

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Милош М. Зувић

**Примена нових материјала за израду
елемената редуктора**

завршни рад

Крагујевац, 2012.

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: 93/2009

Милош М. Зувић

Примена нових материјала за израду елемената редуктора

завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Зорица Ђорђевић, доцент - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да да приказ савремених материјала (термопласта и композита), користећи домаћу и страну литературу. Посебну пажњу посветити примени ових материјала за израду елемената редуктора (зупчаника, вратила, лежаја,...). На крају, кроз један пример прорачуна указати на специфичност прорачуна чврстоће зупчаника израђених од вештачких материјала.

Препоручена литература:

- [1] Николић В., *Машински елементи-теорија, прорачун, примери*, Машински факултет у Крагујевцу, 2004.
- [2] Тимотијевић Д., *Зупчаници од вештачких материјала*, Дипломски рад, Крагујевац, 1994.
- [3] Обершмит Е., *Озубљења и зупчаници*, 1982.

Крагујевац, 26.08.2012

ментор:

Др Зорица Ђорђевић, доцент

РЕЗИМЕ:

Композитни материјали се већ дуги низ година користе у машинству. Осетно видљиве су предности композитних структура у односу на металне структуре, као што су: смањено време за одржавање током експлоатације, бољи однос чврстоће и масе, продужени животи век делова израђених од композита, мањи број везних елемената, већа отпорност на корозију и оштећења услед замора материјала, итд.

У раду је приказан кратак преглед коришћења композитних материјала. Дат је преглед савремених достигнућа у области примене нових материјала за израду елемената редуктора (зупчаника, вратила, лежаја). Приказане су особине, подела, примена композита и термопласта у машинству.

Кључне речи: композитни материјали, термопластични материјали, машинство

ABSTRACT:

Composite materials for many years and used in mechanical engineering. Significant benefits were seen in the composite compared to metal structures, such as reduced maintenance time during the operation, an improved strength and weight, extended service life of parts made of composites, fewer fasteners, greater resistance to corrosion and fatigue damage of materials, and so on.

This paper presents a brief overview of the use of composite materials. Provides an overview of contemporary developments in the field of application of new materials for making helical elements (gears, shafts, bearings). Shows the characteristics, distribution, and use of thermoplastic composites in mechanical engineering.

Keywords: composite materials, thermoplastic materials, mechanical

САДРЖАЈ:

1.УВОД-----	1
2. САВРЕМЕНИ МАТЕРИЈАЛИ -----	2
2.1 Композити-----	2
2.1.1 Грађа композита-----	3
2.1.2 Основна својства композитних материјала-----	4
2.1.3 Композити са честицама-----	6
2.1.4 Композити са влакнима-----	6
2.1.5 Структурни композити-----	9
2.1.6 Примена композита-----	10
2.2 Приказ термопласта-----	13
2.2.1 Прерада термопласта-----	14
2.3Пластични материјали-----	16
2.3.1 Предности пластике-----	16
2.3.2 Недостаци пластике-----	17
2.4Техничка керамика-----	18
2.5Поливинилхлорид (PVC)-----	19
2.6 Полиетилен (PE)-----	20
2.7 Полиамиди (РА)-----	21
3. ПРИМЕНА НОВИХ МАТЕРИЈАЛА ЗА ИЗРАДУ ЕЛЕМЕНАТА РЕДУКТОРА----	24
3.1 Израда зупчаника од нових материјала-----	24
3.1.1 Карактеристике композитних зупчаника-----	24
3.1.2 Особине зупчаника израђених од композитних материјала-----	25
3.1.3 Носивост композитних зупчаника-----	30
3.1.4 Примена термопласта за израду зупчаника-----	31
3.1.4.1 Напони бокова зубаца зупчаника-----	32
3.1.4.2 Напони у подножју зупца зупчаника-----	40
3.1.4.3 Подмазивање зупчаника од термопласта-----	43
3.2 Примена термопласта за израду лежишта-----	44
3.2.1 Клизна лежишта од термопластичних маса-----	44
3.3 Примена композитних материјала за израду вратила-----	49

3.3.1 Карактеристике композитних вратила-----	49
3.3.2 Израда композитних вратила-----	52
3.3.3 Испитивање композитних вратила-----	54
4. РАЧУНСКИ ПРИМЕР ПРОРАЧУНА ЧВРСТОЋЕ ЗУПЧАНИКА ОД ВЕШТАЧКОГ МАТЕРИЈАЛА-----	55
4.1 Прорачун основних димензија зупчаника, зупчастог пара $z_1 - z_2$:-----	56
4.2 Прорачун носивости по критеријуму чврстоће бокова зубаца за зупчаник z_1 :-----	58
4.3 Прорачун носивости по критеријуму чврстоће подножја зубаца за зупчаник z_1 :-----	59
4.4 Прорачун носивости по критеријуму чврстоће подножја зубаца за зупчаник z_2 :-----	60
5. ЗАКЉУЧАК-----	62
ЛИТЕРАТУРА-----	64

1.УВОД

Свакодневни живот човека не би могао да се замисли без технике. У почетку човек је узимао материјале из природе (дрво, камен, глину, кожу, длаку, кости) и дорађивао их је примитивним поступцима како би створио алат, оружије и посуђе и себи олакшао живот. Услед осавременењавања технике, долази до осиромашивања природних извора материјала. Метални материјали који се користе за израду машинских елемената замењују се новим, вештачким путем створеним материјалима.

Шира примена пластичних материјала фактички је започела тек у другој половини 20. века. Један од разлога за то је и смањење извора природних материјала уз пораст броја људи на Земљи. Пластика и у погледу заштите човекове околине има светлу будућност у смислу рециклирања, као и примене биоразградиве пластике. То је један од разлога све веће примене термопласта.

Тако на пример, према чланку “Потрошња пластике у економији УСА”, направљеног од стране Probe Econo-mics из 1997. године, потрошња пластике се драстично повећава, па нпр. у 1996. години је у УСА потрошено 95,6 милијарди m^3 пластике. Најчешће коришћени типови пластике су полипропилен, полистирен и поливинилхлорид. Према ЕСЕВД18 пластична индустрија у региону Централне и Источне Европе се значајно развила у посљедњих 10 година, много брже него у Западној Европи. Прерада пластике у региону Централне и Југоисточне Европе се приближава потрошњи пластике земаља Западне Европе која износи 60 - 80 kg по глави становника.

Пластика укључује све полимере који се не јављају у природи, све синтетске еластомере и све високо модификоване полимере. Сама реч полимер потиче као сложеница из грчких речи полу и мерос и представља производ који се састоји од много честица састављених на специфичан начин.

Полимери су посебна група материјала који су углавном састављени од угљеника, водоника и кисеоника, а понекад садрже и хлор, флуор или азот. Према техничком понашању, полимерни материјали се могу поделити на:

- термопласте (пластомере, термопластике),
- дуροмере (дуропласте),
- еластомере.

2. САВРЕМЕНИ МАТЕРИЈАЛИ

2.1 Композити

У сталном истраживању материјала који би били лаки, а велике отпорности и модула еластичности чине се велики напори који воде ка технолошком развоју савремених материјала.

Под именом композитни материјал подразумевају се материјали састављени из мешавине две или више компонената које се доста разликују како по хемијском саставу тако и по другим особинама. Одговарајућим избором саставних елемената и њиховим запреминским односом у структури композита могу се добити материјали са контролисаним и жељеним својствима.

Композити све више продиру и освајају нова тржишта тако да је количина и могућност примене композита у сталном порасту. Модерни композитни материјали заузимају данас значајну позицију на тржишту материјала за примену у инжењерству. Применом композитних материјала обезбеђује се уштеда у маси, а при томе су отпорност и издржљивост делова нешто веће у поређењу са класичним металним материјалима.

Са аспекта применљивости идеалан материјал би требало да буде јак, жилав и лак, а уз све то да цена материјала буде што нижа. Али пошто је материјал најчешће јак али крт, или жилав али слаб, очигледан пример постизања идеалног материјала био би да се комбинују два материјала са комплементарним особинама.

Значајан развој и примена композитних материјала је почела око 1950. год. Данас се годишње производи око 10 милиона тона са повећањем око 10% годишње.

Композитни материјал настаје комбиновањем два или више материјала различитих састава (метали, керамике, полимери) и/или облика (vlakна, ламеле, зрна) са циљем да се добије нов материјал са већим бројем повољних особина (механичке особине, отпорност на утицај околине, повећање радног века и слично).

Предност композита је та што се код њих најчешће користе најбоље особине саставних материјала и често се постижу такве особине које саставни материјали појединачно уопште не поседују. Такође, предност композитних материјала, у односу на класичне материјале, је висока вредност специфичне чврстоће (R_m/ρ) и специфичног модула (E/ρ), што доприноси изради делова знатно мање масе, што је веома важно тамо где је маса делова од великог значаја.

Разлика метала и композитних материјала лежи у томе што композитни материјали не подлежу пластичној деформацији, тј. под дејством спољашњих сила долази само до еластичних деформација [7]. Важна особина композитних материјала је да поседују релативно велику носивост и после делимичног оштећења, што је последица преношења оптерећења преко великог броја влакана.

Композитни материјали имају велику чврстоћу, малу масу, добра антикорозивна својства, лаку обрадивост, малу топлотну проводљивост као и изражене анизотропске особине.

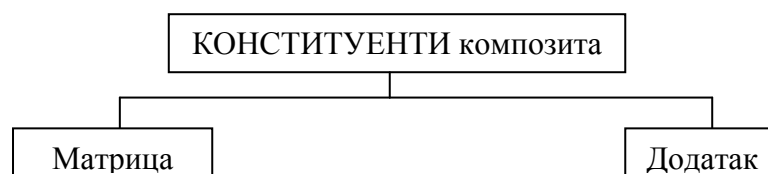
Основна подела композита:

- метални (ММС),
- керамички (СМС),
- полимерни (РМС).

2.1.1 Грађа композита

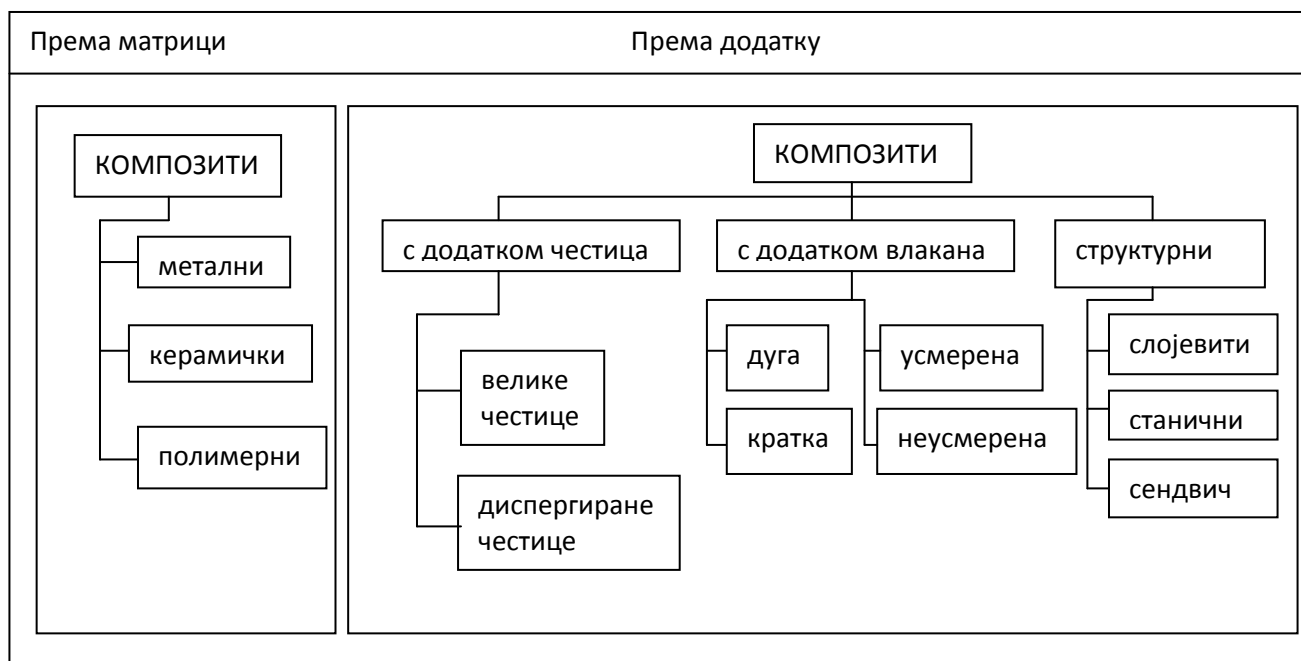
Грађу композита сачињавају [7]:

- **матрица** – основни материјал одређених својстава,
- **додатак** – материјал чијим се додавањем постижу потребне комбинације својства композита.



Слика 2.1. Грађа композита

Композити се могу систематизовати на више начина као на пр. (слика 2.2):



Слика 2.2. Систематизација композита

По правилу се код композита с металном матрицом с додацима смањују трајне деформације при вишим температурама, код композита с керамичком матрицом повећава се жилавост, а код композита с полимерном матрицом повећава се чврстоћа и крутост.

Примери често коришћених композита су:

- с додатком великих честица – бетон, смеша цемента и шљунка (керамичка матрица и керамички додатак);
- с додатком дугих влакана – стаклом ојачана пластика, смеша епокси смоле (ЕП) и стаклених влакана (полимерна матрица и керамички додатак);
- структурно слојевити – „шперплоча“ – ламинатни композити.

2.1.2 Основна својства композитних материјала

Својства композита зависе од својстава компонената. Компоненте, на карактеристике композита, утичу својом:

- Грађом (матрица+додатак) и њиховим својствима,
- уделима,
- облицима,
- величинама и расподелама,
- природама и јачини узајамних веза.

Табела 2.1 Основне карактеристике композита

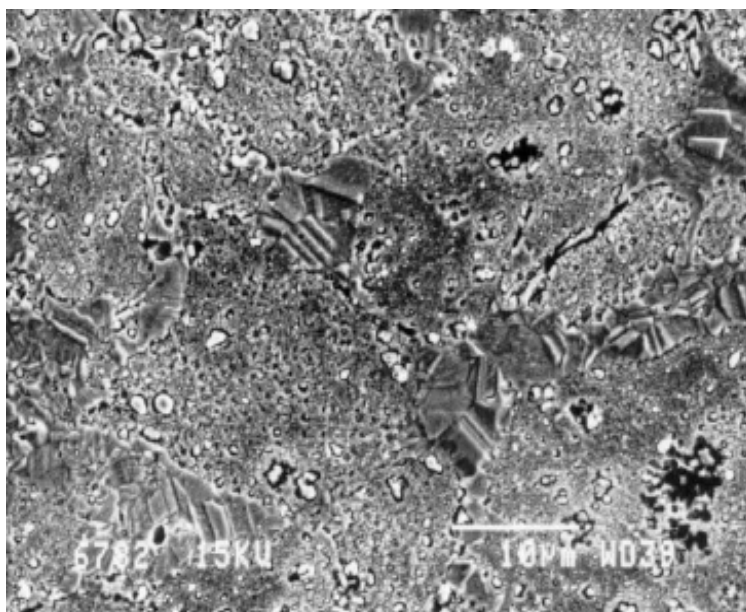
Материјал	Матрица	Титан	Угљеник	Полиестер	Епоксид		
	додатак	титан-карбид честице	угљенична vlakна	стаклено ткање	стаклено ткање	арамидно ткање	угљенично ткање
Састав, W_i [%]		20 $T_iC(p)$	50 $C(V_r)$	фабр. ткање	ткање(kill)	ткање(kill)	ткање(kill)
ρ [kg/dm ³]		4,52÷4,58	1,68÷1,72	1,6 ÷ 2	1,75÷1,97	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_{mi} , [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	0,3÷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_{dis} , [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	115÷121	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 , [μm/(m · 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	-
e_0 , [μΩ · cm]		180÷190	1100÷2700	$10^{18} \div 10^{19}$	$10^{21} \div 10^{22}$	$10^{19} \div 10^{21}$	$10^5 \div 10^6$
$K_{рециклиности}$		0	0	0,015	0,015	0,015	0,015
Цена (KM)		250÷212	15÷21	15÷16,5	17,5÷39	227÷247	117÷137
ОТПОРНОСТ НА:	трошење	добра	добра	средња	средња	средња	средња
	оксидацију	врло добра	слаба	врло слаба	врло слаба	врло слаба	врло слаба
	паљење	врло добра	средња	слаба	добра	добра	добра
	UV 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
	органске раствараче	врло добра	врло добра	средња	добра	добра	добра

2.1.3 Композити са честицама

Честице, које се додају матрици композита, се према пречнику деле на: мале честице (за дисперзије) $< 0,1 \mu\text{m} \dots 1 \mu\text{m} <$ велике честице.

Састав ових композита чине дискретне једнолично распоређене честице – тврд и крт материјал, обавијене меканијом и дуктилнијом матрицом. Структура личи као код многих двофазних дисперзијски ојачаних металних легура. Ипак, код композита се за уградњу дисперзираних честица не примењује трансформација фаза.

Честице су најчешће од оксида, нитрида и карбида, као нпр.: Al_2O_3 , SiC , BN , ZrO_2 , TiC , ThO_2 , SiO_2 , WC , B_4C itd.



