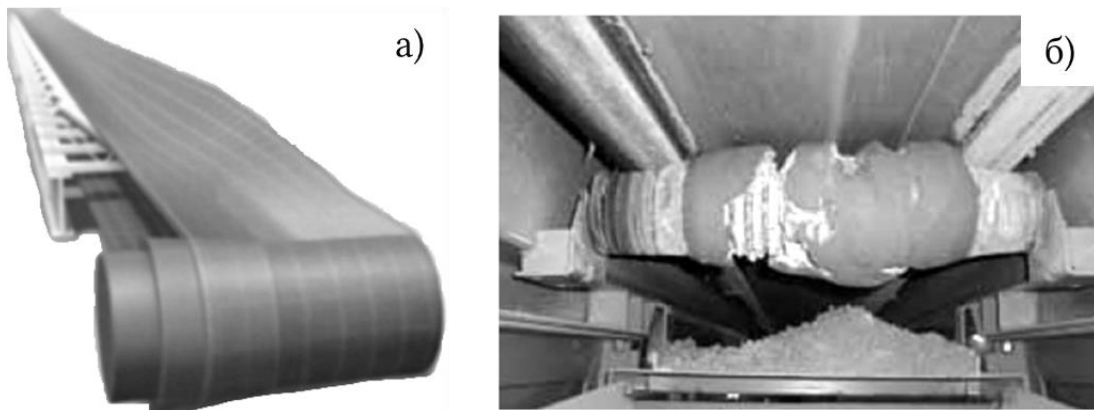
Слика 2.7. Истоварна колица са бубњевима

2.2.7 Уређаји за чишћење

Чишћење траке од налепљеног материјала има битан утицај на правилан рад транспортера и век трајања траке. Налепљени материјал на повратној страни траке лепи се на повратне ваљке што изазива бочно померање траке и њено нестабилно кретање. При обавијању траке са налепљеним материјалом око бубњева, смањује се коефицијент трења и могућност преноса снаге, док постојање чврстих честица доводи до пробијања траке.

Уређаји за чишћење треба да се одликују једноставном конструкцијом, поузданим радом, да што мање хабају траку и да добро чисте траку. Постављају се испод бубњева на истоварном месту или на бубњевима који следе иза плужних истоваривача. Уређаји за чишћење према принципу рада могу да се поделе на механичке, хидрауличке и пнеуматске.

До налепљивања материјала на бубањ долази због местимичног и повремениг спадања мањих количина транспортованог материјала на унутрашњу страну траке током одређеног времена. Због тога чишћење траке од налепљеног материјала има битан утицај на правилан рад транспортера са траком. Фиксни механички чистачи силом притиска на траку врше њено чишћење. Уколико уређај за чишћење притиска траку већом силом остварује се боље чишћење, али се ствара додатни отпор који повећава потребну снагу за кретање траке и доводи до већег и бржег хабања траке, а тиме и скраћивања њеног радног века. Зато се подешеност уређаја за чишћење мора одредити за конкретне услове рада (врста и влажност материјала, затегнутост траке, итд.). На месту на коме је дошло до нагомилавања материјала повећава се пречник бубња, а тиме и обимна брзина траке, тако да иста тежи да сиђе са тог дела, па долази до бочног померања траке из осе транспортера, сл. 2.8.а).



Слика 2.8. Налепљени материјал на бубањ (а) и ваљак (б)

Количина материјала коју чистач скине са траке може да буде значајна, тако да је у неким ситуацијама потребно предвидети повремено или стално одношење очишћеног материјала са траке. Уколико је количина скинутог материјала на чистачу значајна, а није решено питање одношења тог материјала, може се десити ситуација приказана на сл. 2.8.б).

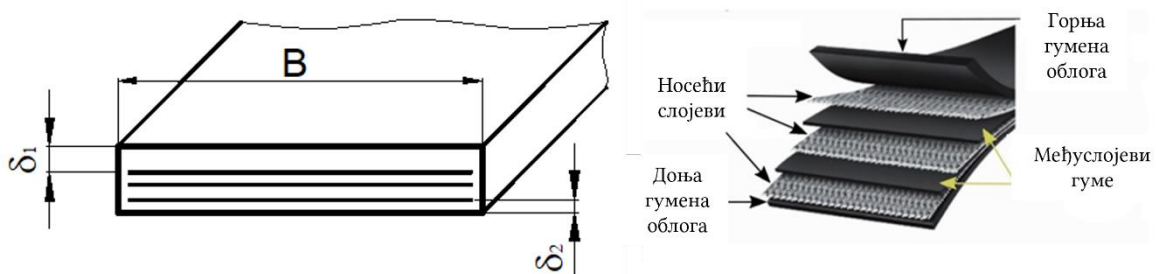
2.2.8 Носећа конструкција

Главна улога носеће конструкције је да повеже све делове транспортера са траком у једну целину. Састоји се од два паралелна главна носача који су ослоњени на подлогу преко ослонаца, и на које се везују носећи елементи ваљчаних слогова, утоварног, погонског и затезног механизма.

Да би се добила довољна дужина главног профила, потребно је спајати појединачне сегменте. У појединим ситуацијама је неопходно извршити заштиту транспортног материјала од атмосферских утицаја (киша, снег, ветар). Најчешће се заштита изводи од полукружних поклопаца који се вијцима везују за носећу конструкцију.

2.3 Транспортне траке

Пошто је предмет дисертације транспортна трака, о њеним особинама ће се навести више детаља. Транспортна трака је најважнији елемент сваког транспортера са траком. Најчешће она носи највећи удео у почетној инвестицији. Због тога избор траке мора бити урађен са великом пажњом. Потребно је да изврши транспорт материјала, прихвати енергију удара на месту утовара материјала, да издржи температурне и хемијске ефекте којима транспортовани материјал утиче на њу, да издржи утицај атмосферских услова и да током читавог радног века издржи пројектовано оптерећење. На слици 2.9. је приказана конструкција траке – састоји се од горњег гуменог заштитног слоја, носећег слоја (каркасе) и доњег гуменог заштитног слоја.



Слика 2.9. Транспортна трака са текстилним носећим слојевима

2.3.1 Текстилни носећи слојеви (каркаса)

Што се тиче носећег слоја, потребно је да испуни следеће услове:

- да пружи довољну затезну чврстоћу како би трака издржала оптерећење које се јавља услед транспорта терета;
- да апсорбује енергију удара материјала који се утовара;
- да пружи подужну и попречну крутост траци за транспорт материјала, због тога што се трака креће по размакнутих ослоним ваљцима.

Већина носећих слојева је израђена од једног или више слојева тканог текстилног материјала. Текстилни материјал јесте раванска структура настала испреплетаном предива, влакана или филамената. Приликом транспорта где се јављају велика оптерећења, употребљавају се траке чији је носећи слој сачињен од челичних ужади.

Влакна која чине основни градивни елемент текстилног носећег слоја су елементи који морају имати дужину минимум 100 пута већу у односу на пречник да би се класификовали као влакна. Такође, потребно је да поседују могућност уплетања у предиво. Филаментна влакна се односе на влакна великих дужина, док се краћа влакна дужине свега неколико сантиметара називају резана влакна. Природна влакна попут вуне и памука спадају у резана влакна. Синтетичка влакна попут најлон и полиестер влакана се сматрају да су филаментна влакна. Природно влакно од свиле је филаментно влакно, али се сече током производње на краће

сегменте и због тога се сматра да је резано влакно. Предиво је термин за континуални низ текстилних влакна или за материјал који је погодан за плетење или ткање и тиме за производњу текстилног материјала. Предива која су направљена од кратких, резаних влакана се називају клупка, док се предива направљена од дугачких влакана називају филаментна предива.

Код трака где је носећи слој направљен од текстилних материјала, ретко када се јавља само један носећи слој. Углавном се састоји од више слојева. Слојеви се производе ткањем главних (основних) нити које се протежу у подужном правцу траке и помоћних нити (нити потке) које се пружају у попречном правцу. Затезна чврстоћа главних нити је основни параметар за избор траке због тога што оне подносе највећи удео оптерећења.

На слици 2.10. је приказана машина за ткање. Ова машина производи текстилни материјал тако што тка главне нити у подужном правцу, док помоћне нити тка у попречном правцу. На тај начин се добија ојачани текстилни материјал који се затим урања у раствор *Rescorcinol-Formaldehyde-Latexa (RFL)* како би се формирао слој са добрим адхезивним својствима у контакту са гуменим компонентама.



Слика 2.10. Машина за ткање текстилних носећих слојева

Текстилни носећи слојеви се производе од памука, целулозе, рајона, најлона, полиестера, фибергласа и арамида.

Као што је већ речено, главни задатак носећег слоја јесте да поднесе оптерећење које се јавља током транспорта и због тога је затезна чврстоћа траке или јачина носећег слоја на кидање главна карактеристика која се посматра приликом избора траке. Ова величина се изражава у N/mm и постоје стандардизоване вредности: 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630 N/mm.

Карактеристике најчешће употребљаваних текстилних носећих слојева су дате у табели 2.1.

Табела 2.1. Карактеристике најчешће употребљаваних текстилних носећих слојева

Тип влакна	Памук	Целулоза	Рајон	Најлон	Полиестер
Дужина приликом лома [km]*	12 ÷ 15	22	51 ÷ 54	80 ÷ 81	75
Издужење код лома [%]	12	19 ÷ 20	11,5 ÷ 12	17 ÷ 18	12 ÷ 13
Промена затезне чврст. услед влаге [%]	+8	-20 ÷ -25	-20 ÷ -25	-10	0
Густина [g/cm ³]	1,5 ÷ 1,54	1,5 ÷ 1,52	1,5 ÷ 1,52	1,14	1,38

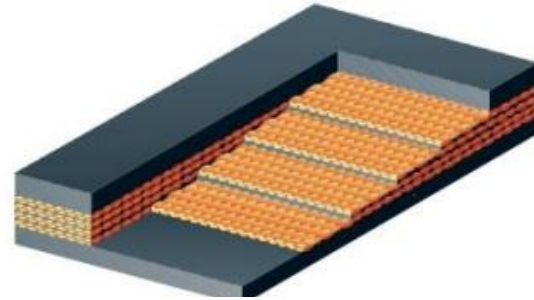
*Вертикално слободно окачено под дејством гравитације.

Носећи слојеви могу бити направљени и од комбинације материјала. Неке од честих комбинација су:

- памучни материјал (основне и помоћне нити од памука);

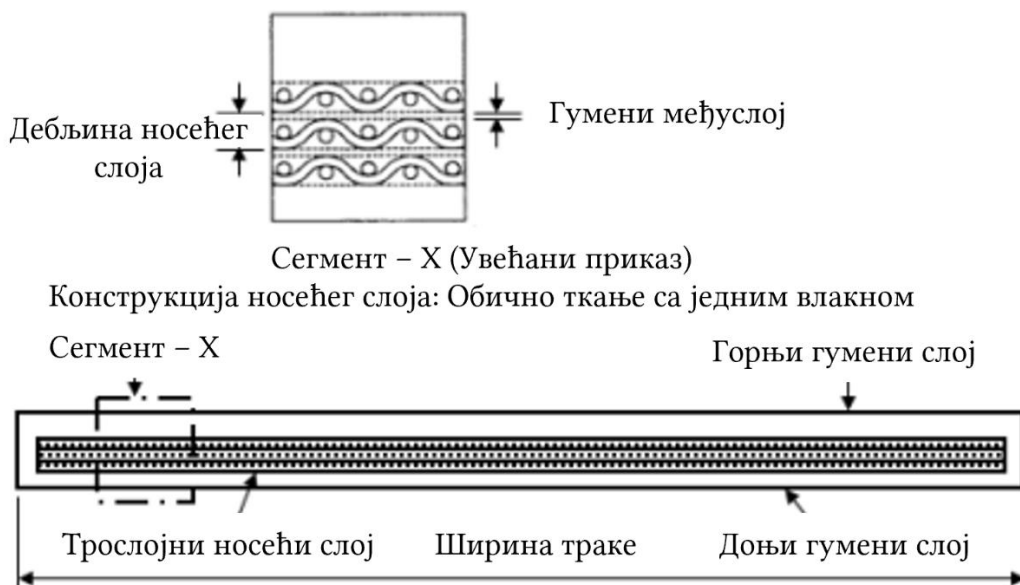
- памучно-најлонски материјал (основне нити од памука, помоћне нити од најлона);
- целулозни материјал (основне и помоћне нити од целулозе);
- рајон-најлонски материјал (основне нити од рајона, помоћне нити од најлона);
- најлон-најлонски материјал (основне и помоћне нити од најлона);
- полиестер материјал (основне и помоћне нити од полиестера);
- полиестер-најлонски материјал (основне нити од полиестера, помоћне нити од најлона).

Код трака чији су носећи слојеви направљени од полиестер-најлонског материјала, влакна полиестера која се споро деформишу и због тога се користе као главне нити (основа), док се еластичнија најлонска влакна користе за помоћне нити (потка). Ово представља комбинацију најбољих карактеристика обе врсте материјала што пружа високу затезну чврстоћу уз низак ниво деформације са одличном отпорношћу на ударе, високу издржљивост и могућност за пренос великих количина материјала.



Слика 2.11. Трака са више текстилних носећих слојева

Транспортна трака са више текстилних носећих слојева је приказана на слици 2.11. Код трака са више слојева, слојеви се постављају један на други с тим што се између њих убацују танки гумени слојеви како би се претходно припремљен текстил адекватно залепио. На слици 2.12. је приказан детаљ носећег слоја траке.



Слика 2.12. Попречни пресек траке са више носећих слојева (под правим углом у односу на правац траке)

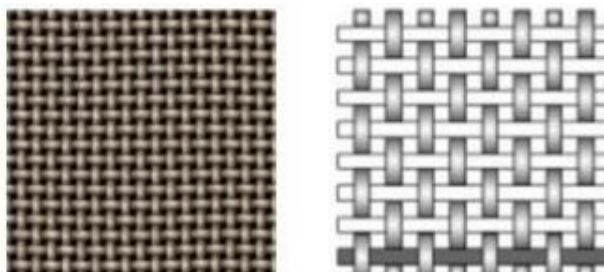
Гумени слој који се поставља између текстилних слојева има и друге улоге – појачава отпорност на ударце материјала приликом утовара и побољшава издржљивост траке. Неадекватно постављен гумени слој доводи до опадања карактеристика траке и представља инхибитор отказа – долази до одлепљивања слојева и тиме до отказа траке.

Трака која се састоји од носећих слојева са гуменим међуслојевима и горњим и доњим заштитним гуменим слојем представља композитни материјал који је тема истраживања ове дисертације.

Да би се трака произвела, она пролази кроз процес топле вулканизације током којег се стварају везе између носећих слојева, али и између носећих и заштитних слојева.

Постоји велики број начина ткања којима се производе текстилни носећи слојеви. Од радних услова зависи који начин ће бити примењен.

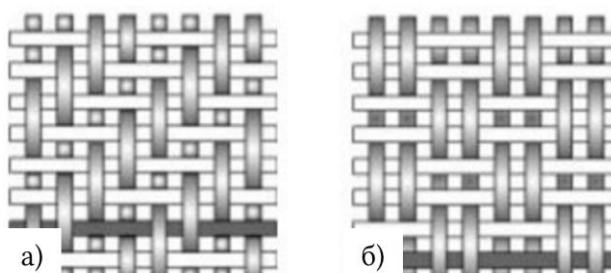
Обично ткање (преплетај платно) је најчешће примењени процес производње текстилног носећег слоја који се примењује код транспортера где је трака равна. Код обичног ткања, главне (основа) и помоћне нити (потка) су испреpletене једна испод друге,



Слика 2.13. Обично ткање

Ово значи да су нити наборане у облику синусне функције. Код оваквог ткања, висок ниво набораности утиче да механичке особине буду лошије у односу на друге врсте ткања. Због тога се користи код транспортних трака за мања оптерећења.

Твил и корпа ткање се користе како би се постигле боље механичке особине него код обичног ткања, слика 2.14. Код твил ткања, нити основе се наизменично преплићу са две или више нити потке кроз образац који се понавља. Другим речима, твил ткање производи

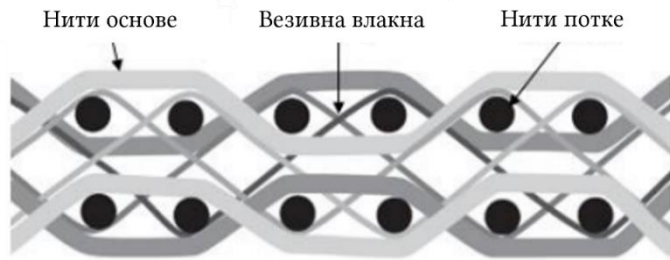


Слика 2.14. Твил ткање (а) и корпа ткање (б)

дијагоналне линије на лицу тканине. Ове линије се формирају тако што се све нити основе преплићу на исти начин уз то што се тачке преплитања сваке нити основе премештају за један пик потке у односу на претходну нит основе. Корпа ткање је суштински исто као обично ткање, једино што се овде две или више нити основе наизменично преплићу са две или више нити потке. Набирање влакана код оваквог ткања је мање него код основног ткања и због тога тканина има боље карактеристике. Корпа ткање је познато као гавраново стопало због тога што ткање личи на птичје стопало.

Код равнoг ткања су нити основе равне без набирања. Нити потке се постављају попречно наизменично са доње и горње стране нити основе. Не долази до набирања код нити потке. Затим се користе везивна влакна која се постављају подужно и она повезују нити основе и потке. Везивна влакна чврсто повезују нити основе и потке стварајући носећи слој изузетне чврстине који има изванредну отпорност на кидање. Равне нити основе елиминишу геометријско истезање материјала што резултује тиме да транспортна трака поседује високу отпорност на истезање. Са друге стране, равне нити потке пружају ефекат греде траци што доводи до боље могућности пријема транспортног материјала и попречне крутости.

Код чврсто тканог текстилног материјала, тканина се састоји од већег броја слојева нити основе и потке које су повезане везивним влакнима, слика 2.15. Овакав тип ткања се користи за транспортне траке са једним носећим слојем. Када је носећи слој израђен чврстим ткањем, нити израђене од полиестера, најлона или арамида су сједињење у компликован композитни текстил где се много слојева нити основе и потке преплићу. Често је овај композитни текстил импрегниран и покривен поливинил хлоридним смолама. Резултат јесте чврсто ткана *PVC* трака која се углавном користи у две сврхе:

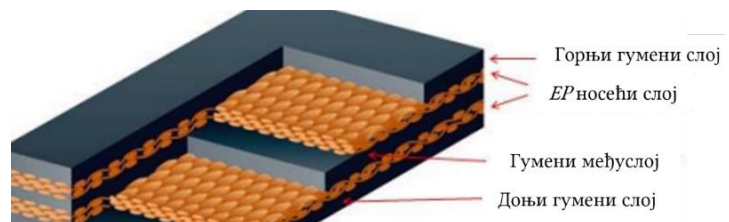


Слика 2.15. Чврсто ткање

- код подземног транспорта у рудницима где је потребна висока отпорност на пожаре;
- код елеватора за житарице због своје отпорности на уља.

PVC транспортне траке се састоје од импрегнираног *PVC* чврсто тканог носећег слоја и *PVC* заштитних слојева. Због своје високе отпорности на пожаре, идеалне су за подземни транспорт.

Полиестер-најлонске транспортне траке (*EP*) су направљене чврстим ткањем како би издржале тешке радне услове, попут великих удара приликом утовара транспортног материјала и великих сила у траци. Користе се за транспорт камења, трупаца итд. Ове траке се израђују са једним или са два носећа слоја, слика 2.16. Код ових трака су основне нити равне и од полиестера (*E*), нити потке су од полиамида тј. од најлона (*P*) и повезане су везивним влакнима од полиамида.



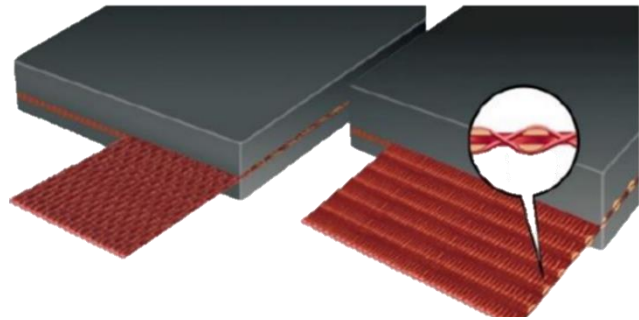
Слика 2.16. Полиестер-најлонске транспортне траке

Код ових трака су основне нити равне и од полиестера (*E*), нити потке су од полиамида тј. од најлона (*P*) и повезане су везивним влакнима од полиамида.

Транспортне траке чији су носећи слојеви направљени од араמידних влакана поседују изузетне механичке способности. Арамид је лаган попут било ког

другог синтетичког влакна, као што је полиестер или најлон, али је јак попут челика. Има могућност великог издужења, не подлеже пузању и има одличну отпорност на топлоту и хемијске реагенсе. Не рђа нити је подложен труљењу.

Арамидне транспортне траке поседују један носећи слој и то доприноси томе да трака буде лака и флексибилна, са оптималном искоришћеношћу снаге. Ове транспортне траке су отпорне на замор током експлоатације. На слици 2.17. су приказане две врсте ткања код ових трака. Прва врста ткања арамидних влакана се зове ујадно ткање пошто се тканина састоји од равних подужних арамидних ујади. Друга врста ткања јесте право ткање основе, где тканина поседује додатну попречну најлонску ујад која штити арамидну ујад са обе стране.



Слика 2.17. Транспортне траке са носећим слојевима од арамида

Избор материјала носећег слоја зависи првенствено од карактеристика материјала који се транспортује, жељеног капацитета и конфигурације трасе. У табели 2.2. су дате основне информације о најчешће коришћеним материјалима.

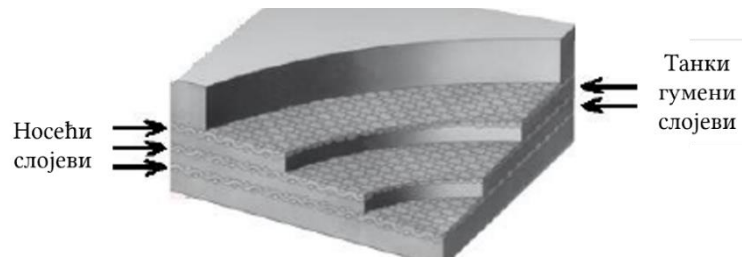
Табела 2.2. Карактеристике материјала носећих слојева траке

Назив материјала	Састав материјала	Основне информације
Памук	Природна целулоза	Памук је једини природни материјал који се навелико користио за израду носећих слојева траке. Због своје способности да апсорбује влагу, подложен је труљењу.
Најлон	Полиамид	Најлон има високу затезну чврстоћу и подноси велика издужења. Отпоран је на абразивна оштећења, замор и ударе. Нема велику способност апсорпције влаге као памук, али може да апсорбује влагу до 10% своје тежине.
Полиестер	Полиестер	Полиестер има високу затезну чврстоћу и није подложен великим издужењима. Отпоран је на абразивна оштећења и замор. Не апсорбује влагу, изузетно је отпоран на труљење.
Фиберглас	Фиберглас	Фиберглас се користи приликом транспорта материјала на високим температурама.
Кевлар	Арамид	Има високу затезну чврстоћу и није подложен великим издужењима. Није склон топлењу, али се разграђује при високим температурама.
Номекс	Арамид	Има изузетно високу затезну чврстоћу и подноси изузетно велика издужења. Одлично подноси високе температуре.

2.3.2 Додатни конструкциони елементи

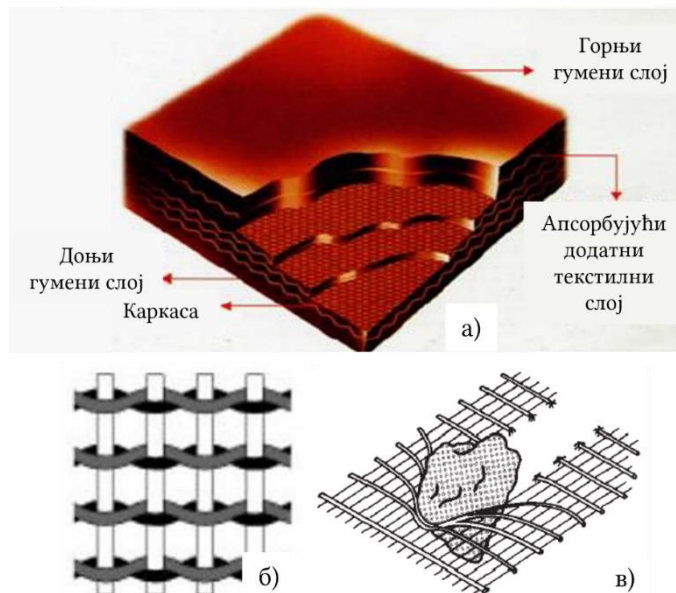
Текстилне транспортне траке могу имати додатне конструкционе елементе поред носећег слоја и гумених заштитних слојева. Ти елементи су додатни гумени слој између носећих слојева, апсорбујући додатни текстилни слој, заштитни слој попречних ужади и бочни гумени слој.

Додатни гумени слој се поставља између носећих слојева. Овај додатни слој побољшава могућност траке да поднесе ударе материјала тако што апсорбује енергију удара. Резултат примене је дуготрајнија веза између носећих слојева и користи се за тешке крупно-комadne расуте материјале, слика 2.18.



Слика 2.18. Додатни гумени слој

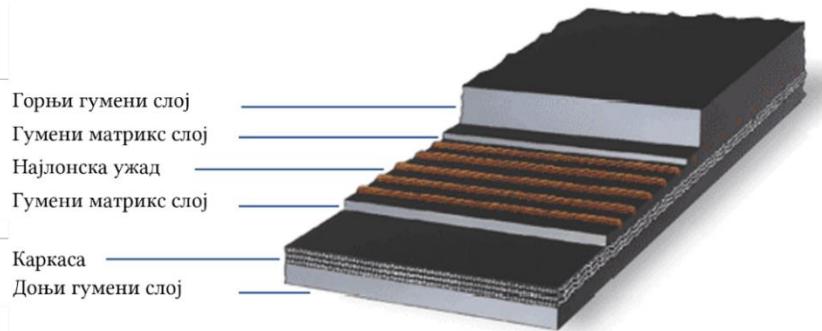
Апсорбујући додатни текстилни слој се поставља кроз средину горњег гуменог заштитног слоја, слика 2.19.а). Улога му је да побољша способност апсорпције удара материјала приликом руковања са тешким материјалима. Он је израђен посебном техником ткања која се зове Лено ткање, слика 2.19.б). Ова техника се користи због тога што су нити основе и потке слободније увезане што омогућава



Слика 2.19. Апсорбујући додатни текстилни слој (а), Лено ткање (б) и додатни челични слој (в)

распршивање енергије удара. Такође, спречава да дође до пробијања носећег слоја траке уколико неки оштар комад материјала пробије заштитни гумени слој. Користи се и у ситуацијама када је потребна висока погонска снага за рад транспортера и када се преноси велики момент са бубња на траку. У тим ситуацијама омогућава дужи животни век траке. У одређеним случајевима када се транспортује изузетно оштар материјал, користи се апсорбујући додатни слој од челичних нити, слика 2.20.в). Заштитни слој попречних ужади побољшава способност траке да апсорбује ударе. Израђује се од попречних синтетичких ужади од најлона пречника 1,5 до 3 mm уроњених у гумени матрикс слој, слика 2.20. Поставља се између носећег слоја и горњег заштитног гуменог слоја.

Када се примењује бочни гумени слој, носећи слој траке се завршава пар милиметара пре ивице траке. Наноси се бочни гумени слој који се сједини са горњим и доњим заштитним гуменим



Слика 2.20. Заштитни слој од попречних синтетичких ужади

слојем. При томе, формира се заштитна опна која спречава да текстилни носећи слој дође у контакт са спољашњом средином. Овај додаток се често користио када се носећи слој израђивао од памука због тога што памук има велику моћ апсорпције влаге што је доводило до труљења материјала. Међутим, пошто је потребан додатни корак у процесу производње траке да би се нанео бочни гумени слој, а како се све више користе синтетички материјали за носеће слојеве који су отпорни на влагу, овај поступак се данас ретко примењује.

2.3.3 Заштитни слој

Носећи слојеви захтевају заштиту од абразивних утицаја, удара материјала, хабања и хемијских реакција како не би губили својства током времена. Ово се постиже постављањем заштитног слоја са горње и доње стране траке.

Заштита носећих слојева постиже се на следеће начине:

- материјал који се утовара на траку клизи по траци док не достигне брзину траке и за то време се јавља трење које подноси горњи заштитни слој;
- материјал који се утовара пада на траку и могу се јавити комади са оштрим ивицама који би раздерали носећи слој да нема заштитног слоја који штити од расецања;
- горња страна траке носи материјал, док се доња страна траке ослања на ослоне ваљке приликом кретања траке на горњој радној страни транспортера, док у случају када се трака креће на доњој повратној страни транспортера, горња страна траке се ослања на ослоне ваљке, док је доња страна слободна – у оба случаја заштитни слојеви штите траку од хабања које се јавља приликом преласка траке преко ваљака.

Заштитни слојеви се израђују од две врсте материјала – најчешће од гуме, а могу бити и од PVC-а. Гуме различитих карактеристика су разврстане по класама и избор класе зависи од радних услова који ће важити током експлоатације транспортера. У случају употребе PVC материјала, коефицијент трења између заштитног слоја и погонског бубња је релативно низак. Такође, због негативног утицаја сунчеве светлости, PVC се највише користи у подземној примени.

Отпорност на хабање транспортне траке је један од главних фактора који утичу на радни век траке и тиме на исплативост инвестиције. Избор типа и врсте заштитног слоја утиче знатно на дужину радног века. Траке опште намене се користе за широк спектар индустријске примене укључујући рударство, прераду руде, дрвну индустрију, пољопривреду итд. Уопштено говорећи, ове траке имају заштитне слојеве од природне и од синтетичких гума попут стиренбутадиена, полибутадиена, акрилонитрила итд.

Што се тиче природне гуме, она је добар основни материјал за заштитне слојеве због тога што:

- има добру затезну чврстоћу и лако подноси деформације;
- има високу термичку отпорност;
- отпорна је на хабање и на раздирање;
- стабилна је у температурном опсегу од -30°C до $+80^{\circ}\text{C}$;
- отпорна је на утицаје воде, алкохола, ацетона, разређених киселина и алкалоида, али није отпорна на концентроване киселине и алкалоиде;
- додавањем различитих укључака може се постићи да природна гума буде отпорна на ватру, као и на старење изазвано сунчевом светлошћу.

Што се тиче синтетичких гума, оне се користе када се јављају одређени тежи радни услови:

- стиренбутадиен је синтетички полимеризовани производ настао од стирена и бутадиена чије су карактеристике сличне природној гуми – затезна чврстоћа, отпорност на раздирање и хабање, као и отпорност на сунчеве утицаје су бољи него код природне гуме;
- нитрилбутадиен је полимер који се састоји од бутадиена и акрилонитрила – физичке карактеристике су нешто лошије него код природне гуме, али подnose шири температурни опсег од -40°C до $+120^{\circ}\text{C}$, отпоран је на абразију и старење изазвано сунчевом светлошћу и користи се када је потребно да трака буде отпорна на утицај уља;
- бутилна гума се састоји од исобутилена и изопрена – има високу отпорност на сунчеву светлост и високе температуре, користи се за температурни опсег од -30°C до $+150^{\circ}\text{C}$, није отпорна на утицаје киселина и алкалоида и користи се када је потребно да трака буде отпорна на високе температуре;
- етилен пропилен гума има слична термичка својства као бутилна гума, али много бољу отпорност на хабање и раздирање и има најбољу отпорност на сунчеву светлост;
- неопрен је производ настао полимеризацијом хлоробутадиена – има сличне карактеристике као природна гума, али знатно бољу отпорност на сунчеву светлост, атоми хлора дају материјалу изузетну отпорност на ватру и користи се када је потребно да трака буде отпорна на масти и уља;

- нитрилни неопрен има побољшана динамичка својства у односу на неопрен – користи се у случајевима где трака треба да буде отпорна на уља и масти неvezано да ли су биљног, животињског или минералног порекла;
- силиконска гума има невероватну отпорност на високе температуре, веома је флексибилна на ниским температурама, добар је изолатор и отпорна је на сунчеву светлост – користи се за температурни опсег од -101°C до $+260^{\circ}\text{C}$, али није отпорна на абразију, раздирање и нема високу затезну чврстоћу.

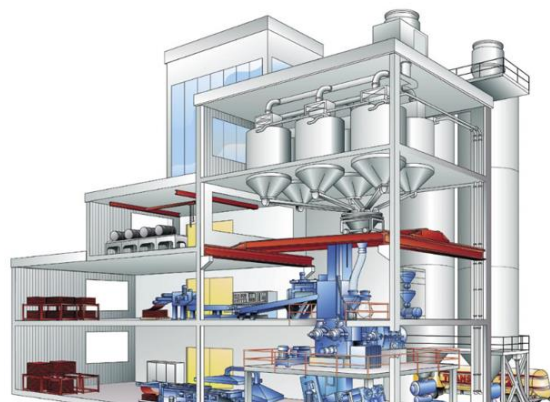
2.3.4 Процес производње траке

Процес производње носећих слојева је описан раније тако да ће се акценат ставити на производњу гумених заштитних слојева и процеса стварања транспортне траке као једне врсте композита.

Процес производње транспортне траке се састоји из следећих корака:

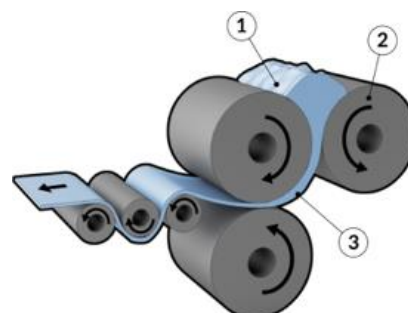
- мешање гуме;
- стварање танког слоја гуме;
- слагање слојева један на други;
- сједињавање слојева;
- инспекција.

Што се тиче првог корака, карактеристике гуменог заштитног слоја зависе од радних услова. Због тога произвођачи производе различите типове гумених слојева. Типични састојци који се користе су полимери, вулканизирајући реагенси, катализатори реакција, омекшивачи, филери, специфични елементи итд. Све сировине се чувају под одређеним температурама заштићене од директне сунчеве светлости. Мешање се започиње тако што се у мешалицу додају сви потребни састојци који су претходно одмерени, слика 2.21.



Слика 2.21. Процес мешања гуме

Измешана маса се из миксера транспортује до равнајућих притисних ваљака који од смеше формирају уске дебеле траке при чему започиње процес вруће вулканизације. То је хемијски процес током којег се индивидуални молекули полимера везују са другим молекулима полимера путем атомских веза. Резултат је да еластични молекули гуме постају део целине која је тврђа, отпорнија на механичка оптерећења и оштећења и отпорна на хемијске утицаје. Такође, током процеса, површина гуме постаје глатка. Хладна вулканизација се ретко користи код производње траке, већ се користи приликом спајања крајева траке о чему ће бити речи касније. Други корак је приказан на слици 2.22. и представља стварање танког слоја гуме. Обавља



Слика 2.22. Процес стварања танког гуменог слоја

се у преси која се састоји од више равнајућих ваљака (2). У пресу улазе уске дебеле траке (1) које се под притиском стањују (3) настављајући процес вулканизације.

Затим се на радном столу слажу слојеви траке почев од доњег гуменог заштитног слоја, затим се стављају носећи слојеви и додатни конструкциони елементи уколико постоји потреба за њима и на крају се од горе поставља горњи гумени слој. Потом се наслагани слојеви изложе мањем притиску како би добили дефинисани облик. Следећи корак јесте сједињавање, слојева тако што се пропусте кроз пресу где се на повишеној температури и притиску наставља процес топле вулканизације током којег се формира финални облик траке. Преса је приказана на слици 2.23.



Слика 2.23. Преса за сједињавање слојева

На крају се врши уклањање гумених влакана која могу да висе са стране траке и трака се сече на потребну меру. Пре сечења, врши се испитивање траке да ли задовољава све тражене услова. На крају се пакује и шаље крајњем кориснику.

2.3.5 Карактеристике траке

Током радног века, трака се издужује. Део издужења је привремен, што је последица промена сила у траци услед покретања и заустављања транспортера, као и због температурних услова. Са друге стране, постоји трајно издужење које се јавља због издужења влакана, које се јавља због оптерећења која трпе током рада. Издужења траке је могуће поделити у следеће категорије:

- еластично издужење – јавља се током промена сила у траци које настају током покретања, заустављања и утовара материјала на транспортер и нестаје када престане деловање узрочника;
- конструкционо издужење – јавља се због процеса ткања, током којег настаје носећи слој, нити основе су благо наборане док се трака не оптерети радним оптерећењем што изазива равнање нити и неповратно издужење;
- трајно издужење – јавља се због пузања и замора влакна које се дешава током експлоатације.

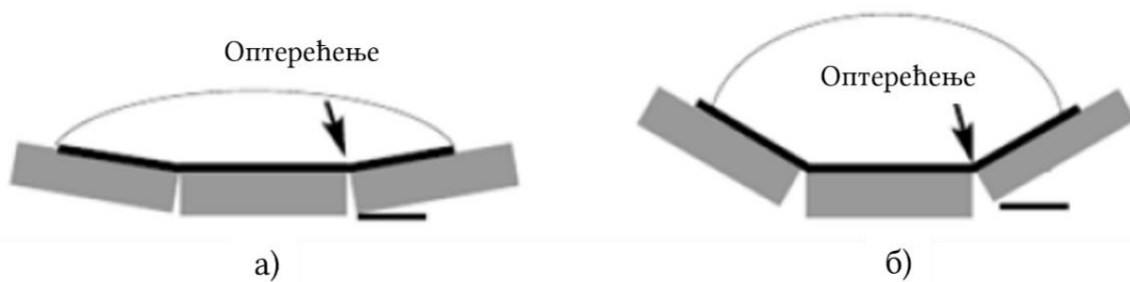
Затезна чврстоћа траке није једина особина траке коју је потребно размотрити током избора траке. Попречна крутост траке је веома важан параметар на који је потребно обратити пажњу, слика 2.24.



Слика 2.24. Неправилно (а) и правилно (б) налагање траке на ослоне ваљке

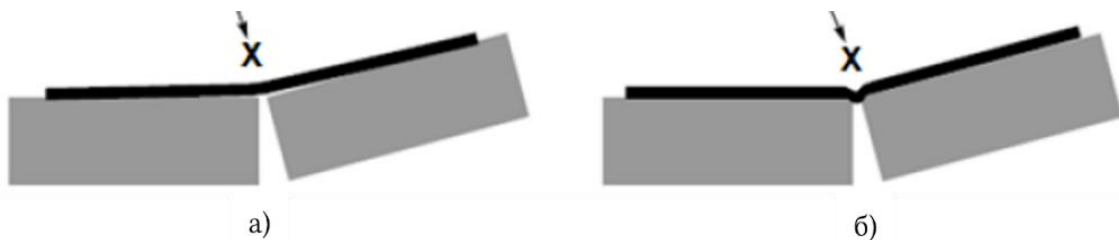
Важно је да трака правилно належе на ослоне ваљке. Празна трака треба да оствари контакт са средњим равним ваљком како би се правилно кретала. Уколико је трака превише крута у попречном правцу, имаће бочна померања која ће временом довести до знатног хабања ивица траке. Потребно је да минимум између 35% и 50% траке буде у контакту са ослоним ваљцима како би се сматрало да трака правилно належе.

Попречна крутост зависи од ширине траке и угла нагиба ослоних ваљака. Уколико је потребно да трака буде флексибилнија, бира се материјал носећег слоја са већом затезном чврстоћом и мањим бројем носећих слојева. Што се тиче угла нагиба ослоних ваљака, он се креће углавном у границама 10° - 45° , али је најчешће у интервалу 25° - 45° слика 2.25.



Слика 2.25. Угао нагиба од 10° (а) и од 30° (б)

На слици 2.25, види се да угао нагиба утиче на траку, тако што се ствара линија дуж које је трака константно савијена. Када се на траци налази материјал, део оптерећења (X) утиче да се трака савије на мањем радијусу на месту прелаза између два суседна ваљка, слика 2.26. Што је оптерећење веће, мањи је радијус савијања. Такође, силе услед оптерећења ће тежити да гурну траку кроз размак између ваљака. Ситуација задовољава уколико трака направи тзв. мост при пуном оптерећењу, слика 2.26.а), док се проблем јавља када трака упадне између ваљака што може да изазове превремени отказ, слика 2.26.б).



Слика 2.26. Задовољавајуће стање (а) и незадовољавајуће стање (б)

Због тога је потребно изабрати траку која има довољну попречну крутост како би премостила размак између ваљака са задовољавајућим радијусом савијања. Како је већ речено раније, на попречну крутост утиче ширина траке, тако да постоје препоруке за минимални број носећих слојева за одређену стандардну ширину траке, табела 2.3.

Табела 2.3. Препоручени минимални број носећих слојева траке

Ширина траке B [mm]	300	400	500	650	800	1000	1200	1400	1600
Мин. број носећих слојева траке z_{MIN}	3÷4	3÷5	3÷6	3÷7	4÷8	5÷10	6÷12	7÷12	8÷13

Потребан број носећих слојева траке z се одређује према максималној радној сили у траци S_{MAX} [N]:

$$z = \frac{n \cdot S_{MAX}}{B \cdot K} \quad (2.8)$$

где је:

- n - степен сигурности;
- B [mm] - ширина траке;
- K [N/mm] - јачина на кидање материјала носећег слоја траке (затезна чврстоћа).

Силе у траци се јављају услед транспорта материјала, али и услед савијања траке дуж трасе, покретања и заустављања транспортера итд. На животни век траке поред сила, утичу појаве пузања и замора влакана што је тема ове дисертације. Раније наведена литература показује да се прорачуната сила множи степеном сигурности и затим дели са ширином траке и затезном чврстоћом како би се добио потребан број носећих слојева. Међутим, степен сигурности је изузетно велик и креће се у опсегу од 9 до 11 за траке чији су носећи слојеви направљени од текстила, табела 2.4.

Табела 2.4. Степен сигурности

Број слојева траке z	2÷4	4÷5	6÷8	9÷11	12÷14
Степен сигурности n	9	9,5	10	10,5	11

Као што се види у табели, степен сигурности расте са бројем носећих слојева траке. Ово се може објаснити тиме да се оптерећење у траци не расподељује униформно кроз све носеће слојеве и да трака није изложена само затезним оптерећењима, већ и савојним оптерећењима када се трака савија преко бубњева и прелази преко ваљака. Такође, кроз прорачун се не узима у обзир појава пузања и замора влакана и спојева траке, тако да управо ту постоји простор за даља истраживања. Ширина траке се одређује на основу потребног капацитета транспортера. Активна ширина траке b мања је од стварне ширине траке B како би се спречило расипање материјала током кретања. Активна ширина траке се рачуна према:

$$b = \sqrt{\frac{Q}{k_3 \cdot a \cdot v \cdot \rho}} \text{ [m]} \quad (2.9)$$

где је:

- $Q[t/\dot{c}]$ - масени капацитет;
- k_3 - коефицијент смањења капацитета транспортера услед нагиба транспортера, који се креће у опсегу $0,76 \div 1$;
- a - коефицијент облика траке који зависи од облика траке, ширине траке и угла нагиба бочних ослоних ваљака;
- $v[m/s]$ - брзина кретања траке која се бира на основу врсте материјала који се транспортује и креће се у опсегу $0,85 \div 4,25 m/s$, а најчешће се бирају брзине у опсегу $1 \div 2,5 m/s$;
- $\rho[t/m^3]$ - густина материјала.

Стварна ширина траке се одређује према:

$$B = \frac{b + 0,05}{0,95} [m] \quad (2.10)$$

На основу добијене вредности, усваја се прва најближа стандардна ширина траке и евентуално се ради корекција брзине транспортовања.

Оријентациона тежина траке по дужном метру одређује се према:

$$q_0 = 11 \cdot B \cdot (1,25 \cdot z + \delta_1 + \delta_2) [N/m] \quad (2.11)$$

при чему се ширина траке B уноси у метрима, а дебљине гумених заштитних слојева δ_1 и δ_2 у милиметрима. Дебљине гумених заштитних слојева су дате у табели 2.5.

Табела 2.5. Дебљине гумених заштитних слојева траке

Врста транспортног материјала	Дебљина облоге (mm)		Примери
	са радне δ_1	са нерадне δ_1	
1. Зрнасти и прашинасти	1.5	1	Зрно, угљена прашина
2. Зрнасти и ситнокомадасти	1.5 – 3	1	Песак, цемент, кокс
3. Средње комадасти	3 – 4.5	1.5	Шљунак, камен
4. Крупно комадасти	6	1.5	Руде

2.3.6 Спајање крајева траке

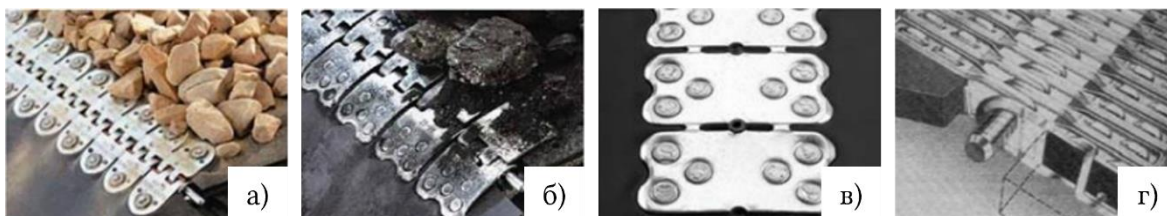
Трака се транспортује уrolана од места производње до места уградње и због тога је потребно пре употребе спојити крајеве траке како би се формирала непрекидна трака. Постоје два начина повезивања крајева траке – механичко спајање путем механичких спојница, и спајање вулканизацијом путем топлоте и/или хемијских реагенаса.

Процес вулканизације обезбеђује јачу везу и дужи животни век, али захтева сложу процедуру те се често због једноставније процедуре примењује механичко спајање.

Механичко спајање

Постоје две врсте механичких спојница – зглобне и равне плоче. Спојнице поседују тзв. зубе којима продиру у гумени заштитни слој траке. Спајају се помоћу нитни, вијака и хефти.

На слици 2.27. су приказани примери механичког спајања.

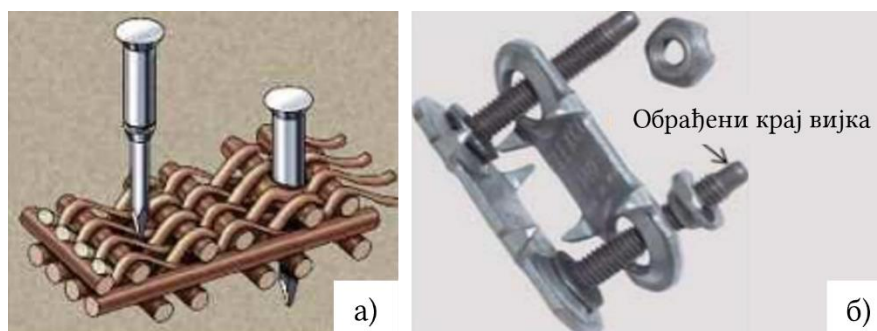


Слика 2.27. Типови механичких спојница – зглобна спојница са вијцима (а), зглобна спојница са нитнама (б), равна плоча са нитнама (в) и спојница са хефтама (г)

Зглобне спојнице долазе у стандардним ширинама које се бирају на основу траке. Омогућавају адекватно поравнање крајева траке. Њихова предност је у томе што се крајеви траке могу раздвојити када се из спојнице извуче везна осовиница. На овај начин се олакшава посао одржавања траке током експлоатације. Користе се код транспортера где су мањи пречници бубњева.

Равне спојнице остварују снажну и трајну везу. Због тога се користе за тешке радне услове попут рудника и сл. Не користе се код транспортера са малим пречницима бубњева због тога што не могу да се савију око њих.

Спајање помоћу нитни се препоручује за ситуације где се бирају траке чији носећи слојеви имају високу затезну чврстоћу. На слици 2.28.а) је приказано како нитне пролазе између нити каркасе при чему их не оштећују. Спајање помоћу вијака се најчешће користи код транспортера са траком, слика 2.28.б). Оно омогућава да се плоче скину по потреби са траке. Глава вијка и навртка равномерно преносе оптерећење на доњу и горњу плочу чиме обезбеђују дужни радни век. Као и нитне, вијци су посебно пројектовани тако да продру кроз каркасу не оштећујући нити. Крајеви вијака се обрађују на мањи пречник без навоја како би се лакше центрирала навртка током монтаже.



Слика 2.28. Постављање нитни кроз носећи слој (а) и вијчана веза (б)

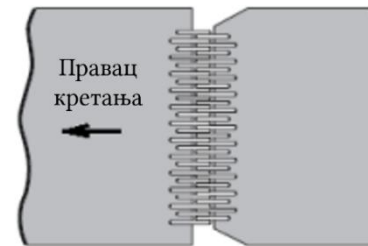
На слици 2.29. приказано је механичко повезивање крајева траке.

Приликом повезивања се користе посебно конструисани алати како би процес био што лакши. Када се навртка заврне до краја, крајеви вијака који остану да вире изнад навртке се скраћују помоћу посебног алата како не би оштетили бубњеве и ваљке. На крају спајања, потребно је да површина споја буде равна и глатка како не би долазило до оштећења осталих елемената транспортера.



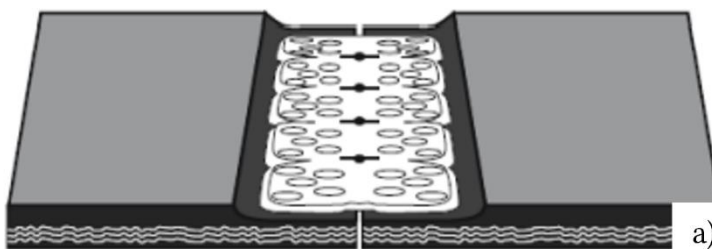
Слика 2.29. Механичко повезивање крајева траке

Крајеве траке је потребно обрадити тако да буду што је могуће равнији и паралелни. Поједини произвођачи траке, у зависности од пројектованог правца кретања траке, препоручују да се закосу ивице краја траке – за траке које ће се кретати само у једном правцу током оперативног века препорука је да се закосу пратећи крај траке, слика 2.30, док за траке које ће се кретати у два правца препорука је да се закосу и водећи и пратећи крај траке.



Слика 2.30. Закосење пратећег краја траке

Напреднији начин употребе механичких спојница захтева да се скине одређена дебљина заштитних гумених слојева путем посебно пројектоване глодалице, слика 2.31.б), и да се направи тзв. канал са заобљеним крајевима у који се поставља механичка спојница, слика 2.31.а). Овом методом се спречава могућност контакта површине бубњева и ваљака са механичком спојницом.



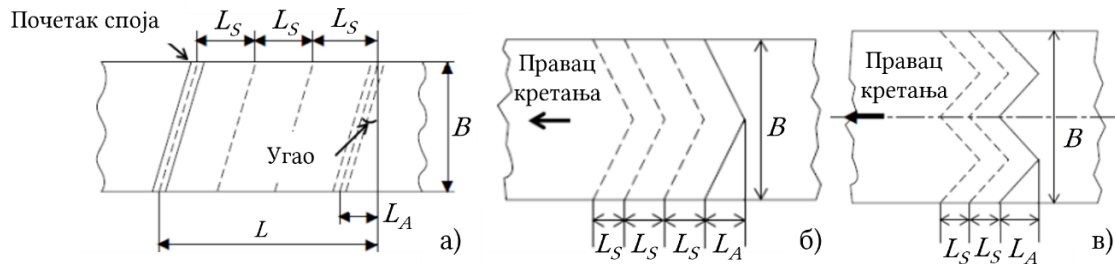
Слика 2.31. Напредан начин постављања механичких спојница

Главна мана механичких спојница јесте то што преносе топлоту у носећи слој чиме доводе до ранијег отказа траке. Због тога се не препоручују за траке које ће преносити предмете повишене температуре.

Вулканизација

Основа адекватног споја крајева траке јесте остварена јака веза између текстилних носећих слојева и гумених слојева – горњих и доњих заштитних, али и

гумених међуслојева који се постављају између текстилних носећих слојева. Код топле вулканизације, до спајања долази на повишеним температурама и притисцима, док код хладне вулканизације до спајања долази уз присуство хемикалија на собној температури. Дужина споја зависи од врсте текстилног носећег слоја. Постоји више врста степенстих спојева – раван спој, дијагоналан спој, Шеврон спој и Цик-цак спој. На слици 2.32. су приказани ови спојеви.



Слика 2.32. Степенсти дијагонални спој (а), Шеврон спој (б) и Цик-цак спој (в)

Са B је означена ширина траке, са L_A је означена пројекција дијагонале споја, са L_S је означена дужина корака споја. Прво је потребно израчунати укупан број корака n_K на основу броја носећих слојева z :

$$n_K = z - 1 \quad (2.12)$$

Укупна дужина споја L за траке са више носећих слојева се рачуна према:

$$L = n_K \cdot L_S + L_A \quad (2.13)$$

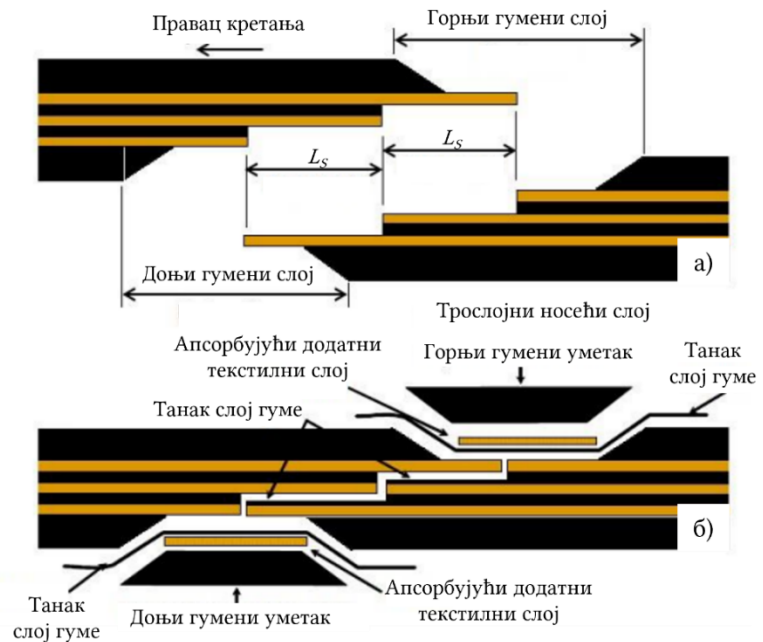
Спојеви код трака чији су носећи слојеви израђени од текстила, израђују се као дијагонални спојеви, слика 2.32.а). Овакав вид спајања спречава да спој буде читавом ширином оптерећен на савијање када се трака савија око бубња. Угао од $16^\circ 40'$ се показао као идеалан. Лако га је конструисати због тога што омогућава да пројекција дијагонале споја буде 30% од ширине траке.

Што се тиче Шеврон споја, пројекција дијагонале споја се бира да буде између 25% и 50% ширине траке и бира се дужина корака споја да буде између 200 и 300 mm. Код Цик-цак споја, пројекција дијагонале споја се бира да буде 25% ширине траке, док се дужина корака споја одређује да буде 150 mm. Шеврон спој се користи код кратких транспортера са траком, док се Цик-цак спој користи за транспортере са траком који могу да раде у оба смера, као и код дозатора. Ови типови спојева се користе и у случајевима када су мали пречници бубњева.

За носеће слојеве израђене равним ткањем који имају високу затезну чврстоћу, користи се тзв. испреплетано спајање које личи на испреплетане прсте између две шаке. О овоме ће бити речи касније.

Код топле вулканизације, користи се степенасто дијагонално спајање. На слици 2.33. приказано је типично спајање вулканизацијом. На почетку је потребно припремити крајеве траке, као што је приказано на слици 2.33.а). Потребно је

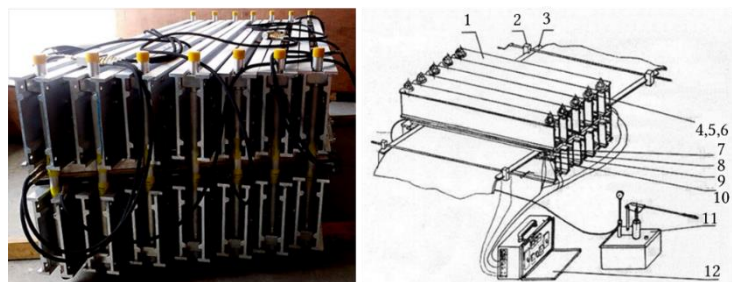
уклонити гумене слојеве и направити степенасте прелазе. По завршетку припреме, на отворене носеће слојеве се наноси вулканизирајући раствор који ће се током вулканизације понашати као цемент. На површине третиране раствором се поставља танак слој гуме, дебљине између 0,3 и 0,8 mm. Затим се на танак слој гуме који је постављен изнад горњег и испод доњег носећег слоја постављају апсорбујући



Слика 2.33. Припрема за вулканизацију

додатни текстилни слојеви и на њих се постављају гумени умети, који се током вулканизације сједињују са горњим и доњим заштитним гуменим слојем, слика 2.33.б).

Када су постављени сви потребни елементи, започиње се са процесом вулканизације, који је приказан на слици 2.34. Уређај за вулканизацију се састоји од металног рама (1), држача траке (2), плоче на коју се трака ослања (3),



Слика 2.34. Уређај за топлу вулканизацију

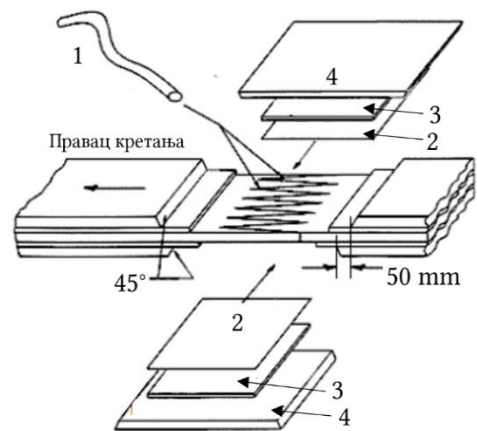
комплетног вијчаног споја који се користи за формирање металног рама (вијак (4), навртка (5) и подлошка (6)), горњег и доњег плочастог изолатора (7), горње грејне плоче (8), доње грејне плоче (9), актуатора (10) који остварује притисак горњег рама на доњи и тиме и на траку, уређаја за регулацију и праћење притиска (11) и уређаја за регулацију и праћење температуре (12)). Метални рам треба да покрије комплетан спој траке тако да буде шири од споја за 100 mm и дужи од споја за 200 mm. Уређај треба да има могућност да оствари притисак до 10 bar и температуру до 150° C. Поступак се спроводи тако што се постепено повећава притисак уз постепено повећање температуре. Када се достигне 100° C, притисак се повећава на максимум од 10 bar. Затим се температура повећава на 150° C. Овај припремни поступак траје између 40 и 60 минута. Када спој траке достигне 150° C, почиње процес спајања крајева траке. У зависности од дебљине траке, процес спајања траје од 25 минута за траке дебљине 10 mm, до 70 минута за траке дебљине преко 25 mm. Током

комплетног процеса спајања, притисак се одржава на 10 bar. По завршетку процеса спајања, следи поступак хлађења када се на притиску од 10 bar снижава постепено температура на 70° C. Овај поступак траје колико год је потребно да се спој природно охлади до наведене температуре од 70° C. Када се спој охлади, уклања се уређај за вулканизацију и сматра се да је процес спајања завршен.

Код хладне вулканизације, исти је поступак припреме крајева траке као на слици 2.33.а). Када се крајеви припреме, на њих се наноси раствор за хладну вулканизацију. Број слојева раствора зависи од типа траке, али обично се наносе 2 или 3 слоја раствора. Време сушења слојева на собној температури је око 60 минута по слоју. Када се последњи слој потпуно осуши, наноси се још један слој и одмах се крајеви траке поставе један на други, водећи рачуна да буде остварена линеарност траке, слика 2.35. Потпуно налегање крајева траке постиже се применом двоструког ваљка којим се прелази преко места споја. Траке које се излажу ниском оптерећењу, суше се минимум 2 сата, а траке које се излажу високом оптерећењу, 6 сати.

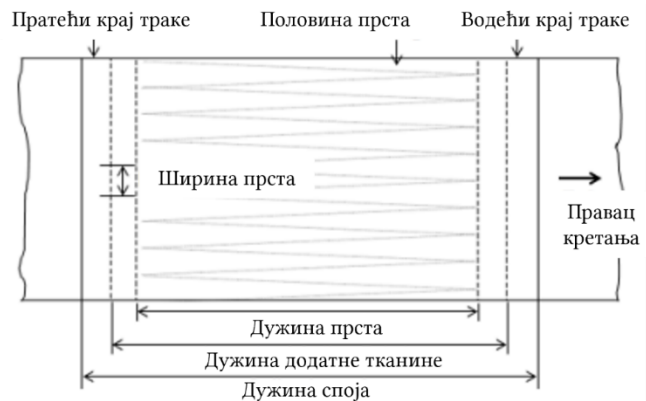


Слика 2.35. Двоструки ваљак



Слика 2.36. Припрема испреплетаног споја

Испреплетано спајање се користи за транспортне траке са једним или два носећа слоја изузетно велике затезне чврстоће, слика 2.36. Када се крајеви траке исеку у облику прстију, они се испреплету и између њих се постави танка гумена тракица (1). На њих се, са доње и горње стране, постављају танки гумени слојеви (2) премазани раствором за топлу вулканизацију. На гумене слојеве се поставе додатни слојеви тканине (3), а на њих гумени слојеви (4) – горњи и доњи заштитни гумени слој. Затим се поставља уређај за вулканизацију и извршава се поступак топле вулканизације. На слици 2.37. су приказане карактеристичне димензије код испреплетаног споја.



Слика 2.37. Испреплетани спој

Дужина прста се рачуна:

$$L = n_K \cdot L_S + L_A \quad (2.14)$$

Дужина додатне тканине се рачуна:

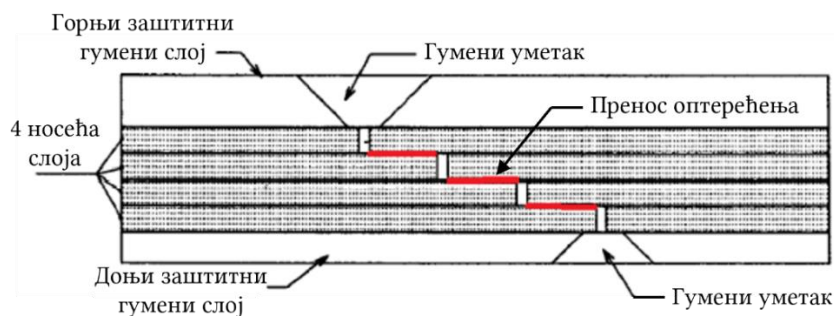
$$L = n_K \cdot L_S + L_A \quad (2.15)$$

Дужина споја се рачуна:

$$L = n_K \cdot L_S + L_A \quad (2.16)$$

Ефикасност споја

Због поступка спајања крајева траке, затезна чврстоћа траке опада. Ова појава се назива ефикасност споја. Узрок ове појаве јесте чињеница да горњи носећи слој не трпи оптерећење после споја, слика 2.38. Може се видети пример од 4 носећа слоја где три слоја преносе оптерећење, док горњи не учествује у томе [2].



Слика 2.38. Пренос оптерећења

За 3 носећа слоја, ефикасност споја се рачуна $= 2 / (2+1) = 0,66$ (34% износи губитак затезне чврстоће).

За 4 носећа слоја, ефикасност споја се рачуна $= 3 / (3+1) = 0,75$ (25% износи губитак затезне чврстоће).

За 5 носећих слојева, ефикасност споја се рачуна $= 4 / (4+1) = 0,80$ (20% износи губитак затезне чврстоће).

Може се закључити да важи законитост – Ефикасност споја $= z / (z + 1)$ где је z број степеника у споју.

Немогућност да се достигне 0% губитка не доводи до отказа траке и не представља проблем. Издржљивост споја не зависи од затезних оптерећења која се јављају током радног века траке, већ зависи од савојног оптерећења које се јавља током савијања траке око бубњева. Адекватним избором пречника бубњева се постиже дуготрајан радни век споја траке, а тиме и саме траке.

2.4 Стандарди у вези са транспортним тракама

У [5] су обрађени стандарди који се тичу аксијалног испитивања транспортних трака. Дат је преглед потребних услова за извођење експеримената, као и смерница како треба да изгледа и функционише испитни уређај. У овом поглављу ће акценат бити дат на аксијалном испитивању узорака транспортних трака, а даће се и кратак преглед осталих стандарда који се тичу транспортних трака. Разматраће се траке са текстилним носећим слојевима.

2.4.1 Аксијална испитивања

Према [6], произвођачи транспортних трака су у обавези да на свакој траци означе информације у вези са произвођачем траке, материјалом носећих слојева, бројем носећих слојева, затезном чврстоћом носећих слојева, специјалним карактеристикама гуменог заштитног слоја и да јасно означе идентификациони број траке. Како би подаци о затезној чврстоћи били поуздани, произвођачи тестирају транспортне траке кроз низ експеримената. Више речи о овом стандарду ће бити касније.

Потребно је направити узорке ради експеримената према [6]. Шема узорковања је дата на слици 2.39.



Слика 2.39. Шема узорковања

Број узорака зависи од дужине траке што је прописано у [7]. У табели 2.6. је приказана зависност броја узорака од укупне дужине траке.

Табела 2.6. Број узорака у зависности од дужине траке

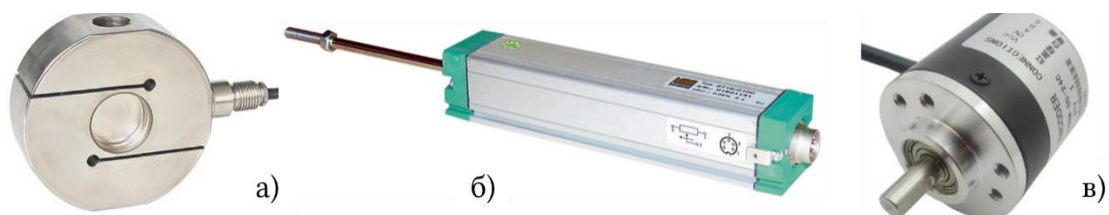
Укупна дужина транспортне траке [m]	Број узорака
$L \leq 500$	1
$500 < L \leq 1.000$	2
$1.000 < L \leq 2.000$	3
$2.000 < L \leq 3.500$	4
$3.500 < L \leq 5.000$	5
$5.000 < L \leq 7.000$	6
$7.000 < L \leq 10.000$	7
Примедба: Потребно је узети додатан узорак за сваких 5.000 m уколико је дужина траке преко 10.000 m.	

Како би експерименти били валидни, потребно је да прође одређени временски интервал између производње траке и самог експеримента. Такође, потребно је испоштовати атмосферске услове који су потребни да би резултати били валидни. Ови параметри су дефинисани у [8]. За све типове експеримената, потребно је да прође 24 h између производње и узорковања траке. Са друге стране, не сме да прође више од три месеца између производње и узорковања. Што се тиче атмосферских услова, постоји 5 комбинација које омогућавају исправно тестирање узорака, што је приказано у табели 2.7.

Табела 2.7. Потребни атмосферски услови

		Температура [°C]	Рел. влажност [%]
1	Атмосферски услови А	20 ± 2	65 ± 5
2	Атмосферски услови Б	23 ± 2	50 ± 5
3	Атмосферски услови Ц (тропски)	27 ± 2	65 ± 5
4	Атмосферски услови D (контролише се темп.)	23 ± 2 или 20 ± 2	/
5	Атм. услови Е (контролише се темп, тропски)	27 ± 2	/

Уређај за аксијално испитивање узорака треба да функционише на принципу константне брзине издужења узорка или константне брзине померања чељусту. Уређај треба да буде у могућности да издужује узорак брзином од 100 ± 10 mm/min. Треба да буде пројектован у складу са [9]. Погонски механизам може да буде електрични, хидраулични и евентуално мануелни уколико се не захтевају резултати високе прецизности. Постоји више концепата уређаја, али најчешће се користи уређај са навојним вретеном. Како би се измерила сила којом се делује на узорак, уређај треба да поседује мерни давач силе, слика 2.40.а). Мерни давач треба да буде постављен тако да региструје само аксијално истезање. Ово се постиже применом зглобних веза између мерног давача и носеће конструкције уређаја, као и између мерног давача и чељусту. Како би се мерила деформација узорка, уређај треба да поседује екстензиометар слика 2.40.б), или ротациони енкодер монтиран на ЕМ, слика 2.40.в). Потребно је да уређај буде способан да графички бележи резултате експеримента.



Слика 2.40. Мерни давачи

Челусти уређаја треба да буду пројектоване тако да спрече померање узорка траке током експеримента. Због тога је потребно користити челусти са назубљеним површинама на месту контакта са узорком, слика 2.41.

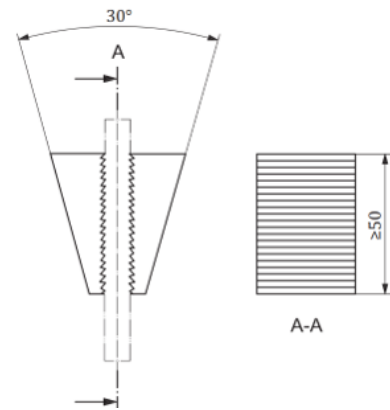
Пре употребе уређаја, потребно је калибрисати систем за мерење силе и деформације узорка за сваки распон сила и деформација за који ће се узорци испитивати. Калибрација система за мерење деформације се ради уз помоћ еталона, док се калибрација система за мерење силе ради према [10]. Могуће је користити тегове познате масе или мерне инструменте. Класа калибрационог уређаја треба да буде за степен виша од тражене класе мерног давача силе који се калибрише.

Пример уређаја је дат на слици 2.42. На њему је означен мерни давач силе (1), горња покретна челусти (2) и узорак траке (3). Максимална сила коју мерни давач силе може да региструје треба да буде 25% већа од максималне силе којом ће се давач оптеретити током радног века. Давач помака треба да има прецизност од најмање 0,1 mm.

Постоје 4 основна експеримента која се користе код аксијалног испитивања транспортних трака који су дефинисани стандардима – утврђивање затезне чврстоће и издужења узорка, утврђивање еластичне и трајне деформације, као и модула еластичности узорка, утврђивање отпорности на раслојавање слојева узорка и утврђивање максималне силе коју могу да поднесу спојеви узорка. За све наведене експерименте, могуће је користити горе описани уређај.

Испитивање затезне чврстоће и издужења узорка

Што се тиче испитивања затезне чврстоће и издужења узорка, потребно је испратити смернице дате у [11]. Кроз овај експеримент се утврђује подужна и попречна затезна чврстоћа, као и издужење узорка при дејству референтне силе која се рачуна као $1/10$ затезне чврстоће помножене са ширином узорка на најужем делу датом у милиметрима. Затезна чврстоћа узорка [N/mm] је величина која показује колику силу трака може да издржи пре отказа, а рачуна се тако што се подели максимална сила [N] измерена током експеримента са ширином узорка [mm] на најужем делу.



Слика 2.41. Препоручена конструкција челусти



Слика 2.42. Пример испитног уређаја

Издужење E_{FR} [%] услед дејства референтне силе се рачуна према:

$$E_{FR} = \frac{100 \cdot (L_2 - L_1)}{L_1} \quad (2.17)$$

где је:

- L_2 - дужина узорка под дејством референтне силе;
- L_1 - иницијална дужина узорка.

Издужење E_{FB} [%] услед дејства силе лома узорка се рачуна према:

$$E_{FB} = \frac{100 \cdot (L_2 - L_1)}{L_1} \quad (2.18)$$

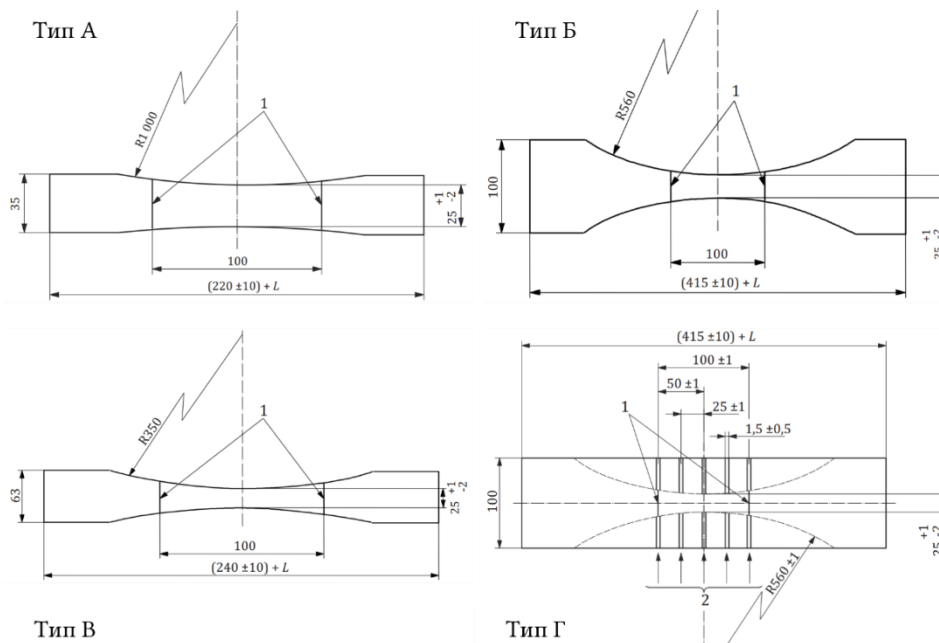
где је:

- L_2 - дужина узорка под дејством силе лома;
- L_1 - иницијална дужина узорка.

Како би резултати били валидни, потребно је испитати три узорка и усвојити средњу вредност као валидну. На почетку експеримента, узорак се поставља у чељусти испитног уређаја и уређај затеже узорак до жељене силе. Пример испитивања је дат на слици 2.43. Постоје четири типа узорка који се користе у експерименту. Избор зависи од затезне чврстоће траке. Типови А, Б и В се користе за траке чија је затезна чврстоћа испод 2000 N/mm, у супротном се користи тип Г. Узорци су приказани на слици 2.44.



Слика 2.43. Испитивање затезне чврстоће узорка



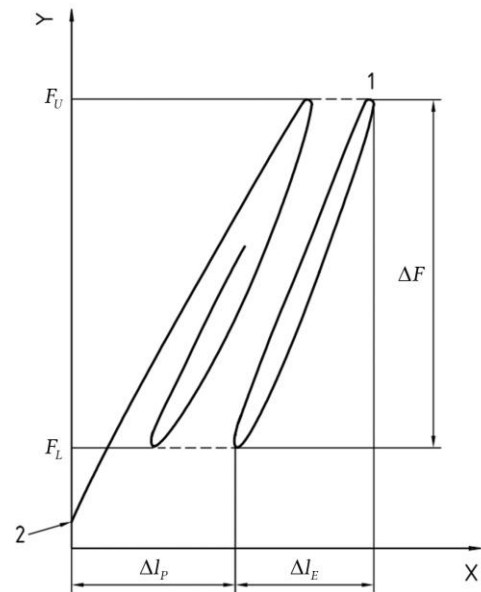
Слика 2.44. Типови узорка са карактеристичним димензијама

Испитивање еластичне и трајне деформације, као и модула еласт. узорка

Испитивање еластичне и трајне деформације, као и модула еластичности узорка се спроводи према [12].

Што се тиче лаких транспортних трака, испитивање се спроводи према [13].

Експеримент се спроводи издужењем узорка. Сила којом се узорак истеже зависи од затезне чврстоће траке. Пре испитивања, узорак се оптерети силом од 0,5% номиналне затезне чврстоће помножене са ширином узорка у најужем делу. Током експеримента, неопходно је да се узорак истеже између горње и доње референтне вредности силе фреквенцијом од 0,1 Hz. Горња референтна сила F_U [N] треба да буде једнака 10% номиналне затезне чврстоће помножене са ширином узорка у најужем делу, док доња референтна сила F_L [N] треба да буде једнака 2%.



Слика 2.45. Графички запис

Неопходно је графички забележити први и двестоти циклус експеримента, слика 2.45.

Са добијеног графика је потребно прочитати вредност ΔF што представља распон силе, као и вредности ΔI_P која представља трајну деформацију и ΔI_E која представља еластичну деформацију.

Процент трајне деформације ε_{PERM} [%] се рачуна према:

$$\varepsilon_{PERM} = \frac{\Delta I_P}{I_0} \cdot 100 \quad (2.19)$$

Процент еластичне деформације ε_{ELST} [%] се рачуна према:

$$\varepsilon_{ELST} = \frac{\Delta I_E}{I_0} \cdot 100 \quad (2.20)$$

где је:

- I_0 - почетна дужина узорка.

Модул еластичности M узорка траке се рачуна према:

$$M = \frac{\Delta F}{\varepsilon_{ELST}} \cdot 100 \text{ или } M = \frac{\Delta F \cdot I_0}{\Delta I_E} \quad (2.21)$$

Како би резултати били валидни, неопходно је испитати три узорка и изразити средњу вредност. Пример испитивања је дат на слици 2.46.



