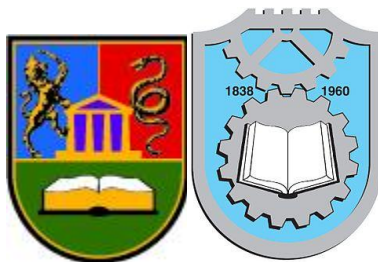


Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Машински елементи 2

Број индекса: 38/2013

Јована Б. Милићевић

**Примена композитних материјала у
аутомобилској индустрији
завршни рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Зорица Ђорђевић - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да обради следеће:

1. Увод,
2. Врсте и карактеристике композитних материјала,
3. Историјат примене композита у аутомобилској индустрији,
4. Израда структурних елемената аутомобила од композитних материјала,
5. Предности и недостаци примене композита у аутомобилској индустрији,
6. Закључак.

Препоручена литература:

[1] З. Ђорђевић, Динамичко понашање вратила од композитних материјала, Докторска дисертација, Машински факултет у Крагујевцу, 2008.

[2] https://www.google.rs/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwj60bDo9oHPAhVDMhoKHeUZCV0QFggaMAA&url=https%3A%2F%2Fwww.mfkv.kg.ac.rs%2Findex.php%2Fs-nastavni-materijali%2Fdoc_download%2F955-predavanje-13&usg=AFQjCNFb_nCkCYjHlcsEHTBki9J_ITCUfg

[3] <https://www.fsb.unizg.hr/polimeri/fileopen.php?id=1298>

Крагујевац, 13.09.2016

Ментор:
др Зорица Ђорђевић, ванр.проф.

Резиме

Композитни материјал је спој два или више различитих материјала са различитим хемијским и физичим особинама. Спајањем, коначни материјал добија нова својства, боља од појединих материјала. У овом раду је представљена примена композитних материјала у аутомобилској индустрији. У уводу је дато објашњење о примени композита, а даље кроз рад речено је која је њихова сврха и наведене су њихове предности. Поред примене у аутомобилској индустрији композити се могу срести у различитим областима, као што су грађевина, машинство, авио индустрија, ракетна индустрија, израда пловних објеката, спортских реквизита, медицинских уређаја... Главне предности композитних материјала су мала густина, висока чврстоћа и ударна отпорност.

Кључне речи: Композитни материјали, аутомобилска индустрија, биокомпозит.

Summary

The composite material is a combination of two or more different materials with different chemical properties and physics. Combining, final material gets a new features, better than individual materials. This work represent a use of composite materials in automotive industry. In the introduction is explained an application of composites, and as we continue through the work we see their purpose and their benefits. Besides to automotive industry composite can be seen in various fields, like a construction, mechanical engineering, aerospace and missile industries, vessels, sports equipment, medical devices... The main advantages of composite materials are low density, high strength and impact resistance.

Keywords: Composite materials, automotive, geocomposite

Садржај

1.0 Увод	5
2.0 Врсте и карактеристике композитних материјала.....	6
2.1 Матрица.....	6
2.2 Полимерни материјали	7
2.3 Композити са додацима	9
3.0 Историјат примене композита у аутомобилској индустрији	12
4.0 Израда структурних елемената аутомобила од композитних материјала	19
5.0 Предности и недостаци примене композита у аутомобилској индустрији	25
6.0 Закључак.....	29
7.0 Литература	30

1.0 Увод

Композитни материјали или композити су састављени од два или више материјала који се разликују по физичком и хемијском саставу. Структурно су нетопиви једно у друго, и уз помоћ микроскопа може се видети да су одвојене. За разлику од индивидуалних материјала, композити имају боља својства као што су већа јачина и крутост, а мања тежина. Они омогућавају лаку израду делова сложене геометрије, лаки су, отпорни на удар, отпорни на замор услед коришћења, имају добру хемијску отпорност и флексибилност у дизајну [1].

У аутомобилској индустрији композити се употребљавају још од 1950-их. Аутомобилска индустрија од тада константно тражи нове начине да смањи тежину возила како би додатно смањили потрошњу горива која утиче на исплативост вожње, очување животне средине, ниске инвестиције у производњу и задовољавајућа механичка својства. Композитни материјали могу да замене челик и притом смање тежину возила. Такође, композити се могу искористити и као замена делова од алуминијума и инжењерске пластике.

Композити који се користе за јефтиније примене састоје се од пластомерне матрице пуњене стакленим влакнима. Често такви композити, ради ниже цене, садрже и минералне честице. Данас се стаклена влакна полако замењују јефтинијим влакнима биљног порекла. Скупље примене укључују слојеве од угљеничних влакана и епоксидних смола.

Полимерни композити све више постају материјали погодни за замену традиционалних материјала у аутомобилској индустрији. У последњих 50 година се њихова употреба знатно повећала. Предности су: мала маса, мања потрошња горива, мањи трошкови што олакшава прелазак на овакву производњу. Употреба им је у почетку била ограничена на мале и споредне компоненте. Велики напредак било је возило *Chevrolet Corvette*, произведено 1953. године. На слици 1.1 је приказан модел из 1954. год. Делови каросерије су били израђени од полиестера ојачаног стакленим влакнима. У Источној Немачкој се 1950-их почео производити *Trabant*, који представља почетак употребе биљних влакана јер му је шасија била направљена од памучних влакана у полиестерској матрици. У касним 1970-има због потребе за мањом масом аутомобила развијене су многе нове примене композитних материјала те је употреба знатно повећана.

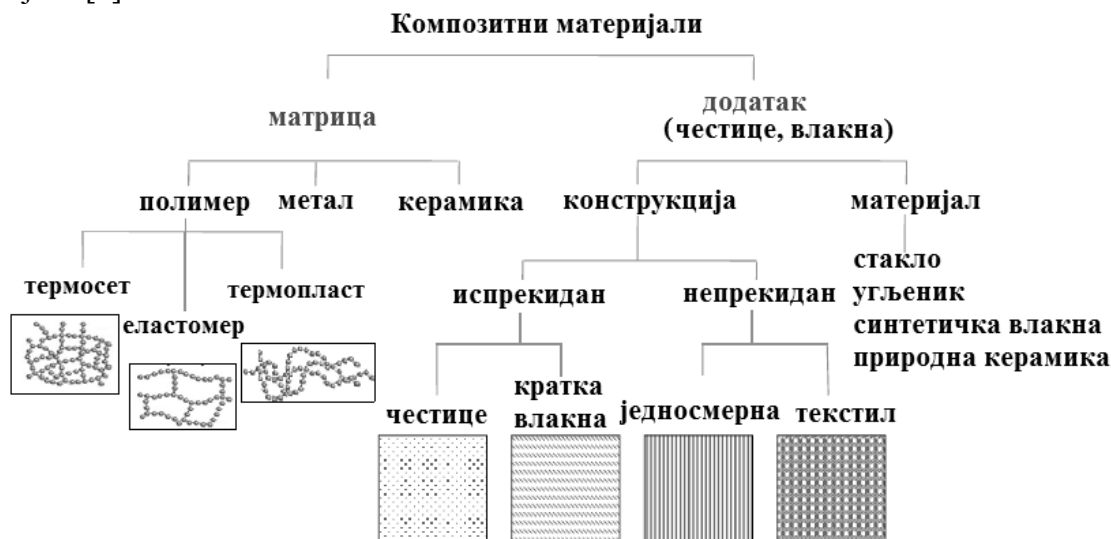


Слика 1.1 Chevrolet Corvette, 1954. год.

Служили су за израду носача хладњака, трансмисионих елемената, лиснатих опруга и точкова. Ињекционо пресовање примењено је 1984. године у изградњи високосеријског аутомобила *Pontiac Fiero* чија је цела каросерија била изграђена од композита. Почетком 1990-их посредно пресовање се показало као погодан поступак производње каросерије.

