

**SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I
BRODOGRADNJE**

**POSLIJEDIPLOMSKI DOKTORSKI STUDIJ
STROJARSTVA**

KVALIFIKACIJSKI ISPIT

POLIMERNI ZUPČANICI

Igor Šuljić

Split, prosinca 2023.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. POLIMERI	2
2.1. Podjela polimera	3
2.2. Nadmolekulna struktura i fizička stanja polimera	5
2.3. Proizvodnja polimera	7
2.4. Razgradnja i uporaba polimera	9
2.5. Poliamidi	10
3. POLIMERNI ZUPČANICI – PREGLED ISTRAŽIVANJA	17
3.1. Ispitivanje polimernih zupčanika uparenih s metalnim	17
3.2. Utjecaj geometrije na rad polimernih zupčanika	24
3.3. Određivanje temperature i zagrijavanje polimernih zupčanika	28
3.4. Mehanizmi trošenja polimernih zupčanika	35
3.5. Dodavanje vlakana i podmazivanje polimernih zupčanika	46
3.6. Apsorpcija vlage i razina buke	51
3.7. Učinkovitost, raspodjela opterećenja i utjecaj opterećenja i brzine vrtnje	55
3.8. Injekcijski prešani i odvalnim glodanjem proizvedeni polimerni zupčanici	58
3.9. Aditivna proizvodnja polimernih zupčanika	60
4. ISPITIVANJE PRIJENOSNIKA SNAGE I GIBANJA	64
4.1. Uređaji s otvorenim tokom snage	64
4.2. Uređaji sa zatvorenim tokom snage	65
5. ZAKLJUČAK	67
LITERATURA	69
POPIS OZNAKA I KRATICA	75

SAŽETAK	80
----------------------	-----------

1. UVOD

Sve ubrzaniji razvoj i napredak novih tehnologija karakteristika je današnjeg gospodarstva, a takav razvoj i napredak tehnologija prati i razvoj novih materijala. Glavni cilj je brža i jeftinija proizvodnja uz što manji utrošak energije uz veću pouzdanost i učinkovitost, a da se pri tom vodi računa o zaštiti i očuvanju okoliša. Kao rješenje za navedene zahtjeve pojavili su se polimeri. Prirodni polimeri su oduvijek zastupljeni svuda oko nas, ali zbog svojih svojstava nisu imali široku upotrebu, pa je početkom proizvodnje sintetskih polimera započela i sve veća primjena polimera u svijetu. Brzi postupci prerade polimernih materijala kao i manji utrošak energije za proizvodnju i oblikovanje gotovih proizvoda od polimera povećali su njihovu konkurentnost na tržištu. Mogućnost proizvodnje sintetskih polimera sa širokom paletom svojstava dovelo ih je u položaj da se mogu primjenjivati na elementima konstrukcija, ali i čitavim konstrukcijama s visokim zahtjevima sigurnosti, pouzdanosti i funkcionalnosti.

Jedan takav element konstrukcija su najznačajniji prijenosnici snage i gibanja, zupčanici. Zupčanici se koriste u raznim uređajima, u malim uređajima poput sata pa sve do velikih uređaja poput brodskih reduktora, te se proizvode od raznih metalnih i nemetalnih materijala. Njihova najveća prednost je mogućnost prenošenja velikih opterećenja i brzina vrtnja, a pri tom imaju malu masu te im je izvedba jako kompaktna. U današnje vrijeme standardne metalne zupčanike sve više zamjenjuju polimerni zupčanici, čiji napredak ubrzano raste. U odnosu na metalne zupčanike polimerni zupčanici imaju manju specifičnu težinu, bolja prigušna svojstva, ne zahtijevaju podmazivanje, nisu podložni koroziji, postojani su pri niskim temperaturama i što je jako važno, troškovi njihove proizvodnje su niski. Kao jedan od njihovih nedostataka ističe se gubitak mehaničkih svojstava pri povišenim temperaturama uslijed kojeg dolazi do povećanog trošenja i prestanka rada kod polimernih zupčanika. Zubi zupčanika u radu su podvrgnuti različitim cikličkim opterećenjima, korijen zuba je opterećen na savijanje i tlak dok je bok zuba izložen velikim kontaktnim naprezanjima. Prolaskom zuba kroz zahvat smjerovi i iznosi opterećenja se mijenjaju što nepovoljno utječe na otpornost trošenju i radni vijek istih.