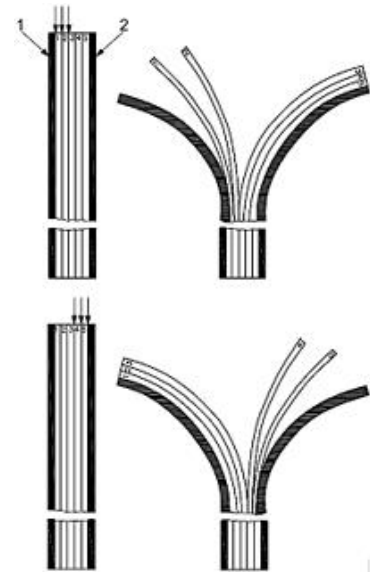
Слика 2.46. Испитивање еластичне деформације узорка

Испитивање отпорности на раслојавање слојева узорка

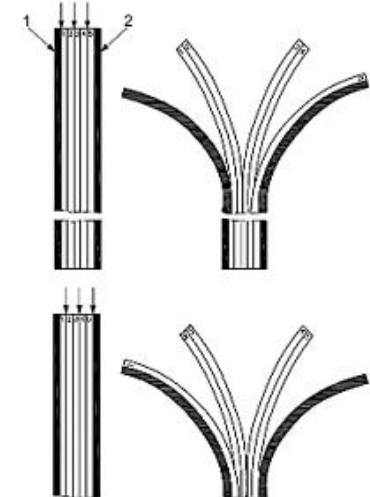
Отпорност на раслојавање слојева узорка траке се испитује према [14], док се лаке транспортне траке испитују према [15]. Постоје два начина испитивања – метод А и Б.

Према методу А, неопходно је одвојити горњи заштитни гумени слој (1) од остатка узорка на једном крају узорка како би чељусти могле да прихвате узорак. Једна чељуст захвата одвојени гумени слој, док друга чељуст захвата остатак узорка. Узорак се тада истезе и бележи се сила потребна да раздвоји додатних 100 mm гуменог слоја од остатка узорка. Затим се поступак понавља за сваки следећи слој док се не стигне до средине узорка. Следећи корак је да се постави нови узорак траке у чељусти и да се започне од доњег гуменог заштитног слоја (2). Испитивање се врши док се не дође до средине узорка. До раслојавања треба да дође између слојева, ако се деси да се сам слој почне раслојавати, такву појаву треба забележити јер је то знак да није остварена адекватна веза између слојева. Метод А је приказан на слици 2.47. Метод Б се започиње исто као метод А. Разлика је у томе што се не одваја слој по слој, већ 2 слоја одједном, слика 2.48.

Код обе методе је неопходно усвојити средње вредности силе при којој долази до раслојавања слојева. Потребно је забележити минималну силу при којој долази до раслојавања. Добијени резултати се вреднују према [16]. Средња вредност адхезије [N/mm] између слојева се добија као количник средње вредности забележене силе [N] и ширине [mm] узорка. Минимална вредност адхезије [N/mm] између слојева се добија као количник минималне вредности забележене силе [N] и ширине [mm] узорка.



Слика 2.47. Метод А приказан на примеру од 5 носећих слојева



Слика 2.48. Метод Б приказан на примеру од 5 носећих слојева

Према [6], вредност адхезије (отпорност на раслојавање) треба да буде што ближа вредностима у табели 2.8.

Табела 2.8. Вредности адхезије

Адхезија [N/mm]		
Између носећих слојева	Између носећих и гумених заштитних слојева	
	Дебљина гумених слојева [mm]	
	0,8 - 1,5	преко 1,5
5	3,5	4,5

Вредности адхезије добијене експерименталним путем могу бити највише 1 N/mm мање од вредности датих у табели 2.8. како би се могло рећи да је трака правилно произведена. Максимална вредност адхезије може бити 16 N/mm за транспортне траке чија је затезна чврстоћа мања или једнака 1250 N/mm и 20 N/mm за транспортне траке чија је затезна чврстоћа већа од 1250 N/mm. Процедура испитивања је приказана на слици 2.49.



Слика 2.49. Ток испитивања

Испитивање максималне силе коју могу да поднесу спојеви узорка

Као што је речено у ранијим поглављима, постоје два начина повезивања крајева трака – механичко и вулканизацијом (топла и хладна вулканизација). Крајеви спојени вулканизацијом се испитују према [17] и [18], док се крајеви спојени механичким путем испитују према [19]. Када се испитују спојеви настали вулканизацијом, проверава се затезна чврстоћа споја, отпорност на раслојавање споја и отпорност на смицање споја. Узорак се поставља у чељусти испитног уређаја и истеже се до тренутка када спој откаже. Затезна чврстоћа споја се рачуна као количник измерене силе [N] при којој је дошло до отказа и ширине узорка [mm]. За овај експеримент довољно је да узорци буду правоугаоног облика минималне ширине од 100 mm. Према [6], проценат губитка затезне чврстоће споја у односу на затезну чврстоћу траке је приказан у табели 2.9.

Табела 2.9. Процент губитка затезне чврстоће споја у односу на затезну чврстоћу траке

Број носећих слојева траке	Губитак затезне чврстоће споја [%]
1	0,2
2	0,2 ¹⁾ 0,5 ²⁾
3	0,33
4	0,25
5	0,2
¹⁾ комбинација са ојачавајућим међуслојем 2-степним спојем	
²⁾ без ојачавајућег међуслоја	

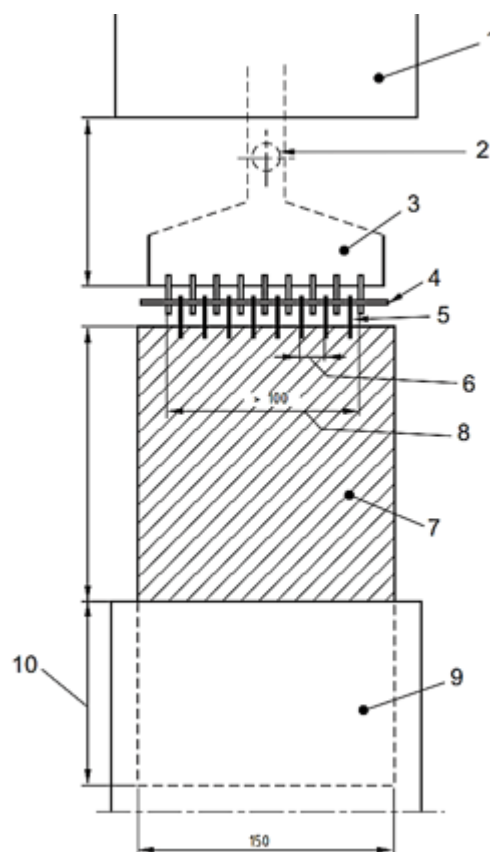
Да би резултати били валидни, неопходно је испитати три узорка и израчунати средњу вредност добијених резултата. Испитивање споја насталог вулканизацијом је дато на слици 2.50.



Слика 2.50. Испитивање споја насталог вулканизацијом

Приликом испитивања спојева насталих механичким путем, експеримент зависи од тога да ли се користи везна осовиница. У оба случаја се узорак истеже док не дође до отказа споја. Разлика је у томе што код испитивања веза које користе везну осовиницу (зглобни спој), потребно је испитати један крај траке са сегментом споја.

Доњи крај узорка се поставља у фиксну чељуст, док се горњи крај узорка, тј. место споја са осовиницом, поставља у горњу покретну чељуст, слика 2.51. На слици су са бројевима означени покретна чељуст (1), оса чељуст (2), додатак чељуст за прихват осовинице (3), везна осовиница (4), половина зглобне спојнице (5), корак зглобне спојнице (6), узорак (7), ширина споја (8), фиксна чељуст (9) и дужина узорка (10). Узорак мора бити минимално 100 mm дугачак плус дужина потребна да се узорак постави у чељуст, ширина споја треба да буде минимално 100 mm, а ширина узорка минимум 150 mm.



Слика 2.51. Испитна шема споја са везном осовиницом

Код испитивања узорка где се не користи осовиница (равне спојнице), користи се спој са оба краја траке. Један крај се поставља у фиксну чељуст, док се други крај поставља у покретну чељуст. Потребно је забележити вредност силе при којој долази до отказа споја. После тога се затезна чврстоћа споја изражава као количник силе [N] и ширине споја [mm]. Потребно је испитати три узорка и узети средњу вредност.

2.4.2 Преглед осталих стандарда

Што се тиче стандарда [6], неопходно је детаљније приказати његов садржај. У табели 2.10. су дате врсте транспортних трака са текстилним носећим слојевима.

Табела 2.10. Врсте транспортних трака

Бр. нос. слој.	Врсте транспортних трака (затезна чврстоћа траке/број носећих слојева траке - [N/mm])													
	1	200/1	250/1	315/1	400/1	500/1	630/1	800/1	1000/1	1250/1	1600/1	2000/1	2500/1	3150/1
2	200/2	250/2	315/2	400/2	500/2	630/2	800/2	1000/2	1250/2	1600/2	2000/2	2500/2	3150/2	
2+			315/3	400/3	500/3	630/4	800/4	1000/5	1250/5	1600/5	2000/5	2500/5	3150/5	

У табели 2.11. су дата издужења траке током дејства стандардног оптерећења током радног века. Дате вредности важе за траке чији су носећи слојеви израђени од полиестера.

Табела 2.11. Издужење траке током дејства стандардног оптерећења

Затезна чврстоћа траке [N/mm]	Издужење током дејства стандардног оптерећења током радног века [%]
200÷500	1,5
630÷1250	2,5
1600÷3150	3
Стандардно оптерећење је 10% од минималног оптерећења при кидању траке.	

Гумени заштитни слојеви се означавају словним ознакама у зависности од њихових карактеристика. У табели 2.12. су приказане словне ознаке и њихова значења. Може се ставити више ознака у зависности од карактеристика траке.

Табела 2.12. Словне ознаке гумених заштитних слојева

Словне ознаке	Карактеристике
W, X, Y, Z	Стандардни гумени заштитни слојеви
E	Антистатички слојеви
K	Антистатички и ватроотпорни слојеви
S	Антистатички и ватроотпорни слојеви
T	Отпорност на високе температуре
R	Отпорност на ниске температуре
G	Отпорност на уља и масти
A	Прехрамбена индустрија
C	Хемијска индустрија
Vt	За надземну употребу у противпожарној индустрији
V	За подземну употребу у противпожарној индустрији

Карактеристике стандардних гумених заштитних слојева су дати у табели 2.13.

Табела 2.13. Карактеристике стандардних гумених заштитних слојева

Врста гуменог слоја	Затезна чврстоћа [N/mm ²]	Издужење при отказу [%]	Абразивно трошење [mm ³]
W	18	400	90
X	25	450	120
Y	20	400	150
Z	15	350	250

У зависности од материјала носећих слојева, траке се означавају према ознакама приказаним у табели 2.14.

Табела 2.14. Ознаке материјала носећих слојева

Ознака материјала	Материјал носећег слоја
B	Памук
Z	Вискоза
R	Вештачка свила
P	Полиамид (најлон)
E	Полиестер
D	Арамид
G	Стакло

Када се користе различити материјали за носеће слојеве у уздужном и попречном правцу, наводе се ознаке за оба материјала. Прва ознака је за материјал носећих слојева у уздужном правцу, а друга за носеће слојеве у попречном правцу. Такође, ако су носећи слојеви у једном од праваца израђени од више материјала у ознаци се наводе оба материјала раздвојена знаком /, а на прво место се ставља ознака материјала који има већу затезну чврстоћу.

Означавање траке се врши на гуменом заштитном слоју траке. Ознака се састоји од следећих чланова:

- ознака произвођача;
- стандард према којем је трака израђена;
- ширина траке [mm];
- материјал носећих слојева;
- затезна чврстоћа траке [N/mm];
- број носећих слојева;
- дебелина заштитних гумених слојева (радна страна/повратна страна);
- ознака гуменог заштитног слоја;
- специјална карактеристика гуменог заштитног слоја;
- идентификациони број траке.

Што се тиче попречне флексибилности траке, она се испитује на основу [20]. Представља се количником f/B где је f [mm] угиб траке, а B [mm] ширина траке. Минимална вредности овог параметра је дата у табели 2.15.

Табела 2.15. Попречна флексибилност траке

Угао бочних ослоних ваљака [°]	f/B_{MIN}
20	0,08
25	0,10
30	0,12
35	0,14
40	0,16
45	0,18
50	0,20
55	0,23
60	0,23

На крају, даће се табеларни приказ стандарда који се тичу транспортних трака са текстилним носећим слојевима који до сада нису поменути из разлога што нису у директној вези са темом дисертације.

Табела 2.16. Преглед стандарда

Ознака стандарда	Назив	Сиже	Ознака лит.
EN ISO 14890:2003	Транспортне траке – Карактеристике текстилних транспортних трака за општу примену, са гуменом или са пластичном облогом	Утврђују се захтеви за текстилне транспортне траке са гуменом или пластичном облогом, за општу површинску примену на равним или коритасто постављеним ваљцима.	[21]
EN ISO 15147:1999	Лаке транспортне траке - Толеранције ширине и дужине сечених лаких транспортних трака	Утврђују се методе мерења ширина и дужина сечених лаких транспортних трака, како је описано у EN 873 и утврђује толеранције димензија.	[22]
EN ISO 16851:2004	Текстилне транспортне траке – Одређивање нето дужине бескрајне (спојене) транспортне траке	Утврђују се методе одређивања нето дужине бескрајне (спојене) транспортне траке. Он се односи на све типове конструкције транспортне траке, сем трака са челичном ужади као ојачањем. Он није погодан, нити валидан за лаке транспортне траке описане у EN 873.	[23]
EN ISO 21178:2006	Лаке транспортне траке – Одређивање електричних отпорности	Утврђују се методе испитивања при одређивању електричних отпорности лаких транспортних трака према ISO 21183-1. Отпорности су површинска отпорност, запреминска отпорност у правцу нормалном на раван траке,	[24]

		као и уздужна и попречна запреминска отпорност у правцима паралелним равни траке.	
EN ISO 21179:2006	Лаке транспортне траке – Одређивање електростатичког поља, изазваног кретањем лаке транспортне траке	Утврђују се методе испитивања при одређивању електростатичког поља изазваног кретањем лаке транспортне траке у складу са ISO 21183-1.	[25]
EN ISO 21180:2006	Лаке транспортне траке – Одређивање највеће затезне чврстоће	Утврђују се методе испитивања при одређивању највеће затезне чврстоће лаких транспортних трака у складу са ISO 21183-1, или других транспортних трака на које ISO 283 није применљив.	[26]
EN ISO 21181:2006	Лаке транспортне траке - Одређивање модула еластичности у неоптерећеном стању	Утврђују се методе испитивања при одређивању модула еластичности у неоптерећеном стању лаких транспортних трака у складу са ISO 21183-1, или других транспортних трака на које ISO 9856 није применљив.	[27]
EN ISO 21182:2006	Лаке транспортне траке - Одређивање коефицијента трења	Утврђују се методе испитивања при одређивању динамичког и статичког коефицијента трења лаких транспортних трака.	[28]
EN ISO 21183-1:2006	Лаке транспортне траке - Део 1: Главне карактеристике и примена	Описују се главне карактеристике и примена лаких транспортних трака.	[29]
EN ISO 21183-2:2006	Транспортне траке - Карактеристике текстилних транспортних трака за општу примену, са гуменом или са пластичном облогом, за примену у јамским рудницима	Утврђују се захтеви за текстилне транспортне траке за општу примену, са гуменом или са пластичном облогом, за примену у јамским рудницима, на равним или коритасто постављеним ваљцима.	[30]
EN ISO 284:2003	Транспортне траке – Електрична проводљивост – Карактеристике и поступак испитивања	Утврђује се највећа електрична отпорност транспортне траке и одговарајућа метода испитивања.	[31]
EN ISO 340:2004	Транспортне траке – Карактеристике запаљивости на лабораторијском узорку – Захтеви и метода испитивања	Утврђују се методе одређивања, на лабораторијском узорку (епрувети), реакције транспортне траке на извор запаљења.	[32]
EN ISO 505:1999	Транспортне траке - Метода одређивања отпорности на напредовање цепања текстилних транспортних трака	Утврђују се методе испитивања при мерењу отпорности на напредовање иницијалног цепања текстилних транспортних трака, укупне дебљине, или само текстилног носећег слоја.	[33]
EN ISO 583:2007	Транспортне траке са текстилним носећим слојем – Укупна дебљина траке и дебљина саставних елемената – Поступци испитивања	Утврђују се методе испитивања при одређивању укупне дебљине траке и дебљине саставних делова транспортних трака са текстилним носећим слојем.	[34]

2.5 Актуелно стање у области

У овом поглављу је приказан преглед актуелног стања у области транспортних трака. Анализирано је укупно 56 радова. Анализирани радови су сврстани у две главне области – одржавање и испитивање трака.

Што се тиче одржавања трака, анализирано је 24 рада које се могу сврстати у 3 категорије, слика 2.52. – 9 радова у вези са визуелном детекцијом подеротина траке, 8 радова у вези са класификационим моделима оштећења траке и 7 радова у вези са утицајним факторима на животни век траке.

Што се тиче испитивања траке, анализирана су 32 рада који се могу сврстати у 5 категорија, слика 2.53. – 3 рада у вези са старењем узорака трака, 2 рада у вези са прелазном секцијом равна-олучаста трака и савијањем траке око бубња, 13 радова у вези са спојевима крајева трака, 1 рад у вези са закрпама трака и 13 радова у вези са аксијалним испитивањем узорака трака.

Већина радова је из часописа са импакт фактором и представљају најновија истраживања у претходних десетак година.



Слика 2.52. Анализирани радови из области одржавања траке



Слика 2.53. Анализирани радови из области испитивања траке

2.5.1 Одржавање траке

Визуелна детекција подеротина трака

У раду [35] је предложен нови метод за рано откриће подужне пукотине транспортне траке. У питању је инфрацрвено посматрање траке путем камере. Прво се врши филтрација слике, затим се утврђује област на којој се налази највећи број оштећења и врши се описивање слике бинарним кодом. Систем даје сигнал за постојање опасности од појаве подужне пукотине траке уколико се препозна постојање спојеног низа оштећења траке. Метод је експериментално испитан и утврђена је ефикасност од 99,19%.

У раду [36] је указано на проблем око визуелног откривања подужне пукотине траке. Пошто је осветљење траке променљива категорија и мења се током експлоатације, традиционални методи за откривање подужне пукотине директно зависе од квалитета осветљења. Због тога се предлаже увођење новог алгоритма који поспешује откривање оштећења у условима смањеног осветљења. Експериментално је потврђена ефикасност од 97% поредећи детекцију оштећења у условима доброг и лошег осветљења.

У раду [37] је описан систем за аудио-визуелно откривање оштећења траке. Систем комбинује визуелно посматрање траке са снимањем звукова који настају током кретања траке. Анализирано је кретање траке без и са оштећењем и прикупљени су визуелни и звучни подаци који су потом класификовани алгоритмом машинског учења. Експериментално је потврђена ефикасност система приликом откривања подужног цепања траке од 96,23%.

У раду [38] је указано на важност правовременог откривања оштећења траке. Истакнуто је да већина постојећих метода за визуелно откривање оштећења има могућност откривања само једног типа оштећења, а могуће је да се на једној слици појаве оштећења у облику огреботина, подеротина и сл. Због тога се предлаже увођење паметног векторског система визуелног откривања оштећења које је способно да детектује више типова оштећења. Систем је тестиран кроз две ситуације – идеални и влажни услови приликом рада траке. Постигнута је ефикасност препознавања оштећења од 100% у идеалним условима и 99,11% у влажним условима.

У раду [39] је приказан другачији начин посматрања развоја подужних пукотина праћењем поља инфрацрвене радијације траке путем инфрацрвених термичких видео технологија. Кроз фреквентну анализу сигнала се уводи коефицијент који је директно пропорционалан стању траке. Утврђен је распон вредности коефицијента за који је трака безбедна за употребу, као и граница преко које трака престаје бити безбедна за употребу јер је настала подужна пукотина.

У раду [40] је предложен мултиспектрални визуелни метод за откривање подужних пукотина и других типова оштећења траке применом сензора који има способност препознавања различитих таласних дужина инфрацрвених сигнала. Кроз анализу добијених слика, успостављен је алгоритам детекције оштећења

траке. За испитивање ефикасности алгоритма је направљена пробна платформа. Утврђена је ефикасност од 96,5% код откривања постојања подужних пукотина и укупна ефикасност откривања оштећења траке од 96,1%.

У раду [41] је приказан метод утврђивања заморног стања траке. Успостављена је веза између видљивих оштећења гумене облоге траке и преосталог радног века траке. Употребом машинске визије и алгоритма вештачке пчелиње колоније је успостављен систем визуелног праћења оштећења на гуменој облози траке и доношења одлука о стању траке. Систем је експериментално испитан показујући ефикасност од 95%.

У раду [42] је указано како је од круцијалне важности по поузданост транспортера континуално пратити стање елемената транспортера. Описана је примена аутономног робота за прикупљање видео материјала о стању транспортера у подземним рудницима, слика 2.54. Затим су разрађени алгоритми за уочавање оштећења ивице траке, померања траке услед неравномерног материјала на траци и процену оптерећења транспортера на основу добијених визуелних података. Основни алгоритам који је коришћен јесте *Canny Edge Detection*.



Слика 2.54. Аутономни робот ANYmal [42]

Закључено је да будућност одржавања и праћења стања траке лежи у примени аутономних робота због тога што се на тај начин избегава присуство човека у опасном окружењу попут подземног рудника.

У раду [43] је приказан процес развоја интелигентног система за аутоматско тестирање и континуалну дијагностику трака. Представљени систем се састоји из пет модула.

Први модул се односи на концепт машинске визије чија је улога визуелно праћење стања траке са текстилним носећим слојевима и идентификација насталих оштећења. Други модул се односи на праћење стања трака са челичним ужадима као носећим слојевима путем магнетне дијагностике. Трећи модул је задужен да обрађује информације добијене од првог модула и да обавештава кориснике о проблемима који су идентификовани. Четврти модул, на основу информација добијених од првог модула, користи еволуциони генетички алгоритам који је у могућности да претпостави даљи развој детектованих оштећења. Последњи, пети модул, на основу детектованих оштећења и њиховог претпостављеног развоја, даје степен сигурности траке, тј. праужа увид у преосталу носивост траке. Наведено је да просечна цена по дужном метру трака коришћених у надземној експлоатацији угља ширине до 2400 mm износи од 250 до 300 EUR. Значај овог система се огледа у томе што спречава велика оштећења траке која би изискивала промену дела или целе траке уз велике трошкове.

Класификациони модели оштећења трака

У раду [44] је испитивана веза између појаве оштећења на траци са врстом материјала који се утовара на њу и висине са које се утовара. Испитивани су узорци нових и коришћених трака. Током испитивања су направљена четири класификациона модела применом метода машинског учења попут регресионе анализе, логистичке регресије, стабла одлучивања и Наив Бајеове класификације. Најбоље резултате су показале методе стабла одлучивања и Наив Бајеове класификације. Донет је закључак да није потребно мењати траку када оштећење настане, већ је боље извршити репарацију оштећеног дела.

У раду [45] је извршена класификација оштећења траке употребом два модела – стабла одлучивања и регресионе анализе. Током експеримента су мењане три варијабле – тип носећег слоја траке, висина утовара материјала и врста материјала који се утовара. Показана је нешто нижа поузданост препознавања оштећења од 81,5% тако што је класификовано 13 од 16 оштећења на узорцима.

У раду [46] је примењен логистички регресиони метод за класификацију оштећења траке. Испитиване су три врсте узорака трака – узорци нових, коришћених и репарираних трака. Дошло се до резултата да највећу отпорност на оштећење услед удара материјала имају репариране траке, затим коришћене и на крају нове траке. Претпостављено је да је узрок томе повећање тврдоће гуменог заштитног слоја траке током експлоатације.

У раду [47] је приказана примена неуронских мрежа за класификацију оштећења траке. Примењена је двослојна неуронска мрежа кроз Матлаб програмски језик са применом сета алата за дубоко учење. Указана је важност неинвазивне методе детекције оштећења траке која би омогућила уживо праћење стања траке. Приказана је ефикасност система од 80%.

У раду [48] је приказан побољшани модел детекције оштећења траке транспортера помоћу машинске визије. Коришћен је унапређени *Yolov3* алгоритам који је омогућио истовремену детекцију више оштећења. Оштећења траке су сврстана у четири категорије – површинско хабање, површинска оштећења, отказ траке и подужне пукотине. Систем машинске визије и дубоког учења који је приказан у раду даје степен оштећења поред тога што детектује оштећење. Систем је експериментално испитан и показао је ефикасност од 97% приликом уочавања оштећења траке.

У раду [49] је испитана могућност употребе технологије виртуелне реалности код одржавања трака. Помоћу индустријске метротомографије снимљен је узорак оштећене траке. Затим су подаци у формату *dicom* пребачени у софтвер Матлаб где је формиран 3Д модел. 3Д модел је омогућио задирање у унутрашњост узорка без уништавања истог. На тај начин је омогућено праћење стања траке и утврђивање степена оштећења без узорка. Закључено је да примена виртуелне реалности у области одржавања транспортних трака има велике могућности и да треба наставити истраживања у том правцу.

У раду [50] је истражена могућности примене лаке конволуционалне неуронске мреже за откривање оштећења на траци транспортера. Интеграцијом *MobilNeta* и *Yolov4* мреже, створен је систем на основу испитане колекције слика оштећења на 3000 комада. Постигнута је брзина обраде слика од 70,26 FPS и степен ефикасности откривања оштећења од 93,22%. Истакнута је важност добрих радних услова попут адекватне осветљености и непостојања прашине приликом прикупљања слика оштећења.

У раду [51] је истакнута важност правовременог и тачног откривања подужне пукотине траке у циљу правилне експлоатације и постизања максималне ефикасности транспортног тока. Наведено је како постојећи методи за откривање оштећења често дају лажна упозорења индукована ситним оштећењима на површини траке. Због тога се предлаже метода идентификације подужних пукотина путем 3Д *point cloud processing*. Систем је експериментално испитан и доказана је ефикасност од 99,2%, тј. само 0,8% су били аларми услед ситнијих оштећења. Такође, постигнута је велика брзина обраде слика од 0,01-0,04 ms.

Утицајни фактори на животни век траке

У раду [52] је истакнуто да је трака композитна структура која се састоји од различитог броја полимерних слојева, текстилних слојева и додатних елемената. Главни узроци пропадања траке јесу контакт између траке и транспортованог материјала, као и између траке и ослоних елемената транспортера. Оштећења траке се јављају услед комбинације различитих фактора – утицаји сунца, кише, снега и леда, хемијских реагенса, као и механичких дејстава. Због тога је тешко дефинисати који је тачан узрок оштећења траке.

Дата је класификација најчешћих оштећења траке и назначено је колико су та оштећења опасна, табела 2.17.

Табела 2.17. Класификација најчешћих оштећења траке [52]

Типови оштећења			Опасност оштећења			Могућност утицаја на мех. настанка оштећења	
			Велика	Средња	Ниска	Да	Не
Оштећења траке	Механичка	Хабање гум. зашт. слојева			+	+	
		Подужне пук. кроз дуб. тр.	+				+
		Подужне пук. гум. слој.		+		+	
		Оштећења ивице траке		+		+	
		Промене унутр. струк. тр.	+				+
	Физичка и хем.	Старење услед кисеоника		+			+
		Термичка оксидација	+			+	
		Смањење термичке отп.	+				+
		Промена тврд. гум. слој.		+			+
		Промена модула еласт. тр.	+				+

У табели 2.18. су приказана места на транспортеру где најчешће настају механичка оштећења.

Табела 2.18. Места најчешћих оштећења траке [52]

Место оштећења	Хабање гум. слој.	Подужне пук. кроз дубину тр.	Подужне пук. гум. слојева	Оштећења ивице траке	Промене унутр. струк. тр.
Утоварни бункер	+	+	+	+	+
Преост. део трансп.	+				+
Истоварно место	+		+	+	+

У табели 2.19. су приказани узроци механичких оштећења траке.

Табела 2.19. Узроци механичких оштећења траке [52]

Хабање гум. слојева	Подужне пукотине кроз дубину траке	Подужне пукотине гумених слојева	Оштећења ивице траке	Промене унутр. струк. тр.
транспортовани материјал	висина утовара	транспортовани материјал	одржавање	радни услови
материјал заштитног слоја	конструкција траке и бункера	материјал заштитног слоја	конструкција траке	конструкција траке
радни услови	гранул. састав материјала	радни услови	транспортна путања	карактеристике материјала
одржавање	радни услови		радни услови	

У табели 2.20. су приказани утицаји радних услова на параметре траке.

Табела 2.20. Утицаји радних услова на параметре траке [52]

Пар. траке	Радни услови						
	Брзина	Температура	Енергија	Капацитет	Откази	Затезање	Погон
Материјал			+	+	+	+	+
Модул еласт.	+	+	+		+	+	+
Величина	+			+	+	+	
Тежина	+		+		+	+	+
Конструкција			+		+		

Затим је методом коначних елемената симулирано понашање траке услед промене модула еластичности у подужном правцу траке у распону од 382 МПа до 427 МПа. Добијени су резултати да повећањем модула еластичности траке расте притисак траке на ослоне ваљке. Такође, добијени су резултати да са повећањем модула еластичности расте деформација траке.

Даље је истом методом симулирано понашање траке услед промена модула еластичности у попречном правцу траке у распону од 4,9 МПа до 8,4 МПа. Добијени су резултати да са порастом модула еластичности опада притисак на ослоне ваљке.

Закључено је да модул еластичности има велики утицај на животни век траке што значи да избор различитог материјала носећег слоја траке има велики утицај на животни век траке.

У раду [53] су анализирани узроци отказа транспортера са траком са аспекта одржавања. За траке је истакнуто да на њих утичу неисправни делови транспортера на које се она ослања – ослони ваљци и бубњеви. Због тога што се трака на лице места испоручује у ролнама дугачким до 400 m, проблем представља механизација која је неопходна да се похабане траке замене новим.

У раду [54] су испитивани механизми хабања гуменог заштитног слоја траке и анализирани су утицајни фактори који утичу на хабање. Утврђено је да су абразија и замор основни узроци хабања гуменог заштитног слоја. Абразија настаје услед трења између траке и ослоних ваљака/бубњева и траке и материјала. Микрорезови настају приликом контакта неравнина са траком и током времена се ти резови укрупњавају и долази до отпадања делића гуме са траке чиме настају пукотине. Замор настаје услед цикличне деформације траке која доводи до стварања малих пукотина испод површине гуменог слоја. Временом се те мале пукотине шире и спајају са околним пукотинама чиме стварају веће пукотине које постају видљиве споља. На крају је закључено да на хабање траке највише утичу оптерећење услед транспорта материјала, дужина транспорта и брзина траке.

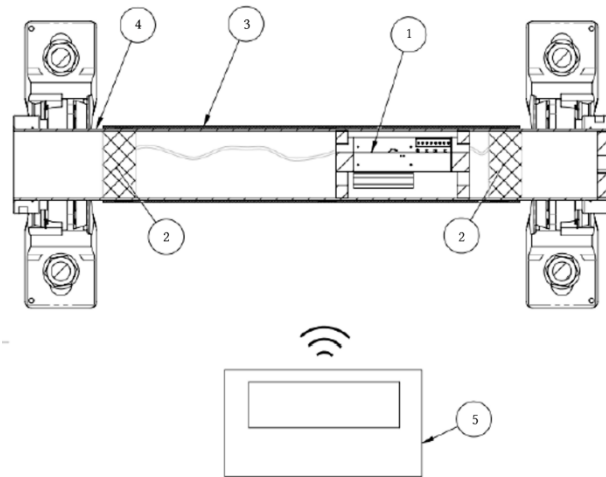
У раду [55] су употребом вишеструке линеарне регресије добијени модели за предвиђање животног века траке на основу концепта транспортера и операционих параметара. На почетку је речено како предвиђање радног века траке на основу праћења дебљине траке није адекватно због тога што се тиме не узима у обзир време експлоатације транспортера, дебљина се не мења константно дуж траке и свака трака показује различите резултате тако да није могуће добити уопштени модел. Затим је објашњено да су операциони параметри за моделе добијени на основу дужине траке, брзине транспорта, висине утовара материјала на траку, угла нагиба бочних ослоних ваљака, времена експлоатације, типа транспортованог материјала, улоге транспортера, праћења стања дебљине траке, називних карактеристика траке и ширине траке. На крају је истакнуто да је потребно детаљније испитати међусобни утицај операционих параметара како би се њихов број свео на минимум.

У раду [56] је наведено како се 66-80% свих оштећења траке деси на месту утовара. Приказано је постројење за лабораторијско испитивање ефеката удара материјала у траку. Узорак се првобитно затегне на 10% затезне чврстоће и онда се пусти актуатор у облику чекића да слободно падне и уради у траку. Током испитивања се прати затезна сила и сила ударца. Резултати експеримента су анализирани основном статистичком методом и регресионом анализом. Испитиван је утицај масе чекића и висине слободног пада на затезну силу и силу удара. Утврђено је да оба параметра имају знатан утицај на посматране силе.

У раду [57] је наведено како не постоје стандардизовани тестови за испитивање удара материјала у траку. Истакнуто је да су најчешћи облици манифестације оштећења услед наведене појаве подужне пукотине, покидана трака, оштећене ивице и истањен гумени заштитни слој, оштећен гумени слој на бубњу уколико постоји, просечена трака и загревање траке услед смањења дебљине заштитног гуменог слоја. Описана су лабораторијска постројења за испитивање узорака трака кроз нестандардизоване тестове.

У раду [58] је приказан нови метод за континуално праћење силе у траци применом мерних трака постављених директно на ослоне ваљке транспортера. Концепт решења је приказан на слици 2.55.

Трака (3) је ослоњена на ваљак (4) и притиска ваљак одређеном силом. Мерне траке (2) на површини ваљка трпе наведену силу. У унутрашњости ваљка се налази аквизициони уређај (1) који бежично комуницира са компјутером (5). Конкретно решење је примењено на дозатору.



Слика 2.55. Концепт мерног система за континуално праћење силе у траци [58]

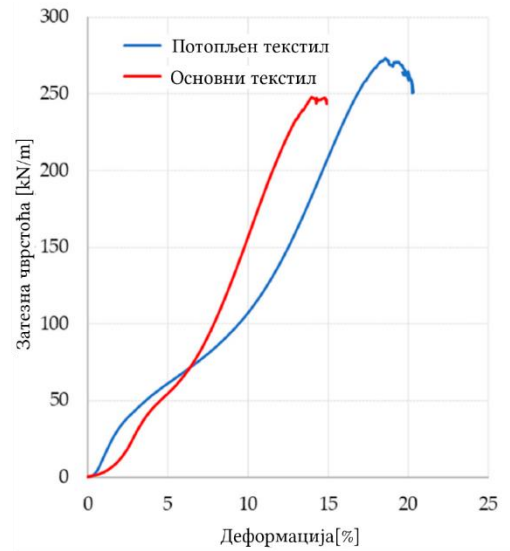
2.5.2 Испитивање траке

Старење узорака траке

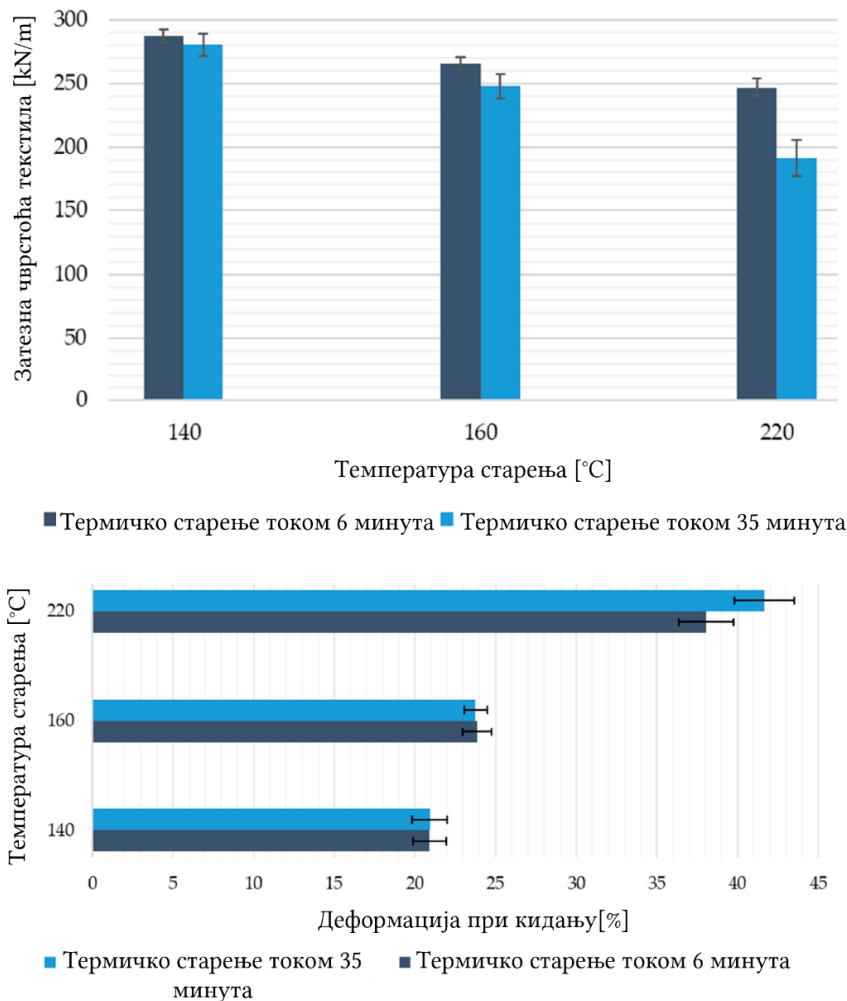
У раду [59] је испитано старење узорака траке у условима повећане влажности ваздуха и температуре, као и потапањем узорака у водене растворе. Мерена је количина апсорбоване количине влаге за узорак траке, гумени заштитни слој и носећи текстилни слој. Коришћени су математички модели попут једноставног *Flickian*, затим секвентно дуалног *Flickian* и дифузно-релаксационог модела који се показао као најбољи при описивању понашања текстилног носећег слоја. Узорак траке је имао нити основе од полиестер влакана, док су нити потке биле од полиамидних влакана. Показано је да је већу количину влаге упио материјал од полиестера те да је он подложнији негативном утицају влаге.

У раду [60] је приказано испитивање утицаја параметара топле вулканизације на затезну чврстоћу траке. Прво је испитиван утицај потапања текстилног слоја у раствор *RFL* (*resorcinol-formaldehyd-latex*) на затезну чврстоћу и деформацију текстилног слоја. Утврђено је да потапање доводи до повећања затезне чврстоће и деформације текстила у правцу основе за 11,41% и 30,51%. Примећена је разлика у нагибу криве напон-деформације што указује да потапање утиче и на модул еластичности текстила, слика 2.56.

Затим су појединачни текстилни слојеви изложени термичком старењу на температурама од 140° C, 160° C, 220° C током 6 и 35 минута. Резултати су показали да пораст температуре старења доводи до смањења затезне чврстоће. Такође, пораст времена старења доводи до смањења затезне чврстоће. Што се тиче деформације при кидању узорка, повећање температуре утиче на повећање деформације при кидању узорка. Резултати ових мерења су приказани на слици 2.57. Следеће је испитиван утицај параметара процеса вулканизације на затезну чврстоћу и деформацију текстилног носећег слоја. Коришћене су три температуре од 140° C, 160° C, 220° C током 6 и 35 минута.

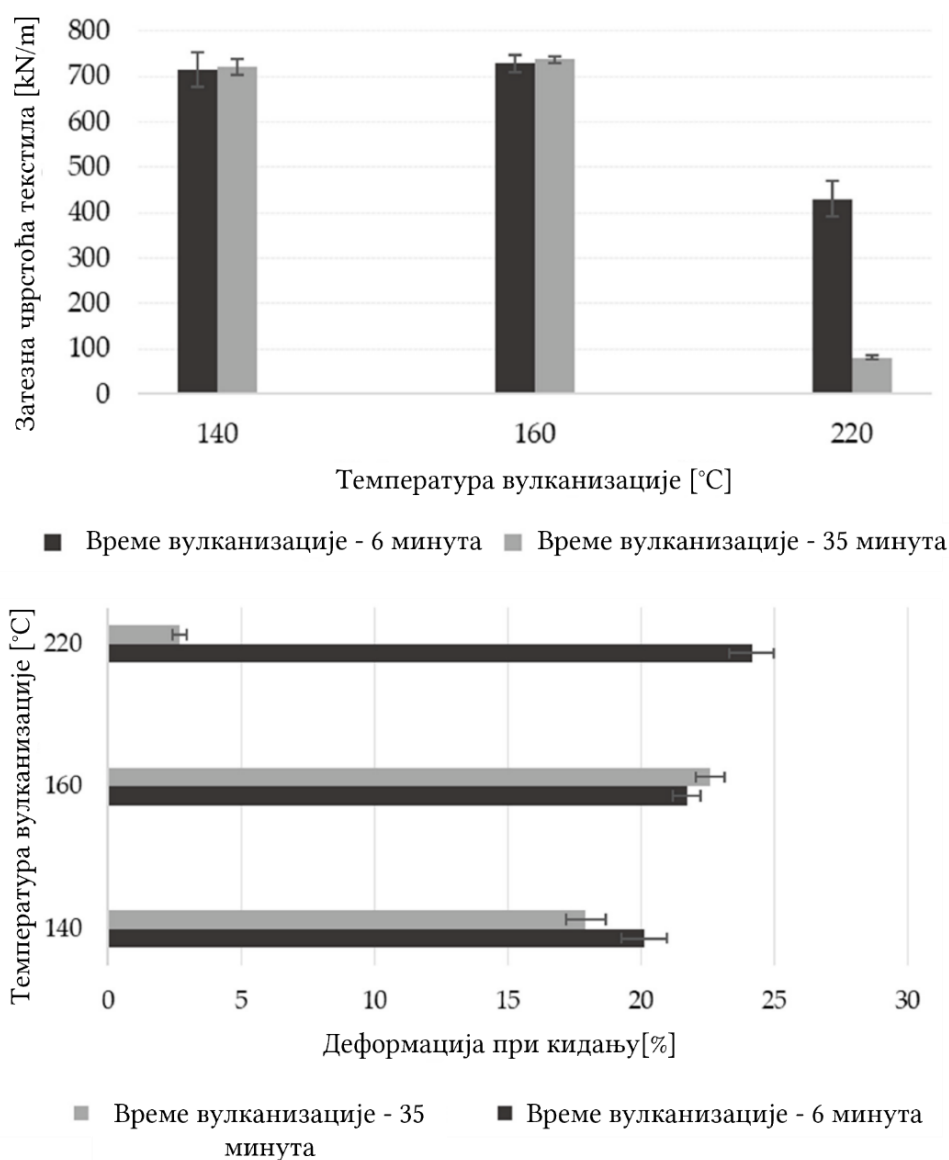


Слика 2.56. Крива напон-деформација потопљеног и основног текстилног слоја [60]



Слика 2.57. Утицаји термичког старења на затезну чврстоћу и деформацију појединачног текстилног слоја [60]

Доказано је да вулканизација на високим температурама доводи до смањења затезне чврстоће носећег слоја без обзира на дужину трајања процеса. Критичан моменат је достигање температуре кристализације полиестер и полиамидних влакана – изнад те температуре носивост материјала је деградирана. Што се тиче деформације, доказано је да повећање температуре вулканизације доводи до повећања деформације при кидању узорка. Резултати ових мерења су приказани на слици 2.58.



Слика 2.58. Утицаји термичког старења на затезну чврстоћу и деформацију појединачног текстилног слоја [60]

У раду [61] је приказано испитивање узорака транспортних трака који су били подвргнути старењу у климатској комори и термичкој шок комори. Узорци су били димензија 150x25 mm, 2 носећа слоја, укупне дебљине 23 mm. У климатској комори су узорци били подвргнути старењу кроз шест комбинација параметара, табела 2.21.

Табела 2.21. Комбинација параметара старења у климатској комори [61]

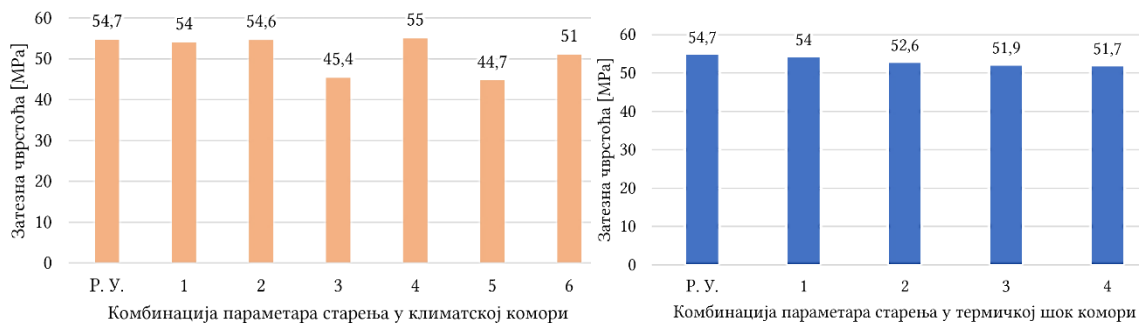
Ком. параметара	Температура [°C]	Релативна влажност [%]	Време старења
1	-30	20	2 недеље
2	-20	20	
3	+10	80	
4	+30	80	
5	+80	80	
6	+30	50	

У термичкој шок комори су узорци били подвргнути старењу кроз четири комбинације параметара, табела 2.22.

Табела 2.22. Комбинација параметара старења у термичкој шок комори [61]

Ком. параметара	Температура [°C]	Број циклуса
1	-20 ÷ +60	600
2	-20 ÷ +60	1200
3	-20 ÷ +60	1800
4	-20 ÷ +60 / -40 ÷ +60	1800 / 500

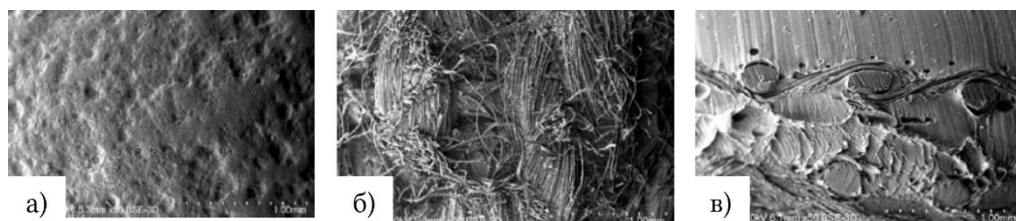
Узорци су после старења, а пре испитивања, изложени атмосферским условима. Ради упоређивања, испитани су и референтни узорци (Р. У.) који нису били изложени старењу. Сви узорци су затезани до момента кидања. Резултати су приказани на слици 2.59.



Слика 2.59. Резултати испитивања узорака после процеса старења [61]

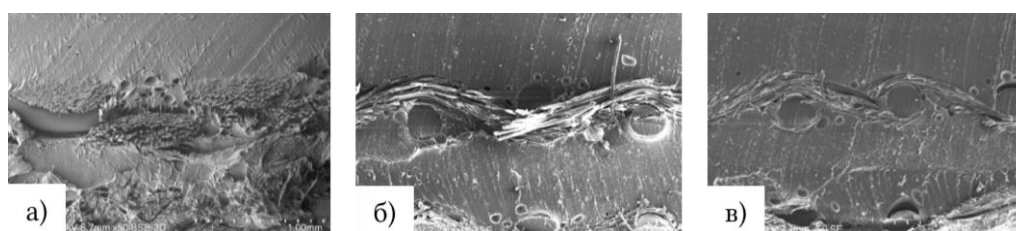
Што се тиче старења у климатској комори, утврђено је да температуре ниже од 0° С немају негативан утицај на затезну чврстоћу, док високе температуре од 80° С имају негативан утицај на затезну чврстоћу. Што се тиче старења у термичкој шок комори, није утврђена никаква узрочно-последична веза.

Такође, урађена је визуелна анализа узорака на месту кидања методом SEM. На слици 2.60. су приказане слике референтног узорка.



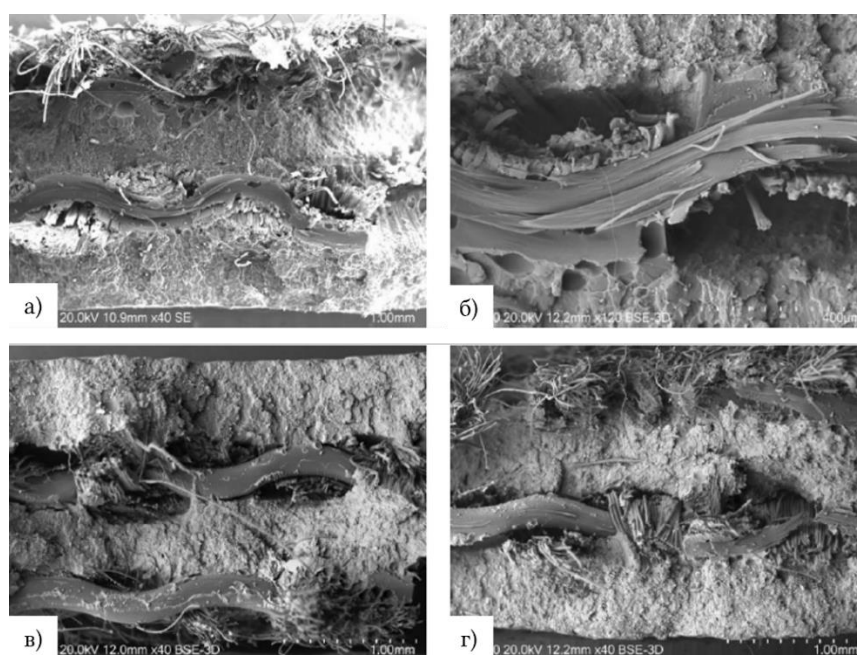
Слика 2.60. Горњи гумени слој а), доњи слој од тканине б), попречни пресек траке в) [61]

На слици 2.61. су приказане слике попречних пресека узорака претходно остарелих у климатској комори. Може се приметити да је у случају б) дошло до оштећења тканине у правцу потке.



Слика 2.61. Узорак климатски остарен комбинацијом параметара 1 а), комбинацијом параметара 4 б), комбинацијом параметара 5 в) [61]

На слици 2.62. су приказане слике попречних пресека узорака претходно остарелих у термичкој шок комори.



Слика 2.62. Узорак термички остарен комбинацијом параметара 1 а), комбинацијом параметара 2 б), комбинацијом параметара 3 в), комбинацијом параметара 4 г) [61]

На слици се може видети да долази до већег степена оштећења влакана при термичком старењу у односу на климатско. Приметно је како са порастом броја циклуса долази до већих оштећења влакана, али и дезинтеграције гумених међуслојева.

Прелазна секција равна-олучаста трака, савијање око бубња

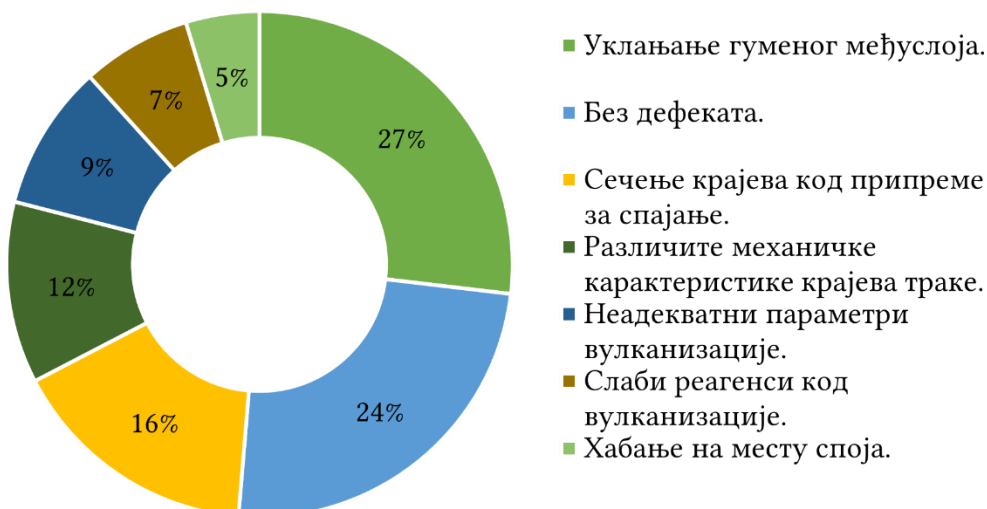
У раду [62] је истакнуто да је могуће да се прекид траке деси на непрекидном делу током експлоатације, тј. не на месту споја крајева траке. Наведено је да место преласка из равног у олучасту облик траке представља критично место. Развијен је универзални теоријски модел који описује силе које се јављају на том прелазном месту и утичу на траку. Такође, представљени су резултати који указују да затезна чврстоћа траке опада са порастом ширине.

У раду [63] је приказано испитивање методом коначних елемената прелазне секције траке са бубња на ослоне ваљке где трака мења облик уз равног у олучасту. Материјал траке је дефинисан као еластични ламинарни материјал (композит) са густином од 1099 kg/m^3 , Поасоновим бројем 0,499, модулом еластичности смицања 2,9 МПа, Јунговим модулом еластичности у попречном правцу од 5,4 МПа и у подужном правцу од 397 МПа. Испитивана је трака без материјала на њој. Највећи напони су се јавили на ваљчаном слогу који је најближи бубњу и то на бочним ваљцима.

Спојеви крајева трака

У раду [64] је приказан математички модел прорачуна преноса оптерећења на месту спојева траке. Наведени су разлози који доводе до губитка носивости споја – метода остваривања споја, избор материјала за спајање, геометријска припрема споја и најчешћи разлог јесте уклањање гуменог међуслоја између текстилних носећих слојева приликом припрема крајева за спајање, слика 2.63.

Током тог процеса, због неопходне брзине да се спој направи, оператери не воде довољно рачуна и грубо уклањају гумени међуслој. Тада долази до оштећења текстилних носећих слојева који потом узрокују губитак носивости споја. Током експерименталних испитивања спојева, утврђено је да траке исте ознаке, али од различитих произвођача, имају различите носивости на месту споја што је приписано различитим методама производње и спајања траке.



Слика 2.63. Процентни удео разлога који доводе до смањења носивости споја крајева траке [64]

Такође, истакнуто је да веза између издужења узорака и нанетог оптерећења није линеарна. Да би се веза могла посматрати као линеарна, потребно је дефинисати модул еластичности носећих слојева за различите амплитуде оптерећења и различита минимална оптерећења што је приказано у табели 2.23. Испитани су узорци EP трака од три произвођача исте називне затезне чврстоће од 2000 kN/m. Узорци су се разликовали по врсти материјала носећег слоја (P или EP).

Табела 2.23. Вредности подужног модула еластичности за носеће слојеве траке при различитим амплитудама оптерећења [64]

Амплитуда оптерећења [kN]	Процент затезне чврстоће [%]	Подужни мод. еласт. нос. слоја тр. E_P [kN/m]·10 ³		
		Узорак 1	Узорак 2	Узорак 3
2-4	10-20	2,6	0,8	1,1
4-6	20-10	2,0	0,8	1,0
6-8	30-40	1,1	1,1	1,5
8-10	40-50	1,3	1,3	1,8
10-12	50-60	1,8	1,6	1,9
12-14	60-70	2,2	1,7	2,7
14-16	70-80	2,4	1,9	2,6
16-18	80-90	3,0	2,2	2,5
18-20	90-100	3,7	2,1	3,0
10-20	50-100	2,7	1,9	2,3
14-20	70-100	2,8	2,0	2,3

У раду [65] су систематски разврстана оштећења траке која се јављају током експлоатације. Класификација оштећења је приказана у табели 2.24.

Табела 2.24. Класификација оштећења траке [65]

Врста оштећења траке	Приликом утовара	Током транспорта	Услед замора
Карактер оштећења	Оштећења су брза и насумичног карактера услед удара комада материјала.	Оштећења су пропорционална дужини трансп. и имају кумулативни карактер.	Оштећења су пропорционална броју циклуса транспортера.
Узрок оштећења	Удар материјала на траку. Проклизавање материјала при убрзавању.	Трење траке о ослоне ваљке, бубњеве, чистаче, вођице итд. Трење између транспортованог материјала и траке.	Савијање траке око бубњева и ослоних ваљака. Континуална промена сила у траци у синусоидној форми.
Испољавање оштећења	Велики број подеротина и оштећења гумених слојева, ивица траке, носећих слојева, као и абразија гумених слојева услед проклизавања мат.	Оштећења гумених слојева, деформација и издужење траке, оштећења ивица траке итд.	Смањење носивости траке током радног века.

Дато је запажање да је животни век траке директно пропорционалан дужини траке и броју спојева крајева траке која представљају слабу тачку због губитка носивости. Предмет истраживања су били транспортери са траком укупне дужине 50,4 km у руднику Рудна у Пољској у периоду од 2011. до 2016. године. Ови резултати су упоређивани са ранијим истраживањима у истом руднику током 1980-их и 2010-их. Анализиране су дужине појединачних секција трака транспортера – сваки транспортер има траку састављену од одређеног броја секција. Утврђено је да поузданост траке опада са повећањем броја секција и смањењем дужина секција. Аутори су представили законитост, тј. повезаност броја циклуса транспортера до појаве оштећења траке:

$$n_C(L_L) = \frac{A_T}{\sum_{p=1}^P A_p + L_L \cdot A_L} \Rightarrow n_C(L_L) = \frac{1}{\frac{\sum_{p=1}^P A_p}{A_T} + L_L \cdot \frac{A_L}{A_T}} \quad (2.22)$$

$$n_C(L_L) = \frac{T_T}{t_C} = \frac{T_T}{L_L/v} \quad (2.23)$$

$$\begin{aligned} T_T(L_L) &= n_C \cdot \frac{L_L}{v} = \frac{A_L \cdot L_L}{v \cdot \left(\sum_{p=1}^P A_p + L_L \cdot A_L \right)} = \frac{L_L}{v \cdot \frac{\sum_{p=1}^P A_p}{A_T} + v \cdot \frac{A_L}{A_T} \cdot L_L} = \\ &= \frac{L_L}{v \cdot a_p + v \cdot b_L \cdot L_L} = \frac{1}{v \cdot b_L + \frac{v \cdot a_p}{L_L}} \end{aligned} \quad (2.24)$$

где је:

- n_C - укупни број циклуса траке до момента оштећења или хабања траке;
- L_L [m] - укупна дужина траке, рачуна се као $L_L \approx 2 \cdot L_p$ где је L_p [m] дужина транспортера;
- A_T [J] - укупно утрошени рад до момента оштећења или хабања траке;
- A_p [J] - утрошени рад од стране одређеног локалног утицаја на оштећење или хабање траке за време једног циклуса траке;
- P - број локалног утицаја на оштећење или хабање траке;
- A_L [J/m] - јединица утрошеног рада линеарног утицаја на оштећење или хабање траке генерисаног за 1 m траке током једног циклуса;
- T_T [s] - укупно експлоатационо време до момента оштећења или хабања траке;
- t_C [s] - време трајања једног циклуса траке;
- v [m/s] - брзина траке;
- a_p, b_L - коефицијенти локалног и линеарног утицаја на оштећење или хабање траке.

Путем једначине (2.24) издржљивост траке је мерена бројем циклуса где је издржљивост изражена као функција дужине траке транспортера и коефицијената који изражавају удео локалних и линеарних оштећења. Једначина је затим коригована уносом вредности поменутих коефицијената:

$$T_T = (0,399027 + 1,47222 \cdot \ln(L_p))^2 \quad (2.25)$$

Даље је једначина (2.25) модификована употребом података само од секција трака које су замењене услед хабања и добијена је једначина:

$$T_T = \frac{1}{0,00689091 + \frac{1,8109}{L_p}} \quad (2.26)$$

која приближније и са ефикасношћу од 95% описује везу између укупне издржљивости траке и дужине транспортера. Битно је напоменути да се јединица величине T_T у коригованим једначинама са уврштеним коефицијентима изражава у месецима.

Током анализе података о животном веку траке који датирају из три поменута периода, утврђено је повећање просечног животног века траке са просечних 50 месеци током 1980-их на 120 месеци током 2010-их што даје добар увид у побољшање транспортне технике током година и повећање пажње ка одрживим принципима експлоатације.

У раду [66] је наведено да у унутрашњим токовима материјала транспортери са траком имају значајну улогу. Због тога је поузданост ових транспортера изузетно значајна и проблем представља отказ услед проблема са траком. Као највећи проблем се истиче пуцање траке које доводи до великог застоја у производњи. Пуцање траке се најчешће дешава на месту споја крајева траке јер спојеви имају мању затезну чврстоћу од остатка траке. Предлаже се увођење интелигентног система праћења стања траке и аутоматског контролног система који би био у стању да заустави рад транспортера при уочавању значајних оштећења. Систем би пратио издужење споја и давао би сигнал после достизања критичног издужења. Ознаке би се ставиле на месту споја и визуелни детектор би пратио растојање између ознака чиме би се пратило стање издужења.

У раду [67] су приказани резултати испитивања стања спојева крајева траке. Указано је на чињеницу да су траке често изложене преоптерећењу које је тешко предвидети и да та преоптерећења могу довести до пуцања траке које се најчешће дешава на месту споја јер спој има нижу затезну чврстоћу од остатка траке. Спојеви траке су испитивани у лабораторијским условима и на терену током експлоатације траке. Мерено је издужење споја при његовом пуцању, а затим и издужење комплетног узорка при пуцању споја. Током мерења је праћен процес издужења како би се установила природа понашања. У лабораторијским условима су испитивани спојеви направљени хладном вулканизацијом са механичким ојачањима који су претходно коришћени и нови спојеви направљени истом

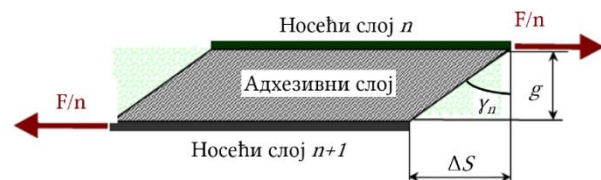
методом, али без механичких ојачања. Што се тиче спојева који су претходно били у употреби, резултати су показали да је њихова затезна чврстоћа у распону од 25% до 32% у односу на називну затезну чврстоћу траке. Добијене вредности су знатно ниже у односу на теоријске претпоставке које се за спојеве крајева трака са четири носећа слоја крећу око 75%. Што се тиче нових спојева, добијене су вредности у распону од 50% до 57% у односу на називну затезну чврстоћу траке. Показало се да примена механичких ојачања заправо смањује носивост споја.

У раду [68] су описани параметри које је могуће пратити током експлоатације споја крајева траке који могу рано да укажу на постојање проблема који може довести до пуцања споја траке. Као најзначајнији параметар је наведено издужење споја крајева траке. Праћењем овог параметра, интелигентни систем праћења стања траке би могао да сигнализира потенцијални проблем. Систем би функционисао на бази динамичког праћења стања траке које би било засновано на моделу неуронских мрежа.

У раду [69] су описани дијагностички системи у одржавању транспортера са траком. Због недостатака постојећих система, представљен је нов систем који се састоји од детектора магнетног поља и магнета који се постављају у спој крајева траке. Електромагнетни систем је изабран због проблема са визуелним системима где се визуелне ознаке на траци током експлоатације губе. Магнети се стављају на почетак и крај споја крајева траке. Мерење започиње када детектор магнетног поља уочи поље првог магнета, а завршава када детектор уочи магнетно поље другог магнета.

У раду [70] је приказана процедура формирања адекватне базе знања о понашању споја крајева траке током експлоатације. Знање је прикупљено током различитих лабораторијских испитивања, као и испитивања на терену током експлоатације. Добијени резултати представљали су полазну основу за формирање нумеричког модела споја траке методом коначних елемената. Нумерички модел се показао као успешан при процени поузданости и јачине споја. Такође, показао је да циклична оптерећења која дуго трају имају веће негативне последице на спој крајева траке у односу на линијска оптерећења већег интензитета.

У раду [71] је наведено да се јачина споја крајева траке састоји из две компоненте – статичка затезна чврстоћа и заморна чврстоћа. Током испитивања на статичко затезање, утврђено је да спој откаже услед кидања носећих слојева у споју без појаве раслојавања. Међутим, током динамичког испитивања, прво откаже адхезивни материјал између носећих слојева, тј. лепак који их спаја. Због тога се истиче да је веома важно проучавати отпорност на замор адхезивних спојева јер прво они доживљавају отказ. На слици 2.64. је приказан модел споја оптерећен затезном силом.



Слика 2.64. Модел споја оптерећеног силом F/n [71]

Мерење оптерећења у споју укључује мерење угла недилатационе деформације адхезивног слоја између носећих слојева. Угао је дефинисан преко коефицијента деформације споја ΔS и растојања између носећих слојева g :

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\Delta S}{g} \quad (2.27)$$

Због различитих карактеристика носећих слојева и адхезивног слоја, угао недилатационе деформације није константан по дужини споја. Због тога је потребно мерити угао истовремено на што више мерних места. Мерење угла је могуће помоћу дигиталне видео технологије. Добијене вредности недилатационе деформације су кључне за идентификацију смичућих напона у споју.

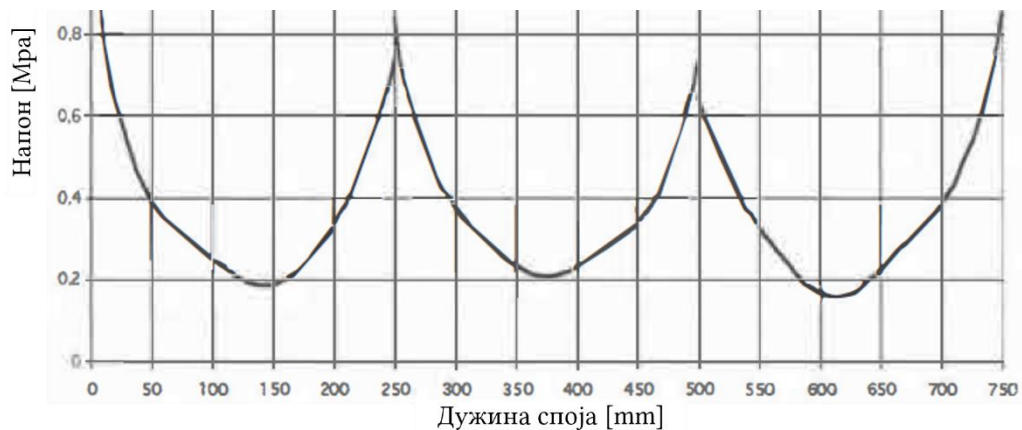
Деформација у споју се рачуна на основу деформације ивице споја ε_k и деформације траке ε_t :

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{(\varepsilon_k + 1)^2 + (\varepsilon_t + 1)^2 + 2(\varepsilon_k + 1) \cdot (\varepsilon_t + 1) \sin \gamma}{2}} - 1 \quad (2.28)$$

где се деформација ивице споја рачуна као:

$$\varepsilon_k = \frac{1 - \cos \gamma}{\cos \gamma - \nu \sin \gamma} \quad (2.29)$$

Поасонов однос адхезивног слоја зависи од врсте гуме која се употребљава приликом процеса вулканизације. Прорачуном смичућег напона се долази до резултата приказаних на слици 2.65.



Слика 2.65. Расподела смичућег напона по дужини споја [71]

На крају се дошло до закључка да је могуће користити дигиталну видео технологију како би се проценио ниво смичућег напона у споју. Наведено је како је потребно даље истраживати област заморне чврстоће како би се дошло до прецизнијих података о појави замора код трака и утицају на исте.

У раду [72] испитивани су утицаји конструкционих параметара траке и гуменог међуслоја на појаву напона у споју крајева траке, као и на заморну чврстоћу споја. Дат је емпиријски образац помоћу којег је могуће предвидети

максимални напон смицања τ у споју крајева траке у функцији затезне чврстоће траке R_t , модула еластичности траке M_t и модула еластичности гуменог међуслоја M_g :

$$\tau = 2,4 \sqrt{\frac{R_t}{M_t}} M_g \quad (2.30)$$

Затим је испитана заморна чврстоћа споја, тј. број циклуса наношења оптерећења док не дође до деламинације спојева у износу од 3 mm. Због повећања температуре у узорку приликом испитивања динамички променљивим оптерећењем, постављена је граница од $23^\circ \text{C} \pm 2^\circ \text{C}$ преко које температура не сме да пређе како би резултати били валидни. Дефинисани су критеријуми испитивања – распон динамички променљивог оптерећења од 5% до 20% затезне чврстоће траке, фреквенција наношења оптерећења 0,3 Hz, синусоидално наношење оптерећења и температура окружења од 18°C . Добијени резултати су представљени у табели 2.25.

Табела 2.25. Резултати испитивања спојева крајева траке на замор [72]

Бр. узорка	Мат. носећег слоја	Затезна чврстоћа траке R_t [kN/m]	Модул еластичности траке M_t [kN/m]	Адхезивна јачина споја T [N/mm]	Број циклуса потребних да дође до деламинације
1	PP	1356	4639	6,3	440
2	EP	1050	12665	11,4	212000
3	EP	997	14717	14,6	359000
4	EP	1771	26577	9,2	145000
5	EP	1942	18683	7,5	8600
6	PP	1752	8697	12,1	1900

Применом нелинеарне вишеструке регресионе анализе, дошло се до једначине за предвиђање броја циклуса LC до појаве деламинације у функцији од модула еласт. траке M_t , затезне чврстоће траке R_t и адхезивне јачине споја T^2 :

$$LC = 8,05 \left(\frac{M_t}{R_t} \right)^2 T^2 \quad (2.31)$$

У раду [73] је истакнуто да су спојеви крајева траке најслабија тачка сваке траке. Спојеви настали хладном вулканизацијом имају век трајања у подземној експлоатацији до два пута краћи у односу на век трајања траке. Спојеви настали топлим вулканизацијом имају боље карактеристике, али изискују више времена и специјалну опрему како би се адекватно урадили што доводи до дугачких застоја транспортног система. Показано је да је могуће користити узорке малих димензија до 100 mm како би се испитала заморна чврстоћа. Током испитивања заморне чврстоће, испитни уређај је био повезан са софтвером који је омогућио записивање силе, деформације узорка, времена и броја циклуса до деламинације споја. Добијени подаци су упоређивани са преко десет параметара траке. Закључено је да

добијене зависности нису довољне како би се формирали математички модели и да је то правац будућег истраживања.

У раду [74] је наведено да је трака током експлоатације оптерећена динамички променљивим оптерећењем. Због тога је развијен метод за испитивање јачине споја крајева траке на кидање. Током испитивања, узорци спојева траке треба да имају јачину на кидање R_p већу од емпиријског модела који зависи од затезне чврстоће траке R_r , броја носећих слојева у траци n_t и броја носећих слојева у споју n_z :

$$R_p = 0,85R_r \frac{n_z - 1}{n_t} [\text{kN/m}] \quad (2.32)$$

Током вишегодишњег испитивања узорка спојева крајева трака, дефинисани су узроци који доводе до смањења јачине споја крајева траке на кидање – грешке током спајања, различити параметри крајева траке и лоше карактеристике материјала за вулканизацију. Грешке током спајања се могу поделити у три категорије – уклањање гуменог међуслоја, сечења крајева носећих слојева и погрешни параметри вулканизације.

У раду [75] је испитивана заморна чврстоћа спојева крајева трака у функцији од напона смицања у спојевима, деформације носећих слојева и гумених међуслојева у споју и јачине споја на деламинацију.

Међутим, истакнуто је да тренутне методе изискују много времена и новца те је за циљ будућег истраживања постављена промена методе утврђивања заморне чврстоће споја. Указано је да је потребно формирати математички модел зависности заморне чврстоће споја у односу на амплитуду промене динамичког оптерећења узорка.

У раду [76] су приказани резултати испитивања узорка спојева крајева трака услед појаве пузања и релаксације напона у њима. Испитивани су узорци трака, узорци гумених заштитних слојева и узорци спојева крајева трака. Приказан је математички модел који описује зависност деформације узорка ε_T од временског интервала излагања оптерећења T .

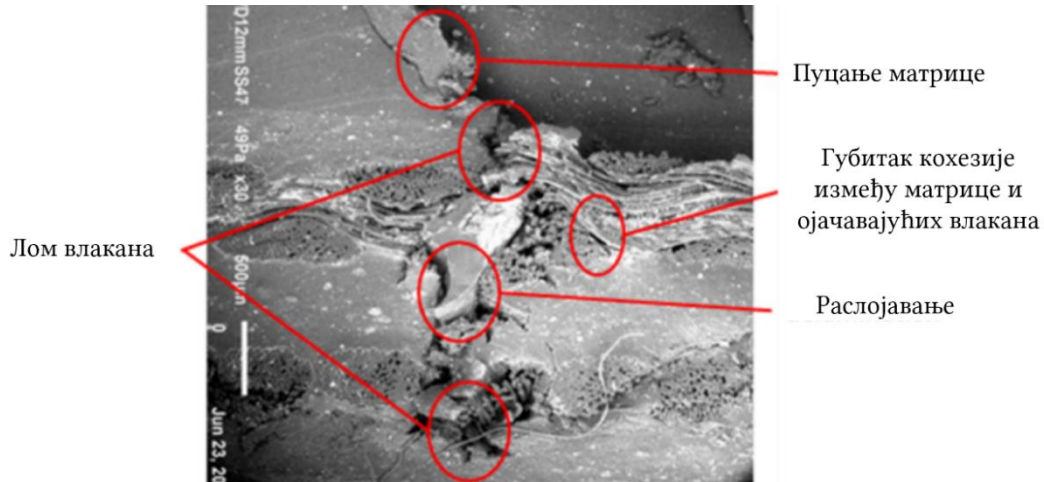
Модел узима у обзир почетну деформацију узорка ε_0 , као и константе b и m које зависе од карактеристика материјала које се могу добити кроз неколико итерација теста на пузање:

$$\varepsilon_T = \varepsilon_0 \left(\frac{T}{b} \right)^m \quad (2.33)$$

Дошло се до закључка да су спојеви крајева трака који су изложени дуготрајном затезном оптерећењу, склони значајним деформацијама које достижу до 200% вредности у поређењу са почетном деформацијом узорка при наношењу оптерећења. Са друге стране, није забележена промена напона у споју током времена због феномена релаксације напона.

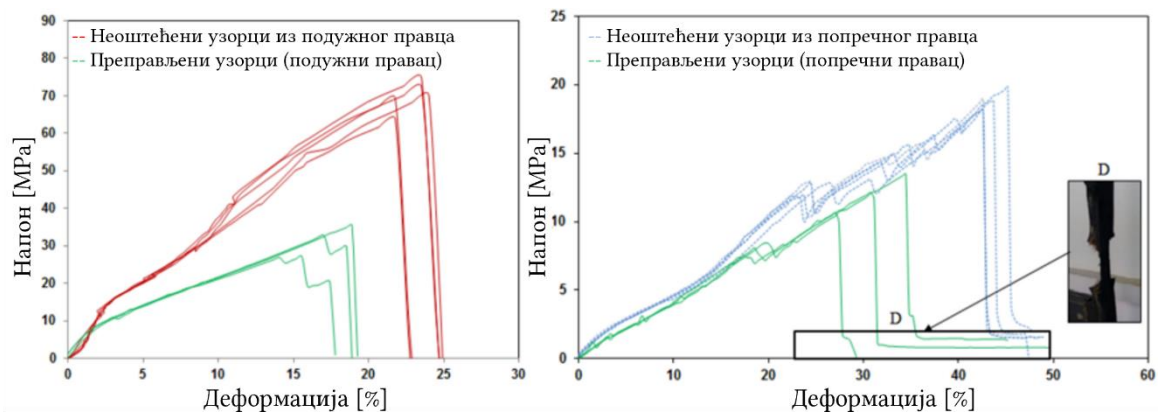
Закрпе трака

У раду [77] су систематизовани механизми оштећења транспортних трака у четири категорије: пуцање матрице композита (гумени међуслојеви - микроскопски ниво), раслојавање (макроскопски ниво), лом и извијање текстилних влакана (микроскопски ниво) и губитак кохезије између матрице и ојачавајућих влакана (микроскопски ниво). Ови механизми су приказани на слици 2.66.



Слика 2.66. Микрографски приказ попречног пресека узорка оштећене траке [77]

Затим је извршено узорковање транспортне траке тако што је узето 8 узорка у подужном и 8 узорка у попречном правцу траке. На 3 узорка са подужног и 3 узорка са попречног правца је извршена преправка уклањањем средишњег дела који је посматран као оштећен и убацивањем закрпа. Систем је представљен кроз аналитички бидирекциони хигро-термомеханички модел. Затим су узорци испитани путем аксијалног истезања. Резултати су приказани на слици 2.67.



Слика 2.67. Упоредни резултати испитивања са подужног и попречног правца [77]

Уочен је губитак затезне чврстоће закрпљеног узорка из подужног правца од 57% и губитак затезне чврстоће закрпљеног узорка из попречног правца од 39%. Такође, потврђен је губитак Јунговог модула еластичности закрпљеног узорка из подужног правца од 20% и губитак Јунговог модула еластичности закрпљеног узорка из попречног правца од 13%.