2.0 Врсте и карактеристике композитних материјала

Композитни материјали развијени су комбинацијом два или више материјала, са сасвим различитим својствима. Индивидуални материјали, када се стопе заједно у јединствени материјал који има своја својства, иако на такав начин не губи своје индивидуалне особине. То је оно што чини композитни материјал тврђи од оригиналног материјала који се користи у композицији. Када је композитни материјал направљен, обично од два материјала, један материјал се зове матрица или везиво, а други материјал је заслужан за ојачање. На слици 2.1 је приказана подела композитних материјала [2].

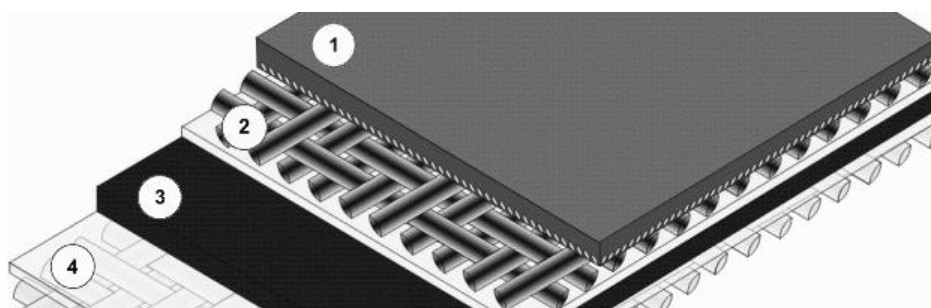


Слика 2.1 Подела композитних материјала

2.1 Матрица

Матрица је тело састојка које служи да се обликује композитни материјал и да му формира његову величину и обим. Она служи за пренос напона на ојачавајуће елементе, заштиту ојачавајућих елемената од спољашњих утицаја, крутост, облик производа и др. Влакна, љускице, честице, плоче и попуњивачи су структурни елементи који одређују унутрашњу структуру композита. Углавном, али не и увек они се могу сматрати додацима композитног материјала.

Многи композити немају матрицу и састављени су од једног или више саставних делова који чине два или више различитих материјала. На слици 2.2 се може видети један од начина слагања композита [2].



Слика 2.2 Слагање композита: 1) Матрица, 2) Први слој влакна, 3) Смола, 4) Други слој влакна

2.2 Полимерни материјали

Полимерни материјали имају велику предност у аутомобилској индустрији. Највећа предност им је мања тежина, а то затим води и до мање потрошње горива.

У индустријској производњи полимери се користе за израду [2]:

- Фолија, кућишта за рачунаре и мониторе,
- Посуда за храну и пиће,
- Текстила, медицинских уређаја, пена, боја,
- Играчака, апарата, сочива, зупчаника, електронских и електричних производа, каросерија и делова аутомобила.

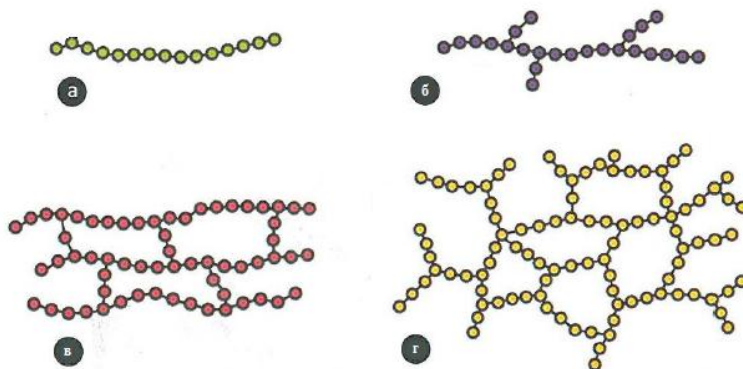
Иако се појам полимер често користи као синоним за пластику, у полимере се у повезаној хемији убраја велики број природних и уметних материјала с различитим својствима.

Полимери се називају и макромолекули, то су супстанце настале међусобним повезивањем молекулских једињења (мономера) ради добијања великих молекула (макромолекула).

Грађа макромолекула се може видети на слици 2.3. Повезивањем мономера настаје реакција полимеризације.

Полимерни материјали, с обзиром на грађу макромолекула, се могу поделити на [2]:

- Линеарне (пластомери),
- Гранате (пластомери),
- Умрежене (еластомери),
- Мрежасте (дуромери).



Слика 2.3 Грађа макромолекула а) линеарна, б) граната, в) умрежена, г) мрежаста

Структура полимерних материјала најчешће је двофазна, пошто поред аморфне има и кристалну грађу. На физичка и механичка својства утиче степен садржаја кристала. Додавањем адитива полимерима могу се побољшати оптичка, механичка и друга својства. Полимери имају два агрегатна стања, а то су чврсто и течност. На ниским температурама су кртки, тврди, крути и стакласти, а на повишеним температурама прелазе у гумасто стање. Прелазак из чврстог у гумасто стање назива се остакљивање. Остакљивање се одвија у температурном интервалу од око 10°C [2].

Према својствима и области примене, полимерне материјале делимо на пластичне (термопластичне и термостабилне) и еластомере.

Полазне сировине за производњу пластике могу бити:

- Минералног порекла (земни гас, нафта, угаљ) и
- Органског порекла (биљног или животињског).

Термопластични материјали или термопласти су полиетилен, полиестирен, плексиглас, најлон, тефлон и други. Утицај температуре на чврстоћу и крутост термопластичних полимера је сличан као код метала. Чврстоћа и модул еластичности се смањују са порастом температуре, а жилавост се повећава.

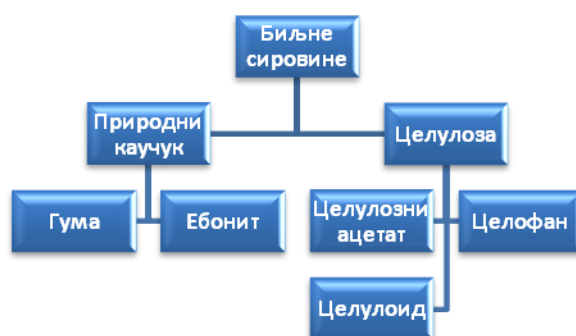
Термостабилни полимери или duroпласти очвршћавају приликом прераде при повишеној температури или под дејством светлости. После отврдњавања не може више успоставити стање пластичности. Под високим температурама duroпласти не горе, него се угљенишу и разграђују. Неки од примера су гума, бакелит, силикон, епоксидне смоле. Производи настали од биљних сировина могу се видети на слици 2.4.

Својства одређеног полимера зависе од:

- Молекулске масе,
- Структуре,
- Степена полимеризације,
- Адитива,
- Заступљености аморфне односно кристалне структуре.

Полимери деле се на [2]:

- Природне - целулоза, скроб, кератин, каучук,
- Полусинтетичке – хемијски модифицирани биополимери из целулозе, целулоид, ацетатна свила из беланчевина (казеин из млека),
- Органско синтетичке - добијени хемијском синтезом (полимеризацијом) из једноставних органских једињења,
- Анорганско синтетичке - добијени хемијском синтезом (полимеризацијом) из једноставних органских и неорганских једињења.



Слика 2.4 Производи настали од биљних сировина

2.3 Композити са додацима

Ојачавајући елементи служе да дају боље механичке карактеристике композитном материјалу и друге карактеристике као што су топлотне и електричне. Задатак ојачала је да буду носиви елемент композита и да обезбеде висок модул еластичности, високу чврстоћу и отпорност на хабање. Својства композита зависе од величине и расподеле матрице и ојачала, индивидуалних својстава, количине, облика, природе и јачине везе.

