

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Машински елементи 2

Број индекса: 107/2013

Ђурђе Р. Јовић

**Примена композитних материјала за
израду машинских елемената
завршни рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. др Зорица Ђорђевић, ванр.проф.-ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена : _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да опише и анализира:

- основна својства, врсте и карактеристике композитних материјала,
- примена композитних материјала за израду машинских елемената и
- кроз пример објасни начин прорачуна степена сигурности на боку и у подножју зупца композитних зупчаника.

Препоручена литература:

[1] В. Николић: *Машински елементи*, Машински факултет Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2004

[2] М. Антић: *Композитни материјали*, Контрол-Инспект д.о.о Београд, Београд 2016.

[3] Ј. Говедаровић, З. Ђорђевић: *Примена композитних материјала за израду машинских елемената*, Седми међународни научно-стручни скуп о достигнућима електро и машинске индустрије, Бања Лука 2005.

Крагујевац, септембар 2016.

Ментор:

Др Зорица Ђорђевић ванр. проф.

Садржај

1.0 Увод.....	1
2.0 Основна својства, врсте и карактеристике композитних материјала.....	2
2.1 Грађа композита	2
2.2 Основна својства композита	4
2.3 Партикуларни - композитни материјали ојачани честицама .	5
2.3.1 Дисперзно ојачани композитни материјали.....	6
2.3.2 Стандардни партикуларни композитни материјали.....	6
2.3.3 Примена композита ојачаних честицама.....	7
2.4 Композитни материјали ојачани влакнима	8
2.4.1 Матрице и влакна.....	9
2.5 Структурни композитни материјали	14
2.5.1 Слојевити композити.....	15
2.5.2 Сендвич композити.....	15
2.5.3 Станични композити.....	16
2.6 Поступци израде композитних материјала	17
3.0 Примена композитних материјала за израду машинских елемената	18
3.1 Особине зупчаника израђених од композитних материјала	19
3.2 Карактеристике вратила израђених од композитних материјала.....	27
3.2.1 Композитна карданска вратила	29
3.3 Каишници и каишеви од композитних материјала	32
4.0 Прорачун носивости композитних зупчаника	35
4.1 Основни параметри	36

4.2 Прорачун основних геометријских величина зупчастог пара	36
4.3 Провера носивости	40
4.4 Радни напон на боку зубаца	40
4.4.1 Критични напон на боку	41
4.4.2 Степен сигурности бока	42
4.5 Радни напон у подножју зубаца	42
4.5.1 Критични напон у подножју	43
4.5.2 Степен сигурности подножја	43
5.0 Закључак	45
6.0 Литература.....	47

Резиме

У овом раду дат је преглед особина композитних материјала, који се све више примењују за израду елемената за пренос снаге. Применом композитних материјала за израду машинских елемената постиже се знатно смањење масе конструкције уз рационалну потрошњу енергије и материјала. Истакнуте су предности, али и недостаци, композитних у односу на конвенционалне челичне машинске елементе. Кроз пример прорачуна објашњен је поступак прорачуна степена сигурности на боку и у подножју зупца композитних зупчаника и дат је коментар добијених резултата.

Кључне речи: композитни материјали, елементи преноса снаге, композитни машински елементи

Abstract

This work contains review of composite materials characteristics, which are being used more often in elements of power transmission. Application of composite materials for production of mechanical elements achieves considerable mass reduction together with rationalization of energy and materials. This work also highlights advantages and drawbacks of composites in comparison with conventional steel mechanical elements. Calculation example explains the procedure for determining the level of security on the side and bottom of composite gear teeth, together with commentary of the results.

Key words: composite materials, power transmission elements, composite mechanical elements

1.0 Увод

Прва примена композитних материјала је почела у авио индустрији 70-их година прошлог века, а данас, након непуних пет деценија, је незаобилазни део у већини индустрија. Аутомобилска индустрија има велике користи од способности и карактеристика ових нових напредних материјала. У процесу производње, метални аутомобилски делови се све више мењују композитним, [1].

Савремени развој технологије и индустрије намеће све строжије захтеве у погледу карактеристика материјала који се користе за израду различитих машинских елемената и конструкција. У циљу постизања бољих механичких карактеристика појединих производа, последњих деценија, све је присутнија тежња за коришћењем вештачких материјала. Предности композита као вештачких материјала, у односу на конвенционалне материјале, је у томе да се код њих користе најбоља својства материјала од којих су састављени. Композитни зупчаници се обично израђују од полимера ојачаних стакленим и угљеничним влакнима. Због могућности апсорбовања удара и вибрација, што смањује буку у току рада, мале масе, релативно малог коефицијента трења, отпорности на корозију, ови зупчаници наилазе на све ширу примену у аутомобилској и електронској индустрији, код компјутера и медицинске опреме. Међутим у односу на металне зупчанике, зупчаници израђени од композитних материјала имају мању затезну чврстоћу (до 200 МПа), мању крутост (модул еластичности до 1000 МПа), максимална температура примена, скоро свих врста композитних зупчаника, ја знатно мала (до 200 °C), велики коефицијент топлотног издужења, итд. Примена композитних машинских елемената због наведених недостатака је ограничена, [2].

Композитни материјали представљају материјале код којих је могуће вршити оптимизацију механичких карактеристика, обрадивости и обликовања, утицај на околину, цене материјала и производње, јер се добијају комбиновањем два или више материјала са комплементарним особинама. Они се састоје од матрице, влакна који служе за ојачање материјала и разних адитива који побољшавају карактеристике материјала, [3].

2.0 Основна својства, врсте и карактеристике КОМПОЗИТНИХ МАТЕРИЈАЛА

Композит је материјал који се састоји из мешавине или комбинације две или више макрокомпоненти, које се разликују по облику и/или саставу материјала и у основи су нетопиве једна у другој. Композити су материјали добијени спајањем два или више материјала различитих својства (метала, керамике, полимера) у циљу постизања потребне специфичне комбинације својстава (густина, чврстоћа, крутост, топлотна проводљивост и др.). Композити могу заменити најчешће коришћене метале – гвожђе и алуминијум, при чему се често постижу боље перформансе делова/састава. На пример, применом композита се постиже мања маса, у случају замене челика за $60 \div 80 \%$, у случају замене алуминијума $20 \div 50 \%$, [4].

Композити се могу дефинисати још и као систем материјала који се састоји од смеше или комбинације два или више макро, микро или нано конституената који се разликују по облику, хемијском саставу и који се у суштини не растварају један у другом, [5].

2.1 Грађа композита

Грађа композита се састоји од **матрице** (основни материјал са својим својствима) и од **додатка** (материјал чијим се додавањем постижу потребне комбинације својстава композита).

Према материјалу матрице композити се деле на:

- металне,
- керамичке и
- полимерне.

По правилу се код композита са металном матрицом и њеним додацима трајно смањују деформације на повишеним температурама, код композита са керамичком матрицом и њеним додацима повећава се жилавост, а код композита са полимерном матрицом и њеним додацима повећавају се чврстоћа и крутост.

Најчешће се користе композити са полимерном матрицом. Ширу примену им ограничавају недовољно развијена аутоматизација производње делова. Како се развијала технологија синтеровања, тако се ширила примена композита са металном матрицом. Композити са керамичком матрицом су најслабије заступљени, [4].

Сваки композитни материјал састоји се од додатка (ојачивача), оријентисаног у одређеном правцу и матрице (основе), која служи као везивно средство.

Подела композита на основу врсте матрице и ојачивача приказана је на слици 2.1.



Слика 2.1. Врсте композитних материјала у зависности од материјала матрице и додатка.

Подела композитних материјала, [5]:

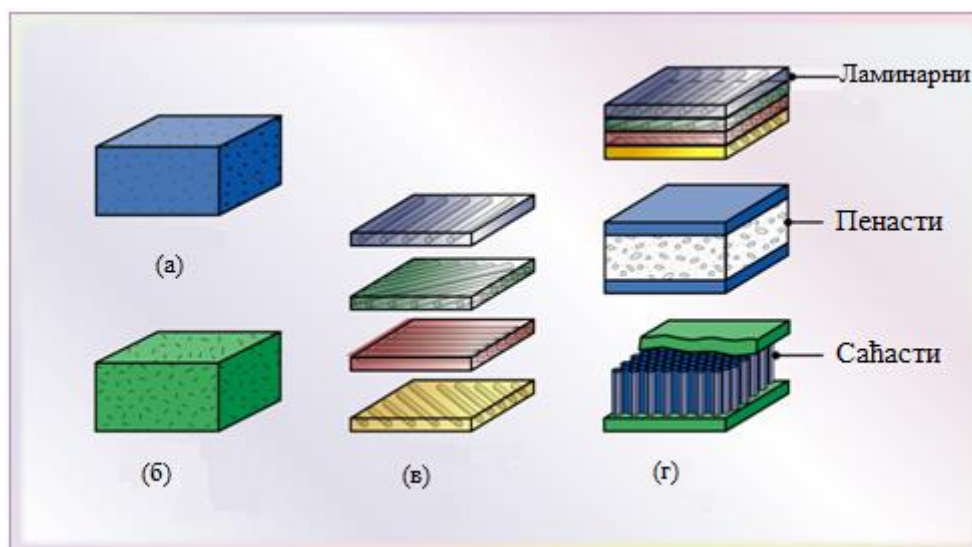
Према облику димензија конституената композити се деле на:

- макроскопски композитни материјали,
- микроскопски композитни материјали и
- нано композитни материјали.

Према облику додатка композити се деле на:

- практикуларне – ојачане честицама (велике честице и диспергиране честице),
- ојачане влакнима (дуга или кратка влакна и усмерена и неусмерена влакна),
- структурне или ламинарне (слојевити, станични и сендвич) и
- комбиноване.

Шематски приказ врста композита у чијој основи је пластика приказан је на слици 2.2.



Слика 2.2. Композитни материјали: а) ојачани честицама б) ојачани кратким или дугим влакнима у различитим правцима в) ојачани континуираним влакнима г) сендвич конструкције које могу бити од континуираних влакана – ламинати, сендвич структура са пеном, или да подсећају на саће.

Композитни материјали могу да буду:

- изотропни (иста својства материјала у свим правцима) и
- анизотропни (различита својства материјала у различитим правцима).

Ако су честице распоређене равномерно, композити ојачани честицама су изотропни. Композити ојачани влакнима су по правилу анизотропни, док су ламинатни композити увек анизотропни, [6].

2.2 Основна својства композита

Својства композита зависе од матрица и додатака као и од њихових својства:

- величине и распореда (расподеле) конституената,
- запреминског удела конституената,
- облика конституената и
- природе и јачине везе међу конституентима.

Зависност односа “границе течења композита – границе течења матрице” дефинисана је пречником честице – d_p , односно l/d_f – дужина влакна/пречник влакна, [7].

Карактеристике појединих композитних материјала дате су у табели 2.1.

Табела 2.1. Карактеристике појединих композитних материјала.

Материјал	матрица	Титан	Угљеник	Полиестер	Епоксид		
	додатак	честице титан-карбида	угљенична влакна	стаклено ткање	стаклено ткање	арамидно ткање	угљенично ткање
Састав, W_i %		20 TiC(p)	50 C(Vf)	фабричко ткање	ткање	ткање	ткање
ρ , kg/dm ³		4,52÷4,58	1,68÷1,72	1,6÷2,0	1,75÷1,97	1,38	1,54÷1,61
R_m , N/mm ²		950÷1040	220÷250	175÷345	31,9÷35,1	92÷106	470÷668
$R_{m,t}$, N/mm ²		960÷1050	14÷23	210÷350	319÷351	129÷152	450÷649
E , kN/mm ²		140÷160	90÷100	14÷31	66,3÷69,7	24÷31	44÷48
ν , –		0,33÷0,35	0,31÷0,33	0,30÷0,35	0,31÷0,32	0,33÷0,35	0,33÷0,34
R_e , N/mm ²		940÷1040	14÷23	166÷276	207÷304	129÷152	450÷649
A , %		0,3÷0,31	0	1÷2	0,85÷0,95	0,37÷0,42	0,84÷0,93
K_{IC} , N/m ^{3/2}		580÷890	180÷200	340÷660	190÷950	190÷1400	190÷2800
HV		240÷270	67÷74	50÷83	11÷22	11÷22	11÷22
$R_{d,IS}$, N/mm ²		26,9÷31,3	15÷17	83÷138	41÷91	71÷99	247÷477
t_{Max} , °C		380÷430	2000÷2100	170÷190	140÷220	140÷220	140÷220
t_{min} , °C		–273	–273	–120÷–70	–120÷–70	–120÷–70	–120÷–70
c , J/(kg·K)		585÷590	754÷758	1150÷1210	1020÷1120	510÷690	950÷1090
λ , W/(m·K)		5,5÷6,0	10÷70	0,65÷0,68	0,42÷0,51	0,19÷0,26	1,1÷2,2
α , $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{K})$		7,7÷8,4	0,6÷8,2	27÷54	8,6÷33	9,4÷13	5,5÷29
E_k , MV/m		–	10÷20	14÷20	12÷20	12÷20	–
ϵ_0 , $\mu\Omega\cdot\text{cm}$		180÷190	1100÷2700	$10^{18}\div10^{19}$	$2\cdot10^{21}\div2\cdot10^{22}$	$3\cdot10^{19}\div2\cdot10^{21}$	$2\cdot10^5\div7\cdot10^5$
$K_{рецивљности}$		0	0	0,015	0,015	0,015	0,015
Цена, РСД		9900 ÷ 14000	990 ÷ 1400	960 ÷ 1100	1160 ÷ 2570	15000÷16300	7740 ÷ 9060
Отпорност на :							
трошење		добра	добра	средња	средња	средња	средња
оксидацију (500°C)		врло добра	слаба	врло слаба	врло слаба	врло слаба	врло слаба
паљење		врло добра	средња	слаба	добра	добра	добра
УВ зраке		врло добра	врло добра	врло добра	добра	добра	добра
слатку воду		врло добра	врло добра	врло добра	врло добра	врло добра	врло добра
морску воду		врло добра	врло добра	врло добра	врло добра	добра	врло добра
јаке киселине		добра	добра	средња	средња	средња	средња
јаке базе		добра	слаба	средња	врло добра	врло добра	врло добра
слабе киселине		врло добра	врло добра	врло добра	врло добра	врло добра	врло добра
слабе базе		врло добра	врло добра	средња	врло добра	врло добра	врло добра
органски растварачи		врло добра	врло добра	средња	добра	добра	добра
Материјал	матрица	Титан	Угљеник	Полиестер	Епоксид		
	додатак	честице титан-карбида	угљенична влакна	стаклено ткање	стаклено ткање	арамидно ткање	угљенично ткање

2.3 Партикуларни - композитни материјали ојачани честицама

Партикуларни композитни материјали су материјали који имају конституенте чији је облик такав да су све три димензије (дужина, ширина и висина) приближно једнаке. Величина и запремински удео честица знатно утичу на својства ових композита. Да би се постигло неопходно ојачавање, честице треба да буду мање од 1 μm у пречнику

и равномерно распоређене у матрици. Запремински удео честица најчешће износи 30 – 40 %. Најпознатији композити из ове групе су кермети.