Аксијално испитивање узорака трака

У раду [78] су приказане основне механичке карактеристике полиамида (*P*) и полиестера (*E*), табела 2.26.

Табела 2.26. Основне карактеристике полиамида и полиестера [78]

Материјал	Полиамид (<i>P</i>)	Полиестер (<i>E</i>)
Затезна чврстоћа влакна [Nmm^2]	740 ÷ 910	830 ÷ 970
Сила лома у влажним условима [%]	65 ÷ 80	60 ÷ 70
Специфична тежина [gcm^2]	1,14	1,38
Издужење при лому [%]	12 ÷ 18	10 ÷ 15
Издужење при лому у влажним условима [%]	15 ÷ 25	12 ÷ 18
Трајно издужење [%]	0,5 ÷ 3	0,3 ÷ 0,9
Еластично издужење [%]	0,6 ÷ 1,5	0,5 ÷ 1,2
Максимално издужење при 1Т [%]	1,5 ÷ 3	0,8 ÷ 2,5

Наведено је да се најчешће носећи слојеви траке означавају са *P* што значи да су нити основе и потке израђени од полиамида и са *EP* што значи да су нити основе од полиестера, а нити потке од полиамида.

Испитивано је по 5 узорака транспортних трака које су реновиране тако што им је замењен горњи гумени заштитни слој са носећим слојевима од *P* и *EP*, различитих затезних чврстоћа (800, 1.000, 1.250 N/mm) и различитог броја носећих слојева (3 и 4). Испитивана је затезна чврстоћа при лому, издужење при референтном оптерећењу и издужење при лому. Да би се упоредили резултати, испитани су узорци и нових, некоришћених трака.

Употребом *DOE* методе, регресионе анализе и статистичко индукционе методе, дошло се до следећих закључака:

- на издужење узорака при референтном оптерећењу утичу врста материјала носећег слоја, број носећих слојева и затезна чврстоћа материјала носећег слоја;
- на затезну чврстоћу при лому утичу затезна чврстоћа материјала и број носећих слојева;
- на издужење при лому утичу затезна чврстоћа материјала и врста материјала носећег слоја.

На крају, истакнуто је да реновирање траке заменом горњег гуменог заштитног слоја чува затезна својства траке – затезну чврстоћу, издужење при референтном оптерећењу и издужење при лому.

У раду [79] је наведено да су траке током експлоатације углавном изложене униаксијалном квази-статичком затезном оптерећењу у подужном правцу и динамичком оптерећењу у попречном правцу услед савијања траке на ослоним ваљцима. Испитивани су узорци трака са номиналним карактеристикама приказаним у табели 2.27.

Табела 2.27. Номиналне механичке карактеристике испитиваних трака [79]

Карактеристика	Јединица	Тип траке		
		800	1000	1250
Затезна чврстоћа				
• у подужном правцу (нити основе)	N/mm	800	1000	1250
• у попречном правцу (нити потке)		160	200	250
Референтно оптерећење, мах.	N/mm	80	100	125
Издужење при лому, мин.	%	10	10	10
Издужење при референтном оптерећењу	%	3	3	3

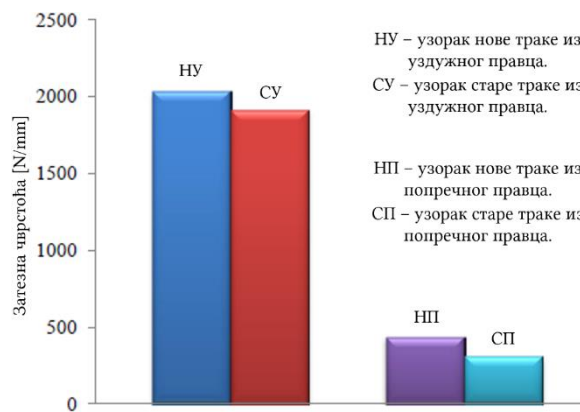
Током испитивања је мерена максимална сила коју узорак траке може да поднесе, издужење узорка при лому и издужење узорка при референтном оптерећењу. Испитивана су три фактора који утичу на понашање узорка траке: номинална затезна чврстоћа, врста носећег слоја (P или EP) и број носећих слојева. Утврђено је да ном. затезна чврстоћа има највећи утицај на затезну чврстоћу траке.

У раду [80] је извршена класификација експеримената са тракама у три категорије: стандардни тестови, тестови сертификације и нестандартни тестови. Прва категорија укључује тестове механичких карактеристика у складу са постојећим стандардима. Друга категорија укључује тестове који су потребни да би се траке користиле у подземним експлоатацијама. Трећа категорија укључује тестове за које не постоје стандарди, али су битни за испитивање важних параметара трака.

У раду [81] су вршена аксијална испитивања узорка трака. Мерила се затезна чврстоћа, модул еластичности и деформација у подужном и попречном правцу. Утврђено је да узорци који се простиру у подужном правцу траке имају боље карактеристике од узорка који се простиру у попречном правцу.

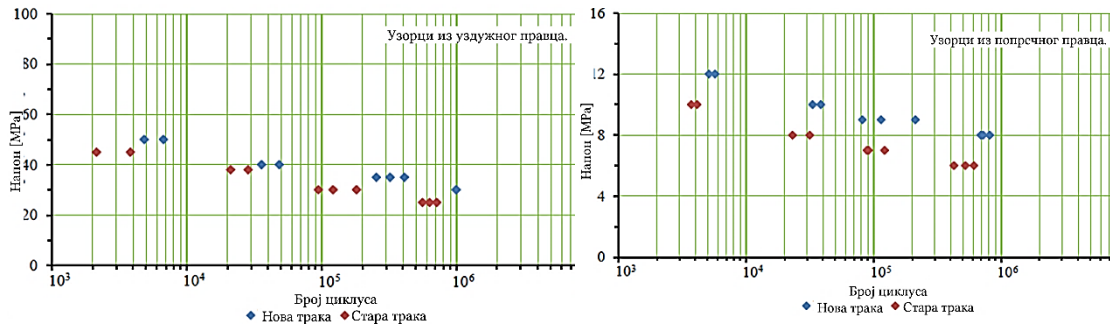
У раду [82] су аксијално испитивани узорци транспортних трака на које су залепљене мерне траке. Мерне траке су се користиле за утврђивање Поасоновог коефицијента и модула еластичности.

У раду [83] су приказана испитивања са узорцима трака. Узорци су испитивани на затезање, замор и испитивани су параметри раста заморне пукотине. Коришћени су узорци са старих употребљених и нових трака и резултати су упоређивани. Што се тиче испитивања на затезање, утврђено је да узорци коришћених трака имају мању затезну чврстоћу у односу на узорке нових трака, слика 2.68.



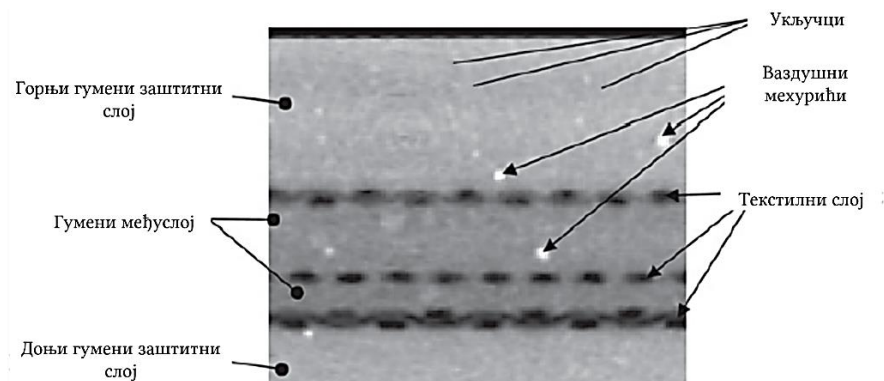
Слика 2.68. Упоредни приказ затезне чврстоће за нову и стару траку [83]

Што се тиче испитивања променљивим оптерећењем на замор, утврђено је да се смањује затезна чврстоћа узорка са порастом броја циклуса, слика 2.69.



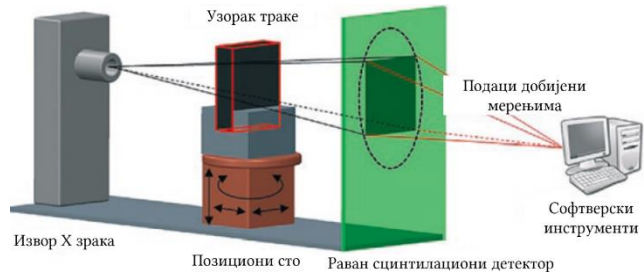
Слика 2.69. Упоредни C-N дијаграм узорка трака [83]

У раду [84] је истакнуто да се физичке и механичке карактеристике траке мењају током експлоатације. Описана је предност употребе метротомографије за неинвазивну анализу стања траке. Путем компјутерске томографије је могуће створити 3Д модел стварног стања траке чиме се добија увид у унутрашњу структуру траке. На почетку експеримента је помоћу ултразвучног мерног уређаја измерена дебљина траке у попречном правцу чиме је добијен увид у промене које су настале током експлоатације. Већа оштећења су настала на бочним деловима траке, док је средишњи део остао нетакнут. Затим су узети узорци траке и испитиван је модул еластичности траке. Утврђена је разлика вредности модула еластичности од 44% за узорке који су узети из средине траке и са ивице траке. Затим је мерена еластична деформација узорка – упоређиване су вредности добијене код испитивања узорка коришћене и некоришћене траке. Узорци коришћених трака су имали еластичну деформацију од 0,5%, док су узорци некоришћених трака имали 0,8% еластичну деформацију. Приликом мерења трајне деформације, сличне разлике нису уочене. Потом је мерена отпорност на раслојавање слојева и утврђено је да узорци коришћених трака имају 50% мању отпорност на раслојавање у односу на нове траке. На крају је мерена гипкост траке, односно могућност стварања олучастог облика. Знатно је слабија гипкост код коришћене траке. После експеримената, снимљени су узорци метротомографском методом, слика 2.70.

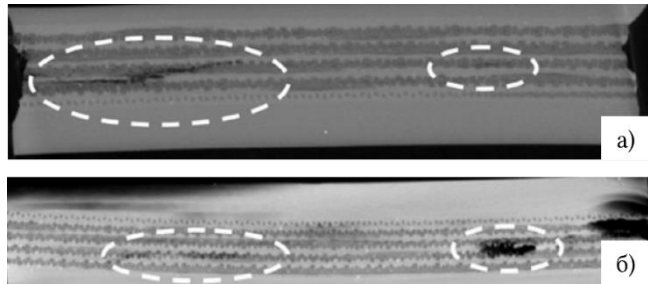


Слика 2.70. Детаљ унутрашњости траке [84]

У раду [85] је приказан метод снимања узорка траке компјутерском томографијом – ЦТ скенером, слика 2.71. Снимањем се добија 3Д модел у облику запреминског или површинског модела. Процес се састоји из следећих корака – скенирање узорка, реконструкција запреминских података, одређивање површине и процена стања. Анализирана су оштећења носећих слојева и заштитних гумених слојева. На слици 2.72. приказана су оштећења носећег слоја узорка траке.



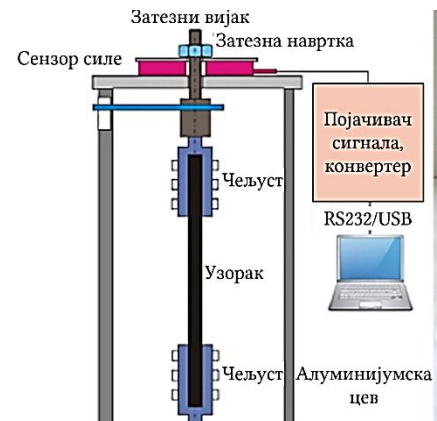
Слика 2.71. Шема скенирања узорка [85]



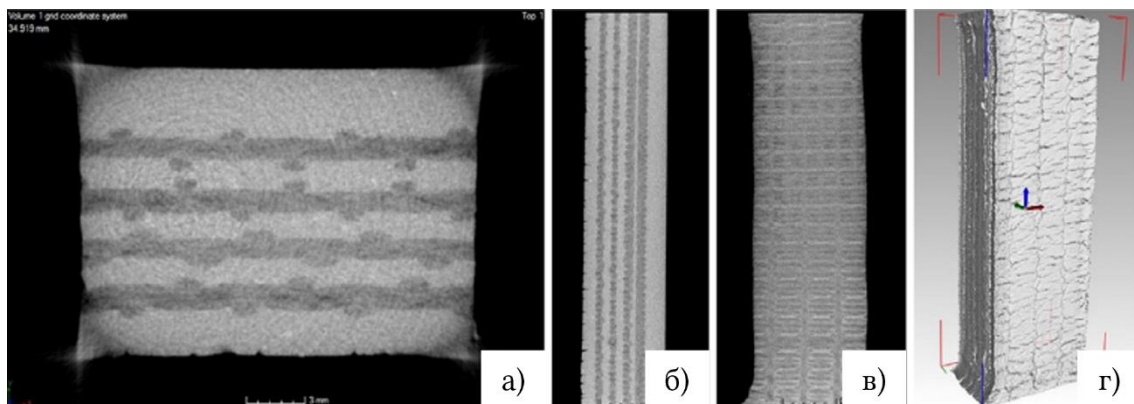
Слика 2.72. Предњи поглед анализаног узорка траке а), бочни поглед б) [85]

У раду [86] је описан уређај за аксијално испитивање узорка транспортних трака који је подобан за употребу у комбинацији са ЦТ скенирањем, слика 2.73.

Наглашена је важност правилног постављања узорка у чељустима и осно поравнање. Скенирање путем ЦТ-а омогућава праћење стања у унутрашњости узорка. Промена растојања између влакана у носећим слојевима указује на оштећење носећег слоја чиме је могуће на време уочити критичне тачке. Пример ЦТ скенирања и направљеног 3Д модела на основу тих информација је приказан на слици 2.74.

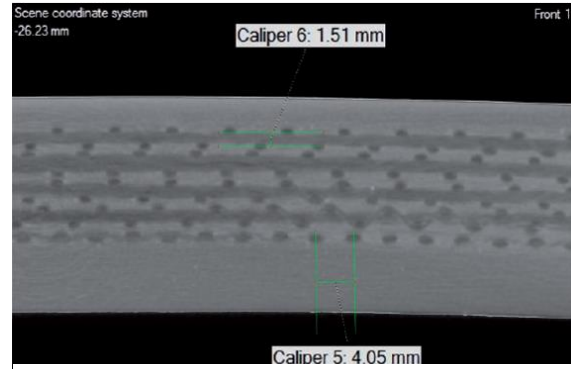


Слика 2.73. Шема испитног уређаја [86]



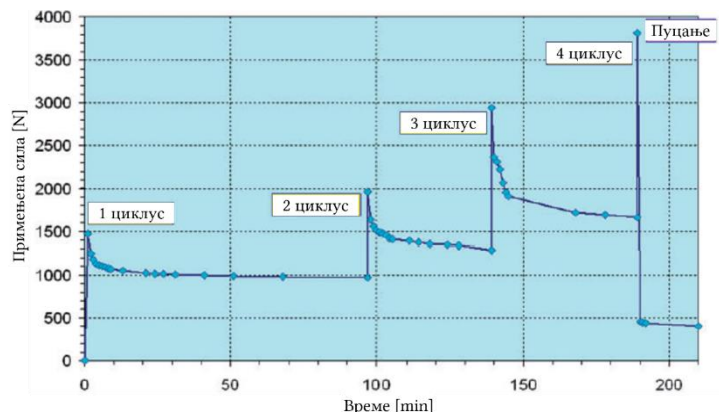
Слика 2.74 Скенирани узорак траке – поглед од горе а), поглед са стране б), поглед спреда в), 3Д реконструкција узорка [86]

У раду [87] је истакнуто да класичним методама испитивања стања трака када се узима узорак и испитује на кидалицама и сличним машинама није могуће разликовати оштећења која су настала током експлоатације од оних која могу настати приликом узорковања. Због тога се описује индустријска томографија – ЦТ скенирање као нова и поуздана метода за ненасилно испитивање стања траке. Праћењем растојања између нити основе, као и између нити потке, могуће је оцењивати стање траке, слика 2.75. Такође, могуће је пратити појаву раслојавања између слојева, као и постојање пукотина. Визуелно испитивање траке не даје довољно поуздане резултате јер није могуће добити увид у стање носећег слоја. Применом рендген скенирања се добијају 2Д слике унутрашњег стања носећег слоја. Због тога ЦТ скенирање добија на значају јер је могуће на основу добијених података направити 3Д модел и тиме утврдити стање траке у било којој тачки.



Слика 2.75. Испитивање растојања између влакана и њихове дебљине [87]

У раду [88] су аксијално испитивани узорци трака и затим су подвргнути метротомографском снимању како би се утврдило стање у носећем слоју. Испитивани су узорци траке EP са три носећа слоја. Укупна јачина на кидање траке је 125 N/mm. Три узорка су на почетку испитана до тачке кидања

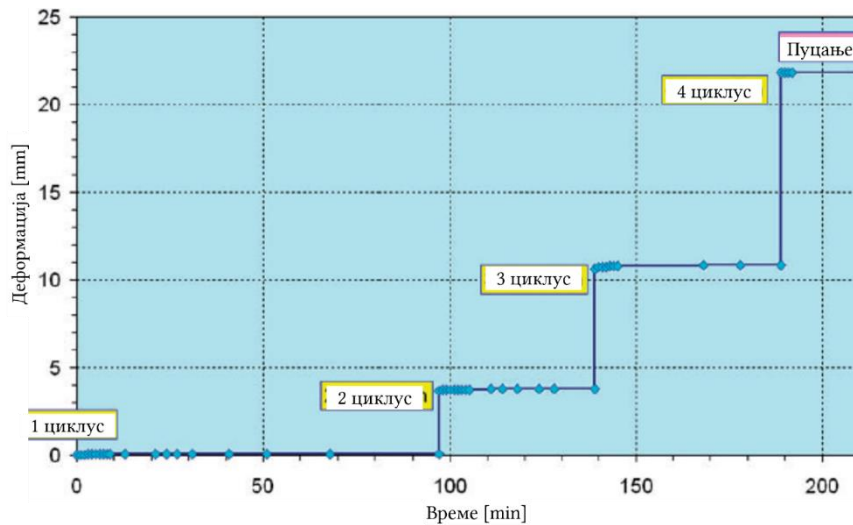


Слика 2.76. Оптерећење узорка током времена [88]

како би се потврдиле називне карактеристике. Утврђено је да су узорци пуцали на 3457 N са просечном деформацијом од 10% што је 13,6% већа јачина на кидање од називне. Затим је испитивано понашање узорка при константном оптерећењу током дужег времена. Узорци су затегнути до одређене силе. Остављени су под тим оптерећењем један период. Сила је постепено опадала и стабилизовала се после 45 минута који представљају релаксацију. Затим су поновљени циклуси оптерећења и релаксације док узорак није пукао, слика 2.76.

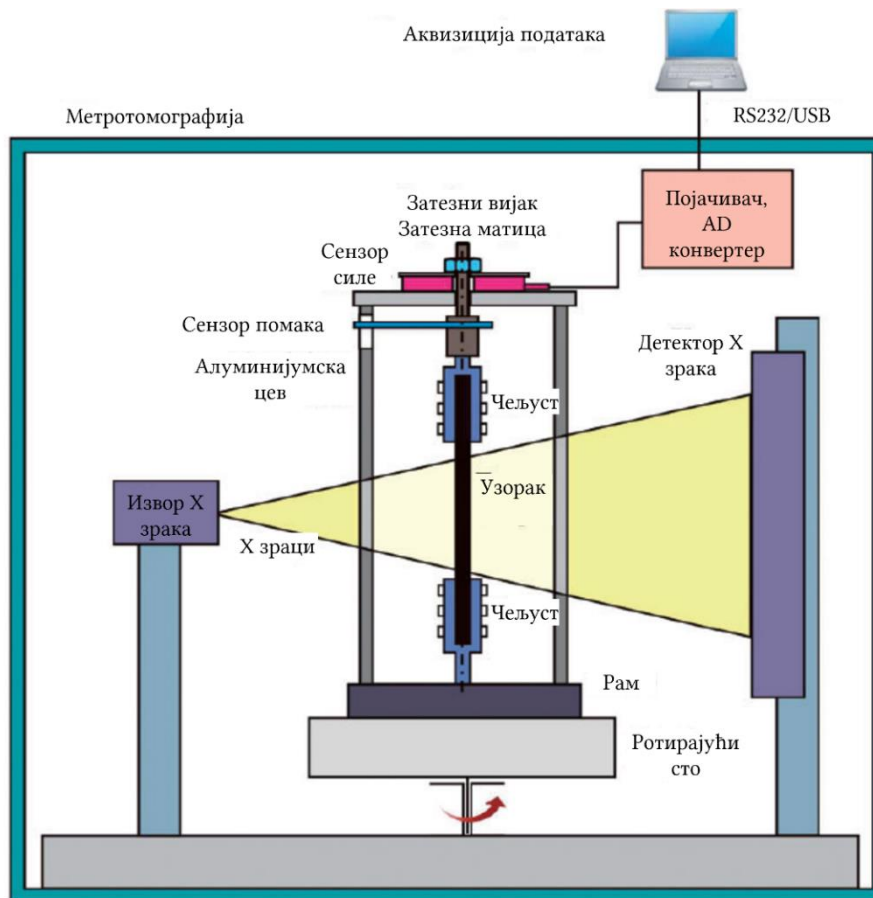
Време релаксације је изабрано на основу потребног периода да се деформација стабилизује. Уколико је разлика између деформација у распону од 10 mm мања од 1%, време релаксације је завршено. Крај релаксације узорка је био битан због добијања јасних слика током снимања метротомографијом. Утврђено је да овим начином оптерећења узорци пуцају при нешто већим вредностима сила него код класичног аксијалног затезања.

Следећи експеримент је био да се узорци оптерећују тако да деформација буде константна за један циклус што значи да сила постепено расте како би се деформација одржавала, слика 2.77.



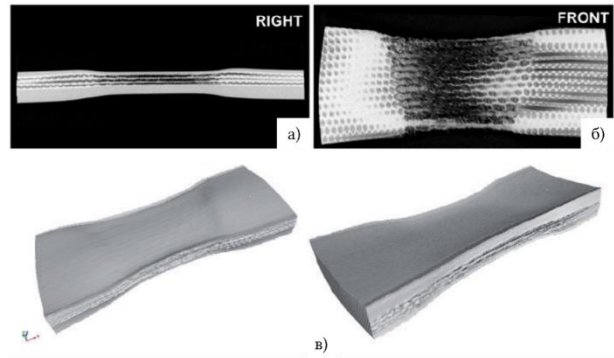
Слика 2.77. Деформација узорка током времена [88]

Током испитивања су узорци снимани метротомографијом како би се пратиле промене у унутрашњости узорка током циклуса деформације, слика 2.78.



Слика 2.78. Снимање метротомографијом узорка током константне деформације [88]

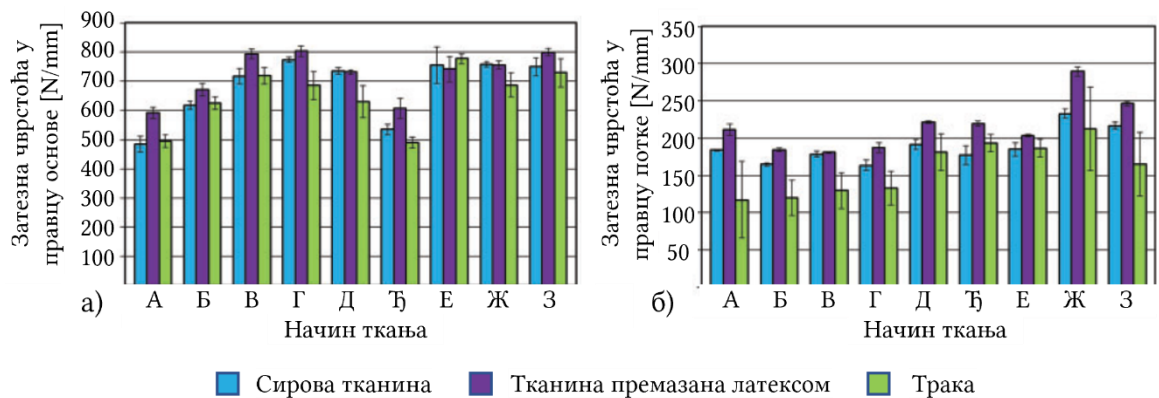
На слици 2.79. су приказани резултати метротомографског снимања, као и добијени 3Д модел. Утврђено је да се оштећења јављају у унутрашњости траке током испитивања. Истакнуто је да узорак траке има већу отпорност на оштећење уколико се постепено оптерећује и дозвољава се период релаксације у односу на једноструко затезање до називне затезне чврстоће. Тиме је указано на зависност понашања узорка у односу на начин наношења оптерећења.



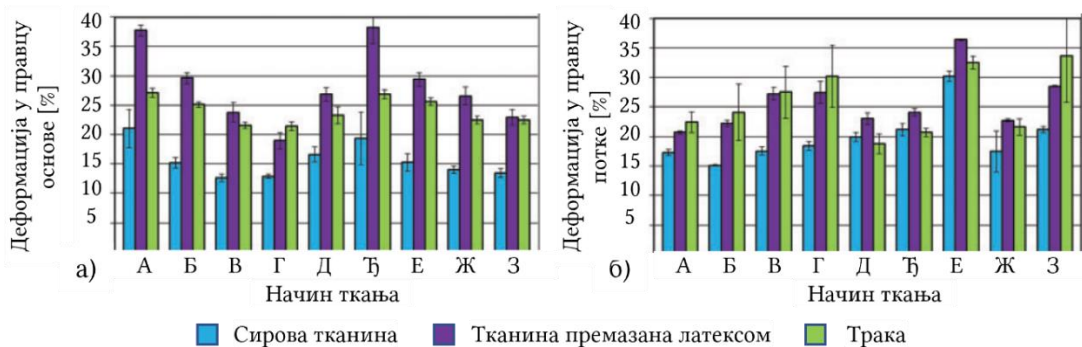
Слика 2.79. Скенирани узорак – поглед са стране а), поглед спреда б), 3Д модел узорка на основу добијених слика в) [88]

У раду [89] је приказано испитивање узорка из три фазе производње траке – сирова тканина, тканина премазана латексом и комплетирана трака са гуменим слојевима. Тканина се премазује латексом да би се боље сјединила са гуменим слојевима током вулканизације. Испитано је по 9 различитих узорка за сваку фазу. Узорци су се разликовали по начину ткања, а код свих узорка су нити основе израђене од полиестера, а нити потке од најлона, тј. полиамида.

Резултати испитивања затезне чврстоће узорка и њихове деформације су приказани на сликама 2.80. и 2.81.

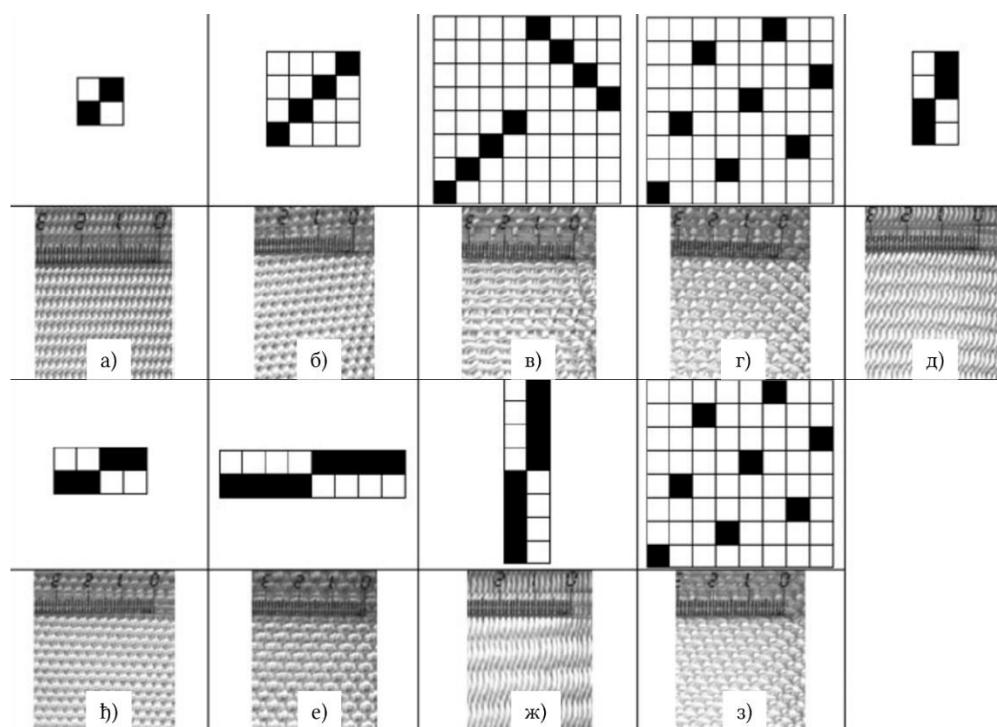


Слика 2.80. Затезна чврстоћа узорка – у правцу основе а), у праву потке б) [89]



Слика 2.81. Деформација узорка – у правцу основе а), у праву потке б) [89]

Начини ткања су приказани на слици 2.82.



Слика 2.82. Начини ткања и површине узорака – обично ткање а), твил ткање б), попречно твил ткање в), сатенско ткање г), реп ткање основе д), реп ткање потке ђ), реп ткање потке е), реп ткање основе ж), сатенско ткање са већом густином потке з) [89]

На основу резултата се закључило да премазивање латексом повећава затезну чврстоћу узорака, али да је потом вулканизација делимично смањује. Што се тиче деформације, премазивање латексом значајно повећава амплитуду деформације, а вулканизација је потом смањује.

У раду [90] је приказано упоредно испитивање узорака нове и коришћене транспортне траке чије су нити основе и потке од полиамида. Трака ознаке В-1600 Р 1600/5 8+4 ширине 1.600 mm и називне јачине на кидање 1.600 N/mm је коришћења на два транспортера са траком за транспорт угља и јаловине.

У првом случају, транспортер је транспортовао материјал 6 година, 1 месец и 25 дана и током тог периода је транспортовао укупно 10.360.000 t материјала.

У другом случају, транспортер је транспортовао материјал 3 године и 2 дана и током тог периода је транспортовао укупно 4.306.000 t материјала.

Испитивана је отпорност на раслојавање носећих слојева, отпорност на раслојавање између гумених заштитних и текстилних носећих слојева, затезна чврстоћа, тј. јачина на кидање узорака транспортне траке у подужном и попречном правцу, издужење узорака, отпорност на абразију гумених заштитних слојева и затезна чврстоћа гумених заштитних слојева.

У табели 2.28. су приказани резултати испитивања транспортне траке коришћење у првом случају.

Табела 2.28. Први случај – 6 година, 1 месец и 25 дана [90]

Карактеристика	Јед.	Први случај – 6 год, 1 м. и 25 дана			
		Нова	Кор.	Раз.	% Нове
Затезна чврстоћа траке у подужном правцу	N/mm	1.869	1.417	-452	-24,2
Затезна чврстоћа траке у попречном правцу	N/mm	496	471	-25	-5
Издужење при референтном оптерећењу 10%	%	1,9	1,7	-0,2	-10,5
Издужење при лому	%	25	15,6	-9,4	-37,6
Отпорност на раслојавање носећих слојева	N/mm	11	10,3	-0,7	-5
Отп. на рас. између нос. и гум. зашт. слојева	N/mm	8,8	7,9	-0,9	-10,2
Абразија	mm ³	117	153	36	30,8
Тврдоћа	°ShA	62	78,5	16,5	26,6
Затезна чврстоћа гуменог слоја	MPa	24,2	14,2	-10	-41,3
Издужење при лому гуменог слоја	%	519	199	-320	-61,7

У табели 2.29. су приказани резултати испитивања транспортне траке коришћење у другом случају.

Табела 2.29. Други случај – 3 година и 2 дана [90]

Карактеристика	Јед.	Први случај – 3 год. и 2 дана			
		Нова	Кор.	Раз.	% Нове
Затезна чврстоћа траке у подужном правцу	N/mm	1.825	1.455	-370	-20,3
Затезна чврстоћа траке у попречном правцу	N/mm	453	409	-44	-9,7
Издужење при референтном оптерећењу 10%	%	2	2,4	0,4	20
Издужење при лому	%	-	18,9	-	-
Отпорност на раслојавање носећих слојева	N/mm	10,7	6,8	-3,9	-36,4
Отп. на рас. између нос. и гум. зашт. слојева	N/mm	7,3	6	-1,3	-17,8
Абразија	mm ³	88	106	18	20,4
Тврдоћа	°ShA	65	71,5	6,5	10
Затезна чврстоћа гуменог слоја	MPa	24,1	14,5	-9,6	-39,8
Издужење при лому гуменог слоја	%	466	300	-166	-35,6

3. Аналитички и микромеханички модели понашања транспортне траке

Транспортна трака као текстилни композит је позната по својим јединственим особинама које укључују малу масу, флексибилност и добар однос чврстоће и еластичности. Међутим, унутрашња структура текстилних композита је сложенија у односу на униформне материјале попут метала. Због тога су текстилни композити предмет вишедеценијског истраживања с циљем да се моделира понашања услед оптерећења. Стандардне криве напон – деформација за метале не могу директно да се примене на текстилне композите. Због тога су развијане различите методологије којима би се успешно описало понашање текстилних композита при оптерећењу.

Методологија јединичне ћелије (*UC – Unit Cell*) се показала као најефикаснији алат [91]. У овој методологији се прво формира јединична ћелија која описује унутрашњу структуру композита. Затим се приступа конститутивном моделирању како би се дефинисало понашање јединичне ћелије. Конститутивно моделирање представља математички опис понашања материјала који је изложен различитом оптерећењу. Рачунају се микроскопски напони и деформације који се јављају у јединичној ћелији при унапред задатим граничним условима. На крају, узимајући у обзир међусобни утицај јединичних ћелија, добијени резултати на микроскопском нивоу се трансформишу на макроскопски ниво и тиме се добијају модели понашања текстилног композита услед оптерећења.

У зависности од могућности моделирања унутрашње структуре текстилног композита, методологија јединичне ћелије се може применити употребом аналитичких или нумеричких приступа.

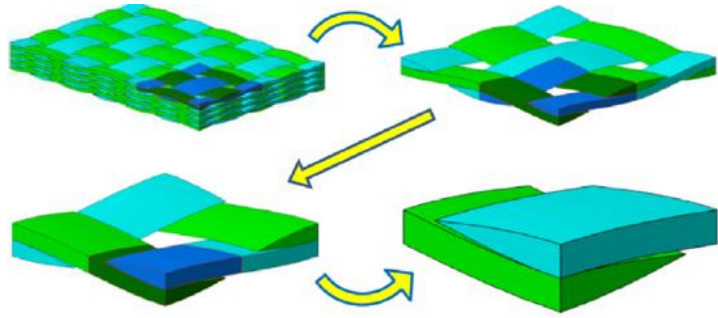
У случају аналитичког приступа, унутрашња структура текстилног композита се представља као склоп једноставних ентитета у паралелној и/или серијској вези. Због такве дискретизације, могућа је примена класичне ламинатне теорије како би се израчунале еластичне карактеристике. Да би аналитички метод био ефикасан, примењују се геометријска поједностављења која могу довести до смањења прецизности резултата.

У случају микромеханичког приступа, компликовано је моделирање реалистичних јединичних ћелија због комплексне геометрије текстилног композита. Због тога се оне деле на подрегионе што ће бити објашњено касније.

Да би методологија јединичне ћелије била ефикасна, неопходно је формирати моделе који су у могућности да предвиде целокупно понашање текстилног композита – при еластичним и нееластичним деформацијама укључујући нелинеарно понашање, зависно од брзине деформације, при динамичким оптерећењима.

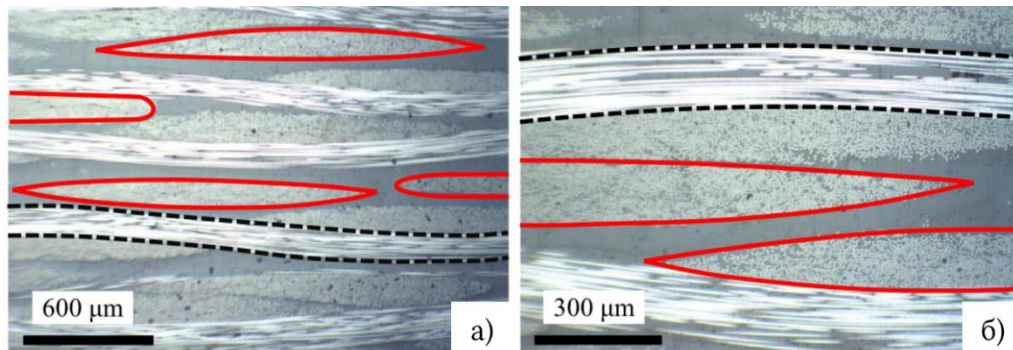
3.1 Формирање јединичне ћелије

Како се носећи слојеви транспортних трака најчешће израђују обичним ткањем, фокус ће бити управо на моделирању понашања таквих материјала, слика 3.1.



Слика 3.1. Процедура формирања јед. ћелије [91]

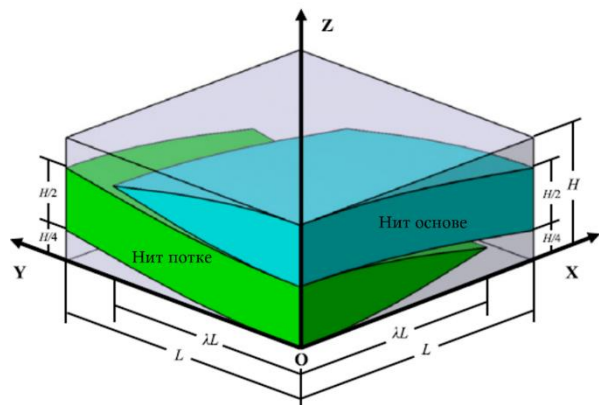
Како би се смањила комплексност геометријског модела, искоришћене су све симетрије материјала како би се добила идеална јединична ћелија. Да би се потврдио геометријски модел јединичне ћелије, претходно су анализирани различити узорци текстилних композита како би се стекла адекватна слика о унутрашњој структури – о попречном пресеку и валовитости нити, слика 3.2.



Слика 3.2. Микроскопски приказ унутрашње структуре текстилног композита при увећању од 25 пута а) и при увећању од 100 пута б) [91]

На основу ових слика и апроксимација помоћу криве, претпостављено је да се попречни пресек материјала и валовитост нити основе и потке могу описати косинусним функцијама. Такође, за сваку нит, претпоставља се да има константан попречни пресек целом дужином и да пречник нити износи половину висине једног слоја због начина ткања.

На слици 3.3. је приказан модел нормалне минималне јединичне ћелије. Појам нормалан се користи како би се указало да је минимална јединична ћелија базирана на ортогоналном координатном систему где су X , Y и Z осе паралелне са нитима основе, потке и висином слоја. Постоји и другачији модел –



Слика 3.3. Модел нормалне минималне јединичне ћелије обично тканог текстилног композита [91]

заокренута минимална јединична ћелија. Нормални модел се користи за хомогенизацију у правцима нити основе и потке, тј. у правцима $0^\circ/90^\circ$, док се заокренути модел користи за хомогенизацију у правцима који се не поклапају са осам, нпр. у правцу 45° . Код нормалног модела, параметар L се користи како би се представиле дужине ивице минималне јединичне ћелије. Бездимензиони параметар λ се дефинише као однос половине ширине нити основе или потке и дужине ивице ћелије. Његова улога је да узме у обзир опуштеност или претегнутост нити.

На основу претходно изнетих претпоставки и геометријских параметара приказаних на слици 3.3, могуће је аналитички описати горњу и доњу површину нити основе и потке, као и њихов угао валовитости у односу на раван XOY . Индекси lo и up се односе на доњу и горњу површину нити:

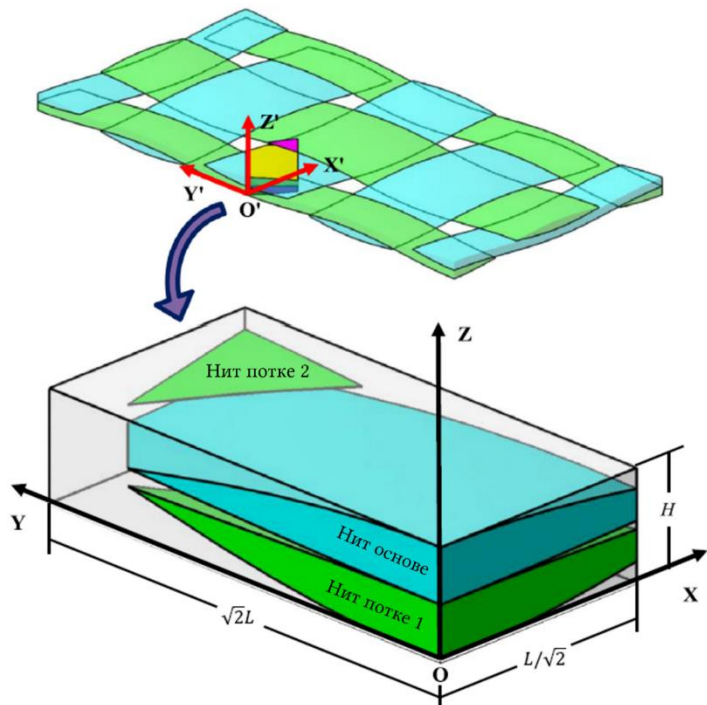
$$z_{osnova}^{lo/up} = \frac{H}{4} \cdot \left(2 + \cos \frac{\pi x}{2L} \mp \cos \frac{\pi y}{2\lambda L} \right) \quad (3.1)$$

$$z_{potka}^{lo/up} = \frac{H}{4} \cdot \left(2 \mp \cos \frac{\pi x}{2\lambda L} - \cos \frac{\pi y}{2L} \right) \quad (3.2)$$

$$\theta_{osnova/potka} = \tan^{-1} \left(\mp \frac{\pi H}{8L} \cdot \sin \frac{\pi x}{2L} \right) \quad (3.3)$$

На слици 3.4. је приказан заокренути модел минималне јединичне ћелије.

Може се приметити да је проблематично описати нити тканине директно у локалном координатном систему, тј. у $OXYZ$. Једноставније је да се прво нити опишу у глобалном координатном систему, тј. у $O'X'Y'Z'$, и онда да се добијене једначине трансформишу у локални координатни систем. На основу ове двостепене процедуре, могу се добити једначине које описују унутрашње карактеристике заокренуте минималне јединичне ћелије обично тканог текстилног композита:



Слика 3.4. Модел заокренуте минималне јединичне ћелије обично тканог текстилног композита у локалном координатном систему [91]

$$z_{osnova}^{lo/up} = \frac{H}{4} \cdot \left(2 + \cos \frac{\sqrt{2\pi}(x+y)}{4L} \mp \cos \frac{\sqrt{2\pi}(x-y)}{4\lambda L} \right) \quad (3.4)$$

$$z_{potka1}^{lo/up} = \frac{H}{4} \cdot \left(2 \mp \cos \frac{\sqrt{2\pi}(x+y)}{4\lambda L} - \cos \frac{\sqrt{2\pi}(x-y)}{4L} \right) \quad (3.5)$$

$$z_{potka2}^{lo/up} = \frac{H}{4} \cdot \left(2 \mp \cos \left(\frac{\sqrt{2\pi}(x+y)}{4\lambda L} - \frac{\pi}{\lambda} \right) - \cos \frac{\sqrt{2\pi}(x-y)}{4L} \right) \quad (3.6)$$

$$\theta_{osnova/potka} = \tan^{-1} \left(-\frac{\pi H}{8L} \cdot \sin \frac{\sqrt{2\pi}(x+y)}{4L} \right) \quad (3.7)$$

$$\varphi_{potka1/potka2} = \tan^{-1} \left(\mp \frac{\pi H}{8L} \cdot \sin \frac{\sqrt{2\pi}(x-y)}{4L} \right) \quad (3.8)$$

3.2 Аналитички модел - Конститутивно моделирање

Моделирање понашања текстилног композита при оптерећењу представља комплексан задатак. Међутим, транспортна трака је највећим делом током свог радног века оптерећена затезним оптерећењем у равни, као и делимично смицајним оптерећењем. Због тога ће управо ти случајеви бити предмет даље анализе.

Конститутивно моделирање ће бити описано у локалном координатном систему због тога што су у њему у претходном поглављу дефинисане оријентације нити тканине. Конститутивне једначине дефинисане у локалном координатном систему се могу трансформисати у глобални координатни систем путем трансформационе матрице T дефинисане у [92]:

$$\begin{aligned} \sigma^g &= T^T \sigma^l \\ \varepsilon^g &= (T^T)^{-1} \varepsilon^l \\ C^g &= T C^l T^T \end{aligned} \quad (3.9)$$

Полипропилен и полиестер су типични полимерни материјали који се често користе за израду носећег слоја транспортне траке, слика 3.5. При малим деформацијама, имају линеарно еластично понашање, док нелинеарни и зависни од брзине деформисања постају када деформације прелазе границу линеарности.



Слика 3.5. Полипропилен а) и полиестер б)

Понашање матрице комп. у еласт. зони је дефинисано Хуковим законом:

$$C_m = \begin{bmatrix} \frac{E_m(1-\nu_m)}{\Delta_m} & \frac{E_m\nu_m}{\Delta_m} & \frac{E_m\nu_m}{\Delta_m} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{E_m\nu_m}{\Delta_m} & \frac{E_m(1-\nu_m)}{\Delta_m} & \frac{E_m\nu_m}{\Delta_m} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{E_m\nu_m}{\Delta_m} & \frac{E_m\nu_m}{\Delta_m} & \frac{E_m(1-\nu_m)}{\Delta_m} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_m \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

где је:

- E_m - Јунгов модул еластичности;
- ν_m - Поасонов однос;
- G_m - модул смицања;
- $\Delta_m = (1+\nu_m) \cdot (1-2\nu_m)$.

Понашање влакана композита у елас. зони је дефинисано Хуковим законом:

$$C_m = \begin{bmatrix} \frac{E_L(1-\nu_{TT})}{\Delta} & \frac{E_T\nu_{LT}}{\Delta} & \frac{E_T\nu_{LT}}{\Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{E_T\nu_{TL}}{\Delta} & \frac{E_T(1-\nu_{LT}\nu_{TL})}{\Delta(1+\nu_{TT})} & \frac{E_T(\nu_{TT}+\nu_{LT}\nu_{TL})}{\Delta(1+\nu_{TT})} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{E_T\nu_{TL}}{\Delta} & \frac{E_T(\nu_{TT}+\nu_{LT}\nu_{TL})}{\Delta(1+\nu_{TT})} & \frac{E_T(1-\nu_{LT}\nu_{TL})}{\Delta(1+\nu_{TT})} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{LT} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{TT} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{TL} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

где је:

- E_L - Јунгов модул еластичности у подужном правцу;
- E_T - Јунгов модул еластичности у попречном правцу;
- ν_{ij} - Поасонов однос;
- G_{LT} , G_{TT} , G_{TL} - модули смицања;
- $\Delta = 1 - \nu_{TT} - 2\nu_{LT}\nu_{TL}$.

У нелинеарној области, понашање наведених полимера се може описати вископластичним Рамасвами-Стоуферовим моделом дефинисаним у [93]. Овај модел описује деформацију полимера у облику брзине деформације где се брзина нелинеарне деформације дефинише као функција више параметара материјала и променљиве тензорског стања. Нелинеарна област ће даље бити анализирана.

3.2.1 Конститутивно моделирање полимера и композита у нелинеарној области

Што се тиче полимера, приликом конститутивног моделирања се мора водити рачуна да њихова реакција на нането оптерећење зависи од брзине nanoшења. За мале деформације, користе се линеарне вискоеластичне технике. Код ових техника се користи комбинација опруга и пригушивача у редној и паралелној вези како би се измоделирало понашање у зависности од брзине деформације. Када су деформације велике и понашање више није линеарно, могу се користити нелинеарни вископластични модели.

Други начин је молекуларни приступ. У овом случају, претпоставка је да деформација полимера настаје услед кретања молекуларних ланаца преко баријера потенцијалне енергије. Молекуларно кретање настаје услед нанетог оптерећења и претпоставља се да унутрашња вискозност опада са нанетим оптерећењем. Напон течења се дефинише као тачка где унутрашња вискозност опадне до момента када се изједначи брзина спољне деформације са брзином унутрашње пластичне деформације. Унутрашњи напони се могу дефинисати као отпор молекуларном кретању који тежи да врати материјал у првобитан облик. Са друге стране, деформацију полимера је могуће дефинисати као одмотавање молекуларног чвора. За оба начина дефинисања деформације полимера, развијени су конститутивни модели у којима се деформација представља као функција параметара попут активационе енергије, активационе запремине, молекуларног полупречника, молекуларног угла ротације и термичких константи. Даље, претпоставља се да је деформација функција различитих променљивих стања које представљају отпорност на молекуларно кретање. Вредности променљивих стања се развијају са променом напона, амплитуде нееластичне деформације и брзине нееластичне деформације. Променљива стања је величина која се користи да опише математичко стање динамичког система. Интуитивно, стање система описује систем довољно добро како би се дефинисало будуће понашање у одсуству било каквих екстерних сила које би утицале на систем. Модели који се састоје од упарених диференцијалних једначина првог реда представљају променљиву стања. У машинским системима, променљиве стања могу бити координате позиције и брзине машинских елемената. Познавајући ове елементе, могуће је дефинисати будуће стање предмета у динамичком систему.

Трећи начин конститутивног моделирања полимера се заснива на искоришћењу, директно или кроз модификације, вископластичних конститутивних једначине које су развијене за метале. Потребно је водити рачуна о томе да се полимери различито понашају од метала током пузања, релаксације и растерећења.

Што се тиче конститутивног моделирања композита, могуће је приступити са макроскопског и микромеханичког аспекта.

У макроскопском аспекту, композитни материјал се моделира као анизотропан, хомоген материјал без обраћања пажње на индивидуалне градивне елементе композита. Постоје различити макроскопски модели који се користе за анализу понашања нелинеарних деформација композита код великих брзина деформације. Код нпр. ламинарних композита сачињених од термопластике ојачане угљеничним влакнима, користи се квадратна пластична потенцијална функција. Даље је развијена скалирајућа функција како би се у обзир узела оријентација влакана у једном слоју композита. Употребом методе коначних елемената, могуће је аналитичке методе проверити нумерички. Сваки слој је могуће моделирати као засебну целину и тиме је могуће испитивати различите материјале у композиту. У микроскопском аспекту, карактеристике материјала и реакције на оптерећење се рачунају на основу понашања индивидуалних градивних ћелија материјала. Овде посебно на значају има метода коначних елемената где је могуће засебно моделирати полимерна влакна и матрицу и анализирати њихов међусобни утицај. Битно је нагласити да се макромеханички приступ базира на једном слоју композита и анализира његову нелинеарност и зависност од брзине деформације, док се микромеханички приступ базира на градивним ћелијама материјала и анализира њихову нелинеарност и зависност од брзине деформације.

3.2.2 Конститутивне једначине нелинеарне области

Утицај брзине деформације на полимерни текстилни композит зависи од реакције матрице композита. Уколико оптерећење изазове деформацију већу од 2%, полимери улазе у нелинеарну зону [94]. Због тога постоји потреба за конститутивним једначинама које би обухватиле нелинеарно, од брзине деформације зависно понашање матрице композита.

Могуће је искористити конститутивне једначине за полимере које укључују механизме деформације материјала. Што се тиче полимера, деформација настаје услед кретања молекуларних ланаца у материјалу. При малим вредностима деформације, пре достизања границе еластичности, постоји отпор молекуларном кретању. У конститутивним моделима, приступ применом променљиве стања се може искористити како би се моделирали механизми који изазивају деформацију материјала. Овакав приступ се активно користи за моделирање понашања метала у нееластичној области који показују вископластично понашање када су загрејани изнад половине температуре топљења. Битна карактеристика овог приступа јесте да се у њему не дефинише напон течења или крај еластичне области. Дакле, нееластична деформација се сматра присутном код свих нивоа оптерећења. Једноставно се нееластична деформација посматра као веома мала појава у односу на еластичну деформацију при малим вредностима оптерећења. Када нееластична деформација достигне значајан ниво, крива напон-деформација почиње да показује нелинеарно понашање. Могуће је једном унифицираном променљивом стања представити сву нееластичну деформацију. Ефекти вискоеластичности,

пластичности и пузања нису раздвојени код овог приступа, већ су сједињени кроз једну унифицирану варијаблу. Постоје физичке индикације које наводе на примену променљивих стања које су развијене за метале. Што се тиче полимера, унифицирана нееластична променљива стања се може применити ради описивања нелинеарног понашања. Заравњење криве напон-деформација код метала, које настаје током цикличног оптерећења у зони пластичне деформације, и напон течења код полимера, могу се заједно дефинисати као моменат када даљи пораст деформације не изазива пораст напона. Неопходно је истаћи да постоје ограничења приликом употребе модела развијених за метале код полимера. Полимери показују нелинеарно понашање приликом растерећења, док метали показују линеарно понашање. Феномени попут пузања и релаксације не могу се представити употребом овог начина. На крају, важно је рећи да се најприближнији резултати добијају у случају затезног оптерећења. Како је управо то најчешћи вид оптерећења транспортне траке, истраживање ће се наставити у том правцу.

Три конститутивне једначине су разматране како би се симулирало деформационо понашање полимерне матрице. Анализирани су само униаксијални облици ових једначина. Све једначине се у својој тродимензионалној форми базирају на девијаторним напонима и инваријантима напона који су код метала и полимера главни узроци нееластичне деформације [95].

Укупна брзина деформације се добија као збир брзине еластичне и нееластичне деформације која се за униаксијално оптерећење може изразити као:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \dot{\varepsilon}^I \quad (3.12)$$

где је:

- $\dot{\varepsilon}$ - укупна брзина деформације;
- $\dot{\sigma}$ - брзина промене напона;
- $\dot{\varepsilon}^I$ - брзине нееластичне деформације;
- E - модул еластичности материјала.

За све разматране конститутивне једначине, усвајане су кључне претпоставке. Као прво, иако код великих брзина деформације адијабатско загревање може бити значајан фактор, у овом случају ће се температурни утицаји занемарити и сматраће се да влада собна температура. Као друго, претпостављено је да вредности деформација неће бити високе. У реалности, полимери су изложени деформацијама високе вредности.

Прва конститутивна једначина која се разматра јесте једноставан закон снаге. Ова једначина, заснована на једначини развијеној у [96], веома је слична Максвеловој једначини која се користи за линеарну вискоеластичну анализу полимера. Такође, једначина личи на Архенијусову једначину за анализу пузања код метала. Брзина нееластичне деформације има следећи облик, где је скалирајући фактор од $1/s$ претпостављен да множи десну страну једначине како би се осигурала компатибилност јединица:

$$\dot{\varepsilon}^I = \left(\frac{|\sigma|}{Z} \right)^n \cdot \frac{\sigma}{|\sigma|} \quad (3.13)$$

где је:

- σ - укупни напон;
- n - константа која контролише зависност од брзине деформације;
- Z - скаларна променљива стања која представља отпорност молекуларном кретању.

Развој променљиве стања Z се може дефинисати преко следећег израза:

$$\dot{Z} = q(Z_1 - Z)|\dot{\varepsilon}^I| \quad (3.14)$$

где је:

- \dot{Z} - брзина промене променљиве стања;
- q - константа материјала;
- Z_1 - вредност променљиве стања при напону засићења;
- Z - тренутна вредност променљиве стања.

Напон засићења настаје када се материјал циклично оптерећује и растерећује амплитудом која залази у пластичну, тј. нееластичну зону. Прво долази до напона ојачања који настаје када се материјал деформише изнад тачке течења. Потребно је повећање оптерећења како би се произвела додатна пластична деформација и материјал постаје ојачан и отпорнији на деформацију. После тачке ојачања долази до тачке засићења. По достизању напона ојачања, сваки следећи циклус оптерећење-растерећење једнаке амплитуде доводи до појаве исте криве напон-деформација где се максимални напон назива напон засићења. При том нивоу напона, брзина нееластичне деформације може се сматрати једнаком брзини нанете деформације при затезним испитивањима где је брзина деформације константна [95].

Једначина 3.14 се може трансформисати у следећи облик како би се исказала вредност променљиве стања Z

$$Z = Z_1 - (Z_1 - Z_0) \cdot \exp(-q|\dot{\varepsilon}^I|) \quad (3.15)$$

где је:

- Z_0 - иницијална вредност променљиве стања.

Друга конститутивна једначина која се разматра је развијена у [97] и оригинално се користила за моделирање деформација код метала. Назива се Боднерова једначина. Ова једначина дефинише брзину нееластичне деформације као пропорционалну експоненцијалној вредности напона:

$$\dot{\varepsilon}^I = \frac{2}{\sqrt{3}} D_0 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{Z}{|\sigma|} \right)^{2n} \right] \cdot \frac{\sigma}{|\sigma|} \quad (3.16)$$

где је:

- D_0 - константа материјала која је скалирајући фактор који представља максималну брзину нееластичне деформације.

Једначина 3.14 се користи како би се одредио развој променљиве стања Z .

Трећа конститутивна једначина која се разматра развијена је у [95] и оригинално је коришћена за метале. Назива се Рамасвами-Стоуферов модел или Рамасвами-Стоуферова једначина. Главна разлика између Боднерове и Рамасвами-Стоуферове једначине је у томе што ова друга користи тензорску уместо скаларне променљиве стања. Тензорска променљива стања представља унутрашњи напон који моделира отпорност молекуларном кретању. Брзина нееластичне деформације повезана је са разликом између нанетог оптерећења и унутрашњег напона. За разлику од скаларне, тензорска променљива стања зависи од просторне оријентације. Сматра се да променљива стања има вредност 0 када материјал није оптерећен и да расте до максимума при заравњењу криве напон-деформација. Такође, употребом ове једначине је могуће моделовати нелинеарну реакцију полимера при растерећењу.

Брзину нееластичне деформације је могуће представити следећим изразом:

$$\dot{\varepsilon}^I = \frac{2}{\sqrt{3}} D_0 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{Z_0}{|\sigma - \Omega|} \right)^{2n} \right] \cdot \frac{\sigma - \Omega}{|\sigma - \Omega|} \quad (3.17)$$

где је:

- Ω - тензорска променљива стања која представља отпорност молекуларном кретању;
- Z_0 - изотропска иницијална вредност променљиве стања.

Отпорност молекуларном кретању се дефинише као повратни напон. Његов смер је увек супротан смеру нанетог оптерећења и проузрокован је геометријски неопходним дислокацијама које се акумулирају током испитивања.

Развој тензорске променљиве стања Ω се може дефинисати путем следећег израза:

$$\dot{\Omega} = q \Omega_m \dot{\varepsilon}^I - q \Omega |\dot{\varepsilon}^I| \quad (3.18)$$

где је:

- $\dot{\Omega}$ - брзина промене тензорске променљиве стања;
- q - константа материјала која представља брзину очвршћавања;
- Ω_m - повратни напон при напону засићења.

У случају затезног оптерећења материјала, где је апсолутна вредност брзине нееластичне деформације једнака брзини нееластичне деформације, једначина 3.18 се може трансформисати у следећи облик:

$$\Omega = \Omega_m - \Omega_m \exp(-q\varepsilon^l) \quad (3.19)$$

где је:

- ε^l - нееластична деформација.

Даље, дефинишу се константе материјала. Што се тиче константе материјала D_0 која је скалирајући фактор, претпоставка је да D_0 има вредност 10^4 пута максимална брзина укупне деформације. Сматра се да представља ограничавајући фактор брзине нееластичне деформације. Да би се дефинисале константе n, Z_0 и Ω_m , потребно је урадити природан логаритам једначине 3.17. Вредности брзине нееластичне деформације, напона и тензорске променљиве стања при напону засићења уносе се у резултујући израз. Добијена једначине гласи:

$$\ln \left[-2 \ln \left(\frac{\sqrt{3} \dot{\varepsilon}_0}{2D_0} \right) \right] = 2n \ln(Z_0) - 2n \ln(\sigma_s - \Omega_m) \quad (3.20)$$

где је:

- σ_s - напон засићења;
- $\dot{\varepsilon}_0$ - константа нанета брзина деформације.

Да би се дефинисале потребне константе, потребно је генерисати фамилију криви напон-деформација при тестовима на затезање где се свака крива добија при другачијој брзини деформације. Парови података о укупној брзини деформације и напона засићења се узимају са сваке криве. Вредности за Ω_m дефинишу се за сваки материјал посебно, али може се са довољно прецизности користити вредност у распону од 50% до 75% од напона засићења. Уколико испитивани материјал не достигне напон засићења, тј. заравњење криве, потребно је урадити екстраполацију како би се проценио напон засићења. За сваку брзину деформације, узима се природни алгоритам разлике напона засићења и процене за Ω_m . Добијена вредност се сматра x координатом тачке на главној криви. Слично, за сваку брзину деформације, она се уноси у леву страну једначине 3.20 и добијена вредност се сматра y координатом на главној криви. Пар података добијених при једној брзини испитивања представља једну тачку на главној криви. Број тачака главне криве једнак је броју тестова на затезање са различитим брзинама деформације узорка. При добијању главне криве, могуће је применити регресиону методу најмањих квадрата. Нагиб најбоље линије је једнак $-2n$. Моменат када најбоља линија сече y осу може се дефинисати као $2n \ln(Z_0)$. На крају се вредности Ω_m могу кориговати док се не добије оптимално поклапање добијене линије са тачкама података.

Да би се дефинисала вредност константе материјала q , потребно је трансформисати једначину 3.19. При достизању напона засићења, вредност повратног напона достиже своју максималну вредност што имплицира да

експоненцијални део израза тежи 0. Уколико се претпостави да напон засићења настаје када је следећа релација задовољена:

$$\exp(-q\varepsilon_s^I) = 0,01 \quad (3.21)$$

могуће је решити једначину за q , где је:

- ε_s^I - нееластична деформација при напону засићења.

Вредност нееластичне деформације при напону засићења процењује се одређујући укупну деформацију при напону засићења са криве напон-деформација настале при константном затезању материјала. Када се одреди вредност укупне деформације, одузима се вредност еластичне деформације. Еластична деформација се рачуна као количник напона засићења и модула еластичности материјала. Добијена вредност нееластичне деформације при напону засићења уводи се у једначину 3.21 и добија се вредност q . Уколико се покаже да вредност нееластичне деформације при напону засићења варира са променом брзине деформације, константа q се рачуна за сваку брзину деформације посебно. Затим се користе регресионе методе како би се дефинисао израз за промену константе у зависности од брзине.

На крају, остало је да се дефинишу изотропска иницијална вредност променљиве стања Z_0 и константа материјала која контролише зависност од брзине деформације n . Користи се следећа релација:

$$y = -2nx + 2n \ln(Z_0) \quad (3.22)$$

Вредност непознате x се рачуна према:

$$x = \ln(\sigma_s - \Omega_m) \quad (3.23)$$

Вредност непознате y се рачуна према:

$$y = \ln \left[-2 \ln \left(\frac{\sqrt{3}\dot{\varepsilon}_0}{2D_0} \right) \right] \quad (3.24)$$

Једначина 3.22 показује да је непозната y у линеарној вези са непознатом x . Због тога је могуће спровести више затезних испитивања материјала при различитим константним брзинама деформације како би се прикупили парови података (x_i, y_i) . Употребом регресионе методе најмањих квадрата, добија се функција која најбоље описује њихову зависност. Са добијене криве се могу извући константе Z_0 и n .

Једначине 3.17 и 3.18 дефинишу униаксијални Рамасвами-Стоуферов модел. Могуће је проширити их како би се дефинисала тродимензионална једначина:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^I = D_0 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{Z_0^2}{3K_2} \right)^n \right] \cdot \frac{S_{ij} - \Omega_{ij}}{\sqrt{K_2}} \quad (3.25)$$

где је:

- S_{ij} - компонента девијаторног напона;
- Ω_{ij} - компонента тензорске променљиве стања;
- $\dot{\varepsilon}_{ij}^I$ - компонента брзине нееластичне деформације;
- K_2 - коефицијент стања.

Коефицијент стања се дефинише на следећи начин:

$$K_2 = \frac{1}{2}(S_{ij} - \Omega_{ij})(S_{ij} - \Omega_{ij}) \quad (3.26)$$

Када се једначине 3.25 и 3.26 уврсте у микромеханички модел о ком ће бити касније речи, нелинеарна деформација и компонента смицајног напона у ламинатима где су влакна оријентисана тако да трпе смицајна оптерећења, нпр. 45° , не поклапају се са експерименталним резултатима. Разлог томе су ефекти хидростатичког напона на нееластичну деформацију. Хидростатички напон утиче на понашање полимера у зони течења. Ранија истраживања [99] указују да у случају мултиаксијалног оптерећења влакана полимера долази до израженог утицаја хидростатичког напона, те да правац пружања влакана од 45° може да се посматра у том духу. Да би се укључио утицај хидростатичког напона, потребно је да се преформулише коефицијент стања K_2 . Једначина 3.26 се трансформише да гласи:

$$K_2 = \frac{1}{2}[K_{11} + K_{22} + K_{33} + 2(K_{12} + K_{13} + K_{23})] \quad (3.27)$$

Нормалне компоненте (11, 22, 33) у једначини 3.27 задржавају оригиналну формулацију према једначини 3.26:

$$K_{11} = (S_{11} - \Omega_{11})(S_{11} - \Omega_{11}) \quad (3.28)$$

$$K_{22} = (S_{22} - \Omega_{22})(S_{22} - \Omega_{22}) \quad (3.29)$$

$$K_{33} = (S_{33} - \Omega_{33})(S_{33} - \Omega_{33}) \quad (3.30)$$

Међутим, смицајне компоненте се дефинишу на следећи начин:

$$K_{12} = \alpha(S_{12} - \Omega_{12})(S_{12} - \Omega_{12}) \quad (3.31)$$

$$K_{13} = \alpha(S_{13} - \Omega_{13})(S_{13} - \Omega_{13}) \quad (3.32)$$

$$K_{23} = \alpha(S_{23} - \Omega_{23})(S_{23} - \Omega_{23}) \quad (3.33)$$

где је:

- α - параметар напона.

Параметар напона се дефинише на следећи начин:

$$\alpha = \left(\frac{\sigma_m}{\sqrt{J_2}} \right)^\beta \quad (3.34)$$

где је:

- σ_m - средњи напон;
- J_2 - друга инваријанта девијаторног тензора напона;
- β - константа материјала зависна од брзине деформације.

Да би се дефинисала константа материјала β , потребно је спровести низ експеримената како би се добиле адекватне криве понашања и преко њих добиле вредности константе за сваку брзину деформације понаособ.

Даље, брзина промене тензорске променљиве стања дефинише се као:

$$\dot{\Omega}_{ij} = \frac{2}{3} q \Omega_m \dot{\varepsilon}_{ij}^I - q \Omega_{ij} \dot{\varepsilon}_e^I \quad (3.35)$$

где је:

- $\dot{\varepsilon}_e^I$ - ефективна брзина нееластичне деформације.

Ефективна брзина нееластичне деформације се дефинише преко следећег израза:

$$\dot{\varepsilon}_e^I = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij}^I \dot{\varepsilon}_{ij}^I} \quad (3.36)$$

Поновљена компонента у изразу указује на сабирање употребом стандардне нотације индекса.

Кључна разлика између Рамасвами-Стоуферовог модела и осталих једначина које користе тензорске променљиве стања, попут Валкеровог модела [98], лежи у дефиницији тензорске променљиве стања. Код Рамасвами-Стоуферовог модела, повратни напон је дефинисан на исти начин као напонски девијатор. При униаксијалном оптерећењу материјала, тензорска променљива стања има следећи облик:

$$[\Omega_{ij}] = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} \Omega & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{3} \Omega & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{3} \Omega \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

где је:

- Ω - униаксијална вредност променљиве стања.

У Валкеровом моделу, тензорска променљива стања при униаксијалном оптерећењу материјала дефинише се као:

$$[\Omega_{ij}] = \begin{bmatrix} \Omega & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2}\Omega & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{2}\Omega \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

Иако оба тензора представљају девијаторске тензоре, различит начин дефинисања променљиве стања имплицира различит начин дефинисања коефицијента стања K_2 у Валкеровом моделу:

$$K_2 = \frac{2}{3} \left(\frac{3}{2} S_{ij} - \Omega_{ij} \right) \left(\frac{3}{2} S_{ij} - \Omega_{ij} \right) \quad (3.39)$$

У [95] је наглашено да вредности константи материјала дефинисане за униаксијални Рамасвами-Стоуферов модел важе и за тродимензионални облик.

3.2.3 Нумеричка имплементација конститутивних једначина

Рунге-Кутеова метода за тродимензионални облик Рамасвами-Стоуферовог модела

Да би се проверио тродимензионални облик Рамасвами-Стоуферовог модела нумерички, развијен је алгоритам. Алгоритам подразумева nanoшеће оптерећења док се контролише деформација материјала. Могуће је користити Рунге-Кутеову методу четвртог реда због једноставности њене примене. Да би се прорачунао скуп вредности променљивих y_n у временском кораку $t + \Delta t$, где је t тренутно време, а Δt временски инкремент, користе се следеће једначине:

$$y_n(t + \Delta t) = y_n(t) + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (3.40)$$

$$k_1 = \Delta t \cdot y'_n(t, y_n) \quad (3.41)$$

$$k_2 = \Delta t \cdot y'_n\left(t + \frac{1}{2}\Delta t, y_n + \frac{1}{2}k_1\right) \quad (3.42)$$

$$k_3 = \Delta t \cdot y'_n\left(t + \frac{1}{2}\Delta t, y_n + \frac{1}{2}k_2\right) \quad (3.43)$$

$$k_4 = \Delta t \cdot y'_n\left(t + \Delta t, y_n + k_3\right) \quad (3.44)$$

где је:

- y'_n - први извод променљиве y_n .

Коефицијент стања се прорачунава помоћу једначина (3.27) - (3.34). Брзина нееластичне деформације рачуна се помоћу једначине (3.25), брзина промене тензорске променљиве стања рачуна се помоћу једначине (3.35) и (3.36). Поасонов однос за еластичну област и брзина нееластичне деформације су коришћене за

прорачун брзине укупне деформације. Укупна деформација, нееластична деформација и напон могу се прорачунати помоћу једначина (3.40) - (3.44).

Итеративна метода за униаксијални облик Рамасвами-Стоуферовог модела

За униаксијални Рамасвами-Стоуферов модел, могуће је применити итеративну методу. На почетку, анализирају се криве напон-деформација за различите брзине деформације и на основу њих се прорачунају константе материјала D_0, q, Z_0, n, Ω_m . По уласку у петљу временског инкремента, рачуна се укупна деформација у моменту $t + \Delta t$ на основу брзине деформације. Првим проласком кроз итерациону петљу, процена напона у моменту $t + \Delta t$ се рачуна на основу Ојлеровог метода:

$$\sigma(t + \Delta t) = E \left[\varepsilon(t + \Delta t) - \varepsilon^I(t) - \dot{\varepsilon}^I(t) \Delta t \right] \quad (3.45)$$

У претходној једначини и једначинама које следе, t представља тренутно време, Δt представља временски инкремент, док су све остале променљиве дефинисане у једначинама 3.12 и 3.17-3.19. Даље, користи се Ојлерова метода за процену брзине промене тензорске променљиве стања, тј. брзине промене повратног напона, док се правило трапезоида користи за процену тензорске променљиве стања, тј. повратног напона у моменту $t + \Delta t$:

$$\dot{\Omega}(t + \Delta t) = q \Omega_m \dot{\varepsilon}^I(t) - q \left[\Omega(t) + \dot{\Omega}(t) \Delta t \right] \left| \dot{\varepsilon}^I(t) \right| \quad (3.46)$$

$$\Omega(t + \Delta t) = \Omega(t) + \frac{\Delta t}{2} \left[\dot{\Omega}(t + \Delta t) + \dot{\Omega}(t) \right] \quad (3.47)$$

Када је прорачунат повратни напон, брзина нееластичне деформације и акумулирана нееластична деформација у моменту $t + \Delta t$ рачунају се:

$$\dot{\varepsilon}^I(t + \Delta t) = \frac{2}{\sqrt{3}} D_0 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{Z_0}{|\sigma(t + \Delta t) - \Omega(t + \Delta t)|} \right)^{2n} \right] \cdot \frac{\sigma(t + \Delta t) - \Omega(t + \Delta t)}{|\sigma(t + \Delta t) - \Omega(t + \Delta t)|} \quad (3.48)$$

$$\varepsilon^I(t + \Delta t) = \varepsilon^I(t) + \frac{\Delta t}{2} \left[\dot{\varepsilon}^I(t + \Delta t) + \dot{\varepsilon}^I(t) \right] \quad (3.49)$$

После првог проласка кроз итеративну петљу, процена напона за моменат $t + \Delta t$ рачуна се помоћу правила трапезоида, док је процена брзине нееластичне деформације у моменту $t + \Delta t$ добијена из претходне итерације:

$$\sigma(t + \Delta t) = E \left[\varepsilon(t + \Delta t) - \varepsilon^I(t) - \left[\dot{\varepsilon}^I(t + \Delta t) + \dot{\varepsilon}^I(t) \right] \frac{\Delta t}{2} \right] \quad (3.50)$$

Процена брзине промене повратног напона прорачунава се на основу следеће једначине:

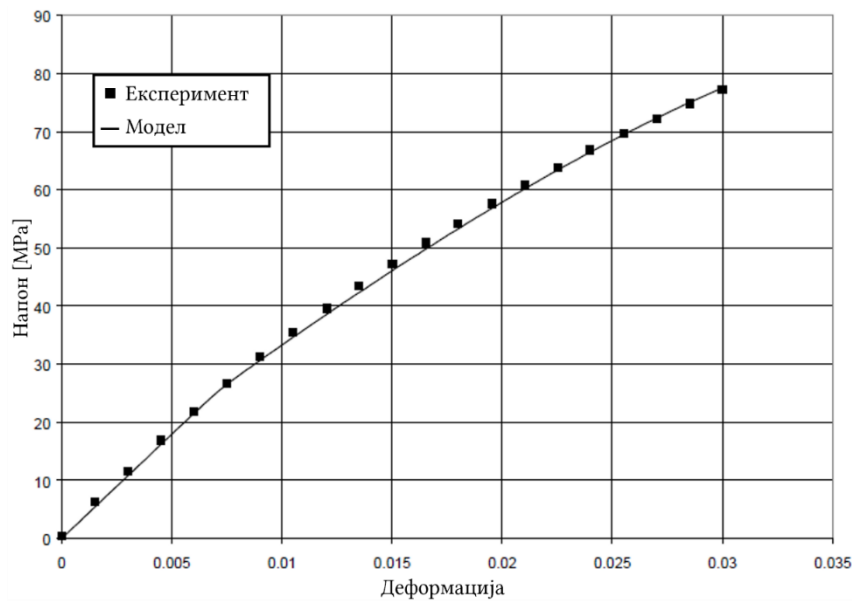
$$\dot{\Omega}(t + \Delta t) = q\Omega_m \dot{\varepsilon}^I(t + \Delta t) - q[\Omega(t + \Delta t) + \Omega(t + \Delta t)\Delta t]|\dot{\varepsilon}^I(t + \Delta t)| \quad (3.51)$$

Процена акумулираног повратног напона у моменту $t + \Delta t$ рачуна се на основу једначине 3.47.

Брзина нееластичне деформације и акумулирана нееластична деформација у моменту $t + \Delta t$ рачунају се на основу једначина 3.48 и 3.49.

Верификација Рамасвами-Стоуферовог модела

Да би се потврдио Рамасвами-Стоуферов модел, испитан је материјал *Fiberite 977-2* који има добра дуктилна својства. Резултати су приказани на слици 3.6.



Слика 3.6. Упоредна анализа експерименталних и аналитичких резултата при брзини деформације од $1 \times 10^{-4}/s$ [93]

3.3 Микромеханички модел

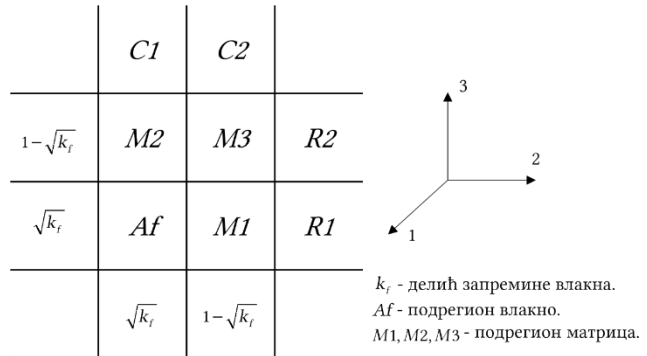
Микромеханички приступ користи се како би се предвиделе ефективне карактеристике и деформациона понашања полимерних композита попут транспортних трака. У микромеханици, ефективне карактеристике и деформациона понашања рачунају се на основу карактеристика индивидуалних градивних елемената – јединичних ћелија.