Према додатуку материјала, деле се на композите [3]:

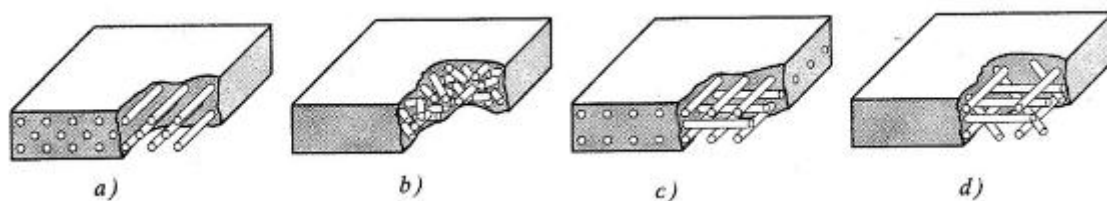
- С додатком честица—велике честице и диспергиране честице,
- С додатком влакана—дуга или кратка и усмерена или неусмерена,
- Структурне или ламинарне - слојевит, станични и сендвич.

Постоје два начина расподеле додатака тј. структурних елемената у композиту. Најчешћи облик појављивања структурних елемената је правилан и поновљив модел, са релативно униформним укрштањима у материјалу и структури, али и са униформном распоређеношћу по материјалу.

Влакнасти и честични композити у којима структурни елемент је равномерно распоређен по калупу, представља хомогени тип композитног материјала. Друга могућност је варијабилни модел структурних елемената који се непонављају ни у унутрашњој форми ни у материјалу. Материјали овог типа се називају степенести композити. У ову категорију спадају лиснати материјали који су састављени од неколико различитих слојева. Слојеви су сложени и додатно међусобно чврсто повезани, а својства варирају обзиром на оријентацију влакана у појединим слојевима (због тога се слојеви слажу различито усмерени).

Композити обавијени нитима могу бити произведени са варијабилном расподелом влакана. Код обе врсте, и код хомогених и код степенестих композита, структурни елементи (влакна и честице) могу бити смештени или у оријентисаном или произвољном распореду.

Различите врсте матричних система композита најразличитијег ткања у две или три димензије даје небројено много могућих комбинација које могу поседовати веома различите механичке, физичке, хемијске и термичке собине. Коначни резултат о крајњим особинама композитних материјала се добија детаљним испитивањима, која морају бити спроведена за сваку комбинацију саставних елемената по питању његових најважнијих особина. За техничку примену свакако су најважнија испитивања термомеханичких карактеристика композитних материјала. На слици 2.4 приказани су различити начини распореда влакнастих ојачала [3].



Слика 2.4 Различити начини распореда влакнастих ојачала:

- a) континуирана једносмерна влакна б) случајно усмерена дисконтинуирана влакна ц) ортогонално распоређена влакна д) вишесмерно усмерена влакна

Континуирана влакна се теже производе и уграђују у матрицу, али осигуравају најбоља својства. Дисконтинуирана влакна с великим коефицијентом знатно се лакше уграђују у матрицу, и тако чине материјал високе крутости и чврстоће.

Садашњи тренд развоја влакнасто матричних композита се одвија у смеру мешања са керамичким, металним и шупљим влакнима, истовремено комбинујући калупе који су јачи, чвршћи и отпорнији на високе температуре. Практично сви синтетички материјали (пластика, гума, керамика и метал) се сада ојачавају влакнима. Влакна се бирају тако даје једно влакно изабрано због његових механичких особина, а друго због сасвим другог разлога као рецимо топлотне отпорности. На пример комбинација од азбестно, метално, влакнастог композита за прављење преносних каишева који се користе за пренос тешких врелих материјала [3].

Неки од често коришћених композита су и:

- Бетон - добијен од цемента и шљунка, представља керамичку матрицу ојачану са великим честицама,
- Стаклопластика - добијена од полиестера и стаклене вуне, представља полимерну матрицу ојачану влакнима,
- Шперплоча - добијена од танке дрвене плоче и лепка, представља структурни слојевит композит.

Примена композитних материјала ојачаних влакнима:

- Гуме за аутомобиле и авионе,
- Фиберглас који се користи за јахте, аутомобиле и авионе,
- Спорски материјали нових технологија: тениски рекети, скије, голф штапови,
- Делови за авионску индустрију
- Ракетну и нуклеарну технику

Врсте влакана које се користе су влакнасто стакло, угљенично влакно, армидно влакно, бор влакна, базалт влакна и природна влакана (дрво, лан, конопља...).

Врсте пластичних полимера су Епоxy, Vinyl Ester, Polyester, Polyurethane, Polypropylene.

Додавање ојачала полимерној матрици служи ради:

- повећања густине,
- модула еластичности,
- савојне чврстоће,
- смањење коефицијента топлотног ширења,
- повећање тврдоће и топлотне постојаности,
- побољшање квалитета површине,
- модификација топлотне и електричне проводљивости,
- повећање вискозности, итд.

Минерална ојачала - Најчешће се користи CaCO_3 , као природни материјал и синтетски. Служи за модификовање површине. Додаје се еластомерима, полиуретанима, полиолефинима, дуромерима. Смањује запаљивост и побољшава могућност бојања пластике.

Каолин - главно ојачало из породице глина, користи се у инжењерским пластикама, побољшава тврдоћу, хемијску постојаност, електрична својства, квалитет површине, смањује апсорпцију влаге.

Силика, SiO_2 - најраширенији кристални облик: α -кварц у облику песка или брашна, топлотна и хемијска отпорност, добра топлотна проводљивост, добра електрична својства, прозирност.

Талк, $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{11}(\text{OH})_2$ - слојевити силикат, други по заступљености у термопластима после CaCO_3 , примена у полиолефинима, побољшава електрична својства, хемијска и топлотна, постојаност на влагу.

Тињци - алуминосиликати, слојевите кристалне структуре, садржавају 2.5-4.5% воде што отежава интеракцију с пластомерима, обрада површине: силани, хлорирани угљиководици, полимерни воскови, добра механичка, електрична и топлотна својства повећава тврдоћу и димензијску стабилност. Примена у полиолефинима (ПЕ), пластомерним полиестерима, полиамидима и дуомерима (епоксиди, полиестери, полиуретани)

Титан диоксид - бели пигмент у бојама

Цинк оксид - пигмент, УВ апсорбер

Метална пунила Al, Cr, Cu, Fe, Ni, Ag, Pb, Zn, W, легуре у облику праха, плочица, вискера. Својства и примена полимера с металним ојачалима су електрична проводљивост, одвођење статичког електрицитета, заштита од радијације, апсорбери микровалова, проводљивост топлоте.

Чађа - ојачавање еластомера, примена у пластомерима, заштита од УВ, пигмент, смањење цене коштања, повећање топлотне и електричне проводљивости.

Графит - слојевити облик угљеника, повећање топлотне и електричне проводљивости, додаток графита минералним ојачалима значајно смањује абразију и побољшава прерадљивост.

Стаклена ојачала су облика стакленог праха, куглица и микробалона.

Стаклени прах: А стакло, величина честица $25 \mu\text{m}$ до 1mm , врло абразивно (замјењује се са стакленим куглицама).

Стаклене куглице: пречник $4 \mu\text{m}$ до 5mm , обрада с агенсима за спајање, побољшање модула, димензијске постојаности, често се комбинују са сеченим стакленим влакнима (у поликарбонатима, итд.)

Микробалони - шупље куглице, А, Д или Е-стакло, употреба у пенама.

Пречник $5\text{--}250 \mu\text{m}$, дебљина зида: $0.3\text{--}2 \mu\text{m}$

Дрвено брашно или отпадно дрво - употребљава се као јефтинија алтернатива минералним ојачалима у пластомерима.

Одабир ојачала према економским критеријумима служи да замени скупљи полимер с евентуално јефтинијим пуњеним материјалом.

Постизање специфичних својстава могуће је само с одређеним врстама ојачала.

3.0 Историјат примене композита у аутомобилској индустрији

Историја композита јавља се још из древних времена када су се композити користили у грађевини. Тада је формиран грађевински материјал комбинацијом сламе и блата. Слама је обезбеђивала структуру и снагу, а блато се понашало као везиво.