Кермети представљају комбинацију керамичких материјала и метала. Највише коришћени кермети састоје се од тврдих честица керамике, волфрамкарбида (WC) или титанкарбида (TiC), који су распоређени у металној матрици, као што је кобалт. Овај композит се користи за израду алата за резање каљених челика. Тврде честице карбида обезбеђују добра режућа својства и на повишеним температурама које се јављају при великим брзинама резања. Међутим, алати за резање направљени само од WC су изузетно крти. Да би се повећала жилавост, честице WC се заједно са кобалтом у праху пресују и жаре на температурама изнад температуре топљења кобалта, тако да растопљени кобалт обложи сваку честицу волфрамкарбида, [6].

Композити са честицама се деле у две подгрупе:

- дисперзно ојачани композити (мале честице) $< 0,1 \mu\text{m}$,
- стандардни партикуларни композити (велике честице) $> 1 \mu\text{m}$.

Нека својства композита са честицама се могу засновати на темељима закона о очувању масе, нпр. густина композита:

$$m_K = \sum m_i \rightarrow V_K \cdot \rho_K = \sum V_i \cdot \rho_i \quad (2.1)$$

$$\rho_K = \sum \phi_i \cdot \rho_i \quad (\phi_i = V_i/V_K) \quad (2.2)$$

где су : K - композит; i – и-та компонента.

2.3.1 Дисперзно ојачани композитни материјали

Мале честице дисперговане су у матрици, а димензије су им $10 \div 250 \text{ nm}$. Својом присутношћу мале честице ометају кретање размештања матрице, те је на тај начин ојачавају. Композити са додатком малих честица се због тога називају дисперзијски ојачани композити. За ефикасно ометање кретања размештања матрице, дисперговане мале честице морају бити тврде (оксидни метали), са учинком појачања осим тврдоће зависи и од дисперзије честица. У материјалу матрице се дисперговане честице не смеју топити нити с њом хемијски реаговати. Са друге стране мале честице морају бити чврсто повезане са материјалом матрице, [4].

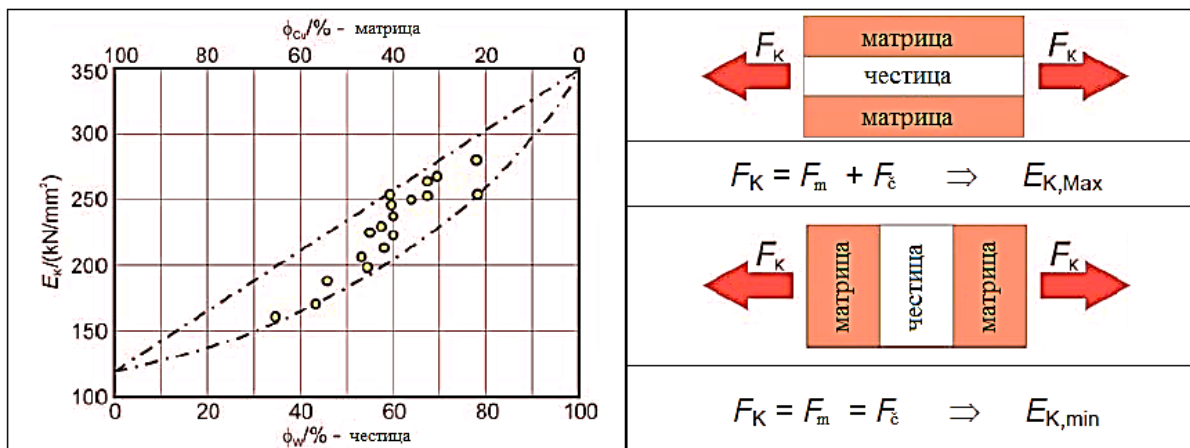
2.3.2 Стандардни партикуларни композитни материјали

Додате велике честице не могу ефикасно спречити кретање размештања матрице, те на тај начин не ојачавају матрицу. При оптерећивању композита једнако се деформишу матрица и додате честице ($\varepsilon_K = \varepsilon_m = \varepsilon_c$), али се у матрици и додатим честицама јављају различита напрезања ($\sigma_m = \sigma_c$). Модул еластичности композита се креће у границама:

$$\text{Горња граница: } E_K, \max = E_m \cdot \phi_m + E_c \cdot \phi_c \quad (2.3)$$

$$\text{Доња граница: } E = \frac{E_m \cdot E_c}{E_m \cdot \phi_c + E_c \cdot \phi_m} \quad (2.4)$$

Како би се смањила цена производа, често се композит формира уз додавање јефтинијих великих честица у матрицу. Приказ оваквог формирања композита дат је на слици 2.3.



Слика 2.3. Формирање композита са јефтинијим великим честицама

2.3.3 Примена композита ојачаних честицама

Бетон формирају керамичка матрица (релативно скупа) и додатне крупне керамичке честице (релативно јефтине). Матрица која повезује честице назива се цементом (портланд - цемент), а као додатак се користи песак или шљунак. За постизање оптималне чврстоће и обликовања, смеша мора да садржи одговарајућу размену додатка, по правилу, $60 \div 80 \%$. Густа структура и добар узајамни контакт постиже се са две врсте додатака – ситне честице песка попуњавају простор између крупнијих честица шљунка. Да би бетон био потпун и спреман за коришћење, већ поменутој смеси се додаје одређена количина воде. Везивање материјала је непотпуно ако је количина воде премала, а ако је превелика количина, онда настаје прекомерно порозан бетон. Чврстоћа бетона се повећава:

- ојачањем челичном “арматуром” – жицама ($D < 12 \text{ mm}$), шипкама ($D > 12 \text{ mm}$), мрежама и профилима. Арматура се поставља у бетон пре његовог укрућивања.
- увођењем преднапетости – постављена арматура се пре укрућивања оптерети испод границе еластичности челика. Након укрућивања бетона арматура се растерети и она при свом скупљању повлачи већ укрућени бетон успостављајући у њему трајно напонско стање, [1].

Метални матрични композити са честицама - Металној се матрици за постизање потребних својстава додају честице керамике велике затезне чврстоће и отпорне на хабање, а та се својства задржавају и на повишеним температурама. Најчешће се као матрице користе алуминијум (Al) легуре за ливење са додатком $10 \div 30 \%$

силицијум карбида (SiC) или честица алуминијум оксида (Al_2O_3) величине $10 \div 20 \mu\text{m}$. Овако формиран композити су јефтинији, могу да се лију и заварују, а имају и релативно добре особине обрадивости пластичном деформацијом и резањем. Користе се за израду делова кочница, мотора и мењача код мотоцикала и аутомобила.

Абразиви - Брусне и резне плоче производе се из додатих, мање или више ситних, врло тврдих и кртих резних честица Al_2O_3 , SiC и кубичног бор нитрита (BN), повезаних стакленом или полимерном матрицом у круту плочу. Дијамантне честице се повезују металном матрицом. Код брусних и резних плоча честице и матрица морају бити добро узајамно повезане (како се честице оптерећене силама резања не би откидале од матрице), а њихови делови такви да истрошене честице могу заменити нове честице из дубљих слојева плоча.

Тврди метали - Тврде метале формирају честице тврде керамике, на пример волфрам-карбид (WC), распршен у металној матрици, на пример кобалта (Co). Сам WC је врло тврд, али крт, те се од њега не могу израђивати плочице за обраду метала резањем. При производњи волфрам-карбидних/кобалтних плочица за резање метала:

- мешају се прахови WC и Co,
- формирана смеша се пресује у компактне плочице и
- плочице се загревају изнад топљења Co.

По хлађењу се добија коначни производ – тврда и жилава плочица.

Електрични контакти – Недовољно квалитетни електрични контактни делови (склопке, релеји) остварују слабе електричне контакте, греју се и троше. Потребно је формирати композит. Композит погодних својстава се формира с металном матрицом од сребра (Ag) која повезује метални додатак – честице волфрама (W). У производњи електричних контактних делова, прво се под притиском, при високој температури, израђују плочице од праха W. Формиране се плочице потапају у раствор Ag која попуњава расположиве поре.

Полимерни композити са честицама - Додатком се могу побољшати различита својства полимерних матрица, најчешће смањити цену, додатком јефтинијих честица калцијум карбоната (CaCO_3), песка (SiO_2), глине или стаклених куглица, [4].

2.4 Композитни материјали ојачани влакнима

Влакнасто ојачани композитни материјали добијени су сједињавањем чврстих, крутих и кртих влакана (прекидна и дисперзна фаза) са меком и пластичном матрицом (непрекидна фаза). Матрица служи да преноси силу са влакна на влакно, да обезбеђује пластичност, жилавост и способност обликовања, док влакна преносе оптерећење. Ојачавајућа влакна у композиту могу бити различито распоређена и оријентисана, [7].

Већина композита са влакнима омогућавају повећану:

- чврстоћу,
- отпорност на старење,
- крутост и
- побољшан однос између чврстоће и тежине израде.

Композити са влакнима могу имати велику чврстоћу на собној али и на повишеној температури. Разни материјали су се побољшавали додавањем других материјала нпр. стаклена влакна у полимерним матрицама (фиберглас) се користе за производњу композитних делова. Овај споменути композит се нарочито користи за израду делова у транспортној и авионској индустрији. Влакна направљена из: бора, угљеника, полимера и керамике могу изванредно појачати композитне материјале. Они се базирају на различитим базним материјалима, који могу бити из полимера, метала, керамике или чак интерметалног споја, [8].

Чврстоћа композита ојачаних влакнима зависи од чврстоће влакана и њихове оријентације, запреминског удела влакана у композиту, као и од односа дужине и пречника влакна.

2.4.1 Матрице и влакна

Као материјал **матрице** користе се метални и полимерни материјали, јер поседују потребну пластичност. Метали који се најчешће користе као матрица су: алуминијум, алуминијум - литијум, магнезијум, бакар и титан (Al, Al-Li, Mg, Ti, Cu). Неметалне матрице обично су полимери: епоксиди, полиестри, полиетар сулфони, полиамиди и силикони, као и керамике (SiC и Al₂O₃). Највише, чак и до 80 %, од свих полимера се користе епоксидне смоле, затим полиестер који је знатно јефтинији од епоксидних смола. Матрица код влакнасто ојачаних композитних материјала има неколико функција које би требало да испуни:

- обједињује влакна и на њих преноси оптерећење, такође осигурава облик и крутост конструкције,
- изолује поједина влакна која се не могу самостално оптеретити, тако успорава ширење пукотина,
- осигурава добар квалитет површине, тиме се подстиче производња делова у коначном облику или блиско коначном облику,
- осигурава заштиту ојачавајућих влакана од хемијских утицаја и механичког оштећења,
- својом дуктилношћу полимера матрице повећава жилавост композита,
- својим својствима и компатибилношћу са влакнима у великој мери утиче на оштећења, итд.

Најширу примену имају композитни материјали са полимерном матрицом и влакнима, тако да је у табели 2.2. дато поређење карактеристика ових композита са карактеристикама типичних представника других врста материјала, [4, 7].

Табела 2.2. Поређење карактеристика композита и обичних материјала.

Материјал	$\rho/\text{kg}\cdot\text{dm}^{-3}$	$E/\text{kN}\cdot\text{mm}^{-2}$	$R_m/\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	$(E/\rho)/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	$(R_m/\rho)/\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	$t_{\text{Max}}/^\circ\text{C}$
Метали						
ливено Fe	7,0	100	0,14	14,3	0,02	230+300
угљенични челик	7,8	205	0,57	26,3	0,073	500+650
легирани Al	2,7	73	0,45	27,0	0,17	150+250
Полимери						
полиамид 6	1,15	2,9	0,082	2,52	0,071	75+100
полипропилен	0,9	1,4	0,033	1,55	0,037	50+80
епоксид	1,25	3,5	0,069	2,8	0,055	80+215
Керамике						
Al_2O_3	3,8	350	0,17	92,1	0,045	1425+1540
MgO	3,6	205	0,06	56,9	0,017	900+1000
К, кратка влакна						
епоксид / 35 % стакло	1,90	25	0,30	8,26	0,16	80+200
полиестер / 35 % стакло	2,00	15,7	0,13	7,25	0,065	80+125
полиамид / 35 % стакло	1,62	14,5	0,20	8,95	0,12	75+110
К, усмерена влакна						
епоксид / 45 % стакло	1,81	39,5	0,87	21,8	0,48	80+215
епоксид / 61 % угљеник	1,59	142	1,73	89,3	1,08	80+215
епоксид / 53 % араид	1,36	63,6	1,1	47,1	0,81	80+215

Влакна се могу дефинисати као производ код којих је дужина битно већа од пречника под условом да је пречник мањи од 1 mm. Како би се постигла што боља механичка својства полимерних материјала ојачаних влакнима, кључан је однос густине и ободне површине влакна. Са обзиром да се повећањем преноса оптерећења са матрице на влакна повећава чврстоћа композита, помоћу врло малих пречника влакана постижу се високе чврстоће композитних материјала. Данас су уобичајени пречници влакана од 3 до 30 μm . Влакна по правилу треба да имају високу тачку топљења. Највећи специфични модул еластичности имају материјали ниског атомског броја те они који имају ковалентне везе као што су графит (угљеник) и бор. Ова два елемента такође имају високу чврстоћу и високу тачку топљења. Примењују се у композитним материјалима јер су сувише крти и реактивни да би се користили засебно.

Влакна код влакнасто ојачаних композитних материјала имају неколико функција које би требало да испуне:

- прихватање оптерећења – код конструкцијских композита влакна носе 70 ÷ 90 % оптерећења,
- осигуравају чврстоћу, крутост и топлотну стабилност,
- осигурање електричне проводљивости или изолације, зависно од намене композита, итд.

У табели 2.3. дате су карактеристике најчешће коришћених влакана, [4, 7].

Табела 2.3. Карактеристике најчешће коришћених влакана.