Poznavanje i razumijevanje ponašanja polimernih zupčanika te predviđanje njihovog očekivanog radnog vijeka imaju velik značaj za njihovu primjenu. Primjena je dijelom ograničena jer se zbog velikog broja poznatih polimernih materijala koji se koriste kao elementi konstrukcija još uvijek nije definirala pouzdana metoda za proračun za svakog od njih. Stoga je jako važno provoditi istraživanja na polimernim zupčanicima u svrhu proširenja znanja o njima i njihove standardizacije koja će dovesti do veće, pouzdanije i učinkovitije primjene.

2. POLIMERI

Švedski kemičar J. J. Berzelius, 1833., uvodi naziv polimer, riječ koja je nastala iz grčkog jezika, a sastavljena je od riječi *poli* koja znači mnogo te riječi *meros* koja znači dio [1]. Polimeri su sustavi sastavljeni od strukturnih elemenata, makromolekula ili polimernih molekula, pa ih nazivamo i makromolekulnim spojevima. Makromolekula je molekula u kojoj su atomi organizirani na način da je ona sastavljena od velikog broja strukturnih jedinica koje se ponavljaju, a nazivaju se ponavljane jedinice ili meri [2]. Polimeri ne postoje u plinovitom agregatnom stanju već samo u čvrstom i kapljevitom stanju, pa možemo reći da su oni kondenzirani sustavi makromolekula.

Kroz povijest su doba često nazivana prema materijalima koji su imali najveći utjecaj na razvoj društva. Imali smo kameno, brončano i željezno doba, a mnogi autori se slažu da je doba čelika na izmaku i da nastupa doba plastike. Plastikom se nazivaju samo sintetski polimerni materijali o čemu će više biti govora u nastavku. Povijesni razvoj polimera nije lako rekonstruirati jer su npr. narod Maje, oko 1600. godine prije nove ere, za proizvodnju gumene lopte prirodni kaučuk miješale s biljkom koja je djelovala kao umrežavalo. U 19. stoljeću započelo se s proizvodnjom proizvoda od prirodnih polimera, uglavnom gumenih. Krajem 19. i početkom 20. stoljeća krenulo je razdoblje sintetskih polimera. Prvim proizvedenim sintetskim polimerom smatra se bakelit, fenol-formaldehid, koji je dobio ime po svom otkrivaču L. Baekalandu (1907.), čime je započelo razdoblje polimerske kemije. U dvadesetim godinama 20. stoljeća počinje industrijska proizvodnja polimera koji se danas masovno koriste: poli(vinil-klorida), polistirena, polietilena, poliuretanskih pjena, poliamida te polimernih kompozita.

Razvoj novih materijala uvijek je direktno povezan s napretkom tehnologije što vrijedi i za polimerne materijale. Svojstva koja posjeduju polimerni materijali, posebno sintetski polimeri, te mogućnost daljnjeg razvoja istih razlog su njihove sve učestalije primjene. 1950. godine proizvodnja plastike iznosila je oko milijun tona, dok je 2004. godine iznosila već 224 milijuna tona. Ako se toj brojci pridoda i proizvodnja kaučuka, ukupna svjetska proizvodnja polimera 2004. godine premašila je 250 milijuna tona [3]. Za usporedbu, 2007. godine, godišnja proizvodnja čelika iznosila je oko 1300 milijuna tona, dok je 1950. godine iznosila oko 100 milijuna tona.

Prednosti koje ostvaruju polimeri u odnosu na druge materijale su mnogobrojne, i to prvenstveno zbog široke palete polimernih materijala. Tako za određene zahtjeve i uvjete rada postoji dovoljno velik broj polimera koji mogu udovoljiti istima. Samim time njihova upotreba

