

**АНАЛИЗА ЗАМОРНОГ ПОНАШАЊА ТРАНСПОРТНЕ ТРАКЕ МЕТОДОМ  
КОНАЧНИХ ЕЛЕМЕНАТА****ANALYSIS OF THE CONVEYOR BELT FATIGUE BEHAVIOR USING THE FINITE  
ELEMENT METHOD**Лука Куцурски, Никола Иланковић, *Факултет техничких наука, Нови Сад***Област - МАШИНСТВО**

**Кратак садржај** – Циљ овог рада је да се истраже и поставе основе за анализу замора композитних материјала применом симулација. На самом почетку дате су теоријске основе из области композита и замора материјала. Након тога, помоћу софтверског пакета Autodesk Inventor Nastran, представљен је детаљан приказ дефинисања ламинарних композита као и поставка анализе замора у софтверу. На крају је обрађена заморна анализа транспортне траке, чиме се добила јасна слика предности и тренутних недостатака софтвера као и смернице за правце даљих истраживања.

**Кључне речи:** композити, заморно понашање, транспортна трака, метода коначних елемената

**Abstract** – The goal of this paper is to investigate and establish the basis for fatigue analysis of composite materials using simulation. At the very beginning of the paper, the theoretical foundations in the field of composite materials and fatigue behavior are given. After that, using the Autodesk Inventor Nastran software package, a detailed description of the creation of laminar composites as well as a fatigue analysis setup in the software is presented. At the end of last chapter, where fatigue behavior of the conveyor belt is analyzed, a clear picture of the advantages and current disadvantages of the software is obtained. Also the possible directions of further research.

**Keywords:** composite materials, fatigue behavior, conveyor belt, finite element method

**1. УВОД**

У данашње време промене се дешавају невероватном брзином, свакодневно се јављају новине које постају део свакодневнице. Практично је немогуће замислити посао инжењера без употребе рачунарске технике и симулација. У претходних неколико деценија дошло је до огромног развоја рачунарске технике, самим тим и рачунарских софтвера, који су омогућили употребу симулација и тиме у многоме олакшале инжењерски посао и донеле низ предности.

**НАПОМЕНА:**

Овај рад је проистекао из мастер рада чији ментор је био др Драган Живанић, ванр. проф.

Постоје многе области које још увек нису довољно истражене или још увек не постоји потпуно развијен софтвер који може да одговори на све захтеве које диктира убрзани технолошки развој. Једна од тих области јесте и замор материјала, поготово замор код композитних материјала, који по својој природи имају комплексну структуру.

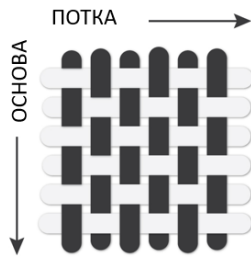
**2. КОМПОЗИТНИ МАТЕРИЈАЛИ**

По дефиницији, композитни материјали или укратко композити су материјали добијени спајањем два или више материјала различитих својстава у микро и/или макроскопској размери, са циљем добијања материјала који најбоље показује својства својих компоненти или добијања таквих својстава каква не поседује нити једна компонента сама за себе. Сваки композит се састоји од матрице, која представља основни материјал одређених својстава, и ојачања које представља материјал чијим се додавањем постижу потребне комбинације својстава композита, слика 1. Композитни материјали се могу поделити на основу више критеријума нпр. на основу материјала матрице, на основу материјала ојачања, према својој структури и понашању тј. својствима у различитим правцима.

Слика 1. *Градивни елементи композита***2.1. Текстилни композити – 2Д и 3Д тканине**

Транспортна трака, као основни елемент тракастих транспортера, представља ламинарни композит, који је састављен од 2Д тканина, па је посебна пажња у раду посвећена текстилним композитима. 2Д тканине настају технолошким процесом који се назива ткање. Разноврсним укрштањем настају тканине различитих особина, изгледа и структура. 2Д тканине имају добре механичке особине у својој равни, високу специфичну крутост и чврстоћу. Међутим, у многим применама јављају се и оптерећења ван њихове равни где 2Д

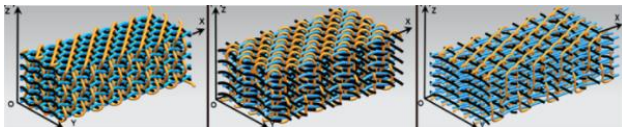
тканине нису право решење. Због јављања потребе за тканинама које имају добре карактеристике и подносе оптерећења ван своје равни, настају 3Д тканине које улазе у састав 3Д композита.