У овом случају ће се анализирати јединична ћелија која се састоји од једног континуалног влакна и матрице која га окружује [100]. У претходном делу је објашњено да се носећи слој траке после ткања утапа у ојачавајуће средство које представља матрицу у овом случају. Напредније технике подразумевају анализу понашања при оптерећењу једног слоја, а на крају више слојева материјала. О томе ће бити речи касније. Сматра се да владају услови малих деформација и температурни утицаји су занемарени. Влакно се сматра да је трансверзално изотропно и линеарно еластично. За својства матрице се сматра да је изотропна, са

деформационим понашањем које зависи од брзине деформације која ће се рачунати употребом конститутивних једначина дефинисаних у претходном поглављу. Микромеханички приступ који ће бити коришћен се заснива на претходним истраживањима [101] и [102].

Јединична ћелија композита је подељена у четири правоугаона подрегиона где је влакно идеализовано тако да има квадратни облик, слика 3.7.

У јединичној ћелији представљеној на слици 3.7, ћелије Af и $M1$ чине ред $R1$. Ћелије $M2$ и $M3$ чине ред $R2$. Ћелије Af и $M2$ чине колону $C1$. Ћелије $M1$ и $M3$ чине колону $C2$. У координатном систему



Слика 3.7. Геометрија и распоред јединичне ћелије

приказаном на слици 3.7, координата 1 представља правац влакна, координата 2 је управна на правац влакна у равни, док је координата 3 управна на правац влакна изван равни. Сматра се да се оптерећење наноси док се контролише деформација материјала. Такође, претпостављено је да се познаје укупна деформација јединичне ћелије у материјалу, као и нееластична деформација у сваком подрегиону јединичне ћелије.

Индекс f означава карактеристике влакна, а индекс m означава карактеристике матрице. Индекси $Af, M1, M2, M3, R1, R2, C1$ и $C2$ користе се како би се означили напони и деформације у одговарајућим регионима или подрегионима јединичних ћелија. Ознаке напона и деформација, без индекса који означавају подрегион, означавају укупан напон и укупну деформацију јединичне ћелије. Индекс I користи се да би се означила нееластична деформација. Индекси $11, 22,$ и 33 користе се да би се означило напон, деформација и карактеристике материјала дуж координатних оса, док се индекси $12, 13$ и 23 користе да се означе тангенцијални напони у равни, као и пратеће деформације и карактеристике материјала. Симбол E представља модул еластичности, симбол G представља смицајни модул и симбол ν представља Поасонов однос. Симбол σ_{ij} представља тензорске компоненте напона, симбол ε_{ij} представља тензорске компоненте деформације и симбол γ_{ij} представља тангенцијалне компоненте деформације. Симбол k_f представља однос запремине влакна и композита.

Напон и деформација, у сваком појединачном подрегиону, сматрају се ефективним напоном и деформацијом, једнаким средњем напону или средњој деформацији кроз подрегион. Такође, сматра се да су униформни кроз подрегион. Ефективни напон и деформација у редовима 1 и 2, као и у колонама 1 и 2, дефинисани су као просечна вредност напона и деформација у подрегионима. Ефективни напон и деформација у јединичној ћелији дефинисани су као просечна

вредност напона и деформације у редовима 1 и 2 (или колонама 1 и 2). Да би се дефинисала просечна вредност, посматра се вредност напона и деформације кроз запремински удео региона у јединичној ћелији.

Компоненте у матрици усклађености су дефинисане према једначини 3.52. Символ S_{ij} представља компоненте матрице усклађености, а не компоненту девијаторног напона као код конститутивних једначина.

$$S_{11f} = \frac{1}{E_{11f}}, S_{22f} = \frac{1}{E_{22f}}, S_{12f} = \frac{-\nu_{12f}}{E_{11f}}, S_{23f} = \frac{-\nu_{23f}}{E_{22f}}, S_{44f} = \frac{1}{G_{23f}}, S_{66f} = \frac{1}{G_{12f}} \quad (3.52)$$

где је:

- E_{11f} - подужни модул еластичности влакна дуж осе 1;
- E_{22f} - трансверзални модул еластичности влакна;
- ν_{12f} - аксијални Поасонов однос влакна;
- ν_{23f} - трансверзални Поасонов однос влакна;
- G_{12f} - модул смицања влакна у равни;
- G_{23f} - трансверзални модул смицања влакна.

Као што је речено раније, матрица се сматра изотропном где је симбол матрице усклађености S_{ijm} дефинисан као:

$$S_{11m} = \frac{1}{E_m}, S_{12m} = \frac{-\nu_m}{E_m}, S_{66m} = \frac{1}{G_m} \quad (3.53)$$

где је:

- E_m - модул еластичности матрице;
- ν_m - Поасонов однос матрице;
- G_m - модул смицања матрице.

Трансверзално изотропна матрица усклађености користи се како би се повезале деформације са напонима.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} \\ S_{12} & S_{23} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11}^I \\ \varepsilon_{22}^I \\ \varepsilon_{33}^I \end{Bmatrix} \quad (3.54)$$

$$\gamma_{12} = S_{66} \cdot \sigma_{12} + 2 \cdot \varepsilon_{12}^I \quad (3.55)$$

$$\gamma_{13} = S_{66} \cdot \sigma_{13} + 2 \cdot \varepsilon_{13}^I \quad (3.56)$$

$$\gamma_{23} = S_{44} \cdot \sigma_{23} + 2 \cdot \varepsilon_{23}^I \quad (3.57)$$

Додатак компоненти нееластичне деформације стандардном трансверзалном изотропном еластичном закону јесте начин на који је нееластичност повезана са конститутивним једначинама. Што се тиче влакна за које је претпостављено да је линеарно еластично, компоненте нееластичне

деформације су занемарене. Што се тиче матрице, која се сматра изотропном, S_{23} је изједначено са S_{12} , док је S_{44} изједначено са S_{66} . У микромеханичким једначинама, претпостављено је да су познате вредности укупне ефективне деформације у јединичној ћелији, као и да су дате вредности нееластичне деформације за сваки подрегион јединичне ћелије.

3.3.1 Нормални напони и деформације

Што се тиче нормалних напона и деформација (11, 22 и 33), дефинисане су следеће претпоставке:

У правцу влакна:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{11Af} &= \varepsilon_{11Am} = \varepsilon_{11R1} \\ \varepsilon_{11B1} &= \varepsilon_{11B2} = \varepsilon_{11R2} \\ \varepsilon_{11R1} &= \varepsilon_{11R2} = \varepsilon_{11}\end{aligned}\tag{3.58}$$

Управно у односу на правац влакна, у равни:

$$\begin{aligned}\sigma_{22Af} &= \sigma_{22Am} = \sigma_{22R1} \\ \sigma_{11B1} &= \sigma_{22B2} = \sigma_{22R2}\end{aligned}\tag{3.59}$$

$$\varepsilon_{22R1} = \varepsilon_{22R2} = \varepsilon_{22}\tag{3.60}$$

Управно на правац влакна, изван равни:

$$\sigma_{33Af} = \sigma_{33B1} = \sigma_{33C1}\tag{3.61}$$

$$\sigma_{33Am} = \sigma_{33B2} = \sigma_{33C2}$$

$$\varepsilon_{33C1} = \varepsilon_{33C2} = \varepsilon_{33}\tag{3.62}$$

Ефективни напони и деформације у редовима 1 и 2, у колонама 1 и 2 и за јединичну ћелију, прорачунати су осредњавањем по запремини вредности помоћу следећих једначина:

$$\varepsilon_{22R1} = \sqrt{k_f} \cdot \varepsilon_{22Af} + (1 - \sqrt{k_f}) \cdot \varepsilon_{22Am}\tag{3.63}$$

$$\varepsilon_{22R2} = \sqrt{k_f} \cdot \varepsilon_{22B1} + (1 - \sqrt{k_f}) \cdot \varepsilon_{22B2}\tag{3.64}$$

$$\varepsilon_{33C1} = \sqrt{k_f} \cdot \varepsilon_{33Af} + (1 - \sqrt{k_f}) \cdot \varepsilon_{33B1}\tag{3.65}$$

$$\varepsilon_{33C2} = \sqrt{k_f} \cdot \varepsilon_{33Am} + (1 - \sqrt{k_f}) \cdot \varepsilon_{33B2}\tag{3.66}$$

$$\sigma_{11R1} = \sqrt{k_f} \cdot \sigma_{11Af} + (1 - \sqrt{k_f}) \cdot \sigma_{11Am}\tag{3.67}$$

$$\sigma_{11R2} = \sqrt{k_f} \cdot \sigma_{11B1} + (1 - \sqrt{k_f}) \cdot \sigma_{11Am}\tag{3.68}$$

$$\sigma_{11} = \sqrt{k_f} \cdot \sigma_{11R1} + (1 - \sqrt{k_f}) \cdot \sigma_{11R2}\tag{3.69}$$

$$\sigma_{22} = \sqrt{k_f} \cdot \sigma_{22R1} + (1 - \sqrt{k_f}) \cdot \sigma_{22R2} \quad (3.70)$$

$$\sigma_{33} = \sqrt{k_f} \cdot \sigma_{33C1} + (1 - \sqrt{k_f}) \cdot \sigma_{33C2} \quad (3.71)$$

Конститутивне везе за влакно и матрицу су дефинисане помоћу једначине 3.54:

$$\varepsilon_{11f} = S_{11f} \cdot \sigma_{11f} + S_{12f} \cdot \sigma_{22f} + S_{12f} \cdot \sigma_{33f} \quad (3.72)$$

$$\varepsilon_{22f} = S_{12f} \cdot \sigma_{11f} + S_{22f} \cdot \sigma_{22f} + S_{23f} \cdot \sigma_{33f} \quad (3.73)$$

$$\varepsilon_{33f} = S_{12f} \cdot \sigma_{11f} + S_{23f} \cdot \sigma_{22f} + S_{22f} \cdot \sigma_{33f} \quad (3.74)$$

$$\varepsilon_{11m} = S_{11m} \cdot \sigma_{11m} + S_{12m} \cdot \sigma_{22m} + S_{12m} \cdot \sigma_{33m} + \varepsilon_{11m}^I \quad (3.75)$$

$$\varepsilon_{22m} = S_{12m} \cdot \sigma_{11m} + S_{11m} \cdot \sigma_{22m} + S_{12m} \cdot \sigma_{33m} + \varepsilon_{22m}^I \quad (3.76)$$

$$\varepsilon_{33m} = S_{12m} \cdot \sigma_{11m} + S_{12m} \cdot \sigma_{22m} + S_{11m} \cdot \sigma_{33m} + \varepsilon_{33m}^I \quad (3.77)$$

Решавајући једначине 3.72 и 3.75 за сваки подрегион и користећи претпоставке о униформним напонима и деформацијама, добијају се следећи изрази:

$$\sigma_{11Af} = \frac{1}{S_{11f}} (\varepsilon_{11} - S_{12f} \cdot \sigma_{22R1} - S_{12f} \cdot \sigma_{33C1}) \quad (3.78)$$

$$\sigma_{11Am} = \frac{1}{S_{11m}} (\varepsilon_{11} - S_{12m} \cdot \sigma_{22R1} - S_{12m} \cdot \sigma_{33C2} - \varepsilon_{11Am}^I) \quad (3.79)$$

$$\sigma_{11B1} = \frac{1}{S_{11m}} (\varepsilon_{11} - S_{12m} \cdot \sigma_{22R2} - S_{12m} \cdot \sigma_{33C1} - \varepsilon_{11B1}^I) \quad (3.80)$$

$$\sigma_{11B2} = \frac{1}{S_{11m}} (\varepsilon_{11} - S_{12m} \cdot \sigma_{22R2} - S_{12m} \cdot \sigma_{33C2} - \varepsilon_{11B2}^I) \quad (3.81)$$

Једначине 3.78 - 3.81 су уврштене у изразе 3.73 - 3.74 и 3.76 - 3.77 за сваки подрегион примењујући претпоставку о униформним напонима и деформацијама. Добијени изрази су уврштени у једначине 3.63 - 3.66 и добијене су следеће релације:

$$\begin{aligned} & \varepsilon_{22R1} - \left(\sqrt{k_f} \frac{S_{12f}}{S_{11f}} + (1 - \sqrt{k_f}) \frac{S_{12m}}{S_{11m}} \right) \varepsilon_{11} + (1 - \sqrt{k_f}) \frac{S_{12m}}{S_{11m}} \varepsilon_{11Am}^I \\ & - (1 - \sqrt{k_f}) \varepsilon_{22Am}^I = \left(\sqrt{k_f} \left(S_{22f} - \frac{S_{12f}^2}{S_{11f}} \right) + (1 - \sqrt{k_f}) \left(S_{11m} - \frac{S_{12m}^2}{S_{11m}} \right) \right) \sigma_{22R1} \\ & + \left(\sqrt{k_f} \left(S_{23f} - \frac{S_{12f}^2}{S_{11f}} \right) \right) \sigma_{33C1} + \left((1 - \sqrt{k_f}) \left(S_{12m} - \frac{S_{12m}^2}{S_{11m}} \right) \right) \sigma_{33C2} \end{aligned} \quad (3.82)$$

$$\begin{aligned}
& \varepsilon_{22R2} - \frac{S_{12m}}{S_{11m}} \varepsilon_{22} + \sqrt{k_f} \frac{S_{12m}}{S_{11m}} \varepsilon_{11B1}^I - \sqrt{k_f} \varepsilon_{22B1}^I + (1 - \sqrt{k_f}) \frac{S_{12m}}{S_{11m}} \varepsilon_{11B2}^I \\
& - (1 - \sqrt{k_f}) \varepsilon_{22B2}^I = \left(S_{11m} - \frac{S_{12m}^2}{S_{11m}} \right) \sigma_{22R2} + \left(\sqrt{k_f} \left(S_{12m} - \frac{S_{12m}^2}{S_{11m}} \right) \right) \sigma_{33C1} \\
& + \left((1 - \sqrt{k_f}) \left(S_{12m} - \frac{S_{12m}^2}{S_{11m}} \right) \right) \sigma_{33C2}
\end{aligned} \tag{3.83}$$

$$\begin{aligned}
& \varepsilon_{33C1} - \left(\sqrt{k_f} \frac{S_{12f}}{S_{11f}} + (1 - \sqrt{k_f}) \frac{S_{12m}}{S_{11m}} \right) \varepsilon_{11} + (1 - \sqrt{k_f}) \frac{S_{12m}}{S_{11m}} \varepsilon_{11B1}^I \\
& - (1 - \sqrt{k_f}) \varepsilon_{33B1}^I = \left(\sqrt{k_f} \left(S_{22f} - \frac{S_{12f}^2}{S_{11f}} \right) + (1 - \sqrt{k_f}) \left(S_{11m} - \frac{S_{12m}^2}{S_{11m}} \right) \right) \sigma_{33C1} \\
& + \left(\sqrt{k_f} \left(S_{23f} - \frac{S_{12f}^2}{S_{11f}} \right) \right) \sigma_{22R1} + \left((1 - \sqrt{k_f}) \left(S_{12m} - \frac{S_{12m}^2}{S_{11m}} \right) \right) \sigma_{22R2}
\end{aligned} \tag{3.84}$$

$$\begin{aligned}
& \varepsilon_{33C2} - \frac{S_{12m}}{S_{11m}} \varepsilon_{11} + \sqrt{k_f} \frac{S_{12m}}{S_{11m}} \varepsilon_{11Am}^I - \sqrt{k_f} \varepsilon_{33Am}^I + (1 - \sqrt{k_f}) \frac{S_{12m}}{S_{11m}} \varepsilon_{11B2}^I \\
& - (1 - \sqrt{k_f}) \varepsilon_{33B2}^I = \left(S_{11m} - \frac{S_{12m}^2}{S_{11m}} \right) \sigma_{33C2} + \left(\sqrt{k_f} \left(S_{12m} - \frac{S_{12m}^2}{S_{11m}} \right) \right) \sigma_{22R1} \\
& + \left((1 - \sqrt{k_f}) \left(S_{12m} - \frac{S_{12m}^2}{S_{11m}} \right) \right) \sigma_{22R2}
\end{aligned} \tag{3.85}$$

Једначине 3.82 - 3.85, заједно са једначинама 3.78 – 3.81, решене су како би се добили напони у подрегионима. Једначине 3.59, 3.60 и 3.67 - 3.71 искоришћене су како би се срачунао ефективни напон у јединичној ћелији.

3.3.2 Тангенцијални напони и деформације у равни 1-2

За тангенцијалне напоне и деформације у равни (раван 1-2), формиране су следеће претпоставке о униформним напонима и деформацијама:

У равни:

$$\gamma_{12R1} = \gamma_{12R2} = \gamma_{12} \tag{3.86}$$

$$\sigma_{12Af} = \sigma_{12Am} = \sigma_{12R1} \tag{3.87}$$

$$\sigma_{12B1} = \sigma_{12B2} = \sigma_{12R2}$$

Применом осредњавања по запремини, ефективни тангенцијални напони и деформације у равни за редове 1 и 2, дефинишу се према следећим изразима:

$$\gamma_{12R1} = \sqrt{k_f} \cdot \gamma_{12Af} + (1 - \sqrt{k_f}) \cdot \gamma_{12Am} \tag{3.88}$$

$$\gamma_{12R2} = \sqrt{k_f} \cdot \gamma_{12B1} + (1 - \sqrt{k_f}) \cdot \gamma_{12B2}$$

$$\sigma_{12} = \sqrt{k_f} \cdot \sigma_{12R1} + (1 - \sqrt{k_f}) \cdot \sigma_{12R2} \tag{3.89}$$

Конститутивне релације за влакно и матрицу, помоћу једначине 3.55, дефинисане су на следећи начин:

$$\gamma_{12f} = S_{66f} \cdot \sigma_{12f} \quad (3.90)$$

$$\gamma_{12m} = S_{66m} \cdot \sigma_{12m} + 2 \cdot \varepsilon_{12m}^I \quad (3.91)$$

Уносећи једначине 3.90 и 3.91 у једначину 3.88 и примењујући претпоставке о униформном напону и униформној деформацији, добијени су следећи изрази из којих је могуће добити вредности тангенцијалних напона у равни за подрегионе:

$$\gamma_{12} = \left[\sqrt{k_f} \cdot S_{66f} + (1 - \sqrt{k_f}) \cdot S_{66m} \right] \cdot \sigma_{12R1} + 2 \cdot (1 - \sqrt{k_f}) \cdot \varepsilon_{12Am}^I \quad (3.92)$$

$$\gamma_{12} = S_{66m} \cdot \sigma_{12R2} + 2 \cdot \sqrt{k_f} \cdot \varepsilon_{12B1}^I + 2 \cdot (1 - \sqrt{k_f}) \cdot \varepsilon_{12B2}^I \quad (3.93)$$

3.3.3 Трансверзални тангенцијални напони и деформације: равн 1-3

Прорачун трансверзалних тангенцијалних напона у подрегионима у равни 1-3, веома је сличан као прорачун тангенцијалних напона у равни 1-2. Разлика је само у томе што се користе колоне 1 и 2 уместо редова 1 и 2. Униформни напони и деформације, приказани у једначинама 3.86 и 3.87, трансформисани су на следећи начин:

Правац нормалан на влакно:

$$\gamma_{13C1} = \gamma_{13C2} = \gamma_{13} \quad (3.94)$$

$$\sigma_{13Af} = \sigma_{13B1} = \sigma_{13C1} \quad (3.95)$$

$$\sigma_{13Am} = \sigma_{13B2} = \sigma_{13C2}$$

Напони и деформације осредњени по запремини у колонама 1 и 2, рачунају се према следећим релацијама:

$$\gamma_{13C1} = \sqrt{k_f} \cdot \gamma_{13Af} + (1 - \sqrt{k_f}) \cdot \gamma_{13B1} \quad (3.96)$$

$$\gamma_{13C2} = \sqrt{k_f} \cdot \gamma_{13Am} + (1 - \sqrt{k_f}) \cdot \gamma_{13B2}$$

$$\sigma_{13} = \sqrt{k_f} \cdot \sigma_{13C1} + (1 - \sqrt{k_f}) \cdot \sigma_{13C2} \quad (3.97)$$

Уврштавајући једначине 3.92 и 3.93 (мењајући индекс 12 са индексом 13 као што је приказано у једначини 3.56) у једначину 3.96, трансверзални напони у подрегионима у равни 1-3 рачунају се из следећих једначина:

$$\gamma_{13} = \left[\sqrt{k_f} \cdot S_{66f} + (1 - \sqrt{k_f}) \cdot S_{66m} \right] \cdot \sigma_{13C1} + 2 \cdot (1 - \sqrt{k_f}) \cdot \varepsilon_{13B1}^I \quad (3.98)$$

$$\gamma_{13} = S_{66m} \cdot \sigma_{13B2} + 2 \cdot \sqrt{k_f} \cdot \varepsilon_{13Am}^I + 2 \cdot (1 - \sqrt{k_f}) \cdot \varepsilon_{13B2}^I \quad (3.99)$$

3.3.4 Трансверзални тангенцијални напони и деформације: раван 2-3

Да би се прорачунали трансверзални тангенцијални напони у подрегионима у равни 2-3, усвојене су претпоставке о униформном напону:

Правац нормалан на раван:

$$\sigma_{23R1} = \sigma_{23R2} = \sigma_{23} \quad (3.100)$$

$$\sigma_{23Af} = \sigma_{23Am} = \sigma_{23R1} \quad (3.101)$$

$$\sigma_{23B1} = \sigma_{23B2} = \sigma_{23R2}$$

Деформације осредњене по запремини у колонама 1 и 2, као и у јединичној ћелији, рачунају се према следећим релацијама:

$$\gamma_{23R1} = \sqrt{k_f} \cdot \gamma_{23Af} + (1 - \sqrt{k_f}) \cdot \gamma_{23Am} \quad (3.102)$$

$$\gamma_{23R2} = \sqrt{k_f} \cdot \gamma_{23B1} + (1 - \sqrt{k_f}) \cdot \gamma_{23B2}$$

$$\gamma_{23} = \sqrt{k_f} \cdot \gamma_{23R1} + (1 - \sqrt{k_f}) \cdot \gamma_{23R2} \quad (3.103)$$

Конститутивне релације за влакно и матрицу дефинисане су помоћу једначине 3.57:

$$\gamma_{23f} = S_{44f} \cdot \sigma_{23f} \quad (3.104)$$

$$\gamma_{23m} = S_{66m} \cdot \sigma_{23m} \cdot 2 \cdot \varepsilon_{23m}^I \quad (3.105)$$

Уврштајући једначине 3.104 и 3.105 у једначине 3.102 и 3.103, уз примену претпоставке о униформном напону, добија се следећи израз за прорачун трансверзалних тангенцијалних напона у подрегиону у равни 2-3:

$$\begin{aligned} \gamma_{23} = & \left[k_f \cdot S_{44f} + (1 - \sqrt{k_f}) \cdot S_{66m} \right] \cdot \sigma_{23} \\ & + 2 \cdot (1 - \sqrt{k_f}) \cdot \left[\sqrt{k_f} \cdot (\varepsilon_{23m}^I + \varepsilon_{23B1}^I) + (1 - \sqrt{k_f}) \cdot \varepsilon_{23B2}^I \right] \end{aligned} \quad (3.106)$$

3.3.5 Ефективне нееластичне деформације

Приликом доношења оптерећења са контролисаном деформацијом на композитну јединичну ћелију, неопходно је прецизно одредити Поасонов однос. Да би се прорачунао Поасонов однос на основу нанете укупне деформације у одређеном координатном правцу, потребне су ефективне нееластичне деформације у сваком координатном правцу. Да би се прорачунале ефективне нееластичне деформације за јединичну ћелију, једнаке претпоставке о униформној деформацији и напону из претходне секције поново су употребљене.

Конститутивне једначине 3.54-3.57 за влакно и матрицу модификоване су за ове прорачуне. Увођењем поједностављења, комплексност математичког апарата је значајно смањена. Међутим, прецизност добијених резултата није нарушена.

Модификоване конститутивне једначине за нормалне и у равни тангенцијалне напоне дате су следећим релацијама где су сви симболи објашњени раније:

$$\sigma_{11} = E_{11} (\varepsilon_{11} - \varepsilon_{11}^I) \quad (3.107)$$

$$\sigma_{22} = E_{11} (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{22}^I) \quad (3.108)$$

$$\sigma_{12} = G_{12} (\gamma_{12} - 2 \cdot \varepsilon_{12}^I) \quad (3.109)$$

Једначине за трансверзалне тангенцијалне напоне веома су сличне једначини 3.109, са изменом индекса 12 са индекса 13 или 23. Једначина за напон у координатном правцу 3-3 веома је слична једначинама 3.107 и 3.108, са изменом индекса 11 или 22 са индексом 33. Као и раније, вредности нееластичне деформације коришћене су када је разматрана матрица материјала. Даље, за изотропне материјале матрице, E_m је заменило E_{11} и E_{22} , док је G_m заменило G_{12} .

Употребом конститутивних једначина 3.107 и 3.108 за влакно и матрицу, са применом претпоставке о униформном напону и деформацији, тј. једначине 3.58-3.71, добијени су следећи изрази за ефективне нееластичне нормалне деформације:

$$\varepsilon_{11}^I = \frac{(1 - \sqrt{k_f}) E_m (\sqrt{k_f} (\varepsilon_{11Am}^I + \varepsilon_{11B1}^I) + (1 - \sqrt{k_f}) \varepsilon_{11B2}^I)}{(1 - \sqrt{k_f}) E_{11f} + (1 - \sqrt{k_f}) E_m} \quad (3.110)$$

$$\varepsilon_{22}^I = \frac{(1 - \sqrt{k_f}) E' \varepsilon_{22Am}^I + E_m (1 - \sqrt{k_f}) (\sqrt{k_f} \varepsilon_{22B1}^I + (1 - \sqrt{k_f}) \varepsilon_{22B2}^I)}{E' + (1 - \sqrt{k_f}) E_m} \quad (3.111)$$

где је:

$$E' = \frac{\sqrt{k_f} E_{22f} E_m}{E_m \sqrt{k_f} + E_{22f} (1 - \sqrt{k_f})} \quad (3.112)$$

Ефективна нееластична деформација у правцу 3-3 прорачуната је преко једначине 3.111. У овом случају, нееластичне деформације у подрегионима Am и $B1$ замењене су у једначини.

Употребом конститутивне једначине за влакно и матрицу 3.109, заједно са претпоставкама о униформном напону и деформацији, једначине 3.86-3.89, добијен је следећи израз за ефективну нееластичну тангенцијалну деформацију у равни:

$$\varepsilon_{12}^I = \frac{(1 - \sqrt{k_f}) G' \varepsilon_{12Am}^I + G_m (1 - \sqrt{k_f}) (\sqrt{k_f} \varepsilon_{12B1}^I + (1 - \sqrt{k_f}) \varepsilon_{12B2}^I)}{G' + (1 - \sqrt{k_f}) G_m} \quad (3.113)$$

где је:

$$G' = \frac{\sqrt{k_f} G_{12f} G_m}{G_m \sqrt{k_f} + G_{12f} (1 - \sqrt{k_f})} \quad (3.114)$$

Ефективна нееластична деформација у правцу 1-3 управном на раван рачуната је помоћу једначине 3.113 и заменом места нееластичним деформацијама у подрегионима A_m и B_1 . Ефективна нееластична деформација у правцу 2-3 управном на раван добијена је из једначине 3.106:

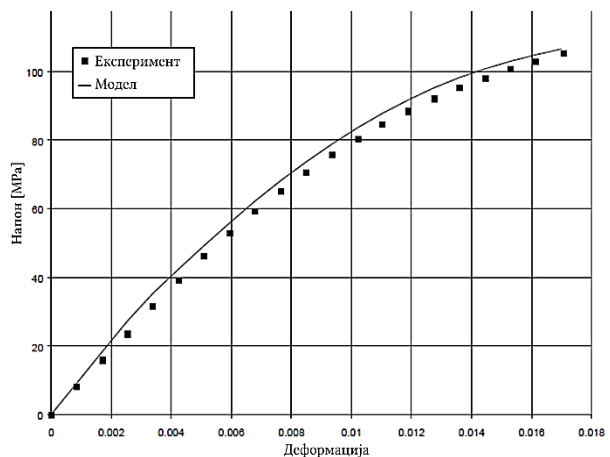
$$\varepsilon_{23}^I = (1 - \sqrt{k_f}) \cdot (\sqrt{k_f} \cdot (\varepsilon_{23A_m}^I + \varepsilon_{23B_1}^I) + (1 - \sqrt{k_f}) \cdot \varepsilon_{23B_2}^I) \quad (3.115)$$

3.3.6 Нумеричка имплементација микромеханичких једначина

Претпостављено је наносење деформације на узорак са контролисаном деформацијом. У алгоритму је деформација дефинисана у одређеном координатном правцу. Да би се добио Поасонов однос, утврђене су ефективне еластичне карактеристике за композит за одређени правац влакна. Еластичне константе у координатном систему материјала добијене су помоћу једначина развијених у [103]. Еластичне константе у структурном координатном систему добијене су помоћу једначина развијених у [104]. Материјални координатни систем приказан је на слици 3.7, док је структурни координатни систем онај координатни систем дуж којег се наносе оптерећења. Материјални координатни систем добија се када се структурни координатни систем ротира око координатне осе 3 за угао који одговара углу простирања влакна у матрици.

Алгоритам Рунге-Кутеове методе четвртог реда укључује прорачун неколико међувредности укупне деформације, нееластичних деформација у подрегионима и напона у подрегионима. Да би се прорачунале међувредности, прво је процена укупне деформације претворена из структурног у материјални координатни систем. Напони у сваком подрегиону су дефинисани на основу микромеханичких једначина. Употребом прорачунатих напона, брзине нееластичне деформације и брзине промене напона у сваком подрегиону прорачунате су на основу полимерних конститутивних једначина. Тензор брзине промене нееластичне деформације прорачунат је за јединичну ћелију у материјалном координатном систему и добијене вредности претворене су у структурни координатни систем. Употребом Поасоновог односа, израчунат је тензор брзине промене укупне деформације у структурним координатном систему. Међувредности потребне за Рунге-Кутеову методу четвртог реда тада су одређене.

Да би се потврдиле микромеханичке једначине, испитан је материјал *Fiberite 977-2* који има добра дуктилна својства. Резултати су приказани на слици 3.8.



Слика 3.8. Упоредна анализа експерименталних и резултата микромеханичких једначина [100]

3.4 Модели отказа

Како би се дефинисали модели отказа који се могу применити при различитим брзинама деформације за полимерне композите, неопходно је прецизно предвидети отказ на нивоу једног слоја што је у корелацији са носећим слојем транспортне траке. Употребљени су Хашинови критеријуми отказа [105].

Хашинови критеријуми отказа базирају се на квадратној комбинацији напона и затезној чврстоћи материјала. Квадратне једначине користе се како би се омогућила најбоља апроксимација отказа уз релативно једноставан модел. Хашин је предвидео четири случаја отказа: отказ влакна услед затезања, отказ влакна услед притиска, отказ матрице композита услед затезања и отказ матрице композита услед притиска. У свим случајевима, сматра се да је отказ наступио уколико је вредност израза један или изнад један. За потребе овог рада, сматра се да је отказ комплетног композита наступио уколико било који од четири случаја има вредност једнаку или већу од један. У реалности, посебно за отказе који се тичу матрице, композит може да поднесе оптерећење и после наступа отказа.

У једначинама које описују случајеве отказа, σ_{ij} представља компоненту нормалног напона, X_T представља затезну чврстоћу слоја у подужном правцу, тј. правцу влакна, а X_C представља притисну чврстоћу слоја у подужном правцу. Даље, Y_T представља затезну чврстоћу слоја у попречном правцу, Y_C представља притисну чврстоћу слоја у попречном правцу, а X_S представља смицајну чврстоћу.

Отказ влакна услед затезања предвиђа се на основу следеће релације:

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{X_S}\right)^2 = 1 \quad (3.116)$$

Отказ влакна услед притиска предвиђа се на основу следеће релације:

$$\frac{|\sigma_{11}|}{X_C} = 1 \quad (3.117)$$

Смицајни напони нису укључени у претходни израз због тога што Хашин није био сигуран да ли они повећавају или смањују притисну чврстоћу. Због тога, они су занемарени.

Отказ матрице композита услед затезања предвиђа се према следећем:

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{X_S}\right)^2 = 1 \quad (3.118)$$

Отказ матрице композита услед притиска предвиђа се према следећем:

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{2X_S}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_C}{2X_S}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_{22}}{Y_C} + \left(\frac{\sigma_{12}}{X_S}\right)^2 = 1 \quad (3.119)$$

Да би се потврдили Хашинови критеријуми, испитан је материјал *Fiberite 977-2* који има добра дуктилна својства. Узорци су испитивани на затезање. Предвиђени напон при отказу износи 480 МПа, а током експеримента је отказ наступио при 500 МПа [100].

У скоријим истраживањима [106] и [107], Хашинови критеријуми су трансформисани како би укључили смицајне напоне. У једначинама које описују случајеве отказа, τ_{ij} представља компоненту смицајног напона, Z_T представља затезну чврстоћу слоја у попречном правцу нормалном на слој, Z_C представља притисну чврстоћу слоја у попречном правцу нормалном на слој. S_{LT} , S_{TT} и S_{TL} представљају смицајну чврстоћу влакна у одговарајућим равнима где L означава подужни правац, а T трансверзални (попречни) правац. Симбол $\langle \rangle$ означава Макаулејеву заграду.

Отказ влакна услед затезања $f_{1fT} (\sigma_{11} \geq 0)$ се предвиђа се према следећем:

$$f_{1fT} = \left(\frac{\langle \sigma_{11} \rangle}{X_T} \right)^2 + \frac{\tau_{12}^2}{S_{LT}^2} + \frac{\tau_{31}^2}{S_{TL}^2} = 1 \quad (3.120)$$

Отказ влакна услед притиска $f_{1fC} (\sigma_{11} < 0)$ се предвиђа се према следећем:

$$f_{1fC} = \left(\frac{-\sigma_{11} - \left\langle -\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{2} \right\rangle}{X_C} \right)^2 = 1 \quad (3.121)$$

Отказ матрице композита услед затезања у равни слоја $f_{2mC} (\sigma_{22} \geq 0)$ предвиђа се према следећем:

$$f_{2mC} = \left(\frac{\langle \sigma_{22} \rangle}{Y_T} \right)^2 + \frac{\tau_{12}^2}{S_{LT}^2} + \frac{\tau_{23}^2}{S_{TT}^2} = 1 \quad (3.122)$$

Отказ матрице композита услед притиска у равни слоја $f_{2mS} (\sigma_{22} < 0)$ предвиђа се према следећем:

$$f_{2mS} = \left(\frac{\langle -\sigma_{22} \rangle}{2S_{TT}} \right)^2 + \left[\left(\frac{Y_C}{2S_{TT}} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_{22}}{Y_C} + \frac{\tau_{12}^2}{S_{LT}^2} = 1 \quad (3.123)$$

Отказ матрице композита услед затезања у равни управној на слој $f_{3mC} (\sigma_{33} \geq 0)$ предвиђа се према следећем:

$$f_{3mC} = \left(\frac{\langle \sigma_{33} \rangle}{Z_T} \right)^2 + \frac{\tau_{23}^2}{S_{TT}^2} + \frac{\tau_{31}^2}{S_{TL}^2} = 1 \quad (3.124)$$

Отказ матрице композита услед притиска у равни управној на слој $f_{3mS} (\sigma_{33} < 0)$ предвиђа се према следећем:

$$f_{3mS} = \left(\frac{\langle -\sigma_{33} \rangle}{2S_{TT}} \right)^2 + \left[\left(\frac{Z_C}{2S_{TT}} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_{33}}{Z_C} + \frac{\tau_{31}^2}{S_{TL}^2} = 1 \quad (3.125)$$

3.5 Понашање текстилног композита после момента отказа

Претходна поглавља се баве понашањем текстилног композита до момента отказа, али је неопходно математички описати понашање и после момента отказа. Могуће је појединачно дефинисати понашање матрице и влакана композита [91].

3.5.1 Еволуција оштећења матрице композита

Полимерна матрица после достизања напона засићења доживљава мале варијације напона. Због тога се примењује критеријум максималне деформације како би се идентификовала тачка где настаје оштећење. Функција отказа матрице композита може се дефинисати као:

$$f_m = \left(\frac{\varepsilon_{eff}}{\varepsilon_{mf}} \right)^2 = 1 \quad (3.126)$$

где су:

- ε_{eff} и ε_{mf} - ефективна и деформација при отказу;

Деформација при отказу зависи од брзине деформације. Због тога је потребно узети у обзир овај феномен приликом анализе деформације при отказу:

$$\varepsilon_{mf} = \begin{cases} \varepsilon_{m0} \left(1 \pm C_{m\varepsilon} \ln \left| \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right| \right) & |\dot{\varepsilon}| > \dot{\varepsilon}_0 \\ \varepsilon_{m0} & |\dot{\varepsilon}| \leq \dot{\varepsilon}_0 \end{cases} \quad (3.127)$$

где су:

- $\dot{\varepsilon}_0$ - референтна брзина деформације;
- ε_{m0} - деформација при отказу мерена при референтној брзини деформације;
- $C_{m\varepsilon}$ - параметар који се користи за скалирање деформације при отказу који се одређује помоћу регресионе методе најмањих квадрата на групи једноосних аксијалних испитивања на затезање која се изводе при различитим брзинама деформације;
- \pm - позитиван предзнак се узима уколико се деформација при отказу повећава са порастом брзине деформације, негативан предзнак се узима уколико се деформација при отказу смањује са порастом брзине.

Еволуцију оштећења матрице композита могуће је формулисати помоћу Вејбулове расподеле према следећем:

$$\omega_m = \begin{cases} 0 & \left| \frac{\varepsilon_{eff}}{\varepsilon_{mf}} \right| \leq 1 \\ 1 - \exp \left[-\frac{1}{\exp(1)} \left(\left(\left| \frac{\varepsilon_{eff}}{\varepsilon_{mf}} \right| \right)^{\beta_m} - 1 \right) \right] & \left| \frac{\varepsilon_{eff}}{\varepsilon_{mf}} \right| > 1 \end{cases} \quad (3.128)$$

где је β_m константа која описује степен еволуције оштећења. На основу једначине 3.128, деградација интегритета материјала услед оштећења може се описати модификовањем еластичности матрице композита дефинисане у једначини 3.10 у $C_m(1 - \omega_m)$.

3.5.2 Еволуција оштећења влакана композита

За описивање еволуције оштећења влакана композита, користи се побољшана Вејбулова расподела у свом једноосном облику:

$$\omega = \begin{cases} 0 & E|\varepsilon| < X \\ 1 - \exp \left(-\frac{1}{m_s \exp(1)} \left(\left(\frac{E|\varepsilon|}{X} \right)^\beta - 1 \right)^{m_s} \right) & E|\varepsilon| \geq X \end{cases} \quad (3.129)$$

где су:

- X - чврстоћа материјала;
- m_s и β - параметри материјала.

На основу предложене формулације, променљиве оштећења које одговарају функцијама отказа дефинисаним једначинама 3.120 - 3.125, могу се изразити у следећем компактном облику:

$$\omega_y = \begin{cases} 0 & F_y < 1 \\ 1 - \exp \left(-\frac{1}{\exp(1)} (F_y^\beta - 1) \right) & F_y \geq 1 \end{cases} \quad (3.130)$$

$$\omega_y = \{ \omega_{1fT} \quad \omega_{1fC} \quad \omega_{2mC} \quad \omega_{2mS} \quad \omega_{3mC} \quad \omega_{3mS} \}^T \quad (3.131)$$

$$\beta = \{ \beta_1 \quad \beta_2 \quad \beta_3 \quad \beta_4 \quad \beta_5 \quad \beta_6 \}^T \quad (3.132)$$

$$F_y = \{ f_{1fT} \quad f_{1fC} \quad f_{2mC} \quad f_{2mS} \quad f_{3mC} \quad f_{3mS} \}^T \quad (3.133)$$

где компоненте F_y представљају 6 функција отказа, а β_i ($i=1,2,\dots,6$) представља коефицијент еволуције оштећења који одговара i -том моделу отказа. Коефицијенти се могу утврдити низом једноосних затезних испитивања узорака материјала. На основу испитивања, сваки коефицијент се може одредити регресионом методом најмањег квадрата која дефинише преосталу чврстоћу на основу измерене преостале чврстоће у моменту отказа σ_j ($j=1,2,\dots,n$) и предвиђене преостале чврстоће $\hat{\sigma}_j$:

$$g(\beta_i) = \sqrt{(\sigma_1 - \hat{\sigma}_1)^2 + \dots + (\sigma_j - \hat{\sigma}_j)^2 + \dots + (\sigma_n - \hat{\sigma}_n)^2} \quad (3.134)$$

где се $\hat{\sigma}_j$ може прорачунати на основу измерене деформације при отказу ε_j :

$$\hat{\sigma}_j = \exp \left(-\frac{1}{\exp(1)} \left(\left(\frac{E|\varepsilon_j|}{X} \right)^{\beta_1} - 1 \right) \right) E\varepsilon_j \quad (3.135)$$

Да би се узела у обзир деградација крутости материјала услед оштећења, понашање влакана композита у еластичној зони дефинисано у једначини 3.11 модификује се у матрицу оштећења, $C(\omega)$, која се може представити као инверзан облик од $S(\omega)$:

$$C(\omega) = S^{-1}(\omega) = \begin{bmatrix} S_d^{-1}(\omega) & 0 \\ 0 & S_s^{-1}(\omega) \end{bmatrix} \quad (3.136)$$

$$S_d(\omega) = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L(1-\omega_1)} & -\frac{\nu_{LT}}{E_L\sqrt{(1-\omega_1)(1-\omega_2)}} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T\sqrt{(1-\omega_1)(1-\omega_3)}} \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_L\sqrt{(1-\omega_1)(1-\omega_2)}} & \frac{1}{E_T(1-\omega_2)} & -\frac{\nu_{TT}}{E_T\sqrt{(1-\omega_2)(1-\omega_3)}} \\ -\frac{\nu_{TL}}{E_T\sqrt{(1-\omega_1)(1-\omega_3)}} & -\frac{\nu_{TT}}{E_T\sqrt{(1-\omega_2)(1-\omega_3)}} & \frac{1}{E_T(1-\omega_3)} \end{bmatrix} \quad (3.137)$$

$$S_s(\omega) = \begin{bmatrix} \frac{1}{G_{LT}(1-\omega_4)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{G_{TT}(1-\omega_5)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{TL}(1-\omega_6)} \end{bmatrix} \quad (3.138)$$

где су:

$$\omega_1 = (\omega_{1fT} \langle \sigma_{11} \rangle - \omega_{1fC} \langle -\sigma_{11} \rangle) / \sigma_{11} \quad (3.139)$$

$$\omega_2 = (\omega_{2mC} \langle \sigma_{22} \rangle - \omega_{2mS} \langle -\sigma_{22} \rangle) / \sigma_{22} \quad (3.140)$$

$$\omega_3 = (\omega_{3mC} \langle \sigma_{33} \rangle - \omega_{3mS} \langle -\sigma_{33} \rangle) / \sigma_{33} \quad (3.141)$$

$$\omega_4 = 1 - (1 - \omega_{1fT})(1 - \omega_{1fC})(1 - \omega_{2mC})(1 - \omega_{2mS}) \quad (3.142)$$

$$\omega_5 = 1 - (1 - \omega_{2mC})(1 - \omega_{2mS})(1 - \omega_{3mC})(1 - \omega_{3mS}) \quad (3.143)$$

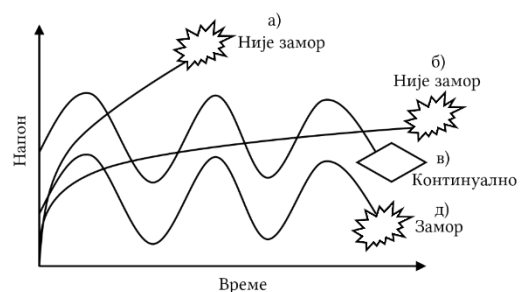
$$\omega_6 = 1 - (1 - \omega_{3mC})(1 - \omega_{3mS})(1 - \omega_{1fT})(1 - \omega_{1fC}) \quad (3.144)$$

4. Замор текстилних композита

Текстилни материјали су са инжењерског аспекта постали занимљиви појавом техничких текстилних материјала. Честа су оштећења текстилних материјала због њихове велике флексибилности и свестраности. Због тога се развила потреба за дубљим разумевањем природе оштећења текстилног материјала, односно влакана која чине основну градивну структуру сваког текстила. Природне или вештачки створене особине влакана одређују њихову чврстоћу, униформност, флексибилност, дуготрајност – одређују њихову способност за индустријску примену. Да би се разумео капацитет текстилних материјала као индустријског елемента, потребно је разумети понашање једног влакна. Због финоће влакна, могуће их је подвргнути врло брзим и контролисаним утицајима температуре, хемијском окружењу, различитим механичким оптерећењима итд. Због тога постоји могућност да се од влакана направи материјал fine структуре који је могуће пројектовати за одређену намену. Такав материјал има већу јачину од материјала који је потпуно униформан по својој структури [108]. Да би се текстилни материјали успешно примењивали у индустријском окружењу, потребно је познавати њихову истрајност и отпорност на велике деформације. Такође, потребно је познавати како ће се понашати током радног века. Због тога су веома битна истраживања на тему замора као једног од најважнијих узрока отказа текстилних материјала. Термин отказ јесте веома широк појам који не дефинише типове и узроке отказа. Најчешћи типови отказа текстилних материјала, а самим тим и влакана, јесу вучење или истезање влакна, предива или тканине до момента пуцања, тј. наношење затезног оптерећења. Осим наношењем затезног оптерећења, материјал се може ослабити трљањем или трењем са сличним или истим материјалима што за последицу има абразивни лом. Абразија је сама по себи позната појава где многи фактори попут температуре, влаге, врсте и природе материјала утичу на начин на који ће се материјал оштетити. Трећа и вероватно најмање очигледна врста отказа јесте она која је узрокована понављањем или наизменичним деловањем силе која је испод затезне чврстоће материјала. Ови откази су узроковани замором материјала.

Наизменично оптерећење и растерећење доводи до отказа услед замора материјала. Међутим, наизменично деловање није ограничено само на затезање или притисак на материјал, већ и учестало савијање и увијање материјала доводи до отказа услед замора.

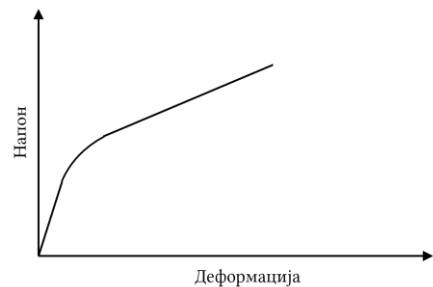
На слици 4.1. је приказана основна разлика између отказа услед достизања затезне чврстоће материјала и отказа услед замора материјала.



Слика 4.1. Разлике између отказа

Када се влакно оптерети великом брзином, отказ услед достигања затезне чврстоће се деси као што је приказано кривом а). Када се влакно оптерети малом брзином, влакно бива изложено постепеном издужењу, односно пузању и достиже тачку лома под мањим оптерећењем након дужег периода испитивања, крива б). Када се наизменично оптерећење јави у форми смањења и повећања нанетог оптерећења, попут синусоиде приказане под в), отказ се не дешава. Конструкције отпорне на замор попут висећих мостова или специјалних трака транспортера са траком су пројектоване на основу овог принципа. Са друге стране, уколико се јави наизменично наношење и уклањање оптерећења (долази до растерећења у том процесу), отказ услед замора материјала се дешава веома брзо, крива д). Замор текстилног влакна је релативно нов концепт уколико се упореди са замором металних конструкција где су различите непредвиђене катастрофе услед појаве замора у ранијем инжењерском добу довеле до озбиљног истраживања ове појаве [109]. Влакна се разликују од метала по једној веома битној чињеници, а то је да влакно не може бити подвргнуто притисном оптерећењу јер под притиском има тенденцију да се извије чиме показује прилично пожељно својство флексибилности и могућност набора, што је потпуно неприхватљиво за метале.

Пошто су влакна полукристални материјали, показују виско-еластичне особине, понашају се делом као вискозни флуид, а делом као еластични материјал. Ово понашање могуће је представити путем типичног дијаграма напон-деформација. Еластичне и пластичне области код виско-еластичних материјала и одговарајуће тачке течења материјала и његовог лома нису прецизно дефинисани код влакнастих материјала.



Слика 4.2. Крива на дијаграму напон-деформација за влакна

Слика 4.2. приказује уобичајен дијаграм напон-деформација за влакнасте материјале. Влакна су анизотропне природе што значи да постоје умерена ограничења за молекуларно поравнање, а тиме и кристалност унутар самог влакна. Ово својство директно утиче на тип отказа влакна у зависности од наношења наизменичног оптерећења на влакно. Због тога отказ влакна настао услед замора може бити далеко сложенији од отказа који претрпи метал. Због ове својствене особине флексибилности влакана, под нормалним условима употребе, ни један појединачни вид отказа се не може сматрати јединим одговорним за крајњи отказ. Под оваквим околностима, материјал може претрпети отказе услед затезања, као и услед савијања и/или увијања са истовременим присуством абразије без узимања у обзир утицаја температуре и влаге. Ово веома збуњујуће и комплексно стање може заправо бити узрок отказа што би се на другачији погрешан начин могло протумачити као отказ услед једнозначног узрочника.

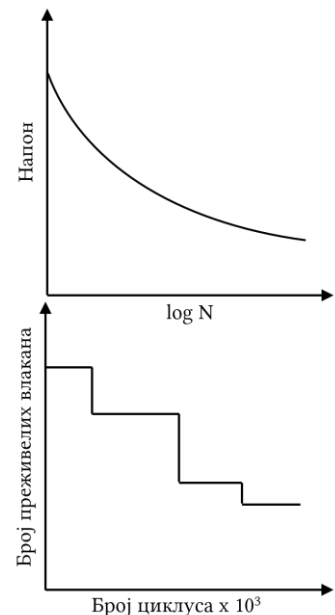
Да би се изоловали и проучавали откази и карактеристике лома узроковане једним режимом рада, направљене су многе специјално дизајниране лабораторије

[110] у последњих четрдесетак година, а многа открића из ове области су објављена у разним научним часописима [111] и на конференцијама [112].

До сада је идентификовано преко двадесет различитих механизма отказа што представља значајне информације за истраживаче ове теме [113]. Ова открића која су често бележена у облику 3Д микрографија, постала су незаобилазан водич за пројектовање производа од текстилних материјала.

Некада су појединачна искуства и методологије покушаја и грешака били доминантан приступ код пројектовања производа од текстилних материјала. Данас је ситуација другачија и производи од текстилних материјала високих перформанси пројектују се и производе на основу функционалности и предвидљивог понашања материјала које постало познато на основу опширних истраживања на тему механизма отказа. Међутим, математичко моделовање и прецизне теоријске поставке које дефинишу критеријуме избора одговарајућег текстилног материјала остају и даље изазов који је потребно дубље истраживати.

Један од уобичајених начина за приказивање заморног века материјала јесте дијаграм на ком је представљена зависност напона од броја циклуса потребних да дође до отказа. С обзиром да је број циклуса док не дође до отказа веома висок, логаритамска скала се користи да би се представио овај податак. Овакав дијаграм се у стручној литератури назива *S-N* дијаграм (*Stress-Number of cycles to failure*). Да би дијаграм имао смисла, бира се једна амплитуда оптерећења док се променљиве – напон и број циклуса, бележе. Када се влакна тестирају на замор, коефицијенти варијација у заморном веку материјала могу да буду веома високи. Због тога није ретко да се користе хистограми или дијаграми преживљавања где се приказује број влакана који преживе тачно одређен број циклуса. На слици 4.3. су приказани типични *S-N* дијаграм и дијаграм преживљавања.



Слика 4.3. *S-N* дијаграм и дијаграм преживљавања

Дијаграми преживљавања могу бити од нарочите помоћи када се проучава отказ услед замора при различитим условима попут температуре и влаге.

Осим хемијског састава материјала и начина тестирања узорка на замор, постоји широки спектар различитих фактора који утичу на резултате испитивања. Испитивање у лабораторијским условима ни у ком случају није прави приказ дешавања током експлоатације, али је најприближнији приказ до којег је могуће доћи са ограниченим ресурсима којима наука располаже у Србији. Променљиве попут физичких величина, садржаја нечистоћа у материјалу, температуре, влаге, услова околине попут киселе или базне средине, присуства и одсуства *UV* зрака утичу на понашање влакна током испитивања на замор.

Пошто се трака транспортера са траком може посматрати као композитни материјал сачињен од текстилних носећих слојева, слојева лепка и гумених заштитних слојева, за њу важе законитости композита, тј. не важе стандардне механичке и физички особине униформних и изотропних материјала попут метала. Због тога другачије подносе оптерећења и механичке деформације. Откази композита не настају нужно ширењем једне пукотине, већ фактори попут оштећења матрице, раслојавања, одлепљивања итд. који делују независно или удружено могу бити узроци отказа.

4.1 Замор при истезању текстилних влакана

Органска влакна малог пречника се користе од традиционалне производње текстила па до напредних техничких конструкција и структура. Отказ влакна који се деси током понављаног нашошења оптерећења и растерећења влакна може довести до озбиљних последица. Због тога је неопходно правилно разумети механизме који доводе до неочекиваног отказа услед замора пре него што је достигнута затезна чврстоћа материјала.

Носећи слојеви трака транспортера са траком се у данашње време производе од великог броја различитих материјала, али акценат ће бити дат на полиестер (полиетилен терефталат – *PET*) и најлон (полиамид 6 и 66) влакна. *PET* влакна се највише употребљавају широм света, док су полиамидна влакна – *PA*, прва вештачки синтетисана влакна на свету и друга су у свету на основу употребе. Обе врста влакана су пронашле своје место у производњи индустријских производа попут пнеуматика, ужади и наравно транспортних трака. Због тога је разумљива жеља да се што боље познаје природа понашања ових влакана услед оптерећења. *PET* и *PA* влакна доживљавају отказ услед замора под одређеним врстама наизменичног оптерећења затезањем. Карактеристичан облик лома који је могуће уочити при отказу влакна услед замора, може бити употребљен приликом дијагностике отказа и пружа увид у механизме који су довели до отказа. Разумевање процеса заморног отказа у овим влакнима може пружити драгоцену искуство које се после може применити како би се отклониле или значајно умањиле шансе да дође до отказа услед замора.

PET и *PA* влакна се производе тако што се извлаче из истопине и чин извлачења поравнава молекуларну структуру влакна побољшавајући његове карактеристике чинећи их анизотропним. Молекули влакна нису у потпуности распоређени паралелно са осом влакна. Да јесу, крутост оваквих влакана би била значајно већа. Због тога су развијени другачији процеси производње влакана како би молекули влакна били што паралелније постављени чиме се постижу високе механичке и термичке способности. Оваква влакна се користе код композита ојачаних влакнима. Један од наведених процеса производње јесте процес стварања кристала у течности где се паралелност молекула постиже радом атомских веза у раствору. Молекули у раствору се природно поравнавају када током производње

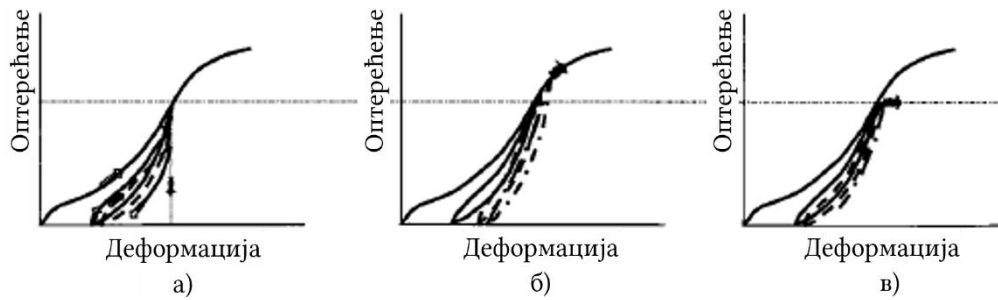
пролазе кроз бризгальку. Слично понашање је могуће уочити приликом транспорта трупца реком. Како би се формирали течни кристали, потребно је да молекули буду крути што се постиже додавањем угљеника током производње. Хемијски процеси, потребни да се овај процес заврши, скупи су и због тога постоје једноставније произведена влакна која су базирана на једноставним и флексибилним полимерима. Употребом разређених раствора полимера у растварачу, могуће је извући влакна чији су молекули поравнати. Влакна чији су молекули поравнати представљају влакна са високим перформансама и као таква чине мали удео светског тржишта текстилних влакана, али диспропорционално томе чине велики удео светског тржишта напредних текстилних материјала који се користе за индустријске производе.

Влакна поседују витку и дугу структуру. Пречник влакана се креће између 5 и 40 микрометара, а техничка влакна која се употребљавају у индустријске сврхе имају пречник између 10 и 25 микрометара. Поређења ради, пречник просечне људске власи је 80 микрометара. Због карактеристичне структуре, влакна су крута током затезања, али су веома савитљива током савијања. Савојна крутост влакна је функција реципрочне вредности четвртог степена пречника влакна. Иако постоје начини да се избегне извијање влакана током притисног оптерећења, највећи број тестова који се спроводе на влакнима су затезне природе [114]. Испитивања влакана путем затезања нису једноставни експерименти због тога што нису брзи и због тога што влакна губе своје карактеристике током испитивања.

Генерално проучавање замора материјала је почело почетком педесетих година прошлог века када се јавио проблем код авиона на млазни погон. Појава замора код метала је била позната и раније, током прве индустријске револуције, али пажња је почела да се поклања тек од средине 20. века.

Метали имају еластичну област где циклична деформација производи цикличан напон. Деформација и напон су фазно поравнати док је материјал у еластичној области и ово значи да је стандардни начин тестирања метала на замор такав да се наноси циклична деформација која индукује фазни циклични напон путем Хуковог закона без варијације амплитуда деформације и напона. Може се приметити да у већини ситуација постоји цикличан напон којем се предмет излаже, а не циклична деформација.

У почетку истраживања замора код влакана покушано је са применом истих принципа као код метала – циклична деформација је примењивана на влакно. Како влакна нису искључиво еластична, пластична деформација која је настајала при сваком циклусу, довела је до издужења узорка што је узрочно утицало на смањење амплитуде оптерећења коју је узорак трпео. Овакав тип једноставног истезања је приказан на слици 4.4. као случај а). Код овог типа истезања, до лома влакна долази при првом циклусу, а може да се деси да уопште не дође до лома због тога што амплитуда оптерећења брзо опада.

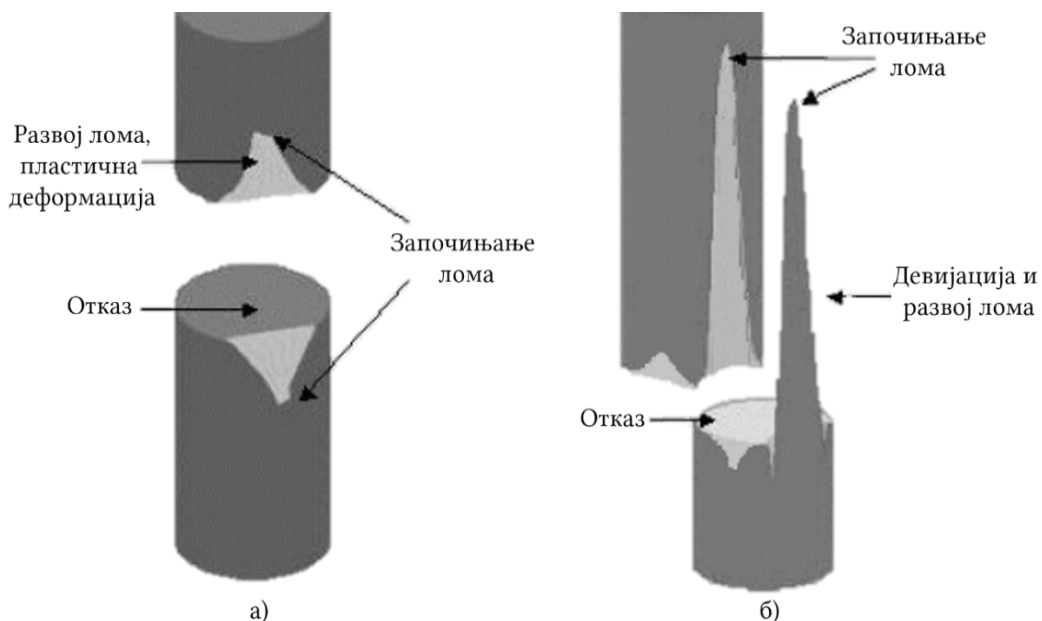


Слика 4.4. Различити начини заморних испитивања – просто циклично затезање а), кумулативно циклично затезање б), максимално циклично затезање в)

Комплексније испитивање омогућава да се феномен акумулиране пластичне деформације уклони. То се постиже акумулираним цикличним издужењем што је на слици 4.4. случај б). Вlakно се поставља у вертикалан положај и пластична деформација се избегава тако што се влакно ослобађа притиска доње чељусту при сваком циклусу. За влакно се закачи тег мале масе и он омогућава да влакно буде затегнуто. Кроз понављање овог поступка, при сваком циклусу долази до смањења запремине влакна између чељусту и долази до пораста вредности на дијаграму напон-деформација. Оптималан начин испитивања влакана јесте путем праћења максималног цикличног оптерећења, одржавајући га константним. Ово подразумева испитни уређај који може да прилагођава оптерећење које се наноси у односу на деформацију влакна, слика 4.4. случај в).

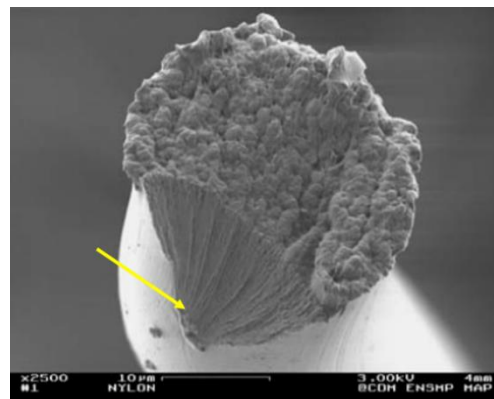
4.1.1 Карактеристике отказа услед затезања и замора

Облик лома влакна услед замора израђеног од полиамида (PA), полиестера (PET) и полиетилен нафталата (PEN) је специфичан и није сличан лому који настаје услед затезања или пузања, слика 4.5.



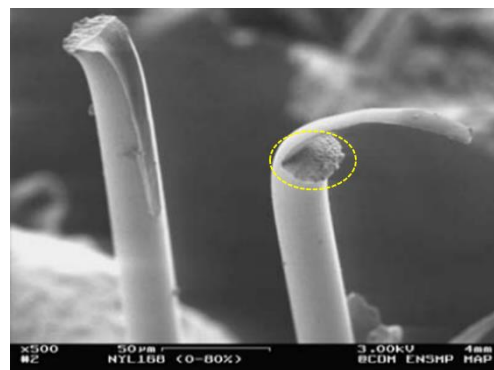
Слика 4.5. Морфологија лома PET и PA влакана – услед затезања или пузања а), услед замора б) [115]

На слици 4.6. приказан је отказ влакна услед затезања израђеног од полиамида *PA66*. Стрелицом је означена зона иницијалне пукотине. Одатле се шири закошена зона лома која настаје због пластичне деформације влакна. Током процеса ширења пукотине, смањује се попречни пресек влакна што доводи до крајњег отказа влакна који настаје услед стварања зоне кидања, која је нормална на његову осу.



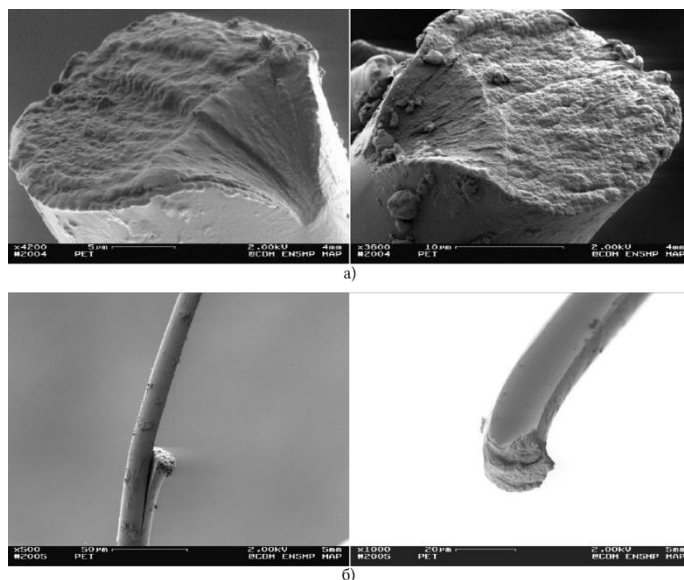
Слика 4.6. Отказ *PA66* влакна услед затезања [116]

На слици 4.7. приказан је отказ влакна услед замора израђеног од полиамида *PA66*. Иницијална пукотина настаје на површини влакна као у претходном случају код затезања. Међутим, разлика је у правцу ширења. Док се пукотина код затезања шири према унутрашњости влакна, код замора се пукотина шири дуж влакна под малим углом у односу на осу влакна. Пукотина се шири до критичне тачке када се попречни пресек влакна смањи и догоди се отказ у корену пукотине. На заокруженом делу слике је могуће видети конкавну зону која је карактеристична за овај вид отказа.



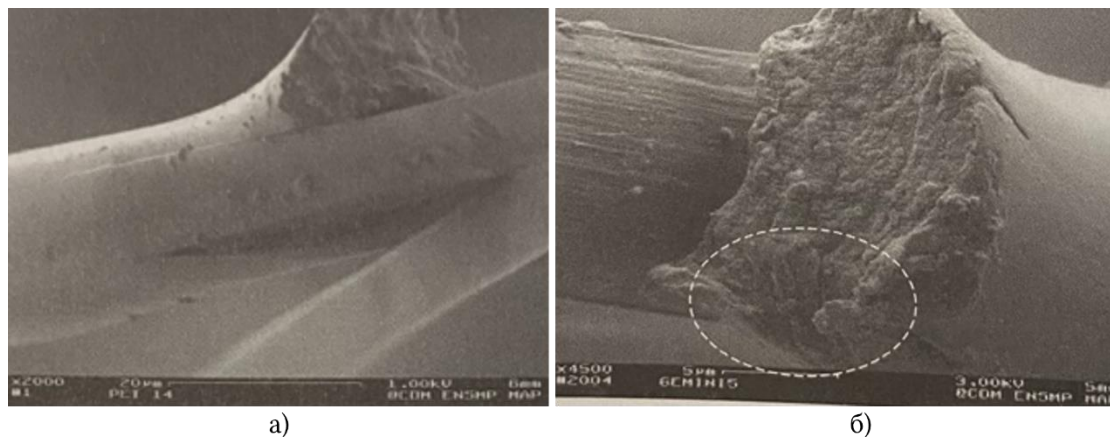
Слика 4.7. Отказ *PA66* влакна услед замора [116]

Попут влакана од полиамида (*PA66*), влакна од полиестера (*PET*) се понашају слично током испитивања на затезање и на замор. Отказ услед затезања има исту морфологију лома као полиамиди, слика 4.8. а). Што се тиче испитивања на замор, морфологија је слична, али постоји јасна разлика која се огледа у томе да је угао ширења пукотине код полиестера мањи него код полиамида. Ова разлика указује да се јавља дужа пукотина код полиестера пре критичног смањења попречног пресека влакна при ком долази до отказа, слика 4.8. б).



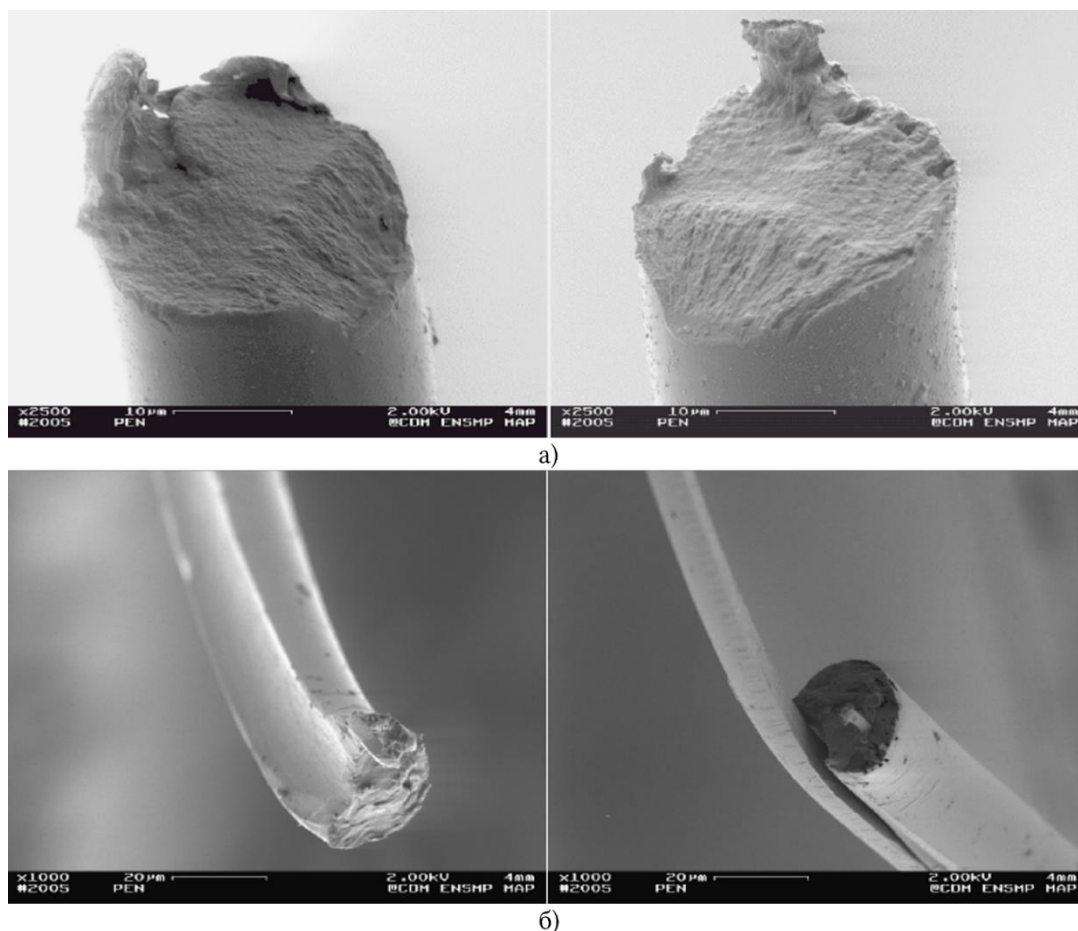
Слика 4.8. Отказ *PET* влакна - услед затезања а), услед замора б) [115]

Последња фаза отказа *PET* влакна насталог услед замора се јавља иза врха пукотине и настаје процес пузања, слика 4.9. а). Пузање започиње са неоштећене стране, а не на површини влакна дуж које се пукотина шири. Ово је приказано на заокруженом делу слике 4.9. б).



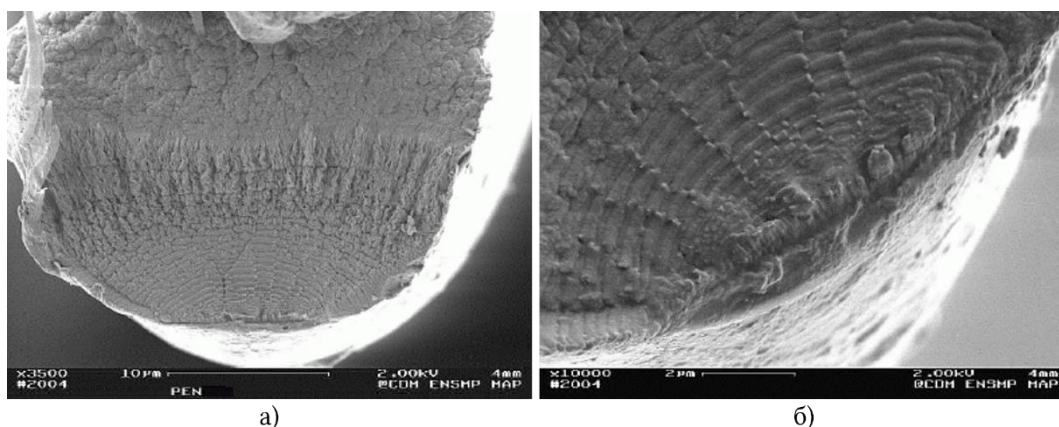
Слика 4.9. Последња фаза отказа *PET* влакна насталог услед замора [116]

Откази влакана израђених од полиетилен нафталата (*PEN*) на први поглед личе на отказе код влакана од полиамида и полиестера и појављују се током испитивања на замор сличне дугачке пукотине дуж правца влакна, слика 4.10.



Слика 4.10. Отказ *PEN* влакна – услед затезања а), услед замора б) [115]

Детаљнијом анализом отказа *PEN* влакана услед замора примећују се одређени механизми отказа који нису примећени код *PA* и *PET* влакана. То не значи да ти механизми не постоје код ових влакана, већ је могуће да не долазе до изражаја, тј. да немају толики утицај на отказ. Појављују се очигледне линије лома које указују на постепено ширење пукотине, слика 4.11. Тачан узрок појаве ових линија није утврђен, али могуће је да настају због процеса растерећења које се дешава током испитивања на замор.

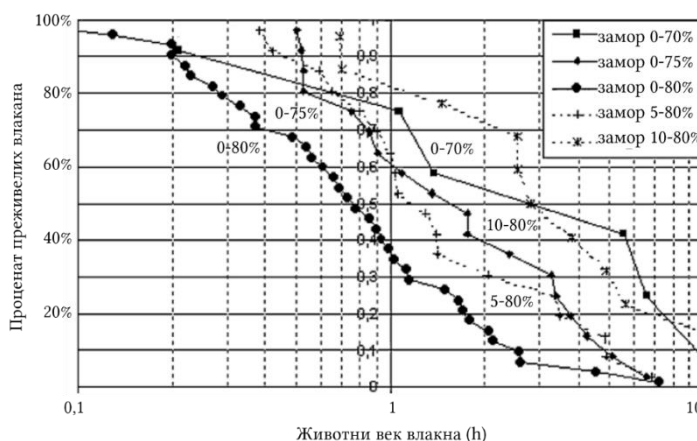


Слика 4.11. Карактеристичне линије лома *PEN* влакана при отказу услед замора [115]

4.1.2 Оптерећење при којем долази до отказа услед замора

Да би дошло до отказа влакна услед замора, постоји неколико услова који морају бити испуњени. Оптерећење које се наноси мора бити цикличног карактера са тачно дефинисаном амплитудом. Минимална вредност амплитуде може бити нула, али отказ услед замора се јавља и уколико је та вредност већа од нуле. Максималне вредности амплитуде при којима су се дешавали откази услед замора, приказани у претходном поглављу, јесу 80% номиналне затезне чврстоће влакна, док је минимална била 0%. Фреквенција испитивања је била 50 Hz.

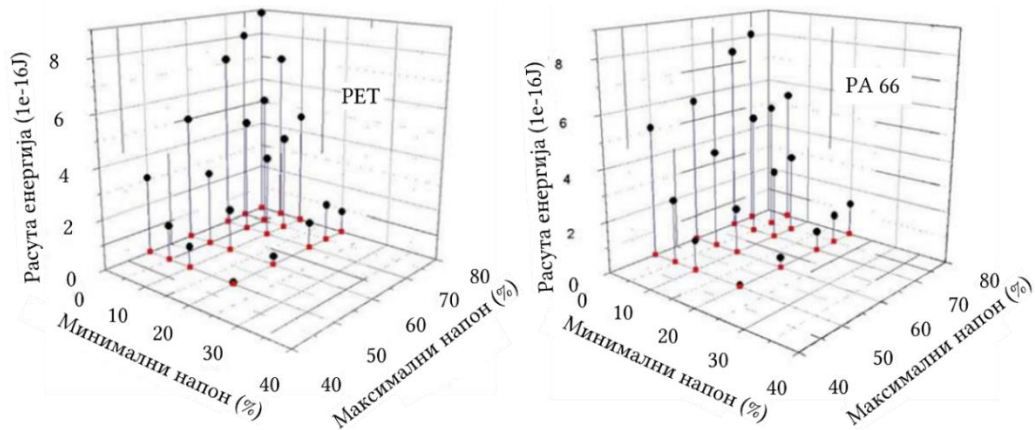
Слика 4.12. приказује дијаграм зависности животног века *PET* влакана и процента преживелих влакана у односу на амплитуду оптерећења при испитивању влакана на замор. Може се видети да повећање максималне вредности амплитуде са 70% на 80% доводи до скраћења средњег животног века влакана. Средњи животни век се дефинише као онај век при којем преживи 50% влакана.