Код влакана ојачана пластиком влакна обезбеђују структуру и снагу, док пластични полимер држи влакна заједно.

Најчешћи пример композита у ширем смислу је бетон. У ову сврху, челична конструкција арматуре даје снагу и крутост бетону, док цемент држи арматуру стационарном. Сама армирана шипка би се савијала превише, а сам цемент би се лако сломио. Међутим, када се комбинују и формирају композит, добија се изузетно крут материјал.

Употреба композита је временом еволуирала тако да се обично данас користе влакна ојачана пластиком. Овај тип композита се интензивно користи у нашим свакодневним животима. Свакодневна употреба влакана ојачане пластике јавља се код авиона, бродова и морске спортске опреме, тениских рекета, даске за сурфовање, хокеј штапова, ауто делова, лопатице турбина, оклопа за тело, грађевинских материјала, водоводних цеви, мостова, ручке алата, итд. [4].

Данас су ретки делови аутомобила који нису направљени од композитних материјала. У првом реду нагласак се ставља на добит, а онда и на заштиту околине. Стога се спроводе бројна истраживања и све више расте употреба биоматеријала у композитима. За моделе код којих цена није ограничавајући фактор употребљавају се композити од епоксидне дуромерне матрице и влакана. Осим развоја лакших композита с бољим механичким својствима ради се на развоју свих компонената у композиту.

Аутомобилска индустрија једна је од најважнијих индустријских грана у свету. Она је велики потрошач пластичних композита. Примена полимерних композита у аутомобилској индустрији почиње 1939. год. када је Хенри Форд конструисао први аутомобил у којем су употребљена стаклена и сојина влакна, влакна конопље у комбинацији с дуромерном матрицом (слика 3.1). За унутрашњост возила већином су коришћени композити са кокосовим влакнима, који су у оно време били револуционарни. Полимерни композити превладавали су каросеријом. Тада се и већина становништва САД-а бавила пољопривредом, а Хенри Форд је хтео да повеже агро културу с аутомобилском индустријом. Уз то био је уверен да ће пластична каросерија бити сигурнија у сударима од челичне. Године 1939. почео је Други светски рат те је наступила несташица. Нажалост у то време се уједно и прекинуо развој тог аутомобила. Аутомобил је био масе 900 kg, тј. 450 kg лакши од тадашњег челичног аутомобила [4].



Слика 3.1 Први аутомобил Хенрија Форда од полимерних композита

Велик корак напред било је возило *Chevrolet Corvette EX-122* из 1953. год., чији су делови каросерије били израђени од полипропилена ојачаног стакленим влакнима. Произведено је 300 аутомобила (слика 3.2).



Слика 3.2 *Chevrolet Corvette EX-122* из 1953. год.

Први серијски произведен аутомобил у Норвешкој с каросеријом од материјала ојачаног стакленим влакнима био је *Troll* из 1956. год. Погонио га је двотактни мотор *Gutbrod* од 22 kW са ниском потрошњом од 5 l/100 km. Максимална брзина била је 130 km/h (слика 3.3) [4].



Слика 3.3 *Troll* из 1956. год.

Трабант је био по приступачнијој цени па је многима била једина прилика да набаве аутомобил. Већи део каросерије био је израђен од дуромера ојачаног памучним влакнима. Произведена су три милиона примерака и постао је најпознатији аутомобил направљен од полимерног композита. Трабант је у самом почетку производње био један од технолошки напреднијих аутомобила (слика 3.4).

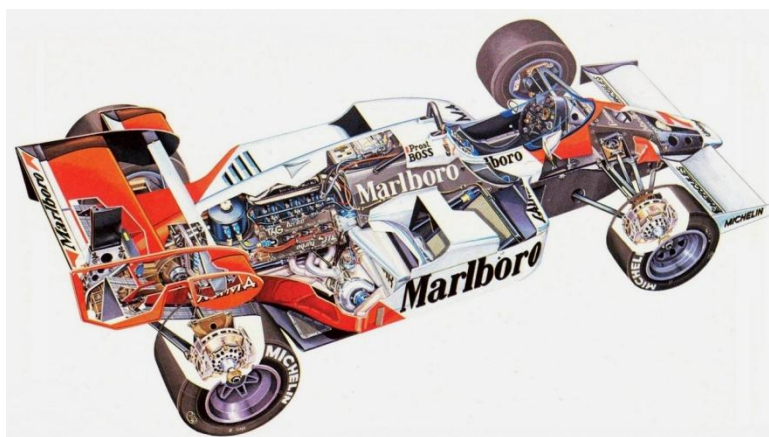


Слика 3.4 Трабант

Било је питање времена када ће се у аутомобилским пнеуматикама почети примењивати стаклена влакна па је тако 1967. год. фирма *Armstrong Rubber* представила и тај новитет. Почетком 70-их година прошлог века осмишљено је равно пресовање осмољеног листа. Тих година потреба за мањом масом аутомобила резултирала је широм применом полимерних композита за производњу структурних компонената, а не само козметичких делова аутомобила. Од полимерних композита израђивали су се носачи хладњака мотора и делови преноса [4].

Употреба композитних материјала за производњу тркачких аутомобила био је значајна прекретница за достигнућа у аутомобилској индустрији. Најранији тркачки аутомобили углавном су се правили са алуминијумским кућиштем, које је било склоно хаварији. У касним 1980-им, употреба напредних композитних материјала у тркачкој индустрији је довела до револуције у свету аутомобилске индустрије. Таква структура обезбедила је адекватно решење за шасију тркачког аутомобила, јер аутомобил није био само лак, већ и снажан и пружао је много више безбедности за возача, у случају судара. Полако и постепено, такви материјали су се користили у производњи спортских аутомобила, што је све више постало исплативо. Данас коришћење композитних материјала у аутомобилској индустрији је мање или више норма.

Први болид Формуле 1 чија је шасија у целости била направљена од полимера ојачаног угљениковим влакнима је *McLarenov MP4/1* из 1982. год (слика 3.5). Болид је био много чвршћи и лаганији него конкурентски болиди, тако да су успех и пробијање композита у мотоспорту обећавали. Формулом 1 је почело ново доба.



Слика 3.5 McLarenov –Формула 1

Ињекцијским пресовањем 1984. год. је произведена каросерија за *Pontiac Fiero*. *McLaren* је био пионир што се тиче шасије од угљикових влакана и у категорији друмских аутомобила. Од 1992. до 1998. год. произведено је 106 примерака модела Формуле 1. Био је уписан у књигу рекорда захваљујући лаганој шасији и мотору. Угљеникова влакна превладавала су и у унутрашњости аутомобила, а такође и у моторном простору и вешању. Данас је теже пронаћи део који није направљен од композитних материјала [4].

- **Примена полимерних композита код каросерије аутомобила**

Углавном се за каросерије употребљавају епоксидне смоле ојачане стакленим или угљениковим влакнима. Каросерија од полимерних композита у данашње време је популарна међу супер аутомобилима. Висока чврстоћа и тврдоћа уз веома малу масу најважнија су својства такве врсте каросерије. Трошкови израде су високи па се таква каросерија употребљава само у возилима којима су споменута својства битна, дакле у спортским аутомобилима намењена за трке, где је битно постићи велико убрзање, брзине и поузданост.

Такав пример је аутомобил *Lexus LFA*, чија је каросерија направљена од 65% полимерних композита са основом од епоксидне смоле ојачане угљениковим влакнима (слика 3.6). Тиме је каросерија олакшана за чак 100 kg.



Слика 3.6 Lexus LFA

Мало јефтинија варијанта каросерије је са стакленим влакнима ојачаним епоксидном смолом. Код модела *Audi R8* употребљена је таква врста каросерије, чиме је маса смањена за 31,5 kg. На слици 3.7 приказана је каросерија у којој се употребљава полимерни композит ојачан стакленим влакнима.