Слика 2.3. Си композит ојачан диспергираним честицама B_4C

2.1.4 Композити са влакнима

Код влакнима ојачаних композита долази до изражаја побољшање чврстоће, жилавости, крутости, повећања односа “чврстоћа/густина” услед уградње чврстих, крутих и кртих влакана у мекшу, дуктилнију матрицу [8]. Два значајна својства влакана су висока топлотна стабилност и контролисана растегљивост при повишеним температурама.

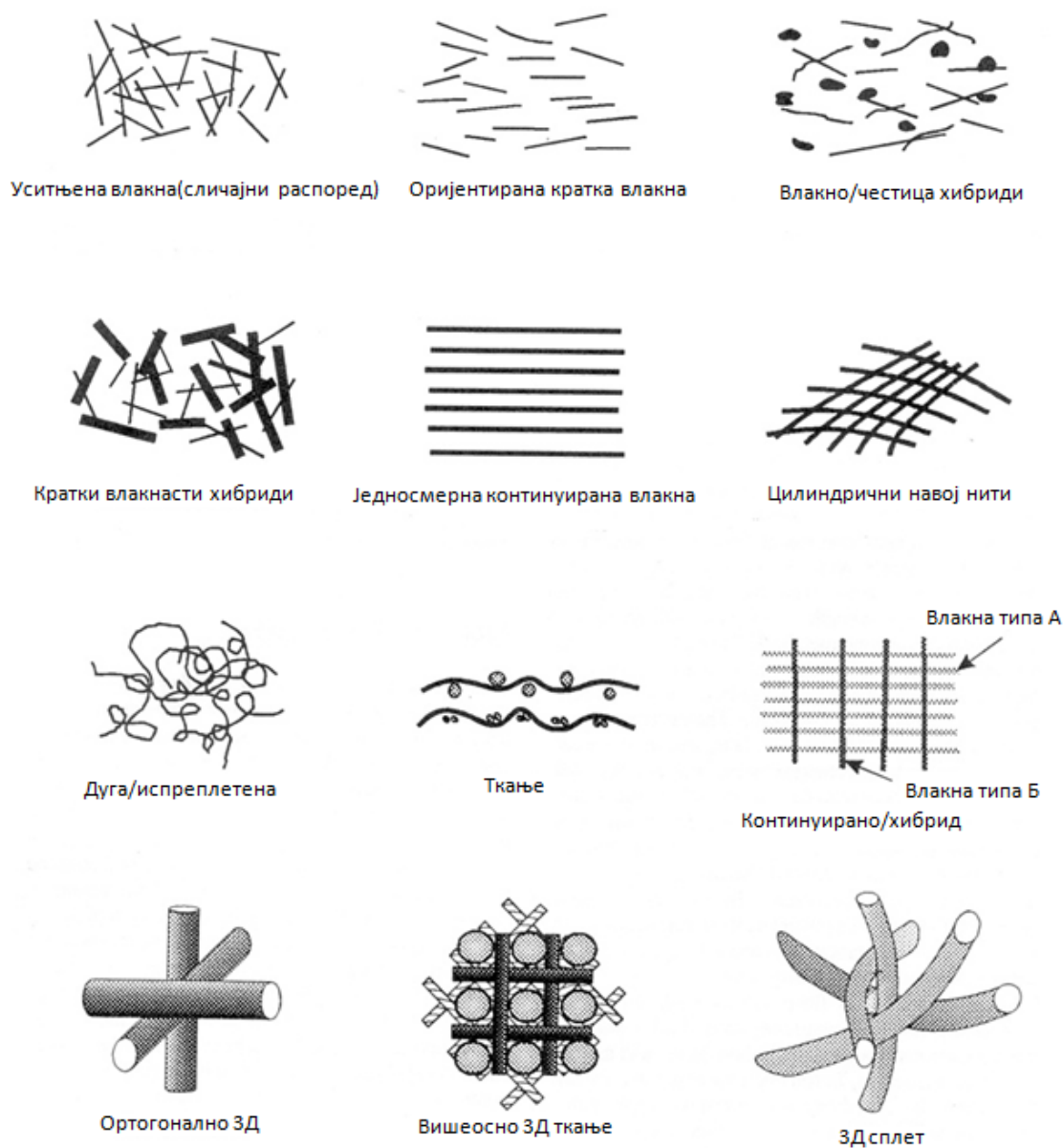
Влакна се разликују према:

- врсти,
- дужини,

- пречнику
- оријентацији и хибридизацији.

Влакнима ојачани композити спадају у скуп анизотропних материјала будући да имају знатно боља својства у смеру влакана.

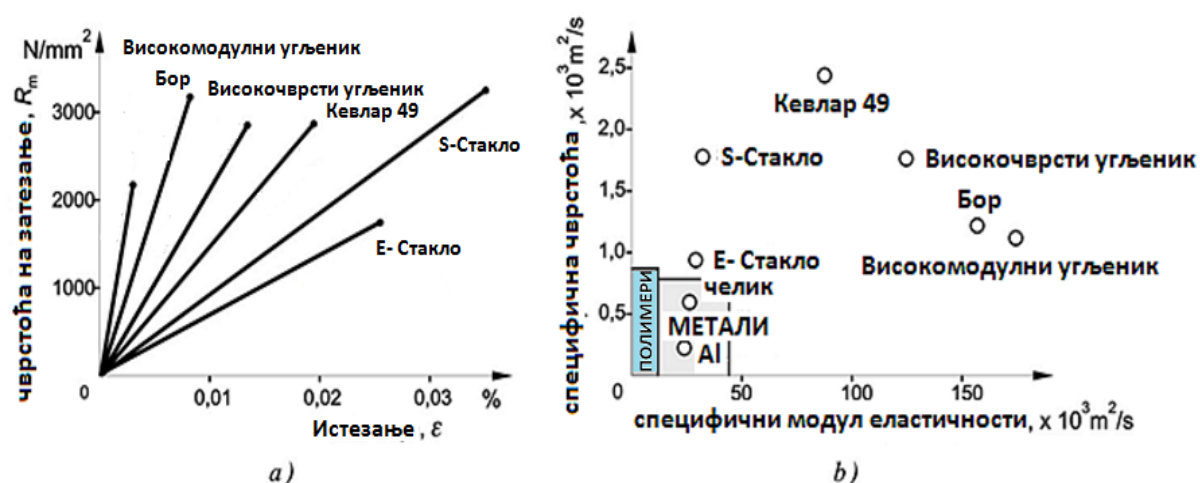
Оријентација влакана у матрици приказана је на слици 2.4.



Слика 2.4 Оријентација влакана у матрици

Влакна су или поликристална или аморфна те имају мали пречник. Влакнасти материјали могу уопштено бити полимерни или керамички (нпр. полимер арамид, стакло, угљеник, бор, алуминијум оксид и силицијум карбид).

Арамидна влакна (ароматски полиарамид с бензенским прстеном) имају изузетну топлотну стабилност, врло високу чврстоћу као и отпорност на замор и ударна оптерећења, иако су ниске притисне чврстоће. "Кевлар" или "Номек" су комерцијални називи за најчешће коришћене ароматске полиарамиде.



Слика 2.5. Својства влакана: (а) крива “напон–деформације”, (б) поређење специфичне чврстоће и специфичног модула еластичности неких метала и влакана

Напредни композит је појам који се користи за композитне материјале од којих се израђују делови за критичне, специјалне намене. Пример су оптерећени делови за авионе и летелице. Напредни композити су углавном композити с полимерном матрицом ојачани с врло снажним полимерним, металним или керамичким влакнима.

Угљична влакна се користе за делове од којих се захтева нарочито велика крутост. Арамидна и полиетиленска влакна су прикладнија за делове од којих се тражи велика чврстоћа, жилавост и отпорност на оштећења.

Композити са металном матрицом ојачани са металним или полимерним влакнима се користе за израду делова отпорних на високе температуре.

2.1.5 Структурни композити

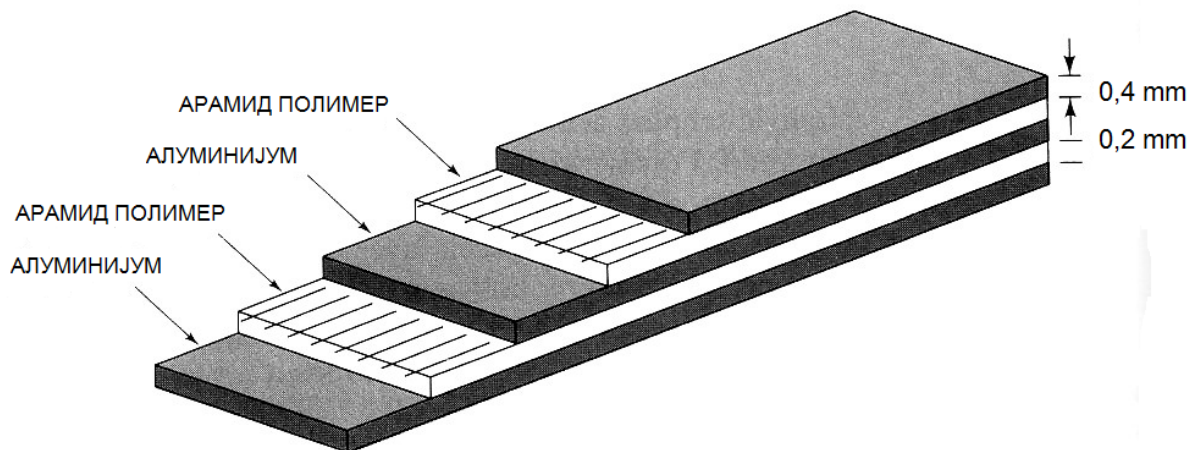
Слојевити композити

У слојевите композите спадају [7]: различити танки слојеви, дебље заштитне површине, облоге, биметали, ламинати и др.

Многи слојевити композити су конструисани ради:

- Повећања отпорности на корозију,
- Ниске цене,
- Велике чврстоће и
- Мале тежине.

Такође су важне карактеристике ових материјала отпорност на хабање и абразију, побољшан изглед радног комада и необична својства топлотне растегљивости.



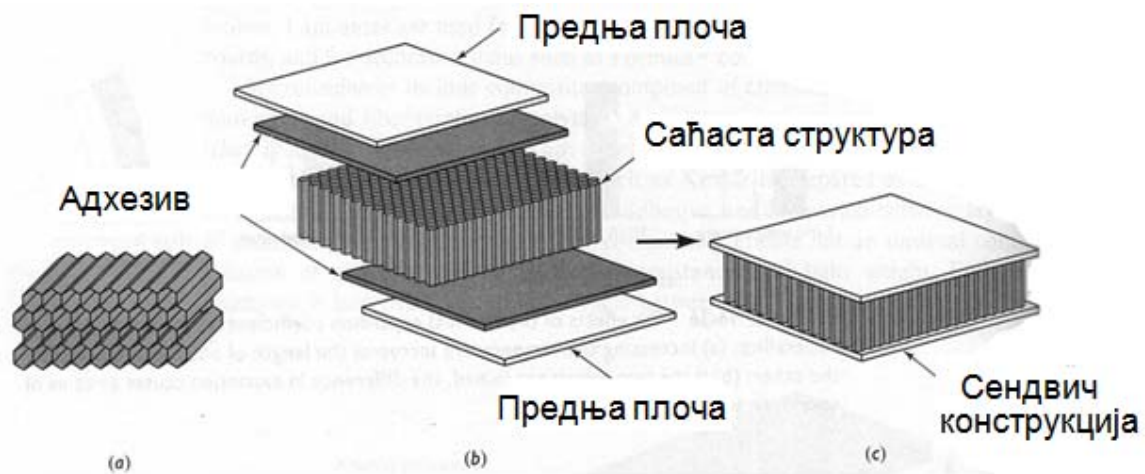
Слика 2.6. Слојевити композит

Сендвич композити

Сендвич структуре су специфични материјали, који садрже танке слојеве обложног материјала везаног уз неки лаки материјал (као што је полимерна пена).

Пример сендвич конструкције је саћаста структура, која је нашла примену у авионској индустрији. Саћаста структура се производи лепљењем алуминијумских, набораних трака на одређеним местима. Саћасти материјал се спаја у панеле, има врло малу густину и савитљив је. Када се са сваке чеоне стране залепи алуминијумска плоча, добије се сендвич структура, која има врло

велику чврстоћу и крутост, а врло малу тежину. Постиже се густина ове сендвич структуре од $0,04 \text{ g/cm}^3$.



Слика 2.7. Сендвич композит

Станични композити

Станичну (ћелијску) структуру формирају сједињене ћелије са танким крутим зидовима (матрица), испуњене гасом (додатак). Ћелије могу бити отворене и затворене.

2.1.6 Примена композита

- **Грађевинарство:**

Стамбене јединице, димњаци, бетонске конструкције, профили, унутрашњи зидови, врата, намештај,.

- **Електротехника:**

Електрични изолациони делови, изолација од утицаја електромагнетних таласа, подлоге склопки.

- **Транспорт железницом:**

Конструкцијски делови вагона, седиште и унутрашње преграде путничких вагона.

- **Транспорт путевима:**

Делови каросерије, комплетне каросерије, вратила трансмисије, опруге, гибњеви, зглобови огибљења, навлаке, кабине, седиште.



Слика 2.8 Транспорт путевима

- **Ваздушни транспорт:**

Конструкцијски делови путничких авиона, кракови елипсе хеликоптера, пропелери, вратила трансмисије.



Слика 2.9. Ваздушни транспорт

- **Машинство:**

Лежајеви, зупчаници, тела дизалица, кућишта редуктора, цеви, делови плоче за цртање.



Слика 2.10. Опште машинство

- **Спорт и рекреација:**

Штапови за пецање, скије, штапови за скок преко мотке, рекет за тенис, заштитне кациге, оквир бицикла, опрема за голф.



Слика 2.11. Спорт и рекреација

2.2 Приказ термопласта

Пластомер (термопласт) је врста полимерног материјала која се на повишеној температури топи. Након завршеног процеса обликовања поново се може растопити, а затим обликовати и може се рециклирати.

Поступци прераде ових материјала базирани су на промени њиховог стања загревањем и хлађењем (чврсто – растопљено – чврсто).

Структура термопластичних материјала може бити аморфна и кристална.

Најзаступљенији полимери из ове групе су полипропилени ниске и високе густине, чија је структура кристаласта и поливинилхлорид чија је структура аморфна.

Данашњи полимери подвргавају се процесу мешања са додацима који служе као средство за пуњење (пунила) или као сретство за ојачање (ојачала).

Ови додаци имају двоструку улогу:

- Да појефтинe полимерни производ,
- Да побољшају особине полимерног производа.

Поступци мешања којима се средства за пуњење и ојачање уграђују у полимерне материјале су бројна [8].

Разликују се два типа пунила:

- Ојачавајућа,
- Неојачавајућа.

Главна ојачања за полимере су стаклена влакна. Постоје хемијска (С) и електрична (Е) класе и стакла високог модула (S).

Основни разлог ојачања термопласта је побољшање његових особина. Најважнија побољшања механичких особина термопласта која се постижу појачавањем стакленим влакнима су:

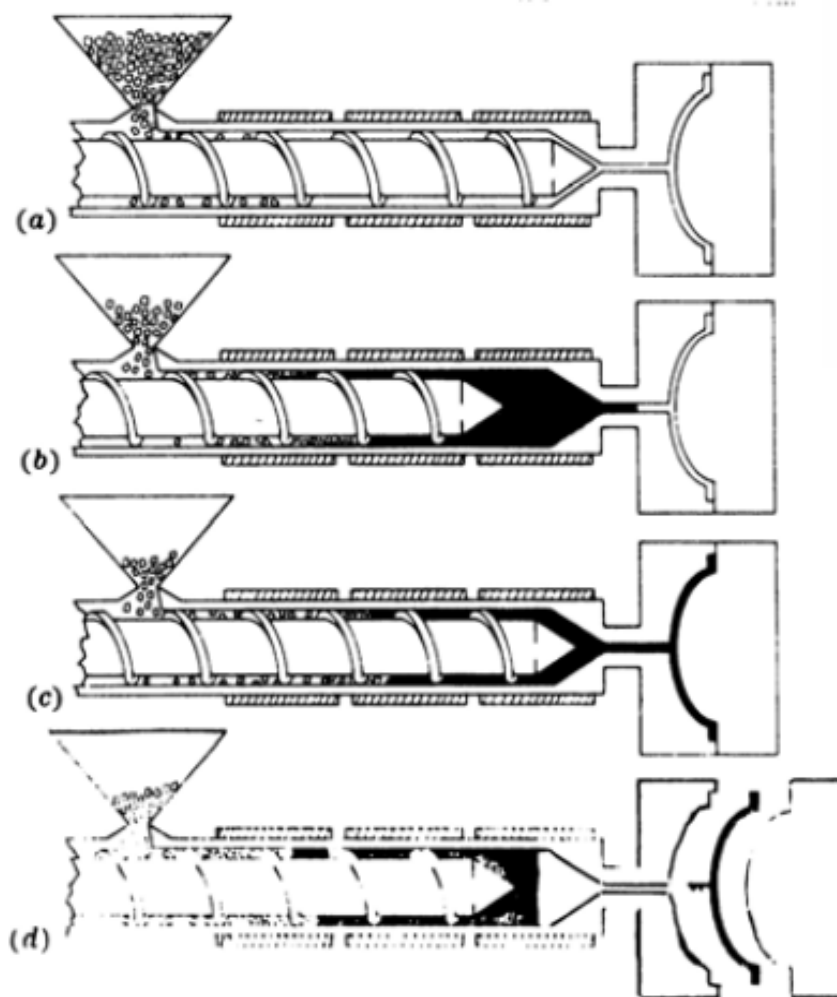
- отпорност на пузање се у великој мери повећава,
- отпорност на удар термопласта ојачаних стакленим влакнима повећава се са количином ојачивача (овакви термопласти задржавају високу отпорност на удар и код ниских температура),
- чврстоћа на истезање ојачаних термопласта је најмање два пута већа него код неојачаних термопласта,
- савојна чврстоћа при повишеним температурама повећава се ојачавањем стакленим влакнима за више од 100%, зависно од врсте полимерног материјала,
- димензиона стабилност ојачаних термопласта се побољшава јер се апсорпција влаге смањује на половину првобитне вредности,

- такође и крутост доприноси димензионој стабилности.