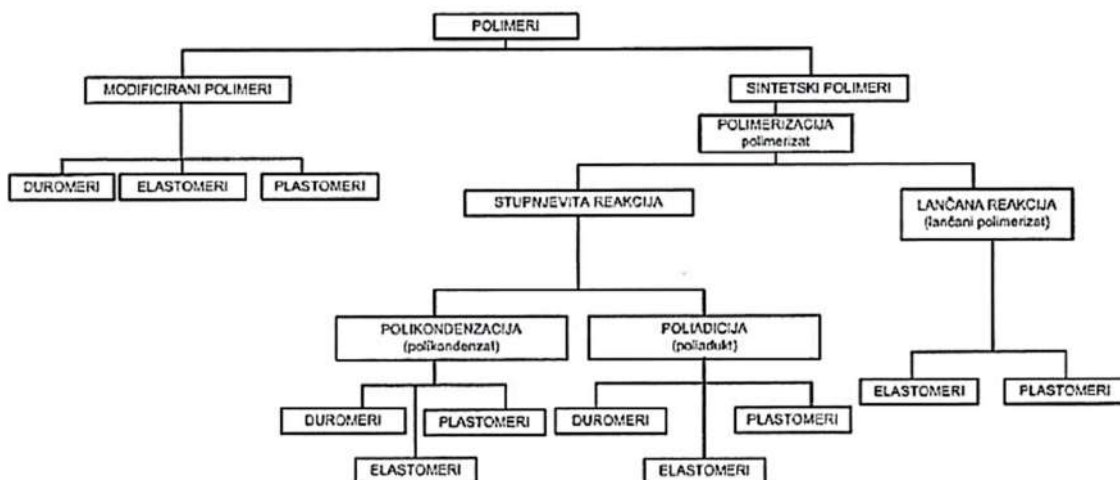
je sve učestalija. Također, proizvodnja polimera je energetski jako privlačna. Za proizvodnju čelika potrebno je oko 350 kJ/cm^3 energije, koliko je potrebno za proizvodnju energijski najzahtjevnijeg polimera, poli(oksimetilena). Polimeri se jednostavno i lako obrađuju, postojani su na niskim temperaturama, imaju nisku specifičnu težinu, nisu podložni koroziji i izvrsno prigušuju vibracije. Imaju nizak koeficijent trenja pa su otporniji na trošenje, a mnogi su otporni na vodu, kiseline ili lužine. Veća brzina i niži troškovi proizvodnje polimere stavljaju u povoljan položaj u odnosu na druge materijale.

Nedostatak polimernih materijala primarno se očituje u njihovoj (ne)postojanosti pri povišenim temperaturama. U takvim uvjetima mijenja se njihova struktura, a time i mehanička svojstva te upotrebljivost. Imaju nizak koeficijent toplinske vodljivosti i veći koeficijent toplinskog širenja u odnosu na čelike. Tijekom vremena nastaju trajne plastične deformacije kod naprezanja koja su niža od granice tečenja, sklone su puzanju, a neki polimeri su izrazito higroskopi što izaziva promjenu dimenzija i mehaničkih svojstava. Međutim, pravilnim izborom polimera i odgovarajućim konstrukcijskim rješenjima njihovi nedostaci se vrlo lako mogu pretvoriti u prednosti.

2.1. Podjela polimera

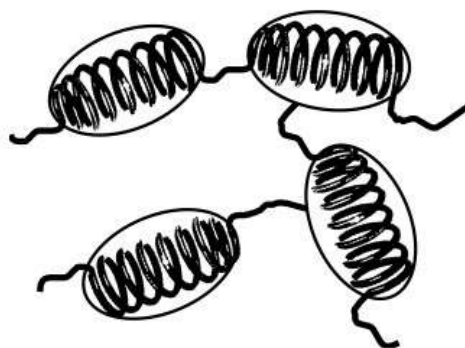
Prema podrijetlu polimeri mogu biti prirodni ili sintetski. Prirodne polimere pretežito pronalazimo u prirodi kao dio biljki ili životinjskih tkiva. Primjer su polisaharidi (celuloza, škrob i sl.), bjelančevine ili proteini (vuna, svila, kazein i sl.) te prirodni kaučuk. Procesom polimerizacije iz monomera kemijskom sintezom stvaraju se polimerne molekule. Broj ponavljenih jedinica u polimernoj molekuli zove se stupanj polimerizacije. Polimerima se uglavnom nazivaju molekule s visokim stupnjem polimerizacije, dok se molekule s nižim stupnjem polimerizacije nazivaju oligomerima. Polimerizacijom nastaje čisti kemijski spoj, polimerizat, koji se kao takav rijetko upotrebljava, stoga se najčešće polimerizat prerađuje do gotovog proizvoda.

Osnovna podjela sintetskih polimera ili poliplasta zasniva se na njihovom ponašanju pri povišenim temperaturama te oni mogu biti elastomeri, duromeri, plastomeri i elastoplastomeri. Polikondenzacijom nastaju plastomeri i duromeri, lančanom polimerizacijom elastomeri i neki plastomeri, a stupnjevitom poliadicijom dobivaju se duromeri, elastomeri i plastomeri. Zajednički naziv za duromere i plastomere, ali i sve skupine materijala na osnovi organskih polimera koji se mogu lijevati ili oblikovati na razne načine je plastika. Slika 2.1. prikazuje osnovnu podjelu polimera i vrste polimerizacije.