Слика 4.12. Дијаграм преживљавања *PET* влакна [117]

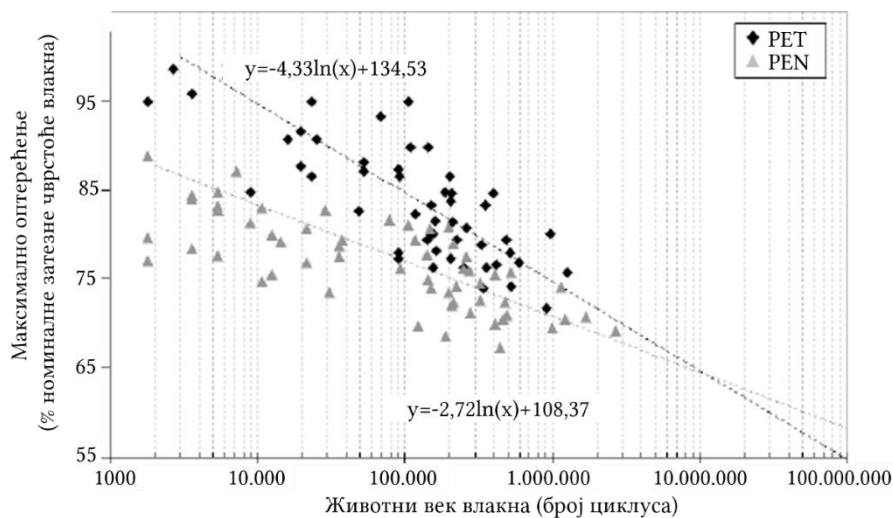
Са друге стране, уколико се минимална вредност амплитуде повећа са 0% на 10%, а максимална вредност се задржи на 80%, повећава се век трајања влакна и има исте вредности као у случају минималне вредности амплитуде од 0% и максималне вредности од 70%.

Приликом наизменичног оптерећења и растерећења влакна долази до пригушења у њему што се повезује са процесом замора. На слици 4.13. је приказано како се на расипање енергије током овог пригушења може утицати променом минималне и максималне вредности амплитуде оптерећења. Може се видети да, за било које услове оптерећења, при повећању минималне вредности амплитуде оптерећења долази до опадања расипања енергије. Ово указује да иако постоји ниво оптерећења изнад којег долази до отказа услед замора, смањивање максималне амплитуде оптерећења само продужава животни век влакна, али не спречава појаву отказа услед замора.



Слика 4.13. Расипање енергије током цикличног оптерећења и растерећења PET и PA66 влакана [118]

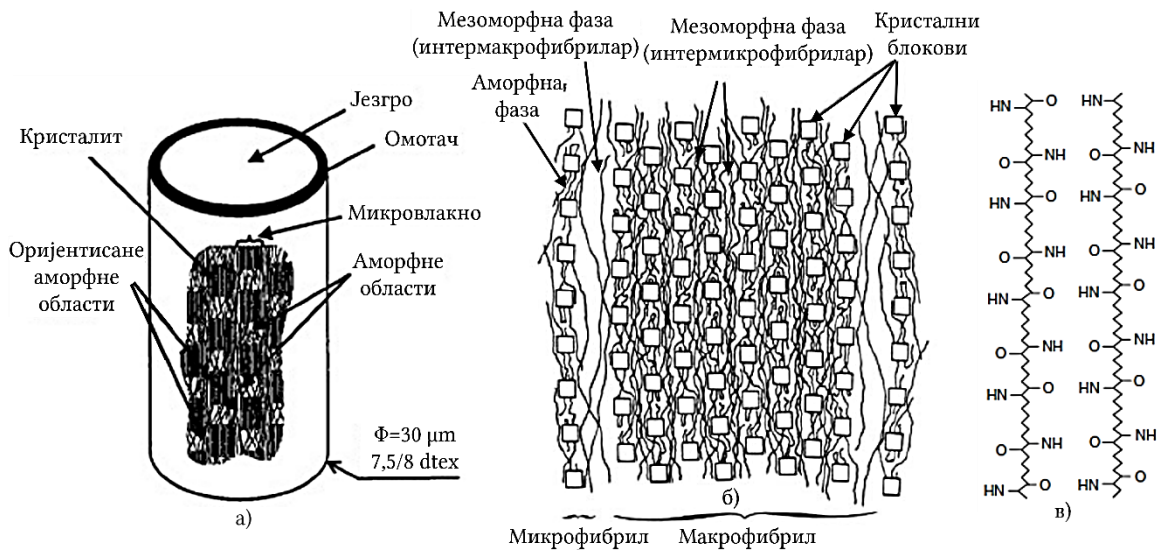
На слици 4.14. су приказане $S-N$ криве за PET и PEN влакна са емпиријским обрасцима који најприближније дефинишу добијене законитости.



Слика 4.14. $S-N$ криве за PET и PEN влакна са мин. вредношћу амплитуде од 0% [115]

4.1.3 Механизми укључени у замор влакна

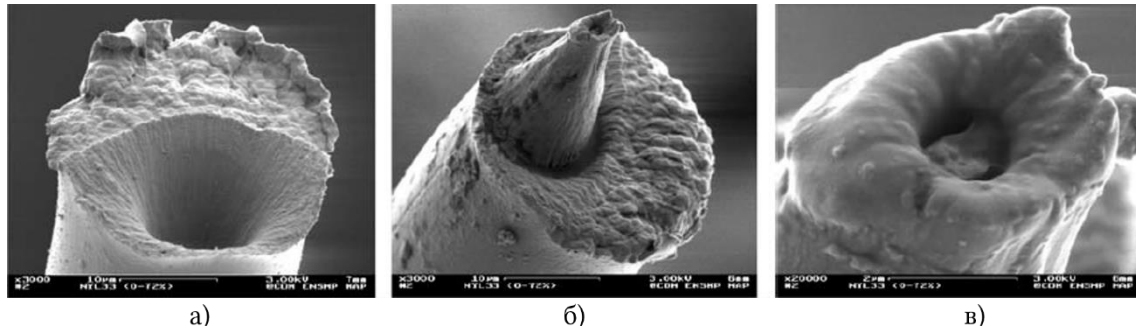
Дугачке пукотине које настају услед замора у влакнима о којима је до сад било речи настају као последица анизотропије молекуларне структуре. Специфични углови под којима се пукотине развијају код *PET* и *PA* влакана су повезани са њиховом унутрашњом структуром која је веома комплексна, слика 4.15. Структура *PET* влакна је веома слична структури *PA* влакна, али постоји јасна разлика која се огледа у већем груписању микрофибрила у макрофибриле што објашњава дуге пукотине при отказу услед замора.



Слика 4.15. Структура *PA* влакна – макроструктура а), микроструктура б) и шематски приказ молекуларног састава в) [119][120]

Ова влакна се производе процесом извлачења при великим брзинама које могу бити до 7000 m/min. При изласку материјала из дизне, његова температура је блиска тачки топљења – око 260° С. Долази до хлађења које је најинтензивније на површини влакна што је прва област у којој долази до очвршћавања. Убрзо долази до хлађења језгра влакна и његовог скупљања. То доводи до заосталих напона у попречном пресеку влакна због тога што језгро које се скупља утиче на површински омотач влакна. Ови напони се могу измерити Рамановим спектроскопом [119].

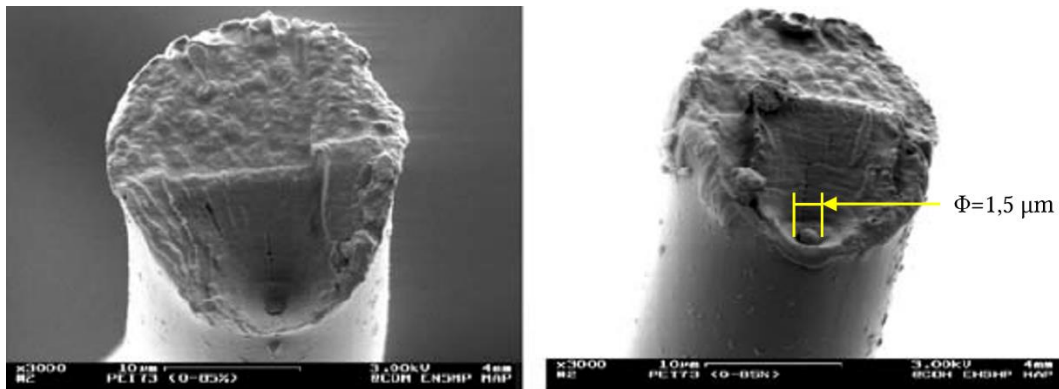
Полимерима се додају различити адитиви пре извлачења како би се побољшале њихове карактеристике. Антимон се додаје како би се убрзао процес полимеризације, док се бром додаје како би се поспешиле против пожарне карактеристике материјала. Када се влакно произведе, ови адитиви имају величину мању од микрона, али су веома значајни при почетном расту пукотине узроковане замором или обичним затезањем. Понекад, у материјалу се могу пронаћи укључци већих димензија који могу довести до отказа унутар самог влакна при тестирању на собној температури, слика 4.16.



Слика 4.16. Лом PA66 влакна при 0-75% на 50 Hz после 201.600 циклуса – кратер у влакну а), карактеристичан конични облик б), кратер на врху конуса в) [121]

У том случају морфологија лома је таква да се појављује карактеристичан коничан облик. Кратер који се може уочити на врху конуса указује да је укључак веће димензије проузроковао стварање пукотине.

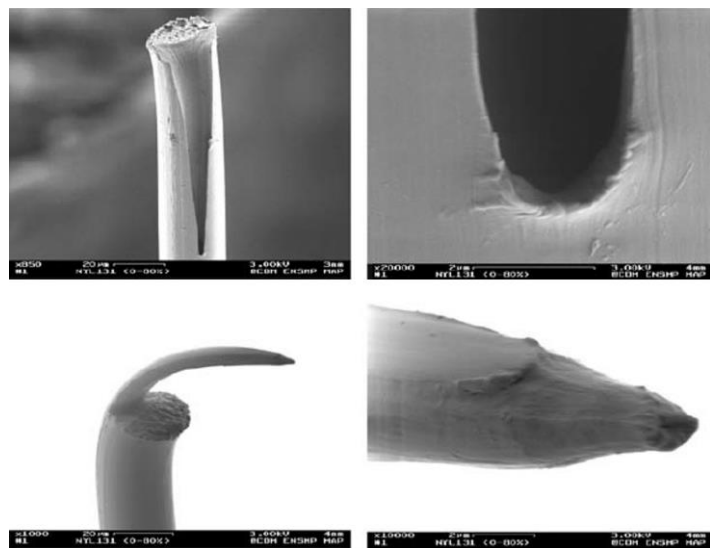
На слици 4.17. је приказан лом PET влакна услед затезања. Може се уочити честица антимона која је проузроковала настанак иницијалне пукотине.



Слика 4.17. Лом PET влакна услед постојања укључка [121]

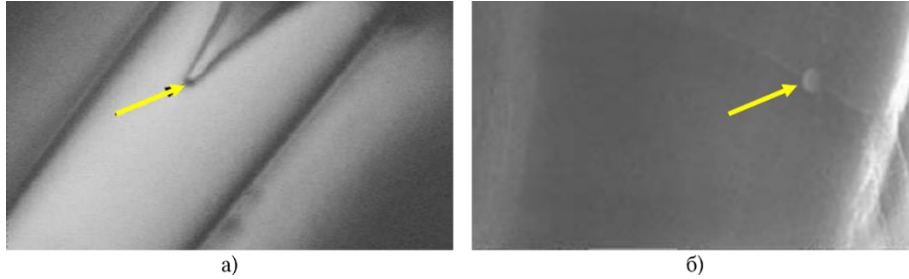
Слика 4.18. показује лом PA66 влакна које је тестирано у распону 0-80% и отказ се догодио после 894.600 циклуса. На први поглед се може закључити да је настао отказ услед замора, међутим детаљнијом анализом се увиђа да се почетна пукотина створила у телу влакна, а не на површини.

Уколико се влакно прегледа пре тестирања и уоче се укључци, тј. адитиви, велика је вероватноћа да ће у ближој



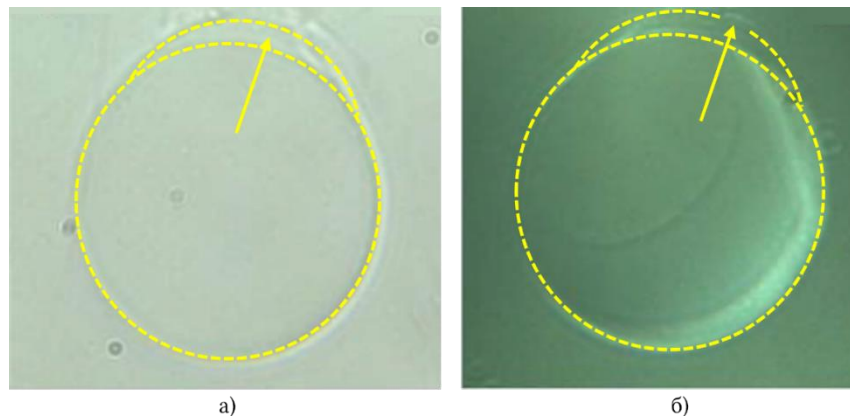
Слика 4.18. Лом PA66 влакна започео испод површине [121]

околини неког од укључака настати иницијална пукотина која ће временом довести до отказа услед замора [122]. На слици 4.19. приказани су такви укључци на месту настанка иницијалне пукотине код влакана од *PA66* и *PET* материјала која су доживела отказ услед замора на собној температури.



Слика 4.19. Укључци који су изазвали иницијалну пукотину – *PA66* влакно а), *PET* влакно б) [121]

На собној температури, почетне пукотине проузрокују укључци који се налазе у зони између језгра и омотача влакна, величине око 1 микрона. Та међузона представља слабу тачку влакна, а укључци је додатно ослабљују. Полимер се знатно издужује када пролази кроз процес извлачења, али укључци који имају значајну тврдоћу се не издужују. Резултат тога јесу зоне испред и иза укључака где се полимер другачије деформише током извлачења од остатка материјала. Ово засигурно ствара слабу област која, уколико се налази у међузони између омотача и језгра влакна, може довести до настанка почетних пукотина које на крају проузрокују отказ услед замора.

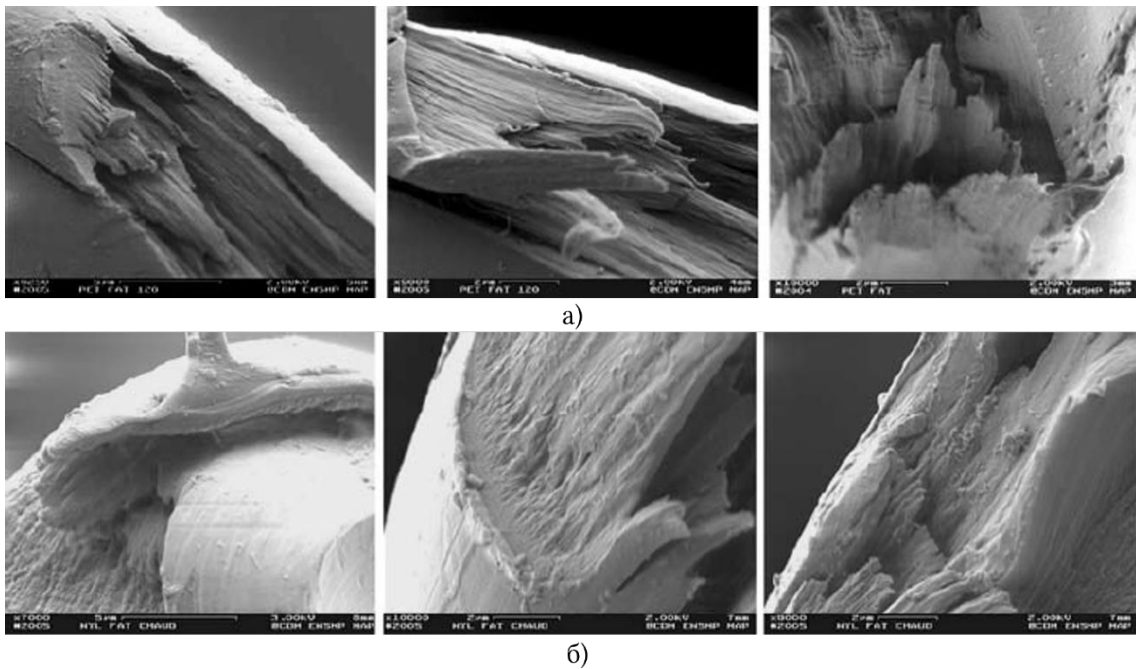


Слика 4.20. Први степен оштећења код *PA66* влакна испитиваног на замор – раздвајање омотача од језгра влакна без пробијања услед присуства укључка а), укључак пробија омотач влакна и почиње развој уздужне пукотине б) [122]

На слици 4.20. су приказана два пресека *PA66* влакна где се уочава присуство укључака у међузони између језгра и омотача влакна. Ово присуство првобитно доводи до одвајања омотача од језгра, а потом и до пробијања омотача од стране укључка током испитивања на замор. Приликом ширења уздужне пукотине, може се приметити да путања није увек права, већ да тежи да пролази кроз зоне где постоје укључци који представљају слабе тачке.

4.1.4 Зависност отказа услед замора од температуре

Морфологија лома *РА66* и *PET* влакана мења се са порастом температуре током испитивања. Код испитивања на затезање, долази до комплекснијих облика лома, а код испитивања на замор, долази до сличних подужних пукотина као на собној температури, али појављује се и другачији окрњени облик, слика 4.21. Ови облици лома се јављају при испитивању снопа влакана на 50 Hz при собној температури. Разлог томе је недостатак простора да се ослободи акумулирана температура услед трења влакана током испитивања. О овој појави је потребно водити рачуна приликом испитивања снопова влакана.

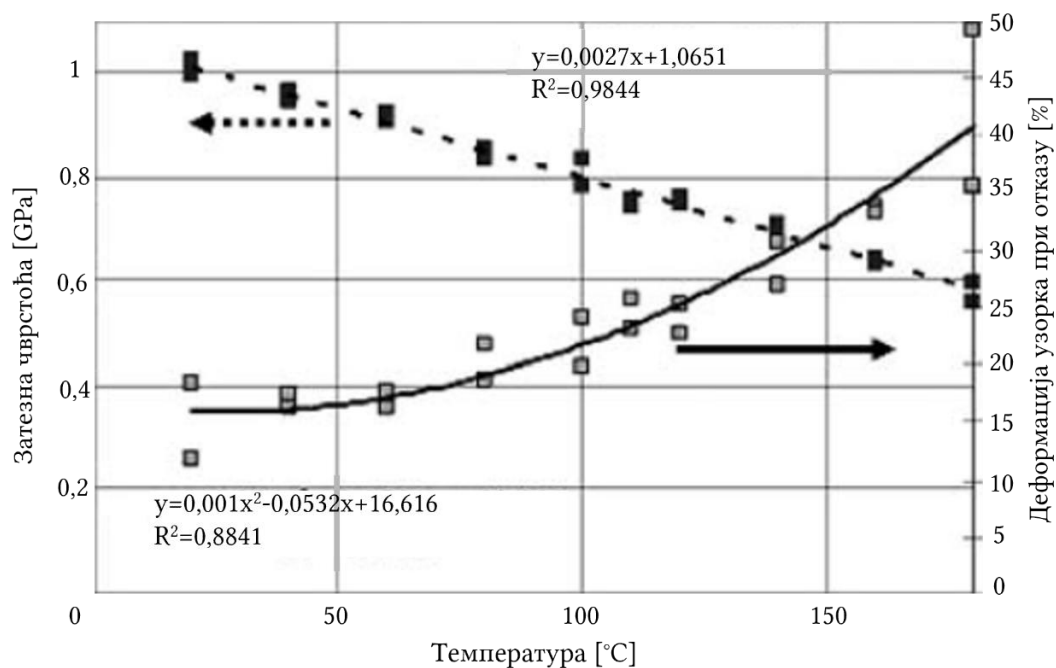


Слика 4.21. Окрњени облик лома услед замора на температури од 80°C – *PET* влакна а), *РА66* влакна б) [118]

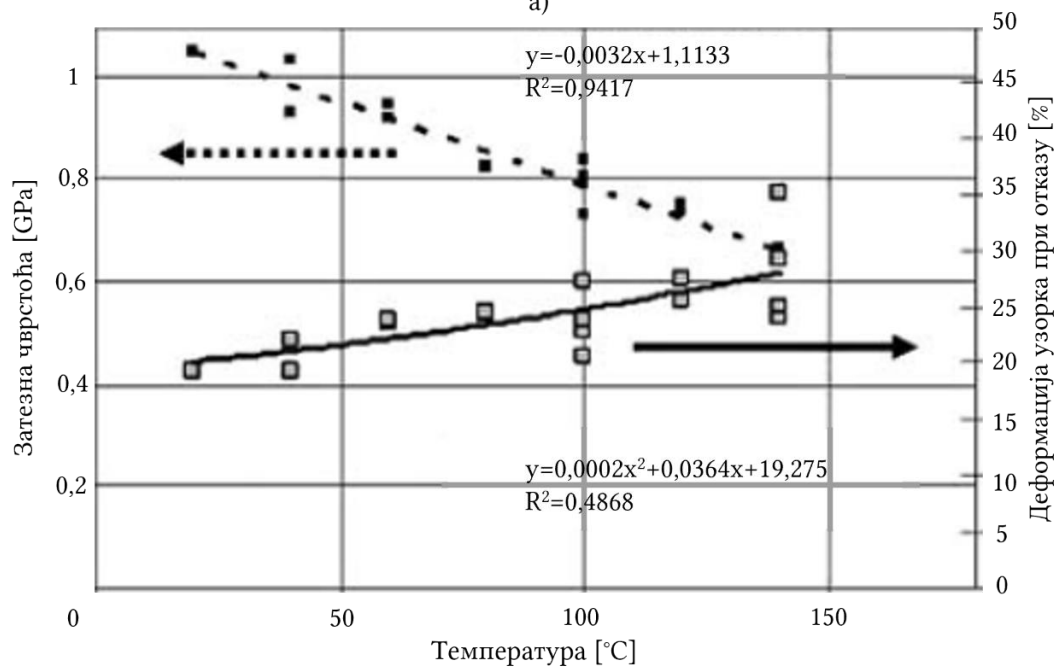
На повећаним температурама се могу јавити пукотине широм тела влакна које не морају бити видљиве споља. Такве пукотине се најчешће налазе око укључака [122]. Током времена се ове пукотине повезују и на крају доводе до отказа услед замора.

Повећање температуре утиче на трансверзалне везе међу микровлакнима у језгру влакна. Оне слабе чиме се језгро разграђује, а додатно се слаби зона између језгра и омотача.

На слици 4.22. су приказане зависности затезне чврстоће и деформације узорка при отказу услед затезања од повећања температуре за *PET* и *РА66* влакна.



а)

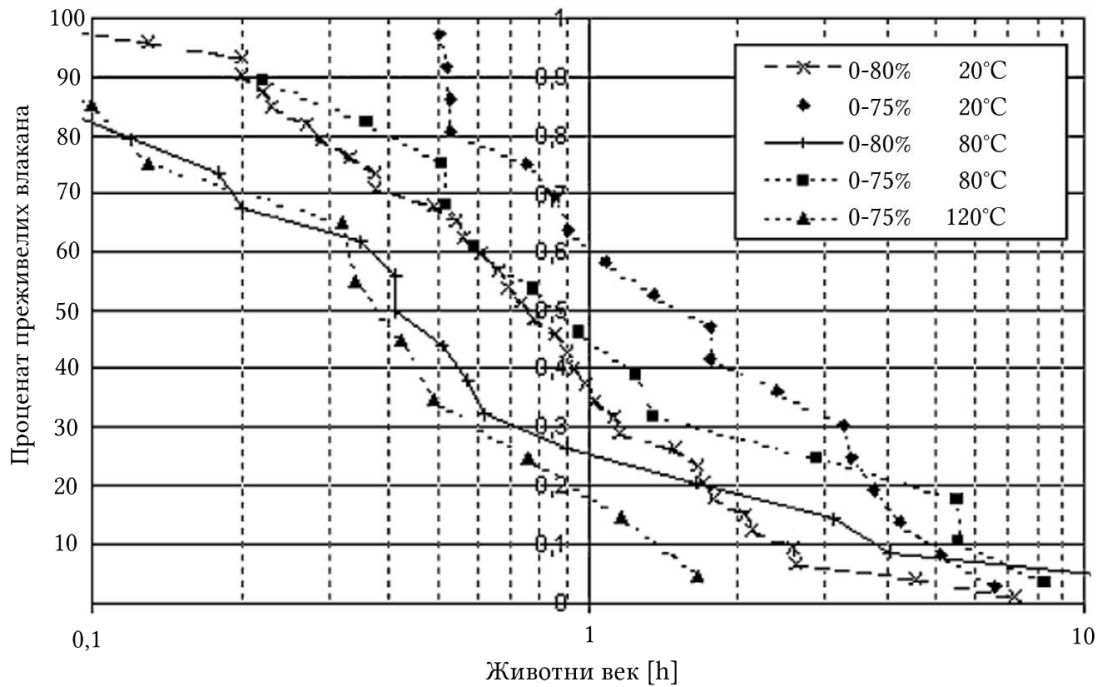


б)

Слика 4.22. Функције затезне чврстоће и деформације при отказу у зависности од температуре – ПЕТ влакна а), ПА66 влакна б) [118]

Може се видети да је затезна чврстоћа веома различита на 80 и 120° С од оне при собној температури. Ово запажање је изузетно битно уколико се влакна у облику нити испитују на собној температури, а због недовољног ослобађања унутрашње топлоте долази до повећања температуре у самом материјалу.

Претходни закључак је потребно имати на уму приликом анализе резултата добијених при испитивању на замор приказаних на слици 4.23. Амплитуда оптерећења је дата у облику процентуалне зависности од затезне чврстоће на тој температури.



Слика 4.23. Утицај температуре на заморни животни век PET влакана [117]

Може се закључити да животни век опада са порастом температуре, али да и даље подизање минималне вредности амплитуде позитивно утиче на животни век при било којој температури. Основни разлог због ког опада животни век јесте то што крајњим процесом који доводи до отказа услед замора код PET влакана управља процес пузања смањеног попречног пресека влакна, процес пузања се убрзава са порастом температуре.

4.2 Заморна оштећења код текстилних композита

Композит представља комбинацију два или више материјала. Различити материјали се користе како би предности једног поништиле недостатке другог. Код композита који су ојачани влакнима, влакна су елемент који носи оптерећење, док матрица има улогу да држи влакна заједно и да их штити од штетних утицаја околине.

4.2.1 Методе испитивања

Постоји више врста испитивања текстилних композита јер је могуће пратити већи број параметара:

1. контрола амплитуде (напона или деформације);
2. фреквенција оптерећења-растерећења;
3. смер оптерећења (аксијални, савојни, би-аксијални итд.);
4. однос оптерећења (затезање/затезање, затезање/притисак итд.).

Проблем који се јавља јесте то што је само једна од набројаних врста испитивања стандардизована према ASTM (Америчко друштво за испитивање и материјале) и ISO (Међународна организација за стандардизацију). То су стандарди

ASTM D 3479/D 3479M-96 (2002) Стандардна метода испитивања замора композитних материјала са полимерном матрицом оптерећењем затезање/затезање и EN ISO 13003:2003 Пластике ојачане влакнима – Одређивање карактеристика замора при наизменичном оптерећењу. Ови стандарди дају опште принципе испитивања композитних материјала на замор и зато се могу користити и код транспортних трака.

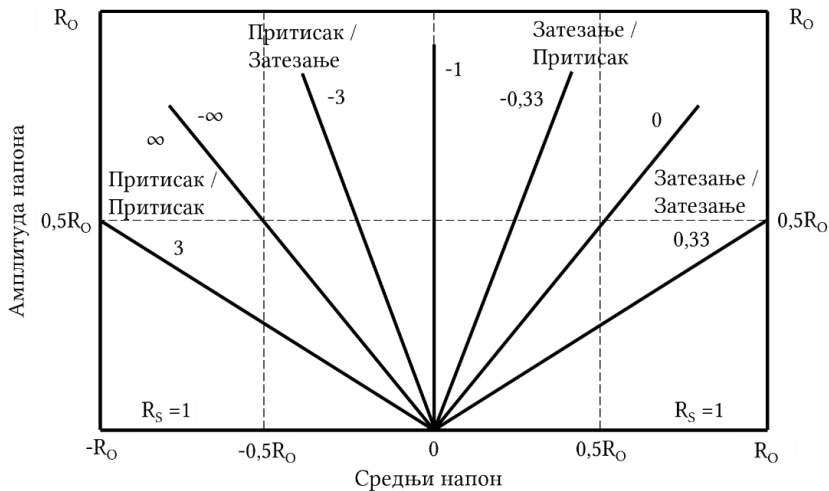
На резултате који се добијају током испитивања утичу две категорије параметара – параметри испитиваног материјала и параметри начина испитивања на замор.

Што се тиче параметара испитиваног материјала, један од најзначајнијих јесте топлотна проводљивост. При испитивању узорка на вишим фреквенцијама (5-10 Hz) долази до повећања температуре у узорку и преко 100° C [123]. Када је топлотна проводљивост ниска, топлота се акумулира у узорку и материјал брже пропада због загревања. Даље, начин слагања слојева композита има значајан утицај на заморно понашање материјала. Уколико се слојеви слажу редом 0°/45°/90° раслојавање почиње при ниском броју циклуса, док са редом слагања 0°/90°/45° раслојавање почиње на вишем броју циклуса [124]. Механичке карактеристике саставних делова композита – влакана и матрице, јачина везе између влакана и матрице, као и удео запремине влакана у запремини композита утичу на заморно понашање. У раду [125] је приказано да је запремина влакана важна променљива при испитивању понашања на замор. Током процеса израде композита, могу се јавити оштећења која ће касније утицати на отказ услед замора. Може се јавити значајно смицање у равни које доводи до стварања набора који касније негативно утичу на заморно понашање [126]. Усеци, рупе или оштећења настала услед удара страног тела у материјал понашају се као места концентрације напона и могу значајно да наруше заморно понашање композитног материјала [127]. Постојање заосталих напона може да доведе до брже појаве првих оштећења. У раду [128] је приказано квази-статичко затезно испитивање узорака текстилног композита. Примећено је да после растерећења остаје заостала деформација која је настала услед пуцања матрице композита.

Што се тиче параметара начина испитивања, потребно је да узорак материјала буде довољно велик како би укључио неколико сегмената ткања због тога што нехомогеност материјала услед распореда влакана у њему значајно утиче на заморно понашање. Избор облика узорка јесте значајан корак у припреми испитивања. Потребно је да узорак на крајевима има заштитни слој како чељустима не би оштетиле основни материјал и довеле до раног отказа [129]. Тај заштитни слој може бити од гуме као код узорака трака. Однос напона је веома важан приликом испитивања материјала:

$$R = \frac{\sigma_{MIN}}{\sigma_{MAX}} \quad (4.1)$$

Граничне вредности напона σ_{MIN} и σ_{MAX} су дефинисане алгебарским знаковима. Негативни предзнак – $-\infty < R < 0$, односи се на оптерећење затезање/притисак, оптерећење затезање/затезање се креће у распону $0 < R < 1$, док се оптерећење притисак/притисак креће у распону $1 < R < +\infty$, слика 4.24. Остали случајеви су нулто затезно оптерећење – $R = 0$, и нулто притисно оптерећење – $R = -\infty$.



Слика 4.24. Дијаграм константног животног века који приказује линије константног односа напона R (обележен на дијаграму као R_s) [130]

Даље, потребно је контролисати амплитуду оптерећења или деформације. Када је амплитуда оптерећења ниска у односу на затезну чврстоћу материјала, замор који настаје назива се замором високог циклуса јер ће се јавити тек после великог броја циклуса. Са друге стране, када је амплитуда оптерећења висока у односу на затезну чврстоћу материјала, замор који настаје назива се замором ниског циклуса јер ће се јавити при малом броју циклуса. Оштећења која се јављају током испитивања зависе од амплитуде оптерећења. Оштећења услед обичног затезања присутна су код замора ниског циклуса, док се типична оштећења услед замора јављају код замора високог циклуса [131]. Фреквенција испитивања је веома важна. При нижим амплитудама оптерећења, циклично пузање се повећавало, а заморни век трајања се смањивао са смањеном фреквенцијом испитивања. Са друге стране, при вишим амплитудама оптерећења, ефекат фреквенције на циклично пузање и заморни век трајања био је супротан од оног при нижим амплитудама, тј. заморни век се скраћивао са повећањем фреквенције [132]. Услови спољашње средине знатно утичу на добијене резултате, поготово влага. Због тога је потребно испитивати материјал у строго контролисаним условима.

4.2.2 Испитивање замора на затезање/затезање

Једносно испитивање на затезање/затезање је најчешће коришћено испитивање. Користи се серво-хидраулични испитни уређај са чељустима за прихват узорка. Могу се користити и серво електромотори са адекватним драјверима.

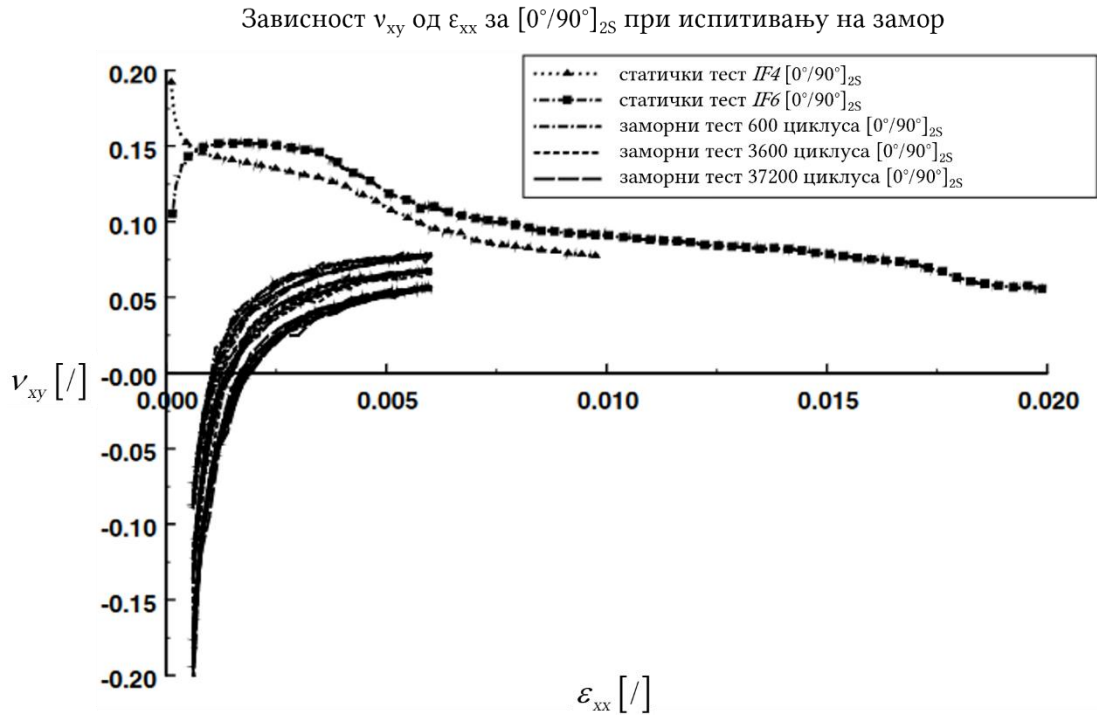
Поравнање узорка у чељустима је од изузетног значаја. Не смеју се појавити савојна оптерећења услед одсуства поравнања осе узорка и оса чељусти. Препорука је да се користе зглобне везе између чељусти и давача силе како би се преносиле само силе, а не и моменти. Потребно је мерити температуру узорка уколико је то могуће. Такође, може се инсталирати посебна хладна комора како би температура узорка током читавог испитивања била једнака собној температури. Неопходно је мерити деформацију узорка и препорука је да се користе високо прецизни давачи помака – екстензиометри или енкодери на мотору. За фреквенцију испитивања се бира највећа могућа како би се смањило трајање испитивања, али неопходно је водити рачуна да на поједине композите, попут термопластика које су ојачане влакнима, повећање фреквенције има негативан утицај који се током експлоатације не јавља.

При испитивању замора на затезање/затезање, однос напона R се бира да буде 0,1. Однос напона има значајан утицај на раст оштећења у узорку. При задржавању максималног нивоа амплитуде, а повећавањем минималног нивоа амплитуде, а самим тиме и односа напона, долази до смањења раста оштећења у узорку. Пуцање матрице композита се смањује уколико се однос напона повећа са 0,3 на 0,5. Претпоставка је да се овај феномен јавља због затварања пукотина [133].

У међународним стандардима који се баве замором код композитних материјала поменути раније, број циклуса до заморног отказа се сматра главним резултатом испитивања замора на затезање/затезање. Међутим, неопходно је пратити и остале исходе испитивања.

Један од параметара који је могуће пратити током трајања испитивања јесте промена аксијалне крутости. Она се може добити као количник измереног оптерећења са давача силе и измерене деформације са давача помака. У зависности од врсте влакана и матрице, као и начина слагања слојева композита, деградација крутости се може кретати у распону од свега неколико процената до неколико десетина процената [134].

Уколико се мери попречна деформација узорка, могуће је пратити Поасонов однос ν_{xy} . Промена Поасоновог односа је значајан параметар када се посматрају оштећења услед замора. На слици 4.25. се види промена Поасоновог односа за текстилни композит при испитивању замора на затезање/затезање. Криве $\nu_{xy} - \varepsilon_{xx}$ код испитивања са контролисаном деформацијом у распону од 0,06% и 0,6%, показују значајно нелинеарно понашање и ограничене су статичком деградацијом Поасоновог односа [135].



Слика 4.25. Промена Поасоновог односа при испитивању текстилног композита на замор затезање/затезање [135]

Праћење акустичне емисије се може спровести како би се регистровали звучни таласи настали током раслојавања композита и отказа влакна. Таласи се формирају када се енергија деформације ослободи током отказа. У раду [136] је коришћена енергија акустичне емисије као параметар заморног оштећења за ткане текстилне композите. Закључено је да је потребно размотрити произвољно коришћење амплитуда оптерећења где је максимална вредност амплитуде блиска затезној чврстоћи материјала због значајне појаве енергије акустичне емисије при ниским нивоима оптерећења у првим циклусима заморног испитивања.

Једна од најновијих техника јесте примена уграђених сензора у узорак композита у облику оптичких влакана са Браговом решетком. Брагова решетка јесте периодична варијација оптичког рефрактивног индекса који је записан у језгру оптичког влакна и обично је дужине неколико милиметара. Када се широкопојасна светлост емитује у оптичко влакно, Брагова решетка делује попут селективног огледала за одређену таласну дужину. Свака решетка има одређену таласну дужину, Брагову таласну дужину λ_B , коју рефлектује, док остале таласне дужине пропушта. Брагова таласна дужина је директно пропорционална са периодом Брагове решетке. Уколико је сензор у облику оптичког влакна уграђен у узорак композита, деформација оптерећеног узорка ће довести до промене периоде Брагове решетке. То ће довести до рефлектовања другачије таласне дужине. Предност примене ове технике јесте да је мерење апсолутно и да се не мења током времена, сензори у облику оптичких влакана су пасивне компоненте које имају дуг животни век (преко двадесет година) и отпорни су на електромагнетне утицаје.

Брагова решетка је малих димензија и лако се уграђује у оптичко влакно које се затим лако уграђује у узорак композита и не утиче на његову структуру. Могуће је уградити више оваквих сензора како би било више мерних места. У раду [137], приказано је да сензори у облику оптичких влакана без проблема преживљавају процес производње различитих композитних материјала и да су резултати аксијалне деформације добијени од мерног давача помака у облику екстензиометра и од сензора у облику оптичких влакана идентични при испитивању замора на затезање/затезање. То указује на адекватно пријањање сензора у композит.

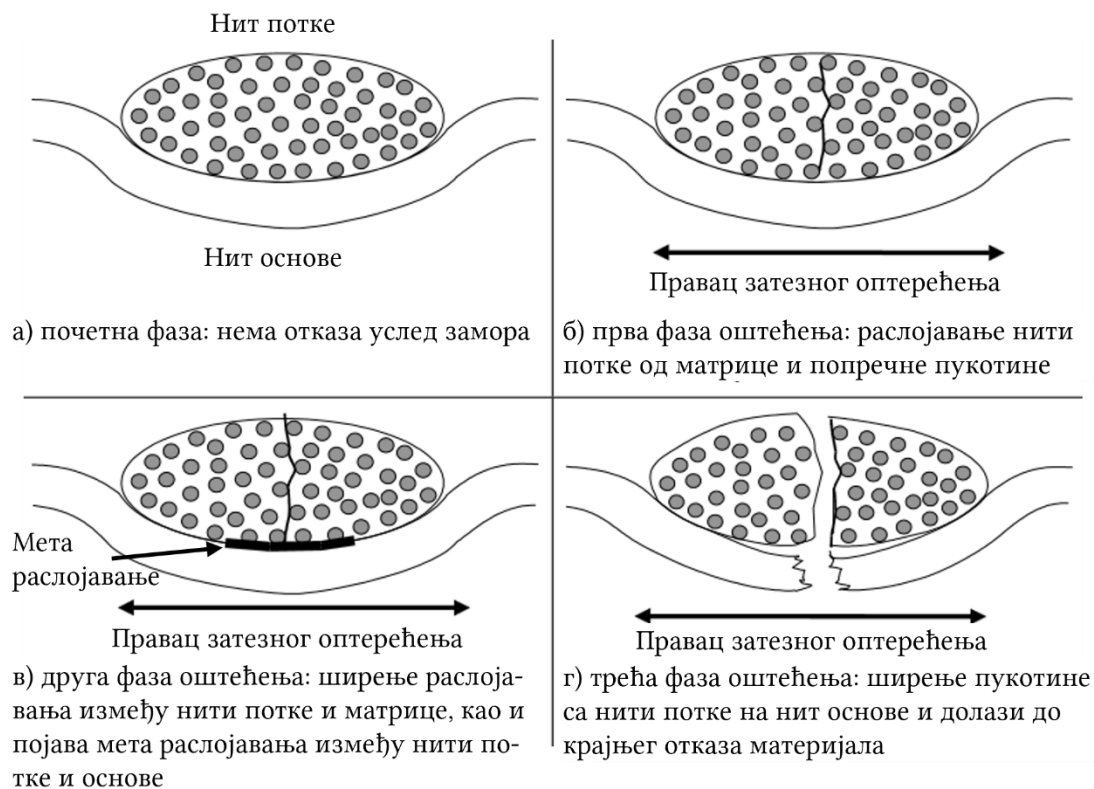
4.2.3 Типична оштећења услед замора код текстилних композита

Текстилни композити имају добру отпорност према отказу услед замора која се огледа у дужини животног века при испитивању на замор. Међутим, то се не односи на број циклуса који доводе до иницијалних оштећења.

Неколико разлика постоји када се посматра понашање при замору метала и текстилних композита. Код метала, дуго и невидљиво траје фаза развоја оштећења. Не уочавају се губици крутости при заморном оптерећењу. Последња фаза пре отказа почиње стварањем малих пукотина које су прво макроскопско видљиво оштећење. Постепен раст и сједињавање ових пукотина доводи до стварања већих пукотина које проузрокују отказ материјала.

Текстилни композити су направљени од дугих очвршћавајућих влакана која су сједињена са полимерном матрицом. Због тога су хетерогени и анизотропни. Прва фаза слабљења материјала услед замора настаје стварањем зона оштећења. Те зоне садрже велики број микроскопских оштећења, почетног раслојавања између влакана и матрице, као и потпуно раздвајање влакана и матрице. Битно је напоменути да прва фаза слабљења материјала настаје веома рано, већ после неколико стотина циклуса. Прву фазу прати друга фаза коју одликује постепена деградација материјала која се огледа у смањивању крутости материјала. Значајнија оштећења настају у трећој фази. Та оштећења се огледају у пуцању влакана и неконтролисано раслојавању између влакана и матрице које доводи до убрзаног пропадања и на крају до отказа [138].

У раду [139] приказано је испитивање тканог текстилног композита. Испитивање је било у правцу нити основе униаксијалним затезањем. Утврђена је постепена деградација материјала. Прво долази до раслојавања нити потке и матрице, слика 4.26. Током ове фазе долази и до попречног пуцања нити потке. У другој фази долази до ширења раслојавања дуж нити потке и више блиских раслојавања се спаја у једно велико раслојавање. Истовремено долази до малог раслојавања, тзв. мета раслојавања између нити потке и основе. У трећој фази, тј. на крају се пукотине са нити потке шире и на нит основе и долази до појаве великих пукотина и отказа материјала. Ови закључци су потврђени у раду [140]. Развој оштећења је праћен електронским микроскопом и праћењем нивоа енергије акустичне емисије.



Слика 4.26. Постепени развој оштећења текстилног композита услед замора [139]

Да би се горе наведена оштећења могла приметити, потребно је применити неку од техника за проверу. Најједноставнија техника је класичан визуелни преглед. У зависности од разлике оптичког рефрактивног индекса матрице и влакана, транспарентност композита може бити висока. Усмеравањем снопа светлости ка узорку могу се открити пукотине у матрици, празнине и укључци.

Оптички или светлосни микроскопи омогућавају увећања до 1000x. На слици 4.27. је приказано микроскопско увећање текстилног композита.



Слика 4.27. Микроскопски приказ тканог текстилног композита [141]

Скенирајући електронски микроскоп (SEM) најчешће се користи приликом фрактографских анализа. Површина лома се скенира са фокусираним снопом високо енергетских електрона. Електрони продиру кроз површину узорка и реагују са атомима материјала у еластичним и нееластичним процесима расејавања. Скупљањем и мерењем расутих сигнала се добија информација о површини и региону испод површине. За конвенционалне инструменте, максимална резолуција SEM је свега неколико нанометара и опсег могућег увећања је веома широк – од 5x до 20.000x.

Могуће је користити ултразвук како би се проверило стање материјала. За оштећења услед замора, користи се *C-scan* техника.

Радиографија представља технику која се често користи. Током проласка радијације кроз материјал, степен апсорпције енергије се може променити дефектима која имају различит коефицијент апсорпције у односу на основни материјал.

Рачунарском микротомографијом, тј. *СТ* скенирањем је могуће добити 3Д моделе високе резолуције. Ови модели омогућавају истраживачима да погледају у унутрашњост материјала без његовог разарања. На слици 4.28. је приказан *СТ* снимак тканог текстилног композита.



Слика 4.28. *СТ* приказ просто тканог текстилног композита

4.3 Модели понашања текстилних композита услед замора

Током експлоатације, текстилни композити су изложени различитим оптерећењима која су динамичког карактера. Због тога је потребно познавати понашање оваквих материјала у таквим случајевима које је немогуће симулирати кроз статичка испитивања. Због тога што су текстилни композити изложени циклусима оптерећења који се непрестано понављају, може се рећи да је замор једна од најбитнијих компоненти које утичу на њихов животни век. Замор је најједноставније представити кроз заморни животни век који се дефинише као број циклуса до отказа при одређеним условима оптерећења – тачно дефинисане границе амплитуде. Познавање појаве замора код текстилних композита је значајно због следећих ставки:

- текстилни композити се користе за индустријску намену (ужад, ремени, транспортне траке, пнеуматици) и због тога је битна могућност предвиђања животног века при дефинисаним условима експлоатације;
- током процеса производње текстилних композита, јављају се оштећења и потребно је познавати природу настанка тих оштећења како би могла да се предупреду;
- приликом одржавања машина и уређаја, процењује се стање индустријских текстилних композита и због тога су потребни модели њиховог понашања како би се могле донети адекватне одлуке о њиховој замени.

4.3.1 Основе замора материјала

Концепт замора је веома једноставан – при понављању кретања, предмет који обавља тај рад слаби. Замор се појављује када се материјал изложи наизменичном оптерећењу и растерећењу током дужег временског периода. Замор је стохастички процес, који је тешко прецизно дефинисати и у строго контролисаним условима. Неке од основних одлика свих процеса замора су:

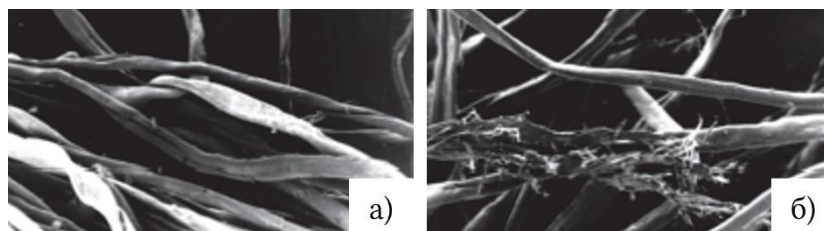
- што је амплитуда оптерећења ближа затезној чврстоћи материјала, то је краћи заморни животни век;
- резултати који се добијају током испитивања материјала на замор, тешко се идеално описују математичком једначином;
- оштећења која настају током процеса замора су кумулативног карактера и не нестају када се материјал растерети;
- при испитивању материјала на замор кроз велики број циклуса (од 10^3 до 10^8), понашање се најбоље описује кроз параметре напона;
- при испитивању материјала на замор кроз мали број циклуса (испод 10^3), понашање се најбоље описује кроз параметре деформације.

На заморни животни век утичу различити параметри – температура, стање површине материјала, присуство оксидирајућих хемикалија, заосталих напона итд. Главни фактори који утичу на заморни животни век су:

- врста материјала – одређени материјали никада неће доживети отказ уколико амплитуда оптерећења остане испод одређеног нивоа, док постоје материјали који ће доживети отказ услед замора неvezано за ниво оптерећења;
- квалитет површине материјала – грубост површине, огреботине и зарези проузрокују концентрацију напона и представљају идеалне зоне за стварање и ширење пукотина чиме се скраћује заморни животни век;
- унутрашња структура материјала – нехомогености запремине материјала попут шупљина и укључака негативно утичу на заморни животни век;
- брзина наношења деформације – има велики утицај поготово код испитивања на замор кроз мали број циклуса;

- правац наношења оптерећења – код материјала који нису изотропни правац наношења оптерећења игра велику улогу;
- услови околине – могу да проузрокују деградацију материјала;
- температура – промене температуре у радном простору и у самом материјалу доводе до знатних промена механичких карактеристика материјала.

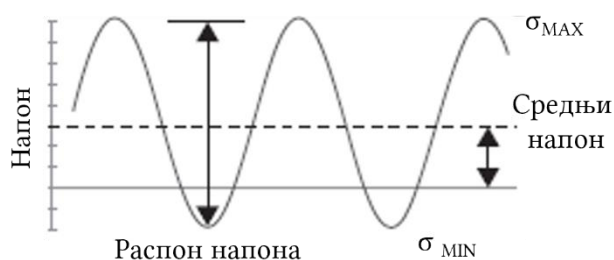
Процеси замора који се одвијају у материјалу се могу видети кроз промене унутрашње структуре и појаве оштећења, слика 4.29.



Слика 4.29. Памучно влакно – неоштећено а), оштећено после 2.500 циклуса [142]

Класична испитивања замора се одвијају са константним амплитудама, слика 4.30.

Циклус напона се карактерише распонем напона $\Delta\sigma = \sigma_{MAX} - \sigma_{MIN}$ као разлика између максималног σ_{MAX} и минималног σ_{MIN} нивоа напона. Амплитуда напона се тада дефинише као $\sigma_A = \Delta\sigma / 2$.



Слика 4.30. Цикличне варијације напона током испитивања замора

Однос напона се дефинише као $R = \sigma_{MIN} / \sigma_{MAX}$. Средњи напон, који се дефинише као $\sigma_M = (\sigma_{MAX} + \sigma_{MIN}) / 2$, често се узима да је једнак нули. Одавде је могуће једноставно извести следеће релације:

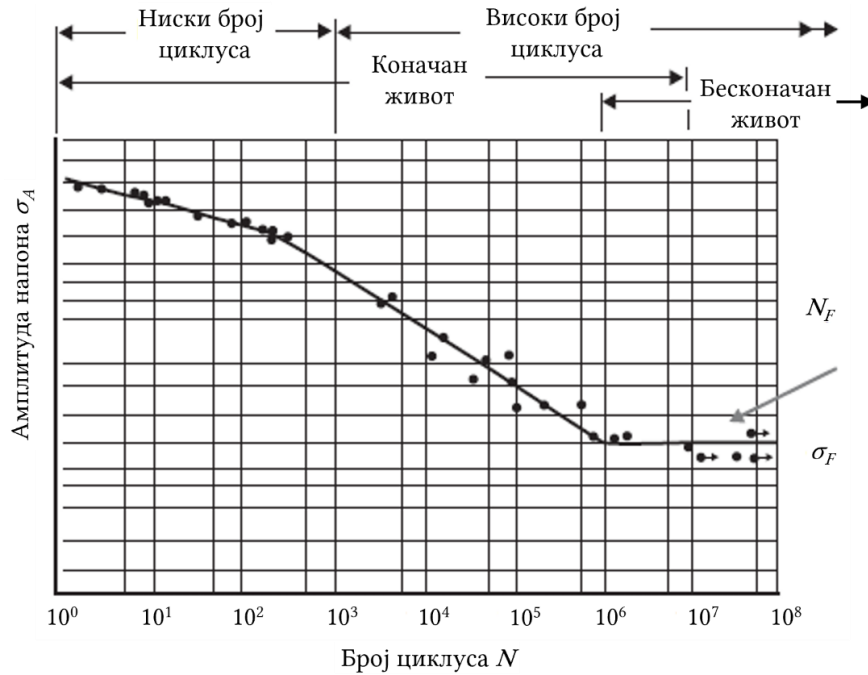
$$R = \frac{2\sigma_M}{\sigma_{MAX}} - 1 \quad \sigma_A = \frac{\sigma_{MAX}}{2}(1 - R) \quad \sigma_M = \frac{\sigma_{MAX}}{2}(1 + R) \quad (4.2)$$

Велерова крива – S-N дијаграм

Класична метода за анализу замора код метала јесте Велерова крива, тј. S-N дијаграм. Ова крива представља зависност σ_A (за $\sigma_M = 0$) или $\sigma_M = \sigma_A$ од броја циклуса N до отказа на том нивоу напона. Типична S-N крива је приказана на слици 4.31.

Вредност N назива се заморни животни век. У логаритамским координатама, S-N крива је права линија до лимита замора σ_F . При овом лимиту, број циклуса је N_F . Стварна S-N крива има две хоризонталне асимптоте. Нижа

хоризонтална асимптота почиње код лимита замора σ_F . Друга хоризонтална асимптота се налази са горње стране $S-N$ криве. Ако је максимални напон σ_{MAX} једнак затезној чврстоћи материјала σ_T , отказ се дешава на првом циклусу као код класичних тестова на затезање. Уколико је $\sigma_M = 0$, тада се отказ дешава при $\sigma_A = \sigma_T$, а ако је $\sigma_M > 0$, тада се отказ дешава при $\sigma_A + \sigma_M = \sigma_T$. При мањој амплитуди напона σ_A , материјал преживљава стотину циклуса N_S као резултат деформационог ојачавања и зато се појављује скоро хоризонтална асимптота.

Слика 4.31. Типична $S-N$ крива

Математички, претходно описана $S-N$ крива (за случај $\sigma_M = 0$) дефинише се преко Басканове једначине:

$$\begin{aligned} \sigma_A &\approx \sigma_T \text{ за } N \leq N_S \\ \sigma_A &= k_1 (N)^{k_2} \text{ за } N_S < N \leq N_F \\ \sigma_A &= \sigma_F \text{ за } N > N_F \end{aligned} \quad (4.3)$$

За више вредности $\sigma_M > 0$ $S-N$ крива се спушта ниже и σ_F се смањује. $S-N$ крива се тада може измоделирати замењујући σ_A са ефективним распоном напона σ_{EF} који се дефинише као:

$$\sigma_{EF} = R \left[1 - \left(\frac{\sigma_M}{\sigma_T} \right)^2 \right]^{-1} \quad (4.4)$$

Ефекти σ_M на замор нису толико велики као ефекти σ_A (замор настаје услед цикличног оптерећења и растерећења).

Вредност лимита замора σ_F често је пропорционална затезној чврстоћи материјала σ_T :

$$\sigma_F \approx a\sigma_T \quad (4.5)$$

Фактор пропорционалности за метале и легуре је у опсегу $0,35 < a < 0,5$.

Амплитуда напона која доводи до отказа материјала при 1000 циклуса износи приближно $0,9\sigma_T$. За случај када је $N_S = 1$, коефицијент k_1 је σ_T . Следи да је коефицијент k_2 једнак $k_2 = \log(0,9) / \log(1000) = -0,0153$ из ових поједностављења. Када постоје спољашњи фактори који утичу на замор, модификовани лимит замора σ_{TF} рачуна се као:

$$\log(\sigma_{TF}) = \log(\sigma_F) + \sum_{i=1}^m k_i \quad (4.6)$$

где су k_i корекциони коефицијенти услед температуре, квалитета површине материјала итд.

Басканова једначина, дефинисана у 4.3, теоријски је изведена за замор склопа паралелних елемената који имају двопараметарну Вејбулову дистрибуцију затезне чврстоће и за насумично оријентацију ових елемената у равни [143].

За предвиђање заморног животног века при затезању код текстилних полимерних композита, користе се следеће претпоставке [144]:

- затезна чврстоћа σ_N после n циклуса испитивања на замор подилази под опадајући закон степена са повећањем броја циклуса, за $n = 1, \sigma_n = \sigma_T$;
- опадање јачине материјала је линеарно зависно од амплитуде напона.

После интеграције израза за опадање јачине материјала, добија се следећа релација:

$$\sigma_T - \sigma_N = k_3 \sigma_{MAX} (1-R)(n^{k_4} - 1) \quad (4.7)$$

где је R однос напона, а k_3 и k_4 су коефицијенти материјала које је потребно експериментално дефинисати.

Број циклуса до отказа се може дефинисати као:

$$N = \left[1 + \frac{1}{k_3(1-R)} \left(\frac{\sigma_T}{\sigma_{MAX}} - 1 \right) \right]^{1/k_4} \quad (4.8)$$

Кориснији облик једначине 4.8 је следећи:

$$\left(\frac{\sigma_T}{\sigma_{MAX}} - 1 \right) \left(\frac{1}{1-R} \right) = k_3 (N^{k_4} - 1) \quad (4.9)$$

због тога што се из њега могу прорачунати коефицијенти материјала k_3 и k_4 .

Даље, доказано је у [144] да је расподела једноосне затезне чврстоће скоро једнака расподели заморне јачине $F(\sigma)$. За расподелу заморне јачине $F(\sigma)$, двопараметарна Вејбулова једначина гласи:

$$F(\sigma) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\sigma}{b_T}\right)^{C_T}\right) \quad (4.10)$$

где се скалирајући коефицијент b_T и коефицијент облика C_T често користе. Предвиђени број циклуса до отказа N^* , за дефинисану вероватноћу отказа $P(N^*)$, дефинише се као:

$$N^* = k_4 \sqrt[1 + \frac{1}{k_3(1-R)} \left[\frac{b_T}{\sigma_N} |\ln(1 - P(N^*))|^{1/C_T} - 1 \right]} \quad (4.11)$$

Заједничка расподела заморног живота N и амплитуде напона σ_A требало би да имају одређена ограничења услед физичких и статистичких граница [145]. Одговарајућа форма функције расподеле има следећи облик:

$$F(N, \sigma_A) = k_5 (\sigma_A - \sigma_F)^{k_7} (N - N_{MIN})^{k_6} \quad (4.12)$$

где је N_{MIN} минимални животни век, k_5 комбиновани скалирајући коефицијент за животни век и амплитуду напона, а k_6 и k_7 су коефицијенти облика. Средња вредност животног века $E(N)$ дефинише се у следећем облику:

$$E(N) = N_{MIN} + \frac{\left(\frac{1}{k_5 (\sigma_A - \sigma_F)^{k_7}}\right)^{1/k_6}}{1 + 1/k_6} \quad (4.13)$$

Поједностављена процедура за процену параметара функције заједничке расподеле $F(N, \sigma_A)$ описана је у [145].

Крива деформационог живота – ε - N дијаграм

У случајевима када се отказ дешава на малом броју циклуса, ефекти пластичне деформације би требало да буду узети у разматрање [146]. На кривој деформационог живота, слика 4.32, амплитуда напона σ_A замењена је са амплитудом укупне деформације ε_T која се састоји од еластичне ε_E и пластичне компоненте ε_P – $\varepsilon_T = \varepsilon_E + \varepsilon_P$.

Еластична компонента амплитуде ε_E , у случају $\sigma_M = 0$, рачуна се преко Басканове једначине 4.3:

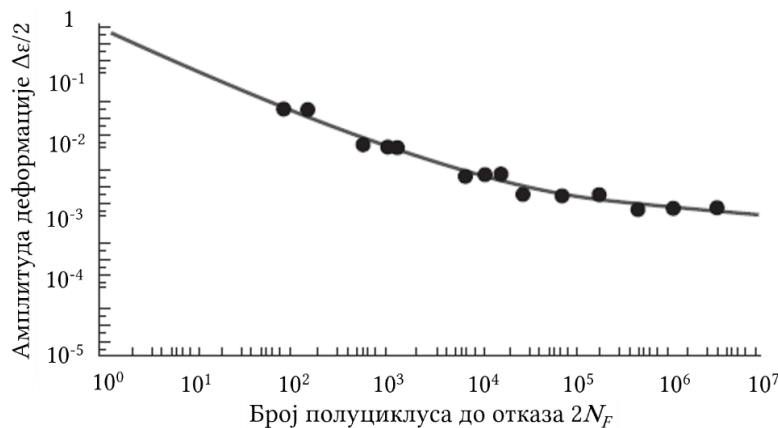
$$\varepsilon_E = \frac{\sigma_F^*}{E} (2N_F)^b \quad (4.14)$$

где је:

- σ_F^* - коефицијент заморне јачине материјала (σ_M при $2N_F = 1b$);
- $2N_F$ - број полуциклуса то отказа;
- b - експонент материјала.

Вредност σ_F^* је приближно једнака σ_T , док је у распону $-0,05 < b < -0,12$. У случају када је средња вредност напона већа од нуле, $\sigma_M > 0$, једначина 4.14 се може написати у следећем облику:

$$\varepsilon_E = \frac{(\sigma_F^* - \sigma_M)}{E} (2N_F)^b \quad (4.15)$$



Слика 4.32. Типична крива деформационог живота – ε - N дијаграм

Пластична компонента амплитуде ε_p се изражава помоћу Мансон-Кофиновог закона [147]:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_F^* (2N_F)^c \quad (4.16)$$

где је:

- ε_F^* - коефицијент заморне дуктилности;
- c - експонент заморне дуктилности.

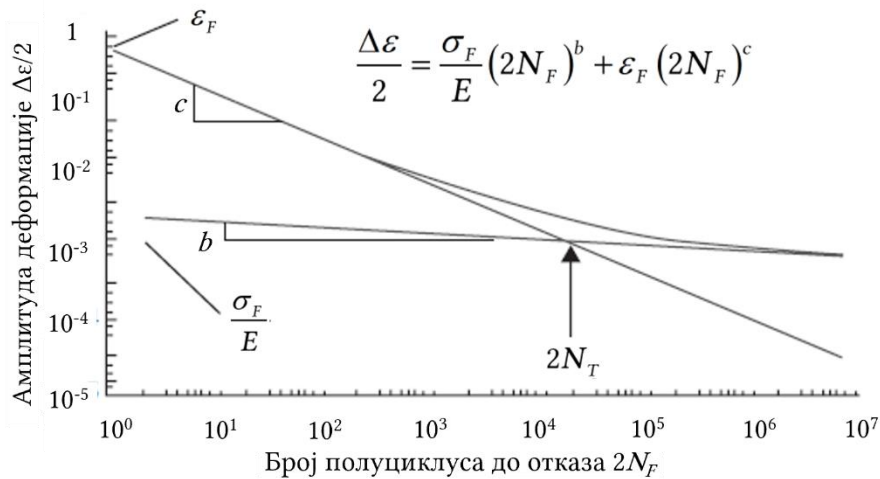
Вредност ε_F^* приближно је једнака деформацији при отказу ε_T , а c је најчешће у распону $-0,5 < c < -0,8$. На слици 4.33. приказана је крива деформационог живота кроз еластичну и пластичну компоненту.

За екстремно низак број циклуса, једначина 4.16 не даје потпуно задовољавајуће резултате и кориснији је експоненцијални модел. У овом случају се заморни животни век изражава преко следеће релације [148]:

$$N = \frac{1}{2} \frac{\exp(w) - 1}{\exp(w \Delta \varepsilon_p / \varepsilon_T) - 1} \quad (4.17)$$

где је:

- w - константа материјала;
- $\Delta \varepsilon_p$ - амплитуда пластичне деформације.



Слика 4.33. Еластична и пластична компонента криве деформационог живота

У раду [149] предложена је техника за описивање напона и деформација у материјалу услед цикличног оптерећења. Амплитуда укупне деформације је подељена у две компоненте, али је описана као функција амплитуде напона σ_A :

$$\varepsilon_T = \varepsilon_E + \varepsilon_P = \frac{\sigma_A}{E} + \left(\frac{\sigma_A}{A} \right)^h \quad (4.18)$$

где је:

- A и h - параметри материјала пластичне деформације.

Оштећења материјала, при малом броју циклуса, испољавају се на површини материјала као микро пукотине и шире се по површини.

У раду [150] је приказана зависност замора и механичких карактеристика материјала. Зависност има следећи облик:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = 0,623 \left(\frac{\sigma_T}{E} \right)^{0,832} (2N_F)^{-0,09} + 0,0196 (\varepsilon_F)^{0,155} \left(\frac{\sigma_T}{E} \right)^{-0,53} (2N_F)^{-0,56} \quad (4.19)$$

где је:

- σ_T - затезна чврстоћа материјала;
- E - модул еластичности материјала.

Термо механички замор

Термо механички замор настаје услед комбинованих термичких и механичких оптерећења где се напон и температура мењају током времена. Ова појава је типична за процесе израде текстилних материјала где је топлота резултат трења између слојева текстилног материјала или трења између слоја текстилног материјала и елемента машине. Овакав термички утицај може бити значајан и може довести до деградације текстилних влакана. На врсту оштећења у материјалу утичу карактеристике материјала, распон механичке деформације, брзина наношења деформација, температура итд. Трансформацијом једначине 4.3, може се добити зависност заморног животног века од температуре:

$$N = N_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) (\sigma_A)^{1/k_2} \quad (4.20)$$

где је:

- E [kJ/mol] – активациона енергија термо активiranог процеса одговорног за промене заморног животног века;
- $R = 8,31 \cdot 10^{-3}$ kJ/mol - универзална гасна константа;
- N_0 - референтни заморни животни век.

Када се материјал загреје, развијају се термички градијенти приликом ширења. Локална ширења ограничавају се околним материјалом на нижим температурама. У овом случају, термичка деформација трансформише се у механичку деформацију што изазива оштећења. Оштећења која настају у оваквој ситуацији имају више узрока попут замора – заморни животни век N^F , оксидације материјала – заморни животни век N^O , као и пузања – заморни животни век N^C [151]. Може се извући зависност укупног заморног животног века N од побројаних узрока:

$$N = \frac{N^F N^O N^C}{N^O N^C + N^F N^C + N^F N^O} \quad (4.21)$$

4.3.2 Општа разматрања при моделовању заморног понашања текстилних композита

Замор текстилних композита је веома комплексна област која је предмет истраживања великог броја радова. Узрок тога је особина да текстилни композити имају добар заморни животни век. Са друге стране, није потребан велики број циклуса оптерећења како би се појавила прва оштећења. Потреба да се утврди степен оштећења у једном моменту животног века текстилног композита и да се дефинише преостали животни век јесте основни покретач свих истраживања.

Текстилни композити су нехомогени и анизотропни материјали и њихово проучавање је због тога комплексније него код метала нпр. Узрок овоме јесу различити типови оштећења који се могу јавити током експлоатације – лом влакна, лом матрице, извијање влакна, отказ везе између матрице и влакна, раслојавање итд.

Параметри који утичу на заморно понашање текстилних композита су:

- врста влакна;
- врста матрице;
- постојање укључака у материјалу влакна или матрице;
- начин слагања слојева композита;
- услови околине – највећи утицај имају температура и влага;
- услови оптерећења – однос оптерећења R и фреквенција оптерећења.

Постоје два техничка разлога због којих је моделовање заморних оштећења тешко и скупо [152]. Први разлог је то што постоји више нивоа на којима су присутни механизми оштећења – микро ниво (vlakна и матрица), средњи ниво (појединачни слој) и макро ниво (текстилни композит). Други разлог је немогућност производње идентичних узорака због природе производње текстилних композита.

Постоји неколико замки при моделовању оштећења услед замора:

- забуна око нивоа оштећења – мешају се информације добијене при испитивању различитих нивоа оштећења композита што доводи до погрешних резултата;
- погрешне генерализације – смањење крутости материјала често се дели у три периода (нагло почетно смањење, даље постепено смањење и крајњи отказ материјала) и проблем је примена погрешних модела за погрешне периоде;
- претерано упрошћавање – прилагођавање криве експерименталним подацима постиже се применом претерано упрошћеним изразима.

Даље, многи модели формирану се за текстилне композите тачно одређеног нивоа слагања слојева и за специфичне услове оптерећења попут једноосног затезног цикличног оптерећења са константном амплитудом, на одређеним фреквенцијама итд. Примена таквих модела на реалне радне услове и реалну структуру материјала може дати погрешне резултате. Постоје озбиљне препреке које је потребно превазићи када се истражује заморни животни век текстилних композита при реалним условима оптерећења [153]:

- превладавајући механизам оштећења није једнак за све нивое оптерећења, шаблони отказа варирају са амплитудом оптерећења и бројем циклуса;
- највећи број експеримената одвија се са једноосним затезним оптерећењем, док у реалности природа оптерећења није тако проста;
- преостала чврстоћа и заморни животни век текстилних композита значајно опадају када се оптерећење мења после неколико циклуса – наношење оптерећења у тзв. серијама утиче на понашање материјала, те серије се дефинишу као серије ниског и повишеног интензитета и преласци са једне серије на другу доводе до опадања карактеристика материјала;
- фреквенција испитивања има велики утицај на резултате – због потребе да експеримент траје краће у односу на експлоатациони век траке, испитивања се врше на већим фреквенцијама што доводи до стварања топлоте у унутрашњости узорка која проузрокује пропадање материјала носећих слојева.

4.3.3 Преглед постојећих модела замора код текст. композита

У овом поглављу ће бити дат преглед постојећих модела замора код текстилних композита. Ригорозна класификација ових модела тешко је остварива,

али могуће је остварити довољно добру класификацију на основу критеријума замора дефинисаних од стране Сендецког у [154]. Према њему, критеријум замора може се класификовати у четири главне категорије:

- критеријум замора макроскопске чврстоће;
- критеријум замора заснован на преосталој чврстоћи;
- критеријум замора заснован на преосталој крутости;
- критеријум замора заснован на стварним механизмима оштећења.

У [153] извршена је слична класификација и дате су три велике категорије:

- модели заморног животног века који не узимају у обзир стварне механизме пропадања материјала, већ се заснивају на *S-N* или Гудмановим дијаграмима и представљају одређене критеријуме заморног отказа;
- феноменолошки модели преостале крутости/чврстоће;
- модели прогресивног оштећења који користе једну или више променљивих које су повезане са мерљивим приказима оштећења.

Што се тиче прве категорије, постоји много модела који се базирају на утврђеним *S-N* дијаграмима за метале. Овакав приступ изискује велики број експеримената за сваки појединачни материјал, за различите начине слагања слојева, различите услове оптерећења итд. Због тога ови модели добро описују уску област одређеног типа текстилног композита (транспортне траке одређених карактеристика и истог произвођача), али не могу се применити на читав спектар текстилних композита.

Што се тиче друге категорије, њу чине феноменолошки модели преостале крутости/чврстоће. Ови модели предлажу еволуционе законитости које описују постепену деградацију крутости или чврстоће узорка текстилног композита у смислу макроскопски мерљивих карактеристика што је у супротности са трећом категоријом модела прогресивног оштећења где се предлажу еволуционе законитости у вези са тачно одређеним оштећењима. Модели преостале крутости узимају у обзир деградацију еластичних карактеристика материјала током испитивања на замор. Крутост је могуће често или континуално мерити током испитивања на замор и могуће ју је утврдити без даљих оштећења материјала. Ови модели могу бити детерминистички где се тачно одређена вредност крутости предвиђа или могу бити статистички где се предвиђа расподела вредности крутости. Модели преостале чврстоће описују деградацију иницијалне статичке затезне чврстоће током испитивања на замор. Они су развијени из потребе за дефинисањем преосталог животног века материјала током којег материјал може да поднесе оптерећење. Најчешће се користе статистички модели попут двопараметарне Вејбулове расподеле за описивање преостале чврстоће и вероватноће отказа текстилног композита после дефинисаног броја циклуса.

Што се тиче треће категорије, њу чине модели прогресивног оштећења. Ови модели описују деградацију текстилног композита у директној вези са специфичним оштећењем. Повезују једну или више променљивих са мерљивим

оштећењима, квантитативно узимају у обзир прогресију стварних механизма оштећења. Често се означавају као механички модели.

Један од важних исхода свих модела замора јесте предвиђање заморног животног века. Свака од три наведене категорије користи сопствене критеријуме за одређивање момента крајњег отказа, а тиме и заморног животног века.

Модели заморног животног века користе информације са *S-N* или Гудманових дијаграма и дају критеријум отказа услед замора који дефинише заморни животни век узорка текстилног композита. Што се тиче заморног понашања материјала, потребно је узети у обзир три претпоставке [155]:

- заморно понашање материјала се може описати детерминистичким једначинама;
- статичка затезна чврстоћа материјала повезана је са заморним животним веком и преосталом чврстоћом материјала на последњем циклусу оптерећења;
- промена механичких карактеристика материјала током испитивања може се дефинисати помоћу двопараметарне Вејбулове расподеле.

Модели преостале чврстоће имају једноставан концепт – отказ се дешава када нането оптерећење проузрокује напон једнак преосталој чврстоћи [156].

Модели прогресивног оштећења и методологије предвиђања заморног животног века често су повезани због тога што се заморни животни век може предвидети дефинисањем критеријума заморног отказа који се потом намеће моделу прогресивног оштећења. За сваку појединачну врсту оштећења, могуће је експериментално дефинисати вредност променљиве оштећења при отказу.

У следећим пасусима ће бити дат преглед модела који су формиран током историје. Битна је напомена да ће једначине бити представљене као у оригиналним радовима како се не би изгубила препознатљивост неких од опште познатих модела.

Модели заморног животног века

Као што је већ речено, ови модели се базирају на информацијама са *S-N* или Гудманових дијаграма и предлажу критеријум отказа услед замора. Не узимају у обзир акумулацију оштећења, већ предвиђају број циклуса при којем ће доћи до отказа услед замора при дефинисаним условима оптерећења.

У раду [157] је постављен критеријум отказа услед замора заснован на формулацији просечног напона у текстилним композитима. Узима у обзир карактеристике влакана и матрице, као и њихову међусобну повезаност. Просечни напони се рачунају помоћу Мори-Танака методе узимајући у обзир несавршености везе између влакана и матрице. Једначина 4.22 односи се на просечни напон у влакну, док се једначина 4.23 односи на просечни напон у матрици.

$$\langle \sigma_{11}^F \rangle = X^F \quad (4.22)$$

$$\left(\frac{\langle \sigma_{22}^M \rangle}{X^M} \right)^2 + \left(\frac{\langle \sigma_{22}^M \rangle}{S^M} \right)^2 = 1 \quad (4.23)$$

где су:

- X^F - функција отказа услед замора при затезном оптерећењу за материјал влакна;
- X^M - функција отказа услед замора при затезном оптерећењу за материјал матрице;
- σ_{11}^F - просечна вредност напона у влакну;
- σ_{22}^M - просечна вредност напона у матрици;
- S^M - функција отказа услед замора при смицању за материјал матрице.

Наведене функције отказа зависе од односа напона R , броја циклуса N и фреквенције испитивања ν и добијају се са $S-N$ дијаграма које би требало унапред експериментално дефинисати.

У раду [158], као и у претходном случају, разликују се ситуације отказа влакна и отказа матрице:

$$\sigma_A = \sigma_A^U \quad (4.24)$$

$$\left(\frac{\sigma_T}{\sigma_T^U} \right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau^U} \right)^2 = 1 \quad (4.25)$$

где су:

- σ_A - напон у правцу влакна;
- σ_T - напон у управном правцу у односу на правац влакна;
- τ - тангенцијални напон;
- σ_A^U - затезна чврстоћа у правцу влакна;
- σ_T^U - затезна чврстоћа у управном правцу у односу на правац влакна;
- τ^U - максимални тангенцијални напон.

Како су затезне чврстоће функције напона при замору, односа напона и броја циклуса, критеријум отказа се изражава у облику три $S-N$ дијаграма који морају бити унапред експериментално дефинисани.

У раду [159] установљен је макроскопски критеријум отказа базиран на Цаи-Хил критеријуму отказа. Критеријум је дефинисан преко следеће релације:

$$\frac{3}{2(F+G+H)} \left[F(\sigma_Y - \sigma_Z)^2 + G(\sigma_Z - \sigma_X)^2 + H(\sigma_X - \sigma_Y)^2 + 2L\sigma_{YZ}^2 + 2M\sigma_{ZX}^2 + 2N\sigma_{XY}^2 \right] = \sigma^{-2} \quad (4.26)$$

где су:

- F, G, H, L, M, N – функције пикова напона X, Y, Z у правцима x, y, z и пикова напона Q, R, S у вези са тангенцијалним напонима σ_{YZ}, σ_{ZX} и σ_{XY} ;
- σ^{-2} - еквивалентни напон у вези са пиковима напона X, Y, Z .