Материјал	$\rho/\text{kg}\cdot\text{dm}^{-3}$	$E/\text{kN}\cdot\text{mm}^{-2}$	$R_m/\text{kN}\cdot\text{mm}^{-2}$	$(E/\rho)/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	$(R_m/\rho)/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
Вискери					
графит, С	2,2	700	20,7	318	9,41
силицијум - нитрид, Si_3N_4	3,2	350÷380	5÷7	109÷118	1,56÷2,2
алуминијум - оксид, Al_2O_3	4,0	700÷1500	10÷20	175÷375	2,5÷5,0
силицијум - карбид, SiC	3,2	480	20	150	6,25
Влакна					
алуминијум - оксид	3,95	379	1,38	96	0,35
арамид (Кевлар 49)	1,44	131	3,6÷4,1	91	2,5÷2,85
угљеник	1,78÷2,15	228÷724	1,5÷4,8	106÷407	0,70÷2,70
Е - стакло	2,58	72,5	3,45	28	1,34
бор	2,57	400	3,6	156	1,40
силицијум - карбид	3,0	400	3,9	133	1,30
РЕ-UHMW (Спектра 900)	0,97	117	2,6	121	2,68
Метална жица					
високо - чврсти челик	7,9	210	2,39	26,6	0,30
молибден	10,2	324	2,2	31,8	0,22
волфрам	19,3	407	2,89	21,1	0,15

Влакна се могу обликовати у три основна облика:

- вискери,
- нити и
- жице.

Вискери су монокристална влакна са мало неправилности у грађи кристалне решетке. Производе се пречника од 0,1 до 5 μm и дужине приближно 5 mm. Могуће је пронаћи вискере врло различитих облика и димензија. Када се говори о искоришћењу изузетних механичких својстава вискера, као једну од основних препрека треба истаћи чињеницу да је цена због скупих поступака производње врло висока. Стога се развој материјала ојачаних вискерима усмерава за сада само на примену у екстремним условима (нпр. у свемирској и војној технологији).

Металне нити обично називамо жицом. У погледу њихове производње ваља напоменути да се уобичајним вучењем тешко могу добити жице пречника 150 μm и мање, тј. жице су већег пречника од нити. Због неусмерених металних веза жице имају нешто нижу затезну чврстоћу (max. 2900 МПа) од нити (max. 4800 МПа) и вискера (max. 25000 МПа), али се она може знатно повисити повећањем густине неправилности кристалне решетке. Може се закључити да су због наведених карактеристика жице од чистих метала мање погодне за композите осим неких изузетака. Ограничења наведена у вези с вискерима и жицама могу се већим делом заобићи ако се високо модулни и високо чврсти неметални неоргански материјали производе и примјењују као нити или кратка влакна. Нити се дефинишу као бесконачно дуга влакна. Када се у ужем смислу говори о полимерима ојачаним влакнима, често се спомињу само нити и кратка влакна. Код влакана бесконачне дужине влакнасти се материјали испоручују не само

појединачно у облику нити већ и у облику вишенитних потпуно синтетичких влакана или вишенитних влакана с облогом или у облику вишенитних струкова.

Нека од најраспрострањенијих врста влакана су:

- текстилна стаклена влакна (кратко стаклена влакна од Е -, А -, S - стакла),
- угљенична (карбонска) влакна (угљеник НМ, НСТ),
- арамидна влакна (арамид НМ, М),
- борна влакна (бор), итд.

Стаклена влакна се израђују извлачењем растопљеног стакла кроз мале отворе у алатима од платине, и то од две врсте стакла Е - стакло и S - стакло. Е – стакло има релативно добру затезну чврстоћу и модул еластичности, највише се користе за израду дугих - непрекидних влакана. S - стакло има већу вредност специфичне чврстоће и крутости од Е -стакла, али је знатно скупље.

Угљенична влакна израђују се процесом хемијског разлагања на повишеним температурама дугих влакана полиакрилнитрида (PAN). Угљенична влакна садрже око 93 – 95 % угљеника, док графитна влакна садрже 99 % угљеника. Угљенична влакна имају малу густину и високе вредности специфичне чврстоће и крутости. У односу на стаклена влакна знатно су скупља.

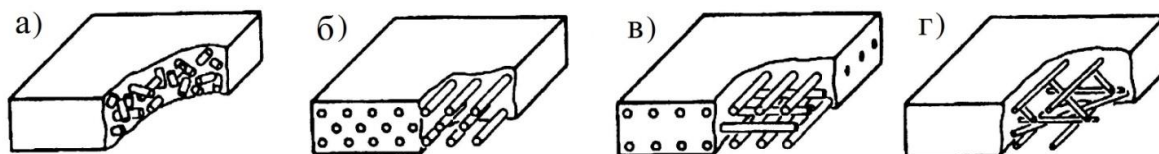
Арамидна влакна (KEVLAR) су ароматични полиамидни полимери ојачани бензоловим прстеном. Због своје мале густине ова влакна имају највећу специфичну чврстоћу и крутост у односу на друга влакна. Под оптерећењем она се пре кидања прво пластично деформишу. Отпорна су на замор. Својства арамидних влакана са порастом температуре преко 100 °C јако се смањују.

Борна влакна се састоје од бора који се наноси (поступком напаравања) на влакна волфрама, пречника 0,01 mm. Обзиром да је основа ових влакана волфрам, она имају велику густину, али високе вредности затезне и притисне чврстоће, модула еластичности и отпорна су на високе температуре.

Жице као влакна релативно великог пречника, такође се користе за ојачавање композита. Жица као ојачавајући материјал се користи код радијалних аутомобилских гума. Материјали који се користе за жице су: челик високе чврстоће, молибден и волфрам.

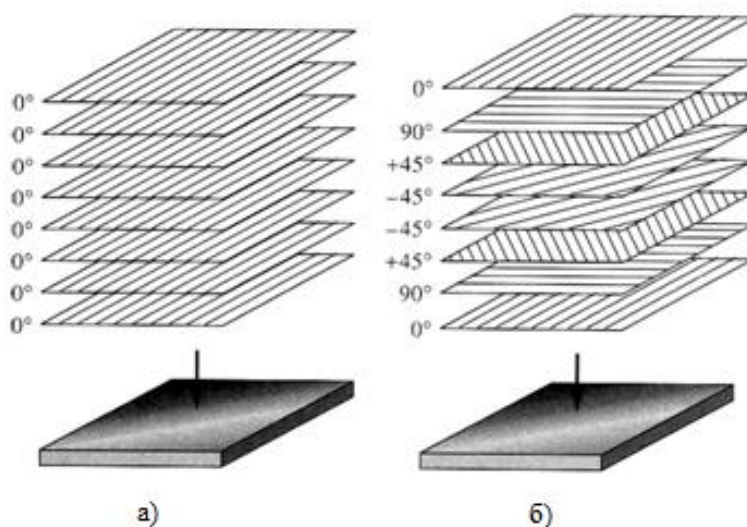
Композити са произвољном оријентацијом влакана понашају се изотропно, али је ефекат ојачавања мали. Композити са влакнима у једном правцу имају оптималне вредности чврстоће и крутости ако оптерећење делује у правцу влакана, али су наведена својства лоша ако је оптерећење управно на правац влакана.

На слици 2.4. приказани су различити начини расподеле влакана у матрици, [7].



Слика 2.4. а) кратка влакна, произвољно оријентисана б) дуга влакна, у једном правцу в) дуга влакна, у два међусобно оријентисана правца г) дуга испреплетена влакна, произвољно оријентисана

Кратка влакна која су произвољно оријентисана (слика 2.4.а) са великим коефицијентом “дужина/пречник” знатно лакше се уграђују у матрицу и на тај начин чине да материјал има велику чврстоћу и крутост. Дуга влакна која су распоређена у једном правцу (слика 2.4.б) теже се производе и уграђују у матрицу, али осигуравају најбоља својства. Дуга непрекидна влакна могу се поставити у неколико смерова унутар матрице. На пример правоугли положај влакна ($0^\circ/90^\circ$) даје добру чврстоћу у ова два међусобно вертикална положаја. Комплекснији размештај влакана ($0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ$) омогућава јачање композита у различитим смеровима. На слици 2.5. приказани су неки од начина постављања влакана.

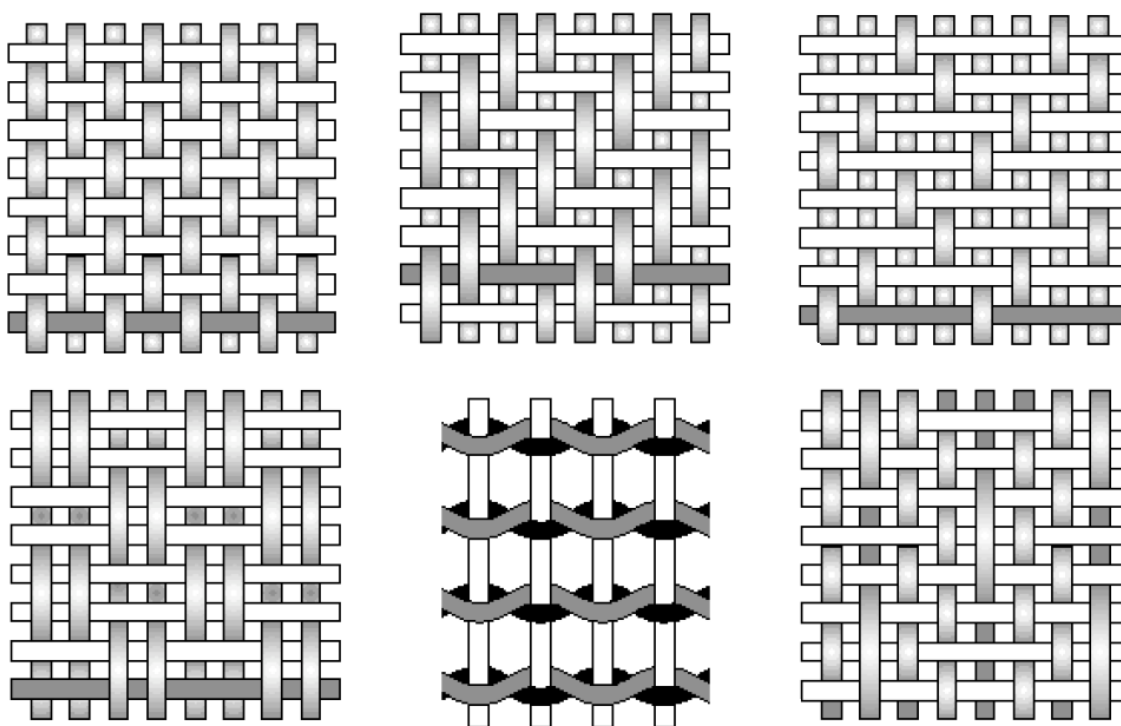


Слика 2.5. а) једносмеран распоред б) $0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ$ распоред

Влакна се могу распоредити и у тродимензионалном облику, па се чак могу везивати и у чворове. Влакна су снажна, крута и имају малу тежину.

Да би се постигла добра својства у више праваца, користе се слојеви са различитом оријентацијом (ткањем) влакана.

На слици 2.6. приказане су различите врсте ткања.



Слика 2.6. Врсте ткања влакнасто ојачаних композита

Важне карактеристике влакна су:

$$\text{Специфична чврстоћа} = \frac{R_e}{\rho} \quad (2.5)$$

$$\text{Специфични модул} = \frac{E}{\rho} \quad (2.6)$$

R_e – граница развлачења, ρ – густина, E – модул еластичности.

Са повећањем запреминског удела влакана у композиту расту његова чврстоћа и крутост. Горња граница запреминског удела влакана је око 80 %, [8].

2.5 Структурни композитни материјали

Структурни композити, по правилу, формиран су од хомогених материјала и композита, а својства им не зависе само од својстава и количина компонената него и од геометријских облика обухваћених делова. Структурни композитни материјали се деле на:

- слојевите,
- сендвич конструкције и
- станичне.

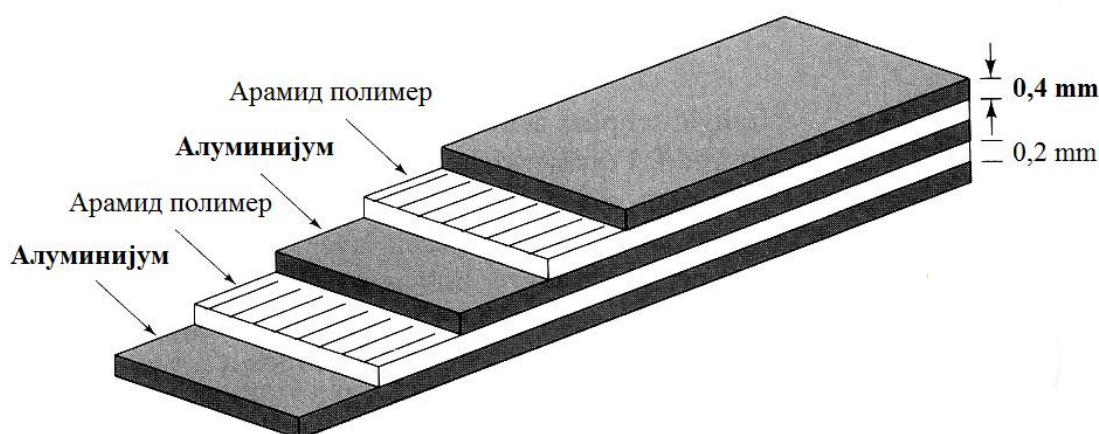
2.5.1 Слојевити композити

Слојевити композити (ламинати) састављени су од дводимензионалних слојева са преферираним смером високе чврстоће (дрво, или усмереним влакнима ојачаних полимерних материјала). Слојеви су сложени и додатно међусобно чврсто повезани, а својства варирају у односу на оријентацију влакана у појединим слојевима (због тога се слојеви слажу различито усмерени). У слојевите композите спадају различити танки слојеви, дебље заштитне површине, облоге, биметали, ламинати, итд. Многи слојевити композити су конструисани ради:

- повећања отпорности на корозију,
- велике чврстоће,
- мале тежине и
- ниске цене производа.

Такође су важне карактеристике ових материјала, отпорност на хабање и абразију, побољшан изглед производа и необична својства топлотне флексибилности.

На слици 2.7. приказан је један слојевити композит.