Slika 2.1. Vrste polimerizacija i polimera [4]

Elastomeri su djelomično umrežene polimerne tvari koje pri sobnoj temperaturi nalazimo u gumastom stanju. Imaju nizak modul elastičnosti, a zbog njihove klupčaste strukture slične opruzi, jednostavno se istežu do dvostruke vlastite duljine čak i pri sobnim temperaturama (Slika 2.2.). Nakon prestanka djelovanja opterećenja trenutno se vraćaju u početno stanje. U tu skupinu spadaju prirodni i sintetski kaučuci, silikoni, poliuretani i drugi.



Slika 2.2. Shematski prikaz elastomera [2]

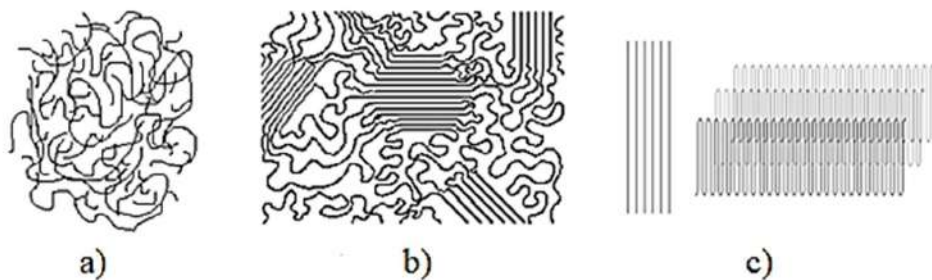
Duromeri su polioplasti gusto prostorno umrežene strukture koji zagrijavanjem ne omekšavaju, netaľjivi su i netopljivi. Pri visokim temperaturama dolazi do kidanja primarnih veza te se razgrađuju. Zbog nedovoljne gibljivosti molekula jako su tvrdi što im omogućava primjenu u konstrukcijama. Najzastupljeniji duromeri izrađeni su od epoksidnih, fenol-formaldehidnih, urea-formaldehidnih ili melamin-formaldehidnih smola i potrebnih dodataka – umreživala.

Plastomeri ili termoplasti su najzastupljenija skupina polimernih materijala. Zagrijavanjem plastomeri omekšavaju, a hlađenjem prelaze u čvrsto stanje. Do temperature taljenja ili omekšavanja plastomeri ne mijenjaju kemijsku strukturu i pri tim se temperaturama mogu oblikovati, a hlađenjem zadržavaju taj oblik. Zagrijavanje i hlađenje plastomera može se ponavljati neograničeno puta, samo je bitno da ne dođe do kemijskih reakcija koje bi utjecale na promjenu strukture. Prema stupnju uređenosti strukture mogu biti amorfni, kristalasti i kristalni. Značajniji predstavnici su poli(vinil-klorid) (PVC), polistiren (PS), polipropilen (PP), poliamidi (PA), poli(tetrafluoretilen) (PTFE), poznatiji kao teflon, i ostali. Polimeri se zbog svojih kompleksnih naziva označavaju kraticama i simbolima. Zbog izvrsnih mehaničkih, toplinskih i triboloških svojstava ova skupina polimera često se koristi u konstrukcijama. Svojstva i upotreba plastomera bit će detaljno opisana u nastavku rada.

Posljednja skupina su elastoplastomeri. Oni se pri sobnim temperaturama ponašaju kao elastomeri, a pri povišenim temperaturama poput plastomera. Prerađuju se konvencionalnim postupcima prerade kao i plastomeri. Poznati su i pod nazivom termoplastične gume ili termoplastični elastomeri.

2.2. Nadmolekulna struktura i fizička stanja polimera

Strukturni elementi višeg reda u odnosu na atome u molekularnoj strukturi čine nadmolekulnu strukturu polimera. Nadmolekulna struktura polimera rezultat je prostornog sređivanja molekula zbog privlačnih sila među molekulama. Osim međumolekulnih sila, kod većine polimera lanci su povezani i slabijim van der Waalsovima (Londonovim i dipolnim) ili jačim (vodikovim) sekundarnim vezama. Obzirom na uređenost nadmolekulne strukture polimeri mogu biti amorfni, kristalasti i kristalni, što je prikazano na Slici 2.3.