Слика 3.7 Audi R8

- **Примена полимерних композита код екстеријера аутомобила**

Од полимерних композита су поклопци мотора, браници, врата и остале облоге које се могу видети на аутомобилу. На *Corvetti Stingray 2014.* смањена је маса употребом композита ојачаног угљениковим влакнима на поклопцу мотора, блатобранима, деловима крова, браницима те заштитним деловима подвоза. Маса је тиме смањена за 30%, а смањење масе значи већу искористивост и мању потрошњу горива. Притом празнине на споју између блатобрана и браника су мање, што значи да је производња прецизнија, а одступања мања. На слици 3.8 приказана је *Corvette Stingray* [4].



Слика 3.8 *Corvetti Stingray 2014.*

Полимерни композити су релативно скупи материјали за примену у свакодневним аутомобилима тако да је *Ford* одрадио модел *Focus* и доказао да ће ти материјали с временом бити уобичајени и бити за шири круг купаца. *Ford Focus* је употребом поклопца мотора ојачаним угљениковим влакнима постигао и већу сигурност путника и пешака у случају незгоде.

Јефтинији делови екстеријера су ојачани стакленим влакнима. Лошијих су својстава од делова ојачаних угљениковим влакнима па је складно томе и нижа цена. Маса је и даље мања од истих делова произведених од металних материјала. Композити ојачани стакленим влакнима имају изврсна физичка својства, топлотну и хемијску постојаност, уз стабилност облика и својстава при повишеним температурама. Одликују се високом тврдоћом и крутошћу, могућношћу бојења површине као и добром отпорношћу на абразију и атмосферске утицаје. Набројена својства чине га извршним избором за производњу већих делова као што су предње маске аутомобила, али и мањих делова као што су делови метлица брисача, климатизације и грејања. Израда везног лима ојачаног стакленим влакнима може се видети на слици 3.9. Производ је пронашао примену зато што је много боље решење од угљеничног челика или алуминијума. Прва је ставка свакако маса, а на то се надовезује и постојаност на корозију, јефтиније одржавање и нема потребе ни за каквим премазима. Исто тако отпорност на удар новије верзије везног лима је већа [4].



Слика 3.9 Везни лим ојачан стакленим влакнима

- **Примена полимерних композита код ентеријера аутомобила**

Полимерни композити употребљавају се за израду дела врата аутомобила. Постоје и унутарашњи модули врата произведени од полипропиленске матрице ојачане стакленим влакнима. Маса је смањена уз боља својства затезне чврстоће. Битна је ставка и постојаност при повишеним температурама јер су модерни аутомобили пуни електронике па се често кроз модуле врата проводе различите електроничке инсталације. Панели врата причвршћени су завртњима за спољну оплату врата. Пажња је посвећена и том сегменту те се приликом причвршћивања завртњима панели не оштећују. Уклањањем тог проблема нестао је и проблем с неугодним звуковима. На слици 3.10 приказан је модул врата за *Chrysler Jeep Liberty* израђен од полипропилена ојачаног стакленим влакнима. За тај је производ фирма *Faurecia Interior Systems* номинована за награду за иновативност 2010. год. [4].



Слика 3.10 Модул врата за *Chrysler Jeep Liberty*

Органска влакна биљног порекла данас се најчешће користе за делове у унутрашњости аутомобила. Употребљавају се претежно влакна лана и конопља у комбинацији са полипропиленском и полиамидном матрицом. Таква варијанта унутарашњих оплата врата мало је јефтинија и има задовољавајућа својства, па су готово све унутарашње оплате израђене од таквог композита.

На располагању су и угљеникова влакна са малом масом и егзотичним изгледом, што је заправо најчешћи разлог производње таквих панела. На слици 3.11 приказан је панел врата *Ferrarija F430 Scuderije*.



Слика 3.11 Панел врата *Ferrarija F430 Scuderije*

Најпрестижнији аутомобили имају композите ојачане угљиковим влакнима због егзотичног изгледа. У унутрашњости аутомобила могу се наћи различите тканине, најчешће полипропиленске матрице ојачане природним влакнима. Сусрећу се у облику оплата врата, оплата пртљажног простора и кровног тапацирања. Веома угодан материјал је мешавина полиестера и полиуретана и има трговачки назив *Alcantara*. Од осталих производа направљених од полимерних композита у унутрашњости аутомобила је пртљак или мањи зупчаници за погон казальки контролне плоче. Делови тунела вентилације такође су направљени од полимерних композита, као и средишња огледала за бољу видљивост и опрезност у вожњи [4].

• Примена полимерних композита код вешања аутомобила

Код *Audi 2014*. израђене су опруге амортизера од епоксидне смоле ојачане стакленим влакнима. Опруге су 40 % лакше од челичних, а трајност им је пет пута дужа од челичне опруге. Предност композитних опруга је њихова постојаност на корозију и хемикалије. Постоје и лиснате опруге од епоксидне смоле ојачане стакленим влакнима, које су такође замениле челични материјал. Ове опруге боље пригушују вибрације те производе мање буке при савијању.

Данас се улаже доста у аутомобилске пнеуматике како би им се побољшала својства. Пнеуматици иду на фелне, а досад коришћене фелне од алуминијум и магнезијум легура замењени су фелнама од полимерних композита. Употребом епоксидне смоле ојачане угљениковим влакнима смањена је емисија CO₂ за 2 до 3% те маса за 20 kg по сету фелна, а затезна чврстоћа је 4,5 пута већа.

4.0 Израда структурних елемената аутомобила од композитних материјала

Делови структурних елемената аутомобила изграђених од композитних материјала су делови каросерије, комплетне каросерије, волани, браници, вратила трансмисије, шасије, навлаке, седишта, врата и др.(слика 4.1).



Слика 4.1 Делови аутомобила од композитних материјала

- **Погонско вратило са задњом вучом**

Један од структурних елемената је погонско вратило за аутомобиле са задњом вучом направљено од композита и алуминијума. Његова улога је да пренесе снагу од мотора, преко диференцијала до задњих точкова. Код путничког или лако теретног возила погонско вратило треба да пренесе обртни момент вредности преко 3500 Nm, а критични број обртаја треба да буде већи од 6500 min⁻¹ [5].

Челично погонско вратило, када има већу дужину од 1m, ради се из два дела, а композитно може из једног дела и притом би имало боље карактеристике од челичног (слика 4.2).

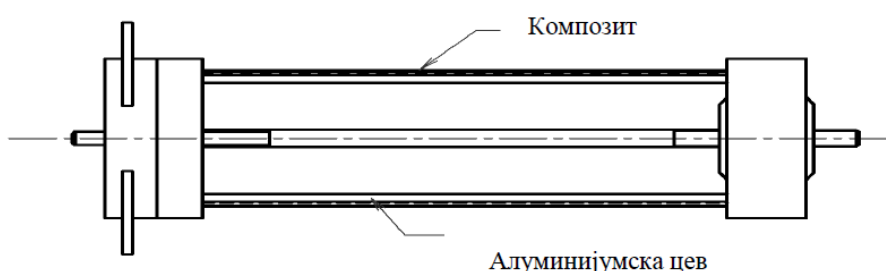


Слика 4.2 Челично погонско вратило

Једноделно композитно погонско вратило може достићи критични број обртаја и до 9200 min⁻¹ због карбонских влакна и епокси композитних материјала који имају око четири пута већу специфичну крутост од челика или алуминијума. Његове предности су смањена бука и вибрације, 60% лакше од дводелног челичног погонског вратила, смањена маса ауто, већа заморна издржљивост, већа корозиона постојност, повећан радни век, већа безбедност возача, смањено време монтаже, смањени трошкови одржавања и број саставних делова.