2.2.1 Прерада термопласта

Постоји неколико поступака прераде термопласта од којих су најважнији [7]:

1. Бризгање (слика 2.12)



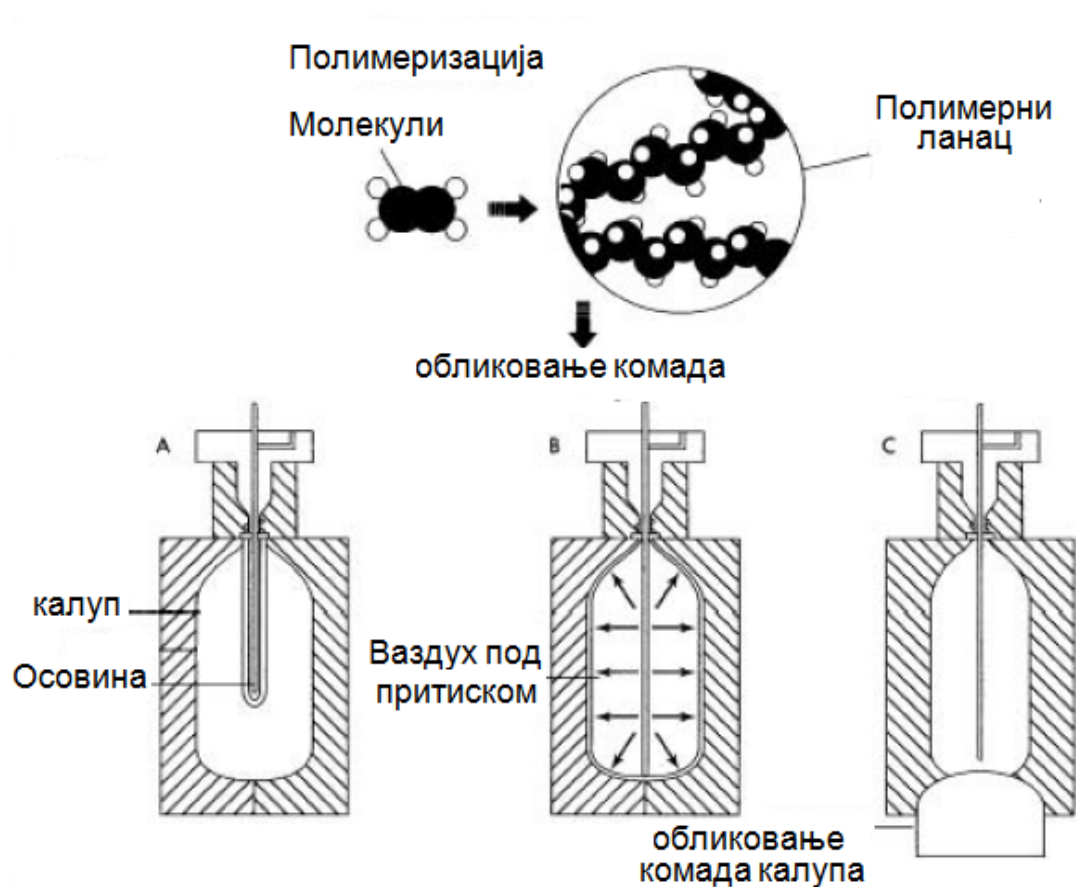
Слика 2.12. Бризгање

2. Екструзија (слика 2.13)



Слика 2.13. Екструдирање

3. Обликовање дувањем (шупља тела) (слика 2.14)



Слика 2.14. Обликовање дувањем

2.3 Пластични материјали

Пластични материјали су материјали на бази природних, синтетичких или модификованих полимера који се под утицајем топлоте размекшавају и постају пластични.

Од пластичних маса израђује се широк асортиман делова машинских конструкција. Од веома квалитетних пластичних маса могу се израђивати и веома одговорни делови као што су: зупчаници, клизни лежајеви и други одговорни машински делови.

Састав пластичних материјала је веома сложен јер поред полимера обично садрже и разне додатке као што су: пластификатори, пуниоци (додаци органског и неорганског састава), омекшивачи, стабилизатори, пигменти, боје, антиоксиданси, антистатичи и друго.

Прерада пластичних маса врши се обликовањем течењем у пластичном стању. Основа поступка обухвата дејство притиском при одређеној температури на пластичну масу која у тим условима у течном стању испуњава запремину калупа-алата. Тако се добијају отпресци одређеног облика који се у току даљег процеса могу обрађивати резањем, пробијањем, просецањем и слично ради добијања пројектованих облика и димензија.

2.3.1 Предности пластике

Маса: Густина пластичног материјала је приближно 10% од густине челика. Код транспорта редукција масе има многе предности. Смањење масе возила или авиона утиче на економичност потрошње горива и перформансе.

Смањење масе производа који се треба транспортовати може бити такође битно. Ово има утицај како на економичност тако и на заштиту човекове околине. Смањење масе комада може такође олакшати руковање (алати, обрада, итд.). Ово може утицати и на личну сигурност код транспорта производа у погледу самоповређивања.

Лакоћа обликовања у комплексне облике: Релативно низак вискозитет и лаган ток пластике омогућава екструдовање, дување, ињекционо пресовање комплексних геометријских облика. Ови начини обликовања пластике омогућавају лако понављање операција и једноставан смештај велике количине производа.

Могућност добијања жељених особина материјала: Пластични материјал се може релативно лако изабрати за специфичне случајеве. Боље механичке особине пластике се могу добити употребом адитива који повећавају чврстоћу, тврдоћу или чврстоћу на удар. Адитиви такође могу послужити да задовоље потребе материјала у погледу провођења топлоте, подмазивања, отпорности на температуру, итд.

Термички изолатор: Пластике имају релативно ниску топлотну проводљивост што омогућује израду делова за алате, ручице за посуђе, посуде за напитке, итд.

Корозија и хемијска отпорност: Већина пластика имају отпорност на утицај околине и немају могућност кородирања. Ова чињеница елиминисе потребу за фарбањем или неком другом површинском заштитом. Пластике које нису биоразградиве дају могућност примене под водом или земљом, као нпр. каблови, чамци, итд. Већина полимера имају одличну хемијску отпорност. Сем тога пластике имају отпорност на већину киселина и база.

Коефицијент трења: Многе пластике имају мали коефицијент трења што је битно код склопова са покретним деловима. Најлон и ацетал имају одлично самоподмазивање. Адитиви за самоподмазивање се могу додавати већини полимера код којих је потребно побољшано самоподмазивање.

2.3.2 Недостаци пластике

Високи коефицијент термичког ширења и скупљања (Табела 2.2): Ово ствара проблеме нарочито при монтажи делова од пластике и делова од других материјала. Вредности коефицијената термичког ширења и скупљања за пластике нису константни као за већину осталих материјала и могу чак варирати у зависности од услова процеса добијања производа.

Табела 2.2 Коефицијент термичког ширења/скупљања пластика и осталих материјала

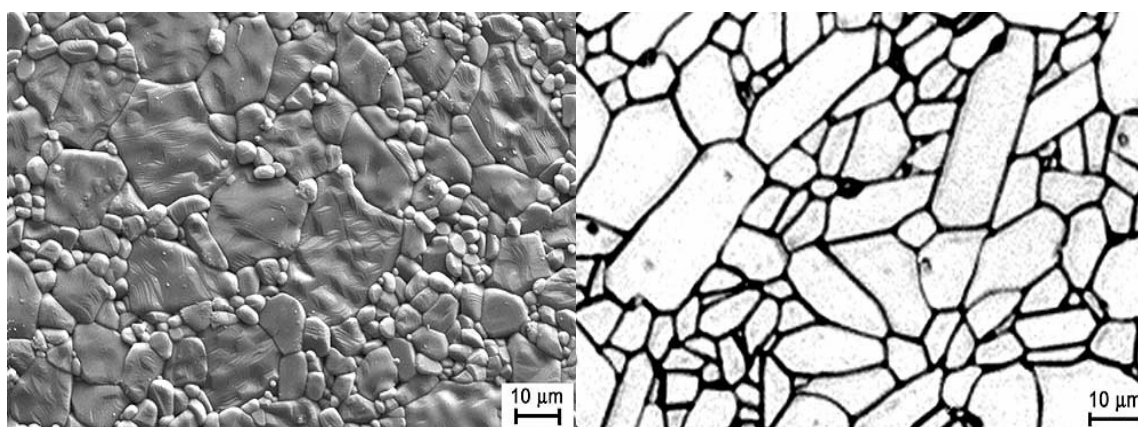
Материјал	Коефицијент термичког ширења/скупљања ($10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)
Стакло	8
Fe	12
Al	25
Фенол	68
PP	81-100
Најлон 66	80
PC	68

Развој производа: С обзиром на комплексност процеса и његов утицај на величину, облик и механичке особине производа, могућност добијања као и карактеристике пластичног производа нису потпуно познате док се не изradi алат и направи пробни узорак производа. Ови алати знају понекад бити изразито скупи и могу захтевати значајну дораду и време да би се постигао циљ.

2.4 Техничка керамика

Керамички материјали су неоргански материјали који се састоје од неметалних и металних елемената везаних претежно јонским и (или) ковалентним везама. Керамички материјали су у општем случају тврди и крти са малом жилавошћу и пластичношћу. Добри су топлотни и електрични изолатори, одликују се високим температурама топљења и имају добру хемијску стабилност.

Техничке керамике су чиста или скоро чиста једињења оксида, карбида и нитрида. Производе се синтеровањем (слика 2.15). Сировина је обично суви прах. Температура синтеровања је од 1000 до 1700°C. Одликују се уједначеношћу структуре и имају високу температура топљења (преко 2000°C). Већина техничких керамика је смеша керамичких једињења.



Слика 2.15. Микроструктура синтерованог прашкастог алуминијумоксида (99,7%). Температура синтеровања била је 1700°C. Микроструктура скоро нема пора.

Техничку керамику делимо на:

- Конструкциони материјали,
- Ватростални керамички материјали,
- Керамички абразивни материјали,
- Тврди метали за резне алате,
- Алатна керамика,
- Супертврди материјали.

2.5 Поливинилхлорид (PVC)

Поливинил-хлорид је случајно откривен барем два пута у 19. веку. Први пут га је открио Henri Victor Regnault 1835. године, а други пут Eugen Baumann 1872. године. Оба се пута полимер појавио као бела чврста супстанца унутар боца винил хлорида које су остављене на сунчевој светлости. У раном 20. веку руски хемичар Ivan Ostromislensky и Fritz Klatter из немачког хемијског трговачког друштва Griesheim-Elektron су покушали користити поливинил хлорид у комерцијалним производима, али је крти полимер узроковао пропаст било којег производа. Године 1926. Waldo Semon и B.F. Goodrich Company осмислили су методу пластицизирања PVC-а мешајући га с различитим адитивима. Резултат је био флексибилнији и лакши за проучавање материјал који је ускоро постигао велику комерцијалну употребу.

Поливинилхлорид или PVC је једна од најкориштенијих врста пластике која се због своје прилагодљивости и ниске цене користи у разне сврхе: као амбалажа, за израду намештаја, играчака, ауто делова, медицинских помагала и, најчешће, различитих грађевинских материјала. Међутим, управо због своје раширености постаје један од великих еколошких проблема, чему придонио и његова токсичност у свим фазама од производње, преко употребе до одлагања.

У смислу донешене добити, PVC је један од највреднијих производа у хемијској индустрији. На свету је преко 50% произведеног PVC-а коришћено у грађевинарству. Последњих неколико година PVC је замењивао традиционалне грађевинске материјале као што су дрво, бетон и глина у многим подручјима.

PVC се већином производи поступком који се назива суспензиони поступак полимеризације. Суспензиона полимеризација је дисконтинуиран процес који се одвија у затвореном производном систему. Течни винилхлорид (мономер) диспергира се у деминерализованој води и полимеризира помоћу иницијатора полимеризације уз додатак средства за одржавања стабилности суспензије. Реакција полимеризације започиње распадом иницијатора. Та реакција се одвија на температури од 55-75 °C и притиску од 7-13 бара. Укупно трајање тог процеса је око 4 до 7 сати. Реакција се прекида када се 85% мономера претвори у полимер додавањем инхибитора реакције у полимеризатор. Како је реакција полимеризације егзотермна, мора се одводити топлота да би се могла контролисати температура самог процеса. Топлота се одводи посредством плашта полимеризатора. Расхладни медији су вода (око 23 °C) и подхлађена вода (око 5 °C). Неизреаговани мономер се отплињавањем одводи у засебан систем кога називамо рекуперација где се након компримирања укапљује и складишти како би се поновно могао користити у процесу. Водена суспензија PVC-а се одводи даље у spremник за складиштење суспензије, а затим се уводи у колону за стрипирање где се суспензији одузима мономер. Демонимеризована суспензија се складишти у spremницима суспензије одакле се одводи на

центрифугирање где се одузима већина воде из PVC-а, док се остатак влаге (воде) одузима у ротационом сушионику струјом врућег ваздуха. Осушени производ се пребацује пнеуматским транспортом у силосе на складиштење као готов производ.

2.6 Полиетилен (PE)

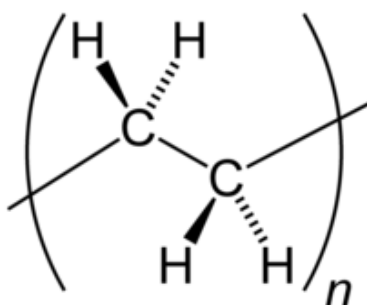
Полиетилен (PE) је макромолекуларни производ (слика 2.16) који се добија полимеризацијом етилена. Представља једну од највише коришћених пластичних маса.

Молекули полиетилена имају равну структуру уз одређену количину бочних ланаца. Садржај кристалне фазе зависи од степена разгранатости молекула. Што је већи степен разгранатости молекула, мањи је степен кристалисаности. Специфична маса полиетилена зависи од молекулске масе, разгранатости и степена кристалисаности.

Полиетилен је термопластични материјал који се производи као:

- Полиетилен ниске густине (LDPE),
- Полиетилен средње густине (MDPE),
- Полиетилен високе густине (HDPE),
- Полиетилен ултра високе молекуларне масе (UHMWPE).

Полиетилен ниске густине има тачку топљења 105°C , отпоран је на ломљење, флексибилан, прозиран па се због тога користи као паковни материјал и за производњу цеви. Има добру отпорност према деловању хемикалија па се може користити за држање многих органских реагенаса осим алкана, ароматских и хлорираних угљоводоника и јаких оксиданаса. Полиетилен високе густине има боље механичке особине и отпорност према хемикалијама. Није отпоран према јаким оксидацијским средствима.



Слика 2.16. Мономерна јединица полиетилена

2.7 Полиамиди (РА)

Полиамиди су погодни за мале зупчанике. Најчешће се користе полиамид 6 (РА6) и полиамиди 66 (РА66) због могућности широке примене и ниже цене од полиамида 11 (РА11), полиамида 12 (РА12), полиамида 46 (РА46).

Ојачани полиамиди са стакленим влакнима имају побољшану димензиону стабилност, отпорност на удар и истезање. Када су пуњени молибденским бисулфидом или тефлоном погодни су за израду лежајева, зупчаника и слично из разлога што тада имају мали коефицијент трења и велику отпорност на хабање [1].

Одмах након термопластичне прераде тврди су и крти, због тога се морају оставити на атмосфери или још боље умочити у воду ради упијања влаге чиме се постиже одлична жилавост.

Користе се за ињекцијско пресовање техничких делова као што су лежајеви, зупчаници, ваљци, вијци, вратила, мембране, уисне гране и кућишта у аутомобилској индустрији, електроиндустрији, за делове пумпи, вентилатора (Слика 2.17).



Слика 2.17. Делови израђени од полиамида

Примена полиамида остварује већу економичност, па и бољу функционалност у односу на делове израђене од класичних материјала.

Главне особине полиамида су:

- Жилавост при високим и ниским температурама,
- Задржавање тврдоће као и облика при врло ниским температурама,
- Без мириса, укуса, неотрован, тешко запаљив,
- Неотпоран према киселинама,
- Нетопив у неутралним растворима соли, мастима, мазивима,
- Има стабилност самоподмазивања,
- Самогашење,
- Захтева специјални режим прераде,
- Веома важна особина је да се могу прерађивати и до неколико пута, а да им се особине не промене.