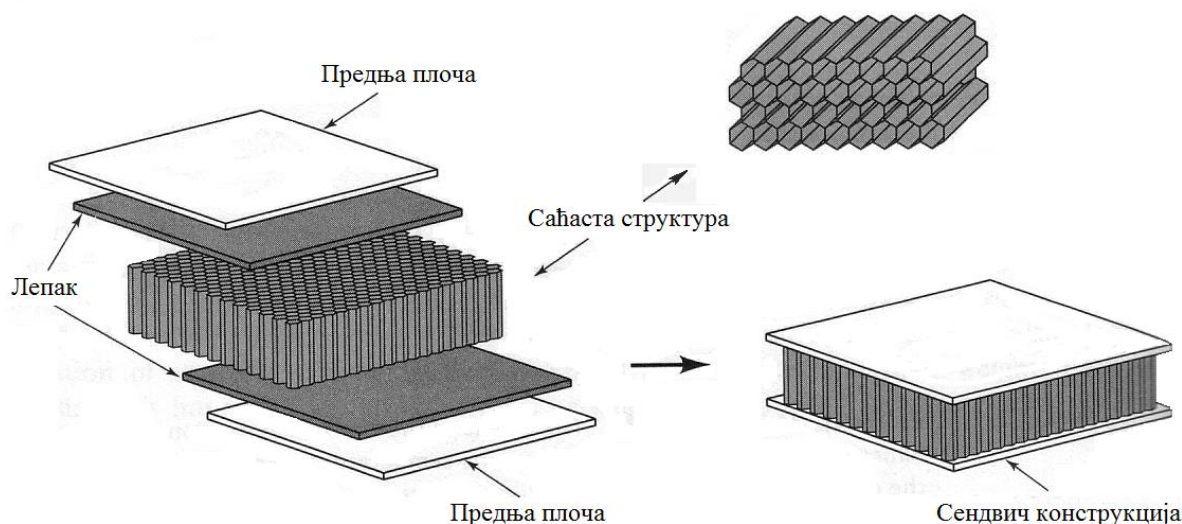
Слика 2.7. Слојевити композит

2.5.2 Сендвич композити

Сендвич конструкције се састоје од танких спољних слојева и лаганог средњег дела који служи за попуњавање. Нити материјал за попуњавање нити спољни слојеви не морају бити чврсти нити крути, али ће сендвич конструкција имати оба својства. Ове конструкције садрже сложене тродимензионалне додатке – језгра (влакна су једнодимензионална, слојеви дводимензионални), намењене пре свега да повећавају чврстоћу и крутост при савојним и смичућим попречним оптерећењима, такође локалним оптерећењима притиска. Језгра су са обе стране везана за облогу. Саћаста структура се производи лепљењем алуминијумских, набораних трака на одређеним местима. Саћасти материјал се спаја у панеле, има врло малу густину и савитљив је. У

случају када се са сваке чеоне стране залепи алуминијумска плоча добије се сендвич структура која има врло велику чврстоћу и крутост, а врло малу масу. Постиге се густина ове сендвич структуре од $0,04 \text{ g/cm}^3$, [4, 7, 8].

На слици 2.8. приказан је један сендвич композит.



Слика 2.8. Структура сендвич композита

2.5.3 Станични композити

Станичну (ћелијску) структуру формирају сједињене ћелије са танким крутим матрицама испуњене додатком. Ћелије могу бити отворене и затворене.

Керамичке пене

Порозност код керамичких пена је $75 \div 90 \%$, те су ниске густине ρ , велике специфичне површине и специфичне чврстоће, такође велике хемијске и топлотне отпорности.

Металне пене

Порозност код металних пена је $40 \div 90 \%$. Највише се користе алуминијумске пене ниских вредности густине ρ и високе крутости. Добро пригушују вибрације и звукове.

Полимерне пене

Полимерне пене са отвореним ћелијама су флексибилне, а пене са затвореним ћелијама круте. Карактеристичне су им ниске вредности густине ρ , [1].

2.6 Поступци израде композитних материјала

У пракси постоји више поступака за израду елемената од композитних материјала, од којих се најчешће примењују, [9]:

- ручно постављање,
- механизовано бризгање влакана,
- пресовање ниским притиском,
- пресовање високим притиском,
- поступак превлачења,
- поступак центрифугирања,
- поступак намотавања, итд.

3.0 Примена композитних материјала за израду машинских елемената

Савремене машинске конструкције захтевају често материјале специјалних облика и особина који могу да одговоре тежим радним условима као што су: повећана снага, притисак, температура, брзина, удари, вибрације, итд. Применом ових материјала, тачно одређеним спектрима оптерећења конструкције, рационалним пројектовањем, обликовањем и увођењем нових технологија израде, долази се до оптималних решења која могу да задовоље предходно постављене захтеве.

Све је већа потражња за материјалима који имају повољне механичке особине (велика отпорност и модул еластичности), малу тежину и цену која треба да буде што је могуће нижа. Композит је мешавина два или више материјала, који за циљ има да се добије нови материјал са већим бројем повољних особина. Предност композита је та што се код њих најчешће користе најбоље особине саставних материјала и често постижу особине које саставни материјали појединачно уопште не поседују. Неке од тих особина су: отпорност на корозију, крутост, отпорност на хабање, смањење тежине, век трајања, термичка и акустична изолованост, повећање модула еластичности, итд. Употребљавају се највише у ваздухопловној и космичкој индустрији, аутомобилској индустрији и код конструкција које треба да имају такве механичке особине које не би могле да се постигну конвенционалним материјалима, [10].

Помоћу елемената за преношење снаге, као посредника између погонске и радне машине, могу се променити параметри снаге, и то величине обртних момената и угаоних брзина или силе и брзине. У пракси се најчешће примењује редуктор, као преносник снаге који смањује број обртаја погонске машине.

Услед све веће потребе коју намеће савремени развој технике и смањивања извора природних материјала, метални материјали који се користе за израду машинских елемената замењују се, где је могуће, новим, вештачки створеним материјалима. Предност примене композита у односу на конвенционалне материјале, огледа се у могућности широког варирања готово свих особина материјала од којих су састављени што се постиже путем избора саставних компонената, њихове количине, распореда и оријентације у оквиру материјала, а са циљем да се искористе њихова најбоља својства. Због релативно малог коефицијента трења машински елементи израђени од композитних материјала налазе све ширу примену у машинској индустрији. Познато је да се при спрезању металних зупчаника, услед трења, јавља хабање зубаца и загревање редуктора. Због тога је неопходно подмазивање течним мазивима, које не само што смањују губитке енергије, већ и штите од корозије и смањују шум, вибрације и ударна оптерећења при раду преносника, [11].

3.1 Особине зупчаника израђених од композитних материјала

Приликом конструисања и обликовања композитних зупчаника постављају се следећа питања: Која је функција зупчаника и где њихова примена има највише смисла? Колико је очекивано време рада зупчаника? Колико је оптерећење које зупчаник треба да пренесе? Како утичу експлатациони услови и спољашња околина на рад и напонско стање зупчаника? Каква је уштеда када се користе композитни зупчаници уместо металних?

У овом раду биће покушано да се одговори на ова питања.

Флексибилност и конструисање

Композитни материјали имају ту предност, у односу на металне, да елиминишу секундарну производњу и омогућавају велику флексибилност у конструисању, при чему се смањује време производње. Композитни зупчаници се могу конструисати као једноделна или дводелна конструкција (са уметнутом главчином од метала), са унутрашњим озубљењем, ексцентрични, са ребрима и изједна са вратилом, при чему се у поређењу са металним зупчаницима, који захтевају машинску обраду и додатну монтажу, смањује број делова, монтаже и трошкова израде. На слици 3.1. су приказани зупчаници израђени од полиамида са уметнутом главчином од метала, који имају предност да се лакше могу монтирати на вратило, термичко оптерећење је смањено за 50 % и имају могућност преношења великог обртног момента.

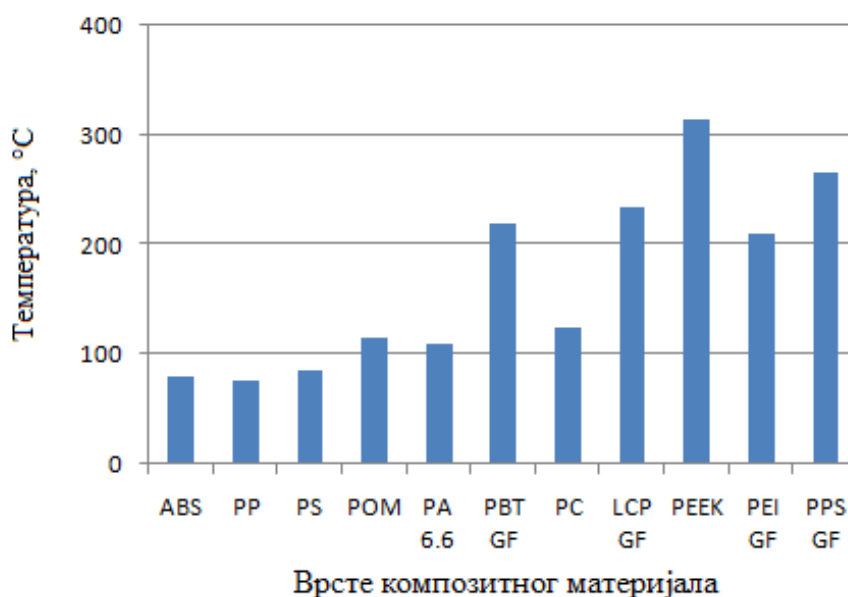


Слика 3.1. Композитни зупчаници са металном главчином

Ови зупчаници се израђују брзгањем у калупе, чиме се добијају готови, вишефункционални и делови сложеног облика. Ово је прецизна, економична и ефикасна технологија израде композитних зупчаника, код којих није потребна завршна обрада.

Компјутеризоване методе коначних елемената што је MFA (Mold-Filling-Analysis), смањује време и цену алата за ливење. Зупчаници израђени од термопластичних и термостабилних полимера имају много предности у односу на металне код преносника мање снаге, који се не подмазују. Зупчаници израђени од фенола и других термостабилних полимера могу се користити у раду са високим температурама и више су отпорни на средства за подмазивање који се у овом случају захтевају. Међутим, термопластични зупчаници, израђени брызгањем у калупе, имају бољу отпорност на замор материјала и у односу на термостабилне зупчанике, могу знатно смањити трошкове производње у поређењу са металним зупчаницима. Данас термостабилни зупчаници налазе примену код преносника велике снаге где се захтева подмазивање и висок стандард квалитета.

Брзина рада композитних зупчаника утиче на пораст радне температуре. Однос брзина-оптерећење може такође утицати на карактеристике материјала. Код неких материјала ако је оптерећење велико и зупчаници раде великом брзином, модул еластичности и затезна чврстоћа се не мењају. Висока температура смањује модул еластичности и затезну чврстоћу, а утиче на повећање смицања. Ови утицају морају да се узму у обзир при конструисању зупчаника. На слици 3.2. дат је приказ температуре издржљивости за поједине врсте композитних зупчаника, које је добила корпорација Ticona, испитивањем материјала.



ABS - Акрилонитрил-бутадиенстирол, PP - Полипропилен, PS - Полистирол, POM - Полиоксиметилен, PA 6.6- Полиамид, PBT GF - Полибутилен-терефталат ојачан стакленим влакнима, PC - Поликарбонат, LCP GF - Течни кристални полимер ојачан стакленим влакнима, PEEK - Полиетеретеркитон, PEI GF - Полиетиленимид ојачан стакленим влакнима, PPS GF - Полифениленсулфид ојачан стакленим влакнима

Слика 3.2. Температура издржљивости појединих врста композитних материјала

Смањење масе

Композитни зупчаници су такође и знатно лакши од металних. Специфична густина челика је 7,85, док специфична густина полиамида РА 6.6 ојачаног стакленим влакнима и ацетал ацеталкополимера је близу 1,4 (табела 3.1.). Да би се пренела иста снага, композитни зупчаници имају веће димензије од металних, али се може реализовати значајно смањење тежине. У табели 3.1. дате су карактеристике полиамида ојачаног стакленим и карбонским влакнима.

Табела 3.1. Механичке карактеристике композитних материјала

Материјал	Густина материјала, g/m ³	Затезна чврстоћа, МПа	Модул еластичности, МПа
РА 4.6, термички стабилан, 30 % ојачан стакленим влакнима	1,41	210	10500
РА 4.6, термички стабилан, 50 % ојачан стакленим влакнима	1,62	230	16800
РА 4.6, термички стабилан, 60 % ојачан стакленим влакнима	1,76	240	20000
РА 4.6, термички стабилан, 30 % ојачан карбонским влакнима	1,3	230	20000
РА 6, термички стабилан, 40 % ојачан карбонским влакнима	1,33	230	20700
РА 6.6, термички стабилан, 40 % ојачан карбонским влакнима	1,33	275	28275
Алуминијум	2,65	225	70000
Челик	7,85	450	206000

Рад без буке

Композитни зупчаници нуде могућност смањивања буке смањивањем динамичког оптерећења. Услед не слагања и малих грешака код зубца јављају се мали удари што резултира појавом шума. Међутим, мали модул зубаца композитних зупчаника и

њихов мекани материјал, што апсорбује ударе, су разлози зашто пластични зупчаници имају рад без буке у односу на најскупље металне зупчанике.

Подмазивање зупчаника

У прошлости, композитни зупчаници су били ваздухом хлађени, било да нису били подмазивани или су били подмазивани машћу. Како је развој технологије и производње захтевао примену композитних зупчаника код већих преносника снаге и већу прецизност, конструктори су се суочили са избором подмазивања уљем, машћу или не подмазивања зупчастих преносника. Одлучити да ли подмазивати или не и којим средствима вршити подмазивање. Мали коефицијент трења код композитних материјала утиче да је хабање код ових зупчаника минимално. Мање трење значи да се мање снаге утроши на загревање. Maytag је прорачунао да је применом разхладног уређаја који поседује композитне зупчанике смањена топлота за 10 – 15 % у поређењу са истим уређајем који има металне зупчанике. Самоподмазујући композитни зупчаници се користе тамо где подмазивање треба да се избегне, код штампача или моторизованих играчака, где се цурење масти или уља не толерише.

Код композитних зупчаника који врше пренос снаге потопљени у уље, топлота услед трења се отклања и преноси се веће оптерећење. Зупчаници који се не подмазују или се подмазују машћу хладе се ваздухом и код њих се јавља повишена температура и преносе мање оптерећење. Зупчаници који се не подмазују, а који развијају високе температуре и преносе мања оптерећења, често су изложени хабању и прегревању на боковима зубаца. Средства за подмазивање се морају пажљиво бирати, јер могу проузроковати велике промене механичких карактеристика и димензија зупчаника.

Исплативост пластике

Бризгање у калупе је брзо и економично у поређењу са поступком глодања зубаца металног зупчаника. Цена може бити смањена за половину па све до једне десетине у односу на пресоване, машински израђене или зупчанике израђене од синтер метала, зависно од начина израде, [10].

Носивост композитних зупчаника

Развијањем технологије и индустрије захтевају се боље механичке карактеристике машинских елемената и конструкција, тако да зупчаници израђени од композитних материјала добијају све већи значај. Разлог за њихову све ширу примену огледа се у томе што поседују низ добрих карактеристика у односу на металне зупчанике. Међутим, у односу на металне зупчанике, они имају мању крутост, мању затезну чврстоћу, велику осетљивост на повећане температуре и влаге. Механичке карактеристике се знатно могу побољшати применом одговарајућих влакна. Тако, на пример полимери ојачани стакленим влакнима задржавају добре механичке особине и веће су за 50 % у односу на оне полиамиде који нису ојачани. Полимери ојачани карбонским влакнима најмање апсорбију влагу, чиме се постиже добра стабилност димензија, могу преносити велика оптерећења и раде скоро бешумно.