Пикови напона су функције заморног животног века и одговарајући $S-N$ дијаграми морају прво бити дефинисани.

У раду [160] је дефинисана логаритамска линеарна веза између нанетог цикличног оптерећења које изазива напон σ и броја циклуса потребних за отказ N . Једначина 4.28 примењује се за добро одабрану референтну линију.

$$\sigma = m \log(N) + b \quad (4.27)$$

$$\sigma_R = m_R \log(N) + b_R \quad (4.28)$$

Скуп резултата добијених при испитивању материјала на замор (напон/број циклуса) користи се како би се установила референтна линија која се затим користи да би се предвидела било која друга напон/број циклуса линија помоћу две недимензионалне функције. Веза између два сета параметара материјала (m, b) и (m_R, b_R) дефинише се помоћу:

$$m = f(a_1, a_2, \theta) g(R) m_R \quad (4.29)$$

$$b = f(a_1, a_2, \theta) b_R \quad (4.30)$$

где су:

- $a_1 = \frac{\sigma_Y}{\sigma_X}$ - први биаксијални однос;
- $a_2 = \frac{\tau_{XY}}{\sigma_X}$ - други биаксијални однос;
- R - однос напона;
- θ - угао слагања слојева.

Овакав модел може се генерализовати кроз израз:

$$\sigma(a_1, a_2, \theta, R, N) = f(a_1, a_2, \theta) [g(R) m_R \log(N) + b_R] \quad (4.31)$$

У радовима [161] и [162] приказано је интензивно истраживање замора у текстилним композитним материјалима. Предложен је тзв. нормализован модел константног живота који представља комбинацију амплитуда средњег и максималног напона:

$$a = f(1-m)^U (c+m)^V \quad (4.32)$$

где су:

- f, U, V - линеарне функције $\log N_F$;
- $a = \frac{\sigma_{ALT}}{\sigma_T}$ - нормализована компонента наизменичног напона;

- σ_T - затезна чврстоћа материјала;
- $m = \frac{\sigma_M}{\sigma_T}$ - нормализована компонента средњег напона;
- $c = \frac{\sigma_C}{\sigma_T}$ - нормализована компонента отпора на притисак.

У радовима [163] и [164] приказан је модификовани Цаи-Хилов критеријум отказа за оптерећење у равни за вишеосно заморно оптерећење. Назван је генерализовани проширени Цаи-Хилов критеријум отказа услед замора и дефинисан је преко следеће релације:

$$M_{11}^2 \left(\frac{\sigma_{XX}}{\bar{\sigma}_{11}} \right)^2 + M_{22}^2 \left(\frac{\sigma_{XX}}{\bar{\sigma}_{22}} \right)^2 - M_{11}M_{22} \left(\frac{\sigma_{XX}}{\bar{\sigma}_{11}} \right) + M_{12}^2 \left(\frac{\sigma_{XX}}{\bar{\sigma}_{12}} \right)^2 = 1 \quad (4.33)$$

где су све компоненте напона у равни изражене у облику σ_{XX} кроз трансформацију напона између структурног координатног система и координатног система материјала, односе напона R_{XX}, R_{YY}, R_{XY} и односе α и β између $\sigma_{XX}, \sigma_{YY}, \sigma_{XX}, \sigma_{XY}$.

Заморне чврстоће $\bar{\sigma}_{ij}$ су функција броја циклуса N , фреквенције ν и односа напона R_{ij} и одређују се експериментално унапред.

У раду [165] представљена је емпиријска методологија за предвиђање заморног животног века за случај оптерећења варијабилном амплитудом за текстилне композите. $S-N$ дијаграм је описан преко једначине:

$$\sigma_{MAX} = b \log(N) + c \quad (4.34)$$

где су b и c полиноми четвртог реда у функцији распона односа напона R'' . За случај оптерећења затезање-затезање, однос напона је $0 < R < 1$, док се распон односа напона рачуна као $R'' = 4 + R$.

У раду [166] приказано је моделовање ефекта фреквенција оптерећења на текстилне композите. Референтни $S-N$ дијаграм је моделован преко четворо-параметарног закона:

$$p = p_0 + \frac{1 - p_0}{(1 + \tau N)^n} \quad (4.35)$$

где су:

- $p = \frac{\sigma}{\sigma_U}$;
- $p_0 = \frac{\sigma_0}{\sigma_U}$;
- σ_U - статичка затезна чврстоћа;
- σ_0 - граница напона испод које не долази до отказа услед замора;

- τ и n се одређују на основу уклапања криве.

$S-N$ дијаграм добијен при фреквенцији од 1 Hz је узет као референтни дијаграм. Максимална температура у узроку при испитивању на 1 Hz била је 39° C.

У раду [168] је представљен емпиријски закон замора:

$$\frac{d\sigma}{dt} = -a\sigma_{MAX} (1-R)^\gamma t^{-K} \quad (4.36)$$

где су:

- a и K - константе;
- $\gamma = 1,6$;
- σ_{MAX} - нанети ниво оптерећења;
- R – однос напона;
- t – време.

Једначину 4.36 могуће је трансформисати:

$$\left(\frac{\sigma_{ULT}}{\sigma_{MAX}} - 1 \right) \frac{1}{(1-R)^\gamma} f^\beta = \alpha (N^\beta - 1) \quad (4.37)$$

где су:

- f - фреквенција;
- $\gamma = 1,6$;
- N - број циклуса до отказа;
- α и β - константе.

Како је десна страна једначине 4.37 константа за одређену вредност σ_{MAX} без обзира на вредност f и R , параметри α и β могу се одредити експериментално.

Феноменолошки модели преостале крутости/чврстоће

Феноменолошки модели преостале крутости

Модели преостале крутости описују деградацију еластичних карактеристика материјала током испитивања на замор. Да би се описала ова деградација, често се користи променљива D , која је у једнодимензионалном стању дефинисана преко релације:

$$D = 1 - \frac{E}{E_0} \quad (4.38)$$

где је E_0 модул еластичности неоштећеног материјала.

Може се приметити да, иако се променљива D посматра као променљива оштећења, ови модели се класификују као феноменолошки модели, а не као модели прогресивног оштећења. Код модела прогресивног оштећења, степен пораста оштећења dD/dN изражава се у вези са макроскопски видљивим карактеристикама и није директно базиран на стварним механизмима оштећења.

У раду [168] предложен је модел за степен пораста оштећења:

$$\frac{dD}{dN} = \begin{cases} \frac{A(\Delta\varepsilon)^C}{(1-D)^B} & \text{затезање} \\ 0 & \text{притисак} \end{cases} \quad (4.39)$$

где су:

- A, B, C – параметри материјала;
- $\Delta\varepsilon$ - амплитуда нанете деформације.

Овај модел је током година прошао кроз више различитих итерација, с тим што је уместо амплитуде нанете деформације коришћена амплитуда напона. У раду [169] је степен пораста оштећења дефинисан као:

$$\frac{dD}{dN} = K_D \frac{\sigma^M}{(1-D)^N} \quad (4.40)$$

где су:

- σ^M - напон услед нанетог оптерећења;
- M, N – фиксни параметри;
- K_D - параметар дисперзије резултата.

Модел је даље модификован [170] у следећем облику:

$$\frac{d\omega}{dN} = \frac{K(\sigma_{MAX}^*)^N}{(1-\omega)^K} \quad (4.41)$$

где су:

- ω - представља оштећење D ;
- K, N и степен K – константне материјала;
- σ_{MAX}^* - бездимензиони ефективни напон који одговара максималном заморном напону.

Бездимензиони ефективни напон дефинише се као:

$$\sigma_{MAX}^* = \text{Max} \left\{ \sqrt{\left(\frac{\sigma_{11}}{X}\right)^2 - \frac{\sigma_{11}\sigma_{22}}{X^2} + \left(\frac{\sigma_{22}}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2} \right\} \quad (4.42)$$

где су X, Y, S затезна чврстоћа материјала, попречна затезна чврстоћа материјала и чврстоћа на смицање.

У раду [171] уведен је концепт модула замора F који је дефинисан као нагиб напона услед нанетог оптерећења и резултујуће деформације при одређеном циклусу. Степен деградације модула замора прати степену функцију броја циклуса замора N :

$$\frac{dF}{dN} = -AcN^{c-1} \quad (4.43)$$

где су A и c константе материјала.

Даље, претпостављено је да напон услед нанетог оптерећења σ_A варира линеарно са резултујућом деформацијом у било ком насумичном циклусу оптерећења:

$$\sigma_A = F(n_i) \cdot \varepsilon(n_i) \quad (4.44)$$

где су:

- $F(n_i)$ - модул замора на циклусу оптерећења n_i ;
- $\varepsilon(n_i)$ - деформација на циклусу оптерећења n_i .

После интеграције и увођења критеријума деформационог отказа, заморни животни век N се може израчунати као:

$$N = [B(1-r)]^{1/C} \quad (4.45)$$

где су:

- $r = \frac{\sigma_A}{\sigma_U}$ - однос напона услед нанетог оптерећења и затезне чврстоће материјала;
- B и C - константе материјала.

Предложен је модел кумулативног оштећења базиран на модулу замора и резултујуће деформације:

$$D = \frac{r}{1-r} \left[\frac{F_0}{F(n)} - 1 \right] \quad (4.46)$$

Отказ се дешава у ситуацији:

$$D = \sum_{i=1}^m \Delta D_i = 1 \quad (4.47)$$

где су:

- ΔD_i - количина акумулираног оштећења током замора при односу напона r_i ;
- m - број циклуса оптерећења до крајњег отказа.

У раду [172] предложен је модел преостале крутости:

$$\left(\frac{E(N^*)}{E(0)} \right)^A = 1 - H \left(1 - \frac{\sigma}{R(0)} \right)^A N^* \quad (4.48)$$

где су:

- $N^* = n / N$ - однос броја циклуса оптерећења и заморног животног века;
- σ - напон услед нанетог оптерећења;
- $R(0)$ - затезна чврстоћа материјала;

- $E(0)$ - почетни модул еластичности;
- a и H – параметри независни од нивоа нанетог оптерећења.

Даље је претходни модел развијан у [173] како би се добио модел кумулативног оштећења где се променљива оштећења дефинише као:

$$D = \left[\frac{H(1-\bar{\sigma})^A}{1-\bar{\sigma}^A} \right] \frac{n}{N} \quad (4.49)$$

где је:

- $\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{R(0)}$ - нормализовани распон напона.

У случају када је $D=0$, ни један циклус оптерећења није нанет и $E = E(0)$. Када је $D=1$, преостали модул је једнак крутости материјала при отказу E_F .

Наведени модел оштећења је проширен како би се предвидео преостали животни век композитног узорка изложеног заморном оптерећењу варијабилне амплитуде. Да би се дефинисао критеријум отказа услед замора у случају оптерећења варијабилном амплитудом, коришћен је приступ еквивалентних циклуса. Број циклуса на одређеном нивоу напона у групи оптерећења са варијабилном амплитудом се трансформише у еквивалентни број циклуса на одређеном референтном случају напона тако да оригинална и трансформисана група оптерећења производе исто оштећење. Када збир вредности оштећења при сваком нивоу напона достигне вредност један, долази до отказа. Овакав приступ усваја претпоставку да је понашање узорка композита зависно од претходног понашања.

Даље, у раду [174] предложен је нови модел преостале крутости:

$$\frac{dE^*(n)}{dn} = \frac{-a}{(n+1)[E^*(n)]^{M-1}} \quad (4.50)$$

где су:

- $E^*(n) = E(n)/E(N)$ - однос преостале крутости и крутости при отказу;
- n – број циклуса оптерећења;
- a и M – параметри који зависе од нанетог оптерећења, фреквенције испитивања итд.

Увођењем критеријума деформационог отказа, преостала крутост $E(n)$ се може изразити у зависности од статичке затезне чврстоће σ_U и може се добити статистичка расподела преостале крутости уз претпоставку да се затезна чврстоћа материјала може добити помоћу двопараметарне Вејбулове расподеле.

У раду [175] представљен је модел преостале крутости за композитне материјале где доминирају влакна:

$$\frac{dE(n)}{dn} = -E(0)Qvn^{v-1} \quad (4.51)$$

где су Q и v параметри који су повезани линеарном једначином. Експериментални подаци показали су да је могуће v записати као линеарну функцију напона услед нанетог оптерећења. Развијена је и статистичка расподела преостале крутости.

Утврђено је да наведени модел није био адекватан за примену код композитних материјала где доминира матрица јер код њих крива напон/деформација није више линеарна. Због тога је у раду [176] модел проширен за композитне материјале где доминира матрица тако што је $E(n)$ преостала крутост, тј. модул еластичности замењен са модулом замора $F(n)$. Кроз моделовање нелинеарног напонско деформационог понашања материјала, изведен је израз који повезује модул замора $F(n)$ са почетном крутошћу $E(0)$.

У раду [177] развијен је модел оштећења услед замора за ткење текстилне композите изложене оптерећењу затезање-затезање:

$$\beta = A \int_0^N \left(\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_0} \right)^n dN \quad \beta \leq \beta_{lim} \quad (4.52)$$

где су:

- N - број циклуса;
- ε_e - ефективни ниво деформације;
- ε_0 - референтни ниво деформације;
- A и n – константне.

Променљива оштећења β повезана је са еластичним карактеристикама преко следећих релација:

$$E = E_0 (1 - \beta) \quad (4.53)$$

$$v = v_0 (1 - \beta) \quad (4.54)$$

Феноменолошки модели преостале чврстоће

После испитивања на замор, узорак се може испитати класичним тестом на затезање на кидалици. Испитивање се врши до момента док не дође до лома узорка. До лома долази пре него што се достигне затезна чврстоћа материјала због оштећења која су еволуирала у узорку током испитивања на замор. Бележи се напон при којем је дошло до лома и тај ниво напона се назива преостала чврстоћа. Постоје два модела преостале чврстоће – модел изненадног отказа и модел истрошености.

Када се узорци текстилних композита изложе високим вредностима напона (замор услед ниског броја циклуса), преостала чврстоћа, у форми функције од броја циклуса, на почетку је скоро константна и почиње да драстично опада када се достигне број циклуса потребних за отказ. Модел изненадног отказа представља адекватну технику за описивање оваквог понашања и користи се за једнодирекционе текстилне композите високе чврстоће [178].

Са друге стране, када се узорак текстилног композита изложи нижим нивоима напона, преостала чврстоћа у форми функције од броја циклуса спорије опада. Овакво понашање описује се моделима истрошености. У овом случају важи да најјачи узорак има или најдужи заморни животни век или највећу преосталу чврстоћу при отказу [179].

Код модела истрошености који је иницијално представљен у [180], претпоставља се да је преостала чврстоћа $R(n)$ монотono опадајућа функција броја циклуса n и да се промена преостале чврстоће може апроксимирати степеном једначином:

$$\frac{dR(n)}{dn} = \frac{-A(\sigma)}{m[R(n)]^{m-1}} \quad (4.55)$$

где су:

- $A(\sigma)$ - функција максималног цикличног напона σ ;
- m - константа.

У раду [181] предложена је једначина криве преостале чврстоће:

$$R^v(n) = R^v(0) - \frac{R^v(0) - \sigma^v}{R^c(0) - \sigma^c} KS^b n \quad (4.56)$$

где су:

- R - преостала чврстоћа;
- n - број циклуса;
- σ - максимални циклични напон;
- v - параметар материјала;
- $c = \alpha / \alpha_f$ - однос Вејбуловог параметра облика затезне чврстоће и заморног животног века;
- $\tilde{N} = 1 / KS^b$ - $S-N$ дијаграм заморног животног века где су K и b константе, а S је распон напона.

У раду [182] истраживана је акумулација оштећења у носећим слојевима текстилних композита при цикличном испитивању на затезање. Предложен је модел базиран на нормализованој промени преостале чврстоће:

$$\left[\frac{1-f_r}{1-s} \right] = g\left(\frac{n}{N} \right) \quad (4.57)$$

где су:

- $f_r = \frac{F_r}{F_0}$ - нормализована преостала чврстоћа;
- $s = \frac{\sigma_a}{F_0}$ - нормализован циклични напон;
- N - број циклуса до отказа при напону σ_a ;
- $g\left(\frac{n}{N}\right)$ - функција нормализованог броја циклуса.

У раду [183] представљена је претпоставка да се иницијална затезна чврстоћа задржава скоро до момента финалног отказа услед замора. Дефинисана је имагинарна чврстоћа S_0 за први циклус оптерећења и она има већу вредност од затезне чврстоће. Уколико се $S-N$ крива за испитивање на затезање/затезање представи преко следеће релације:

$$s = 1 + K \log(N) \quad (4.58)$$

где је $s = S_f/S_0$ - S_f заморна чврстоћа при константној амплитуди оптерећења, а S_0 имагинарна чврстоћа, преостали заморни животни век, после одређеног броја циклуса оптерећења, може се представити кривом сличној $S-N$ криви, али са другачијим нагибом и условом да пролази кроз тачку S_0 . Оваква крива назива се крива оштећења и фамилија таквих криви се дефинише преко:

$$s = 1 + k \log(N) \quad k < K \quad (4.59)$$

Док год се деградација преостале чврстоће налази у простору између имагинарне чврстоће и затезне чврстоће, нема очигледне деградације чврстоће.

У раду [130] представљен је модел истрошености за предвиђање преостале чврстоће и заморног животног века композита изложеног заморном оптерећењу:

$$R(n) = R_0 - (R_0 - S_p) \left(\frac{n}{N}\right)^\nu \quad (4.60)$$

где су:

- R - преостала чврстоћа;
- S_p - максимални ниво напона услед нанетог оптерећења;
- ν - параметар материјала;

Линеарна деградација чврстоће кореспондира $\nu = 1$. Изненадни отказ се дешава у случају $\nu \gg 1$, а брза деградација чврстоћа се дешава при $\nu < 1$.

У раду [184] дата је претпоставка да преостала чврстоћа континуално опада пратећи следећу релацију:

$$\frac{d\sigma_n}{dn} = a_0 \Delta \sigma n^{-b} \quad (4.61)$$

где су:

- σ_n - преостала чврстоћа после n циклуса;
- $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \sigma_{\max} (1 - R)$ - мера утицаја односа напона R ;
- a_0 и b - константе.

Претходни модел је даље развијан у [185]. Једначина 4.61 је интегралисана и добијена је следећа релација:

$$\sigma_0 - \sigma_n = \alpha \sigma_{\max} (1 - R) (n^\beta - 1) \quad (4.62)$$

где су:

- $\alpha = \frac{a_0}{1 - b}$;
- $\beta = 1 - b$.

Једначина 4.62 омогућила је еволуцију деградације чврстоће током испитивања на замор, али захтева познавање параметара α и β , као и затезне чврстоће узорка σ_0 пре испитивања. Уколико се претпостави да отказ услед замора настаје када преостала чврстоћа достигне ниво максималног напона услед нанетог оптерећења, тј. $\sigma_n = \sigma_{\max}$, из једначине 4.62 може се добити следећа релација:

$$\sigma_0 = \sigma_{0N} = \sigma_{\max} [\alpha (1 - R) (N^\beta - 1) + 1] \quad (4.63)$$

Једначина 4.63 може се написати и на другачији начин како би била у одговарајућем облику за примену на експерименталним подацима добијеним са $S-N$ дијаграма:

$$\sigma_{\max} = \sigma_0 [\alpha (N^{*\beta} - 1) (1 - R) + 1]^{-1} \quad (4.64)$$

На основу једначина 4.63 и 4.64 могуће је добити експлицитну једначину за преосталу чврстоћу материјала σ_n :

$$\sigma_n = \sigma_{\max} + \alpha \sigma_{\max} (1 - R) (N^{*\beta} - n^\beta) \quad (4.65)$$

где је N^* број циклуса до отказа услед замора при σ_{\max} .

Међутим, затезна чврстоћа узорака пре испитивања, σ_{0N} , који су испитивани на замор до броја циклуса N^* , представља статистичку расподелу и требало би да се подудара са статичком расподелом затезне чврстоће σ_0 према једначини 4.63. Претпоставља се да се расипање у монотonoј затезној чврстоћи материјала σ_0 може представити двопараметарном Вејбуловом расподелом. Стога се вероватноћа добијања σ_0 вредности $\leq x$ може описати помоћу:

$$F_{\sigma_0}(x) = P(\sigma_0 \leq x) = 1 - \exp\left[-(x/\gamma)^\delta\right] \quad (4.66)$$

где су:

- γ - параметар скале или карактеристична чврстоћа;
- δ - параметар облика.

Из једначине 4.63 чини се да, уз познате σ_{\max} и R , расипање заморног животног века исказаног кроз више узорака одговара варијабилности у монотонјој затезној чврстоћи материјала. Следи да једначина 4.63 принципијелно прати претпоставку једнакости нивоа чврстоће и животног века дату у [178]. На основу дате претпоставке, даљи приступ моделовање понашања материјала се може развијати у статистичком правцу. Из једначина 4.63 и 4.66 може се препознати да се веза која омогућава прорачун $F(N^*)$ и да се пронађе N нижи од N^* , може написати у следећем облику:

$$F(N^*) = 1 - \exp \left\{ - \left[\frac{\sigma_{\max} \left[1 + \alpha (N^{*\beta} - 1) (1 - R) \right]}{\gamma} \right]^\delta \right\} \quad (4.67)$$

Даље, издвајањем N^* са леве стране једнакости у једначини 4.67 може се добити следећа релација:

$$N^* = \left\{ 1 + \frac{1}{\alpha(1-R)} \left[\frac{\gamma}{\sigma_{\max}} \left| \ln(1 - F(N^*)) \right|^{1/\delta} - 1 \right] \right\}^{1/\beta} \quad (4.68)$$

Једначина 4.68 омогућава директан прорачун класичне $S-N$ криве за фиксну вероватноћу отказа, $F(N^*)$, када је познат однос напона R . Сходно томе, при фиксном нивоу максималног нивоа цикличног напона, могуће је дефинисати број циклуса до отказа.

У раду [186] извршена је трансформација једначине 4.50 како би се дефинисала деградација преостале чврстоће. У једначини 4.50 крутост при отказу $E(N)$ дефинисана је увођењем деформационог критеријума отказа:

$$\frac{\sigma}{\sigma_U} = c_1 \left[\frac{E(N)}{E(0)} \right]^{c_2} \quad (4.69)$$

где су:

- σ - напон услед нанетог оптерећења;
- σ_U - затезна чврстоћа материјала;
- $E(0)$ - почетна крутост;
- $E(N)$ - крутост при отказу;
- c_1 и c_2 - параметри који узимају у обзир ефекат нелинеарности.

Преостала чврстоћа се може изразити као:

$$\sigma_R^\gamma = \sigma_U^\gamma - \frac{n}{N} (\sigma_U^\gamma - \sigma^\gamma) \quad (4.70)$$

где су:

- σ_R - преостала чврстоћа;
- γ - параметар материјала.

Заморни животни век N у једначини 4.70 може се изразити у функцији од затезне чврстоће σ_U и напона услед нанетог оптерећења σ .

У раду [187] дата је претпоставка да се преостала чврстоћа материјала при испитивању замора на затезање/затезање може описати следећом функцијом:

$$R(i) = R(0) - [R(0) - \sigma] \frac{\sin(\beta x) \cos(\beta - \alpha)}{\sin \beta \cos(\beta x - \alpha)} \quad (4.71)$$

где су:

- $R(i)$ - преостала чврстоћа на i -том циклусу оптерећења;
- $R(0)$ - иницијална затезна чврстоћа материјала;
- σ - напон услед нанетог оптерећења;
- $x = i/N_f$;
- α и β - параметри који се дефинишу током експеримента.

Модели прогресивног оштећења

Модели прогресивног оштећења разликују се од претходно наведених модела по томе што уводе једну или више променљиву оштећења која описује пропадање текстилног композита. Модели се базирају на физичком моделовању механизма оштећења који доводе до макроскопски видљивих деградацију механичких карактеристика. Модели су подељени у две категорије – модели који предвиђају пораст оштећења (број пукотина у матрици композита по дужном метру, величину зоне раслојавања) и модели који повезују пораст оштећења са преосталим механичким карактеристикама попут крутости и чврстоће.

Модели прогресивног оштећења који предвиђају пораст оштећења

Модел за пораст зоне раслојавања је приказан у [188]. Узорци су на почетку обрађени тако да су избушени отвори који су представљали зоне концентрације напона. Током испитивања на замор се појавила подужна пукотина између слојева композита која је изазвала раслојавање. Математичка формулација модела је приказана преко следеће релације:

$$\frac{dA_i}{dN} = \hat{c} f(G_{it})^n \quad (4.72)$$

где су:

- A_i - површина зоне раслојавања;
- G_{it} - степен ослобађања енергије током раслојавања;
- \hat{c} и n - константе које се експериментално утврђују.

У раду [189] је предложен полуемпиријски модел за предвиђање раста зоне раслојавања код текстилних композита услед заморног оптерећења. Модел је дефинисан преко следеће релације:

$$\Delta a \frac{\sigma_f^2}{E_y G_{crit}} = A \left(U \frac{G_{max}}{G_{crit}} \right)^b \quad (4.73)$$

где су:

- Δa - пораст зоне раслојавања;
- σ_f - затезна чврстоћа једног носећег слоја;
- E_y - попречни модул еластичности једног носећег слоја;
- G_{crit} - критична вредност ослобођене енергије при раслојавању;
- A и b - параметри који зависе од материјала;
- U - функција од G_{max} / G_{crit} и G_{min} / G_{max} .

У раду [190] анализирано је понашање пукотина у носећим слојевима код узорака текстилних композита изложених цикличном оптерећењу константне амплитуде. Предложена је функција отказа која је у стању да предвиди стварање иницијалне пукотине у појединачном слоју:

$$f = \frac{\sigma_{yy}^2}{YY'} + \left(\frac{1}{Y} - \frac{1}{Y'} \right) \sigma_{yy} + \left(\frac{\sigma_{xy}}{S} \right)^2 = 0,981N^{-0,134} \quad (4.74)$$

где су:

- Y - затезна чврстоћа слоја;
- Y' - отпорност на извијање слоја;
- S - смицајна чврстоћа слоја;
- σ_{yy} - напон у подужном правцу слоја;
- σ_{xy} - напон у попречном правцу слоја.

У раду [191] предложен је једноставан модел за описивање пораста зоне раслојавања код текстилних композита. Степен пораста зоне раслојавања при заморном оптерећењу описује се следећом релацијом:

$$\frac{da}{dN} = D(\Delta G)^n \quad (4.75)$$

где су:

- a - дужина пукотине одговорне за почетак раслојавања;
- ΔG - опсег ослобођене енергије при раслојавању;
- D и n - константне.

Модел прогресивног оштећења који повезују пораст оштећења са преосталим механичким карактеристикама

У овој категорији модели повезују променљиве оштећења са преосталим механичким карактеристикама попут крутости или чврстоће.

У раду [192] описана је филозофија моделовања која разматра проблематику међусобне интеракције различитих типова оштећења. Са једне стране, рачунски је неизводљиво узети у обзир све интеракције свих типова оштећења на микроскопском нивоу, али са друге сједињавањем деловања свих типова оштећења и осредњавањем њиховог утицаја долази до губитка критичних информација. Због тога је предложен приступ који је назван концепт репрезентативне запремине. Ова репрезентативна запремина дели се у критичне елементе за које се појединачно анализирају утицаји оштећења на микромеханичком нивоу и рачунају се локални напони. На основу добијених резултата може се апроксимирати понашање репрезентативне запремине. Локални напони доводе током времена до смањења чврстоће материјала која се може прорачунати преко следеће формулације:

$$\frac{\sigma_L^r(\tau_1)}{\sigma_{Lu}^i} = \left[\frac{(F_e / F_L)^i}{F_e(\tau) / F_L(\tau)} \right]_{rv} \left[1 - \int_0^{\tau_1} (1 - F_e(\tau)) k(t)^{k-1} dt \right] \quad (4.76)$$

Са леве стране знака једнакости налази се преостала чврстоћа нормализована иницијалном заморном чврстоћом материјала. Први фактор са десне стране знака једнакости преставаља однос почетне концентрације напона и тренутне концентрације напона у репрезентативној запремини rv , док је F генерализована функција отказа. Индекс e означава да се вредност функције отказа процењује у критичном елементу, док индекс L означава да се вредност функције отказа процењује у носећем слоју у некој тачки која је удаљена од места отказа. Све вредности под интегралом процењују се у критичном елементу. Функција отказа је написана као функција времена пошто се напон у критичном елементу мења како се оштећење развија у околним критичним елементима.

У раду [193] приказано је да се смањење крутости код текстилног композита може дефинисати преко веома једноставне релације:

$$E = E_0 (1 - cD) \quad (4.77)$$

где су:

- $D = 1/2s$ - просечна густина пукотине, док је $2s$ просечни корак пукотине;
- c - константа;
- E_0 - иницијална крутост;
- E - редукована крутост.

Даље, претпостављено је да је степен пораста пукотине степена функција еластичне енергије између две суседне пукотине у појединачном слоју. Применом једначине 4.77, може се дефинисати степен деградације крутости услед пукотина у матрици композита:

$$-\frac{1}{E_0} \frac{dE}{dN} = A \left[\frac{\sigma_{\max}^2}{E_0^2 (1 - E/E_0)} \right]^n \quad (4.78)$$

где су:

- σ_{\max} - заморни ниво напона;
- A и n - константне.

Једначина 4.78 је даље развијана у [194] где је дато предвиђање $S-N$ дијаграма уз помоћ деформационог критеријума који даје критичну вредност D_f променљиве оштећења D . Наводи се да је процес раслојавања доминантни механизам оштећења и дефинисана је променљива оштећења D као:

$$D = \frac{A}{A_0} = 2,857 \left(1 - \frac{E}{E_0} \right) \quad (4.79)$$

где су:

- A - површина зоне раслојавања;
- A_0 - укупна расположива зона за раслојавање између слојева.

Степен оштећења, који је примењен на квази-изотропни текстилни композит, дефинисан је као:

$$\left(\frac{dD}{dN} \right)_{R=0,1} = 9,2 \cdot 10^5 \left(\frac{\Delta\sigma}{\sigma_{TS}} \right)^{6,4} \quad (4.80)$$

где су:

- R - однос напона;
- $\Delta\sigma$ - распон напона услед нанетог оптерећења;
- σ_{TS} - затезна чврстоћа материјала.

У раду [195] коришћена је глобална променљива оштећења D која је једнака $C_m D_m$ или $C_d D_d$ у зависности од доминантног типа оштећења – пукотина матрице или раслојавања. D_m представља функцију густине пукотина, D_d представља функцију зоне раслојавања, док су C_m и C_d константне које зависе од карактеристика материјала и слагања слојева текстилног композита. Степен пораста глобалне променљиве оштећења D рачуна се као:

$$\frac{dD}{dN} = \frac{A(\sigma_{\max})^C}{BD^{B-1}} \quad (4.80)$$

где су:

- $D = 1 - \frac{E}{E_0}$;
- A, B, C - константне материјала;
- σ_{\max} - заморни ниво напона.

Предложена су четири модела предвиђања заморног живота при испитивању на затезање/затезање узорка текстилног композита:

- критеријум појаве пукотине у матрици композита;
- критеријум величине зоне раслојавања;
- критеријум преосталог модула еластичности;
- критеријум преостале чврстоће.

Што се тиче критеријума појаве пукотине у матрици композита и величине зоне раслојавања, одређена је максимална дозвољена густина пукотина или максимална дозвољена зона раслојавања. За критеријуме преосталог модула еластичности и преостале чврстоће, установљене су додатне претпоставке да се $S-N$ крива за композите сачињене од слојева истог усмерења понаша према следећој степеној релацији:

$$KN_f \sigma_{\max}^b = 1 \quad (4.80)$$

где су:

- K и b - константе;
- N_f - заморни животни век;
- σ_{\max} - максимални ниво напона услед нанетог оптерећења.

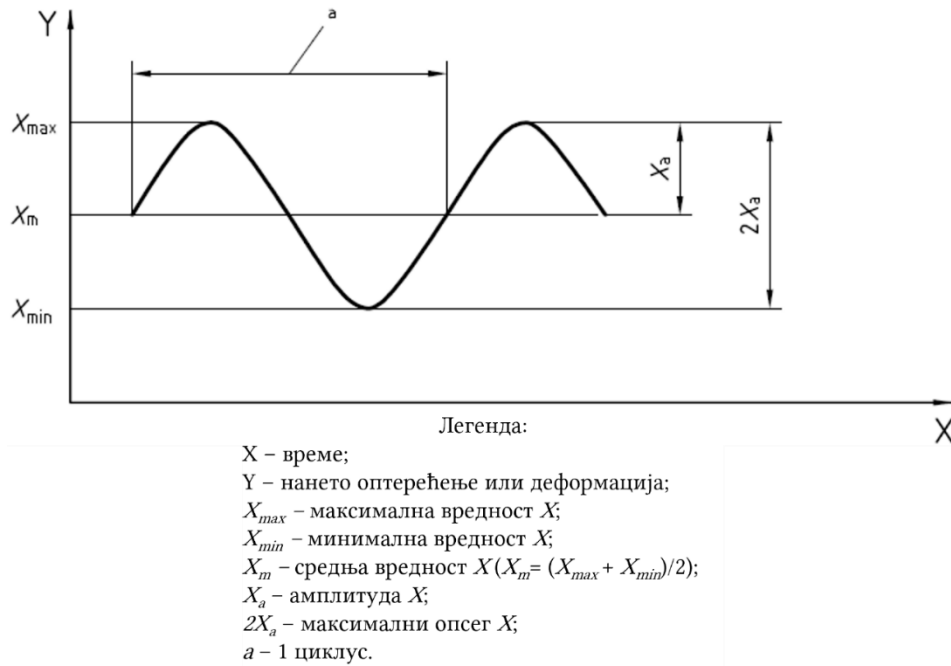
4.4 Стандарди у вези са испитивањем на замор текстилних композита

Као што је више пута речено, транспортне траке су текстилни композити који се састоје од гумених заштитних слојева (полимери) и носећих текстилних слојева (ткана полимерна влакна урођена у полимерни раствор који се може сматрати матрицом). У поглављу 2.4 су обрађени стандарди који се тичу транспортних трака. Међутим, не постоје стандарди који обрађују област замора код трака. Због тога ће у овом поглављу бити обрађена два стандарда који најприближније описују овај феномен. Стандарди ће бити детаљно анализирани пошто до сад нису примењивани за област замора трака. Одређени сегменти стандарда који се поклапају са стандардима обрађеним у поглављу 2.4 неће бити разматрани овде. Стандарди су ISO 13003 2003 *Fibre-reinforced plastics – Determination of fatigue properties under cyclic loading conditions* [196] и ASTM D 3479/D 3479M 2019 *Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials* [197].

4.4.1 ISO 13003 2003

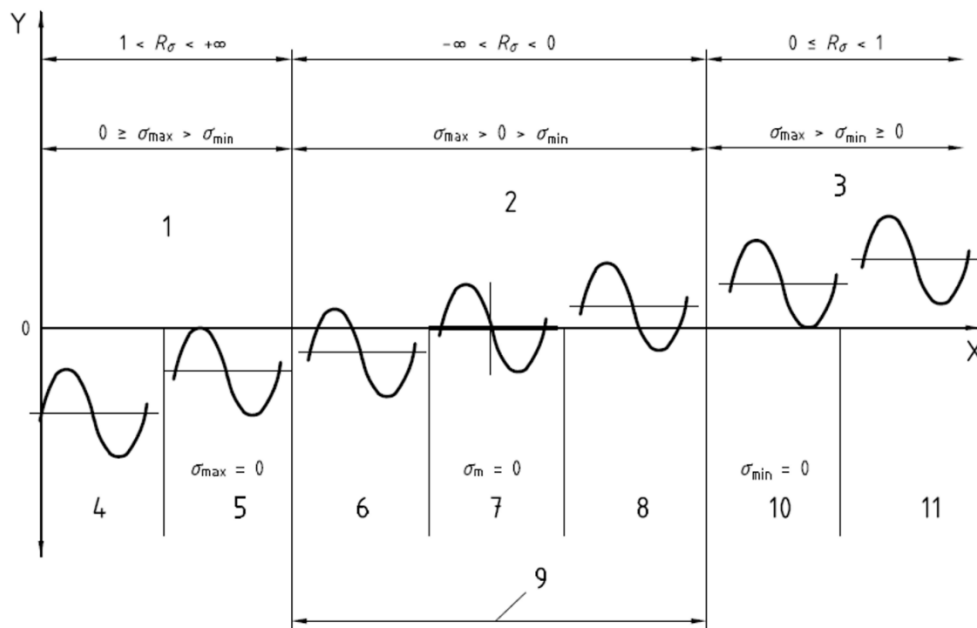
Што се тиче ISO стандарда, он дефинише процедуру за испитивање на замор влакнима ојачаних полимерних композита при цикличном оптерећењу константне амплитуде и фреквенције.

Облик цикличне промене нанетог оптерећења и прорачунатог напона или деформације између константних максималних и минималних вредности, обично је синусног облика, слика 4.34.



Слика 4.34. Облик цикличне промене оптерећења (напона) или деформације [196]

Тип цикличне промене зависи од карактеристике оптерећења или деформације, слика 4.35. Може бити чисто притисног или затезног карактера, а може бити и мешовитог карактера.



Слика 4.35. Примери типова циклуса [196]

Уређај за испитивање би требало да буде у стању да спроведе велики број циклуса оптерећења ($\geq 10^8$ циклуса) без губитка прецизности. Број циклуса може се добити на основу директног мерења са испитног уређаја или на основу дефинисане фреквенције и временског трајања испитивања.

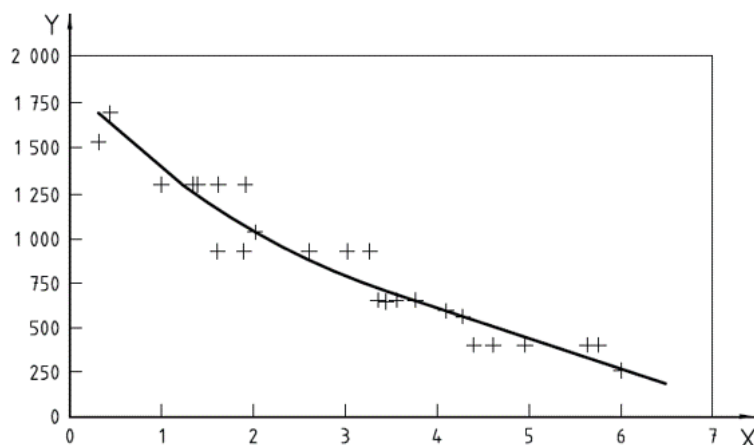
Сензори који се користе за мерење оптерећења и деформације треба да имају опсег прецизности од 2%.

Што се тиче броја узорака, за одређивање дијаграма зависности животног века материјала од нивоа оптерећења/деформације, потребно је испитати пет узорака на минимално четири различита нивоа нанетог оптерећења/деформације. За одређивање Вејбулове криве, потребно је 24-30 узорака испитати на већем броју нивоа нанетог оптерећења (идеално 3 узорка на 10 нивоа оптерећења).

Фреквенција испитивања обично се узима највећа могућа како би се скратио период испитивања, али мора се изабрати тако да се избегне повећање температуре у узорку кроз аутогено загревање. Дозвољено је повећање температуре узорка за 10° C у односу на почетну. Генерално, опсег фреквенције испитивања креће се између 1 и 25 Hz.

На почетку се 5 узорака испитује на статичко затезање како би се дефинисале номиналне карактеристике узорка. Затим се испитују узорци на дефинисане опсеге заморног оптерећења. Потребно је бележити нането оптерећење/деформацију, максимално оптерећење/деформацију, пуну хистерезу криве оптерећења/деформације, температуру узорка на сваком нивоу оптерећења/деформације, број циклуса до отказа или губитка крутости од 20%.

Резултати се приказују на графикону попут оног на слици 4.36.



Слика 4.36. Пример S-N дијаграма [196]

Y оса представља вредност напона/деформације и линеарног је типа, док X оса представља број циклуса и логаритамског је типа. Оваква крива назива се Велерова крива или S-N дијаграм. На графикону је потребно обележити све добијене вредности (вредност напона/деформације при отказу на одређеном броју циклуса - + на дијаграму) и затим одредити оптималну криву помоћу методе најмањег квадрата како би се показао тренд података.

Што се тиче статистичке анализе резултата, потребан је велик број испитивања. Најчешће се користи Вејбулова крива за дефинисање тренда података.

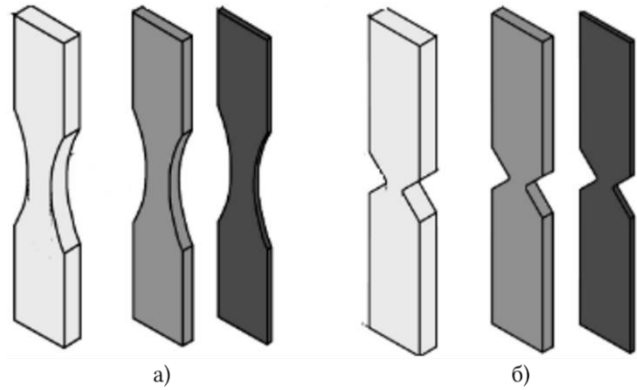
Однос напона треба да буде такав да минимални напон никада није једнак нули и предлаже се вредност 0,1.

Извештај испитивања треба да садржи следеће податке:

- позивање на наведени стандард;
- пуне карактеристике испитиваног материјала (планирана употреба материјала, природу матрице, природу и тип ојачавајућих влакана, начин ткања и редослед слагања слојева, порекло материјала, број произвођача и број серије материјала, опис процеса производње ако је познат);
- метода прављења узорака;
- која метода је коришћена;
- врста контролисаних параметара (оптерећење, деформација) и облик цикличног оптерећења (најчешће синусоидни);
- амбијенталне карактеристике (температура, влажност) и метода одређивања;
- укупан број коришћених узорака;
- просечна вредност димензија узорка (ширина \times дебљина \times дужина) и облик;
- геометрија теста;
- површина узорка изложеног напону;
- затезна чврстоћа узорка при стандардном затезању;
- заморна чврстоћа узорка при стандардом затезању уколико је потребно;
- максималне, минималне и просечне вредности напона, оптерећења и деформације;
- однос напона R ;
- фреквенција испитивања;
- критеријум отказа (лом или губитак крутости);
- за сваки узорак:
 - димензије узорка;
 - нането оптерећење/деформација, услови околине;
 - број циклуса до отказа (лома или губитка 20% крутости);
 - максимална температура површине узорка уколико је изнад дозвољене вредности;
 - тип испитивања (затезање/затезање, затезање/притисак, притисак/притисак).
- графиконе крутости узорка према броју циклуса уколико је могуће;
- дијаграм резултата – напон/деформација према броју циклуса до отказа за све узорке;
- датум испитивања.

4.4.2 ASTM D 3479/D 3479M 2019

Што се тиче ASTM стандарда, он дефинише заморно понашање текстилних полимерних композита изложених цикличном затезном оптерећењу. Бави се само композитима ојачаним влакнима која имају ортотропне еластичне карактеристике у правцу испитивања, тј. у подужном правцу.



Слика 4.37. Врсте узорака – узорци са прелазом са радијусом а), узорци са зарезима б)

Могу се користити само узорци који немају зарезе на најужем делу, већ прелазе са радијусом, слика 4.37. Оптерећење мора имати константну амплитуду једноосног карактера у равни.

Оптерећење мора имати константну амплитуду једноосног карактера у равни.

Постоје две процедуре које стандард прописује – процедуре А и Б.

Што се тиче процедуре А, контролни параметар је оптерећење (напон) и машином за испитивање узорака се управља тако да је узорак изложен понављајућем оптерећењу са константном амплитудом. Узорак се оптерећује циклично између минималне и максималне вредности оптерећења при дефинисаној фреквенцији. Број циклуса потребних до отказа (лома или унапред одређене промене крутости) може се одредити за узорак изложен дефинисаном односу оптерећења, односно напона и максималном напону.

Што се тиче процедуре Б, контролни параметар је деформација у правцу оптерећења и машином за испитивање узорака се управља тако да је узорак изложен понављајућој деформацији са константном амплитудом. Узорак се оптерећује циклично између минималне и максималне вредности деформације при дефинисаној фреквенцији. Број циклуса потребних до отказа (лома или унапред одређене промене крутости) може се одредити за узорак изложен дефинисаном односу деформације и максималној деформацији.

Наведене процедуре формиране су како би се добиле карактеристике материјала при испитивању на замор. Главни резултат који се добије јесте заморни животни век при дефинисаном оптерећењу и условима животне средине. Понављањем тестова се може добити расподела заморног животног века за одређене типове материјала, начине слагања слојева композита, радних услова и услова околине. Овај стандард се може користити код испитивања заморних оштећења код текстилних полимерних композита попут микроскопских пукотина, лома влакна или раслојавања. Преостала чврстоћа или крутост зависе од типа оштећења које се јавило. Преостала чврстоћа добија се када се прекине циклично испитивање узорка и узорак се статички затегне до моменте отказа. Преостала крутост се добија на исти начин. Потребно је елиминисати могућност савијања

узорка током испитивања. Савијање се може десити уколико чељусти нису саосне, уколико узорак није адекватно постављен у чељусти или уколико узорак није адекватно припремљен. За утврђивање карактеристика композитног материјала, потребно је да испитивања буду са истом фреквенцијом испитивања и односом оптерећења (напона). Промене ова два параметра доводе до другачијих резултата.

Што се тиче машине за испитивање, потребно је да има фиксну и покретну чељуст. Требало би да постоји могућност управљања брзином померања покретне чељусти. Погонски механизам треба да оствари синусоидну форму оптерећења. Сензор оптерећења треба да има прецизност од 1%. Сензор помераја може бити деформетар или ротациони енкодер на ЕМ.

Током припреме узорака, мора се водити рачуна да буду адекватно издвојени јер свако оштећење на њима доводи до погрешних резултата. Препорука је да ивице узорка буду исполиране тако да се могу видети влакна појединачног слоја путем обичног оптичког микроскопа.

Број узорака за одређивање *S-N* дијаграма дат је у табели 4.1. Такође, потребно је минимум три различита нивоа оптерећења.

Табела 4.1. Број узорака за одређивање *S-N* дијаграма [197]

Тип теста	Број узорака
Прелиминарни тест	6
Истраживачко испитивање	12
Утврђивање карактеристика материјала	24
Испитивање поузданости	24

Температуре околине треба да буде у опсегу $23^{\circ} \pm 3^{\circ} \text{C}$, влажност треба да буде $50\% \pm 10\%$.

На почетку испитивања, потребно је измерити узорке и прорачунати њихову површину. Затим се пет узорака испитује на статичко затезање како би се прорачунала просечна затезна чврстоћа и просечна деформација узорка при отказу. Одређује се максимална и минимална вредност параметра теста (напон или деформација) за заморно испитивање са константном амплитудом као проценат просечне затезне чврстоће или просечне деформације узорка при отказу. Бележи се однос напона или деформације. Дефинише се фреквенција испитивања и одређује се облик криве цикличног оптерећења (најчешће синусоидна). Потребно је пратити температуру узорка, не сме да порасте за више од 10°C . Због тога је потребно пажљиво изабрати фреквенцију испитивања.

Узорци се у чељусти постављају водећи рачуна да буду саосни са осом испитног уређаја. Неопходно је да буде чврст контакт како узорак не би исклизнуо током испитивања.

Бележи се број циклуса после којег је дошло до отказа.

Што се тиче процедуре А, постоје два приступа како прећи из зоне нултог оптерећења у зону планираног заморног оптерећења – амплитудно оптерећење и директно оптерећење.

Амплитудно оптерећење се састоји од квази-статичког повећања оптерећења до постизања планираног просечног оптерећења (напона), тј. планиране тачке, и лаганог повећања амплитуде оптерећења (напона), тј. распона, све док се не достигну жељене минималне и максималне вредности амплитуде. Код овог приступа, транзиција заморног оптерећења се дешава између услова нултог оптерећења и услова минималне и максималне вредности амплитуде. Број циклуса потребних да се уради ова транзиција се бележи.

Директно оптерећење се састоји од квази-статичког повећања оптерећења до минималног оптерећења (напона) које одмах прати циклично оптерећење између минималног и максималног заморног оптерећења (напона). Овај приступ елиминише транзицију заморног оптерећења повезану са амплитудним оптерећењем и могуће је само уз примену модерних контролера.

Бележи се деформација узорка адекватним уређајем.

Потребно је пратити максималну и минималну вредност заморног оптерећења током испитивања. Уколико се јави одступање од жељених вредности веће од 2%, потребно је забележити.

Што се тиче процедуре Б, она се користи када је деформација параметар теста. Користи исти приступ транзиције оптерећења као процедура А, али се константна амплитуда оптерећења дефинише помоћу максималне, минималне, просечне деформације, као и амплитуде деформације.

Бележи се деформација узорка адекватним уређајем.

Потребно је пратити максималну и минималну вредност деформације током заморног испитивања. Уколико се јави одступање од жељених вредности веће од 2%, потребно је забележити.

За прорачун расподеле заморног живота, може се користити *Log-Normal* расподела или, чешће, двопараметарна Вејбулова расподела. Двопараметарна Вејбулова расподела се често користи како би се представили подаци добијени током заморног испитивања константном амплитудом узорака. Функција густине двопараметарне Вејбулове расподеле за заморни животни век изражава се преко следеће релације:

$$f(N) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{N}{\alpha}\right)_{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{N}{\alpha}\right)_{\beta}\right] \quad (4.81)$$

Кумулативна функција Вејбулове расподеле за заморни животни век изражава се преко следеће релације:

$$F(N) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{N}{\alpha}\right)_{\beta}\right] \quad (4.82)$$

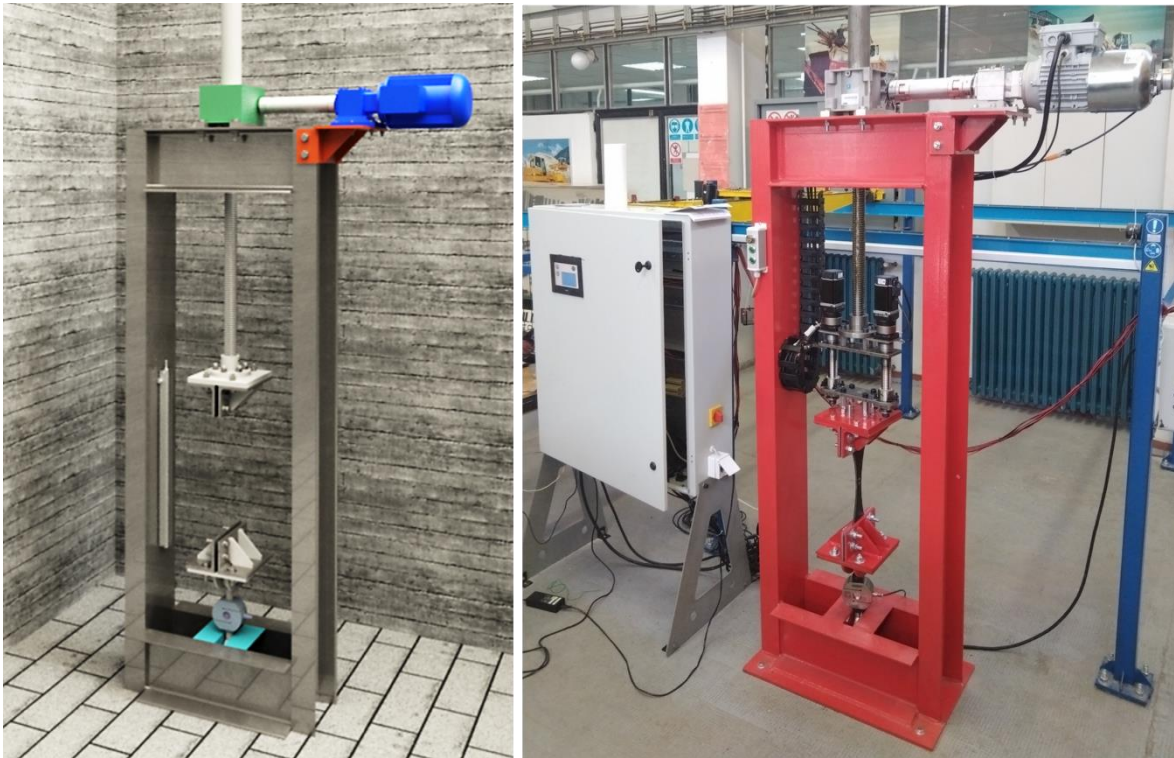
За одређивање Вејбулових параметара скале и облика, α и β , користи се техника максималне сличности.

Извештај испитивања треба да садржи следеће податке:

- позивање на наведени стандард;
- време, место и име и презиме оператера теста;
- идентификација материјала који се испитује;
- опис процеса производње узорка;
- просечну дебљину носећих слојева материјала;
- резултате недеструктивних тестова евалуације;
- метод припреме узорака;
- опис испитне опреме – испитног уређаја, чељусти, притиска чељусти на узорак, резултати поравнања, степен узорковања података и врста аквизиционог уређаја, датуми и методе калибрације за све мерне уређаје;
- опис узорака – број испитаних узорака, димензије сваког узорка, начин слагања слојева композита и средња вредност дебљине узорка;
- опис услова околине – релативна влажност и амбијентална температура;
- опис оптерећења – контролни параметар теста (оптерећење (напон) или деформација), фреквенција, облик криве цикличног оптерећења, моменти када се јави одступање од жељених вредности веће од 2%;
- процедура – процедура А или процедура Б, начин везе између мерних уређаја оптерећења и деформације за узорком и опис опреме за аквизицију података;
- број циклуса до отказа, максималне и минималне вредности оптерећења (напона) или деформације, однос напона или деформације, понашање узорка током испитивања које је довело до отказа (раслојавање, пукотине итд.) сваког узорка;
- критеријум отказа (лом, губитак крутости итд.);
- затезна чврстоћа контролног узорка за процедуру А или деформацију при отказу за процедуру Б, просечну вредност, стандардну девијацију и коефицијент варијације;
- препорука је да се уврсте и следеће ставке:
 - идентификација материјала испитиваног узорка – произвођач, број произвођача, ознака материјала и број серије, датум сертификације, датум престанка важења сертификације, пречник нити, број покиданих или уврнутих нити, тип матрице;
 - опис производних корака коришћених за производњу композита укључујући датум почетка и краја производње, спецификацију процеса, опис коришћене опреме;
 - опис физичких карактеристика носећих слојева – густина, запремински проценат ојачавајућих влакана.

5. Уређај за испитивање узорака транспортних трака УЗИТТ МКМ 5000

За потребе ове дисертације, пројектована је и израђена кидалица под именом УЗИТТ МКМ 5000 која се састоји од два модула. Модул А се користи за статичко затезно испитивање узорака транспортних трака, док се модул Б користи за заморно затезно испитивање узорака трака. Кидалица је тако пројектована да се модул Б уграђује у модул А и да је модул Б неактиван током статичког испитивања. На слици 5.1. је приказан концепт кидалице и израђена кидалица.



Слика 5.1. Концепт модула А и израђена кидалица са модулима А и Б

5.1 Модул А

Пројектовање и израда модула А кидалице за испитивање узорака транспортних трака били су предмет више научних радова [198][199][200], као и два мастер рада [201][202]. На слици 5.2. је приказана скица модула А.

Улазни подаци за пројектовање модула А били су:

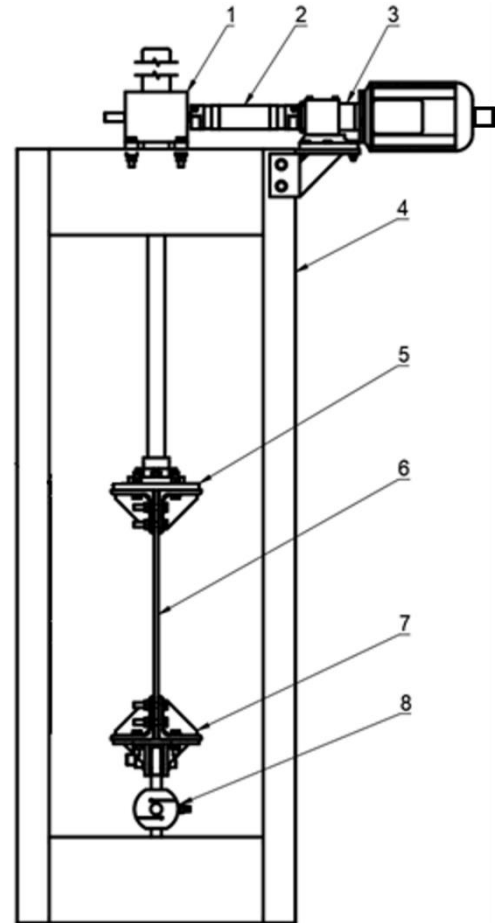
- максимална сила затезања 50.000 N;
- минимални ход чељусти: 127,5 mm;
- брзина затезања узорка: 100 mm/min \pm 10 mm/min;
- константна брзина затезања;
- могућност држања узорка под истим нивоом оптерећења дужи период.

Модул А се састоји од склопа навојног вретена (1), спојнице вратила (2), мото-редуктора са енкодером (3), носеће конструкције (4), носеће конструкције (4), горње чељусти (5), узорка траке (6), доње чељусти (7) и давача силе (8). Веза између давача силе и доње чељусти, као и давача силе и носеће конструкције, урађена је преко зглобних веза како би се преносила само аксијална сила.

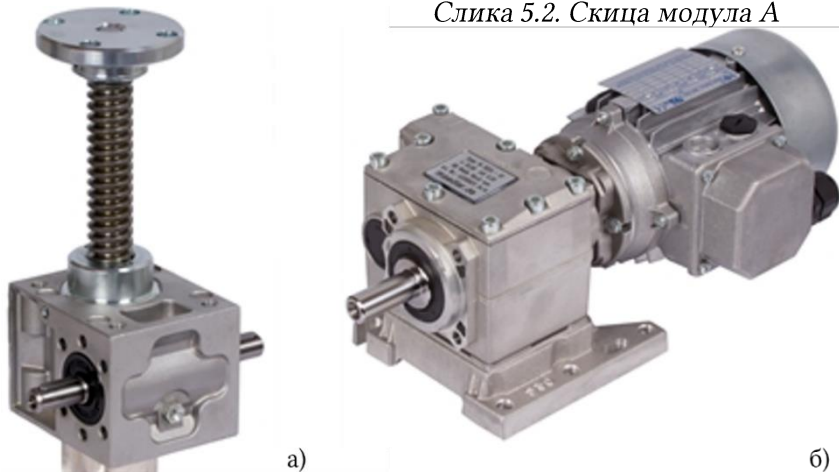
Склоп навојног вретена 475 014 00 је изабран из [203]. Навојно вретено типа Б има вођицу против ротације, тако да је омогућено само аксијално померање навојног вретена, слика 5.3. а). Носивост навојног вретена на притисак је 50 kN, димензија навоја је 40x7, док је материјал вретена С45. Померај навојног вретена за један улазни обртај је 1 mm.

Како би се постигла сила од 50 kN на навојном вретену, потребан је улазни момент од 34 Nm. Због тога је изабран мото-редуктор са енкодером снаге 0,55 kW, момента 47 Nm и излазног броја обртаја од 107 min^{-1} , слика 5.3. б). Тиме је омогућена брзина аксијалног померања навојног вретена од 107 mm/min. Такође, поседује кочницу. Мото-редуктор са енкодером 432 055 80 изабран је из [203].

Веза између мото-редуктора и склопа навојног вретена је остварена преко вратила спојнице која има могућност преноса 78 Nm, слика 5.4. а). Има могућност компензације великих несаосности вратила – аксијалне, радијалне и угаоне. Вратило спојница RNW 24 је изабрана из [203].



Слика 5.2. Скица модула А



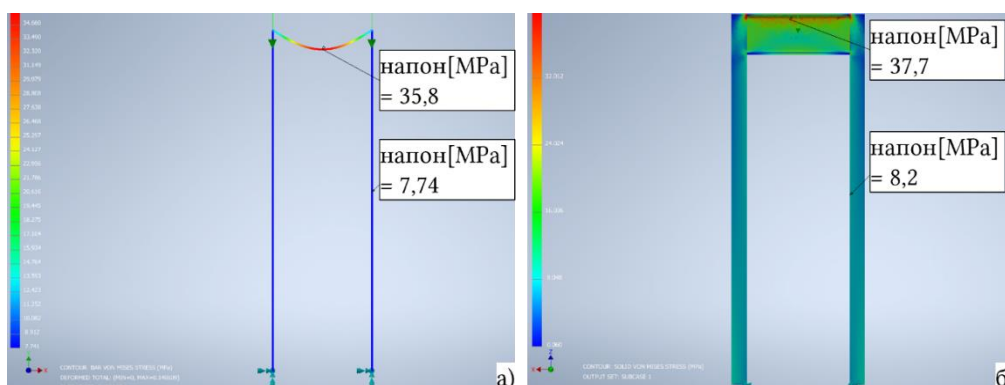
Слика 5.3. Склоп навојног вретена а), мото-редуктор са енкодером б) [203]



Слика 5.4. Вратило спојница а) [203], давач силе б) [204]

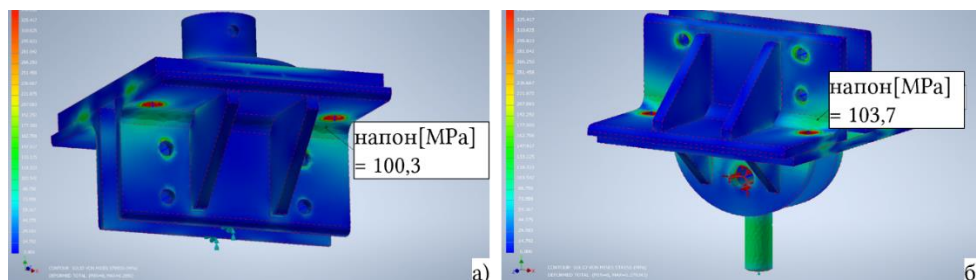
Давач силе је капацитета 7.500 kg, што је 73.575 N. Мерни опсег превазилази тражени мерни опсег од 50.000 N због тога што ће се наведени давач користити и за мерења модула Б која су заморног карактера. Прецизност давача је 0.02%. Приказан је на слици 5.4. б). Давач силе *CTL 7500* је изабран из [204].

Што се тиче носеће конструкције, за рам кидалице је изабран метални профил U200, материјала S355. За чељусти је изабран метални профил L100, материјала S355. Комплетан рачунски прорачун је дат у [201]. У дисертацији ће бити приказани резултати анализе конструкције методом коначних елемената. Нането оптерећење је 50 kN. За анализу рама кидалице коришћења је линијска и запреминска анализа. Резултати анализе су приказани на слици 5.5.



Слика 5.5. Резултати анализе МКЕ рама кидалице – линијска а), запреминска б)

У оба случаја добијени резултати су нижи од напона течења датог материјала. Одступање резултата се може објаснити концентрацијама напона које су се јавиле код запреминске анализе због комплексности геометрије која не постоји код линијске анализе. За анализу горње и доње чељусти коришћења је запреминска анализа. Резултати анализе су приказани на слици 5.6.

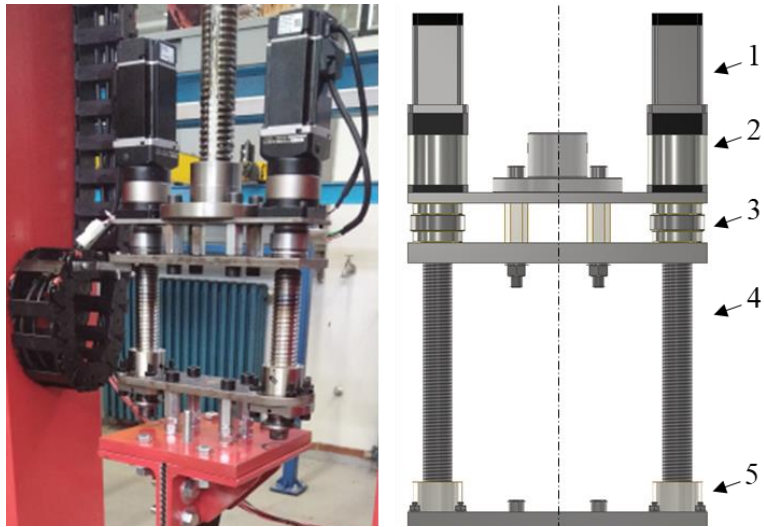


Слика 5.6. Резултати анализе МКЕ чељусти – горња чељуст а), доња чељуст б)

У оба случаја добијени резултати су нижи од напона течења датог материјала. Јавиле су се концентracије напона око отвора за вијак које су занемарене јер у реалности глава вијка и навртка налажу преко подлошке на површину чељусти, а у моделу је подешено да глава вијка и навртка налажу на линију кружног отвора за вијак.

5.2 Модул Б

Модул Б се користи за испитивање узорака на замор. Приказан је на слици 5.7. Састоји се од два серво мотора (1), два планетарна редуктора (2), два улежиштења (3), два навојна вретена (4), две навртке са куглицама за навојно вретено (5) и осталих везних елемената. Сви елементи модула су изабрани из каталога [205].



Слика 5.7. Модул Б за испитивање на замор

Улазни подаци за пројектовање модула Б су били:

- максимална сила затезања 25.000 N;
- минимални ход чељусти: 127,5 mm;
- фреквенција испитивања: 0,1 ÷ 5 Hz;
- подешавање профила оптерећења;
- могућност држања узорка под истим нивоом оптерећења дужи период.

5.3 Управљање уређајем

Што се тиче статичког испитивања, померај се мери преко ротационог енкодера. Брзина затезања је дефинисана брзином мото-редуктора који је прикључен на фреквентни регулатор *Hitachi NES1-007 HBE*. Фреквентни регулатор добија задату вредност брзине преко аналогног сигнала са *PLC*-а *Fatek PBS MC 64* који поседује модул за генерисање аналогног сигнала *FBS 2D 4A*. Сигнал са мерне ћелије иде на мерно појачало модул *FBS LC* у склопу *PLC*-а. Што се тиче динамичког испитивања, померај и брзина се дефинишу преко *PLC*-а који управља серво драјверима *Fatek SD3* који регулишу рад серво мотора. Корисник задаје параметар теста преко *PLC*-а који уз помоћ серво драјвера и интерног алгоритма успоставља параметре мерења (амплитуда, фреквенција, профил сигнала, средња сила). *PLC* у комуникацији са серво драјверима управља мерењима и прати

измерене резултате. Затим их усмерава ка рачунару који се користи као интерфејс према кориснику ради задавања параметара и који записује резултате. Да би се оба серво мотора идентично кретала, *PLC* управља једним серво драјвером у смислу задавања облика сигнала, фреквенције, амплитуде итд, а други серво драјвер копира кретање првог. За ову намену је посебно дизајниран софтвер који има модул за статичко испитивање и модул за динамичко испитивање. Веза између *PLC* -а и рачунара је на бази *RS485* интерфејса. Параметри су 19.200 битова у секунди. Сличан протокол се користи за комуникацију серво драјвера и *PLC*-а, као и између *PLC*-а и панела осетљивог на додир. Ова комуникација је отпорна на сметње и обезбеђује довољну количину података у времену.



Слика 5.8. Редно везана мерна хелија уређаја са калибрационом мерном хелијом

5.4 Калибрација уређаја

Калибрација уређаја је постигнута применом мерне хелије познате карактеристике *CZL312A 5t* која је монтирана на ред са мерном хелијом уређаја за испитивање узорака транспортних трака, слика 5.8.

За поступак калибрације је коришћен узорак транспортне траке ширине 10 cm и дужине 100 cm називне носивости 50.000 N, слика 5.9.

Добијена је карактеристика мерне хелије која је унета у софтвер. На крају калибрационог поступка је покидан калибрациони узорак при вредности оптерећења од 49.260 N, слика 5.10.

Слика 5.10. Покидан калибрациони узорак



Слика 5.9. Поступак калибрације

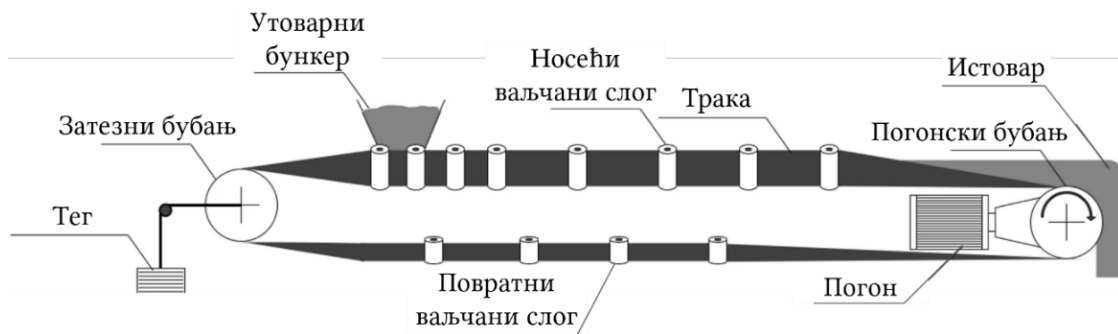


6. Испитивање узорка транспортних трака

У овом поглављу ће бити приказано експериментално испитивање узорка транспортних трака.

Као што је речено у поглављу 2.3.5, приликом избора броја носећих слојева траке, користи се степен сигурности у распону $9 \div 11$. Овако висок степен сигурности објашњава се тиме што се оптерећење у траци не расподељује униформно кроз све носеће слојеве и да трака није изложена само затезним оптерећењима, већ и савојним оптерећењима када се трака савија око бубњева и прелази преко ваљака. Такође, кроз прорачун се не узима у обзир појава пузања и замора влакана и спојева траке. Због тога ће се у овој дисертацији анализирати утицај замора на животни век траке, поготово на траке са мањим бројем носећих слојева.

Као пример, анализираће се хоризонтални транспортер са траком дужине 2.000 m, капацитета $300 \text{ m}^3/\text{h}$ и брзине транспорта $1,68 \text{ m/s}$ који транспортује житарице, слика 6.1.



Слика 6.1. Хоризонтални транспортер са траком [206]

На почетку ће се дати рачунска подлога експерименталног испитивања како би се утврдиле силе које се јављају у траци методом обиласка контуре. Затим ће се изабрати трака на основу највеће силе у траци уз примену одговарајућег степена сигурности.

После избора траке, приступиће се експерименталном испитивању траке на уређају описаном у претходном поглављу. Приказаће се припрема узорка и комплетан ток експеримента.

Урадиће се више типова експеримената.

Што се тиче првог типа експеримента, на модулу Б уређаја за испитивање транспортних трака ће се узорци нове траке изложити заморном оптерећењу при дефинисаним нивоима оптерећења до момента лома узорка. Овим ће се дефинисати заморни модел животног века у облику F^1-N^2 дијаграма. Овако експериментално добијен модел животног века ће се упоредити са моделом

¹ F – ниво оптерећења (сила);

² N – број циклуса до лома узорка.

животног века добијеним рачунарским експериментом нумеричком методом коначних елемената. Испитаће се узорак траке који ће бити формиран као солид елемент и оптеретиће се заморним оптерећењем. Пошто аутор није пронашао научне радове који су се бавили испитивањем узорака текстилних композита овом методом, биће поступно приказан рачунарски експеримент.

Што се тиче другог типа експеримента, на модулу Б уређаја за испитивање транспортних трака ће се узорци нове траке изложити заморном оптерећењу при дефинисаном броју циклуса и дефинисаним нивоима оптерећења и затим ће се на модулу А уређаја испитати преостале механичке карактеристике узорака. Овим ће се дефинисати заморни феноменолошки модел преостале чврстоће.

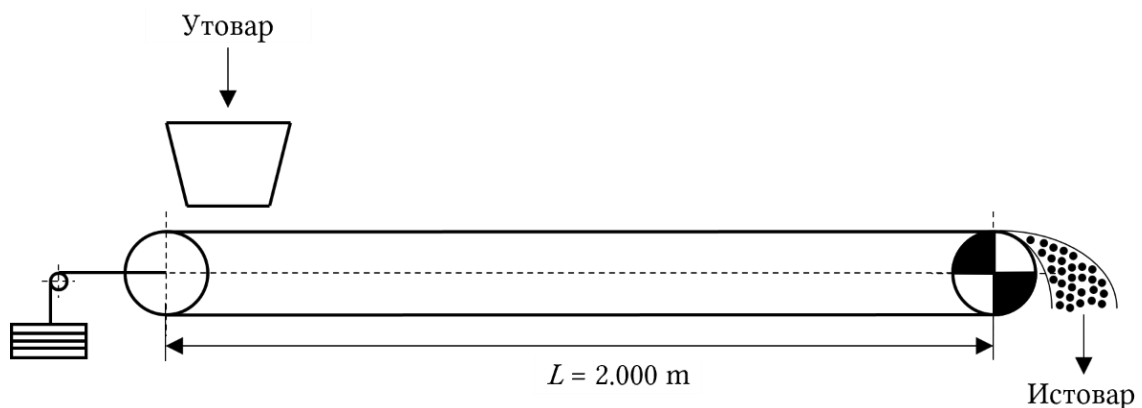
Што се тиче трећег типа експеримента, узорци нове транспортне траке ће бити изложени истом максималном нивоу заморног оптерећења на модулу Б уређаја за испитивање транспортних трака, али ће се мењати однос оптерећења R чиме ће варирати средња и минимална вредност променљивог оптерећења. Овим ће се анализирати утицај вредности односа оптерећења на животног век траке.

Што се тиче четвртог типа експеримента, он ће бити рачунски. Анализираће се потребна снага за погон транспортера у случају употребе методологије прорачуна која је приказана у следећем поглављу и у случају употребе добијених резултата из првог типа експеримента. Прорачунаће се уштеда енергије.

На основу резултата добијених у првом експерименту, дефинисаће се предлог допуне методологије избора транспортне траке у циљу дефинисања радног века.

6.1 Рачунска подлога

Као што је већ речено, анализираће се хоризонтални транспортер са траком дужине 2.000 m, капацитета 300 m³/h и брзине транспорта 1,68 m/s који транспортује житарице. Шема транспортера је приказана на слици 6.2.



Слика 6.2. Шема хоризонталног транспортера са траком

Улазни подаци су следећи:

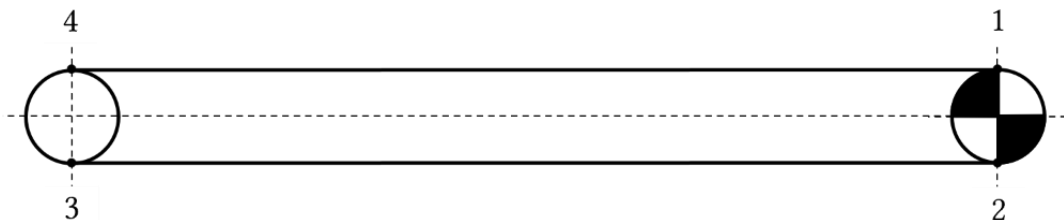
- дужина транспортера $L = 2.000$ m;

- технички капацитет $Q_T = 300 \text{ m}^3/\text{h}$;
- брзина транспорта $v = 1,68 \text{ m/s}$;
- ширина траке $B = 650 \text{ mm}$;
- број носећих слојева траке $z = 3$;
- јачина материјала на кидање $K = 180 \text{ N/mm}$;
- степен сигурности $n = 9$;
- линијска тежина материјала $q = 365 \text{ N/m}$;
- линијска тежина траке $q_0 = 45 \text{ N/m}$;
- пречник бубњева $D = 510 \text{ mm}$;
- тежина носећих ваљака $G_N = 135 \text{ N}$;
- тежина повратних ваљака $G_p = 100 \text{ N}$;
- корак ваљака на радној страни $t = 1,4 \text{ m}$;
- корак ваљака на повратној страни $t_p = 3 \text{ m}$;
- коефицијент отпора кретању траке на радној страни $c = 0,025$;
- коефицијент отпора кретању траке на повратној страни $c_p = 0,02$;
- коефицијент отпора на бубњу $p = 0,055$;
- обухватни угао траке око погонског бубња $\alpha = 3,75 \text{ rad}$;
- коефицијент трења између бубња и траке $\mu = 0,4$.

6.1.1 Амплитуда оптерећења узорка

Да би се утврдила највећа сила у траци, употребиће се метода обиласка контуре која је приказана у [4].

Иако је избор полазне тачке за примену методе обиласка контуре произвољан, препоручује се да то буде или силазна тачка са погонског бубња или минимална сила на радној страни траке. Израчунавајући отпоре на појединим деловима транспортера, полазећи од силазне тачке са погонског бубња која је на слици 6.3. означена са 2, добијају се силе у означеним карактеристичним тачкама у функцији непознате силе у тачки 2 S_2 .