Неки од полиамидних производа и њихова примена :



Слика 2.18 Полиамид 60



Слика 2.19 Полиамид са MOS2

PA 60 :

- Примењује се у црној и обојеној металургији, текстилној, индустрији коже и обуће, дрвној, индустрији возила, рударству и грађевинарству итд.
- Користи се за израду разних машинских делова као што су: зупчаници, ланчаници, пужни ваљци, ременице, клизне шине, водилице, чауре итд.

PA са MOS2 :

- Примењује се у индустрији пољопривредних машина, текстилној, дрвној индустрији, рударству и грађевинарству, обојеној и црној металургији и др.

Табела 2.3. Основне карактеристике неких полиамида

Особине		Јединица мере	РА 6	РА 12
ТЕРМИЧКЕ	Специфично топлотни капацитет	$\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$	1	0.9
	Топлотна проводност	W/ms	0.29	0.23
	Температурна проводност	$\text{m}^2/\text{s} \cdot 10^8$		
	Топлотна продорност	$\text{W}_s^{1/2}/\text{m}^2\text{K}$		
	Температура постојаности облика (ASTM D 648)	K	394	344-3777
ФИЗИЧКЕ	Густина	kg/m^3	1130	1020
	Скупљање	%	0.5-2.2	0.4-0.6
	Абсорпција воде 3 mm	%	1.3-1.9	0.25
	Брзина горења	cm/min	самогасив	самогасив
	Пропусност светла	%	-	-
	Мутноћа	%	-	-
	Отпорност на киселине	-	лоша до добра	лоша до добра
	Отпорност на базе	-	врло добра	врло добра
МЕХАНИЧКЕ	Чврстоћа на истезање	N/mm^2	49-85	46-58
	Чврстоћа на савијање	N/mm^2		50-100
	Отпорност на удар	kgdm/cm	4.3-10	10.8-30
	Модул еластичности	N/mm^2	773-3000	1260-1350
	Тврдоћа,Роквел	-	R103-109	M-31R-106
ЕЛЕКТРИЧНЕ	Диелектрична чврстоћа	$\text{V}/0.0025 \text{ mm}$	440-510	452
	Површински отпор	Ω		$> 10^{13}$
	Диелектрична константа, 60 циклa	-	3.9-5.5	4.2
	Запремински специфични отпор	Ω/cm		$8 \cdot 10^{14}$
	Диелектрични фактор губитка код 50 Hz			

3. ПРИМЕНА НОВИХ МАТЕРИЈАЛА ЗА ИЗРАДУ ЕЛЕМЕНАТА РЕДУКТОРА

3.1 Израда зупчаника од нових материјала

3.1.1 Карактеристике композитних зупчаника

Све већи значај и примену данас имају зупчаници од композитних материјала. Разлог повећане примене лежи у испуњавању захтева за смањење шума у раду, бољом постојаношћу на корозију, мањом тежином, добром ударном отпорношћу, затим бољом моћи изоловања као и особине клизања у раду на сувом. Други разлог је могућност израде конструктивних елемената компликованих облика са знатно нижим трошковима [1].

Особине зупчаника од композитних материјала су :

- могуће је бризгање под притиском код термопласта (код великог броја комада је економично),
- отпорност је десет пута мања у односу на челичне зупчанике,
- релативно мала маса (тежина) услед мале густине,
- врло повољно одржавање бучности (већа тишина у раду) и осцилација услед високог унутрашњег трења (пригушивања), нарочито код спаривања вештачки материјал-вештачки материјал,
- другачије одржавање корозије (делимично могућ погон у води),
- друге особине трења клизања у раду на суво (ипак коефицијент проводљивости топлоте је мањи за стоти део него код челика, па је због тога важно средство за подмазивање ради одвођења топлоте),
- модул еластичности код полимида је стоти део Е-модула челика, а код тканине за изолацију је двадесети део Е-модула челика (због тога је неосетљив на одступање при озубљењу, али ипак треба обратити пажњу на деформације),
- код полиамида Е-модул углавном зависи од влажности (за остале вештачке материјале не важи),
- коефицијент топлотног издужења код полиамида је десет пута, а код слојевитог пресованог дрвета и тканине за изолацију до три пута већи него код челика (треба посебно обратити пажњу при избору зазора),
- мирно оптерећење (у прекиду погона) води код полиамида трајној деформацији са пузањем, који погон блокира или код поновног покретања разара,
- карактеристика материјала термопласта зависи највише од температуре.

Због ових особина зупчаници од вештачких материјала примењују се претежно за уређаје фине технике, у машиноградњи, на местима где треба смањити буку и осцилације при раду, за погон трака (зупчаник од термопласта).

Са жарењем лива (према подацима испоручиоца вештачког материјала), може се при хлађењу побољшати настали напони опуштањем и кристализацијом (а тиме и чврстоћа), тиме се повећава и жилавост.

Једна од веома важних особина за примену једног броја вештачких материјала је њихова изузетна прозрачност. Максимална прозрачност неких пластичних маса у видљивом делу спектра износи 92-94%. Остале особине као што су лакоћа прераде и завршне обраде, могућност бојења при производњи и преради, добар спољашњи изглед, метализација и лепљење, битно доприносе сталном порасту примене вештачких материјала.

3.1.2 Особине зупчаника израђених од композитних материјала

У савременој технологији и индустрији све већу примену налазе зупчаници израђени од композитних материјала, јер омогућавају смањење масе, хабање, буке и трошкова конструкције. 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 зупчаници треба да пренесу? Како утичу експлоатациони услови и спољашња околина на рад и напонско стање зупчаника? Колика је очекивана тежина? Да ли је неопходно подмазивање? Каква је уштеда када се користе композитни зупчаници уместо металних?

Одговори на ова питања биће изложени у следећим ставкама.

Конструисање композитних зупчаника

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 томе се, у поређењу са металним зупчаницима који захтевају машинску обраду и додатну монтажу, смањује број делова монтаже и трошкови израде [5].

На слици 3.1. су приказани зупчаници израђени од полиамида са уметнутом главчином од метала, који имају предност лакшег монтирања на вратило, термичко оптерећење је смањено за 50%, и имају могућност преношења великог обртног момента.



Слика 3.1. Композитни зупчаници са металном главчином

Овакви зупчаници се израђују брызгањем 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, као што је MFA (Mold-Filing Analzsis), смањују време и цену алата за ливење.

Зупчаници израђених од термопластичних и термостабилних полимера имају много предности у односу на металне код преносника мање снаге, који се не подмазују. 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 термопласти налазе примену код преносника великих снага где се захтева подмазивање и висок стандард квалитета.

Брзина рада композитних зупчаника утиче на пораст радне температуре. Али, 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 отпорност се не мењају. Висока температура смањује модул еластичности и затезну отпорност, а утиче и на повећање пузања. Ови утицаји се морају узети у обзир приликом конструисања зупчаника.

Смањење шума при раду

Композитни зупчаници пружају могућност смањивања буке смањивањем динамичког оптерећења. Услед неслагања и малих грешака код зубаца јављају се мали удари што резултира појавом шума. Међутим, мали модули зубаца композитних зупчаника и њихов мекани материјал, што апсорбује ударе, разлози су што пластични зупчаници имају рад са малом буком или чак без буке, у односу на скупље металне зупчанике.

Економичност композитних зупчаника

Бризгање у калупе за разлику од глодања зубаца металног зупчаника је брзо и економично. Цена коштања 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. На пример, Whirlpool је у новим веш машинама користио ацетал кополимер зупчанике ојачане стакленим влакнима. Ти зупчаници су јефтинији за петину цене коштања металних зупчаника и машина има много мању тежину.



Слика. 3.2 Ацетал кополимер зупчаник

Смањење тежине

Специфична густина челика је 7,81, док специфична густина полиамида 6.6 ојачаног стакленим влакнима и ацетал кополимера је близу 1,4 (табела 3.1.). Да би се пренела иста снага, композитни зупчаници имају веће димензије од металних, али је значајно смањење тежине (масе).

Табела 3.1. Механичке карактеристике композитних материјала

Материјал	Густина материјала [kg/m ³]	Затезна чврстоћа [MPa]	Модул еластичности [MPa]
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	7,81	450	206000

Подмазивање зупчаника

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 неподмазивања зупчастих преносника. Одлука да ли треба зупчаник подмазати или не, и којим средствима за подмазивање важни су фактори које треба конструктор размотрити.

Уопште, оптерећење и век трајања зупчаника који се подмазују зависе од оптерећења у подножју зубаца. Зупчаници који се не подмазују, који развијају високе температуре и преносе мање оптерећење, 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.

Мали коефицијент трења код композитних материјала утиче да је хабање зупчаника минимално. Доказано је да код расхладног уређаја који поседује композитне зупчанике, смањена је топлота у поређењу са истим уређајем који има металне зупчанике за 10% - 15%.

Подмазивање уљем или машћу омогућава додатно искоришћавање јачине композитних зупчаника који су ојачани стакленим влакнима без прекомерног хабања.

Самоподмазујући композитни зупчаници се користе тамо где подмазивање треба да се избегне, као што је код штампача, где се цурење уља или масти 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 и они који се подмазују машћу хладе се ваздухом, и код њих се јавља повишена температура и преносе мање оптерећење [1].

3.1.3 Носивост композитних зупчаника

Развојем 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 лежи у предностима које поседују: апсорција удара и вибрација, мала тежина, отпорност на корозију, могућност рада без подмазивања, израда компликованих облика са знатно нижим трошковима методом бризгања под притиском са великом тачношћу димензија.

Међутим, у односу на металне зупчанике, они имају мању крутост, мању затезну чврстоћу, велику осетљивост на повећање температуре и влаге [5]. Механичке карактеристике се знатно могу побољшати применом одговарајућих влакана. Тако, на пример полимери ојачани стакленим влакнима задржавају добре механичке особине и веће су за 50% у односу на оне полимиде који нису ојачани.



Слика 3.3. Ламинатни зупчаници

Полиоксимерилен (POM) зупчаници имају ограничену примену на високим температурама (тачка топљења је 160°C), али зато добро функционишу на собној температури. Испитивањем пластичних зупчаника оптерећених различитим вредностима оптерећења на температурама од 20°C до 200°C пронађен је материјал поли-етер-етер-китон (PEEK), који може пренети велики обртни момент на високим температурама.

Сама израда и конструисање композитних зупчаника је релативно нова област изучавања, конструктори имају ограничен број података о механичким, хемијским и триболошким особинама у току рада зупчаника. Зато се за правилан избор састава композитног материјала (матрице и влакана за ојачање) најчешће врше испитивања.

3.1.4 Примена термопласта за израду зупчаника

Зупчаници од термопласта су мањих димензија, производња им је у великим серијама. Производе се тако да се материјал загреје до течног стања и убризгава под притиском у калупе. Оваквим поступком се производе зупчаници са модулом $m \geq 0,2 \text{ mm}$ и ширином венца $\geq 0,5 \text{ mm}$. Веће димензије зупчаника, а и мање димензије оних који се производе појединачно, израђују се обрадом из плоча или округлих профила (који се производе екструзијом).

Од великих броја постојећих термопласта за израду зупчаника употребљавају се само неки. Осим полиамида долази у обзир још и полиацетали, јер они располажу својствима неопходним за зупчанике.

Полиацетали имају на пример боља механичка својства од полиамида. У табели 3.2. је приказан преглед механичких својства и назива неких врста полиамида, полиацетала и полиуретана који се употребљавају за израду зупчаника.

Табела 3.2 Термопласти за зупчанике

Својство	Јединица	РА 6	РА 6.6	Полиокси-метилен
Густина	kg/dm^3	1,14	1,14	1,41
Затезна чврстоћа	N/mm^2	80	85	70
Истезање	%	60	40	40
Модул еластичности	N/mm^2	2800	3000	3300
Тврдаћа са куглом (10s)	N/mm^2	140	150	170
Жилавост	J/mm^2	без лома	без лома	без лома
Постојаност облика (1000 h статичког оптерећења)	N/mm^2	45	55	40
Коефицијент трења		0,38...0,45	0,35...0,42	0,34
Трошење	$\mu\text{m/km}$	0,23	0,09	8,7
Могућност краткотрајне употребе код температуре	$^{\circ}\text{C}$	160	170	150
Могућност трајне употребе код температуре	$^{\circ}\text{C}$	120	120	120
Топлотна проводност	w/mk	0,23	0,23	0,31
Истезање на температури 20÷100 $^{\circ}\text{C}$	%	0,95	0,9	1,15
Упијање влаге	%	2,5...3,0	2,5...3,0	0,3

Затезна чврстоћа статички оптерећених термопласта, посебно полиамида, је у односу на металне материјале за зупчанике релативно ниска. Чврстоћа на савијање има веће вредности. Зупчаници су најчешће изложени високим температурама изазваним трењем бокова. Затезна чврстоћа пада нагло са порастом температуре.

Осим најчешће коришћених комбинација - погонски зупчаник од челика, гоњени од термопласта могуће су и комбинације оба зупчаника од истих или од различитих термопласта (на пример полиамид-полиацетал) [7]. Термопласти употребљени за зупчанике могу радити без подмазивања, а могу бити и подмазивани.

Термопласти имају предност тамо где :

- се јављају ударна оптерећења,
- је недовољно подмазивање или га нема уопште,
- је потребна отпорност на хабање деловањем прашине и нечистоћа,
- се тражи отпорност на корозију.

Лоше стране термопласта су :

- лоша проводност топлоте,
- висок коефицијент топлотног ширења.

3.1.4.1 Напони бокова зубаца зупчаника

Радни напон бокова зубаца

Код термопласта постоји могућност оштећења једино код полиамида, појавом рупичења. До појаве рупичења код зупчаника од полиамида долази на кинематској кружници. За прорачун се употребљавају једначине (1) и (2) које се могу употребити и за зупчанике од челика :

$$\sigma_H = \sigma_{H0} \cdot Z_B \quad (1)$$

$$\sigma_{H0} = Z_H \cdot Z_E \cdot Z_\beta \cdot Z_\epsilon \cdot \sqrt{\frac{F_t}{d \cdot b} \cdot \frac{u+1}{u} K_A \cdot K_V \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{H\beta}} \quad (2)$$

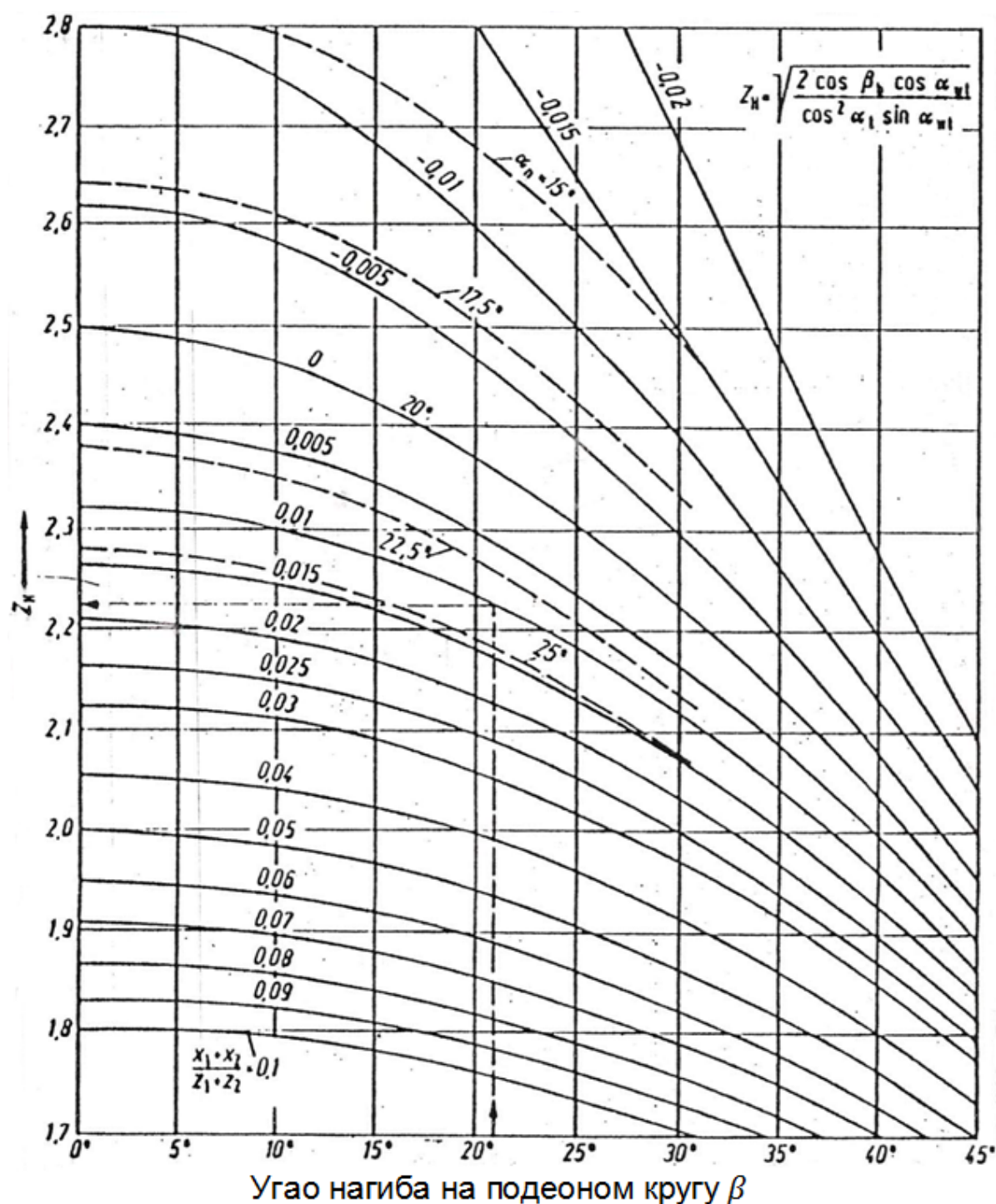
Z_H -фактор облика бока зубаца,

Израз за фактор облика зубаца дат је у једначини (3):

$$Z_H = \sqrt{\frac{2}{\tan \alpha_w \cdot \cos^2 \alpha}} \quad (3)$$

Где је $\epsilon = 20^\circ$; α_w -угао додирнице.