Полиоксиметилен – РОМ зупчаници имају ограничену примену на високим температурама (тачка топљења је 160 °C), али зато добро функционишу на собној температури. Захтеви, као што су рад на високим температурама, се повећавају. Испитивањем пластичних зупчаника оптерећених различитим вредностима оптерећења на температурама од 20 °C до 200 °C пронађен је материјал полиетеретеркитон РЕЕК, који може пренети велики обртни момент на високим температурама. Због свих ових утицајних фактора, који се јављају у току експлатације прорачун носивости композитних зупчаника се разликује у односу на прорачун код металних зупчаника. Прорачун носивости се врши тако што се зубац посматра као уклештена греда која је оптерећена на савијање и претпоставља се да је само један пар зубаца у контакту.

Сама израда и конструисање композитних зупчаника је релативно нова област изучавања, конструктори имају ограничени број података о механичким, хемијским и триболошким особинама у току рада зупчаника. Зато се за правилан избор састава композитног материјала (матрице и влакна за ојачавање) најчешће врше испитивања. У последње време све више научника поклања пажњу овој области, па је тако група са Машинског факултета Kanza University из Јапана, проучавала и испитивала понашање зупчаника израђених од полиоксиметилена и полиетеретеркитона. У табели 3.2. дате су механичке карактеристике зупчаника од РЕЕК ојачаних карбонским влакнима. За испитивање су коришћени зупчаници од различитих врста композита (РЕЕК/CF). Приликом овог испитивања погонски зупчаник је био израђен од материјала РЕЕК/CF, а гоњени од челика и није вршено подмазивање. До лома зупчаника долазило је услед замора материјала. Разлог због кога је најмањи напон у подножју зубаца зупчаника израђеног од РЕЕК/CF(3) је у малој способности сједињавања атома матрице и карбонских влакана, [11].

Табела 3.2. Механичке карактеристике зупчаника од РЕЕК/CF

Зупчаник	Затезна чврстоћа, МПа	Издужење %	Чврстоћа подножја зубаца, МПа
РЕЕК/CF(1)	200	5,4	265
РЕЕК/CF(2)	225	5,4	305
РЕЕК/CF(3)	150	4,0	195
РЕЕК/CF(4)	205	6,5	270
РЕЕК/CF(5)	160	4,5	200

Особине композитних зупчаника израђених од полиетеретеркитона – РЕЕК™

Повећање захтева код савремених машинских конструкција, као што су преношење великих оптерећења под утицајем високих температура указује на потребу за новим материјалима који ће имати већу отпорност на високу температуру и хабање, него до сада применљиви полиамиди и полиацетали. Полимери који су отпорни на високе температуре отварају нове могућности за замену металних зупчаника и доприносе смањењу тежине, цене и буке.

Полиетеретеркитон (РЕЕКTM) је изузетно јак термопластични материјал који задржава механичка својства на веома високим температурама. РЕЕКTM, као семи кристални материјал, има добро уређену молекуларну структуру са јасно дефинисаном тачком топљења. Овај материјал не омекшава постепено са повећањем температуре, него се претвара у течну стању када се достигне тачка топљења.

Композитни зупчаници израђени од РЕЕКTM полимера имају следеће карактеристике:

- **Термичке** - РЕЕКTM полимер се користи на температури од 260 °C, што је највиша температура примена за термопластике. РЕЕКTM полимер има изузетну термичку отпорност, задржавајући механичка својства на 315 °C. Ојачани скелетним или карбонским влакнима побољшавају механичке карактеристике и налазе примену на још вишим температурама.
- **Механичке** – Овај полимер са и без ојачавајућих влакана нуди одличне механичке особине под дејством високих температура и других услова рада. Има добру димензионалну стабилност, изузетну чврстоћу, високу ударну и затезну јачину. Отпоран је на хабање и има мали коефицијент трења и абразије. РЕЕКTM полимер ојачан карбонским влакнима има већу вредност модула еластичности и затезне чврстоће и повећану отпорност на хабање и абразију. У табели 3.3. дате су неке механичке карактеристике неојачаних полимера РЕЕКTM, РА 6.6 (полиамид) и РОМ (полиацетала), који се користе за израду зупчаника.
- **Хемијска отпорност** – Семи кристална структура овог материјала омогућава добру отпорност на дејство органских и неорганских хемијских једињења на повишеним температурама. Није растопљив у великом броју растварача.
- **Хидролитичка отпорност** – Може дуже времена радити на температури од 250 °C у присуству паре или великог воденог притиска и да при томе задржава добре механичке карактеристике.
- **Електричне** – Задржава електрична изолациона својства на великом интервалу температура и фреквенција.
- **Отпорност на запаљивост** – Састав материјала је такав да је при појави пламена развој дима мали, као и зрачење токсичних гасова. Иначе је слабо запаљив, [12].

Табела 3.3. Механичке карактеристике полимера који се користе за израду зупчаника

Материјал	Густина материјала, g/m ³	Затезна чврстоћа, МПа	Модул савијања, МПа	Радна температура, °C	Температура топљења, °C
РЕЕК TM	1,32	103	4137	250	340
РА 6.6	1,14	55	2896	80	264
РОМ	1,42	40	2344	90	163

Примена зупчаника израђених од композитних материјала

Када су инжењери у Maytag-у у њиховим веш машинама употребили композитне зупчанике, елиминисали су буку коју су правили метални зупчаници, смањили су трошкове и број делова у поређењу са редукторима који су имали металне зупчанике. Неојачани зупчаници и зупчаници са стакленим влакнима (Celcon acetal kopolimer) задржавају чврстоћу и димензије чак и кад су потопљени у уље, имају мали коефицијент трења, одличну отпорност на хабање, отпорност на дејство хемијских агенаса и малу апсорпцију влаге. Такође, имају дуг радни век, који је значајан због времена сервисирања. На слици 3.3. приказани су убризгавањем добијени зупчаници који својим дизајном комбинују две или више функција.



Слика 3.3. Композитни зупчаници који се уграђују у Maytag веш машине

Hewlett-Packard и UFE примењују композитне зупчанике код штампача. На слици 3.4. приказани су ацетал кополимерни зупчаници који испуњавају високе квалитете дефинисане AGMA стандардом. Тачност је неопходна због кретања папира, да би се спречило заглављивање папира или лоше штампање.



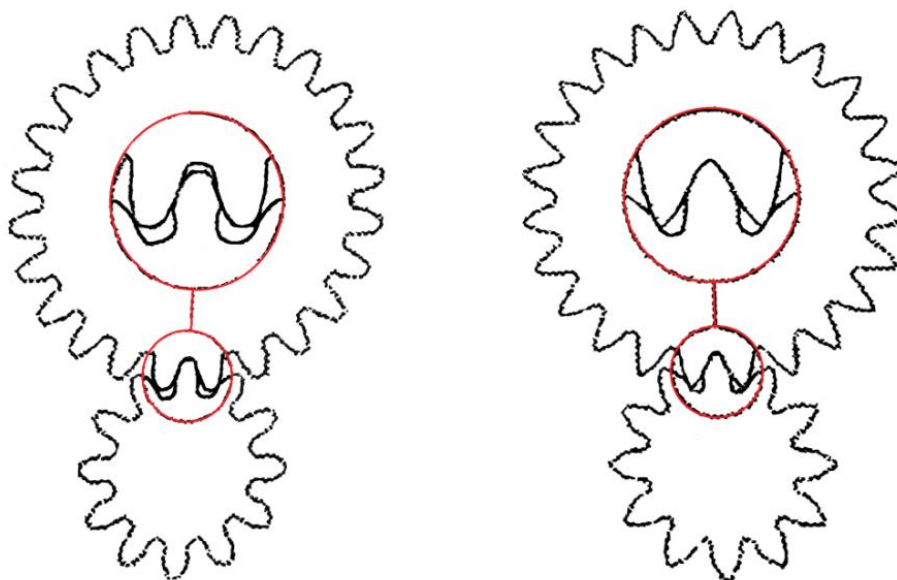
Слика 3.4. Примена композитних зупчаника код Hewlett-Packard штампача

За побољшање поузданости World Washer машина, Whirlpool Corporation је применио зупчасту спојницу, која је приказана на слици 3.5. и код које су зупчаници израђени од ацетал кополимера. Планетарни преносник са композитним зупчаницима, који се мало хабају, имају век трајања четири пута већи. Такође, смањен је број делова за 20% у поређењу са ранијим конструкцијама које су имале металне зупчанике, [10].



Слика 3.5. Зупчаста спојница са композитним зупчаницима примењена код World Washer машина Whirlpool Corporation

Компанија Kleiss Gears Inc. бави се конструисањем и производњом композитних зупчаника. На слици 3.6. се може видети разлика између зупчаника конструисаних AGMA стандардом и оптимално конструисаног зупчаника од стране ове компаније. Композитни зупчаник има издужене зупце тако да се остварује максимални контакт приликом спрезања. Што је спрезање зупчаника боље и има мање одступања, мањи су губици као и хабање, [13].



Слика 3.6. Пример оптималне конструкције зупчаника у односу на стандардну конструкцију

3.2 Карактеристике вратила израђених од композитних материјала

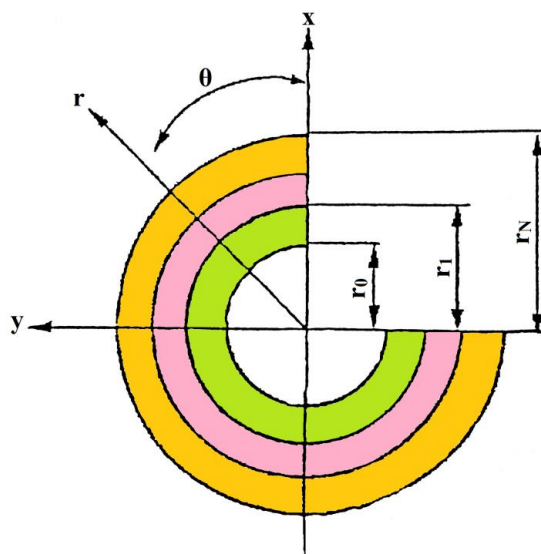
Отпорни и влакнима ојачани композитни материјали, велике крутости и релативно мале специфичне тежине су погодни за израду вратила редуктора. Композитна вратила се, у поређењу са челичним, одликују мањом масом, мањим вредностима напона и деформација, изузетно хармоничним ублажавањем вибрација и већим вредностима сопствених фреквенција.

Најчешће се за израду вратила користе карбонска влакна ојачана пластичном структуром или хибридне конструкције од карбонских и стаклених влакна. Комбинација карбонских влакна, епокси композита и алуминијума даје резултате јер карбонска влакна и епокси композити повећавају фреквенције услед савијања, а алуминијум поседује потребну отпорност на увијање. Такође, погодна је и комбинација стаклених и графитних влакна и полиестерске смоле. Због своје велике отпорности, носивости и специфичне крутости као идеални за израду вратила показали су се и ламинати добијени комбинацијом метал-матрица-композит. У табели 3.4. наведене су основне карактеристике најчешће коришћених композитних материјала за израду вратила.

Табела 3.4. Основне карактеристике композитних материјала

Материјал	E_{11} , GPa	E_{22} , GPa	G_{12} , GPa	V_{12}	ρ , kg/m ³
Карбон/епокси	126,9	11,0	6,6	0,28	1610
Стакло/епокси	40,3	6,21	3,07	0,20	1910
Графит/епокси	139	11,0	6,05	0,31	1578
Бор/епокси	211	24,1	6,90	0,36	1967

На слици 3.7. приказан је попречни пресек једног n -слојног ламинатног вратила.



Слика 3.7. n -слојно ламинатно вратило

Уколико је овакво вратило изложено увијању, максимални дозвољени напон у правцу влакна (σ_1) за сваки слој се приближно може одредити коришћењем следећег израза:

$$\sigma_1 = \frac{T_{tmax}}{2\pi r^2 t} \quad (3.1)$$

где су:

T_{tmax} - максимална вредност момента увијања при 100000 циклуса оптерећења на замор,

t – половина дебљине слоја и

r – полупречник слоја вратила.

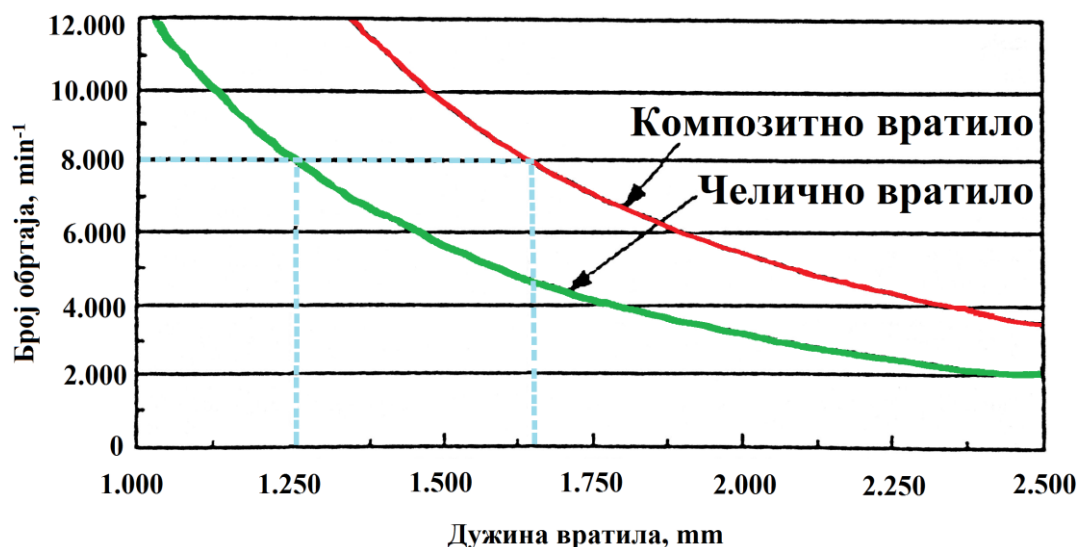
За композитно вратило препоручене вредности степена сигурности, који представља однос критичног и радног напона, крећу се у распону од 2,5 до 4.

Сопствене фреквенције композитног вратила од карбонских влакана могу бити два пута веће од челичног или алуминијумског јер карбонска влакна имају четири пута већу специфичну крутост од челика или алуминијума.

Уколико је код вратила од челика, алуминијумових или титанових легура број сопствених фреквенција близак резонантном или излази из резонантног режима треба променити геометријске димензије вратила, док се код композитних материјала то може постићи само изменом оријентације влакна у појединим слојевима.

Битна особина композитних материјала за израду вратила је да њихова примена омогућава повећање дужине вратила која би, у случају других материјала, довела до појаве савојне резонанце.