Слика 6.3. Карактеристичне тачке на траси транспортера са траком

Сила у тачки 3 се рачуна према:

$$S_3 = S_2 + \Delta S_{2-3} \quad (6.1)$$

при чему се отпор кретања између тачака 2 и 3 рачуна према:

$$\Delta S_{2-3} = \left(q_0 + \frac{G_p}{t_p} \right) \cdot c_p \cdot L = \left(45 \frac{\text{N}}{\text{m}} + \frac{100 \text{ N}}{3 \text{ m}} \right) \cdot 0,02 \cdot 2.000 \text{ m} = 3.133 \text{ N} \quad (6.2)$$

Следи да је сила у тачки 3:

$$S_3 = S_2 + 3.133 \text{ N} \quad (6.3)$$

Сила у тачки 4 се рачуна према:

$$S_4 = S_3 + \Delta S_{3-4} \quad (6.4)$$

при чему се отпор кретања између тачака 3 и 4 рачуна према:

$$\Delta S_{3-4} = p \cdot S_3 = p \cdot (S_2 + 3.133 \text{ N}) = 0,055 \cdot S_2 + 172,3 \text{ N} \quad (6.5)$$

Следи да је сила у тачки 4:

$$S_4 = 1,055 \cdot S_2 + 3.305 \text{ N} \quad (6.6)$$

Сила у тачки 1 се рачуна према:

$$S_1 = S_4 + \Delta S_{4-1} \quad (6.7)$$

при чему се отпор кретања између тачака 4 и 1 рачуна према:

$$\begin{aligned} \Delta S_{4-1} &= \left(q + q_0 + \frac{G_N}{t} \right) \cdot c \cdot L = \\ &= \left(365 \frac{\text{N}}{\text{m}} + 45 \frac{\text{N}}{\text{m}} + \frac{135 \text{ N}}{1,4 \text{ m}} \right) \cdot 0,025 \cdot 2.000 \text{ m} = 25.320 \text{ N} \end{aligned} \quad (6.8)$$

Следи да је сила у тачки 1:

$$S_1 = 1,055 \cdot S_2 + 28.625 \text{ N} \quad (6.9)$$

Како се може уочити, силе у свим карактеристичним тачкама су изражене преко силе у тачки 2, тако да је потребан још један додатни услов како би се могле израчунати њихове вредности. Вредности сила у појединим карактеристичним тачкама транспортера са траком ће се наћи из услова да је минимална сила у траци једнака:

$$S_{MIN} = 5 \cdot t \cdot (q + q_0) = 5 \cdot 1,4 \text{ m} \cdot \left(365 \frac{\text{N}}{\text{m}} + 45 \frac{\text{N}}{\text{m}} \right) = 2.870 \text{ N} \quad (6.10)$$

Минималну силу у траци треба доделити тачки на радној страни транспортера у којој сила има најмању вредност, али у овом случају би то довело до негативне вредности силе у тачки 2. У таквом случају, минимална сила у траци се додељује тачки на било којој страни транспортера у којој сила има најмању вредности, а то је тачка 2:

$$S_2 = S_{MIN} = 2.870 \text{ N} \quad (6.11)$$

Следи да су силе у преосталим тачкама једнаке:

$$S_3 = 6.003 \text{ N} \quad (6.12)$$

$$S_4 = 6.334 \text{ N} \quad (6.13)$$

$$S_1 = 31.655 \text{ N} \quad (6.14)$$

Да би погонски бубањ могао да покрене траку, односно да не би дошло до проклизавања, мора бити задовољен услов:

$$\varphi = \frac{e^{\mu \cdot \alpha} - 1}{\frac{S_1}{S_2} - 1} \geq 1,25 \quad (6.15)$$

У овом случају, добија се следећа релација:

$$\varphi = \frac{e^{0,4 \cdot 3,75 \text{ rad}} - 1}{\frac{31.655 \text{ N}}{2.870 \text{ N}} - 1} = 0,35 < 1,25 \quad (6.16)$$

Заменом вредности уочава се да услов није задовољен. Решење овог проблема може се постићи додатним затезањем траке, повећањем коефицијента трења између траке и погонског бубња или повећањем обухватног угла траке око бубња, односно применом вишебубањског погона. У овом случају ће се применити додатно затезање траке у вредности од 7.410 N. Следи да су нове силе у карактеристичним тачкама:

$$S'_2 = 10.280 \text{ N} \quad (6.17)$$

$$S'_3 = 13.413 \text{ N} \quad (6.18)$$

$$S'_4 = 13.744 \text{ N} \quad (6.19)$$

$$S'_1 = 39.065 \text{ N} \quad (6.20)$$

У овом случају, добија се следећа релација:

$$\varphi = \frac{e^{0,4 \cdot 3,75 \text{ rad}} - 1}{\frac{39.065 \text{ N}}{10.280 \text{ N}} - 1} = 1,25 \quad (6.21)$$

Заменом вредности уочава се да је услов задовољен.

Следећи корак јесте да се провери да ли усвојени број носећих слојева од вештачког материјала одговара условима експлоатације:

$$z = \frac{S_{MAX} \cdot n}{B \cdot K} = \frac{39.065 \text{ N} \cdot 9}{650 \text{ mm} \cdot 180 \frac{\text{N}}{\text{mm}}} = 3 \quad (6.22)$$

Заменом вредности се уочава да је изабран довољан број носећих слојева траке.

На основу претходног прорачуна, види се да је затезна чврстоћа изабране траке, уколико се сматра да само носећи слојеви носе оптерећење, једнака:

$$\sigma_{TR} = \frac{z \cdot B \cdot K}{1,25 \cdot z \cdot B} = \frac{3 \cdot 650 \text{ mm} \cdot 180 \frac{\text{N}}{\text{mm}}}{1,25 \cdot 3 \cdot 650 \text{ mm}} = \frac{351.000 \text{ N}}{2.437,5 \text{ mm}^2} = 144 \text{ MPa} \quad (6.23)$$

Током експеримента ће се користити узорак В приказан на слици 2.66. који је у најужем делу широк 25 mm. Гранична сила којом се узорак може оптеретити је:

$$S_{GR} = \sigma_{TR} \cdot 1,25 \cdot z \cdot B_{UZ} = 144 \text{ MPa} \cdot 1,25 \cdot 3 \cdot 25 \text{ mm} = 13.500 \text{ N} \quad (6.24)$$

На основу максималне прорачунате радне силе у траци од $S'_1 = 39.065 \text{ N}$, може се утврдити максимално радно оптерећење узорка од $S_{MAX,UZ} = 1500 \text{ N}$. На основу минималне прорачунате радне силе у траци од $S'_2 = 10.280 \text{ N}$, може се утврдити минимално радно оптерећење узорка од $S_{MIN,UZ} = 395 \text{ N}$. Следи да је радни однос напона, тј. оптерећења једнак:

$$R = \frac{S_{MIN,UZ}}{S_{MAX,UZ}} = \frac{395 \text{ N}}{1500 \text{ N}} = 0,26 \quad (6.25)$$

6.1.2 Фреквенција испитивања

Да би експериментално испитивање било ефикасно, потребно је скратити временски период испитивања повећањем фреквенције испитивања.

Временски период потребан да трака направи један циклус износи:

$$T = \frac{2 \cdot L}{v} = \frac{2 \cdot 2.000 \text{ m}}{1,68 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 2381 \text{ s} \quad (6.26)$$

Следи да је фреквенција рада транспортера са траком једнака:

$$\nu_R = \frac{1}{T} = \frac{1}{2381 \text{ s}} = 4,2 \cdot 10^{-4} \text{ Hz} \quad (6.27)$$

Уколико се зна да у једној години има $n_{S,1G} = 31.536.000 \text{ s}$, следи да трака за једну годину непрекидног рада изврши следећи број циклуса:

$$n_{C,1G} = \nu_R \cdot n_{S,1G} = 4,2 \cdot 10^{-4} \text{ Hz} \cdot 31.536.000 \text{ s} = 13.245 \quad (6.28)$$

Према раније наведеним препорукама, фреквенција испитивања не треба да буде висока због тога што може доћи до повећања унутрашње температуре узорка која може негативно да утиче на крајње резултате. Због тога ће се изабрати фреквенција испитивања од:

$$\nu_I = 1 \text{ Hz}. \quad (6.29)$$

Уколико се зна да у једном дану има $n_{S,1D} = 86.400 \text{ s}$, са фреквенцијом испитивања од 1 Hz, уређај за испитивање, тј. модул Б, може да уради за један дан следећи број циклуса:

$$n_{C,1D} = \nu_I \cdot n_{S,1D} = 1 \text{ Hz} \cdot 86.400 \text{ s} = 86.400 \quad (6.30)$$


Уколико се зна да у једном дану има $n_{H,1D} = 24$ h, потребан број сати испитивања узорка да би се симулирало годину дана рада траке износи:

$$n_{H,S1G} = \frac{n_{C,1G}}{n_{C,1D}} \cdot n_{H,1D} = \frac{13.245}{86.400} \cdot 24 \text{ h} = 3,68 \text{ h} \approx 3,5 \text{ h} \quad (6.31)$$

6.2 Избор траке

На основу добијених вредности у поглављу 6.1.1, бира се трака произвођача *Trelleborg* из Словеније ознаке *TRELLEBORG EP 500/3 Y 526858* из каталога [207]. Према прорачуну, потребно је да трака има три носећа слоја јачине на кидање од 180 N/mm, али наведени произвођач нема у понуди такву траку, већ има траку са три носећа слоја јачине на кидање од 160 N/mm.

Међутим, у техничком листу који је произвођач доставио, види се да је испитана јачина на кидање једног слоја 174,33 N/mm, тако да је наведена трака усвојена као адекватна. Сертификат, тј. технички лист је приказан на слици 6.4.

 TRELLEBORG Trelleborg Slovenija, d.o.o. <small>Družba za proizvodnjo in trženje gumenotehničnih izdelkov in pnevmatike Industrial Rubber Products and Tyres Škofjeloška cesta 6, 4000 Kranj, Slovenija</small>	Quality certificate Date: 23.05.2022			
Standard: DIN 22102 / TDS				
Material : 600270 RUBBER CONVEYOR BELT EP 500/3 1/1 CUT EDGE 1300X5,00				
Batch : 526858 Inspection lot: 040000991533				
Characteristic	Unit	Min	Max	Value
Breaking strength longitudinally	N/mm	500.00		523.00
Elongation at break	%	12.00		29.50
Working elongation - 10%	%		1.50	1.34
Adhesion top cover / 1st ply	N/mm	3.50		4.40
Adhesion 1st ply / 2nd ply	N/mm	5.00		7.60
Adhesion 2nd ply / 3rd ply	N/mm	5.00		6.80
Adhesion bottom ply / bottom cover	N/mm	3.50		4.00
Tensile strength of cover	N/mm ²	20.00		0.00
Elongation of cover	%	400.00		0.00
Abrasion resistance	mm ³		130.00	122.00

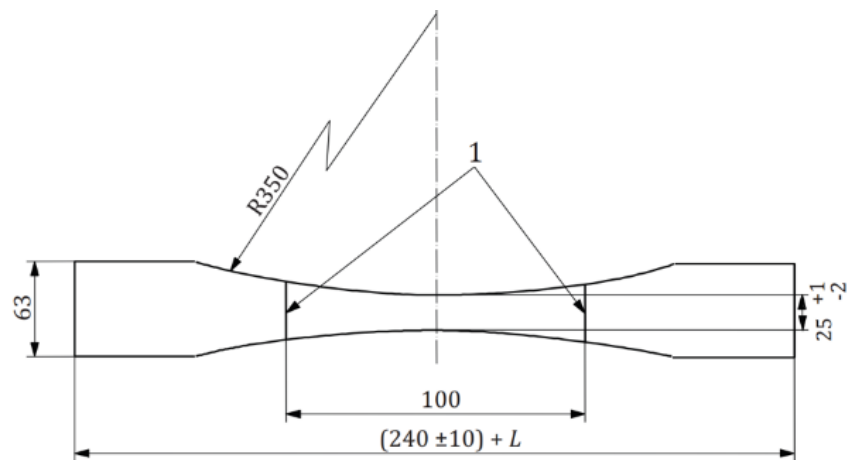
Applies also to batch: 543173.

Signature
David Učakar

Слика 6.4. Сертификат квалитета изабране траке

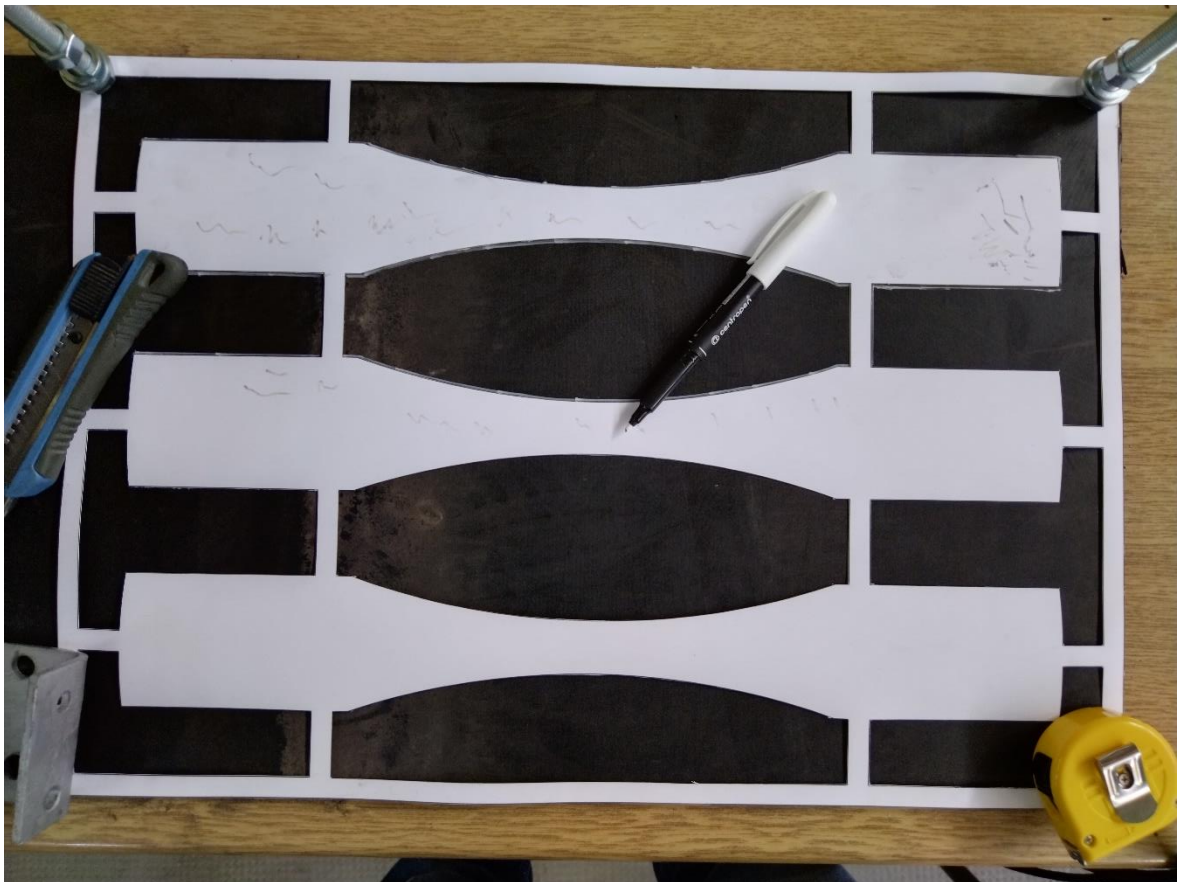
6.3 Узорковање траке

Тип узорка је раније дефинисан и приказан је на слици 6.5.



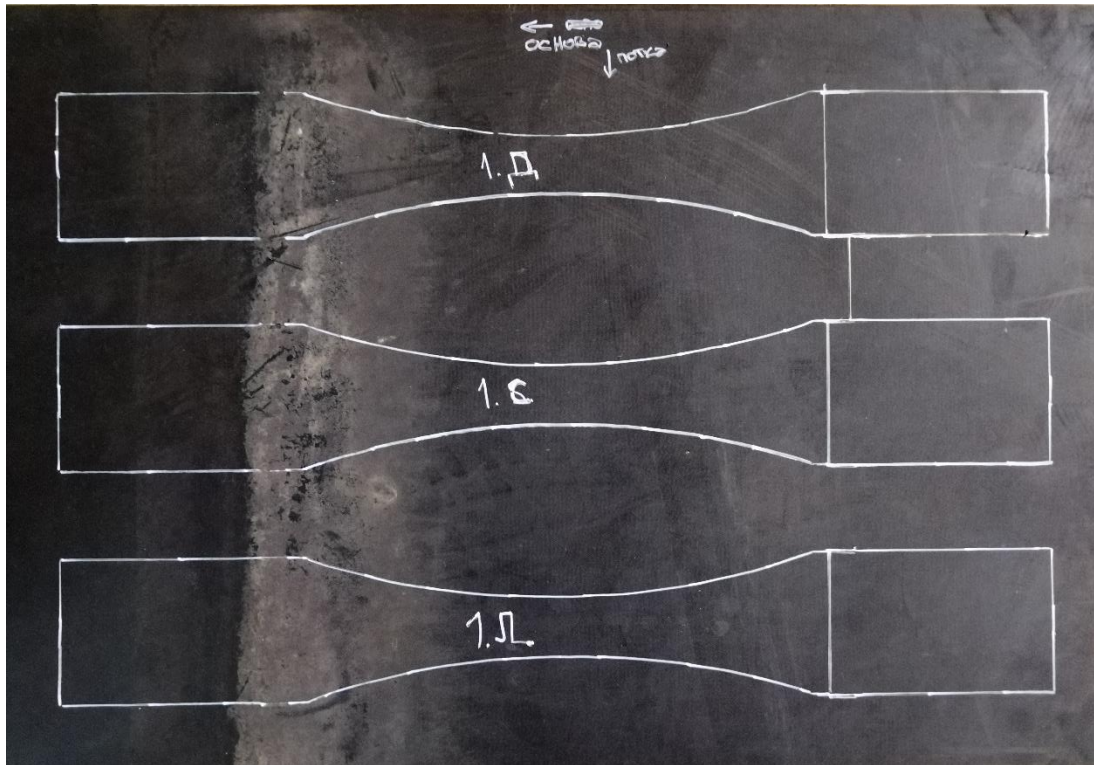
Слика 6.5. Узорак тип В

Како би сви узорци били истих димензија, направљен је шаблон на основу ког су означавањем габарити узорка на траци, слика 6.6.



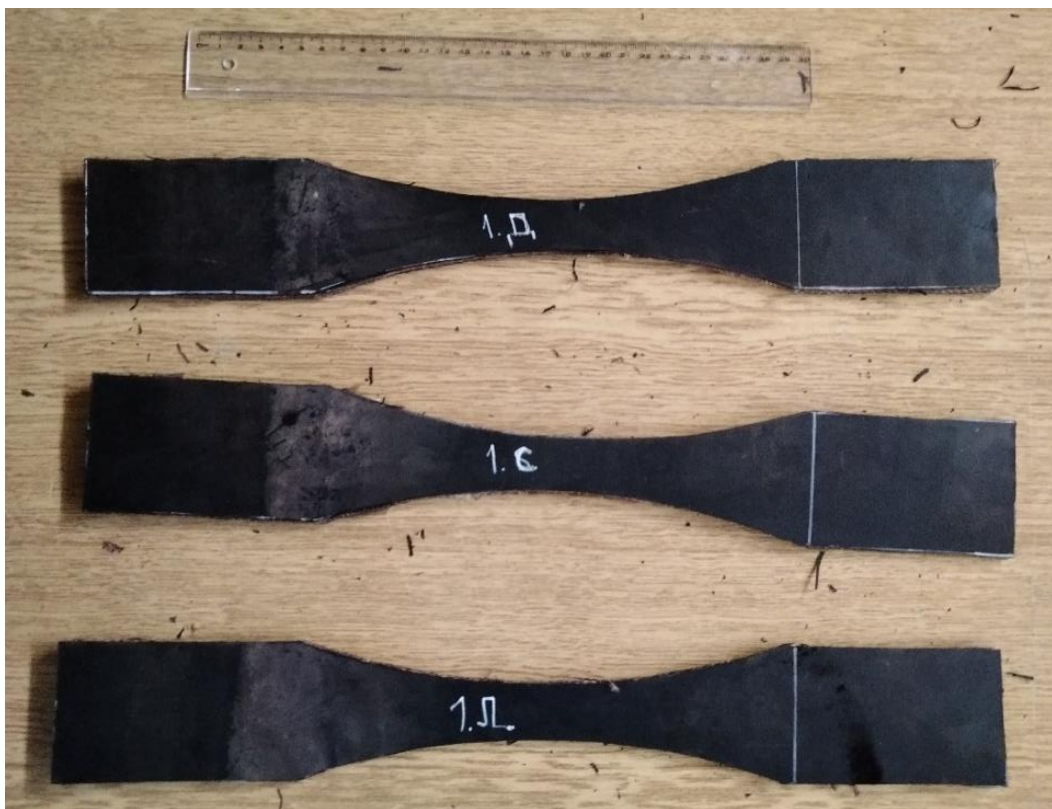
Слика 6.6. Шаблон за означавање габарита узорка на траци

На слици 6.7. су приказани означени габарити узорка на транспортној траци.



Слика 6.7. Означени габарити узорка на траци

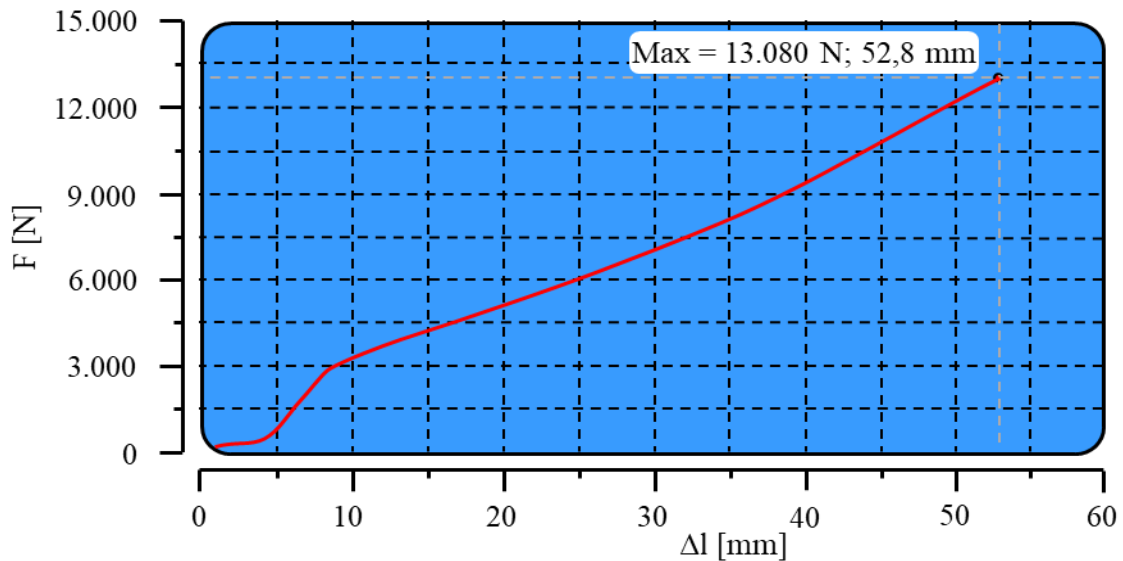
Узорци су исечени оштрим скалпелом како би се избегло оштећење носећих слојева. Први сет исечених узорка је приказан на слици 6.8.



Слика 6.8. Исечени узорци

6.4 Верификација квалитета изабране транспортне траке

Пре тестирања узорка транспортних трака на замор, приступило се верификацији квалитета изабране транспортне траке. Узорци су испитани у складу са [11]. Испитано је укупно десет узорка. Добијена средња вредност силе кидања узорка транспортних трака износи 13.080 N при релативној деформацији од 22%. Затезна чврстоћа узорка је дефинисана на 104 МПа. Дијаграм зависности оптерећења и деформације добијен током статичког аксијалног испитивања једног од узорка је приказан на слици 6.9.



Слика 6.9. Графички приказани резултати аксијалног статичког испитивања узорка транспортних трака

На дијаграму се могу приметити четири зоне:

- прва зона, зона исправљања (деформација 0÷4 mm, оптерећење 0÷323 N) – у овој зони долази до малог пораста оптерећења у односу на велику деформацију због исправљања нити основе текстилних носећих слојева, може се закључити да је потребно статичко предзатезање у износу од 2,5% од називне силе кидања узорка и деформацијом у износу од 1,6%;
- друга зона, еластична зона (деформација 4÷9 mm, оптерећење 323÷3.000 N) – ова зона се може сматрати еластичном зоном транспортних трака која се завршава са, условно речено, силом течења од 23% од називне силе кидања и деформацијом у износу од 3,75%;
- трећа зона, блажа пластична зона (деформација 9÷33 mm, оптерећење 3.000÷6.765 N) – у овој зони са 1 mm деформације просечно расте оптерећење за 163 N, завршава се са силом од 52% од називне силе кидања и деформацијом у износу од 13,75%;
- четврта зона, стрмија пластична зона (деформација 33÷52,8 mm, оптерећење 6.765÷13.080 N) – у овој зони са 1 mm деформације просечно расте оптерећење за 224 N, завршава се кидањем узорка и деформацијом од 22%.

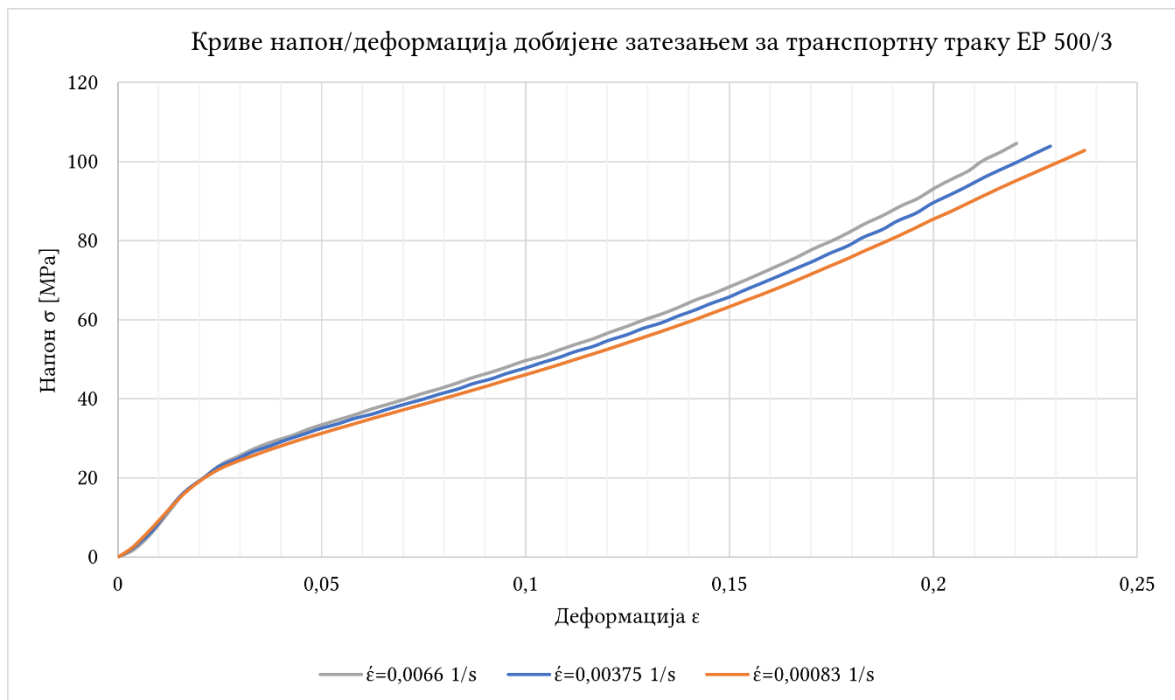
На слици 6.10. је приказан један од покиданих узорака током статичког аксијалног испитивања.



Слика 6.10. Узорак покидан током аксијалног статичког испитивања

6.5 Примена Рамасвами-Стоуферовог математичког модела понашања транспортне траке

Пошто се узорци транспортне траке испитују затезањем, могуће је искористити униаксијални облик Рамасвами-Стоуферовог модела дат у поглављу 3.2.3. Како се у моделу указује да на понашање транспортне траке утиче брзина деформације, на почетку су узорци транспортних трака затезани различитим брзинама (брзинама деформације) до момента кидања: 0,2 mm/s (0,00083 1/s), 0,9 mm/s (0,00375 1/s) и 1,6 mm/s (0,0066 1/s) што је брзина затезања дефинисана стандардом [11] који дефинише испитивање транспортних трака на затезање. Потребно је напоменути да је извршена трансформација криве сила/издужење приказане на слици 6.9. у криву напон/деформација. Такође, резултати су модификовани тако да је уклоњена прва зона, зона исправљања, јер модел не познаје такво понашање материјала. На слици 6.11. приказани су добијени резултати.

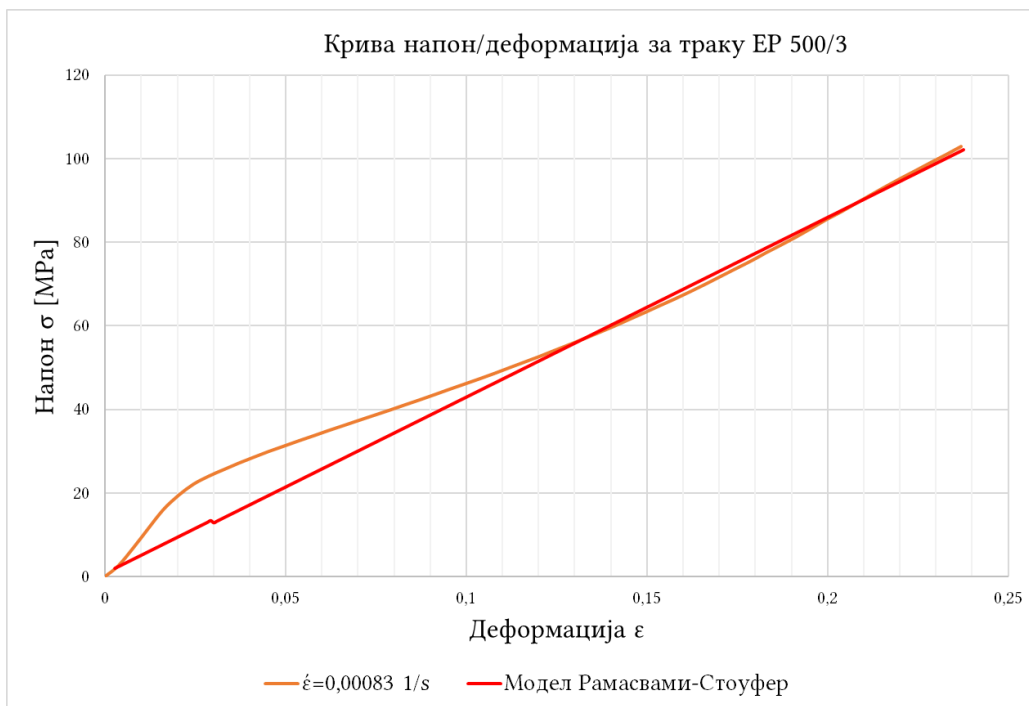


Слика 6.11. Крива напон/деформација транспортне траке EP 500/3

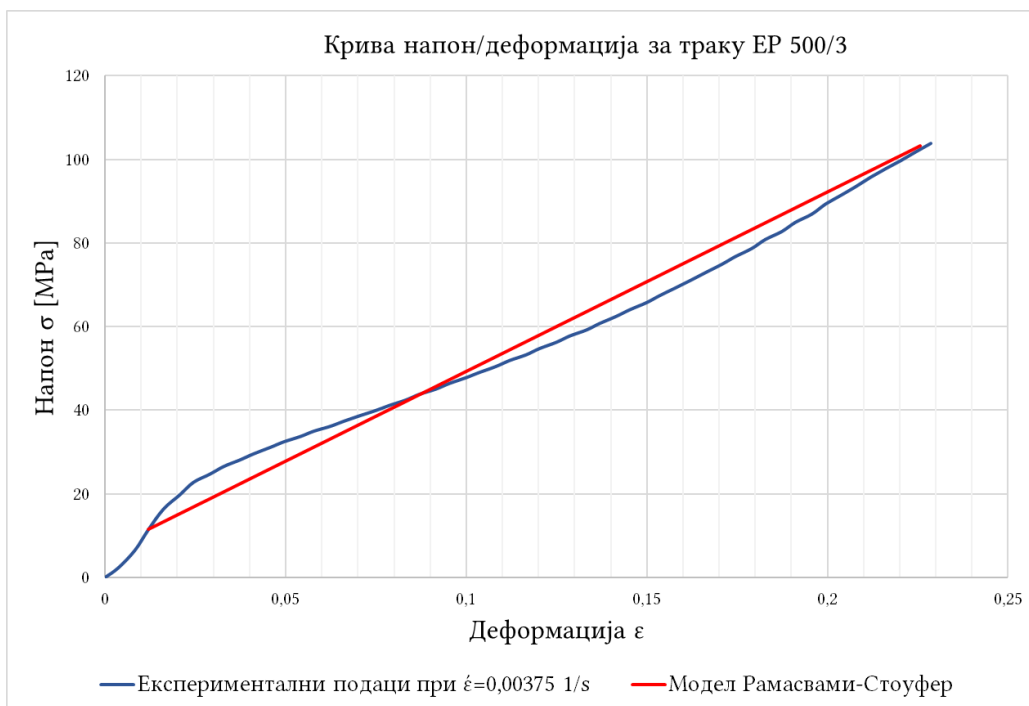
На слици се јасно уочава да не постоје разлике у понашању узорка транспортних трака до напона од 20 МПа и деформације 0,02, тј. у еластичној зони. Разлике се јављају касније, тј. у блажој и стрмијој пластичној зони што се поклапа са претпоставком Рамасвами-Стоуферовог модела о утицају брзине деформације на понашање материјала. Максимални напон од 104,6 МПа се достиже при највећој брзини деформације од 0,0066 1/s, док се максимална деформација од 0,237 достиже при најмањој брзини деформације од 0,00083 1/s. Ово указује да су током мањих брзина израженији ефекти пузања материјала који доводе до смањења носивости материјала.

Следећи корак је био да се дефинишу модул еластичности и константе материјала: $E = 430 \text{ MPa}$; $D_0 = 661/s$; $\Omega_m = 69 \text{ MPa}$; $q = 16,75$; $n = 1,8$; $Z_0 = 6355 \text{ MPa}$.

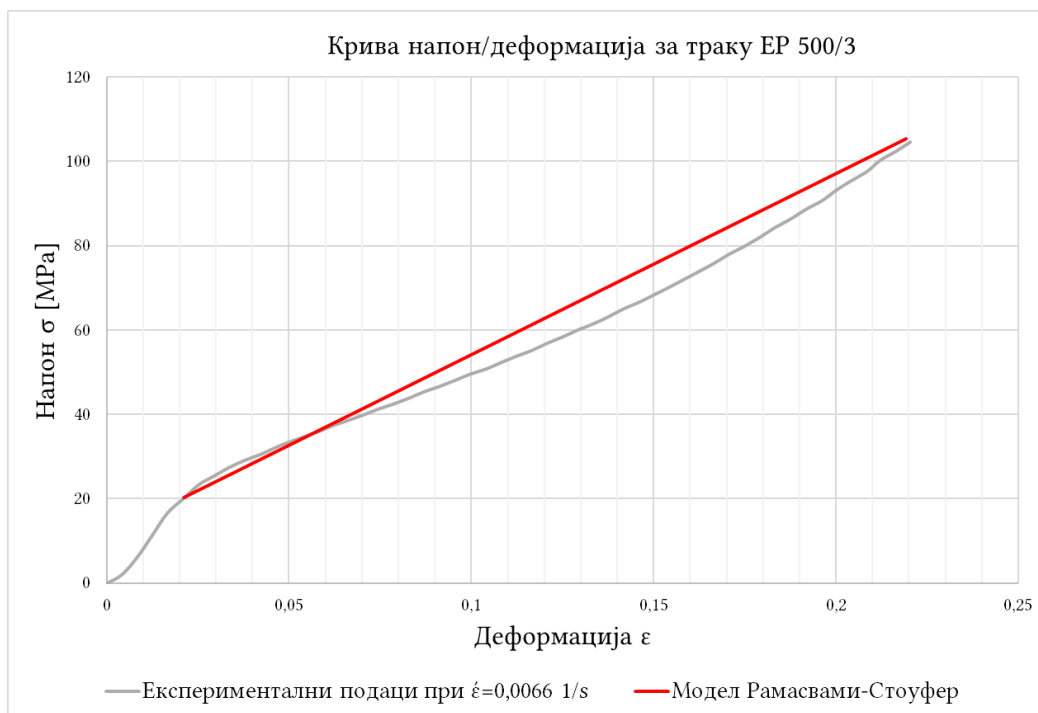
Прорачунате криве и одговарајући експериментални резултати су приказани на следећим сликама.



Слика 6.12. Корелација модела и експерименталних резултата при брзини деформације од $0,00083 \text{ 1/s}$



Слика 6.13. Корелација модела и експерименталних резултата при брзини деформације од $0,00375 \text{ 1/s}$



Слика 6.14. Корелација модела и експерименталних резултата при брзини деформације од 0,0066 1/s

Као што се може видети на сликама, прорачунате криве Рамасвами-Стоуферовог модела се поклапају са експерименталним резултатима. Неопходно је напоменути да је урађена екстраполација експерименталних резултата како би се за сваки од наведених случајева дефинисао напон засићења који је неопходан за дефинисање константи материјала. Добијени резултати указују да је могуће конститутивним једначинама описати понашање текстилних композита попут транспортних трака уз претходно адекватно експериментално испитане карактеристике материјала.

6.6 Први тип експеримента – F-N дијаграм

Код овог типа експеримента, циљ истраживања је да се анализира утицај заморног оптерећења на животни век траке. У том смислу, узорак траке је потребно подвргнути променљивом оптерећењу да би се утврдио број циклуса које узорак траке може да издржи пре лома. При томе, узорке траке је потребно оптеретити различитим вредностима средњег оптерећења у односу на јачину траке на кидање и у дефинисаним границама минималног и максималног оптерећења. Овакав приступ испитивању симулираће оптерећење траке у раду јер је сила у траци променљива у одређеним границама током кретања траке дуж трасе транспортера. Узорци траке ће бити оптерећени променљивим оптерећењем у виду синусне функције где ће свака периода представљати један радни циклус, односно оптерећење траке током једног од њених пролаза дуж целе трасе транспортера. За пример приказан у поглављу 6.1, потребно је 2.381 секунди за један радни циклус,

што ће у експерименту бити представљено једном периодом оптерећења узорка. На овај начин, за дати пример, годишњи рад траке, који се огледа у 13.245 радних циклуса, биће симулиран кроз идентичан број периода оптерећења узорка. На крају, добијени резултати ће се верификовати путем рачунарског експеримента методом коначних елемената у софтверу *Autodesk Inventor Nastran*.

6.6.1 План испитивања

Испитаће се 5 нивоа оптерећења по 10 узорака где се минималне и максималне вредности испитне силе крећу у распону од $\pm 25\%$ у односу на средњи ниво оптерећења чиме се постиже однос оптерећења од $R = 0,6$. На овај начин ће максималне вредности испитне силе достићи 95,6%, 91,7%, 82,6%, 81% и 73,4% у односу на прекидну силу узорка од 13.075 N.

План испитивања је дат у табели 6.1.

Табела 6.1. План испитивања

	Ниво оптерећења				
	I	II	III	IV	V
Број примерака узорка	10	10	10	10	10
Испитна сила макс. [N]	12.500	12.000	10.800	10.600	9.600
Испитна сила меан [N]	10.000	9.600	8.640	8.480	7.680
Испитна сила мин. [N]	7.500	7.200	6.480	6.360	5.760

Како би испитивање било валидно, неопходно је водити рачуна о следећем:

- не сме бити проклизавања узорака у чељустима испитног уређаја и мора се постићи саосност између чељусту и узорка;
- потребно је водити рачуна о температури околине и влажности ваздуха како би се испитивања урадила у адекватним условима.

6.6.2 МКЕ модел узорка транспортне траке

Како транспортна трака представља текстилни композит, узорак је у софтверу потребно моделирати као композит и испитати га на замор. Међутим, актуелна верзија софтвера *Autodesk Inventor Nastran* не омогућава да се композит испита на замор, већ поседује модул за испитивање композита на статичка оптерећења и модул за испитивање на замор солида, површина и линија. Због тога ће се у овом случају извршити упрошћење где ће узорак транспортне траке бити измоделиран као солид модел који ће бити оптерећен заморним оптерећењем. Солид модел ће представљати носећи слој траке који служи да поднесе радно оптерећење.

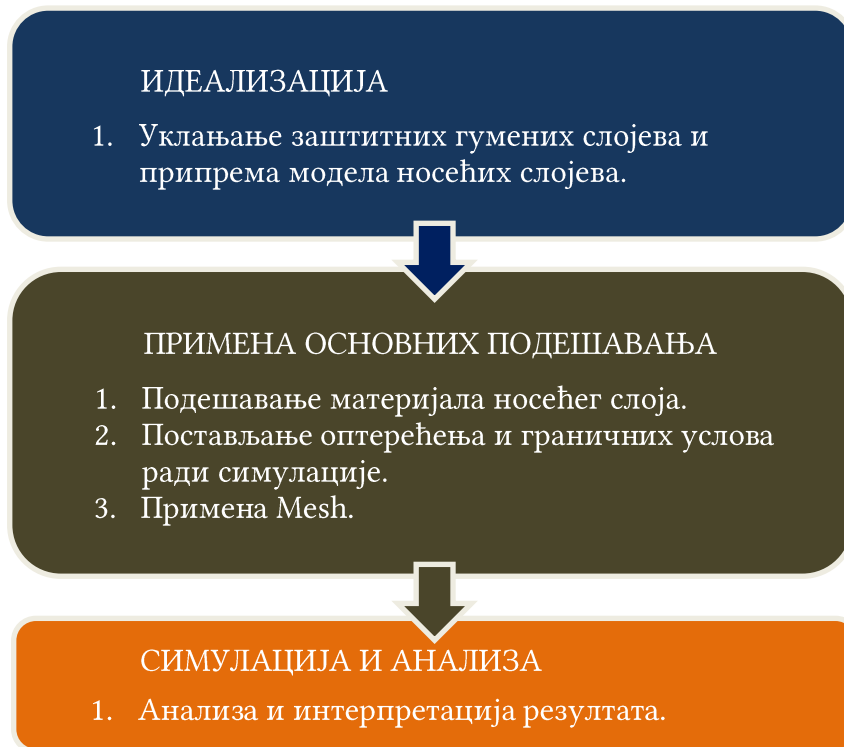
Дефинисане су следеће карактеристике траке:

- материјал носећег слоја: *EP* (полиестер-полиамид);
- густина: 1435 kg/m³;

- Јунгов модул еластичности: 430 МПа;
- Поасонов однос: 0,3595;
- затезна чврстоћа: 144 МПа;
- пет максималних нивоа оптерећења: 12,5 kN, 12 kN, 10,8 kN, 10,6 kN, 9,6 kN.

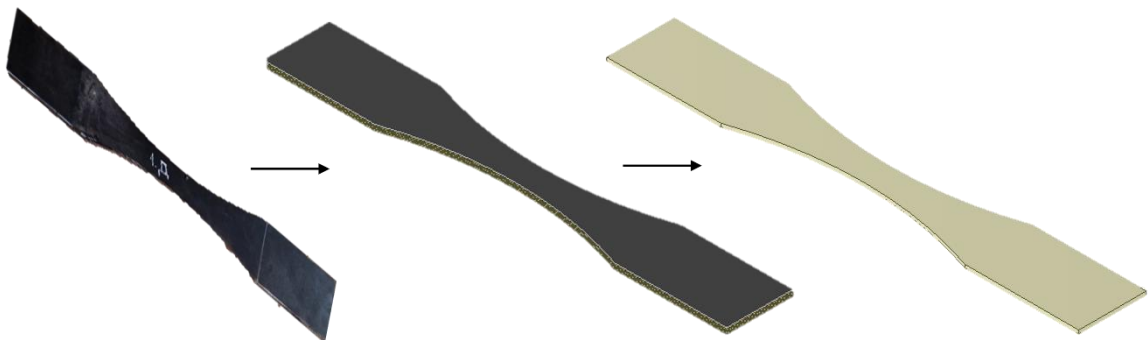
Циљ рачунарског експеримента јесте верификација експерименталних резултата добијених на испитном уређају.

Ток решавања проблема је приказан на слици 6.15.



Слика 6.15. Ток решавања проблема

На почетку је неопходно извршити идеализацију модела тако што је потребно уклонити заштитне гумене слојеве и носеће слојеве траке измоделирати као солид. Поступак идеализације је приказан на слици 6.16.



Слика 6.16. Поступак идеализације

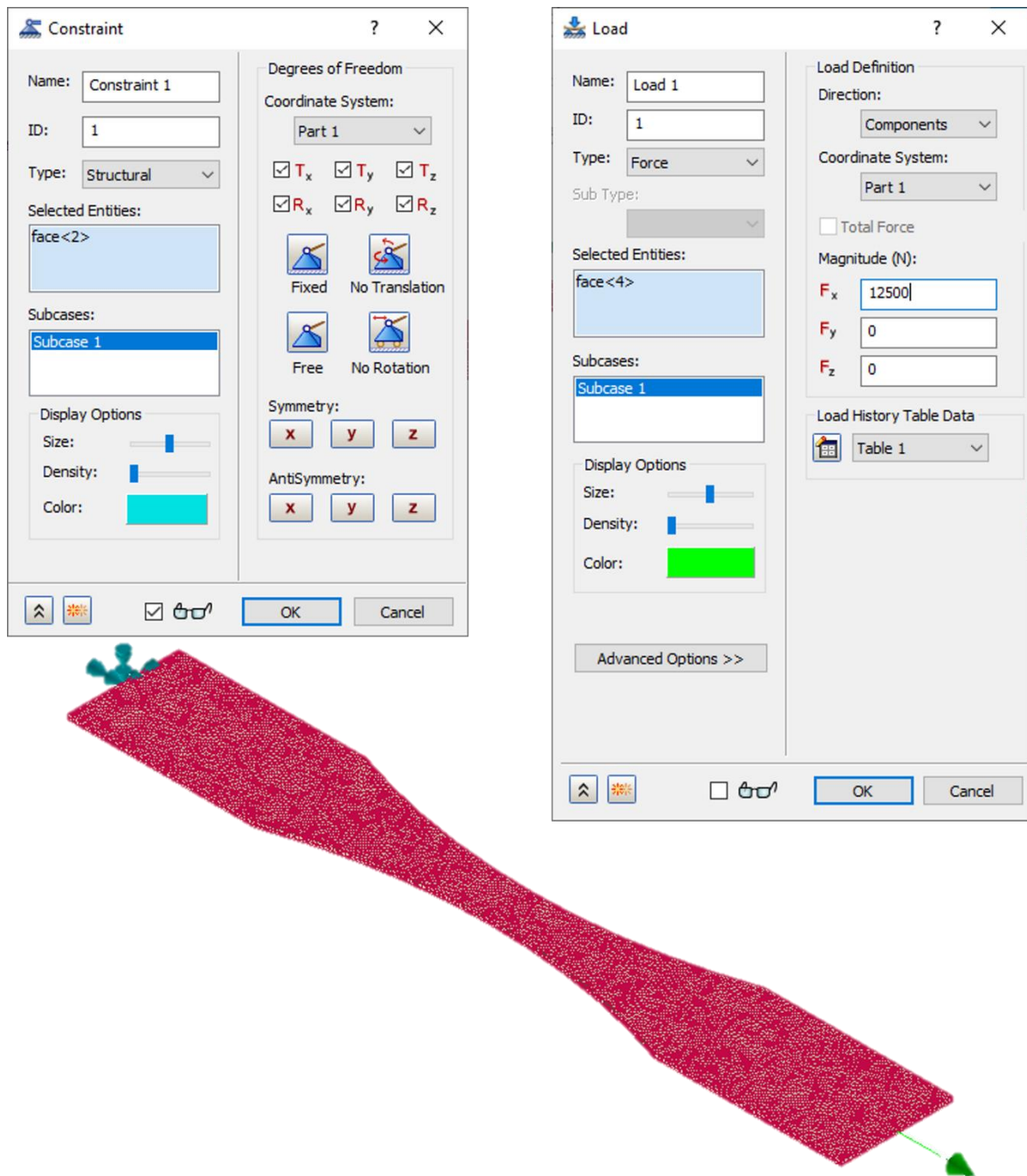
Следећи корак јесте дефинисање материјала носећег слоја. На слици 6.17. су приказане основне карактеристике дефинисаног материјала носећег слоја.

The screenshot shows the 'Material' dialog box with the following data:

Section	Parameter	Value
General	ρ	0,01435
	GE	0
	T_{REF}	
Structural	E	430
	G	
	ν	0,3595
	α	
Allowables	S_T	174
	S_c	
	S_s	
	S_y	50
Failure Theory	Failure Theory	von Mises Stress
	<input type="checkbox"/> Rigid	
Coordinate System	Coordinate System	Part 1
	Mass (t)	
Moments of Inertia	I_{xx}	
	I_{yy}	
	I_{zz}	
	I_{xy}	
	I_{yz}	
	I_{zx}	
Thermal	<input checked="" type="checkbox"/> Thermal	
	C	5e+8
Thermal	K	16,3
	Save New Material	
Analysis Specific Data	Nonlinear	
	Fatigue (on)	
	PPFA	

Слика 6.17. Подешавање параметара материјала

Када се унесу карактеристике материјала, потребно је прећи на дефинисање граничних услова и оптерећења. На један крај узорка је потребно поставити укљештење, док је на други крај потребно поставити оптерећење које ће се мењати према раније наведеним максималним нивоима оптерећења, слика 6.18. Такође, потребно је дефинисати величину коначног елемента, тзв. мрежу. Величина коначног елемента треба да износи 2 mm.



Слика 6.18. Подешавање граничних услова и оптерећења

Последњи корак јесте да се покрене анализа.

6.7 Други тип експеримента – Модел преостале чврстоће

Код овог типа експеримента, план је да се утврди модел преостале чврстоће транспортне траке после дефинисаног броја циклуса. Узорци се испитују у распону од 6.120 до 10.200 N фреквенцијом од 1 Hz. По истеку дефинисаног циклуса оптерећења, узорци се статички испитују до момента кидања.

Потребно је да се утврди временски период рада траке који ће се симулирати. У поглављу 2.5.2 приказан је рад [65] у ком се даје зависност између укупне издржљивости траке и дужине транспортера:

$$T_T = \frac{1}{0,00689091 + \frac{1,8109}{L_p}} \quad (6.32)$$

Како је $L_p = L = 2.000 \text{ m}$, долази се до укупног експлоатационог времена до момента оштећења или хабања траке T_T израженог у броју месеци:

$$T_T = \frac{1}{0,00689091 + \frac{1,8109}{2.000 \text{ m}}} \approx 128 \text{ месеци} \quad (6.33)$$

Временски период од 128 месеци представља период до момента оштећења траке које ће захтевати њену промену или репарацију. За експериментално испитивање узорака траке на замор симулираће се временски период од 120 месеци.

Пошто је утврђено да модул Б може да симулира годину дана рада транспортера са траком за $n_{C,1G} = 13.245$ циклуса што је $n_{H,S1G} = 3,68 \text{ h} \approx 3,5 \text{ h}$, може се формирати план испитивања који је приказан у табели 6.2.

Табела 6.2. План испитивања узорака транспортних трака на замор

Број узорка	Трајање испит. [ц]	Трајање испит. [h]	Симул. време [год]	Крајњи корак
1.	30.000	8,3	2,65	Испитати узорак до називне затезне чврстоће од 144 МПа.
2.	60.000	16,6	4,53	
3.	90.000	25	6,79	
4.	120.000	33,3	9,06	
5.	150.000	41,6	11,32	

Да би испитивање било валидно, потребно је поступак испитивања поновити најмање 5 пута. На основу добијених резултата ће се формирати дијаграм зависности преостале чврстоће и броја циклуса и дефинисаће се опадање механичких карактеристика материјала услед појаве замора.

6.8 Трећи тип експеримента – Утицај односа оптерећења на животни век траке

Код овог типа експеримента, циљ је да се анализира утицај односа оптерећења на животни век траке. Узорци ће бити оптерећени истим максималним вредностима оптерећења, али ће се мењати средња и минимална вредност оптерећења.

Узорци ће се испитати при 3 вредности односа оптерећења – $R = 0,4; 0,6$ и $0,8$. У свим случајевима ће максимална вредност оптерећења износити 10.800 N , док ће се мењати вредност средњег и минималног оптерећења у складу са вредностима односа оптерећења.

Табела 6.3. План испитивања

	Однос оптерећења		
	$R = 0,4$	$R = 0,6$	$R = 0,8$
Број примерака узорка	5	5	5
Испитна сила макс. [N]	10.800	10.800	10.800
Испитна сила меан [N]	7.560	8.640	9.720
Испитна сила мин. [N]	4.320	6.480	8.640

6.9 Четврти тип експеримента – Упоредна анализа потребне снаге за погон транспортера

У овом типу експеримента, урадиће се упоредна анализа рачунске потребне снаге за погон транспортера према методологији приказаној у поглављу 6.1 и према добијеним резултатима из првог типа експеримента, објашњеног у поглављу 6.4. Утврдиће се да ли постоји уштеда енергије и, ако постоји, колико износи.

Потребна снага за погон транспортера се рачуна према следећем изразу:

$$P = \frac{U \cdot v}{\eta} \quad (6.34)$$

где су:

- U - обимна сила на погонском бубњу транспортера;
- η - степен искоришћења погонског система.

Обимна сила се рачуна као разлика сила у наилазној и силазној тачки траке са погонског бубња:

$$U = S_1 - S_2 \quad (6.35)$$

У ситуацијама када није испуњен услов против проклизавања транспортне траке на погонском бубњу, уноси се додатна сила затезањем што је описано у поглављу 6.1.1. У овом случају, обимна сила се рачуна као:

$$U = S'_1 - S'_2 \quad (6.36)$$

7. Резултати испитивања и дискусија

У овом поглављу ће бити речи о добијеним резултатима током испитивања узорака транспортних трака. Показаће се добијене вредности у бројчаном облику, као и у облику дијаграма. Урадиће се дискусија резултата којом ће бити истакнут значај добијених резултата.

7.1 Први тип експеримента – $F-N$ дијаграм

Да би се дефинисао $F-N$ дијаграм, употребљен је трансформисан генерални математички модел заморног животног века текстилних композита - Бондов модел са варијабилним односом напона [165].

Овај модел дефинише $S-N$ дијаграм преко следеће законитости:

$$\sigma_{MAX} = b \log(N) + c \quad (7.1)$$

где су:

- σ_{MAX} - максимална вредност амплитуде напона;
- N - број циклуса до лома;
- b и c - полиноми четвртог реда у функцији произвољне функције R'' . За случај оптерећења затезање/затезање, однос напона је $0 < R < 1$, док се произвољна функција рачуна као $R'' = 4 + R$.

У случају варијабилног односа напона $R \neq const.$, полиноми четвртог реда се рачунају према следећим изразима:

$$b = K(R'')^4 + L(R'')^3 + M(R'')^2 + N(R'') + P \quad (7.2)$$

$$c = Q(R'')^4 + T(R'')^3 + U(R'')^2 + V(R'') + W \quad (7.3)$$

Пошто је током испитивања однос напона био константан $R = 0,6$ и пошто је код транспортних трака битна сила кидања, а не напон, урађена је трансформација математичког модела датог у једначини 7.1 у следећи облик:

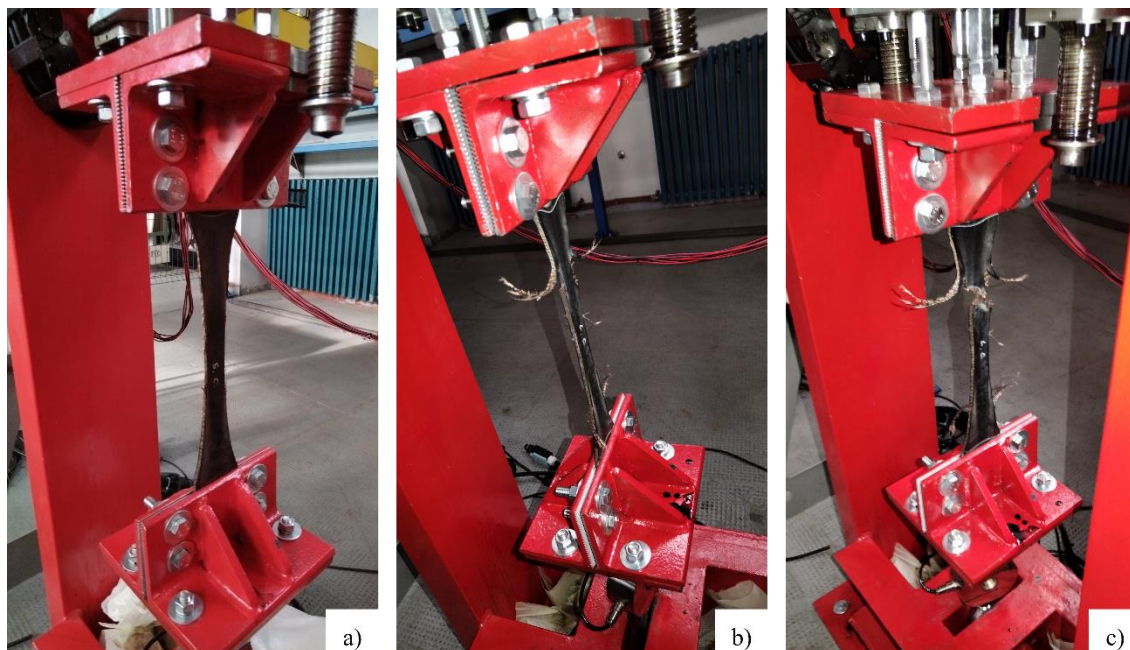
$$F_{MAX} = b \ln(N) + c \quad (7.4)$$

где је:

- F_{MAX} [N] - максимална испитна сила.

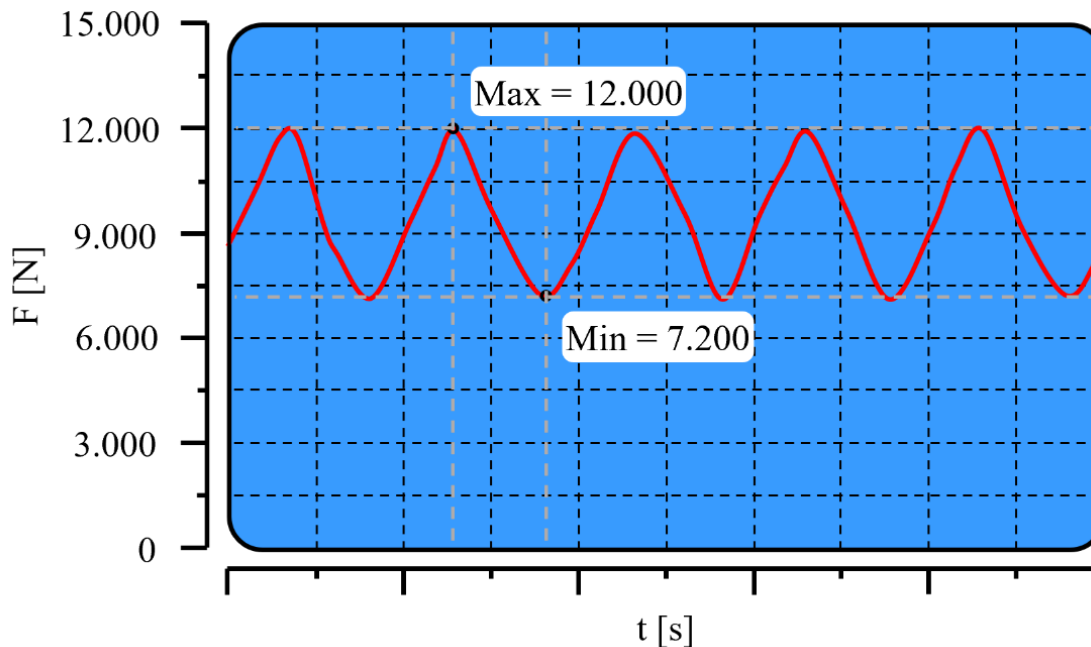
Коефицијенти b и c ће бити израчунати интерполацијом криве експерименталних резултата.

На слици 7.1. приказано је испитивање узорка транспортне траке у три фазе – иницијална фаза, испитна фаза и крајња фаза, тј. лом узорка.



Слика 7.1. Фазе испитивања узорка – иницијална фаза а), испитна фаза б) и лом узорка в)

На слици 7.2. приказан је сегмент мерења другог нивоа оптерећења.



Слика 7.2. Сегмент мерења другог нивоа оптерећења

У табели 7.1. приказани су добијени резултати.

Табела 7.1. Резултати испитивања првог типа експеримента

	Ниво оптерећења																								
	I					II					III														
F_{max} [N]	12.500					12.000					10.800														
% F_{zat} [%]	95,6					91,7					82,6														
N	641	659	743	778	833	884	890	899	918	986	2.499	2.658	2.738	2.825	3.125	3.258	3.320	3.458	3.731	4.069	35.444	36.996	37.889	38.920	39.458

	Ниво оптерећења																								
	III					IV					V														
F_{max} [N]	10.800					10.600					9.600														
% F_{zat} [%]	82,6					81					73,4														
N	39.789	39.998	40.482	40.995	41.830	70.703	73.458	78.958	79.889	81.259	81.377	86.967	88.478	91.582	94.358	414.329	418.598	425.874	436.849	468.855	478.411	488.415	495.659	505.574	519.837

Ради јаснијег прегледа добијених резултата, у табели 7.2. су приказане средње вредности добијених резултата.

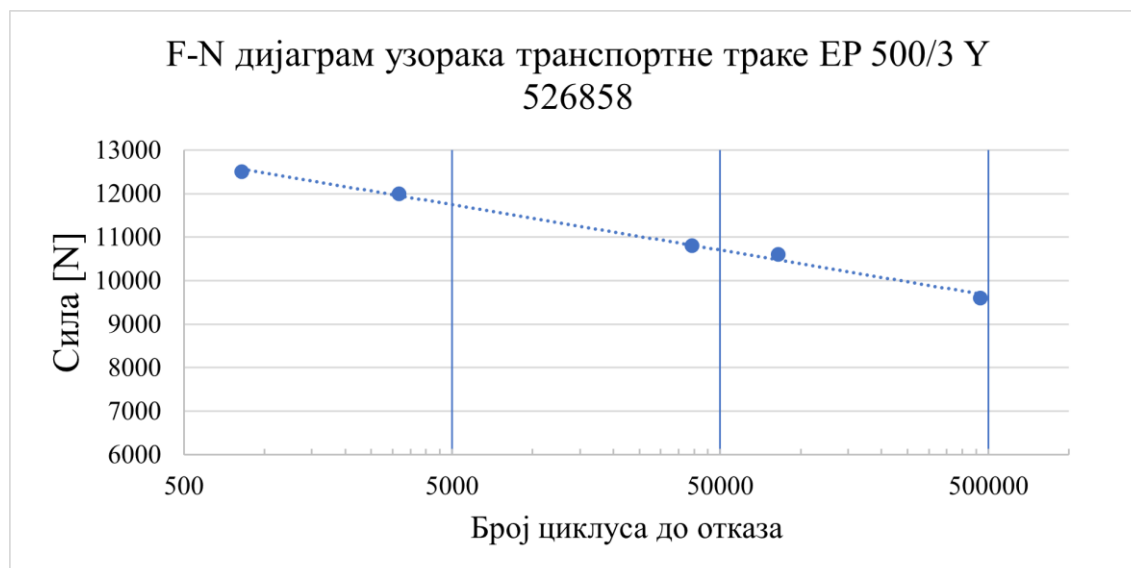
Табела 7.2. Уређени резултати испитивања првог типа експеримента

	Ниво оптерећења				
	I	II	III	IV	V
Средња испитна сила [kN]	10	9,6	8,64	8,48	7,68
Макс. испитна сила [kN], процент прекидне силе [%]	12,5	12	10,8	10,6	9,6
Мин. испитна сила [kN]	7,5	7,2	6,48	6,36	5,76
Број узорака	10	10	10	10	10
Просечан број циклуса до лома	823	3.168	39.180	82.472	467.568
Стандардна девијација	190	384	2.978	4.619	28.521
Релативна стандардна девијација [%]	22,9	12,1	7,6	5,6	6,1

Као што је већ речено, коефицијенти b и c математичког модела заморног животног века ће бити срачунати интерполацијом криве експерименталних резултата. Њихове вредности су $b = -451,2$ и $c = 15.584$. Једначине криве, тј. крива $F-N$ дијаграма за узорке нове траке $EP 500/3 Y 526858$ гласи:

$$F_{MAX} = -451,2 \ln(N) + 15584 \quad (7.5)$$

На слици 7.3. је приказан добијени $F-N$ дијаграм. На дијаграму су означене просечне вредности броја циклуса до лома.

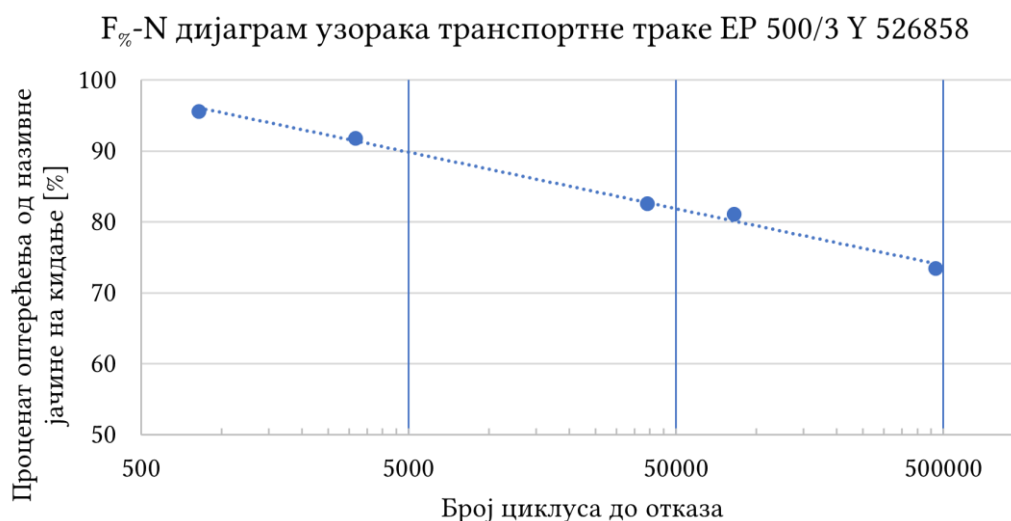


Слика 7.3. F-N дијаграм за узорке транспортне траке

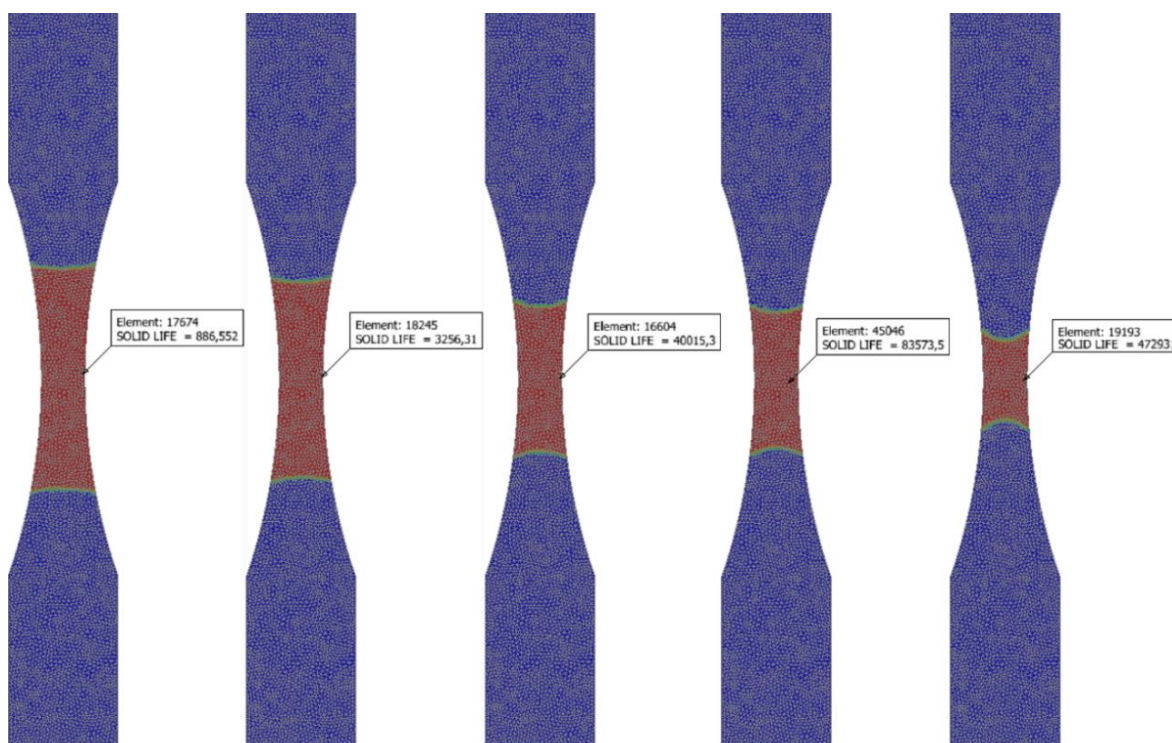
Ради уопштавања добијеног модела, резултати су трансформисани у однос процента максималног оптерећења од називне јачине на кидање узорка транспортне траке и броја циклуса до отказа. Једначина трансформисане законитости гласи:

$$F_{\%} = -3,451 \ln(N) + 119,19 \quad (7.6)$$

На слици 7.4. је приказан добијени $F_{\%}$ -N дијаграм. На дијаграму су означене просечне вредности броја циклуса до лома.

Слика 7.4. $F_{\%}$ -N дијаграм за узорке транспортне траке

За верификацију добијених резултата употребљен је МКЕ модел који је описан у поглављу 6.6.2. Нумеричке симулације су урађене на исти начин као и физички експеримент који је описан у претходном делу. Резултати су приказани на слици 7.5.



Слика 7.5. Добијени резултати анализе на замор путем МКЕ

Добијени резултати су упоређени са резултатима добијеним физичким експериментом и то је приказано у табели 7.3.

Табела 7.3. Резултати компаративне анализе експерименталних и МКЕ резултата

	Ниво оптерећења				
	I	II	III	IV	V
Просечан број циклуса до лома током физичког експеримента	823	3.168	39.180	82.477	467.568
Број циклуса до лома према МКЕ експерименту	866	3.256	40.015	83.573	472.931
Процентуална разлика резултата [%]	5	2,7	2,1	1,2	1,1

Добијена вредност просечног броја циклуса до лома узорка траке при максималном оптерећењу од 95,6% називне јачине на кидање, свега 823 циклуса, указује да до оштећења долази у првом циклусу оптерећења. Разлог за то су механизми оштећења влакана објашњени у претходним поглављима. Код метала, молекуларне везе омогућавају хомогеност структуре и такав материјал може да издржи већи број циклуса при максималном оптерећењу близу називне затезне чврстоће него што је то случај код текстилних композита као што су транспортне траке.

При максималном оптерећењу од 91,7% називне јачине на кидање траке, број циклуса је порастао (823 → 3.168), али тај број још увек не обезбеђује економски исплатив и прихватљив век трајања траке.

Преласком на ниво максималног оптерећења од 82,6% и 81%, дошло је до значајног повећања броја циклуса до лома. Овде треба напоменути да већи број циклуса до лома (39.180 – 82.472) уз благи пад нивоа оптерећења (82,6% - 81%) указује на осетљивост разматраног утицаја, што захтева даљу и детаљнију анализу.

Такође, примећено је веома значајно повећање броја циклуса до лома (467.568) на нивоу оптерећења од 73,4%, што може указивати на потенцијално веома дуг животни век траке при мањим оптерећењима од 70% називне јачине на кидање траке.

За пример који је раније поменут, испитана транспортна трака би радила 4 месеца при максималним оптерећењима од око 90% називне јачине на кидање траке, на 80% око 6 година и на 75% око 30 година.

Треба напоменути да претходни прорачун узима у обзир само оштећење узорка траке услед затезања, односно не узима у обзир стварно оштећење траке током експлоатације, које настаје услед савијања траке око бубњева, удара материјала о траку при утовару, неусклађености са правцем транспортера, неправилног затезање траке итд.

7.2 Други тип експеримента – Модел преостале чврстоће

Да би се дефинисао модел преостале чврстоће, употребљен је трансформисан математички модел преостале чврстоће текстилних композита – Амореов модел [185]. У овом моделу се наводи да чврстоћа материјала континуално опада током цикличног оптерећења. Пошто је код транспортних трака битна сила кидања, а не напон, урађена је трансформација математичког модела и добијен је следећи упрошћени облик:

$$F_{PR} = aN^{-b} \quad (7.7)$$

где је:

- $F_{PR} [N]$ - преостала јачина на кидање после N циклуса.

Коефицијенти a и b ће бити израчунати интерполацијом криве експерименталних резултата.

Резултати који се добијају кроз овај тип експеримента су ограничени према дефинисаним параметрима у поглављу 6.7. и важе за максимално радно оптерећење узорка 10.200 N што представља 78% носивости материјала и однос оптерећења $R = 0,6$.

У табели 7.4. приказани су добијени резултати.

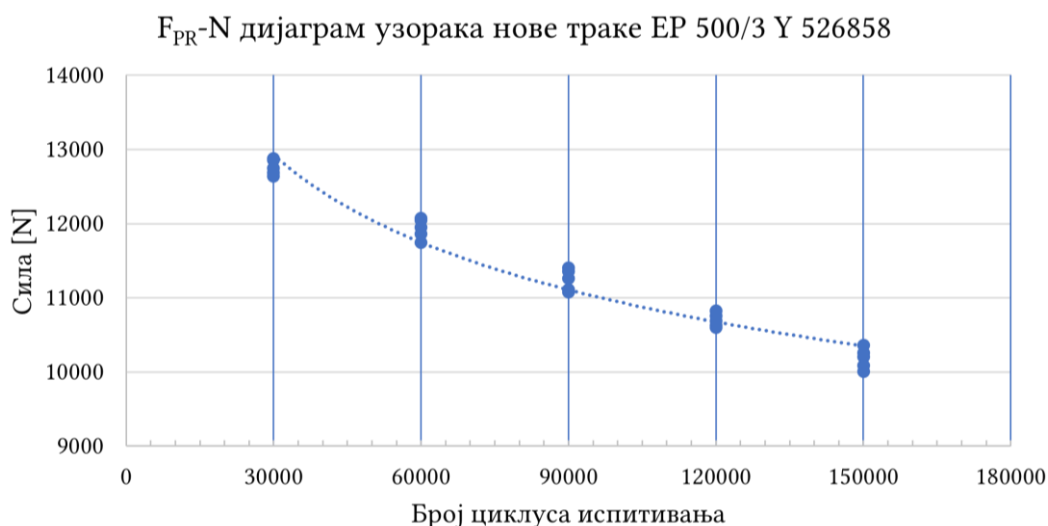
Табела 7.4. Резултати испитивања другог типа експеримента

	Бр. узорка	Број циклуса оптерећења				
		30.000	60.000	90.000	120.000	150.000
Преостала јачина на кидање F_{PR} [N]	1	12.636	11.747	11.076	10.598	10.008
	2	12.684	11.858	11.108	10.628	10.085
	3	12.748	11.946	11.258	10.687	10.200
	4	12.858	12.048	11.355	10.755	10.256
	5	12.877	12.072	11.406	10.824	10.358

Као што је већ речено, коефицијенти a и b математичког модела преостале чврстоће ће бити срачунати интерполацијом криве експерименталних резултата. Њихове вредности су $a = 53.650$ и $b = -0,138$. Једначине криве, тј. крива $F_{PR}-N$ дијаграма за узорке нове траке EP 500/3 Y 526858 гласи:

$$F_{PR} = 53.650N^{-0,138} \quad (7.5)$$

На слици 7.6. је приказан добијени $F_{PR}-N$ дијаграм.

Слика 7.6. $F_{PR}-N$ дијаграм за узорке транспортне траке

7.3 Трећи тип експеримента – Утицај односа оптерећења на животни век траке

Код првог типа експеримента добијен је $F-N$ дијаграм који приказује зависност броја циклуса до отказа од максималног нивоа оптерећења. За овај тип експеримента је искоришћена максимална вредност трећег нивоа оптерећења од 10.800 N и мењани су односи оптерећења - $R = 0,4; 0,6$ и $0,8$. Фреквенција испитивања је износила 1 Hz.

На слици 7.7. приказани су покидани узорци у сва три случаја испитивања.



Слика 7.7. покидани узорци при различитим односима оптерећења

У табели 7.5. приказани су добијени резултати.