Вредности фактора Z_H се, такође, могу одредити са слике 3.4:



Слика 3.4 Подручје фактора Z_H за $\alpha_n = 20^\circ$; $x_1 + x_2 = 0$; (испрекидане линије означавају $22,5^\circ, 25^\circ$)

Остале величине које карактеришу радни напон бокова зуба зупчаника су:

F_t — обимна сила, b — ширина зупчаника, d — подеони пречник малог зупчаника, u — преносни однос.

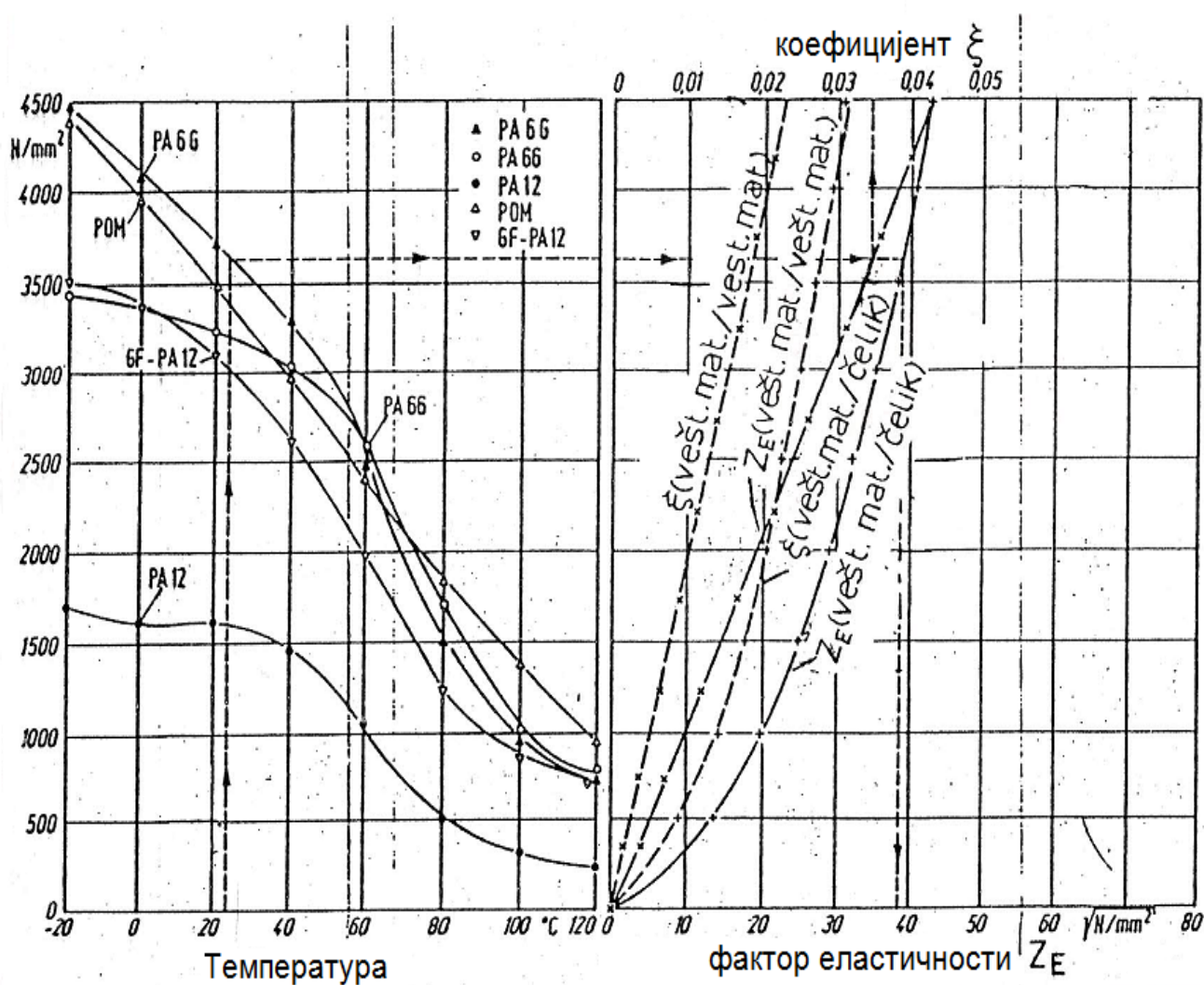
Z_E -фактор еластичности материјала,

За различите материјале спрегнутих зупчаника фактор еластичности материјала је:

$$Z_E = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)}} \quad (4)$$

Где су: E_1, E_2 -модули еластичности, а ν_1, ν_2 –Poisson-ови коефицијенти.

Вредности фактора Z_E , када су у питању вештачки материјали, се такође може одредити помоћу слике 3.5 [5]:



Слика 3.5: а) Модул еластичности, б) фактор еластичности Z_E и коефицијент ξ за прорачун крутости

Z_ε -фактор степена спрезања бокова зупца,

Узима у обзир утицај степена спрезања профила ε_α на величину контактних напона. Вредност фактора се одређује на основу израза наведених у литератури [4].

Z_B -фактор једноструке спреге,

Ако је број зубаца малог зупчаника $z > 20$, онда може да се усвоји $Z_B = 1$.

Z_β -фактор нагиба зубаца ; $Z_\beta = \sqrt{\cos \beta}$ (5)

K_A — фактор радних услова,

K_V — фактор унутрашњих динамичких сила,

$K_{H\alpha}$ — фактор расподеле оптерећења на парове зубаца,

$K_{H\beta}$ — фактор расподеле оптерећења дуж додирне линије бокова зубаца.

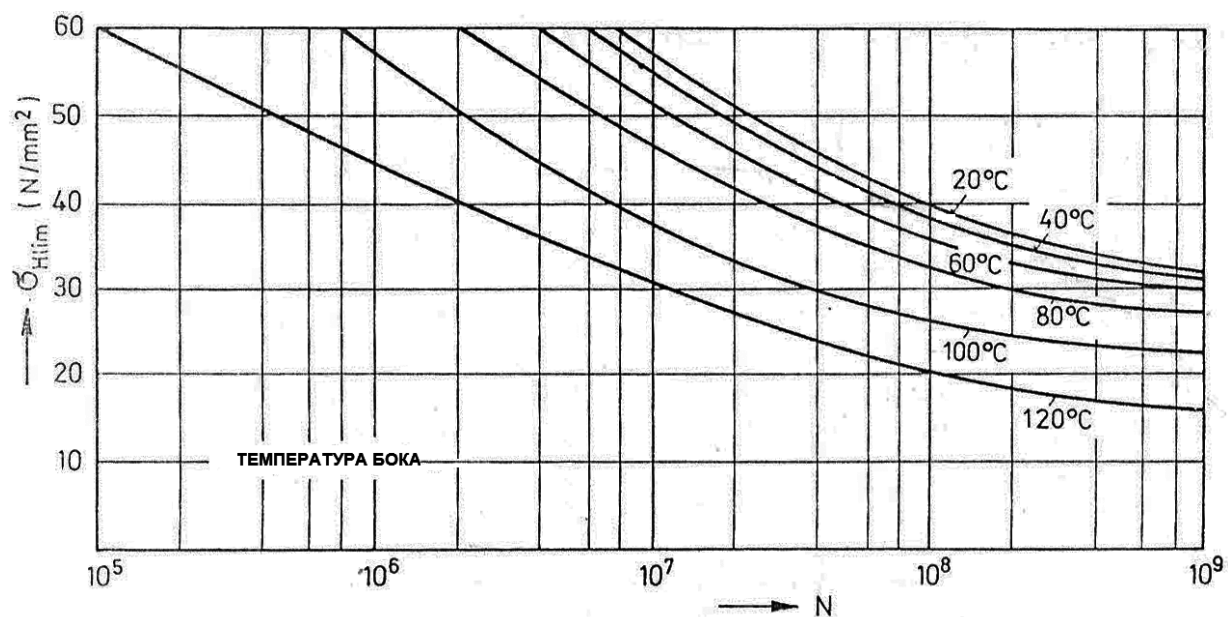
Ови фактори су детаљно изведени и објашњени у литератури [4].

Критични напон бокова зубаца

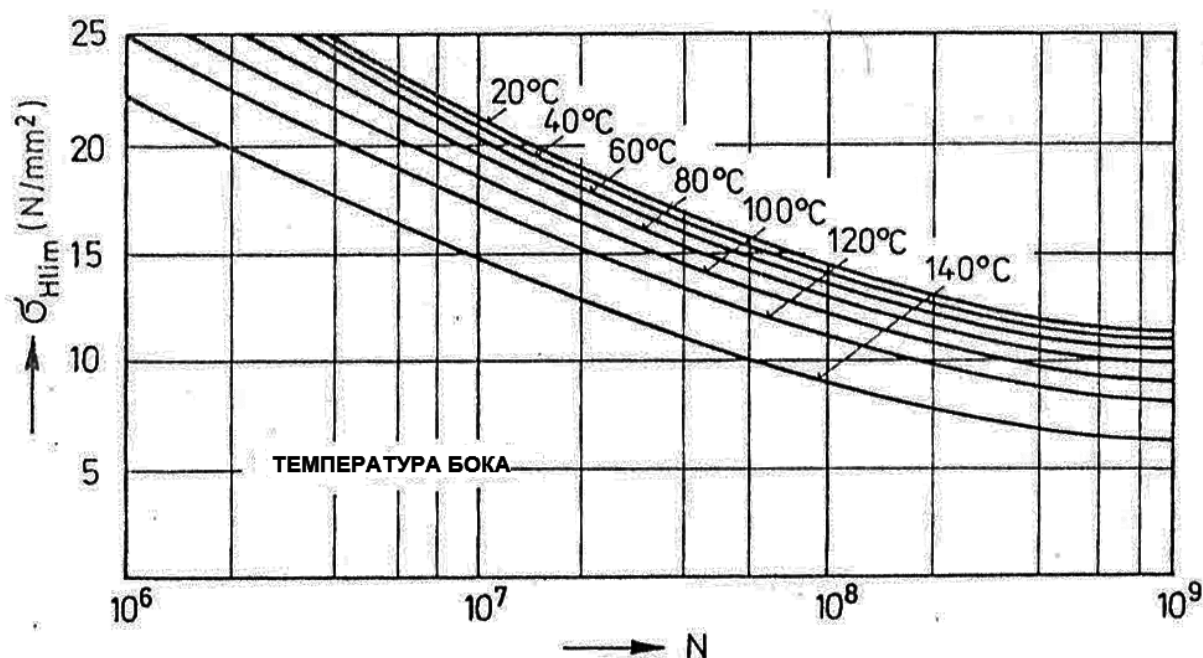
Критични напон (6), под одређеним условима, доводи до појаве критичног стања и неког вида разарања бокова зубаца(хабање зубаца,питинг и др.).Код зупчастих парова модела, критични напон је једнак трајној динамичкој издржљивости бокова зубаца σ_{Hlim} .

$$[\sigma_H] = \sigma_{Hlim} \cdot Z_{NT} \cdot Z_L \cdot Z_R \cdot Z_V \cdot Z_W \cdot Z_X \quad (6)$$

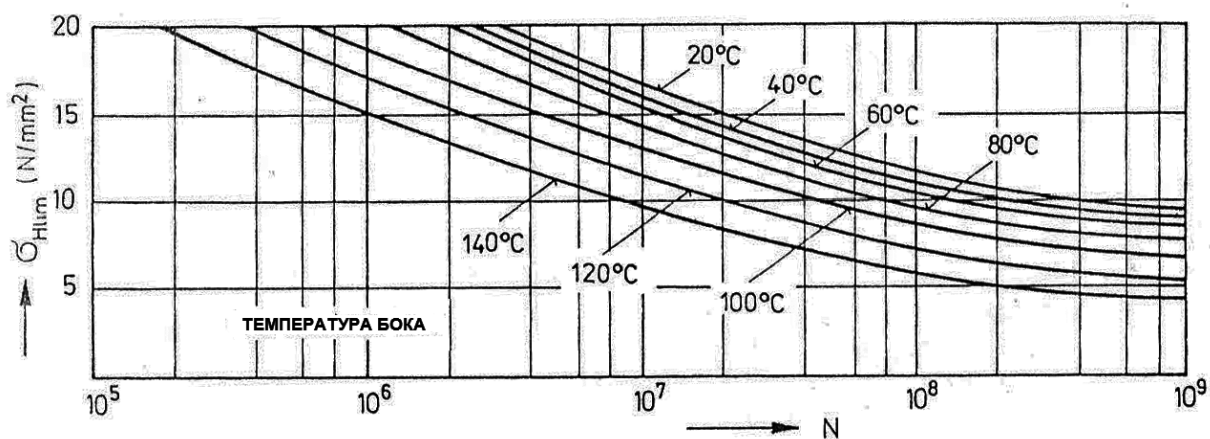
Вредности σ_{Hlim} за полиамид 6.6, као најчешће коришћени вештачки материјал за израду зупчаника, за различите температуре бокова код подмазивања уљем дате су на слици 3.6. За исти материјал подмазиван машћу вредности су дате на слици 3.7, а за неподмазане зупчанике на слици 3.8. Дате вредности σ_{Hlim} важе за модуле $= 1,5 \div 4,5 \text{ mm}$, као и за храпавост $R_z \leq 6 \mu\text{m}$.



Слика 3.6. Вредности σ_{Hlim} за полиамид 6.6 у зависности од вредности температура бокова подмазиваних уљем



Слика 3.7. Вредности σ_{Hlim} за полиамид 6.6 у зависности од вредности температура бокова подмазиваних машћу



Слика 3.8. Вредности σ_{Hlim} за полиамид 6.6 у зависности од температуре бокова без подмазивања

У табели 3.3. дате су измерене вредности динамичке издржљивости полиамида 6.6 за различите материјале зупчаника у спреси, различите модуле, бројеве зубаца и ширине зупчаника.

Табела 3.3. Измерене вредности σ_{Hlim} полиамида 6.6

Спрезани материјали	модул mm	Број зуба зупчаника		Ширина b mm	Ободна сила F_t N	Ободна брзина v m/s	Начин подмазивања	Број промена N	Контактно (Хертзово) напрезање σ_{Hlim} N/mm ²
		испитиваног	његовог пара						
полиамид/полиамид	1,5	66	66	20	400	0,52	суво	$1,4 \cdot 10^6$	3 100
полиамид/полиамид	1,5	62	61	20	160	7,1	суво	$5,7 \cdot 10^6$	2 080
полиамид/полиамид	3	43	43	20	39	9,4	суво	$3,6 \cdot 10^8$	1 020
полиамид/полиамид	3	43	43	20	78	9,4	суво	$3,4 \cdot 10^7$	1 360
полиамид/полиамид	3	30	30	20	220	13,2	суво	$2,7 \cdot 10^6$	1 270
полиамид/полиамид	3	30	30	20	180	6,8	суво	$1,2 \cdot 10^7$	1 270
полиамид/полиамид	3	29	29	20	280	6,5	маст	$8,4 \cdot 10^7$	1 920
полиамид/полиамид	3	29	29	20	160	6,5	маст	$4,4 \cdot 10^6$	2 110
полиамид/полиамид	3	30	30	20	67	13,2	маст	$2,0 \cdot 10^8$	1 550
полиамид/полиамид	3	43	43	20	200	9,7	маст	$1,2 \cdot 10^7$	2 050
полиамид/полиамид	4,5	24	24	20	190	7,9	суво	$4,4 \cdot 10^7$	1 130
полиамид/полиамид	4,5	24	24	20	50	7,9	маст	$1,6 \cdot 10^8$	1 250
полиамид/полиамид	4,5	24	24	20	93	8,2	маст	$3,1 \cdot 10^7$	1 600
полиамид/полиамид	4,5	24	24	20	960	0,57	уље	$1,4 \cdot 10^7$	5 520
полиамид/челик	4,5	24	24	20	960	0,57	уље	$6,0 \cdot 10^6$	7 710
полиамид/челик	4,5	16	24	20	420	11,8	уље	$2,1 \cdot 10^7$	4 800
полиамид/челик	4,5	16	24	20	1110	11,8	уље	$5,3 \cdot 10^6$	5 100
полиамид/челик	4,5	24	24	20	370	7,9	уље	$1,9 \cdot 10^8$	3 000
полиамид/челик	4,5	16	24	20	1110	7,9	уље	$1,8 \cdot 10^6$	3 700

Остале величине су:

Z_{NT} –фактор радног века,

Z_L –фактор подмазивања,

Z_R –фактор храпавости,

- Могуће је у спрези вештачки материјал/ вештачки материјал, да вредност овог фактора буде иста као у спрези вештачки материјал/метал, кад год дубина храпавости металног зупчаника износи $R_z < 3 \mu m$.