Слика 2. 2Д тканина

Разлика између 3Д и 2Д тканине је што 3Д тканине поред основе и потке садржи и везиво. У зависности од структуре тканине, нити потке, основе и везива пролазе, преко, дуж и кроз тканине у смеровима X, Y, Z. Последњих година 3Д тканине су технологија у повоју.

Поред добрих карактеристика на оптерећење ван равни, 3Д тканине имају низ предности. Због тога је 3Д ткање технологија у развоју која нуди разне предности у односу на 2Д тканине. Кључне предности су смањена маса, уклањање деламинације, смањен ризик од пукотина, краће време производње и смањење трошкова. Приказ неких од типова 3Д тканина дат је на слици 3.



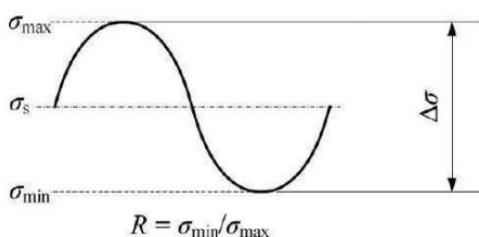
Слика 3. 3Д тканина

### 3. ЗАМОР МАТЕРИЈАЛА

Замор представља оштећење материјала изазавано периодично променљивим оптерећењима која по свом интензитету не прелазе напон течења. Лом услед замора је последица еластичних и еласто-пластичних деформација које се, због нехомогености материјала, неравномерно распоређују по запремини тела.

Почетне прелине настају у микрозапреминама неповољно оријентисаним према спољашњем оптерећењу, пренапрегнутим зонама и локалним ослабљењима услед геометријских неправилности.

Сами циклуси тј. циклично оптерећење има неколико карактеристика које су од посебног значаја – максималне и минималне вредности оптерећења (напона), као и амплитуду. Разлика између максималне и минималне вредности назива се распон напона и обележава се са  $\Delta\sigma$ , слика 4.



Слика 4. Амплитуда оптерећења

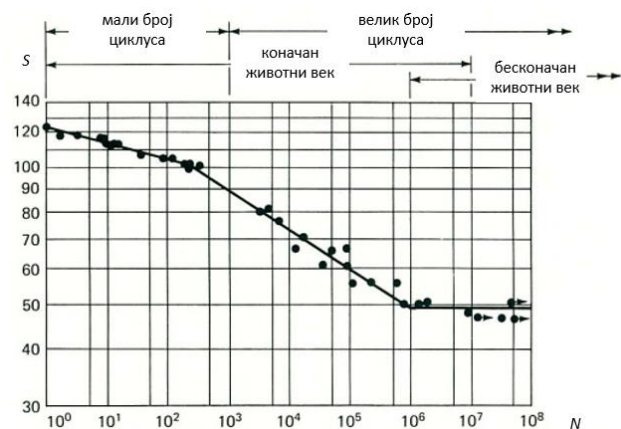
Однос ове две вредности, односно минималног и максималног напона назива се фактор асиметрије циклуса  $R$ , и од великог је значаја при нумеричкој симулацији конструкција оптерећених на замор.

Такође, величине које су карактеристичне код цикличног оптерећења су средњи напон  $\sigma_m$  и амплитудни напон  $\sigma_a$ , који се израчунавају као:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}, \quad \sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (1)$$

#### 3.1. S-N дијаграм

Једна од основних метода за предвиђање животног века при замору јесте S-N дијаграм, слика 5. S представља опсег цикличног оптерећења, док N представља број циклуса до отказа. Да би се формирала крива, потребно је да се низ узорака тестира до отказа у различитим опсезима оптерећења. Уобичајена је пракса да се крива учртава кроз средњу вредност у сваком опсегу напона.