Табела 7.5. Резултати испитивања трећег типа експеримента

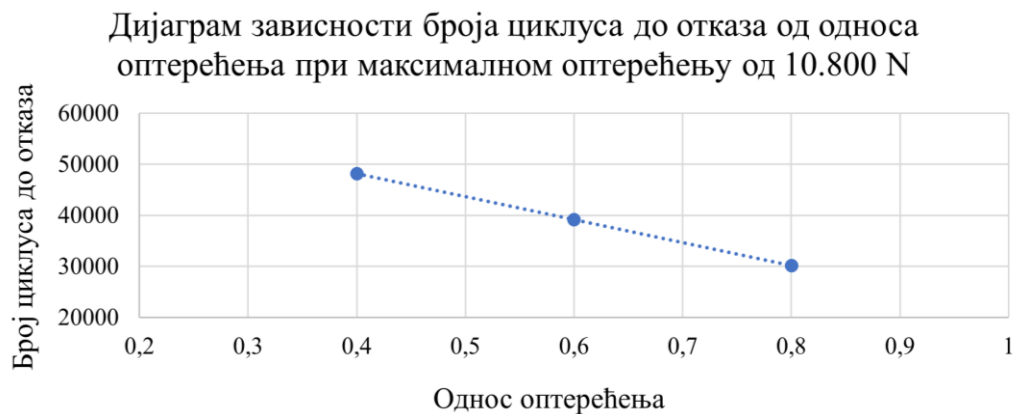
	Однос оптерећења														
	R = 0,4				R = 0,6				R = 0,8						
F_{max} [N]	10.800				10.800				10.800						
% F_{zat} [%]	82,6				82,6				82,6						
F_{mean} [N]	7.560				8.640				9.720						
F_{min} [N]	4.320				6.480				8.640						
N	43.256	45.878	48.588	50.825	52.258	35.044	37.489	38.320	40.909	44.139	25.837	28.987	31.139	31.951	32.545

Ради јаснијег прегледа добијених резултата, у табели 7.6. приказане су средње вредности добијених резултата.

Табела 7.6. Уређени резултати испитивања трећег типа

	Однос оптерећења		
	$R = 0,4$	$R = 0,6$	$R = 0,8$
Макс. испитна сила [kN], процент прекидне силе [%]	10,8 82,6	10,8 82,6	10,8 82,6
Средња испитна сила [kN]	7,56	8,64	9,12
Мин. испитна сила [kN]	4,32	6,48	8,64
Број узорака	5	5	5
Просечан број циклуса до лома	48.161	39.180	30.092
Стандардна девијација	3.266	2.978	2.445
Релативна стандардна девијација [%]	6,7	7,6	8,1

На слици 7.8. приказани су добијени резултати.

Слика 7.8. Дијаграм зависности броја циклуса до отказа N од односа оптерећења R

На основу добијених резултата, може се закључити да повећање односа оптерећења, тј. смањивање амплитуде оптерећења повећавањем минималног нивоа оптерећења доводи до скраћивања животног века узорака транспортних трака.

Анализирањем покиданих узорака, може се приметити разлика у начину кидања узорка. При односу оптерећења $R = 0,8$, узорци се кидају слично као код статичког лома, не долази до „цветања“ носећих слојева и не долази до кидања заштитних гумених слојева. При односу $R = 0,4$ и $R = 0,6$, узорци се кидају услед замора, долази до „цветања“ носећих слојева и долази до кидања заштитних гумених слојева.

Што се тиче начина наношења оптерећења, јавља се разлика у брзини затезања. Наиме, узорци су испитивани при фреквенцији од 1 Hz. При односу оптерећења $R = 0,8$, ход чељусту је краћи, што изискује мању брзину затезања како би се један циклус оптерећења обавио у једној секунди. При односу оптерећења $R = 0,4$, ход чељусту је дужи, што изискује већу брзину затезања како би се један циклус оптерећења обавио у једној секунди.

7.4 Четврти тип експеримента – Упоредна анализа потребне снаге за погон транспортера

У случају употребе методологије приказане у поглављу 6.1, уз усвајање да ефикасност погонског система износи 0,81, добија се потребна снага за погон транспортера из примера где трака има три носећа слоја, у износу од:

$$P = 58,955 \text{ kW} \quad (7.7)$$

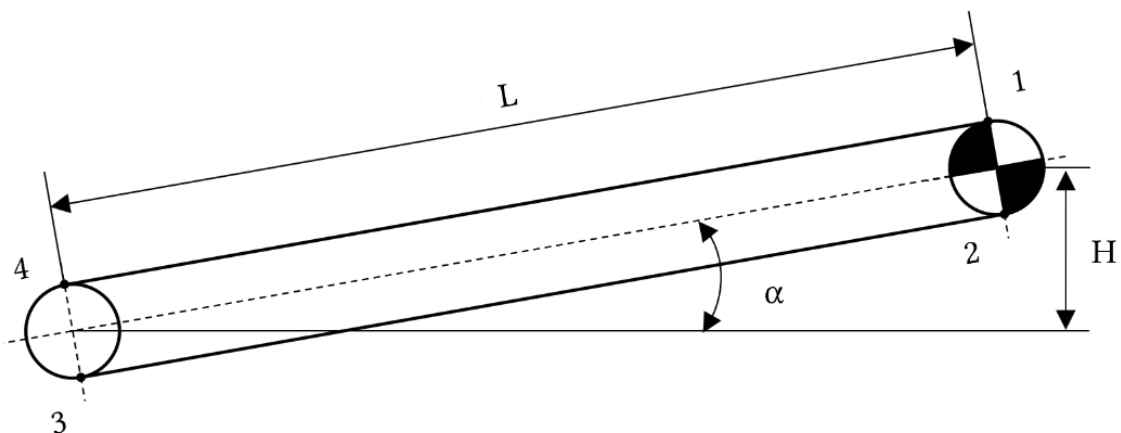
Са друге стране, примењујући резултате из поглавља 7.1, може се усвојити много мањи степен сигурности него у оригиналној методологији ($n = 9 \rightarrow n = 1,5$) што доводи до избора траке са једним носећим слојем чиме се добија потребна снага за погон транспортера у износу од:

$$P = 55,523 \text{ kW} \quad (7.8)$$

Уштеда енергије која се може остварити износи 6%, док би новчана уштеда за искоришћену електричну енергију у периоду од 10 година константног рада транспортера, са ценом 1 MWh од 110 € за индустрију, износила 33.000 €.

7.5 Предлог допуне методологије за прорачун и избор транспортних трака

На основу добијених резултата у поглављу 7.1, могуће је формирати предлог допуне методологије за прорачун и избор транспортних трака. Наиме, добијени резултати указују да је наведену методологију, уз усвајање јасних ограничења по питању облика трасе и карактеристика траке, могуће допунити дефинисањем радног века траке, тј. броја година до кидања услед аксијалног замора. На слици 7.8. је приказано ограничење у облику трасе које се огледа у праволинијском облику, тј. без конкавних и конвексних кривина. Што се тиче ограничења карактеристика траке, максимална ширина траке не треба да прелази 1 m, да има три носећа слоја и да јачине на кидање не прелази 200 N/mm.



Слика 7.8. Ограничења трасе

Подаци:

Улазни подаци за кориговану методологију су:

- $L[m]$ - дужина транспортера (осно растојање између бубњева);
- $Q_E[m^3/h]$ - жељени експлоатациони капацитет;
- $\alpha[^\circ]$ - нагиб транспортера;
- материјал који се транспортује.

Излазни податак кориговане методологије је:

- $T[год]$ - број година до кидања тр. траке услед аксијалног оптерећења.

Израда:

1. Одређивање капацитета:

Технички капацитет:

$$Q_T = \frac{Q_E}{0,64} [m^3/h] \quad (7.9)$$

2. Дефинисање основних карактеристика материјала и транспортера:

- $\varphi[^\circ]$ - угао унутрашњег трења материјала;
- $\delta(\alpha)[^\circ]$ - максимални дозвољени нагиб транспортера или тражени ако је мањи од максималног;
- $\rho[t/m^3]$ - густина материјала;
- $v[m/s]$ - брзина транспорта.

3. Прорачун траке:

- $k_3[/math> - коефицијент смањења капацитета услед транспорта под нагибом;$
- $a[/math> - коефицијент облика траке;$
- $b[m]$ - активна ширина траке;
- $B[m]$ - стварна ширина траке;
- $v[m/s]$ - коригована брзина након усвајања стандардне траке.

4. Усвајање коефицијента отпора кретању материјала, линијске тежине транспортне траке и прорачун линијске тежине материјала:

- $c[/math> - коефицијент отпора кретању материјала;$
- $q_0 = 100[N/m]$ - линијска тежина транспортне траке.

Линијска тежина материјала:

$$q = \frac{Q_T}{35 \cdot v \cdot \rho} [N/m] \quad (7.10)$$

5. Метод обиласка контуре:

Прорачун максималне радне силе у траци:

$$S_1 = 2,5 \cdot L \cdot \cos(\alpha) \cdot c \cdot (260 + q + 113B) \pm 2,5 \cdot q \cdot L \cdot \sin(\alpha) [\text{N}] \quad (7.11)$$

6. Избор траке и прорачун њене носивости и удела оптерећења:

Број носећих слојева траке :

$$z = \frac{1,5 \cdot S_1}{1000B \cdot K} [/] \quad (7.12)$$

где је:

- $K [\text{N/mm}]$ - јачина на кидање једног носећег слоја траке.

Носивост траке:

$$F_{Tr} = z \cdot 1000B \cdot K [\text{N}] \quad (7.13)$$

Удео максималне радне силе у траци у односу на носивост траке:

$$F_{\%} = \frac{S_1}{F_{Tr}} \cdot 100 [\%] \quad (7.14)$$

7. Број циклуса који транспортер одради за годину дана:

$$N_G = 15.768.000 \cdot \frac{V}{L} [\text{ciklusa}] \quad (7.15)$$

8. Број циклуса који трака може да издржи при $F_{\%}$:

$$N = e^{\frac{119,19 - F_{\%}}{3,451}} [\text{ciklusa}] \quad (7.16)$$

9. Радни век транспортне траке услед аксијалног оптерећења:

$$T = \frac{N}{N_G} [\text{god}] \quad (7.17)$$

У случају примера наведеног у поглављу 6.1, хоризонталног транспортера дужине 2.000 m, применом допуњене методологије, добијају се резултати који следе.

Максимална сила у траци:

$$\begin{aligned} S_1 &= 2,5 \cdot L \cdot \cos(\alpha) \cdot c \cdot (260 + q + 113B) \pm 2,5 \cdot q \cdot L \cdot \sin(\alpha) = \\ &= 2,5 \cdot 2.000 \text{ m} \cdot 0,025 \cdot \left(260 + 365 \frac{\text{N}}{\text{m}} + 113 \cdot 0,65 \text{ m} \right) = 87.300 \text{ N} \end{aligned} \quad (7.18)$$

Број носећих слојева траке:

$$z = \frac{1,5 \cdot S_1}{1000B \cdot K} = \frac{1,5 \cdot 87.300 \text{ N}}{1.000 \cdot 0,65 \text{ m} \cdot 180 \text{ N/mm}} = 1,1 \approx 1 \quad (7.19)$$

Усваја се 1 носећи слој иако се према прорачуну добија да је потребно 1,1 носећих слојева. Уколико би се усвојила 2 носећа слоја, добио би се превелики степен сигурности, а 1 носећи слој ће незнатно утицати на краћи радни век транспортне траке.

Носивост траке:

$$F_{Tr} = z \cdot 1000B \cdot K = 1 \cdot 1000 \cdot 0,65 \text{ m} \cdot 180 \text{ N/mm} = 117.000 \text{ N} \quad (7.20)$$

Удео максималне радне силе у траци у односу на носивост траке:

$$F_{\%} = \frac{S_1}{F_{Tr}} \cdot 100 = \frac{87.300 \text{ N}}{117.000 \text{ N}} \cdot 100 = 74\% \quad (7.21)$$

Број циклуса који транспортер обави за годину дана непрекидног рада:

$$N_G = 15.768.000 \cdot \frac{v}{L} = 15.768.000 \cdot \frac{1,68 \text{ m/s}}{2.000 \text{ m}} = 13.245 \text{ ciklusa} \quad (7.22)$$

Број циклуса који трака може да издржи при $F_{\%}$:

$$N = e^{\frac{119,19 - F_{\%}}{3,451}} = e^{\frac{119,19 - 74}{3,451}} = 486.385 \text{ ciklusa} \quad (7.23)$$

На крају се добија радни век транспортне траке услед замора које изазива аксијално оптерећење:

$$T = \frac{N}{N_G} = \frac{486.385}{13.245} = 36,7 \text{ god} \quad (7.24)$$

8. Закључак

Шири оквир истраживања ове дисертације био је анализа утицајних параметара на експлоатационе карактеристике транспортних трака. Улога транспортних трака јесте да изврше транспорт материјала, да прихвате енергију удара на месту утовара материјала, да издрже температурне и хемијске ефекте којима транспортни материјал утиче на њих и да током читавог радног века издрже пројектовано, радно оптерећење. Током једног радног циклуса који транспортна трака направи током транспорта материјала, силе које се јављају у траци често се крећу у великом опсегу. Променљива оптерећења доводе до појаве микропукотина у материјалу које се временом повећавају и сједињују стварајући критичне зоне које могу да доведу до превременог кидања траке. Да би се могао предвидети радни век траке при дефинисаним вредностима променљивог оптерећења, урађена су исцрпна експериментална истраживања симулирајући услове блиске радним условима. Стога, истраживање обухвата експерименте на посебно конструисаном уређају како би се транспортна трака испитивала у условима блиским радним, али на већим фреквенцијама како би се за краће време симулирао потенцијални радни век (један радни циклус у експерименту представљен је једном периодом).

Увидом у доступну литературу из наведене области истраживања, дошло се до закључка да постоје недовољно истражене области у којима је могуће спровести додатна истраживања. Доступна истраживања транспортних трака могу се поделити у две велике категорије – истраживања у вези са одржавањем траке и истраживања у вези са испитивањем трака. Што се тиче одржавања трака, радови се баве визуелном детекцијом подеротина, класификационим моделима оштећења и утицајним факторима на животни век. Што се тиче испитивања трака, радови се баве испитивањем узорака који су вештачки остарени термичким путем, утицајем прелазних зона равна-олучаста трака, закрпама трака, као и аксијалним испитивањем трака. Постоји мали број радова који се баве заморном чврстоћом спојева транспортних трака, али недостаје истраживање које се бави понашањем саме транспортне траке услед замора. Са друге стране, анализиран је велик број истраживања која се баве понашањем текстилних композита услед замора. Обрађени су бројни модели који на различит начин описују животни век текстилних композита:

- модели заморног животног века који не узимају у обзир стварне механизме пропадања материјала, већ се заснивају на *S-N* дијаграмима;
- феноменолошки модели преостале крутости/чврстоће;
- модели прогресивног оштећења који користе једну или више променљивих које су повезане са мерљивим приказима оштећења.

Међутим, ни један од обрађених модела се не бави конкретно транспортним тракама тако да су наведени модели послужили као основа за формирање модела понашања транспортних трака услед променљивог аксијалног оптерећења. Такође,

анализирани су DIN, EN и ISO стандарди који се тичу транспортних трака, као и ASTM стандарди који се тичу полимерних текстилних композита. Стандарди који се баве транспортним тракама, не дотичу се проблематике оштећења услед замора, док се ASTM стандарди дотичу проблематике замора, али не код транспортних трака. Према томе, наведени стандарди су послужили као основа за формирање експеримената и смернице за анализу добијених резултата.

Основни циљ дисертације је боље разумевање понашања и промена експлоатационих карактеристика транспортних трака, при различитим нивоима оптерећења, у сврху добијања математичке зависности броја циклуса до отказа, односно радног века и нивоа и амплитуде оптерећења, кроз одговарајуће једначине и дијаграме. Такође, циљ је формирање верификационог модела експериментално добијених резултата методом коначних елемената у софтверу *Autodesk Inventor Nastran*.

Удео цене транспортне траке достиже чак до 30% у инвестицији транспортера са траком. Са друге стране, степен сигурности који представља однос силе кидања и рачунске максималне силе у траци и који се користи приликом избора траке, веома је висок и креће се у распону 9÷11, што указује да актуелни прорачуни не узимају многе утицајне параметре у обзир. Актуелни прорачуни занемарују чињеницу да се оптерећење не распоређује униформно кроз све носеће слојеве траке и да се услед променљивог оптерећења појављује замор који доводи до превременог кидања траке. У циљу постизања оптималнијег избора транспортне траке, тј. потенцијалног смањивања степена сигурности, као и уштеде енергије, приступљено је детаљној анализи утицајних параметара на експлоатационе карактеристике транспортне траке при заморном оптерећењу, како би се формирао предлог допуне методологије избора транспортних трака. Бољим познавањем експлоатационог понашања транспортне траке, омогућило би се предвиђање преосталог радног века што би довело до проактивног одржавања и планирања ремонта чиме би се направиле велике уштеде. Конкретно, непланирано заустављање транспортера са траком у руднику угља доводи до губитака од 10.000 € на сваких сат времена. За реализацију планираних експерименталних испитивања, посебно је конструисан уређај УЗИТТ МКМ 5000 који се састоји из два модула. Модул А се користи за статичко затезно испитивање, док се модул Б користи за заморно затезно испитивање. Уређај је тако пројектован да се модул Б уграђује у модул А и да је модул Б неактиван током статичког испитивања.

Анализом добијених резултата, произилазе следећи закључци:

- на радни век транспортне траке утичу нивои радних оптерећења у односу на јачину на кидање транспортне траке, материјал и број носећих слојева, као и амплитуда оптерећења;
- при максималним нивоима оптерећења, блиским носивости транспортне траке, радни век је изузетно кратак и значајна оштећења се јављају након веома малог број циклуса;

- при одређеном нижем нивоу максималног оптерећења у односу на јачину кидања траке (75%), може се закључити да постоји економска оправданост употребе одређене транспортне траке која се огледа кроз дужину радног века – 30 година непрекидног рада до момента кидања. Због логаритамске зависности броја циклуса до лома и нивоа оптерећења, сваки нижи проценат максималног оптерећења од наведеног доводи до знатно дужег радног века;
- постоје потешкоће приликом испитивања транспортних трака на замор које се огледају у потребном времену за испитивање. Конкретно, за случај транспортера дужине 2.000 m који је анализиран у дисертацији, било би потребно 2 године како би се испитало 10 узорака при фреквенцији испитивања од 1 Hz до 6.000.000 циклуса који представљају граничну вредност радног века при оптерећењу од 65% у односу на јачину на кидање траке. Значајно повећање фреквенције испитивања би довело до пораста температуре узорка која би негативно утицала на добијене резултате;
- формиран верификациони модел методом коначних елемената у софтверу *Autodesk Inventor Nastran* показао је ефикасност која се огледа у незнатном одступању добијених резултата у односу на експериментално добијене резултате, поготово при нижем нивоу оптерећења, тј. вишем броју циклуса до отказа. Значај овог закључка је већи када се анализира заједно са претходним јер омогућава знатне уштеде у времену, а и у ресурсима, током испитивања транспортних трака;
- однос оптерећења R утиче на животни век транспортне траке, али и на облик лома који трака доживи. Наиме, при вишем односу оптерећења, $R = 0,8$, узорци доживљавају лом сличан статичком лому и доживљавају краћи животни век, док при нижим нивоима оптерећења, $R = 0,6$ и $R = 0,4$, долази до постепеног „цветања“ носећих слојева и лома услед замора и доживљавају дужи животни век;
- предлог допуне методологије за прорачун и избор транспортних трака омогућава избор траке на основу жељеног, тј. потребног радног века, чиме се могу остварити знатне уштеде код инвестиционих трошкова, али и уштеде код експлоатационих трошкова које се огледају у уштеди енергије за погон транспортера.

За потребе истраживања испитивани су узорци једне врсте транспортне траке. Разлог томе је била потреба да се оформи процедура којом је могуће проценити интегритет и преостали радни век транспортне траке. Потешкоће код испитивања на замор се првенствено односе на време трајања експеримента. Високе вредности фреквенције испитивања могу довести до појаве термичких ефеката који могу негативно да утичу на материјал транспортне траке, поготово због тога што се гумени заштитни слојеви понашају као изолатори. Због тога је

одлучено да се узорци испитују фреквенцијом од 1 Hz јер је утврђено да наведена фреквенција не производи негативне термичке ефекте. За испитивање узорака једне транспортне траке је утрошено 70 дана за први тип експеримента, 26 за други тип експеримента и 7 дана за трећи тип експеримента што је укупно 103 дана. Наведена потешкоћа у виду трајања експеримента је разлог што за ову дисертацију нису испитивани узорци више различитих трака.

Током испитивања је утврђено да су транспортне траке изузетно комплексни материјали који нису у довољној мери испитани. Даља истраживања би требало да се баве следећим:

- утицај начина ткања носећих слојева транспортних трака, утицај различитог броја и јачине носећих слојева транспортних трака и утицај произвођача и његове технологије производње транспортних трака на експлоатационе карактеристике и понашање услед заморног оптерећења;
- утицај савојног оптерећења које настаје приликом преласка траке око бубњева на животни век;
- утицај атмосферских услова попут температуре и влажности, као и оштећења услед удара материјала у траку на заморни животни век;
- утицаји начина складиштења, као и временског периода између производње и употребе на експлоатационе карактеристике;
- развој нових техничких решења за праћење промена сила у траци током транспорта материјала.

За доношење општих закључака који би се тicali нових транспортних трака са *EP* носећим слојем, потребно је вишегодишње истраживање које би обухватило више различитих произвођача (минимум 3), различит број носећих слојева (1, 3 и 7 носећих слојева), испитивање при различитим односима оптерећења (минимум 3), различитим нивоима оптерећења (минимум 5) и за сваки случај испитивања по 10 узорака. То је укупно 1.350 експеримената. Како је просечно време потребно за испитивања једног узорка, тј. просечно време једног експеримента у овој дисертацији било 1,4 дана, наведено истраживање би захтевало 5 година непрекидног испитивања. Са друге стране, за доношење општих закључака који би се тicali коришћених транспортних трака, неопходно би било анализирати рад више транспортера са траком током вишегодишњег периода уз праћење силе у траци, временских услова, врста транспортованог материјала и његових карактеристика итд. Наведена анализа и потребни експерименти на коришћеним тракама би захтевали период од минимум 10 година. Сумирајући временске периоде потребне за доношење општих, генералних закључака који би се тicali транспортних трака, долази се до минимум 15 година непрекидног испитивања.

9. Литература

- [1] Спиваковский А. О, Дьячков В. К, „Транспортирующие машины“, Машиностроение, Москва, 1983.
- [2] Colijn H, „Mechanical Conveyors for Bulk Solids“, Elsevier, Amsterdam, 1985.
- [3] Pajer G, Kuhnt H, Kurth F, „Stetigförderer“, Technik, Berlin, 1983.
- [4] Живанић Д, „Непрекидни и аутоматизовани транспорт“, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2020.
- [5] Planković N, Živanić D, Katona M, „Analysis of Axial Tests of Conveyor Belt Samples“, Mašinstvo, Vol. 17(3-4), pp. 83-91, December 2020, ISSN: 1512-5173, DOI: <https://bit.ly/3JMM7Qj>
- [6] DIN 22102, 2014.
- [7] EN ISO 282, 1992.
- [8] EN ISO 18573, 2012.
- [9] EN ISO 7500-1, 2018.
- [10] EN ISO 376, 2011.
- [11] EN ISO 283, 2015.
- [12] EN ISO 9856, 2016.
- [13] EN 873, 1996.
- [14] EN ISO 252, 2011.
- [15] EN ISO 21183, 2018.
- [16] EN ISO 6133, 2015.
- [17] PN-C-94147, 1997.
- [18] DIN 22121, 2015.
- [19] EN ISO 1120, 2012.
- [20] EN ISO 703, 2017.
- [21] EN ISO 14890, 2003.
- [22] EN ISO 15147, 1999.
- [23] EN ISO 16851, 2004.
- [24] EN ISO 21178, 2006.
- [25] EN ISO 21179, 2006.
- [26] EN ISO 21180, 2006.
- [27] EN ISO 21181, 2006.
- [28] EN ISO 21182, 2006.
- [29] EN ISO 21183-1, 2006.
- [30] EN ISO 21183-2, 2006.
- [31] EN ISO 284, 2003.
- [32] EN ISO 340, 2004.

- [33] EN ISO 505, 1999.
- [34] EN ISO 583, 2007.
- [35] Yang Y, Chengcheng H, Tiezhu Q, Haitao Z, Ling M, „Longitudinal tear early-warning method for conveyor belt based on infrared vision“, *Measurement*, Vol. 147, December 2019, ISSN: 0263-2241, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.07.045>
- [36] Wang G, Zhang L, Sun H, Zhu C, „Longitudinal tear detection of conveyor belt under uneven light based on Haar-AdaBoost and Cascade algorithm“, *Measurement*, Vol. 168, January 2021, ISSN: 0263-2241, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108341>
- [37] Che J, Qiao T, Yang Y, Zhang H, Pang Y, „Longitudinal tear detection method of conveyor belt based on audio-visual fusion“, *Measurement*, Vol. 176, May 2021, ISSN: 0263-2241, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109152>
- [38] Hao X, Liang H, „A multi-class support vector machine real-time detection system for surface damage of conveyor belts based on visual saliency“, *Measurement*, Vol. 146, pp. 125-132, November 2019, ISSN: 0263-2241, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.06.025>
- [39] Yang R, Qiao T, Pang Y, Yang Y, Zhang H, Yan G, „Infrared spectrum analysis method for detection and early warning of longitudinal tear of mine conveyor belt“, *Measurement*, Vol. 165, December 2020, ISSN: 0263-2241, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107856>
- [40] Hou C, Qiao T, Zhang H, Pang Y, Xiong X, „Multispectral visual detection method for conveyor belt longitudinal tear“, *Measurement*, Vol. 143, pp. 246-257, ISSN: 0263-2241, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.05.010>
- [41] Mei X, Miao C, Yang Y, Li X, „On-line intelligent evaluation of the fatigue state of a composite conveyor belt“, *Thermal Science*, Vol. 25(3), pp. 2191-2198, 2021, ISSN: 0354-9836, DOI: <https://doi.org/10.2298/TSCI200216105M>
- [42] Stachowiak M, Koperska W, Stefaniak P, Skoczylas A, Anufriev S, „Procedure of detecting damage to conveyor belt with use of an inspection legged robot for deep mine infrastructure“, *Minerals*, Vol. 11(10), September 2021, ISSN: 2075-163X, DOI: <https://doi.org/10.3390/min11101040>
- [43] Blazej R, Jurdziak L, Zimroz R, Hardygora M, Kawalec W, „Investigations of conveyor belts condition in the Institute of mining engineering at Wrocław University of Technology“, *23rd World Mining Congress – Mapping The Future: Advances in Mining Engineering*, Montreal, 2013, DOI: <https://bit.ly/3GCqxMy>
- [44] Andrejiova M, Grincova A, Marasova D, „Identification with machine learning techniques of a classification model for the degree of damage to rubber-textile conveyor belts with the aim to achieve sustainability“, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 127, September 2021, ISSN 1350-6307, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105564>

- [45] Andrejiova M, Grincova A, Marasova A, „Failure analysis of the rubber-textile conveyor belts using classification models“, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 101, pp. 407-417, July 2019, ISSN: 1350-6307, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.04.001>
- [46] Andrejiova M, Grincova A, Marasova D, Fedorko G, Molnar V, „Using logistic regression in tracing the significance of rubber–textile conveyor belt damage“, *Wear*, Vol. 318(1-2), pp. 145-152, October 2014, ISSN: 0043-1648, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.06.026>
- [47] Blazej-Kirjanov A, Rzeszowska A, „Conveyor belt damage detection with the use of a two-layer neural network“, *Applied Sciences*, Vol. 11(12), June 2021, ISSN: 2076-3417, DOI: <https://doi.org/10.3390/app11125480>
- [48] Zhang M, Shi H, Zhang Y, Yu Y, Zhou M, „Deep learning-based damage detection of mining conveyor belt“, *Measurement*, Vol. 175, April 2021, ISSN 0263-2241, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109130>
- [49] Fedorko G, „Application possibilities of virtual reality in failure analysis of conveyor belts“, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 128, July 2021, ISSN: 1350-6307, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105615>
- [50] Zhang M, Zhang Y, Zhou M, Jiang K, Shi H, Yu Y, Hao N, „Application of lightweight convolutional neural network for damage detection of conveyor belt“, *Applied Sciences*, Vol. 11(16), August 2021, ISSN: 2076-3417, DOI: <https://doi.org/10.3390/app11167282>
- [51] Xu S, Cheng G, Pand Y, Jin Z, Kang B, „Identifying and characterizing conveyor belt longitudinal rip by 3d point cloud processing“, *Sensors*, Vol. 21(19), October 2021, ISSN: 1424-8220, DOI: <https://doi.org/10.3390/s21196650>
- [52] Fedorko G, Molnar V, Honus S, Beluško M, Tomaškova M, „Influence of selected characteristics on failures of the conveyor belt cover layer material“, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 94, pp. 145-156, December 2018, ISSN: 1350-6307, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.07.034>
- [53] Zimroz R, Krol R, „Failure analysis of belt conveyor systems for condition monitoring purposes“, *Mining Science*, Vol. 128(36), pp. 255-270, 2009, ISSN: 2300-9586, DOI: <https://bit.ly/3l4eWgV>
- [54] Hakami F, Pramanik A, Ridgway N, Basak A. K, „Developments of rubber material wear in conveyor belt system“, *Tribology International*, Vol. 111, pp. 148-158, July 2015, ISSN: 0301-679X, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.03.010>
- [55] Webb C, Hodkiewicz M, Muller S, Wilson R, „Conveyor belt life modelling“, *CEED Seminar Proceedings*, 2013, DOI: <https://bit.ly/3reuIcO>
- [56] Grinčova A, Marasova D, „Experimental research and mathematical modelling as an effective tool of assessing failure of conveyor belts“, *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, Vol. 16(2), pp. 229-235, 2014, ISSN: 1507-2711, DOI: <https://bit.ly/3E0eFTA>

- [57] Bajda M, „Laboratory tests of conveyor belt parameters affecting its lifetime“, 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017, pp. 495-502, Sofia Bulgaria, 29 June – 5 July 2017, ISBN: 1314-2704, DOI: <https://bit.ly/3o5aosN>
- [58] Bzinkowski D, Ryba T, Siemiatkowski Z, Rucki M, „Real-time monitoring of the rubber belt tension in an industrial conveyor“, Reports in Mechanical Engineering, Vol. 3(1), pp. 1-10, 2022, ISSN: 2683-5894, DOI: <https://doi.org/10.31181/rme200103001b>
- [59] Kessentini R, Klinkova O, Tawfiq I, Haddar M, „Modeling the moisture diffusion and hygroscopic swelling of a textile reinforced conveyor belt“, Polymer Testing, Vol. 75, pp. 159-166, January 2019, ISSN: 0142-9418, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer-testing.2019.01.013>
- [60] Lemmi T, Barburski M, Kabzinski A, Frukacz K, „Effect of vulcanization process parameters on the tensile strength of carcass of textile-rubber reinforced conveyor belts“, Materials, Vol. 14(24), December 2021, ISSN: 1996-1944, DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14247552>
- [61] Rudawska A, Madlenak R, Madlenakova L, Drozdziel P, „Investigation of the effect of operational factors on conveyor belt mechanical properties“, Applied Sciences, Vol. 10(12), June 2020, ISSN: 2076-3417, DOI: <https://doi.org/10.3390/app10124201>
- [62] Wozniak D, Hardygora M, „Aspects of selecting appropriate conveyor belt strength“, Energies, Vol. 14(19), September 2021, ISSN: 1996-1073, DOI: <https://doi.org/10.3390/en14196018>
- [63] Fedorko G, Ivančo V, „Analysis of force ratios in conveyor belt of classic belt conveyor“, Procedia Engineering, Vol. 48, pp. 123-128, November 2012, ISSN: 1877-7058, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.494>
- [64] Bajda M, Hardygora M, „Analysis of reasons for reduced strength of multiply conveyor belt splices“, Energies, Vol. 14(5), March 2021, ISSN: 1996-1073, DOI: <https://doi.org/10.3390/en14051512>
- [65] Bajda M, Blazej R, Jurdziak L, „Analysis of changes in the length of belt sections and the number of splices in the belt loops on conveyors in an underground mine“, Engineering Failure Analysis, Vol. 101, pp. 436-446, July 2019, ISSN: 1350-6307, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.04.003>
- [66] Mazurkiewicz D, „Monitoring the condition of adhesive-sealed belt conveyors in operation“, Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, Vol. 2(27), pp. 41-49, 2005, ISSN: 1507-2711, DOI: <https://bit.ly/31rvUyG>
- [67] Mazurkiewicz D, „Analysis of the ageing impact on the strength of the adhesive sealed joints of conveyor belts“, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 208(1-3), pp. 477-485, November 2008, ISSN: 0924-0136, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.01.012>
- [68] Mazurkiewicz D, „Tests of extendability and strength of adhesive-sealed joints in the context of developing a computer system for monitoring the condition of belt joints

- during conveyor operations“, *Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability*, Vol. 3(47), pp. 34-39, 2010, ISSN: 1507-2711, DOI: <https://bit.ly/3poFwCL>
- [69] Mazurkiewicz D, „Computer-aided maintenance and reliability management systems for conveyor belts“, *Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability*, Vol. 16(3), pp. 377-382, 2014, ISSN: 1507-2711, DOI: <https://bit.ly/3ojw2JA>
- [70] Mazurkiewicz D, „A knowledge base of the functional properties of the conveyor belt adhesive joint for FEM simulation of its stress and strain rate“, *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 26(10-11), pp. 1429-1442, July 2012, ISSN: 0169-4243, DOI: 10.1163/156856111X618308
- [71] Blazej R, Hardygora M, „Modeling of shear stresses in multiply belt splices“, *Bulk Solids Handling*, Vol. 23(4), pp. 234-241, July 2003, ISSN: 0173-9980, DOI: <https://bit.ly/31DNzUE>
- [72] Hardygora M, Komander H, Blazej R, Jurdziak L, „Method of predicting the fatigue strength in multiplies splices of belt conveyors“, *Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability*, Vol. 14(2), pp. 171-175, 2012, ISSN: 1507-2711, DOI: <https://bit.ly/3yfnVpC>
- [73] Bajda M, Blazej R, Jurdziak L, „Accelerated comparative fatigue strength testing of belt adhesive joints“, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences*, Vol. 95, pp. 42-53, 2017, ISSN: 1755-1315, DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/95/4/042053>
- [74] Hardygora M, Bajda M, Blazej R, „Laboratory testing of conveyor textile belt joints used in underground mines“, *Mining Sciences*, Vol. 22, pp. 161-169, 2015, ISSN: 2300-9586, DOI: <https://doi.org/10.5277/msc152211>
- [75] Bajda M, Blazej R, Hardygora M, „Impact of selected parameters on the fatigue strength of splices on multiply textile conveyor belts“, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences*, Vol. 44(5), 2016, ISSN: 1755-1315, DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/44/5/052021>
- [76] Blazej R, Bajda M, Hardygora M, „Monitoring creep and stress relaxation in splices on multiply textile rubber conveyor belts“, *Acta Montanistica Slovaca*, Vol. 22(2), pp. 116-125, 2017, ISSN: 1335-1788, DOI: <https://bit.ly/3DPFbOK>
- [77] Kessentini R, Klinkova O, Tawfiq I, Haddar M, „Theoretical and experimental investigation of bonded patch repairs of a rubber reinforced composite conveyor belt“, *Polymers*, Vol. 13(10), May 2021, ISSN: 2073-4360, DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13111710>
- [78] Andrejiova M, Grincova A, Marasova D, „Analysis of tensile properties of worn fabric conveyor belts with renovated cover and with the different carcass type“, *Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability*, Vol. 22(3), pp. 472-481, 2020, ISSN: 1507-2711, DOI: <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2020.3.10>
- [79] Ambriško L, Marasova D, Grendel P, „Determination the effect of factors affecting the tensile strength of fabric conveyor belts“, *Eksploatacja i Niezawodnosc –*

- Maintenance and Reliability, Vol. 18(1), pp. 110-116, 2016, ISSN: 1507-2711, DOI: <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2016.1.14>
- [80] Taraba V, „The methods of conveyor belt basic characteristics testing and special tests“, Transport and Logistics, Vol. 4(6), pp. 59-68, 2004, ISSN: 1451-107X, DOI: <https://bit.ly/3DyZrK5>
- [81] Manjgo M, Pirić E, Burzić Z, Vuherer T, „Ispitivanje mehaničkih osobina na zatezanje na kompozitnim trakama od gume“, 10th International Scientific Conference on Production Engineering RIM 2015, pp. 7-12, Dubrovnik, 04. 10. – 07. 10. 2015, ISBN: 978-9958-624-41-1, DOI: <https://bit.ly/3qECdK7>
- [82] Manjgo M, Pirić E, Vuherer T, Burzić M, „Determination of mechanical properties of composite materials-the rubber conveyor belt with cartridges made of polyester and polyamide“, ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering, Vol. 16, pp. 141-144, February 2018, ISSN: 1584 – 2665, DOI: <https://bit.ly/3j3e4Id>
- [83] Pirić E, „Uticaj eksploatacionih uslova na ponašanje gumene trake trakastih transporterā“, PhD dissertation, University „Džemal Bijedić“ Mostar, Faculty of Mechanical Engineering Mostar, April 2015, Mostar BiH
- [84] Fedorko G, Molnar V, Živčak J, Dovica M, Husakova N, „Failure analysis of textile rubber conveyor belt damaged by dynamic wear“, Engineering Failure Analysis, Vol. 28, pp. 103-114, March 2013, ISSN: 1350-6307, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2012.10.014>
- [85] Fedorko G, Molnar V, Dovica M, Husakova N, Kral J, Ferdynus M, „The use of industrial metrotomography in the field of maintenance and reliability of rubber-textile conveyor belts in closed continuous transport systems“, Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability, Vol. 18(4), pp. 539-543, 2016, ISSN: 1507-2711, DOI: <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2016.4.8>.
- [86] Fedorko G, Molnar V, Michalik P, Dovica M, Toth T, Kelemenova T, „Extension of inner structures of textile rubber conveyor belt – Failure analysis“, Engineering Failure Analysis, Vol. 70, pp. 22-30, December 2016, ISSN: 1350-6307, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.07.006>
- [87] Fedorko G, Molnar V, Dovica M, Toth T, Fabianova J, Strohmmandl J, Neradilova H, Hegeduš M, Beluško M, „Analysis of defects in carcass of rubber–textile conveyor belts using metrotomography“, Journal of Industrial Textiles, Vol. 47(7), pp. 1812-1829, May 2017, ISSN: 1528-0837, DOI: <https://doi.org/10.1177%2F1528083717710712>
- [88] Fedorko G, Molnar V, Michalik P, Dovica M, Kelemenova T, Toth T, „Failure analysis of conveyor belt samples under tensile load“, Journal of Industrial Textiles, Vol. 48(8), pp. 1364-1383, March 2019, ISSN: 1528-0837, DOI: <https://doi.org/10.1177%2F1528083718763776>
- [89] Barburski M, „Analysis of the mechanical properties of conveyor belts on the three main stages of production“, Journal of Industrial Textiles, Vol. 45(6), pp. 1322-1334, 2016, ISSN: 1528-0837, DOI: <https://doi.org/10.1177%2F1528083714559567>

- [90] Bajda M, Hardygora M, „Examination and assessment of the impact of working conditions on operating parameters of selected conveyor belts“, *Mining Science*, Vol. 29, pp. 165-178, 2022, ISSN: 2300-9586, DOI: <https://doi.org/10.37190/msc222910>
- [91] Chen Y. H, Aliabadi M. H, „Micromechanical modelling of the overall response of plain woven polymer matrix composites“, *International Journal of Engineering Science*, Vol. 145, December 2019, ISSN: 0020-7225, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2019.103163>
- [92] Li L. Y, Wen P. H, Alibadi M. H, „Meshfree modelling and homogenization of 3D orthodonal woven composites“, *Composites Science and Technology*, Vol. 71(15), pp. 1777-1788, October 2011, ISSN: 0266-3538, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compsci tech.2011.08.014>
- [93] Goldberg R. K, Stouffer D. C, „High strain rate deformation modeling of a polymer matrix composite: Part I – Matrix constitutive equations“, NASA Lewis Research Center, August 1998, DOI: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19980227139>
- [94] Rosen S. L, „Fundamental Principals of Polymer Materials“, John Wiley and Sons, New York, 1982, ISBN: 9780471087045
- [95] Stouffer D. C, Dame L. T, „Inelastic Deformation of Metals. Models, Mechanical Properties and Metallurgy“, John Wiley and Sons, New York, 1996, ISBN: 9780471021438
- [96] Qian Z, Liu S, „Unified Constitutive Modeling from Viscoelasticity and Viscoplasticity of Polymer Matrix Composites“, 12th Technical Conference of the American Society of Composites, pp. 165-174, Dearborn Michigan USA, 6-8 October 1997, ISBN: 1566766060, DOI: <https://bit.ly/3Jjk0HS>
- [97] Bodner S. R, „Review of a Unified Elastic-Viscoplastic Theory“, Elsevier, Essex, 1987, ISBN: 978-94-010-8039-2, DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-009-3439-9_6
- [98] Walker K. P, „Research and Development Program for Nonlinear Structural Modeling with Advanced Time-Temperature Dependent Constitutive Relationships“, NASA Lewis Research Center, November 1981, DOI: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19820008207>
- [99] Bordonaro C. M, „Rate Dependent Mechanical Behaviour of High Strength Plastics: Experiment and Modeling“, PhD Dissertation, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, August 1995, DOI: <https://bit.ly/3JnMHn5>
- [100] Goldberg R. K, „Strain Rate Dependent Deformation and Strength Modeling of a Polymer Matrix Composite Utilizing a Micromechanics Approach“, NASA Glenn Research Center, December 1999, DOI: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19860012143>
- [101] Sun C. T, Chen J. L, „A Micromechanical Model for Plastic Behavior of Fibrous Composites“, *Composites Science and Technology*, Vol. 40(2), pp. 115-129, 1991, ISSN: 0266-3538, DOI: [https://doi.org/10.1016/0266-3538\(91\)90092-4](https://doi.org/10.1016/0266-3538(91)90092-4)
- [102] Robertson D. D, Mall S, „Micromechanical Relations for Fiber-Reinforced Composites Using the Free Transverse Shear Approach“, *Journal of Composites*

Technology & Research, Vol. 15(3), pp. 181-192, September 1993, ISSN: 0884-6804, DOI: <https://bit.ly/3sKJS8S>

- [103] Murthy P. L. N, Chamis C. C, „Integrated Composite Analyzer (ICAN): Users and Programmers Manual“, NASA Lewis Research Center, March 1986, DOI: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19860012143>
- [104] Herakovich C. T, „Mechanics of Fibrous Composites“, John Wiley and Sons, New York, 1998, ISBN: 978-0-471-10636-4
- [105] Hashin Z, „Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites“, Journal of Applied Mechanics, Vol. 47(2), pp. 329-334, June 1980, ISSN: 0021-8936, DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3153664>
- [106] Kress G, „Examination of Hashin’s failure criteria for the second world-wide failure exercise“, Journal of Composite Materials, Vol. 46(19-20), pp. 2539-2561, June 2012, ISSN: 0021-9983, DOI: <https://doi.org/10.1177/0021998312449892>
- [107] Xu. Z, Yang F, Guan Z. W, Cantwell W. J, „An experimental and numerical study on scaling effects in the low velocity impact response of CFRP laminates“, Composite Structures, Vol. 154, pp. 69-78, October 2016, ISSN: 0263-8223, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.07.029>
- [108] Hearle J. W. S, „High-Performance Fibres“, Woodhead Publishing, Sawston, 2001, ISBN: 978-1-85573-539-2.
- [109] Bannantine J. A, Comer J. J, Handrock J, L, „Fundamentals of Metal Fatigue Analysis“, Pearson, London, 1989, ISBN: 978-0133401912.
- [110] Bunsell A. R, Hearle J. W. S, Hunter R. D, „An Apparatus for Fatigue Testing of Fibres“, Journal of Physics E: Scientific Instruments, Vol. 4, pp. 868-872, November 1971, ISSN: 0022-3735.
- [111] Clark I. E, Hearle J.W.S, „The Development of the Biaxial Rotation Test for Fatiguing Fibres“, Journal of Physics E: Scientific Instruments, Vol. 12, pp. 11-14, November 1979, ISSN: 0022-3735.
- [112] Calil S, F, Hearle J.W.S, „Fatigue of Fibres by Biaxial Rotation Over a Pin“, ICF4 Conference, pp. 1267-1271, Waterloo, 19-24. Jun 1977, ISBN: 978-1483118451.
- [113] Hearle J. W. S, Lomas B, Cooke W. D, „Atlas of Fibre Fracture and Damage to Textiles“, Woodhead Publishing. Sawston, 1998, ISBN: 978-1-85573-319-0.
- [114] Bunsell A. R, Scwartz P, „Fiber Test Methods“, Comprehensive Composite Materials, Vol. 5, pp. 49-70, 2000, ISBN: 978-0-08-042993-9, DOI: <https://doi.org/10.1016/B0-08-042993-9/00062-0>
- [115] Lechat C, Bunsell A. R, Davies P, Piant A, „Mechanical behaviour of Polyethylene Terephthalate & Polyethylene Naphthalate fibres under cyclic loading“, Journal of Material Science, Vol. 41, pp. 1745-1756, 2006, ISSN: 0022-2461, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-006-2372-x>
- [116] Bunsell A. R, „Tensile Fatigue of Textile Fibres“ in „Fatigue Failure of Textile Fibres“, Woodhead Publishing. Sawston, 2009, ISBN: 978-1-84569-572-9.

- [117] Le Clerc Ch, Bznsell A. R, Piant A, „Influence of Temperature on the Mechanical Behaviour of Polyester Fibres“, Journal of Materials Science, Vol. 41, pp. 7509-7523, September 2006, ISSN: 0022-2461, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0835-8>
- [118] Le Clerc Ch, Monasse B, Bunsell A. R, „Influence of Temperature on Fracture Initiation in PET and PA66 Fibres Under Cyclic Loading“, Journal of Materials Science, Vol. 42, pp. 9276-9283, November 2007, ISSN: 0022-2461, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-007-1864-7>
- [119] Marcellan A, Colomban Ph, Bunsell A. R, „(Nano)structure, Skin/Core and Tension Behaviour of Polyamide Fibres“, Journal of Raman Spectroscopy, Vol. 35(4), pp. 308-315, April 2004, ISSN: 0377-0486, DOI: <https://doi.org/10.1002/jrs.1162>
- [120] Ramirez J. M. H, Colomban Ph, Bunsell A. R, „Micro-Raman study of the fatigue fracture and tensile behaviour of polyamid (PA 66) fibres“, Journal of Raman Spectroscopy, Vol. 35, pp. 1063-1072, November 2004, ISSN: 0377-0486, DOI: <https://doi.org/10.1002/jrs.1255>
- [121] Ramirez J. M. H, Bunsell A. R, „Fracture Initiation Revealed by Variations in the Fatigue Fracture Morphologies of PA 66 and PET Fibres“, Journal of Materials Science, Vol. 40, pp. 1269-1272, March 2005, ISSN: 0022-2461, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-005-6949-6>
- [122] Le Clerc Ch, Bunsell A. R, Piant A, Monasse B, „Role of Skin/Core Structure and Inclusions in the Fatigue Crack Initiation and Propagation in Organic Fibres“, Journal of Materials Science, Vol. 41(20), pp. 6830-6842, September 2006, ISSN: 0022-2461, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0374-3>
- [123] Xiao X.R, „Modeling of Load Frequency Effect on Fatigue Life of Thermoplastic Composites“, Journal of Composite Materials, Vol. 33(12), pp. 1141-1158, June 1999, ISSN: 1530-793X, DOI: <https://doi.org/10.1177/002199839903301205>
- [124] Kim R.Y, „Experimental Assessment of Static and Fatigue Damage of Graphite Epoxy Laminates“, The Third International Conference on Composite Materials, pp. 1015-1028, Paris, 26-29. August 1980, ISBN: 978-1-4832-8370-8, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-4832-8370-8.50081-4>
- [125] Adali S, „Optimisation of Fibre Reinforced Composite Laminates Subject to Fatigue Loading“, The Third International Conference on Composite Structures, pp. 43-55, Paisly, 9-11. September 1985, DOI: 10.1016 / 0308-0161 (85) 90068-7
- [126] Lomov S.V, Huysmans G, Luo Y, Prodromou A, Verpoest I, „Textile Composites: Modelling Strategies“, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 32(10), pp. 1379-1394, October 2001, ISSN: 1359-835X, DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(01\)00038-0](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(01)00038-0)
- [127] Jones R, Williams J.F, Tay T.E, „Is Fatigue Testing of Impact Damaged Laminates Necessary?“, Composite Structures, Vol. 8(1), pp. 1-12, 1987, ISSN: 0263-8223, DOI: [https://doi.org/10.1016/0263-8223\(87\)90012-2](https://doi.org/10.1016/0263-8223(87)90012-2)
- [128] Bassam F, Boniface L, Jones K, Ogin S.L, „On the Behaviour of the Residual Strain Produced by Matrix Cracking in Cross-ply Laminates“, Composites Part A: Applied

- Science and Manufacturing, Vol. 29(11), pp. 1425-1432, November 1998, ISSN: 1359-835X, DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(98\)00037-2](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(98)00037-2)
- [129] Harris B, „Fatigue Testing of Fibre Composites“, Advisory Group for Aerospace Research / Development (AGARD). Fatigue Test Methodology, AGARD Lecture Series No. 118 (LS-118), pp. 6.1-6.18, 1981
- [130] Schaff J.R, Davidson B.D, „Life Prediction Methodology for Composite Structures. Part II – Spectrum Fatigue“, Journal of Composite Materials, Vol. 31(2), pp. 158-181, January 1997, ISSN: 1530-793X, DOI: <https://doi.org/10.1177%2F002199839703100203>
- [131] Harik V.M, Klinger J.R, Bogetti T.A, „Low Cycle Fatigue of Unidirectional Laminates: Stress Ratio Effects“, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 122(4), pp. 415-419, October 2000, ISSN: 0094-4289, DOI: <https://doi.org/10.1115/1.1289024>
- [132] Ellyin F, Kujawski D, „Fatigue Testing and Life Prediction of Fiberglass-Reinforced Composites“, Neale K. W, Labossiere, P. (eds), The First International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures (ACMBS-I), pp. 111-118, Canadian Society for Civil Engineering, Sherbrooke, Quebec, Kanada, 1992, ISBN: 9780921303411
- [133] Wevers M, Verpoest I, De Meester P, „Is Crack Closure Due to Fatigue Loading Causing More Damage in Carbon Fibre Reinforced Epoxy Composites?“, The Fourth European Conference on Composite Materials (ECCM/4), pp. 181-188, Elsevier Applied Science, Stuttgart, September 1990, ISBN: 9781851665624
- [134] Kedward K. T, Beaumont P. W. R, „The Treatment of Fatigue and Damage Accumulation in Composite Design“, International Journal of Fatigue, Vol. 14(5), pp. 283-294, 1992, ISSN: 0142-1123, DOI: [https://doi.org/10.1016/0142-1123\(92\)90479-V](https://doi.org/10.1016/0142-1123(92)90479-V)
- [135] Van Paepegem W, De Baere I, Lamkanfi E, Degrieck J, „Poisson’s Ratio as a Sensitive Indicator of (Fatigue) Damage in Fibre-reinforced Plastics“, Fatigue and Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 30(4), pp. 269-276, April 2007, ISSN: 1460-2695, DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.2007.01095.x>
- [136] Bouchak M, Farrow I. R, Bond I. P, Rowland C. W, Menan F, „Acoustic Emission Energy as a Fatigue Damage Parameter for CFRP Composites“, International Journal of Fatigue, Vol. 29(3), pp. 457-470, March 2007, ISSN: 0142-1123, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2006.05.009>
- [137] De Baere I, Voet E, Van Paepegem W, Vlekken J, Cnudde V, Masschaele B, Degrieck J, „Strain Monitoring in Thermoplastic Composites with Optical Fibre Sensors: Embedding Process, Visualisation with Micro-tomography and Fatigue Results“, Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol. 20(5), pp. 453-472, September 2007, ISSN: 0892-7057, DOI: <https://doi.org/10.1177%2F0892705707082325>
- [138] Schulte K, Reese E, Chou T. W, „Fatigue Behaviour and Damage Development in Woven Fabric and Hybrid Fabric Composites“, Sixth International Conference on Composite Materials (ICCM-VI) & Second European Conference on Composite

Materials (ECCM-II): Vol. 4, pp. 4.89-4.99, Elsevier, London, UK, 20-24 July 1987, ISBN: 1851661182

- [139] Fujii T, Amijima S, Okubo K, „Microscopic Fatigue Processes in a Plain-weave Glass-fibre Composite“, Composites Science and Technology, Vol. 49(4), pp. 327-333, February 1993, ISSN: 0266-3538, DOI: [https://doi.org/10.1016/0266-3538\(93\)90063-M](https://doi.org/10.1016/0266-3538(93)90063-M)
- [140] Pandita S. D, Huysmans G, Wevers M, Verpoest I, „Tensile Fatigue Behaviour of Glass-plain Weave Fabric Composites in the On and Off-axis Directions“, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 32(10), pp. 1533-1539, October 2001, ISSN: 1359-835X, DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(01\)00053-7](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(01)00053-7)
- [141] Van Paepegem W, „Development and Finite Element Implementation of a Damage Model for Fatigue of Fibre-reinforced Polymers“, PhD thesis, Ghent University of Architectural and Engineering Press, Ghent, Belgium, 2002, ISBN: 90-76714-13-4, DOI: <https://bit.ly/3qHGxYd>
- [142] Anokhina Y. E, Zinoveva V. A, Shablygin M. V, „Fibre Damage in Textile Processing“, Fibre Chemistry, Vol. 33, pp. 59-62, January 2001, ISSN: 0015-0541, DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1019237832523>
- [143] Altus E, Herszage A, „A Two-dimensional Micromechanic Fatigue Model“, Mechanics of Materials, Vol. 20(3), pp. 209-223, May 1995, ISSN: 0167-6636, DOI: [https://doi.org/10.1016/0167-6636\(94\)00057-3](https://doi.org/10.1016/0167-6636(94)00057-3)
- [144] Caprino G, Giorleo G, „Fatigue Lifetime of Glass Fabric/Epoxy Composites“, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 30(3), pp. 299-304, March 1999, ISSN: 1359-835X, DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(98\)00124-9](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(98)00124-9)
- [145] Castillo E, Fernandez-Cantelli A, Hadi A. S, „On Fitting a Fatigue Model to Data“, International Journal of Fatigue, Vol. 21(1), pp. 97-106, January 1999, ISSN: 0142-1123, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(98\)00048-6](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(98)00048-6)
- [146] Bishop N, Sherratt F, „Finite Element Based Fatigue Calculations“, NAFEMS, 2000
- [147] Manson S. S, „Fatigue: A Complex Subject – Some Simple Approximations“, Experimental Mechanics, Vol. 5, pp. 193-226, July 1965, ISSN: 0014-4851, DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02321056>
- [148] Xue L, „A Unified Expression for Low Cycle Fatigue and Extremely Low Cycle Fatigue and its Implication for Monotonic Loading“, International Journal of Fatigue, Vol. 30(10-11), pp. 1691-1698, October 2008, ISSN: 0142-1123, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2008.03.004>
- [149] Ramberg W, Osgood W. R, „Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters“, NASA Lewis Research Center, July 1943, DOI: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19930081614>
- [150] Muralidharan U, Manson S. S, „A Modified Universal Slopes Equation for Estimation of Fatigue Characteristics of Metals“, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 110(1), pp. 55-58, January 1988, ISSN: 0094-4289, DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3226010>

- [151] Sehtioglu H, „Thermo-mechanical Fatigue Life Prediction Methods“, ASTM Special Technical Publication, pp. 47-76, San Francisco USA, January 1992, ISBN: 978-0-8031-1423-4, DOI: <https://doi.org/10.1520/STP24152S>
- [152] Fong J. T, „What is Fatigue Damage?“, ASTM Special Technical Publication, pp. 243-266, San Francisco USA, January 1982, ISBN: 978-0-8031-0696-3, DOI: <https://doi.org/10.1520/STP34330S>
- [153] Degrieck J, Van Paepegem W, „Fatigue Damage Modeling of Fibre-Reinforced Composite Materials: Review“, Applied Mechanics Review, Vol. 54(4), pp. 279-300, July 2001, ISSN: 0003-6900, DOI: <https://doi.org/10.1115/1.1381395>
- [154] Sendeckyj G. P, „Life Prediction for Resin-Matrix Composite Materials“, Composite Materials Series, Vol. 4, pp. 431-483, 1991, ISSN: 0927-0108, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-70507-5.50014-7>
- [155] Sendeckyj G. P, „Fitting Models to Composite Materials Fatigue Data“, ASTM Special Technical Publication, pp. 245-260, San Francisco USA, January 1981, ISBN: 978-0-8031-0700-7, DOI: <https://doi.org/10.1520/STP29314S>
- [156] Schaff J. R, Davidson B. D, „Life Prediction Methodology for Composite Structures. Part I – Constant Amplitude and Two-stress Level Fatigue“, Journal of Composite Materials, Vol. 31(2), pp. 128-157, January 1997, ISSN: 0021-9983, DOI: <https://doi.org/10.1177%2F002199839703100202>
- [157] Reifsnider K. L, Gao Z, „A Micromechanics Model for Composites Under Fatigue Loading“, International Journal of Fatigue, Vol. 13(2), pp. 149-156, March 1991, ISSN: 0142-1123, DOI: [https://doi.org/10.1016/0142-1123\(91\)90007-L](https://doi.org/10.1016/0142-1123(91)90007-L)
- [158] Hashin Z, Rotem A, „A Fatigue Criterion for Fibre Reinforced Composite Materials“, Journal of Composite Materials, Vol. 7(4), pp. 448-464, October 1973, ISSN: 0021-9983, DOI: <https://doi.org/10.1177%2F002199837300700404>
- [159] Wu L, „Thermal and Mechanical Fatigue Analysis of CFRP Laminates“, Composite Structures, Vol. 25(1-4), pp. 339-344, 1993, ISSN: 0263-8223, DOI: [https://doi.org/10.1016/0263-8223\(93\)90180-X](https://doi.org/10.1016/0263-8223(93)90180-X)
- [160] Fawaz Z, Ellyin F, „Fatigue Failure Model for Fibre-reinforced Materials Under General Loading Conditions“, Journal of Composite Materials, Vol. 28(15), pp. 1432-1451, September 1994, ISSN: 0021-9983, DOI: <https://doi.org/10.1177%2F002199839402801503>
- [161] Gathercole N, Reiter H, Adam T, Harris B, „Life Prediction for Fatigue of T800/6356 Carbon-fibre Composites: I Constant-amplitude Loading“, International Journal of Fatigue, Vol. 16(8), pp. 523-532, 1994, ISSN: 0142-1123, DOI: <https://doi.org/10.1016/0142-1123%2894%2990478-2>
- [162] Adam T, Gathercole N, Reiter H, Harris B, „Life Prediction for Fatigue of T800/6356 Carbon-fibre Composites: II Variable-amplitude Loading“, International Journal of Fatigue, Vol. 16(8), pp. 533-547, 1994, ISSN: 0142-1123, DOI: <https://doi.org/10.1016/0142-1123%2894%2990479-0>

- [163] Jen M, Lee C. H, „Strength and Life in Thermoplastics Composite Laminates Under Static and Fatigue Loads. Part I: Experimental“, International Journal of Fatigue, Vol. 20(9), pp. 605-615, October 1998, ISSN: 0142-1123, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(98\)00029-2](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(98)00029-2)
- [164] Jen M, Lee C. H, „Strength and Life in Thermoplastics Composite Laminates Under Static and Fatigue Loads. Part II: Formulation“, International Journal of Fatigue, Vol. 20(9), pp. 617-629, October 1998, ISSN: 0142-1123, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(98\)00030-9](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(98)00030-9)
- [165] Bond I. P, „Fatigue Life Prediction for GRP Subjected to Variable Amplitude Loading“, Composite Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 30(8), pp. 961-970, August 1999, ISSN: 1359-835X, DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(99\)00011-1](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(99)00011-1)
- [166] Xiao X. R, „Modeling of Load Frequency Effect on Fatigue Life of Thermoplastic Composites“, Journal of Composite Materials, Vol. 33(12), pp. 1141-1158, June 1999, ISSN: 0021-9983, DOI: <https://doi.org/10.1177%2F002199839903301205>
- [167] Epaarachchi J. A, Clausen P. D, „A New Approach to a Fatigue Damage Model for Glass-Fibre Reinforced Plastic Composites“, Seventh International Conference on Composites Engineering, pp. 211-212, 2-8 July 2000, Denver USA
- [168] Sidoroff F, Subagio B, „Fatigue Damage Modelling of Composite Materials from Bending Tests“, Sixth International Conference on Composite Materials, pp. 432-439, 20-24 July 1987, London UK, ISBN: 9781851661183
- [169] Vieilleigne S, Jeulin D, Renard J, Sicot N, „Modelling of the Fatigue Behaviour of a Unidirectional Glass Epoxy Composite Submitted to Fatigue Loadings“, International Conference on fatigue of composites, pp. 424-430, 3-5 June 1997, Paris France
- [170] Kawai M, „Damage Mechanics Model for Off-axis Fatigue Behaviour of Unidirectional Carbon Fiber-reinforced Composite at Room and High Temperatures“, Twelfth International Conference on Composite Materials, pp. 322, 5-9 July 1999, Paris France, ISBN: 978-1855734760
- [171] Hwang W, Han K. S, „Cumulative Damage Models and Multi-stress Fatigue Life Prediction“, Journal of Composite Materials, Vol. 20(2), pp. 125-153, March 1986, ISSN: 0021-9983, DOI: <https://doi.org/10.1177%2F002199838602000202>
- [172] Whitworth H. A, „Modelling Stiffness Reduction of Graphite Epoxy Composite Laminates“, Journal of Composite Materials, Vol. 21(4), pp. 362-372, April 1987, ISSN: 0021-9983, DOI: <https://doi.org/10.1177%2F002199838702100405>
- [173] Whitworth H. A, „Cumulative Damage in Composites“, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 112(3), pp. 358-361, July 1990, ISSN: 0094-4289, DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2903338>
- [174] Whitworth H. A, „A Stiffness Degradation Model for Composite Laminates Under Fatigue Loading“, Composite Structures, Vol. 40(2), pp. 95-101, December 1997, ISSN: 0263-8223, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(97\)00142-6](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(97)00142-6)

- [175] Yang J. N, Jones D. L, Yang S. H, Meskini A, „A Stiffness Degradation Model for Graphite/Epoxy Laminates“, *Journal of Composite Materials*, Vol. 24(7), pp. 753-769, July 1990, ISSN: 0021-9983, DOI: <https://doi.org/10.1177%2F002199839002400705>
- [176] Yang J. N, Lee L. J, Sheu D. Y, „Modulus Reduction and Fatigue Damage of Matrix Dominated Composite Laminates“, *Composite Structures*, Vol. 21(2), pp. 91-100, 1992, ISSN: 0263-8223, DOI: [https://doi.org/10.1016/0263-8223\(92\)90044-D](https://doi.org/10.1016/0263-8223(92)90044-D)
- [177] Hansen U, „Damage Development in Woven Fabric Composites During Tension-Tension Fatigue“, *Journal of Composite Materials*, Vol. 33(7), pp. 614-639, April 1999, ISSN: 0021-9983, DOI: <https://doi.org/10.1177%2F002199839903300702>
- [178] Chou P. C, Croman R, „Residual Strength in Fatigue Based on the Strength-life Equal Rank Assumption“, *Journal of Composite Materials*, Vol. 12(2), pp. 177-194, July 1978, ISSN: 0021-9983, DOI: <https://doi.org/10.1177%2F002199837801200206>
- [179] Hahn H. T, Kim R. Y, „Proof Testing of Composite Materials“, *Journal of Composite Materials*, Vol. 9(3), pp. 297-311, July 1975, ISSN: 0021-9983, DOI: <https://doi.org/10.1177%2F002199837500900308>
- [180] Halpin J. C, Jerina K. L, Johnson T. A, „Characterization of Composites for the Purpose of Reliability Evaluation“, ASTM International, San Antonio USA, 1973, ISBN: 9780803107014
- [181] Yang J. N, Beaumont P. W. R, „Load Sequence effects on the Fatigue of Unnotched Composite Materials“, ASTM International, Philadelphia USA, 1981, ISBN: 9780803107199
- [182] Daniel I. M, Charewicz A, „Fatigue Damage Mechanisms and Residual Properties of Graphite/epoxy Laminates“, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 25(5/6), pp. 793-808, 1986, ISSN: 0013-7944, DOI: [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(86\)90042-1](https://doi.org/10.1016/0013-7944(86)90042-1)
- [183] Rotem A, „Fatigue and Residual Strength of Composite Laminates“, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 25(5/6), pp. 819-827, 1986, ISSN: 0013-7944, DOI: [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(86\)90044-5](https://doi.org/10.1016/0013-7944(86)90044-5)
- [184] Caprino G, D'Amore A, „Flexural Fatigue Behaviour of Random Continuous-fibre Reinforced Thermoplastic Composites“, *Composites Science and Technology*, Vol. 58(6), pp. 957-965, 1998, ISSN: 0266-3538, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(97\)00221-2](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(97)00221-2)
- [185] D'Amore A, Giorgio M, Grassia L, „Modeling the Residual Strength of Carbon Fiber Reinforced Composites Subjected to Cyclic Loading“, *International Journal of Fatigue*, Vol. 78, pp. 31-37, September 2015, ISSN: 0142-1123, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.03.012>
- [186] Whitworth H. A, „Evaluation of the Residual Strength Degradation in Composite Laminates under Fatigue Loading“, *Composite Structures*, Vol. 48(4), pp. 261-264, April 2000, ISSN: 0263-8223, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(99\)00113-0](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(99)00113-0)
- [187] Yao W. X, Himmel N, „A New Cumulative Fatigue Damage Model for Fibre-reinforced Plastics“, *Composites Science and Technology*, Vol. 60(1), pp. 59-64, January 2000, ISSN: 0266-3538, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(99\)00100-1](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(99)00100-1)

- [188] Bergmann H. W, Prinz R, „Fatigue Life Estimation of Graphite/epoxy Laminates Under Consideration of Delamination Growth“, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*“, Vol. 27(2), pp. 323-341, September 1989, ISSN: 1097-0207, DOI: <https://doi.org/10.1002/nme.1620270208>
- [189] Dahlen C, Springer G. S, „Delamination Growth in Composites Under Cyclic Loads“, *Journal of Composite Materials*, Vol. 28(8), pp. 732-781, May 1994, ISSN: 0021-9983, DOI: <https://doi.org/10.1177%2F002199839402800803>
- [190] Bartley-Cho J, Lim S. G, Hahn H. T, Shyprykevich P, „Damage Accumulation in Quasi-isotropic Graphite/epoxy Laminates Under Constant-amplitude Fatigue and Block Loading“, *Composites Science and Technology*, Vol. 58, pp. 1535-1547, September 1998, ISSN: 0266-3538, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(97\)00214-5](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(97)00214-5)
- [191] Schon J, „A Model of Fatigue Delamination in Composites“, *Composites Science and Technology*, Vol. 60, pp. 553-558, March 2000, ISSN: 0266-3538, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(99\)00156-6](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(99)00156-6)
- [192] Reifsnider K. L, „The Critical Element Model: A Modeling Philosophy“, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 25(5/6), pp. 739-749, 1986, ISSN: 0013-7944, DOI: [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(86\)90037-8](https://doi.org/10.1016/0013-7944(86)90037-8)
- [193] Ogin S. L, Smith P. A, Beaumont P. W. R, „Matrix Cracking and Stiffness Reduction During the Fatigue of a (0/90)s GFRP Laminate“, *Composites Science and Technology*, Vol. 22(1), pp. 23-31, 1985, ISSN: 0266-3538, DOI: [https://doi.org/10.1016/0266-3538\(85\)90088-0](https://doi.org/10.1016/0266-3538(85)90088-0)
- [194] Beaumont P. W. R, „The Mechanics of Fatigue Damage in Structural Composite Materials“, *The Fourth European Conference on Composite Materials*, 25-28 September 1990, Stuttgart Germany, ISBN: 978-9401068413
- [195] Liu B, Lessard L. B, „Fatigue and Damage-tolerance Analysis of Composite Laminates: Stiffness Loss, Damage-modelling and Life Prediction“, *Composites Science and Technology*, Vol. 51(1), pp. 43-51, 1994, ISSN: 0266-3538, DOI: [https://doi.org/10.1016/0266-3538\(94\)90155-4](https://doi.org/10.1016/0266-3538(94)90155-4)
- [196] ISO 13003, 2003.
- [197] ASTM D 3479/D 3479M, 2019.
- [198] Ilanković N, Živanić D, Zelić A, Katona M, „Basic Parameters of a Tensile Device for Conveyor Belts“, *X International Conference Heavy Machinery*, pp. 73-80, 23-25 June 2021, Vrnjačka Banja Serbia, ISBN: 978-86-81412-09-1
- [199] Katona M, Ilanković N, Živanić D, „Design of the Device for Testing Conveyor Belts“, *Publications of the School of Engineering Sciences*, Vol. 35(11), pp. 1859-1862, October 2020, ISSN: 0350-428X, DOI: <https://doi.org/10.24867/10AM02Katona>
- [200] Đurić N, Ilanković N, „Basics for Design of Device for Testing Conveyor Belts“, *Publications of the School of Engineering Sciences*, Vol. 37(1), pp. 28-31, January 2022, ISSN: 0350-428X, DOI: <https://doi.org/10.24867/16AM09Djuric>

- [201] Katona M, „Design of the Device for Testing Conveyor Belts“, Master Thesis, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad Serbia, 2020
- [202] Đurić N, „Basics for Design of Device for Testing Conveyor Belts“, Master Thesis, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad Serbia, 2021
- [203] Mädler GmbH Germany, Catalogue Vol. 42, 2020, www.maedler.de
- [204] Laumas Elettronica S.r.l Italy, www.laumas.com
- [205] Sah Electronics, Serbia, Catalogue 2022, www.sah.rs
- [206] Kirjanow-Blazej A, Blazej R, Jurdziak L, Kozłowski T, Rzeszowska A, „Innovative diagnostic device for thickness measurement of conveyor belts in horizontal transport“, Scientific Reports, Vol. 12(1), May 2022, ISSN: 2045-2322, DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11148-1>
- [207] Trelleborg Slovenija, Catalogue 2020, www.trelleborgslovenija.com

Овај Образац чини саставни део докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта који се брани на Универзитету у Новом Саду. Попуњен Образац укоричити иза текста докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта.

План третмана података

Назив пројекта/истраживања
Истраживање и анализа утицајних параметара на експлоатационе карактеристике транспортних трака
Назив институције/институција у оквиру којих се спроводи истраживање
Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Република Србија
Назив програма у оквиру ког се реализује истраживање
Докторске академске студије: Машинство
1. Опис података
1.1 Врста студије Укратко описати тип студије у оквиру које се подаци прикупљају Докторска дисертација
1.2 Врсте података а) квантитативни б) квалитативни
1.3. Начин прикупљања података а) анкете, упитници, тестови б) клиничке процене, медицински записи, електронски здравствени записи в) генотипови: навести врсту _____ г) административни подаци: навести врсту _____ д) узорци ткива: навести врсту _____ ђ) снимци, фотографије: навести врсту _____ е) текст, навести врсту: Литературни извори ж) мапа, навести врсту _____ з) остало: описати: Експериментална испитивања

1.3 Формат података, употребљене скале, количина података

1.3.1 Употребљени софтвер и формат датотеке:

- a) Excel фајл, датотека .xlsx
- b) SPSS фајл, датотека _____
- c) PDF фајл, датотека .pdf
- d) Текст фајл, датотека .docx
- e) JPG фајл, датотека .jpg, .png
- f) Остало, датотека .wmf

1.3.2. Број записа (код квантитативних података)

- a) број варијабли: **велики број**
- б) број мерења (испитаника, процена, снимака и сл.): **велики број**

1.3.3. Поновљена мерења

- a) да
- б) не

Уколико је одговор да, одговорити на следећа питања:

- a) временски размак између поновљених мера је **између неколико минута и неколико дана**.
- б) варијабле које се више пута мере односе се на **Истраживање и анализа утицајних параметара на експлоатационе карактеристике транспортних трака**.
- в) нове верзије фајлова који садрже поновљена мерења су именоване као **оригинал_2**.

Напомене: _____

Да ли формати и софтвер омогућавају дељење и дугорочну валидност података?

- a) **Да**
- б) **Не**

Ако је одговор не, образложити _____

2. Прикупљање података

2.1 Методологија за прикупљање/генерисање података

2.1.1. У оквиру ког истраживачког нацрта су подаци прикупљени?

- а) експеримент, навести тип: **експериментално испитивање утицајних параметара на експлоатационе карактеристике транспортних трака.**
- б) корелационо истраживање, навести тип _____
- ц) анализа текста, навести тип: **прикупљање података анализом доступне литературе.**
- д) остало, навести шта _____

2.1.2 Навести врсте мерних инструмената или стандарде података специфичних за одређену научну дисциплину (ако постоје).

- Фреквентни регулатор Hitachi NES1-007 HBE;
- PLC Fatek PB5MC 64;
- модул за генерисање аналогног сигнала FBS 2D 4A;
- мерно појачало FBS LC;
- серводрајвери Fatek SD3;
- мерна хелија CZL312A 5t;
- инкрементални енкодер TK45.

2.2 Квалитет података и стандарди

2.2.1. Третман недостајућих података

- а) Да ли матрица садржи недостајуће податке? Да **Не**

Ако је одговор да, одговорити на следећа питања:

- а) Колики је број недостајућих података? _____
- б) Да ли се кориснику матрице препоручује замена недостајућих података? Да **Не**
- в) Ако је одговор да, навести сугестије за третман замене недостајућих података
- _____

2.2.2. На који начин је контролисан квалитет података? Описати

Квалитет података је контролисан анализом и поређењем резултата измерених при експерименталном испитивању и оних добијених развијеним моделима.

2.2.3. На који начин је извршена контрола уноса података у матрицу?

Валидација података је реализована од стране комисије за оцену и одбрану докторске дисертације.

3. Третман података и пратећа документација

3.1. Третман и чување података

3.1.1. Подаци ће бити депоновани у НаРдУс – Националном репозиторијуму дисертација у Р. Србији и у Репозиторијуму докторских дисертација на Универзитету у Новом Саду.

3.1.2. URL адреса <https://cris.uns.ac.rs/searchDissertations.jsf>

3.1.3. DOI _____

3.1.4. Да ли ће подаци бити у отвореном приступу?

а) Да

б) Да, али после ембарга који ће трајати до _____

в) Не

Ако је одговор не, навести разлог _____

3.1.5. Подаци неће бити депоновани у репозиторијум, али ће бити чувани.

Образложење

3.2. Метаподаци и документација података

3.2.1. Који стандард за метаподатке ће бити примењен? _____

3.2.1. Навести метаподатке на основу којих су подаци депоновани у репозиторијум.

Ако је потребно, навести методе које се користе за преузимање података, аналитичке и процедуралне информације, њихово кодирање, детаљне описе варијабли, записа итд.

3.3. Стратегија и стандарди за чување података

3.3.1. До ког периода ће подаци бити чувани у репозиторијуму? **Неограничено.**

3.3.2. Да ли ће подаци бити депоновани под шифром? Да **Не**

3.3.3. Да ли ће шифра бити доступна одређеном кругу истраживача? Да **Не**

3.3.4. Да ли се подаци морају уклонити из отвореног приступа после извесног времена?

Да **Не**

Образложити

4. Безбедност података и заштита поверљивих информација

Овај одељак МОРА бити попуњен ако ваши подаци укључују личне податке који се односе на учеснике у истраживању. За друга истраживања треба такође размотрити заштиту и сигурност података.

4.1 Формални стандарди за сигурност информација/података

Истраживачи који спроводе испитивања с људима морају да се придржавају Закона о заштити података о личности (https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_zastiti_podataka_o_licnosti.html) и одговарајућег институционалног кодекса о академском интегритету.

4.1.2. Да ли је истраживање одобрено од стране етичке комисије? Да Не

Ако је одговор Да, навести датум и назив етичке комисије која је одобрила истраживање

4.1.2. Да ли подаци укључују личне податке учесника у истраживању? Да Не

Ако је одговор да, наведите на који начин сте осигурали поверљивост и сигурност информација везаних за испитанике:

- а) Подаци нису у отвореном приступу
 - б) Подаци су анонимизирани
 - ц) Остало, навести шта
-

5. Доступност података

5.1. Подаци ће бити

- а) јавно доступни
- б) доступни само уском кругу истраживача у одређеној научној области
- ц) затворени

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести под којим условима могу да их користе:

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести на који начин могу приступити подацима:

5.4. Навести лиценцу под којом ће прикупљени подаци бити архивирани.

Ауторство – некомерцијално.

6. Улоге и одговорност

6.1. Навести име и презиме и мејл адресу власника (аутора) података

Никола Иланковић, ilankovic@uns.ac.rs

6.2. Навести име и презиме и мејл адресу особе која одржава матрицу с подацима

Никола Иланковић, ilankovic@uns.ac.rs

6.3. Навести име и презиме и мејл адресу особе која омогућује приступ подацима другим истраживачима

Никола Иланковић, ilankovic@uns.ac.rs