Z_V –фактор обимне брзине,

- за термопласте се могу узети исте препоруке које важе и за челичне зупчанике. На тај начин ће брзина индиректно утицати на чврстоћу, у зависности од температуре.
- За слојевито пресоване материјале и подмазивање уљем може се, за интервал $2 < V_t < 12 \text{ m/s}$. Z_V одредити на следећи начин (7):

$$Z_V = 1,05 - 0,2 V_t \quad (7)$$

Z_W –фактор утицаја разлике тврдоћа спрегнутих бокова,

Z_X –фактор величине зубаца.

Ови фактори су детаљно изведени или приказани у табелама или преко дијаграма у литератури [4].

Степен сигурности против разарања бокова зубаца

Мерило сигурности против разарања бокова зубаца представља однос критичног напона за радне услове зупчаника и напона на боковима зубаца. Степен сигурности се означава са S_H и једнак је (8):

$$S_H = \frac{[\sigma_H]}{\sigma_H} \geq S_{Hmin} \quad (8)$$

Према најновијим препорукама усваја се $S_{Hmin} = 1,0 \dots 1,2$, ако су спрегнути зупчаници од различитих материјала.

3.1.4.2 Напони у подножју зупца зупчаника

Радни напон у подножју зубаца

Прорачун се врши према истим једначинама које важе и за зупчанике од челика (9):

$$\sigma_F = Y_{Sa} \cdot Y_{Fa} \cdot Y_\varepsilon \cdot Y_\beta \cdot \frac{F_t}{b \cdot m_n} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{F\alpha} \cdot K_{F\beta} \quad (9)$$

F_t — обимна сила,

b — ширина зупчаника,

m_n — модул.

Како Y_{Sa} и Y_{Fa} зависе од истих параметара често се замењују једним фактором:

$$Y_{FS} = Y_{Sa} \cdot Y_{Fa}$$

Y_{FS} — фактор облика зубаца за прорачун савојног напрезања у корену зубаца, вредност се читава, као код зупчаника од челика, са дијаграма (слика 3.9),

Y_ε — фактор степена спрезања. С обзиром на мали модул еластичности зупчаника од термопласта, а као последица тога велике деформације зубаца и належућих површина бокова, узима се да се код зупчаника од термопласта оптерећење равномерно распоређује на све зубце у захвату ($Y_\varepsilon = 1$).

Y_β — фактор нагиба косих зубаца,

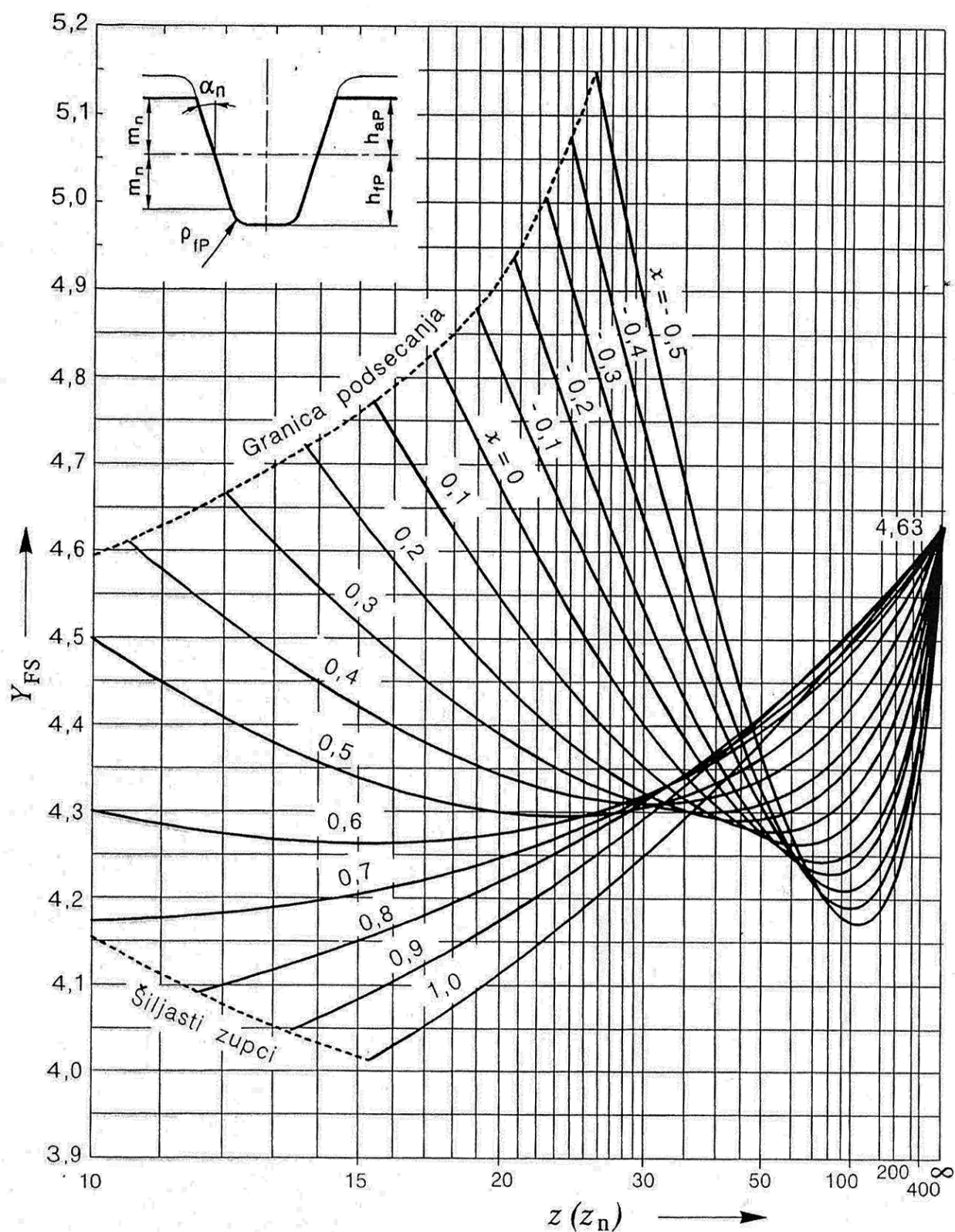
K_A — фактор радних услова,

K_V — фактор унутрашњих динамичких сила,

$K_{F\alpha}$ — фактор расподеле оптерећења на парове зубаца,

$K_{F\beta}$ — фактор расподеле оптерећења дуж додирне линије бокова зубаца.

Наведени фактори су детаљно објашњени у литератури [4].



Слика 3.9. Фактори облика за оптерећење корена зубца

$$(\alpha_n = 20^\circ; \frac{h_{ap}}{m_n} = 1,0; \frac{h_{fp}}{m_n} = 1,25)$$

Критични напон подножја зубаца

Основни вид разарања, у подножју зупца зупчаника, је лом зупца. Лом настаје услед наглог преоптерећења у току рада или замора.

Критични напон подножја зубаца у радним условима је дат једначином (10):

$$[\sigma_F] = \sigma_{Flim} \cdot Y_{NT} \cdot Y_{ST} \cdot Y_{\delta relT} \cdot Y_{RrelT} \cdot Y_X \quad (10)$$

Где је:

σ_{Flim} — трајна динамичка издржљивост подножја зубаца,

Y_{NT} — фактор радног века,

Y_{ST} — фактор концентрације напона опитног зупчаника,

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

Y_{RrelT} — релативни фактор храпавости,

Y_X — фактор величине пресека.

Сви ови фактори су детаљно објашњени у литератури [4].

Код променљивих напрезања (као нпр. код међузупчаника) смањује се чврстоћа на око 67%, а код изолационе тканине на око 80%.

Уколико код полиамидних зупчаника недостаје вредност за променљиву чврстоћу, онда се узима вредност као код челика помножена фактором 0,67.

Степен сигурности подножја зубаца

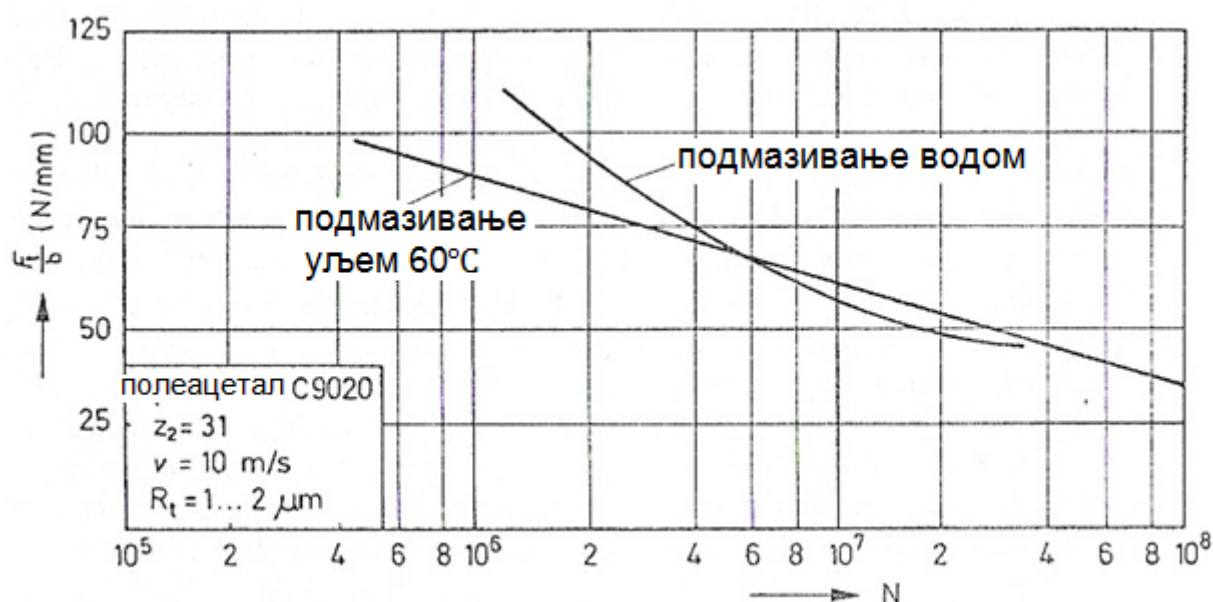
Степен сигурности подножја зубаца или степен сигурности против заморног лома зубаца у корену (подножју) се одређује за погонски и гоњени зупчаник. Степен сигурности представља однос критичног и радног напона у подножју зубаца за одговарајући зупчаник.

Општи израз је (11):

$$S_F = \frac{[\sigma_F]}{\sigma_F} \geq S_{Fmin}; \quad S_{Fmin} = 1,25 \dots 2,5. \quad (11)$$

3.1.4.3 Подмазивање зупчаника од термопласта

Ради што мањег хабања и због губитака до којих долази трењем између бокова, зупчанике би требало подмазивати. Мерења функционалне зависности оптерећења по јединици ширине зубца F_t/b и броја промена (века трајања) зупчаника од полиацетала (С 9020), $Z_2 = 31$, $v = 10$ m/s у захвату са зупчаником од челика храпавости $R_z = 1-2$ μm показала су да је век трајања готово једнак ако је подмазивање вршено водом или уљем (слика 3.10). То заправо значи да се подмазивање може вршити успешно и водом. Коефицијент трења неподмазиваних зупчаника износи $\mu = 0,2$, подмазиваних само једанпут машћу за зупчанике $\mu = 0,09$, подмазиваних уљаном маглом $\mu = 0,07$, а подмазиваних уљем $\mu = 0,06$.



Слика 3.10. Специфична оптерећеност у односу на број промена код подмазивања уљем и подмазивања водом

3.2 Примена термопласта за израду лежишта

3.2.1 Клизна лежишта од термопластичних маса

Присуство триболошких процеса код клизних лежишта је обавезна и непожељна појава којој се мора посветити посебна пажња, како у фази пројектовања тако и у фази експлоатације. Прецизним дефинисањем триболошког оптерећења, познавањем услова експлоатације и оптималним конструктивним решењем, пројектант настоји да у фази пројектовања сведе трење и хабање на минимум, односно да обезбеди минималне непроизводне губитке енергије, захтевану поузданост и довољан век трајања клизног лежишта.

Термопластичне масе које представљају једно од основних обележја технолошког развоја развијених земаља пред крај 20-ог века, нуде широк дијапазон особина (нарочито триболошких), као и могућности да се коришћењем одређене врсте и количине додатака могу добити материјали који одговарају датом триболошком оптерећењу.

У поређењу са металним клизним лежиштима, термопластична лежишта имају предности и недостатке који се могу разврстати кроз корисне и штетне појаве.

Најчешће коришћени материјали за израду лежишта су:

Рулон®

Рулон® је специјална форма TFE флуорокарбона и других инертних додатака. Рулон А је први пут представљен индустрији 1952. године као материјал за пластичне лежајеве са малим коефицијентом трења и одличном отпорношћу на абразију. Одмах је употребљен у многим апликацијама као материјал за лежајеве јер му није потребно подмазивање и не мења особине у опсегу температура од -240° до $+290^{\circ}\text{C}$, при чему му не смета рад у средини са корозивним материјама. Рулон А је 1000 пута механички отпорнији од TFE, мање се деформише приликом оптерећења и чвршћи је.

РА 6.6 са додатком MoSO_2

Додатак MoS_2 полиамиду 6.6 даје веома добре особине клизања. Користи се за израду елемената изложених клизању (лежајеви, клизне лајсне...)

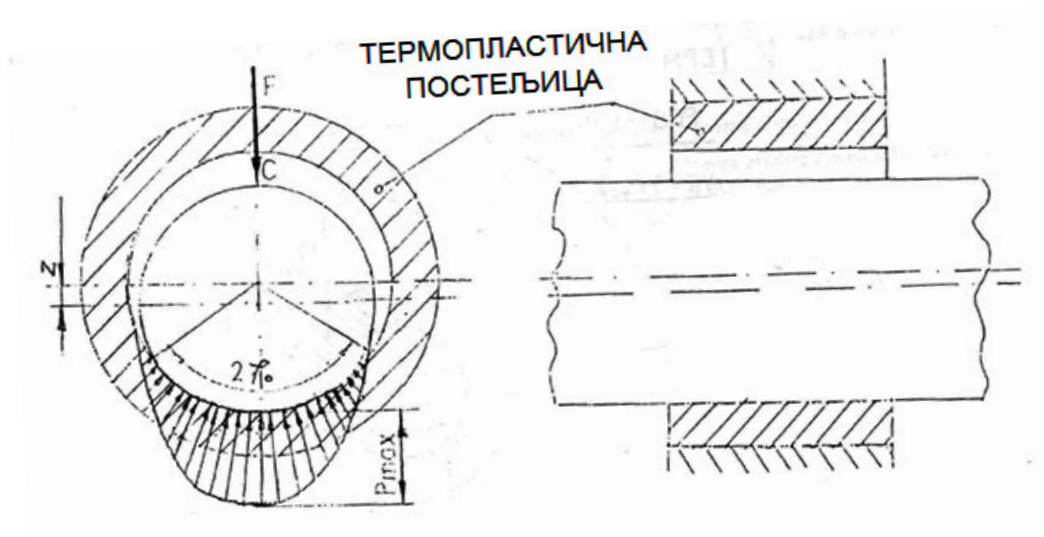
Анализа оптерећења

Први корак у пројектовању клизних лежишта је анализа оптерећења која обухвата прикупљање информација о захтевима који се постављају постелици као елементу трибомеханичког система и као елементу читаве конструкције у оквиру које ће бити уграђена. Исправна анализа оптерећења подразумева поштовање свих утицајних фактора на триболошко оптерећење клизног лежишта од термопластичних маса и њихова класификација дата је на слици 3.11.



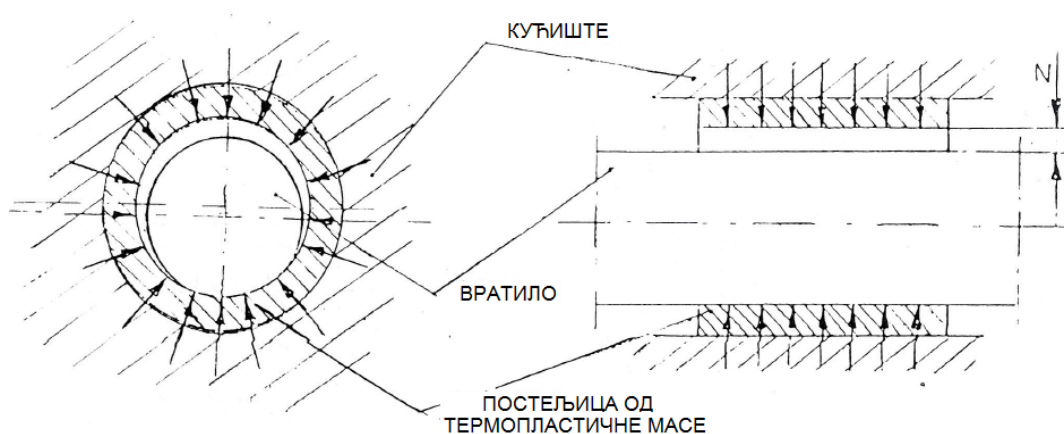
Слика 3.11. Класификација неопходних информација за испитивану конструкцију лежишта од термопластичних маса

На контактної зони измађу постелице и вратила, која је ограничена ширином лежишта и углом $2\varphi_0$ (слика 3.12), као последица трења развија се топлота и она се одводи већим делом преко кућишта на околни ваздух док мањи део топлоте преузима ваздух и одводи га аксијално кроз вратило.