Са слике 3.8. се може видети да је за постизање одређене вредности критичног броја обртаја, дозвољена дужина композитног вратила знатно већа него код челичног вратила, [11].



Слика 3.8. Зависност критичног броја обртаја од дужине вратила

3.2.1 Композитна карданска вратила

У карданско вратило је уложено много година испитивања задњих деценија. Кардани су израђени обично од пуних или шупљих цеви од челика или алуминијума. Преко 70 % једноделиних или довелних карданских преносника је направљено од више комада што резултира да финални изглед карданског вратила има велику тежину. Од 1988.-е године почињу масовно да се користе композитна карданска вратила. Цев кардана од графит/карбон/фиберглас/алуминијум-а је настала као директан одговор на захтев индустрије за бољим перформансама и ефикасношћу. Овакви кардански преносници почели су да се уграђују у мање и лаке камионе, као и у аутомобиле са великим перформансама. Главни разлог овога је било значајно смањење масе карданског вратила, крајњи резултати показују да је укупна маса композитног вратила износила око 2,7 kg што је значајно мањи износ од тежине челичног кардана, које је тежило око 10 kg, [1].

Погонско вратило аутомобила служи за пренос снаге од мотора, преко диференцијала до задњих точкова возила. Погонско вратило путничког возила са малим теретом или теретног возила би требало да пренесе обртни момент већи од 3500 Nm и да критични број обртаја буде већи од 6500 min⁻¹. Дужина погонског вратила је већа од 1 m, па се челично погонско вратило ради из два дела. Такво дводелно челично погонско вратило има сложену структуру и велику тежину и ствара буку и вибрације централног лежача аутомобила. Због таквих ствари дводелно челично вратило замењује се једноделним композитним вратилом.

Пренос веће снаге

Тестирањем је установљено да је преласком на композитно погонско вратило ојачано карбонским влакнима снага точка аутомобила повећана за 5%, превасходно због мале ротационе масе погонског вратила. Композитно вратило ојачано карбонским влакнима може да пренесе већу обимну силу него челично вратило дупло веће тежине. Карбонска влакна смањују вибрације, а самим тим долази до смањења губитка снаге услед вибрација система за пренос силе на точкове. Сва вратила су изложена дејству обимних сила и свака се увијају до одређеног степена. Континуална увијања при дејству обимних сила резултирају томе да се крајеви вратила увијају за неколико степени. Међутим карбонска влакна имају готово савршену “еластичну меморију”, што их чини отпорнијим на перманентно увијање.

Хармонично ублажавање вибрација

Повећање обртног момента доводи до увијања вратила. При извесној “критичној брзини”, јединственој за сваки тип вратила, увијање вратила доводи до бочних угиба и појаве вибрација. Фреквенције ових штетних вибрација зависе од густине, крутости, димензија и облика вратила. Критична брзина вратила од композитних материјала је много већа него челичних и алуминијумских вратила истих димензија. Изузетно хармонично ублажавање вибрација, као и велика крутост и мала густина, омогућавају

вратилу од карбонских влакана да буквално елиминише вибрације вратила за пренос снаге са мотора на точкове.

Веће сопствене фреквенције

Сопствене фреквенције композитног вратила од карбонских влакана могу бити два пута веће од челичног или алуминијумског јер карбонска композитна влакна имају четири пута већу специфичну крутост од челика или алуминијума, а да је при томе маса редукована за 50%, [13].

Примена композитних вратила у тркачким аутомобилима изазвала је велику пажњу задњих деценија. Када при великим брзинама дође до лома кардана, његове компоненте лете на све стране, такође је могуће да направи рупу у земљи што може довести до одлетања аутомобила у ваздух. Композитна карбонска вратила може да поломи само јак ударац са стране. Када дође до лома композитног карданског вратила, слика 3.9. оно се подели на фина влакна, добијајући такозвани изглед “метле” тако да су било какве последице по возача минималне.



Слика 3.9. Лом једноделног композитног карданског вратила

Бројне студије су се бавиле оптималним дизајном карданских вратила као и врстама материјала од којих се израђују и наравно оријентацијом влакана. Pollard је проучавао различите врсте композитних карданских вратила за аутомобилску индустрију, такође је упоредио његове предности и мане у разним условима експлатације. Rangaswamy је оптимизовао и анализирао једноделно карданско вратило користећи генетски код и компјутерски софтвер ANSYS. Они су такође установили да се коришћењем композитних материјала знатно смањује маса у односу на челична карданска вратила. Битну ствар коју су установили је да у зависности како су оријентисана влакна композита знатно утичу на момент савијања. Једноделно композитно вратило које служи за пренос кретање на задње точкове дизајнирано је и анализирано у ANSYS-у.

На слици 3.10. (горе) се може видети дводелно карданско вратило направљено од челика, на истој слици 3.10. (доле) се може видети једноделно композитно вратило, [1].



Слика 3.10. Дводелно челично вратило и једноделно композитно вратило

Јапанска компанија Hitachi Automotive Systems, априла ове године, објавила је да ће производити композитна карбон/фибер карданска вратила за компанију Alfa Romeo, која ће бити уграђивана у нови Alfa Romeo Giulia аутомобил. Одлучили су се за овај потез из добро познатих разлога, смањење масе возила што доводи до смањења потрошње горива и смањења емисије штетних гасова, што је у данашње време јако битна ставка. Карданско вратило које ће бити уграђивано у аутомобил (слика 3.11.), имаће значајно смањену масу од око 5 kg, што је око 40 % мање од масе конвенционалних челичних карданских вратила. Пружа одличан допринос у безбедности при вожњи јер смањује утицај сила, такође око 50 % лакше долази до лома композитног од челичног вратила при судару два возила. Коришћењем карбонских влакана код ових вратила смањује се бука централног лежаја, што доводи до већег комфора током саме вожње. Треба истаћи да ће Alfa Romeo Giulia бити први аутомобил у који се серијски уграђује карданско вратило, за све типове мотора. Ова чињеница само даје значај примени композитних материјала, као и шта се од њих очекује у будућности, [14].



Слика 3.11. Нова Alfa Romeo Giulia и композитно карбон/фибер карданско вратило које се уграђује у њега

3.3 Каишници и каишеви од композитних материјала

Каишници представљају веома важне и одговорне делове зупчастог каишног преноса. Од правилног избора, конструкције и квалитета израде каишника у многоме зависи синхроност преноса и ниво експлатационих карактеристика. По својим конструкционим карактеристикама зупчасти каишеви се разликују међу собом као и зупчасти каишеви. Они се састоје из одређеног броја једнаких међузубља, који омогућавају коректно спрезање са каишом. Каишници су конструисани тако да зупци каиша улазе и излазе из међузубља са занемарљивим трењем. Међузубље се израђује са зазором, које служи за лакши улаз и излаз каиша из спреге, као и да исправи све предходне конструктивне грешке каиша и самог каишника, као и грешке искошења вратила преносника. Могу се правити са и без ободног прстена, чија је улога да спречи спадање каиша. Могу бити изједна са каишником или као два одвојена дела, што је скупље.

Америчка компанија Uniroyal Goodyear у зависности од пречника вратила, израђује две врсте каишника:

- једноделне каишнике и
- дводелне каишнике (са уметнутом главчином).

Баш као и зупчаници, често се праве дводелни композитни каишници, код којих се уметне метална главчина, на слици 3.12. може се видети један овакав зупчасти каишник без ободног прстена. Ободни прстенови се најчешће праве од угњеничних челика и алуминијума.



Слика 3.12. Дводелни композитни каишник са уметнутом металном главчином

Компанија SDP израђује каишнике од пластичних маса који се карактеришу малом масом, великом чврстоћом и малом инерцијом. Цена им је 40 % мања од цене конвенционалних металних каишника, [15].

Као и многи други машински делови и каишници и каишеви се могу произвести од различитих композитних материјала уместо од метала. Овакви делови од композитних материјала имају следеће предности у односу на конвенционалне металне, [16]:

- мања маса,
- могућност прецизније израде делова,
- мања бука при раду,
- нижи коефицијент трења,
- не рђају и не захтевају фарбање, итд.

Данас се све чешће примењују пластичне масе: поликарбонат, ацетал, најлон, Lexan 500, Fiberglass (ојачан) и Derlin 500. Од алуминијумских легура за израду каишника најчешће се користе: AlCuMgPb (алуминијум – бакар – магнезијум - олово), AlZnMgCu0.5-F48 (алуминијум - цинк - магнезијум - бакар), AlCuMgSi (алуминијум – бакар – магнезијум - силицијум). Ове легуре прави америчка компанија Brecoflex.

Зупчасти каишници од пластичних маса и лаких легура обично се израђују ливењем под притиском. Зупци каишника се нарезују профилисаним глодалом.

Зупчасти каишни преносник представља релативно млади преносник, настао половином прошлог века. Полако су ови елементи за пренос снаге почели да се примењују у свим гранама индустрије. “Глас 1004” био је први аутомобил на коме је за погон брегастог вратила био примењен зупчасти каиш, који је био једноставне конструкције и без затезача. Данас је зупчасти каиш најчешће примењивани начин погона брегастог вратила. Иако се примена зупчастих каишева најчешће везује за ауто индустрију, тек 2 % ових производа заврши у тој грани индустрије. На слици 3.13. налази се зупчасти каиш намењен за ауто индустрију.

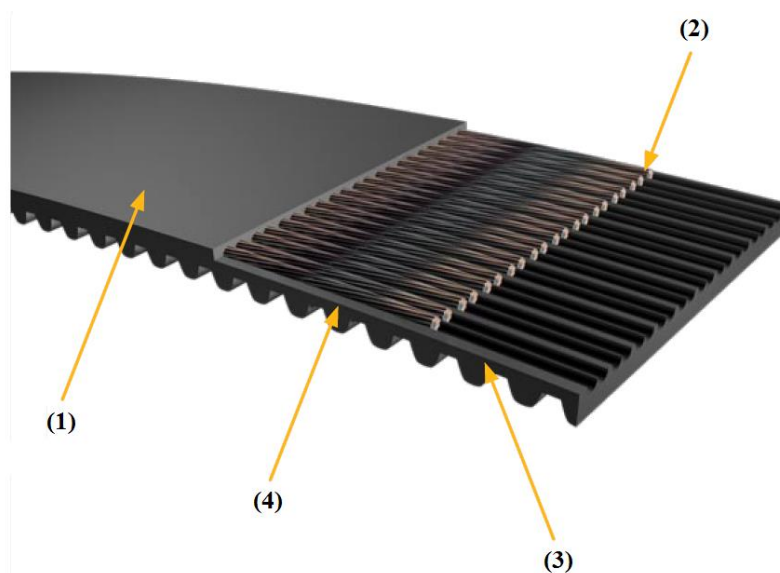


Слика 3.13. Зупчасти каиш који се уграђује у неке типове Honda аутомобила

Зупчасти каишеви су сами по себи композитни материјали. Савремена решења су прилагођена захтевима пораста носивости, смањења шума и продужења радног века. Побољшања су добијена проналажењем нових облика зубаца и применом нових материјала. Савремена решења каишева састоје се само од две компоненте, полиуретана отпорног на хабање и вучног елемента од побољшаног челика. Комбинацијом ове две компоненте добијени су каишеви високе чврстоће на смицање и малог еластичног издужења, [15].

На слици 3.14. је приказан пресек зупчастог каиша шведске компаније SKF који је сложен елемент и састоји се из следећих делова, [17]:

- леђне површине (1),
- вучног елемента (2),
- зубаца (3) и
- омотача (4).



Слика 3.14. Зупчасти каиш компаније SKF

Леђна површина се прави изједна са зупцима и затвара намотано уже. Основни задатак јој је да чува вучни елемент (уже) од нечистоћа, влаге и уља. Направљена је од гуме.

Вучни елемент је основни елемент зупчастог каиша. То је непрекидно хеликоидно намотано уже одређеног корака. У овом случају направљено је од развученог стакленог влакна.

Зупци са леђном површином чине целину. Направљени су од полиамид индустријске тканине.

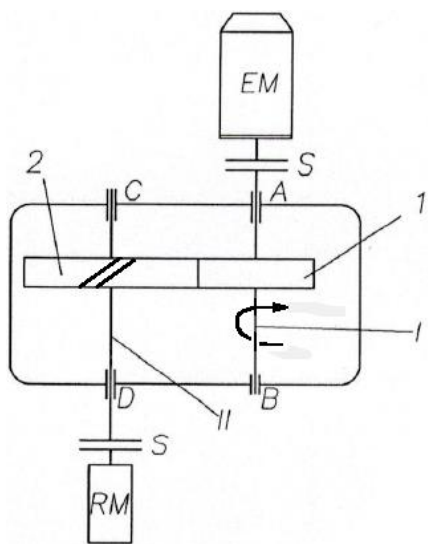
Омотачем се прекрива зупчасти каиш због отпорности на хабање. Направљен је од високог степена хлоропенског једињења, [15, 17].

4.0 Прорачун носивости композитних зупчаника

Пример: За зупчасти пар 1,2 композитних зупчаника израђених од PA6630GF (полиамид 6.6 са додатком 30% стаклених влакана) потребно је прорачунати степене сигурности на боку и у корену зупца.