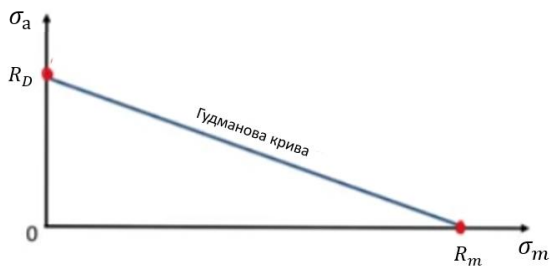
Слика 5. Приказ S-N дијаграма

#### 3.2. Гудманов дијаграм

Пре самог приказа дијаграма, слика 6, потребно је да се образложе величине које фигуришу у дијаграму, а то су:

- средњи напон;
- амплитудни напон;
- затезна чврстоћа – представља највећу вредност напона којим се материјал може оптеретити затезањем а да притом не дође до лома, означава се са  $R_m$ ;
- граница развлачења – представља напон изнад којег материјал почиње трајно да мења облик (пластична деформација), означава се са  $R_p$ ;
- трајна динамичка чврстоћа - представља напон испод којег материјал може издржати бесконачан број поновљених циклуса оптерећења, означава се са  $R_D$ .

На Гудмановом дијаграму може се видети да је на хоризонталној оси постављен средњи напон, а на вертикалној оси амплитудни напон. За било коју комбинацију ова два напона, која дају тачку која се налази у области испод Гудманове криве, каже се да материјал тј. узорак може да издржи такво оптерећења бесконачно много циклуса. За комбинације напона које дају тачку изнад Гудманове криве каже се да ти узорци, под таквим оптерећењем, могу да издрже коначан број циклуса.



Слика 6. Гудманов дијаграм

#### 4. РАД СА ЛАМЕНАРНИМ КОМПОЗИТА У AUTODESK INVENTOR NASTRAN

*Autodesk Inventor* је софтверски пакет за пројектовање помоћу рачунара, служи за 3Д машински дизајн, симулацију, визуелизацију и документацију, развијен је од стране фирме *Autodesk*. *Inventor* омогућава интеграцију 2Д и 3Д података у једно окружење, стварајући виртуелну презентацију финалног производа која омогућава корисницима да провере форму, уклапање и функцију производа пре него што се сам производ изради. *Nastran*, као додатни модул који је интегрисан у *Inventor*, веома је моћан алат за анализу методом коначних елемената (е. *FEA*). Користи се за анализу статичких и динамичких напрезања, као и анализу преноса топлоте конструкција и механичких компоненти.

Поред анализе конвенционалних инжењерских материјала, *Nastran* је опремљен да симулира понашање најновијих напредних материјала, укључујући композите, пластику, хипереластичне, вискоеластичне и крте материјале као што је бетон. Први корак код дефинисања композита је одабир материјала, преко картице *Materials*. Софтвер нуди могућност одабира материјала из његове библиотеке, али пружа могућност кориснику да дефинише особине материјала по жељи.

Када се дефинишу материјали који ће сачињавати композит, *Laminate* алат омогућава да се дефинише сваки слој тако што ће се дефинисати материјал слоја један по један заједно са њиховим дебелинама, угловима постављања итд. Поред основних поставки, корисник је у могућности да дефинише и која теорија отказа ће се користити (*Hill, Hoff* и *Tsai, Max Stress*), интерламинарни смичући напон, коефицијент пригушења и многе друге параметре. Ако се у композиту јављају слојеви са истим или сличним особинама, веома је корисна алатка *Global Ply* преко које се веома брзо бирају претходно дефинисани слојеви.

Када су слојеви композита дефинисани, помоћу алатке *Idealizations*, жељеном 3Д моделу се додељују претходно дефинисане карактеристике композита. У алатци је потребно за тип елемента изабрати *Shell Elements*, затим обележити поље *Associated Geometry* и одабрати геометрије на којима се жели применити идеализација. Да би резултати анализе били што тачнији, на крају је неопходно дефинисати оријентацију материјала, помоћу алатке *Material Orientation*. Када су претходни кораци урађени може се приступити статичкој анализи композита.