Слика 3.12. Шема оптерећења термопластичног клизног лежишт

Појава топлоте у зони контакта постељица-рукавац, доводи до ширења термопластичне постељице. То ширење се битно разликује од ширења металне постељице јер термопластичне масе имају знатно већи топлотни коефицијент ширења од метала, одакле следи да се термопластична постељица шири много брже него метално кућиште у које је уграђена.



Слика 3.13. Смер ширења постељице од термопластичне масе

Метално кућиште на слици 3.13. спречава ширење спољашњег пречника термопластичне постељице. Смер промене запремине биће принудно одређен према оси вратила што има за последицу смањење експлоатационог зазора и може довести до критичних вредности угла контакта $2\varphi_0$.

Избор термопластичне масе

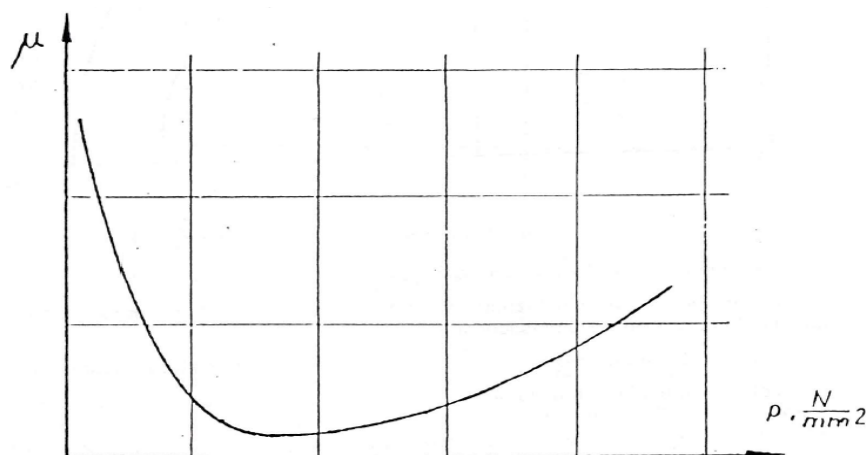
Доминантни фактори за избор материјала триболошких система у експлоатацији су коефицијент трења и отпорност на хабање. Испуњење основних захтева, које поставља пројектни задатак, омогућавају термопластичне масе и то на специфичан начин.

За разлику од метала, код термопластичних маса, коефицијент трења зависи од више фактора, а неки од њих су дати на слици 3.14.



Слика 3.14. Неки од утицајних фактора на коефицијент трења термопластичних маса

За разлику од метала, код термопластичних маса, коефицијент трења знатно зависи од оптерећења. Са порастом оптерећења може доћи до пада коефицијента трења (Слика 3.15).



Слика 3.15. Утицај оптерећења на величину коефицијента трења термопластичних маса

Табела 3.4. Најчешће коришћене пластичне масе за израду клизних лежишта са препорукама области примене

Материјал	Дозвољено оптерећење N/mm^2	Дозвољена радна температура $^{\circ}C$	Коефицијент трења	Област примене
Термопласти без пуниоца (полиамиди, полиацетали)	10	100	$0,4 \div 0,45$ Неподмазивано	Лежишта за возила, текстилне машине, машине за прехранбenu инд., где је подмазивање тешко остварљиво или непожељно
Термопласти са пуниоцима (графит, MoS_2 , PTFE) или на чеоној подлози	$10 \div 14$	$100 \div 130$	$0,15 \div 0,35$	Исто као претходни само за виша оптерећења
PTFE са пуниоцем (стакло, бронза, графит)	$2 \div 7$	250	$0,05 \div 0,35$	За израду лежишта када се захтева низак коефицијент трења и незнатно хабање могу се по потреби и према могућностима подмазивати
PTFE са пуниоцем на чеоној подлози	140	280	$0,05 \div 0,3$	За лежишта ваздухопловства, спојница, конвејера
Полиамиди са пуниоцем и без њега(графит)		300	$0,4 \div 0,6$ Без пуниоца $0,1 \div 0,3$ Са пониоцем	За неподмазивана лежишта и заптивке са добром отпорношћу на повишеним температурама

3.3 Примена композитних материјала за израду вратила

3.3.1 Карактеристике композитних вратила

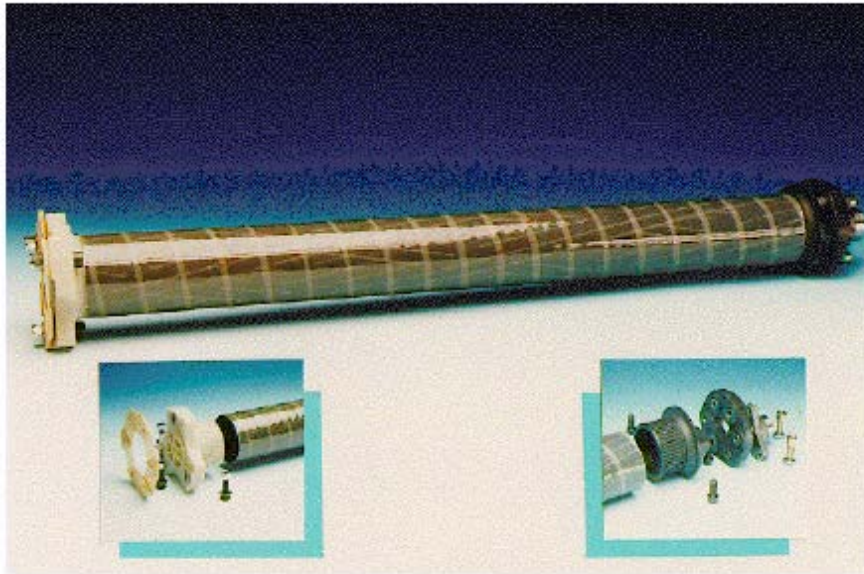
Развој композитних вратила отпочео је још шездесетих година прошлог века. Године 1962. *Spicer Universal Joint Division Of Dana Corporation* је направио своју прву верзију композитног вратила. Истраживања су настављена 1975. и 1983. године *Spicer Universal Joint Division Of Dana Corporation* је према пројекту *Strongwella* направио графит-алуминијумску цев за *Ford econoline* модел. *Strongwell* користи нову опрему и технологију за прорачун и производњу вратила. Композити од стаклених влакана, графита и специјалних смола су били урађени околу алуминијумске цеви.

General Motors је 1988. године направио вратило од стаклених влакана/карбонских влакана и полиестерских смола околу алуминијумске цеви за модел GTM-400 пикап.

Minn Kota је развио технологију којом се комбинују полимерне смоле и различито оријентисана стаклена влакна. У калупу се од стаклених или графитних влакана и полиестерске смоле, након загревања, обликује вратило.

FR-HITEMP је отпочео дизајнирање, производњу и пласман вратила од карбонских влакана ојачаних пластичном структуром. Технологија коју користе се у многоне разликује од традиционалне методе. Према традиционалној методи композити од карбонских влакана, која су најпре провучена кроз течну смолу, се намотавају на цев. Метода коју примењује FR-HITEMP користи препрег (претходно импрегнирану) траку од карбонских влакана која се директно обавија око цеви. Ова метода има следеће предности:

- тачно подешавање угла и места влакана,
- контрола затегнутости и компактности композитног материјала,
- тачна контрола односа смоле и влакана,
- брзо намотавање око више вратила.



Слика 3.16. Композитно вратило

Тестрањем у лабораторији ВАС (*Burkett Advanced Composite Tehnologies Ltd.*) је утврђено да композитна вратила (слика 3.16.) имају мању масу и знатно већу торзиону отпорност у поређењу са класичним челичним вратилом (слика 3.17.), или са популарним алуминијумским вратилом (слика 3.18.).



Слика 3.17. Челична вратила

Комбинација алуминијум и карбонска влакна/епокси смола је погодна јер алуминијум поседује потребну отпорност на увијање, док је улога карбонских влакана/епокси композита повећана отпорност на фреквенције услед савијања.

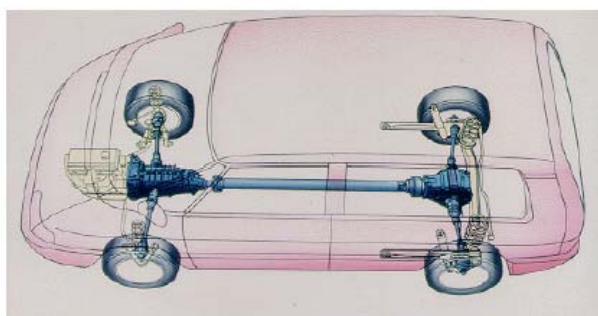


Слика 3.18. Алуминијумско вратило

Погонско вратило код аутомобила са задњом вучом (слика 3.19.), служи за пренос снаге од мотора, преко диференцијала до задњих точкова аутомобила. 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 1m, па се челично погонско вратило ради из два дела. То дводелно челично погонско вратило има сложену структуру и велику тежину и ствара буку и вибрације централног лежаја аутомобила. Зато се ово дводелно вратило замењује једноделним композитним вратилом (слика 3.20.).



Слика 3.19. Челично погонско вратило аутомобила са задњом вучом



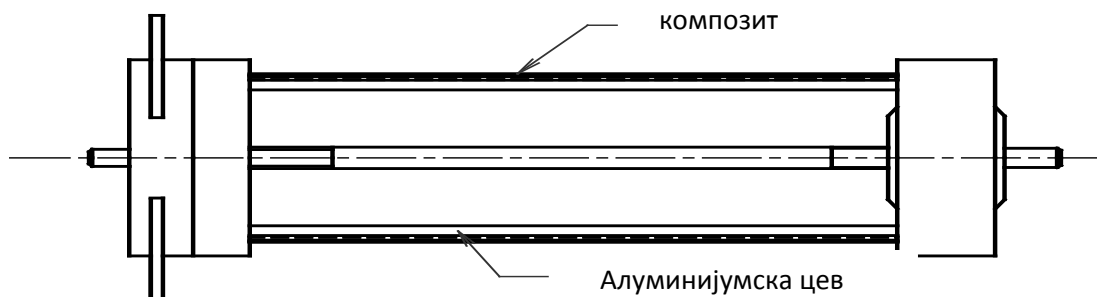
Слика 3.20. Композитно погонско вратило

3.3.2 Израда композитних вратила

Искуства са композитним материјалима су показала да треба наћи компромисна решења између тежње да се добије минимална маса конструкције са максималним механичким карактеристикама и трошкова организације њихове производње.

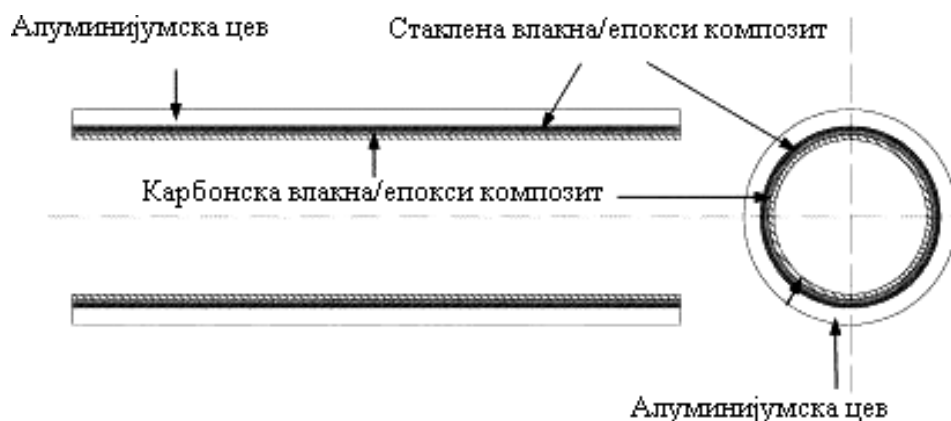
Најчешће се за израду вратила користе карбонска влакна ојачана пластичном структуром или хибридне конструкције од карбонских и стаклених влакана. Такође, погодна је и комбинација стаклених или графитних влакана и полиестерске смоле. Због своје велике отпорности, носивости и специфичне крутости као идеални за израду вратила показали су се и ламинати добијени комбинацијом метал-матрица-композит [2].

Прва верзија (дата на слици 3.21) комбинованог алуминијум/композитног (Ал-композитног) погонског вратила састојала се од алуминијумске цеви око које је био урађен омот од једног слоја стаклених влакана и већег броја слојева карбонских влакана/епокси пре-прег материјала. Улога слоја од стаклених влакана је била да елиминише појаву корозије између алуминијума и карбонских влакана.



Слика 3.21. Комбиновано погонско вратило

У скорије време све више се приступа новом начину израде комбинованог вратила где су слојеви карбонских влакана и епокси композита урађени по унутрашњој површини алуминијумске цеви. На тај начин елиминише се могућност оштећења композитног слоја, а смањена је и корозија. Изглед једног таквог вратила је приказан на слици 3.22.



Слика 3.22. Шематски приказ алуминијум/композитног погонског вратила

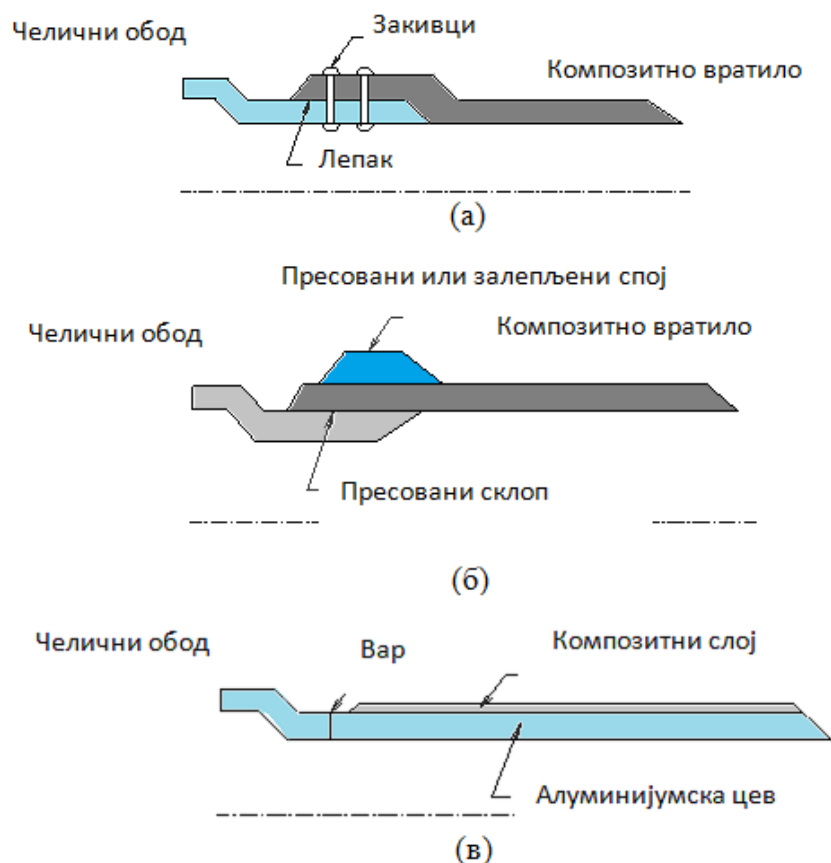
Приликом израде комбинованог вратила проблем је у поузданом спајању комбинованог дела са челичним или алуминијумским ободом спојнице, што је један од најтежих задатака [3]. Постоје три добра начина спајања ова два дела (слика 3.23.), а то су:

- Механички спој са завртњима или закивцима,
- Спајање лепљењем,
- Спајање заваривањем.

Код механичког споја се врши спајање подлога завртњима или закивцима. Пошто су за постављање завртња или закивака потребне рупе, то се у отворима може јавити концентрација напона, замор и корозиони проблеми.

За спајање лепљењем користи се више слојева лепка. Овакав спој доводи до расподеле оптерећења на више додирних површина, у поређењу са механичким спојем нису потребни отвори и већа је отпорност на замор. Међутим, залепљени спој треба да има добро обрађене и припремљене површине које се лепе, а приликом оштећења у току експлоатације тешко га је раставити због оправки.

Заваривањем се сједињавају две металне подлоге у комбинацији са температуром и металрушким условима. У том случају, због температуре и различитих коефицијената температурног ширења материјала може доћи до различитог ширења спољашњег и унутрашњег дела.