Полазни подаци:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Улазна снага: | $P_{EM} = 0,55 \text{ kW}$ |
| 2. Излазни број обртаја: | $n_2 = 157 \text{ min}^{-1}$ |
| 3. Излазни обртни момент: | $T_2 = 32,7 \text{ Nm}$ |
| 4. Преносни однос: | $i = 8,8$ |
| 5. Број зубаца зупчаника 1: | $z_1 = 20$ |
| 6. Број зубаца зупчаника 2: | $z_2 = 176$ |
| 7. Модул: | $m_n = 0,7 \text{ mm}$ |
| 8. Угао нагиба зубаца: | $\beta = 20^\circ$ |
| 9. Фактор радних услова: | $K_A = 1,2$ |
| 10. Материјал зупчаника: | PA6630GF |
| 11. Однос b/d_1 : | 1 |
| 12. Стварно осно растојање зупчастог пара: | $a = 73,5 \text{ mm}$ |
| 13. Коефицијент померања профила: | $x_1 = 0; x_2 = 0,7264$ |
| 14. Ширина зупчаника: | $b = 20 \text{ mm}$ |



Шема редуктора



Зупчасти пар 1,2

4.1 Основни параметри

4.1.1 Бројеви обртаја

$$n_2 = n_{RM} = 157 \text{ min}^{-1}$$

$$n_2 = \frac{n_1}{i} \rightarrow n_1 = n_2 \cdot i = 157 \cdot 8,8 = 1381,6 \text{ min}^{-1}$$

$$n_1 = n_I = n_{EM} = 1381,6 \text{ min}^{-1}$$

4.1.2 Угаоне брзине

$$\omega_1 = \frac{\pi \cdot n_1}{30} = \frac{\pi \cdot 1381,6}{30} = 144,68 \text{ s}^{-1}$$

$$\omega_1 = \omega_I = \omega_{EM}$$

$$\omega_2 = \frac{\omega_1}{u_{1,2}} = \frac{144,68}{8,8} = 16,44 \text{ s}^{-1}$$

$$\omega_2 = \omega_{II} = \omega_{RM} = 16,44 \text{ s}^{-1}$$

4.1.3 Обртни моменти

$$T_{EM} = \frac{P_{EM}}{\omega_{EM}} = \frac{550}{144,68} = 3,8 Nm$$

$$T_{EM} = T_1 = T_I$$

$$T_{II} = T_2 = T_{RM} = 32,7 Nm$$

4.2 Прорачун основних геометријских величина зупчастог пара

4.2.1 Угао нагиба профила алата у нормалној равни, α_n

$$\alpha = \alpha_n = \alpha_p = 20^\circ$$

4.2.2 Угао нагиба профила алата у чеоној равни, α_t

$$\alpha_t = \arctg \left(\frac{t_g \alpha_n}{\cos \beta} \right) = \arctg \left(\frac{t_g 20^\circ}{\cos 20^\circ} \right) = \arctg 0,3873 = 21,173^\circ$$

4.2.3 Корак на подеоном кругу, p_t

$$p_t = m_t \cdot \pi = \frac{m_n \cdot \pi}{\cos \beta} = \frac{0,7 \cdot \pi}{\cos 20^\circ} = 2,34 \text{ mm}$$

4.2.4 Корак на основном кругу, p_{bt}

$$p_{bt} = p_t \cdot \cos \alpha_t = p_{et} = 2,34 \cdot \cos 21,173 = 2,182 \text{ mm}$$

p_{et} – спрежни корак

4.2.5 Пречници подеоних кругова, d_1 и d_2

$$m_t = \frac{m_n}{\cos \beta} = \frac{0,7}{\cos 20^\circ} = 0,7449 \text{ mm}$$

$$d_1 = m_t \cdot z_1 = 0,7449 \cdot 20 = 14,89 \text{ mm}$$

$$d_2 = m_t \cdot z_2 = 0,7449 \cdot 176 = 131,10 \text{ mm}$$

4.2.6 Ширина зупчаника

$$b_1 = b_2 = b = 20 \text{ mm}$$

4.2.7 Пречници основних кругова, d_{b1} и d_{b2}

$$d_{b1} = d_1 \cdot \cos \alpha_t = 14,89 \cdot \cos 21,173^\circ = 13,89 \text{ mm}$$

$$d_{b2} = d_2 \cdot \cos \alpha_t = 131,10 \cdot \cos 21,173^\circ = 122,25 \text{ mm}$$

4.2.8 Угао нагиба зубаца на основном кругу, β_b

$$\beta_b = \arcsin(\sin \beta \cdot \cos \alpha_n) = \arcsin(\sin 20^\circ \cdot \cos 20^\circ) = 18,598^\circ$$

4.2.9 Нулто осно растојање, a_d

$$a_d = \frac{d_1 + d_2}{2} = m_t \cdot \frac{z_1 + z_2}{2} = 0,7449 \cdot \frac{20 + 176}{2} = 73,003 \text{ mm}$$

4.2.10 Коефицијент померања алата у чеоној равни, x_{1t} и x_{2t}

$$x_{1t} = x_1 \cdot \cos \beta = 0 \cdot \cos 20^\circ = 0 \text{ mm}$$

$$x_{2t} = x_2 \cdot \cos \beta = 0,7264 \cdot \cos 20^\circ = 0,68 \text{ mm}$$

4.2.11 Величине померања профила у чеоној равни

$$\vartheta_{1t} = x_{1t} \cdot m_t = 0 \text{ mm}$$

$$\vartheta_{2t} = x_{2t} \cdot m_t = 0,68 \cdot 0,7 = 0,4778 \text{ mm}$$

4.2.12 Угао додирнице у чеоној равни

$$\begin{aligned} \operatorname{inv} \alpha_{wt} &= 2 \cdot \frac{x_1 + x_2}{z_1 + z_2} \cdot \operatorname{tg} \alpha_n + \operatorname{inv} \alpha_t \\ &= 2 \cdot \frac{0 + 0,7264}{20 + 176} \cdot \operatorname{tg} 20^\circ + 0,01779 = 0,02048 \end{aligned}$$

$$\alpha_{wt} = 21,148611^\circ$$

4.2.13 Стварно осно растојање

$$a = a_d \cdot \frac{\cos \alpha_t}{\cos \alpha_{wt}} = 73,003 \cdot \frac{\cos 21,173^\circ}{\cos 22,148^\circ} = 73,5 \text{ mm}$$

4.2.14 Пречници кинематских кругова

$$d_{w1} = d_1 \cdot \frac{\cos \alpha_t}{\cos \alpha_{wt}} = 14,89 \cdot \frac{\cos 21,173^\circ}{\cos 22,146^\circ} = 14,99 \text{ mm}$$

$$d_{w2} = d_2 \cdot \frac{\cos \alpha_t}{\cos \alpha_{wt}} = 131,10 \cdot \frac{\cos 21,172^\circ}{\cos 22,148^\circ} = 131,99 \text{ mm}$$

4.2.15 Темени зазор

$$c = c_p = (0,1 \div 0,3) m_n = 0,25 \cdot 0,7 = 0,175 \text{ mm}$$

Према стандарду SRPS M. C1. 016

4.2.16 Висина теменог дела зупца (главе зупца)

$$h_{aP} = h_a = m_n = 0,7 \text{ mm}$$

- 4.2.17 Висина подножног дела зупца (ноге зупца)

$$h_{fP} = h_f = m_n + c_p = 0,7 + 0,175 = 0,875 mm$$

- 4.2.18 Укупна висина зупца

$$h_p = h_{aP} + h_{fP} = 0,7 + 0,875 = 1,575 mm$$

- 4.2.19 Пречници подножних кругова

$$d_{f1} = d_1 - 2 \cdot h_{fp} + 2 \cdot x_1 \cdot m_n = 14,89 - 2 \cdot 0,875 + 2 \cdot 0 \cdot 0,7 = 13,14 mm$$

$$d_{f2} = d_2 - 2 \cdot h_{fp} + 2 \cdot x_2 \cdot m_n = 131,10 - 2 \cdot 0,875 + 2 \cdot 0,7264 \cdot 0,7 = 130,36 mm$$

- 4.2.20 Пречници темених кругова

$$d_{a1} = 2 \cdot a - d_{f2} - 2 \cdot c = 2 \cdot 73,5 - 130,36 - 2 \cdot 0,175 = 16,27 mm$$

$$d_{a2} = 2 \cdot a - d_{f1} - 2 \cdot c = 2 \cdot 73,5 - 13,148 - 2 \cdot 0,175 = 133,49 mm$$

- 4.2.21 Лучне дебљине зубаца на подеоном кругу у чеоној равни

$$s_{t1} = m_n \cdot \left(\frac{\pi}{2} + 2 \cdot x_1 \cdot tg\alpha_n \right) = 0,74 \cdot \left(\frac{\pi}{2} + 2 \cdot 0 \cdot tg20^\circ \right) = 1,17 mm$$

$$s_{t2} = m_n \cdot \left(\frac{\pi}{2} + 2 \cdot x_2 \cdot tg\alpha_n \right) = 0,74 \cdot \left(\frac{\pi}{2} - 2 \cdot 0,7264 \cdot tg20^\circ \right) = 1,56 mm$$

- 4.2.22 Лучне ширине међузубља на подеоном кругу у чеоној равни

$$e_{t1} = p_t - s_{t1} = 2,34 - 1,17 = 1,17 mm$$

$$e_{t2} = p_t - s_{t2} = 2,34 - 1,56 = 0,78 mm$$

- 4.2.23 Парцијалне дужине додирнице

$$g_a = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{d_{a1}^2 - d_{b1}^2} - \frac{d_{w1}}{2} \cdot \sin\alpha_{wt} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{16,27^2 - 13,89^2} - \frac{14,99}{2} \cdot \sin 22,148^\circ = 1,41 mm$$

$$g_f = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{d_{a2}^2 - d_{b2}^2} - \frac{d_{w2}}{2} \cdot \sin\alpha_{wt} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{133,49^2 - 122,25^2} - \frac{131,99}{2} \cdot \sin 22,148^\circ = 1,92 mm$$

- 4.2.24 Дужина активног дела додирнице

$$g_\alpha = g_a + g_f = 1,41 + 1,93 = 3,34 mm$$

- 4.2.25 Парцијални степен спрезања

$$\varepsilon_a = \frac{g_a}{p_{bt}} = \frac{1,41}{2,18} = 0,65$$

$$\varepsilon_f = \frac{g_f}{p_{bt}} = \frac{1,93}{2,18} = 0,88$$

- 4.2.26 Степен спрезања профила

$$\varepsilon_\alpha = \varepsilon_a + \varepsilon_f = 0,646 + 0,884 = 1,53$$

$$1 \leq \varepsilon_{\alpha} = 1,53 \leq 2$$

4.2.27 Степен спрезања бочних линија профила

$$\varepsilon_{\beta} = \frac{b \cdot \operatorname{tg} \beta}{p_t} = \frac{b \cdot \sin \beta}{m_n \cdot \pi} = \frac{20 \cdot \sin 20^{\circ}}{0,7 \cdot \pi} = 3,33$$

4.2.28 Степен спрезања бокова

$$\varepsilon_{\gamma} = \varepsilon_{\alpha} + \varepsilon_{\beta} = 1,554 + 3,33 = 4,68$$

4.2.29 Провера интерференце при спрезању

$$CT_1 > CA$$

$$\frac{d_{w2}}{2} \cdot \sin \alpha_{wt} > g_a$$

$$\frac{131,98}{2} \cdot \sin 22,146^{\circ} > 1,42$$

$$24,82 > 1,42$$

$$CT_2 > CE$$

$$\frac{d_{w1}}{2} \cdot \sin \alpha_{wt} > g_f$$

$$\frac{14,99}{2} \cdot \sin 22,146^{\circ} > 1,95$$

$$2,82 > 1,93$$

4.3 Провера носивости

$K_A = 1,2$ – фактор радних услова

K_v – фактор унутрашњих динамичких сила

$$K_v = f_F \cdot K_{350} \cdot N + 1 = \dots$$

$$F_t = \frac{2 \cdot T_1}{d_{w1}} = \frac{2 \cdot 3,8 \cdot 10^3}{14,99} = 506,7 N$$

$$\frac{K_A \cdot F_t}{b} = \frac{1,2 \cdot 506,7}{20} = 30,4 \frac{N}{mm}$$

Квалитет: 7.

f_F – фактор корекције оптерећења; $f_F = 3,21$, [18].

$$\frac{z_1 \cdot v_1}{100} \cdot \sqrt{\frac{u^2}{1 + u^2}} = \frac{20 \cdot 1,08}{100} \cdot \sqrt{\frac{8,8^2}{1 + 8,8^2}} = 0,21$$

$$v_1 = \frac{d_{w1} \cdot \pi \cdot n_1}{60 \cdot 1000} = \frac{14,99 \cdot 1381,6 \cdot \pi}{60 \cdot 1000} = 1,08 \frac{m}{s}$$

$$K_{350 N} = 0,015, [18].$$

$$K_v = f_F \cdot K_{350} \cdot N + 1 = 3,21 \cdot 0,015 + 1 = 1,048$$

Фактор расподеле оптерећења дуж бочне линије

$$K_\beta = 1,13, [18].$$

$$\frac{K_A \cdot K_v \cdot F_t}{b} = \frac{1,2 \cdot 1,048 \cdot 506,7}{20} = 31,9 \frac{N}{mm}$$

$f_w = 1,60$ – корекциони фактор, [18].

$f_p = 1,0$ – фактор спрегнутих материјала, [18].

$f_1 = 1$ – фактор положаја зупчаника на вратилу (за симетричан положај), [18].

$$K_{F\beta} = 1 + (1,13 - 1) \cdot 1,6 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 1,208$$

$$K_{H\beta} = K_{F\beta}^{1,39} = 1,208^{1,39} = 1,3$$

Фактор расподеле оптерећења на парове зубаца $K_{H\alpha} - K_{F\alpha}$

$$\frac{K_A \cdot F_t}{b} = \frac{1,2 \cdot 506,7}{20} = 30,4 \frac{N}{mm}$$

$$K_{H\alpha} = K_{F\alpha} = \frac{\varepsilon_\alpha}{\cos^2 \beta_b} = \frac{1,53}{\cos^2 18,598^\circ} = 1,7$$

4.4 Радни напон на боку зубаца

$$\sigma = Z_H \cdot Z_E \cdot Z_\varepsilon \cdot Z_B \cdot \sqrt{\frac{F_t}{d_1 \cdot b} \cdot \frac{u+1}{u} \cdot K_A \cdot K_v \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{H\beta}}$$

Када је: $Z_{n1} > 20$, $Z_B = 1$

Z_E – фактор еластичности материјала

$$Z_E = 27 \sqrt{\frac{N}{mm^2}}, [19].$$

Z_ε - фактор степена спрезања бока зупца

$$\varepsilon_\beta = 3,336 \rightarrow \varepsilon_\beta = 1$$

$$Z_\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_\alpha}} = \sqrt{\frac{1}{1,554}} = 0,81$$

Z_H – фактор облика бока зупца

$$Z_H = \frac{1}{\cos \alpha_t} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \cos \beta_b}{tg \alpha_{wt}}} = \frac{1}{\cos 21,17^\circ} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \cos 18,598^\circ}{tg 22,148^\circ}} = 2,31$$

Z_β – фактор угла нагиба зупца

$$Z_\beta = \sqrt{\cos \beta} = \sqrt{\cos 20^\circ} = 0,97$$

$$\begin{aligned} \sigma_H &= Z_H \cdot Z_E \cdot Z_\varepsilon \cdot Z_\beta \cdot Z_B \cdot \sqrt{\frac{F_t}{d_1 \cdot b} \cdot \frac{u+1}{u} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{H\alpha} + K_{H\beta}} = \\ &= 2,31 \cdot 27 \cdot 0,81 \cdot 0,97 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{506,7}{14,89 \cdot 20} \cdot \frac{8,8+1}{8,8} \cdot 1,2 \cdot 1,05 \cdot 1,7 + 1,3} = 113,44 MPa \end{aligned}$$