Slika 2.3. Nadmolekulna struktura polimera – (a) amorfna, (b) kristalasta i (c) kristalna [5]

Nadmolekulna amorfna struktura polimera nije do kraja razjašnjena. Kod amorfni polimera sustav je uvijek u stanju nereda, ne postoji pravilni prostorni poredak molekula. Čvrsti amorfni

polimeri posjeduju zadovoljavajuću čvrstoću, ali im povećanjem temperature opada krutost. Zbog neuređenosti molekula imaju veći specifični volumen u odnosu na kristalne i kristalaste polimere.

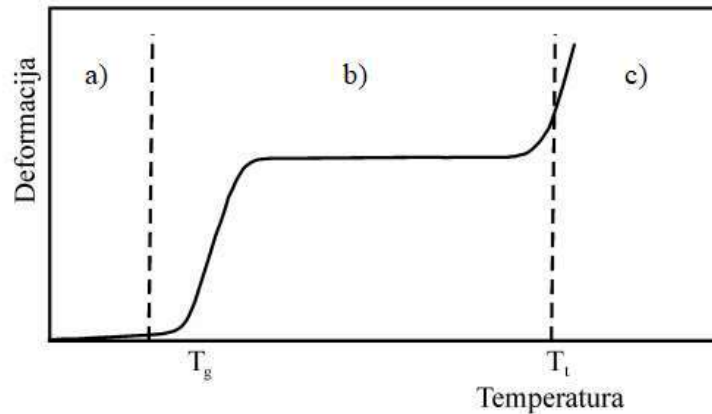
Kristalnu strukturu polimera odlikuje uređenost i prostorna složenost lanaca. Stvaranje kristalnih polimera uvjetovano je postojanjem regularnih makromolekula i konformacija velike geometrijske pravilnosti. Konformacije su prostorni oblici molekula. Zbog slobodne rotacije atoma oko jednostrukih veza molekule se mogu pojaviti u više konformacija. Molekule prelaze iz jedne u drugu konformaciju bez kidanja veza. Nastajanju kristala skloni su brojni polimeri kao polietilen, poliamidi, poli(oksimetilen) i drugi.

Polimerni materijali su većinom kristalasti, sastavljeni su od uređenih amorfnih i neuređenih kristalnih područja. Može se reći da kod kristalastih polimera amorfnu fazu predstavlja poremećaje u kristalnom području. Odnos amorfnih i kristalnih faza izražava se stupnjem kristalnosti, koji se iskazuje kao maseni ili volumni omjer amorfne i kristalne faze i iznosi od 5-95%. Polimeri s kristalastom strukturom postaju mekani pri povišenim temperaturama, dok pri sobnoj temperaturi imaju bolja mehanička svojstva nego amorfni. Najčešće su mliječno bijele boje. Nadmolekulnu strukturu elastomera, duromera i plastomera prikazuje Slika 2.4.

	PLASTOMERI				ELASTOMERI		DUROMERI
	amorfn		kristalasti		elasto-plastomeri	umreženi	
Građa makromolekula	linearna	granata	linearna		rahlo umrežena		prostorno umrežena
Shematski prikaz strukture							
Strukturalna uređenost	amorfn		djelomice kristalna anizotropna	djelomice kristalna izotropna	amorfn do slabo sređena		amorfn

Slika 2.4. Strukture polimera [6]

U ovisnosti o temperaturi kod polimera se javljaju tri različita fizička ili deformacijska stanja: staklasto ili kristalno, gumasto ili viskoelastično i kapljevitost ili viskofluidno. Ova fizička stanja posljedica su pokretljivosti makromolekula s promjenom temperature. Staklasto i gumasto stanje smatraju se čvrstim stanjem. Prijelazi iz stanja u stanje nisu oštri već postoje temperaturna područja širine 20-30°C koja se prikazuju dogovorno određenim temperaturama. Slika 2.5. prikazuje ovisnost deformacije o temperaturi s naznačenim fizičkim stanjima polimera.