#### 5. АНАЛИЗА ЗАМОРА ТРАНСПОРТНЕ ТРАКЕ У AUTODESK INVENTOR NASTRAN

Најраспрострањеније транспортно средство непрекидног транспорта јесте тракасти транспортер. Разлог широке примене је тај што се са овим транспортерима постижу високи техничко-економски ефекти, потпуна аутоматизација свих фаза технолошког процеса, уз пуну радну сигурност и одговарајуће усклађености коришћења капацитета других уређаја у технолошком процесу [1]. Нажалост, у великом броју случајева долази до пуцања транспортне траке при нивоима оптерећења који су нижи од дозвољеног. То је јасан знак да велику улогу у експлоатационом веку транспортне траке игра заморно оптерећење. Због тога што замор још увек представља нову и недовољно истражену област у софтверском пакету *Autodesk Inventor Nastran*, у раду се анализа замора материјала формирала на основу експерименталних истраживања и резултата из докторске дисертације [2]. Транспортна трака се састоји од гуме, као матрице, и полиестер-полиамид влакана, као ојачивача. Како је транспортна трака састављена од горњег и доњег гуменог слоја и језгра, које се састоји од полиестер-амида, својства испитане траке су дата у табели 1. и табели 2.

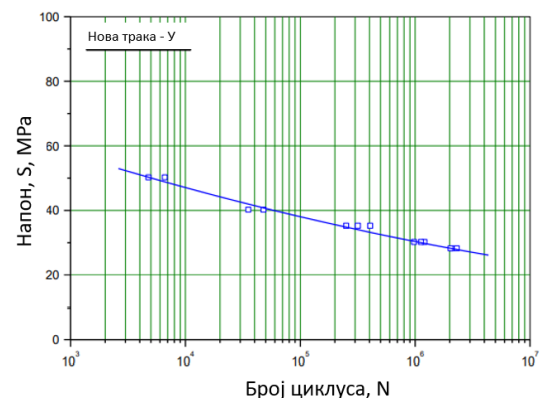
Табела 1. Физичко механичке карактеристике језгра транспортне траке

Особина материјала	Врста материјала	
	Р (полиамид)	Е (полиестер)
Затезна чврстоћа [N/mm <sup>2</sup> ]	990	1150
Издужење при кидању [%]	17	14
Модул еластичности [N/mm <sup>2</sup> ]	5,5	13,8
Густина материјала [g/cm <sup>3</sup> ]	1,14	1,38

Табела 2. Карактеристике транспортне траке

Дебелина транспортне траке [mm]	20
Дебелина горњег заштитног гуменог слоја [mm]	6
Дебелина доњег заштитног гуменог слоја [mm]	4
Број носећих слојева [mm]	4
Дебелина носећег слоја [mm]	2,5
Јачина на кидање [mm]	2000

Према [2], на основу утврђених модела стандардних метода испитивања композитног материјала, одређена су основна макромеханичка својства траке: затезна чврстоћа, модул еластичности, Поасонов коефицијент и деформација.



Слика 7. S-N дијаграм добијен експерименталним путем

Испитивања на затезање су урађена на епруветама композита гума-полиестер-полиамид и изведена су према стандарду ASTM D 3039, док су испитивања у условима динамичког деловања силе рађена по стандардима ASTM E 466, ASTM E 467 и ASTM E468. На основу резултата у условима динамичког оптерећења, формиран је дијаграм приказан на слици 7. Са дијаграма су очитане вредности напона, за одређене бројеве циклуса, и употребљене за добијање сила за испитивање затезне чврстоће и трајне динамичке чврстоће, за формирану модел епрувете у софтверу.

Због немогућности софтвера да покрене анализу замора када је модел креиран као композитни материјал, модел тј. епрувета за коју је урађена анализа је креирана као *Solid*. За дебљину епрувете је дефинисана вредност од 10 mm, што у ствари представља 4 слоја од по 2,5 mm. Та 4 слоја су заправо и једини носећи слојеви у транспортној траци. Анализа је замишљена да се верификује кроз пет итерација.