4.4.1 Критични напон на боку

$$[\sigma_H] = \sigma_{Hlim} \cdot Z_{Nt} \cdot Z_L \cdot Z_R \cdot Z_v \cdot Z_w \cdot Z_x =$$

$$PA6630GF (\sigma_{Hlim} = 1270 MPa; \sigma_{Flim} = 300 MPa), [19].$$

$Z_{NT} = 1,0$ – фактор радног века

Z_L – фактор подмазивања

$$Z_L = C_{ZL} + \frac{4 \cdot (1 - C_{ZL})}{\left(1,2 + \frac{80}{v_{50}}\right)^2} = 1,08$$

$$C_{ZL} = 0,91 (\sigma_{Hlim} > 1200 \frac{N}{mm^2}), [18].$$

$$\vartheta = 1,08 \frac{m}{s}$$

$$v_{50} = 300 \frac{mm^2}{s}$$

$$Z_R = \left(\frac{3}{R_{z1,2}}\right)^{C_{ZR}} = \left(\frac{3}{3,32}\right)^{0,08} = 0,99$$

$$R_{z1,2} = \frac{R_{z1} + R_{z2}}{2} \cdot \sqrt[3]{\frac{100}{a}} = \frac{3+3}{2} \cdot \sqrt[3]{\frac{100}{73,5}} = 3,32 \mu m$$

$$R_{z1} = R_{z2} = 3 \mu m, [18].$$

$$C_{ZR} = 0,08$$

Z_V – фактор обимне брзине

$$Z_V = C_{ZV} + \frac{2 \cdot (1 - C_{ZV})}{\sqrt{0,8 + \frac{32}{\vartheta_x}}}$$

$$C_{ZV} = C_{ZL} + 0,02 = 0,91 + 0,02 = 0,93$$

$$Z_x = 0,93 + \frac{2 \cdot (1 - 0,93)}{\sqrt{0,8 + \frac{32}{0,72}}} = 0,93 + \frac{0,14}{6,533} = 0,95$$

Z_W – фактор утицаја разлике тврдоће спрегнутих бокова

$$Z_W = 1,0$$

Z_X – фактор величине зубаца

$$Z_X = 1,0, [18].$$

$$[\sigma_H] = 1270 \cdot 1,08 \cdot 0,99 \cdot 0,95 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 1289,99 MP_a$$

4.4.2 Степен сигурности бока

$$S_H = \frac{[\sigma_H]}{\sigma_H} = \frac{1289,99}{113,44} = 11,37$$

4.5 Радни напон у подножју зубаца

$$\sigma_{F1} = Y_{Fa1} \cdot Y_{Sa1} \cdot Y_\epsilon \cdot Y_\beta \cdot \frac{F_{t1}}{b \cdot m_n} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{F\alpha} \cdot K_{F\beta}$$

Y_{Fa1} – фактор облика зупца

$$z_{n1} = 24,1 \quad \text{и} \quad z_{n2} = 212,93$$

$$x_1 = 0 \quad \text{и} \quad x_2 = 0,7264$$

$$\left. \begin{array}{l} Y_{Fa1} = 2,75 \\ Y_{Fa2} = 2,07 \end{array} \right\}, [18].$$

Y_{Sa} – фактор концентрације напона

$$\left. \begin{array}{l} Y_{Sa1} = 1,64 \\ Y_{Sa2} = 2,22 \end{array} \right\}, [18].$$

Y_ϵ – фактор степена спрезања

$$Y_\epsilon = 0,25 + \frac{0,75}{1,53} = 0,7$$

Y_β – фактор напона косих зубаца

$$Y_{\beta} = 1 - \varepsilon_{\beta} \cdot \frac{\beta}{120^{\circ}} = 1 - 1 \cdot \frac{20^{\circ}}{120^{\circ}} = 0,83$$

$$\varepsilon_{\beta} = 3,11 \rightarrow \varepsilon_{\beta} = 1$$

$$\sigma_{F1} = 2,75 \cdot 1,64 \cdot 0,7 \cdot 0,83 \cdot \frac{506,7}{20 \cdot 0,7} \cdot 1,2 \cdot 1,05 \cdot 1,7 \cdot 1,208 = 245,4 MP_a$$

$$\sigma_{F2} = 2,07 \cdot 2,22 \cdot 0,73 \cdot 0,83 \cdot \frac{495,48}{20 \cdot 0,7} \cdot 1,2 \cdot 1,05 \cdot 1,7 \cdot 1,208 = 244,5 MP_a$$

4.5.1 Критични напон у подножју

$$[\sigma_F] = \sigma_{Flim} \cdot Y_{NT} \cdot Y_{ST} \cdot Y_{\delta relT} \cdot Y_x \cdot Y_{RrelT}$$

σ_{Flim} - трајна динамичка чврстоћа подножја зубаца

$$\sigma_{Flim1} = \sigma_{Plim2} = 300 MP_a \text{ за PA6630GF, [19].}$$

$Y_{NT} = 1$ – фактор радног века

$Y_{ST} = 2$ – фактор радног века опитног зупчаника

$Y_{\delta relT}$ – релативни фактор осетљивости материјала на концентрацију напона

$$\left. \begin{matrix} Y_{\delta relT1=0,99} \\ Y_{\delta relT2=1,01} \end{matrix} \right\}, [18].$$

$Y_x = 1,0$ – фактор величине пресека, [18].

Y_{RrelT} – релативни фактор храпавости

$$Y_{RrelT} = 1,065, [18].$$

$$[\sigma_{F1}] = 300 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 0,99 \cdot 1,0 \cdot 1,065 = 632,61 MP_a$$

$$[\sigma_{F2}] = 300 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 1,01 \cdot 1,0 \cdot 1,065 = 645,39 MP_a$$

4.5.2 Степен сигурности подножја

$$S_{F1} = \frac{[\sigma_{F1}]}{\sigma_{F1}} = \frac{632,61}{245,4} = 2,58$$

$$S_{F2} = \frac{[\sigma_{F2}]}{\sigma_{F2}} = \frac{645,39}{244,5} = 2,64$$

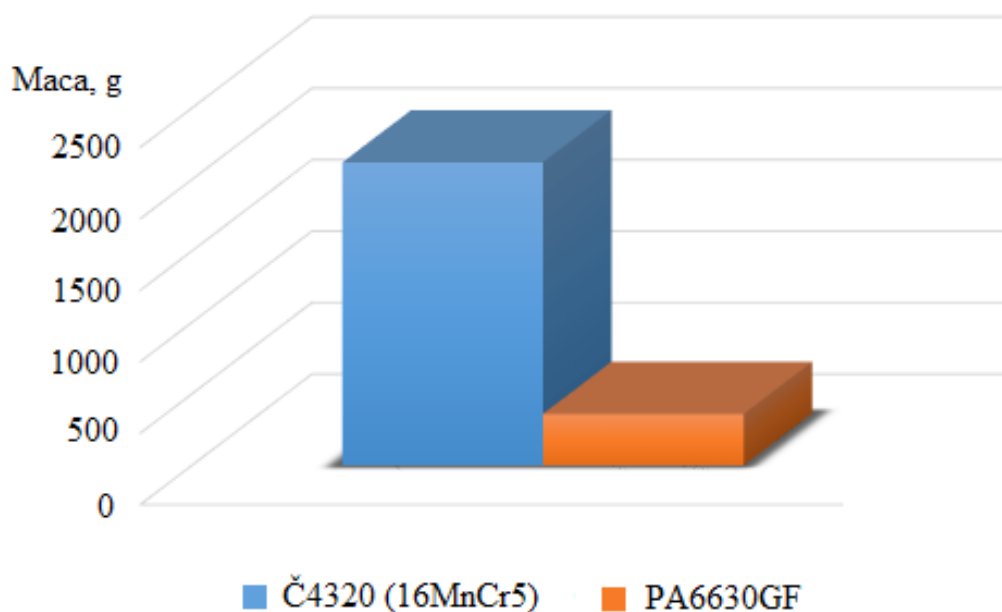
На основу прорачуна који се односио на носивост металних зупчаника и на основу прорачуна зупчаника од композитног материјала, из овог рада, изнета су нека поређења и приказа су у табели 4.1.

Табела 4.1. Поређење карактеристика зупчаника од челика и композита

Материјал	Густина, g/m^3	Маса, g	Степен сигурности бока зуба σ_H	Степен сигурности подножја зубца σ_{F1}	Степен сигурности подножја зубца σ_{F2}
Č4320 (16MnCr5)	7,85	2120	1,88 ¹⁾	3,69 ²⁾	3,78 ³⁾
PA6630GF	1,35	360	11,37	2,58	2,64

Напомена: Вредности са индексом (1, 2 и 3) су преузети из литературе [20]

Прорачуном је показано да композитни зупчаници задовољавају услове носивости и чврстоће, као што то чине и челични зупчаници. Наравно, сваки од материјала има своје предности и недостатке. На слици 4.1. се може видети једна од главних предности композита – маса композитног зупчаника значајно је мања од масе челичног.



Слика 4.1. Разлика у маси челичног и композитног зупчаника

5.0 Закључак

Циљ завршног рада било је упознавање са основним карактеристикама композитних материјала, као и машинским елементима који се могу правити од истих. У оквиру рада су поменути и обрађени композитни материјали који служе за израду машинских елемената.

Поред свих предности и недостатака које повлачи са собом широка примена композитних материјала, најчешћи разлог за њихову употребу јесте смањивање извора природних материјала и све већа потреба коју намеће савремени развој. Развојем компјутерске технологије машински елементи израђени од композитних материјала могу се конструисати и моделирати уз помоћ одговарајућих софтвера. Метода коначних елемената је једна од најчешће коришћених програмских пакета за прорачун и анализу композитних елемената.

Елементи од композитних материјала све више налазе примену у разним гранама индустрије. Повећање захтева у раду машинских конструкција, смањење масе и ниска цена производа утицали су на све већу примену РЕЕКTM полимера за израду зупчаника. Ови зупчаници имају све већу примену, јер могу радити са и без подмазивања, имају постојаност механичких карактеристика на високим температурама, омогућавају повећање флексибилности у процесу конструисања, једноставно се израђују, није потребна накнадна обрада зупчаника и имају дужи радни век. Испитивањем композитних зупчаника израђених од полиамида 6.6 који су ојачан са 30% стаклених влакана дошло се до закључака да степени сигурности бока и подножја зубаца задовољава потребне радне услове. Наравно, највећа предност композитних материјала је мала густина, која директно утиче на смањење масе. У овом случају композитни зупчаник је лакши скоро шест пута од челичног зупчаника.

За разлику од зупчаника, каишници тек траже своју нешто ширу примену. По начину израде композитни каишници имају доста сличности са зупчаницима. Могу се израђивати ливењем у калупе и правити са уметнутим металним главчинама. Што се тиче каишева, они су сами по себи композитни материјали, јер се у њих уграђују ојачавајућа влакна. Иако имају широко поље примене, каишеви се стално испитују и карактеристике им се побољшавају.

Композитна вратила, а посебно карданска вратила, свакодневно имају све ширу примену због својих добрих карактеристика као што су смањење масе вратила за 50%, преноса веће снаге, веће вредности критичних брзина и сопствених фреквенција, једноставније конструкције, повећане безбедност у раду, итд. Међутим, без обзира на ове значајне предности композитног у односу на конвенционално челично вратило још увек је њихова примена ограничена, превасходно због још увек високе цене производње. Компанија Alfa Romeo се одлучила на серијску производњу модела Giulia,

који ће у свим верзијама модела имати композитно карданско вратило. Овакав потез ће само натерати конкурентне компаније да се окрену уграђивању композитних елемената у своја возила.

Из свега изнетог, закључује се да експлоатација ових нових материјала непрекидно расте, а да ће своје место имати и у будућности, обзиром на ограниченост природних ресурса. Имајући у виду сва добра својства и простор за даљи напредак, чини се да ера композитних материјала тек долази.

6.0 Литература

- [1] M. R. Khoshravan Azar: *Design and modal analysis of composite drive shaft for automotive application*, International journal of engineering science and technology, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Iran 2011.
- [2] Ј. Говедаровић, З. Ђорђевић: *Утицај спољашње средине на напонско стање зупчаника израђених од композитних материјала*, Шесто међународно саветовање о достигнућима електро и машинске индустрије, Бања Лука 2003.
- [3] Ј. Говедаровић, З. Ђорђевић: *Неке карактеристике композитних зупчаника израђених од полиетеретеркитона*, Научно-стручни скуп о истраживању и развоју машинских елемената и система, Крагујевац 2004.
- [4] <http://documents.tips/documents/08-kompoziti.html>, датум приступа 10.08.2016.
- [5] М. Јовановић, В. Лазић, Д. Адамовић, Н. Ратковић: *Машински материјали*, предавање број 10 - *Обојени матали и легуре*, Машински факултет Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац 2003.
- [6] <https://ironlady003.wordpress.com/2014/05/12/kompozitni-materijali/>, датум приступа 20.08.2016.
- [7] М. Антић: *Композитни материјали*, Контрол-Инспект д.о.о Београд, Београд 2016.
- [8] Н. Томац: *ТМО 17 Композити*, Универзитет у Ријеци, Ријека 2003.
- [9] Т. Филетин: *Напредне технологије материјала*, предавање - *Поступци производње материјала*, Факултет стројства и бродоградње Универзитета у Загребу, Загреб 2015.
- [10] Ј. Говедаровић, З. Ђорђевић: *Основне карактеристике зупчаника израђених од композитних материјала*, Трећи скуп о конструисању, обликовању и дизајну, Нови Сад 2004.
- [11] Ј. Говедаровић, З. Ђорђевић: *Примена нових материјала за израду елемената редуктора*, Девети Север-ов симпозијум о механичким преносницима, Суботица 2003.
- [12] Ј. Говедаровић, З. Ђорђевић: *Примена композитних материјала за израду машинских елемената*, Седми међународни научно-стручни скуп о достигнућима електро и машинске индустрије, Бања Лука 2005.
- [13] Ј. Говедаровић, З. Ђорђевић: *Неке карактеристике вратила израђених од композитних материјала*, Шесто међународно саветовање о достигнућима електро и машинске индустрије, Бања Лука 2003.

- [14] <http://www.hitachi.com/New/cnews/month/2016/04/160426a.pdf>, датум приступа 10.09.2016.
- [15] Б. Стојановић, М. Благојевић: *Механички преносници*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац 2015.
- [16] <http://capitolstampings.com/composite-pulleys/composite-pulleys-flat-idler/>, датум приступа 11.09.2016.
- [17] <http://www.acornbearings.co.uk/downloads/catalogues/power-transmission/belts-and-pulleys/skf-power-transmission-belts.pdf>, датум приступа 12.09.2016.
- [18] В. Николић: *Машински елементи*, Машински факултет Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2004.
- [19] Е. Обершмит: *Озубљења и зупчаници*, Загреб, 1982.
- [20] Ђ. Јовић: *Прорачун једноступеног редуктора*, Пројектни задатак из предмета *Машински елементи 2*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац 2016.