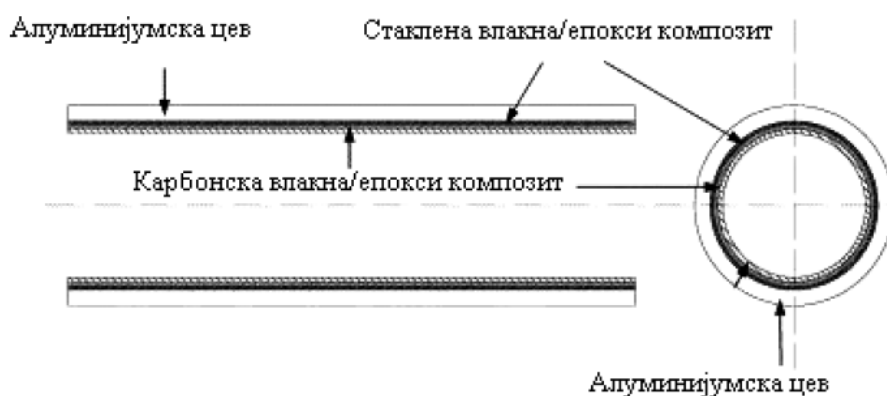
Недостатак му је висока цена карбонских влакана и епокси композита. Решење је у изради комбинованог вратила од алуминијума и композитног материјала. Улога алуминијума је да пренесе потребну вредност обртног момента, а улога карбонских и епокси композита је повећање сопствених фреквенција услед савијања.

Прва верзија погонског вратила од алуминијума и композита састојала се од алуминијумске цеви око које је био уграђен омот од једног слоја стаклених влакана и више слојева карбонских и епокси пре-прег материјала. Слој стаклених влакана је имао улогу да спечи појаву корозије између алуминијума и карбонских влакана. Велике вредности сопствених фреквенција вратила добија се када су мале вредности углова оријентације влакана у односу на осу вратила. Овде су зато употребљени слојеви са оријентацијом $[\pm 5]_{4t}$ јер композит са оријентацијом од 0° има малу отпорност на затезање. На слици 4.3 се види шема комбинованог погонског вратила [6].



Слика 4.3 Комбиновано композитно вратило

Данас се све више приступа новом начину израде комбинованог вратила где су слојеви карбонских влакана и епокси композита урађени по унутрашњој површини алуминијумске цеви. На овакав начин се спречава оштећење композитног слоја, а смањена је и корозија. Маса оваквог вратила је око 25% масе класичног челичног вратила, а носивост је далеко премашила могућности класичног металног вратила. На слици 4.4 се види шема нове верзије комбинованог погонског вратила [6].

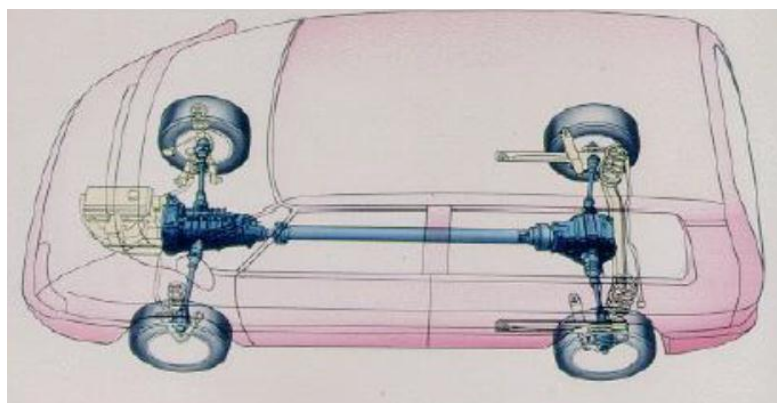


Слика 4.4 Комбиновано погонско вратило

Код израде комбинованог вратила тешко је спајање комбинованог дела са челичним или алуминијумским ободом спојнице. Постоје три начина за спајање ова два дела, а то су:

1. Механички спој завртњима или закивцима,
2. Спајање лепљењем,
3. Спајање заваривањем.

Код механичког споја веза може бити остварена завртњима или закивцима. У отворима за завртње или закивке се може јавити концентracије напона, замор и корозија. Код залепљеног споја користи се више слојева лепка и расподела оптерећења је на више додирних површина. У поређењу са механичким спојем нису потребни отвори и већа је отпорност на замор. Спајање лепљењем захтева добро обрађене и припремљене површине које се лепе и приликом оштећења у току експлоатације тешко их је раставити. Спајање заваривањем сједињавају се две металне подлоге у комбинацији са температуром и металуршким условима. Зато због температуре може доћи до различитог ширења спољашњег и унутрашњег дела. На слици 4.5 се види композитно погонско вратило [6].



Слика 4.5 Композитно погонско вратило

• Шасија аутомобила

За производњу шасија произвођачи аутомобила користе компресионо ливење у којој се композитни материјали трансформишу у било које ливено једнослојно или вишеслојно једињење. Недавне иновације у области напредних композита у аутомобилској индустрији за производњу довеле су до употребе угљеничних влакана од ојачане пластике, са различитим термосет композитима, укључујући армирана влакана и карбонска влакана у матрици епоксидне смоле. Тркачки аутомобили су почетком 90-их имали шасије направљене од пластике ојачане са карбонским влаканима. Процес се састоји у осмољавању карбонских влакана која се чувају у калупу, а који се потом смешта у аутоклав, уз веома високе температуре и притисак.

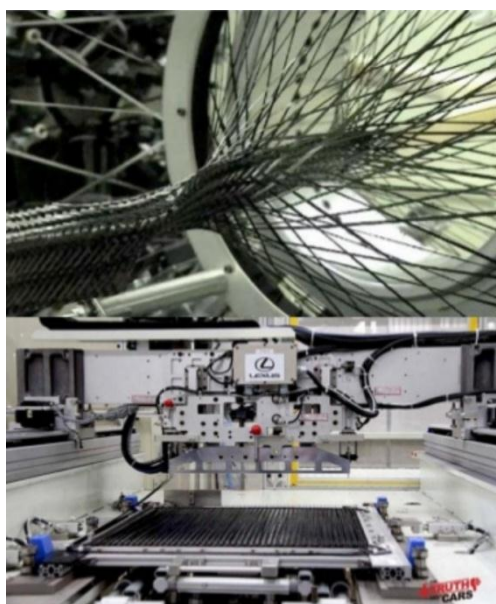
Шасија је унутрашњи део аутомобила. Она садржи мотор, уређаје за напајање горивом, подмазивање, хлађење, трансмисију, мењач, карданско вратило, погонски мост, ходне делове (оквир, осовине точкова), уређај за управљање (волан с деловима), уређај за кочење (кочнице с деловима), електро уређаје (акумулатор, алтернатор, светла и сигнализацију). На шасију се уграђује каросерија и остала опрема аутомобила.

Шасија треба да испуни одређене услове, а то су:

1. Мања маса тела,
2. Минималан број компоненти,
3. Обезбеди довољан простор за путнике и пртљаг,
4. Издржљивост на вибрације у току вожње,
5. Производња јефтина и лака,
6. Лепог изгледа,
7. Равномерно распоређено оптерећење,
8. Добра вентилација,
9. Дуг радни век.

Шасија направљена од челика је замењена шасијом од алуминијума при чему је тежина смањена 40%, али је и даље крута, а притом и скупа за масовну производњу. *Audi A8* је први кренуо са масовном производњом алуминијумске шасије.