Табела 3. План испитивања

Бр. итерације	Сила [N]	Предвиђен број циклуса до отказа
1	48.000	1.000
2	40.000	5.000
3	32.000	50.000
4	28.000	300.000
5	24.000	1.000.000

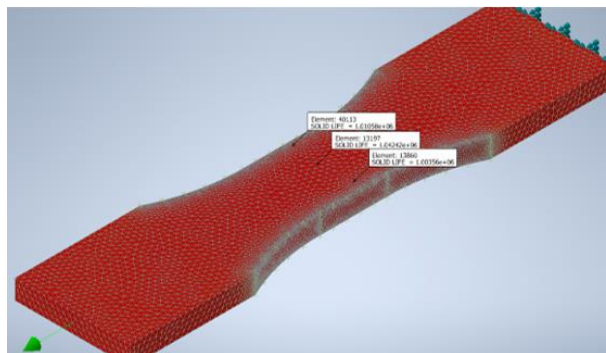
На почетку је у софтверу дефинисан материјал према подацима добијених из испитивања. Након тога, посебна пажња је посвећена дефинисању S-N криве у оквиру за дијалог *Fatigue*. Унесене су вредности нагиба криве, затезне чврстоће, трајне динамичке чврстоће. Након тога, да би се симулирао рад серво хидрауличке кидалице, на један крај епрувете је постављено укљештење, док је на другом крају постављено оптерећење које је фигурисало кроз анализу. За анализу замора неопходно је и дефинисати како ће се оптерећење мењати кроз време, у оквиру за дијалог *Load History Table Data*. Пре покретања анализе, за сваки од случајева оптерећења, потребно је дефинисати мрежу коначних елемената. Преко алатке *Mesh control* дефинише се локална мрежа. Дефинисана је величина од 0,5 mm. Затим је дефинисана глобална мрежа коначних елемената, преко алата *Generate Mesh*. Дефинисани су елементи величине 3 mm. Када су претходни кораци урађени, анализа је пуштена за пет случајева оптерећења, наведених у табели 3. Резултати анализе замора добијени након пет итерација истог су реда величине као и резултати добијени експерименталним путем.

Табела 4. Резултати рачунарског експеримента

Бр. итерације	Сила [N]	Број циклуса до отказа за посматране елементе		
		1	2	3
1	48.000	1.010	1.023	1.003
2	40.000	5.426	5.539	5.420
3	32.000	51.967	55.819	51.029
4	28.000	298.774	311.663	294.629
5	24.000	1.010.580	1.042.420	1.003.560

Овим је потврђена валидност резултата симулације, као и самих апроксимација које су уведене у поставку

анализе замора. Резултати су представљени у табели 4. Такође је један од резултата симулације је приказан на слици 8.



Слика 8. Приказ резултата из пет итерација

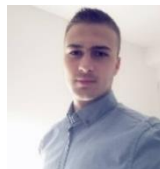
## 6. ЗАКЉУЧАК

Експериментална истраживања везана за анализу замора су захтевна, изискују доста времена и финансијских средстава. Коришћењем симулација, као полазне тачке за анализу замора, елиминису се већина ограничавајућих фактора присутних код експерименталних метода. Још једна од великих предности је могућност брзе измене модела, његове структуре или специфичних карактеристика у почетним фазама истраживања и након тога брзо добијање нових резултата. Све то доводи до тога да даља експериментална истраживања буду мањег обима, јефтинија и бржа. Поред свих претходно наведених могућих бенефита приликом коришћења софтвера за анализу замора, један од конкретних бенефита се јавља у области транспортних трака. Степен сигурности приликом прорачуна транспортне траке је тренутно велик да би се елиминисао ефекат замора. Добијањем реалног животног века транспортне траке, степен сигурности би могао драстично да се смањи, чиме би дошло до избора транспортне траке оптималних карактеристика, а тиме и до значајних уштеда.

## 7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Колоња Б., Кнежевић Д., „Транспорт у припреми минералних сировина“, 2000.
- [2] Пирић Е., „Утицај експлоатационих услова на понашање гумене траке тракастих транспортера“, 2015.

### Кратка биографија:



**Лука Куцурски** рођен је у Сомбору, Србија 1998. год. Дипломирао је 2020. год. на Факултету техничких наука, смер Механизација и конструкционо машинство, на којем исте године уписује мастер академске студије.



**Никола Иланковић** рођен је у Суботици 1994. год. Завршио је мастер академске студије 2018. године на Факултету техничких наука и исте године уписао докторске студије машинства. Запослен је у звању асистент мастер на Факултету техничких наука у Новом Саду.