Слика 3.23. Врсте спајања композитног вратила и обода спојнице: а) спајање закивцима, б) залепљени слој, в) спајање заваривањем

3.3.3 Испитивање композитних вратила

Композитна погонска вратила аутомобила морају да буду јака, лака и поуздана. Да би се уверили у сигурност да ће сви ови захтеви бити испуњени сваки производ пролази кроз ригорозно тестирање. Тако, на пример у ЦТГ-овој техничкој лабораторији испитује се трајност, јачина и замор под дејством променљивог оптерећења. После тестирања које су спровели дошло се до следећих закључака [3]:

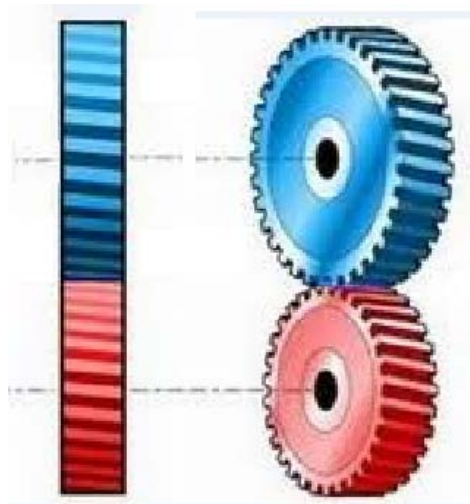
- композитно погонско вратило може да издржи 10^7 циклуса оптерећења без разарања при дејству динамичког оптерећења од $\pm 500 \text{ Nm}$,
- критични број обртаја композитног вратила износи око 9000 min^{-1} ,
- композитно погонско вратило је око 50% лакше од одговарајућег челичног вратила,
- минимална вредност обртног момента коју може пренети композитно вратило износи 3550 Nm .

4. РАЧУНСКИ ПРИМЕР ПРОРАЧУНА ЧВРСТОЋЕ ЗУПЧАНИКА ОД ВЕШТАЧКОГ МАТЕРИЈАЛА

За зупчанике од ливеног полиамида за погон ваљцима проверити вредности степена сигурности бокова и подножја зубаца, уколико су препоручене минималне вредности $S_{Hmin} = 1,0$ и $S_{Fmin} = 1,25$;

Подаци:

- Снага на зупчанику 1: $P_1 = 12,35 \text{ kW}$
- Бројеви обртаја: $n_1 = 714,28 \text{ min}^{-1}$; $n_2 = 266,34 \text{ min}^{-1}$;
- Подаци зупчаника:
 - $m_n = 3,5 \text{ mm}$
 - $\beta = 12^\circ$
 - $\alpha_0 = 20^\circ$
 - $x_1 x_2 = 0$
 - $b = 71 \text{ mm}$
 - $z_1 = 22$; $z_2 = 59$
- Подмазивање: потопљено у уљу
- Степен искоришћења зупчастог пара: $\eta = 0,97$
- Температура околине: $\theta_0 \approx 23^\circ \text{C}$
- Храпавост зубаца: $R_z \leq 4 \text{ (}\mu\text{m)}$
- Материјал зупчаника: полиамид 6.6



ПРОРАЧУН

4.1 Прорачун основних димензија зупчаника зупчастог пара $z_1 - z_2$:

1. Стандардни модул: $m_n = 3,5$
2. Стандардни профил: $\alpha_p = 20^\circ$; $c_p = (0,2 \div 0,3)m_n$; $c_p = 0,25 \cdot 3,5 = 0,875$
 $h_{fp} = m_n + c_p = 3,5 + 0,875 = 4,375 \text{ mm}$; $h_{ap} = m_n = 3,5 \text{ mm}$;
 $h_p = h_{fp} + h_{ap} = 7,875 \text{ mm}$
3. Угао нагиба профила: $\text{tg} \alpha_t = \frac{\text{tg} \alpha_p}{\cos \beta} = \frac{0,364}{0,978} = 0,372$; $\alpha_t = 20,4052^\circ$
4. Корак на подеоном кругу: $p_t = \frac{m_n \cdot \pi}{\cos \beta} = \frac{3,5 \cdot \pi}{0,978} = 11,24 \text{ mm}$
5. Корак на основном кругу: $p_{bt} = p_t \cdot \cos \alpha_t = 11,24 \cdot \cos 20,4052^\circ = 10,532 \text{ mm}$
6. Пречници подеоних кругова:

$$d_1 = \frac{m_n \cdot z_1}{\cos \beta} = \frac{3,5 \cdot 22}{0,978} = 78,73 \text{ mm}$$

$$d_2 = \frac{m_n \cdot z_2}{\cos \beta} = \frac{3,5 \cdot 59}{0,978} = 211,15 \text{ mm}$$
7. Ширина зупчаника: $b = 71 \text{ mm}$
8. Пречници основних кругова:
 $d_{b1} = d_1 \cdot \cos \alpha_t = 78,73 \cdot 0,937 = 73,77 \text{ mm}$
 $d_{b2} = d_2 \cdot \cos \alpha_t = 211,15 \cdot 0,937 = 197,85 \text{ mm}$
9. Пречници кинематских кругова:
 $d_{w1} = d_1 = 78,73 \text{ mm}$
 $d_{w2} = d_2 = 211,15 \text{ mm}$
10. Осно растојање:

$$a = \frac{d_{w1} + d_{w2}}{2} = \frac{78,73 + 211,15}{2} = 144,94 \text{ mm}$$
11. Пречници подножних кругова:
 $d_{f1} = d_1 - 2 \cdot h_{fp} + 2 \cdot x_1 \cdot m_n = 78,73 - 2 \cdot 4,375 + 2 \cdot 0 \cdot 3,5 = 69,98 \text{ mm}$
 $d_{f2} = d_2 - 2 \cdot h_{fp} + 2 \cdot x_2 \cdot m_n = 211,15 - 2 \cdot 4,375 + 2 \cdot 0 \cdot 3,5 = 202,4 \text{ mm}$
12. Пречници темених кругова:
 $d_{a1} = 2 \cdot a - d_{f2} - 2c = 2 \cdot 144,94 - 202,4 - 2 \cdot 0,875 = 85,73 \text{ mm}$

$$d_{a2} = 2 \cdot a - d_{f1} - 2c = 2 \cdot 144,94 - 69,98 - 2 \cdot 0,875 = 218,15 \text{ mm}$$

13. Парцијалне дужине додирнице:

$$g_a = \frac{1}{2} \sqrt{d_{a1}^2 - d_{b1}^2} - r_1 \cdot \sin \alpha_{wt} = \frac{1}{2} \sqrt{85,73^2 - 73,77^2} - 39,365 \cdot 0,348$$

$$= 8,15 \text{ mm}$$

$$g_f = \frac{1}{2} \sqrt{d_{a2}^2 - d_{b2}^2} - r_2 \cdot \sin \alpha_{wt} = \frac{1}{2} \sqrt{218,15^2 - 197,85^2} - 105,575 \cdot 0,348$$

$$= 9,205 \text{ mm}$$

14. Дужина активног дела додирнице:

$$g_\alpha = g_a + g_f = 8,15 + 9,205 = 17,355 \text{ mm}$$

15. Парцијални степени спрезања:

$$\varepsilon_a = \frac{g_a}{p_{bt}} = \frac{8,15}{10,532} = 0,77$$

$$\varepsilon_f = \frac{g_f}{p_{bt}} = \frac{9,205}{10,532} = 0,87$$

16. Степен спрезања профила:

$$\varepsilon_\alpha = \varepsilon_a + \varepsilon_f = 0,77 + 0,87 = 1,64$$

17. Степен спрезања бочних линија:

$$\varepsilon_\beta = \frac{b \cdot \operatorname{tg} \beta}{p_t} = \frac{71 \cdot 0,212}{11,24} = 1,63$$

18. Укупни степен спрезања:

$$\varepsilon_\gamma = \varepsilon_\alpha + \varepsilon_\beta = 1,64 + 1,63 = 3,27$$

19. Преносни однос:

$$u = \frac{z_2}{z_1} = \frac{59}{22} = 2,681$$

20. Угаоне брзине:

$$\omega_1 = \frac{\pi \cdot n_1}{30} = 74,76 \text{ s}^{-1}$$

$$\omega_2 = \frac{\pi \cdot n_2}{30} = 27,87 \text{ s}^{-1}$$

21. Обртни момент:

$$T_1 = \frac{P_1}{\omega_1} = \frac{12350}{74,76} = 165,19 \text{ Nm}$$

$$T_2 = \frac{P_1 \eta}{\omega_2} = \frac{12350 \cdot 0,97}{27,87} = 429,85 \text{ Nm}$$

22. Обимна сила:

$$F_{t1} = \frac{2 \cdot T_1}{d_1} = \frac{2 \cdot 165,19}{78,73} = 4196 \text{ N}$$

$$F_{t2} = \frac{2 \cdot T_2}{d_2} = \frac{2 \cdot 429,85}{211,15} = 4071,5 \text{ N}$$

23. Обимна брзина:

$$V_t = \frac{d_1 \cdot n_1 \cdot \pi}{60 \cdot 1000} = \frac{78,73 \cdot 714,28 \cdot \pi}{60000} = 2,94 \text{ m/s}$$

4.2 Прорачун носивости по критеријуму чврстоће бокова зубаца за зупчаник z_1 :

Радни напон бокова зубаца

$$\sigma_{H0} = \sqrt{\frac{F_{t1}}{d_1 \cdot b} \cdot \frac{u+1}{u} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{H\beta} \cdot Z_H \cdot Z_E \cdot Z_\beta \cdot Z_\epsilon}$$

$$Z_H = 2,5 - \text{дијаграм, слика 3.4}$$

$$Z_E = 35 \sqrt{N/mm^2} - \text{дијаграм, слика 3.5}$$

$$Z_\beta = \sqrt{\cos \beta} = 0,989$$

$$Z_\epsilon = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_\alpha}} = 0,89$$

$$K_A = 1,1$$

$$K_V = 1$$

$$K_{H\alpha} = 1$$

$$K_{H\beta} = 1$$

$$\sigma_{H0} = \sqrt{\frac{4196}{78,73 \cdot 71} \cdot \frac{2,681+1}{2,681} \cdot 1,1 \cdot 2,5 \cdot 35 \cdot 0,989 \cdot 0,89}$$

$$\sigma_{H0} = 82,01 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_H = \sigma_{H0} \cdot Z_B = 82,01 \cdot 1 = 82,01 \text{ N/mm}^2$$

Критични напон бокова зубаца

$$[\sigma_H] = \sigma_{Hlim} \cdot Z_{NT} \cdot Z_L \cdot Z_R \cdot Z_V \cdot Z_W \cdot Z_X$$

полиамид 6.6: $\sigma_{Hlim} = 60 \text{ MPa}$ - дијаграм, слика 3.6

$$Z_{NT} = 1$$

$$Z_L = 1,04$$

$$Z_R = 1,3$$

$$Z_V = 1,1$$

$$Z_W = 1$$

$$Z_X = 1$$

$$[\sigma_H] = 60 \cdot 1 \cdot 1,04 \cdot 1,3 \cdot 1,1 \cdot 1 \cdot 1 = 89,232 \text{ MPa}$$

Степен сигурности против разарања бокова зубаца:

$$S_H = \frac{[\sigma_H]}{\sigma_H}$$

$$S_H = \frac{89,232}{82,01} = 1,1$$

4.3 Прорачун носивости по критеријуму чврстоће подножја зубаца за зупчаник z_1 **Радни напон подножја зубаца**

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

$Y_{FS} = 4,45$ – дијаграм, слика 3.9

$$Y_\beta = 1 - \epsilon_\beta \cdot \frac{\beta}{120^\circ} = 1 - 1 \cdot \frac{12^\circ}{120^\circ} = 0,9$$

$$Y_\epsilon = 1$$

$$K_A = 1,1$$

$$K_V = 1$$

$$K_{F\alpha} = 1$$

$$K_{F\beta} = 1$$

$$\sigma_{F1} = 4,45 \cdot 1 \cdot 0,9 \cdot \frac{4196}{71 \cdot 3,5} \cdot 1,1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 74,39 \text{ N/mm}^2$$

Критични напон у подножју зубаца

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

$$\sigma_{Flim} = 90 \text{ N/mm}^2$$

$$Y_{NT} = 1$$

$$Y_{ST} = 2$$

$$Y_{\delta relT} = 1$$

$$Y_{RrelT} = 1$$

$$Y_X = 1$$

$$[\sigma_F] = 90 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 180 \text{ N/mm}^2$$

Степен сигурности против разарања подножја зубаца:

$$S_F = \frac{[\sigma_F]}{\sigma_{F1}} = \frac{180}{74,39} = 2,42$$

4.4 Прорачун носивости по критеријуму чврстоће подножја зубаца за зупчаник z_2

Радни напон подножја зубаца

$$\sigma_{F2} = Y_{FS} \cdot Y_{\epsilon} \cdot Y_{\beta} \cdot \frac{F_{t2}}{b \cdot m_n} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{F\alpha} \cdot K_{F\beta}$$

$$Y_{FS} = 4,25 - \text{дијаграм, слика 3.9}$$

$$Y_{\beta} = 1 - \epsilon_{\beta} \cdot \frac{\beta}{120^\circ} = 1 - 1 \cdot \frac{12^\circ}{120^\circ} = 0,9$$

$$Y_{\epsilon} = 1$$

$$K_A = 1,1$$

$$K_V = 1$$

$$K_{F\alpha} = 1$$

$$K_{F\beta} = 1$$

$$\sigma_{F2} = 4,25 \cdot 1 \cdot 0,9 \cdot \frac{4071,5}{71 \cdot 3,5} \cdot 1,1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 68,94 \text{ N/mm}^2$$

Критични напон у подножју зубаца

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

$$\sigma_{Flim} = 90 \text{ N/mm}^2$$

$$Y_{NT} = 1$$

$$Y_{ST} = 2$$

$$Y_{\delta relT} = 1$$

$$Y_{RrelT} = 1$$

$$Y_X = 1$$

$$[\sigma_F] = 90 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 180 \text{ N/mm}^2$$

Степен сигурности против разарања подножја зубаца:

$$S_F = \frac{[\sigma_F]}{\sigma_{F2}} = \frac{180}{68,94} = 2,61$$

Закључак: Вредности степена сигурности су веће од минимално прописаних, па у току рада неће доћи до разарања бокова зубаца нити до лома зубаца у подножју.

5. ЗАКЉУЧАК

Данас све више до изражаја долази употреба савремених – композитних материјала. Њиховом употребом се може смањити маса конструкција и до 80%.

Производња машинских делова од савремених материјала (композита и термопласта) има веома значајну улогу у индустрији, због једноставности израде, прилагодљивости средини и отпорности на воду и корозију.

Композити и термопласти се користе у широком распону производа, од исечака на папиру до свемирских бродова. Савремени материјали су већ заменили многе традиционалне металне материјале у многим областима.

Њихов инжењерски значај досегао је тачку у којој се све чешће користе као замена за металне материјале.

Има неколико разлога због којих композитни материјали потискују из употребе традиционалне материјале, а неки од њих су:

- поступак добијања класичних материјала је у односу на савремене веома скуп и дугачак, уз огромне утрошке енергије,
- знатно смањена тежина машинских елемената,
- високе антифрикционе особине омогућавају примену у склоповима где је присутно трење, а подмазивање није пожељно или забрањено,
- дужи животни циклус конструкције (нпр. у року од 25 година угљенична влакна изгубе 2-10% почетне чврстоће).

Из анализе карактеристика композитних материјала за израду вратила може се закључити да се заменом челичног вратила композитним може постићи:

- редукација масе конструкције за око 50%,
- пренос већег момента увијања и савијања,
- изузетно хармонично ублажавање вибрација,
- веће вредности критичних брзина и сопствених фреквенција.

Предности композитних зупчаника у односу на металне огледају се у следећем:

- могуће је бризгање под притиском,
- релативно мала маса,
- смањена бука и осцилације у раду,
- смањена корозија,
- могу да раде и без подмазивања, и др.

Искуства са композитним материјалима су показала да треба наћи компромисна решења између тежње да се добије минимална маса конструкције са максималним механичким карактеристикама и трошкова и тежине организације њихове производње.

Примена савремених материјала захтева мање почетне инвестиције у сам производни процес, јер је већина алата за обраду пластичних материјала знатно јефтинија од алата за обраду челичних материјала. Поред тога је и време освајања и лансирања производње знатно смањено, али су сировине и даље прилично скупе.

Даља истраживања и развој у сегменту употребе савремених материјала у индустрији се усмеравају на проналажење нових композита бољих физичких и техничких карактеристика, за повећане радне температуре и притиске, али без значајнијег повећања цене израде.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Говедаровић Ј., Ђорђевић З., *Примена нових материјала за израду елемената редуктора*, Зборник радова са 9. Северовог симпозијума о механичким преносницима СЕВЕР ПРЕНОСНИЦИ 2003., Суботица, 2003., 95-98.
- [2] Ђорђевић З., Говедаровић Ј., *Неке карактеристике вратила израђених од композитних материјала*, Зборник радова са 6. Међународног саветовања о достигнућима електро и машинске индустрије ДЕМИ 2003, Бања Лука, 2003., 477-482.
- [3] Kim H.S., Lim T.S., Lee D.G., *Optimal design of the press fit joint for a hybrid aluminum/composite drive shaft*, Composite Structures, Vol. 70, 2005., 33-47.
- [4] Николић В., *Машински елементи-теорија, прорачун, примери*, Машински факултет у Крагујевцу, 2004.
- [5] Обершмит Е., *Озубљења и зупчаници*, 1982.
- [6] Тимотијевић Д., *Зупчаници од вештачких материјала*, Дипломски рад, Крагујевац, 1994.
- [7] <http://polj.uns.ac.rs/Files/materijali/9%20Nemetalni%20materijali.pdf>
- [8] Филетин Т., *Преглед развоја и примене савремених материјала*, Факултет Машинства и бродоградње у Загребу, 2000.