Када говоримо о лаганим материјалима у аутомобилској индустрији свакако су карбонска влакна (угљенична влакна) и кевлар најлакши. То су синтетички материјали који се производе у облику веома танких влакана која се потом плету у тканину, убацују у калуп те заливају епоксидом чијим отврдњавањем добија се чврст и лаган материјал. Делови направљени од карбонских влакана су око пет пута чвршћи од делова направљених од челика уз шта имају и знатно мању масу. Кевлар, који такође долази у облику влакана, односно плетива, осмислили су Стефани Кволек и Херберт Бладес у лабораторијима DuPont, 1965. год. Кевлар је материјал још бољих својстава од карбонских влакана, али уједно и скупљи. Али, за аутомобилску индустрију која има старе производне процесе, све је скупо. Кевлар се почетком 80-их прошлог века почео користити у Формули 1, а однедавно и у напреднијим аутомобилима. Добро подноси високе температуре и отпоран је на старење. Начин како аутомобилска индустрија прави материјал од карбонских и арамидних влакана научила је од текстилне индустрије. Овај материјал се једноставно обликује према калупу и залије епоксидом. Проблем се јавља када треба да се направи затворен кружни облик, цев или слично. У изради таквих облика примењују се машине за плетење тканина какве су кориштене при изради предњих деформабилних структура на *Mercedes Benz* и моделу *SLR McLaren*. На слици 4.6 види се машина за плетење карбонских влакана [7].



Слика 4.6 Начини ткања карбонских влакана

Прва шасија од карбонских влакана у Формули 1 припадала је McLarenovом МР4/1 из 1981. год. Карбонска влакна су двоструко јача и пет пута лакша од челика. Пре него што се обложе смолом да се стврдну, карбонска влакна пролазе кроз процес ткања. Постоје различите врсте тог специјалног ткања. Најчешће се користе 2 начина (weave и twill), зависно од својства који су потребни. McLaren готово увек користи други начин. На слици 4.7 види се шасија од карбонских влакана [7].



Слика 4.7 Карбонска шасија

Научници из области материјала имају главну улогу када су у питању дизајн и технике производње болида. Они треба да гарантују да одабрани материјали пружају возачу идеалан спој безбедности и ефикасности, као и остваривање што бољих резултата у трци. Развој нових материјала и технологија омогућује да аутомобили Формуле 1 постану лакши, безбеднији и бржи него икада пре. Композити са угљеничним влакнима данас представљају скоро 85% материјала делова болида Формуле 1 (слика 4.8) [8].

За производњу угљеничних влакана се користе три сировине: смола, вештачка свила и полиакрилонитрил. Висока температура термичке обраде и примена притиска током процесирања угљеничних влакана су кључни елементи за добијање квалитетних влакана изузетних перформанси које се захтевају у Формули 1. Високи захтеви се објашњавају чињеницом да влакна почињу да се оријентишу и добијају жељену морфологију и перформансе тек при вишој температури и притиску. Композитни материјал од ког се прави тело болида мора да буде изузетно јак и отпоран, нарочито приликом ударца. Неопходно је да сила удара може да се транспортује кроз материјал, и на крају апсорбује како би се обезбедила што мања оштећења. Сви ови захтеви су постигнути употребом композита са угљеничним влакнима [8].



Слика 4.8 Најновији модел болида Формуле 1

- **Хаубе, врата и кров од композита, наноструктуре и суперкондензатора - решење за електроаутомобиле**

Оловни и никал-метал-кадмијев акумулатор је претежак за електричне аутомобиле. Решење су понудили стручњаци Волва, који су развили нову генерацију акумулатора, састављених од угљичних влакана, наноструктурних батерија и суперкондензатора. Нови састав ће најпре применити на поклопцу пртљага модела С80, а то је могуће и на предњој хауби, вратима и крову. Израда сендвич конструкције исто је чврста и издржљива те олакшава те елементе за 50 %.

- **Спортски двосед без крова од композитних материјала**

Honda EV-STER је мали спортски двосед без крова. Може се видети на слици 4.9. Како би се смањила маса аутомобила коришћен је композитни материјал уз динамичан и иновативан дизајн и изврсне еколошке перформансе. Коришћење овог материјала се позитивно одразило и на аутономију вожње, која износи 160 km с једним пуњењем батерија. Погон је на задње точкове, а управља се са две полуге које су у комбинацији с низом малих *LC (Liquid Crystal)* дисплеја.



Слика 4.9 Honda EV-STER

5.0 Предности и недостаци примене композита у аутомобилској индустрији

• Предности и недостаци композитних материјала

Предности композитних материјала:

1. Висока чврстоћа,
2. Висок модул еластичности,
3. Мала густина,
4. Висока специфична чврстоћа,
5. Ударна отпорност,
6. Заморна отпорност,
7. Корозиона отпорност,
8. Пригушење,
9. Анизотропија,
10. Лака покретљивост,
11. Добра савитљивост,
12. Погодност за прављење прототипова,
13. Отпорност на буку и вибрације,
14. Дужи животни век,
15. Лако одржавање,
16. Лакша уградња композитних делова од челичних и алуминијумских,
17. Могу се обликовати тако да задовоље и најсложеније захтеве.

Недостаци композитних материјала:

1. Спора производња,
2. Висока цена,
3. Токсичност,
4. Запаљивост,
5. Непостојаност у агресивним срединама,
6. Недовољно стручне радне снаге,
7. Слабо познавање у стручним круговима,
8. Осетљивост на влагу,
9. Осетљивост на температуру,
10. Непогодност оправке.

• Предности и недостаци природних влакана

Добре особине природних влакана [9]:

1. Биоразградива су,
2. Лако доступна,
3. Храпаве су површине и специфичне слојевите стуктуре са добрим адхезијским својствима,
4. Разградњом не настаје CO_2 ,
5. Ниска цена и мала потрошња енергије током производње,
6. Сигурнија су за руковање и производњу у односу на синтетичка влакна,
7. Слична механичка својства као стаклена влакна,
8. Мала густина, добра акустичност и изолацијска својства.

Лоше особине природних влакна:

1. Осетљива су на труљење услед интеракције с микроорганизама и гљивицима,
2. Влакана почињу да се разлажу у распону од 90° до 200°C, па су темепературе обраде и избор материјала матрице ограничени,
3. Димензије влакна и механичка својства варирају зависно од врсте биљака,
4. Смањује се земљиште за садњу прехрабраних сорти.



Слика 5.1 Употреба природних влакана код аутомобила

- **Предности и недостаци биљних влакана у поређењу са стакленим у композитима**

У поређењу са стакленим влакнима, биљна влакна се одликују многим предностима, која су утолико вреднија јер се постижу без знатне промене или губитка механичких и акустичних својстава. Нижа цена већине биљних влакана (од 25 до 50 % у односу на стаклена) један је од важнијих, ако не и главни разлог преласка на композите пуњене тим влакнима. Биљна влакна драстично снижавају масу уз задржавање механичких својстава композита. Најбољи пример је панел за врата који, уз иста својства, грађен од композита од биљних влакана има масу од 5 kg, док је онај пуњен стакленим влакнима масе 9 kg. Због ниже густине, која никад није виша од $1,5 \text{ g/cm}^3$, компоненте не само да су лакше него и аутомобили грађени од њих троше мање горива. Биљна влакна показују већу сигурност у случају судара јер се не ломе. Добри су акустични изолатори због шупље станичне структуре. Из истог су разлога такви композити и добри топлотни изолатори. Биљна влакна се лакше режу и слабије су абразивна према опреми за прераду од стаклених влакана. За разлику од стаклених влакана не утичу негативно на здравље корисника. Будући да је пољопривредни производ, биљна влакна се лако добављају и доступна су у целом свету. При производњи користи мало енергије, око четири пута мање него за исту масу стаклених влакана [9].

Замена стаклених влакана биљним као резултат има економске, социјалне и еколошке предности. Разлози су многобројни: биљна влакна као што су влакна лана, конопље, агаве, јуте, цурауа (врста из породице ананаса) и друго јефтинија су и лакша од стаклених влакана те их је лако поново обрадити након употребе. Примена биљних влакана у композитима у аутомобилском сектору нагло расте, 20% годишње. Од наведених посебно су занимљива влакна лана и конопље, која се највише користе у аутомобилској индустрији и цурауа влакна, чија су физичка својства готово једнака стакленим влакнима. Њихова примена не само да је око 50% јефтинија него би и придонела економском развоју амазонске регије где се узгаја.

Највећи недостатак биљних влакана су превелике осцилације у квалитету, који зависи од узгоја, и апсорпција влаге која компликује примену.

- **Предности лана као биокомпозита**

С развојем подручја техничког текстила расте интересовање за ланена влакна као материјала за израду биокомпозита. Лан има слична механичка својства као стаклена и нека угљенична влакна, али због својих микроморфолошких карактеристика мање је густине, храпаве површине, специфичне слојевите структуре и апсорптиван те не узрокује алергијске реакције. Приликом прераде и употребе влакана не заостају никакви отпаци, већ сваки део након прераде се може искористити. Тако се и кратка влакна лана сматрају високо вредним састојком изолационих материјала који се уграђују у аутомобиле и разна друга транспортна возила због отпорности на температуру, мале тежине, нетопљивости и биоразградивости. Такође, дрвенасти се остаци након издвајања влакана из стабљике искоришћавају за израду управљачких плоча у аутомобилима. Ланена влакна за ојачање у биокомпозитима коришћена су већ током Другог светског рата у изградњи *Spitfire* авиона. Данас такви биокомпозити налазе широку примену на подручју аутомобилске, авио и грађевинске индустрије (слика 5.2). Многи произвођачи аутомобила као *Mercedes Benz* уграђују биокомпозите с ланеним влакнима у своје аутомобиле. Ови композити посебно су погодни за израду унутаршњих делова аутомобила, на пример замењују стаклена влакна у композитима од којих су изграђени унутарашњи панели врата, преградне полице, наслони седла, покривач резервне гуме те остале унутрашње пресвлаке [9].

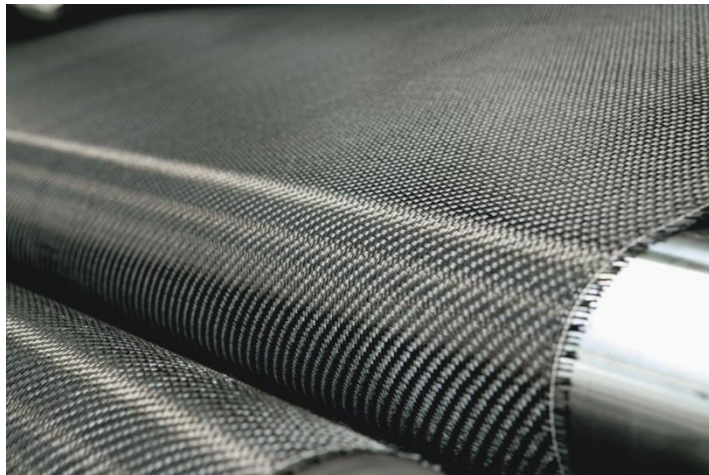


Слика 5.2 Биокомпозит

- **Предности угљеничних влакана**

Предности угљеничних влакана (слика 5.3) [9]:

1. Велика чврстоћа и велик модул еластичности,
2. Велика крутост,
3. Мала густина у односу на металне нити,
4. Изврсна отпорност на топлоту (термички распад у подручју 3600 до 4000°C),
5. Веома слаба горивост,
6. Хемијска инертност,
7. Отпорност на корозију,
8. Отпорност на киселине и органске раствараче,
9. Добра топлотна и електрична проводљивост,
10. Немагнетичност,
11. Врло мала апсорпција рендгенских зрака,
12. Неупијање влаге,
13. Изврсна биокompatibilност и мала маса.



Слика 5.3 Угљенична влакна

Предност примене композитних материјала у односу на конвенционалне материјале се огледа у могућности широког варирања практично свих својстава материјала од којих су састављени. Тражена својства се постижу путем избора компонената са циљем да се искористе њихове најбоље особине. У неким случајевима најбољи резултати могу бити постигнути употребом комбинације композита и металних материјала [10].

6.0 Закључак

Композитни материјали или композити су састављени од два или више материјала који се разликују по физичком и хемијском саставу. Структурно су нетопиви једно у друго, и уз помоћ микроскопа могу се видети одвојено. За разлику од индивидуалних материјала, композити имају боља својства као што су већа јачина и крутост. Они омогућавају лаку израду делова сложене геометрије, лаки су, отпорни на удар, отпорни на замор услед коришћења, имају добру хемијску отпорност и флексибилност у дизајну итд.

Примена полимерних композита у аутомобилској индустрији почиње 1939. год. када је Хенри Форд конструисао први аутомобил у којем су употребљена стаклена и сојина влакна, влакна конопље у комбинацији с дуромерном матрицом. Од тада композити се све више користе. Њихова највећа примена је код тркачких аутомобила.

Композити који се најчешће користе у аутомобилској индустрији су композити са стакленим влакнима, са биљним влакнима, са угљеничним или карбонским влакнима, са армидним влакнима и др.

Делови структурних елемената аутомобила изграђени од композитних материјала су делови каросерије, комплетне каросерије, волани, браници, вратила трансмисије, шасије, навлаке, седишта, врата и др.

С развојем подручја техничког текстила расте интересовање за израду биокомпозита. Ланена влакна имају слична механичка својства као стаклена и нека угљенична влакна, али због својих микроморфолошких карактеристика мање су густине, хrapаве површине, специфичне слојевите структуре и добре апсорптиване моћи те не узрокују алергијске реакције. Данас такви биокомпозити налазе широку примену у подручју аутомобилске, авио и грађевинске индустрије. Многи произвођачи аутомобила као *Mercedes Benz* уграђују биокомпозите с ланеним влакнима у своје аутомобиле. Ови композити посебно су погодни за израду унутаршњих делова аутомобила.

Аутомобилска индустрија се и даље развија, тражи константно нове начине да смањи тежину возила како би додатно смањили потрошњу горива и поспешили очување животне средине. Композитни материјали су решење јер могу да замене челик и доста смање масу возила. Такође, композитни материјали се могу искористити и као замена делова од алуминијума и инжењерске пластике.

Захваљујући својим карактеристикама очекује се значајно повећање удела композитних материјала у ауто индустрији у току наредних година.

7.0 Литература

- [1] Јовановић М., Лазић В., Адамовић Д., Ратковић Н., Машински материјали, Машински факултет у Крагујевцу, 2003.
- [2] <http://documents.tips/documents/kompozitni-materijali-55a0bed2b0919.html>, preuzeto 11.03 2016.
- [3] https://www.google.rs/url?sa=t&rct=j&q=&resrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwj60bDo9oHPAhVDMhoKHeUZCV0QFggaMAA&url=https%3A%2F%2Fwww.mfkv.kg.ac.rs%2Findex.php%2Fs-nastavni-materijali%2Fdoc_download%2F955-predavanje-13&usg=AFQjCNFb_nCkCYjHlcsEHTBki9J_ITCUfg, preuzeto 22.03 2016.
- [4] <https://www.fsb.unizg.hr/polimeri/fileopen.php?id=1298>, preuzeto 30.05.2016.
- [5] Николић В., Машински елементи – теорија, прорачун, примери, Машински факултет у Крагујевцу, 2004.
- [6] Ђорђевић З., Динамичко понашање вратила од композитних материјала, Докторска дисертација, Машински факултет у Крагујевцу, 2008.
- [7] <http://www.nezavisne.com/automobili/auto-novosti/Lagani-materijali-u-automobilskoj-industriji/2557>, preuzeto 5.08.2016.
- [8] <https://svetmaterijala.wordpress.com/tag/kompoziti/>, preuzeto 20.08.2016.
- [9] http://www.ttf.unizg.hr/advancetex/PDF/Conferences/6_Full_paper_Brunsek_Pavunc_Vujasinovic_TZG_2015.pdf, preuzeto 2.09.2016.
- [10] Djordjevic Z., Blagojevic M., Marjanovic V., Jovanovic S., THE INFLUENCE OF MATERIAL TYPES ON TWIST ANGLES AND TORSION STABILITY OF A COMPOSITE SHAFT, Technical Gazette, Vol.21, No.5, pp. 917-923, 2014.