Slika 2.5. Termomehanička krivulja polimera: (a) staklasto, (b) gumasto i (c) kapljevito stanje [2]

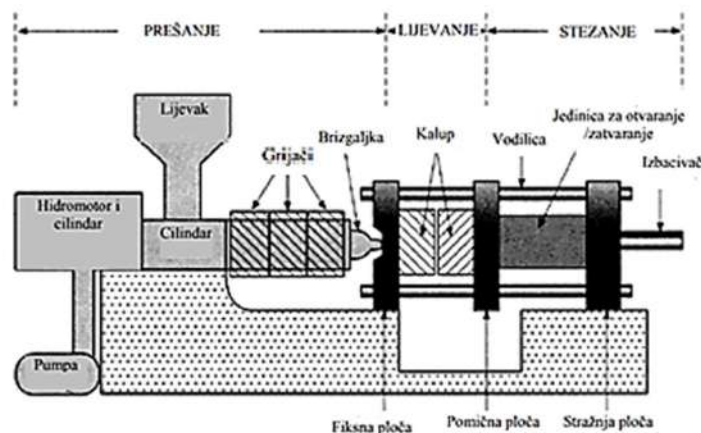
U staklastom se stanju makromolekule nalaze u stanju statističke konformacije, odnosno postoje samo vibracijska gibanja makromolekula. Deformacije su male, elastične i slijede Hookeov zakon. Prijelaz iz staklastog u gumasto stanje karakterizira temperatura staklišta T_g . U gumastom stanju moguće je gibanje segmenata lanaca i bočnih lanaca makromolekule pa se one istežu u smjeru djelovanja vanjske sile, a deformacije su i dalje elastične. Temperatura tališta T_t prikazuje prijelaz iz gumastog u kapljevito stanje. Kapljevito stanje obilježeno je velikom pokretljivošću cijelih makromolekula i lanaca. Deformacije koje nastaju u tom stanju su nepovratne odnosno plastične. Amorfni plastomeri, koji se često primjenjuju u konstrukcijama, upotrebljivi su do temperature staklišta, dok im se na temperaturama iznad staklišta pogoršavaju mehanička svojstva. Plastomeri s kristalnom strukturom imaju konstrukcijsku primjenu do temperature taljenja jer su im mehanička svojstva još uvijek zadovoljavajuća iako dolazi do omekšavanja kristalne strukture.

2.3. Proizvodnja polimera

Nafta, ugljen i prirodni plin su najčešće sirovine od kojih se proizvode polimerne tvari i materijali. Proizvodnja polimernih proizvoda i poluproizvoda uglavnom se temelji na istovremenom mehaničkom, reološkom i toplinskom ponašanju polimera, često uz prisutnost kemijskih reakcija. Prema [7], izradbeni postupci, neovisno o vrsti materijala su: stvaranje praoblika od bezobličnih tvari, promjene oblika, povezivanja, prevlačenja i promjena svojstava proizvoda. Praoblikovanjem od bezobličnih tvari nastaju poluproizvodi poput ekstrudiranih cijevi, traka, odljevaka ili otpresaka. Ekstrudiranje, kalandriranje, lijevanje, injekcijsko prešanje i u novije vrijeme aditivna proizvodnja, najvažniji su postupci praoblikovanja. Proizvodi i poluproizvodi nastali

praoblikovanjem uglavnom zahtijevaju naknadno preoblikovanje proizvoda, promjenu oblika. Ako prilikom preoblikovanja dolazi do smanjenja volumena tijela tada govorimo o odvajanju. U nastavku su kratko opisani postupci injekcijskog prešanja, odvajanja i aditivne proizvodnje jer se oni najčešće koriste u proizvodnji polimernih zupčanika koji su glavna tema ovog rada.

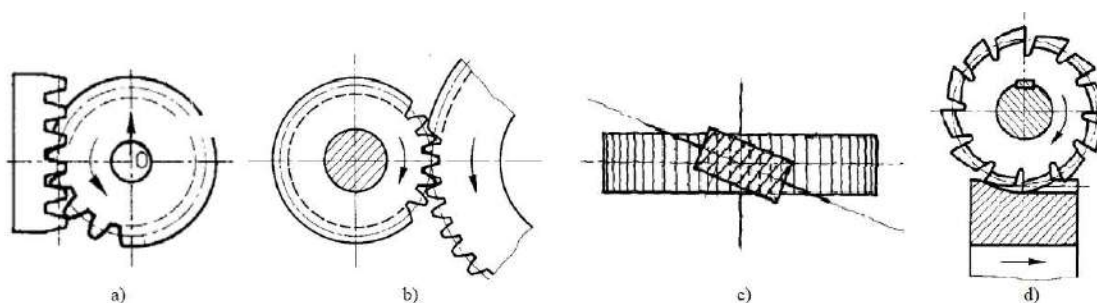
Injekcijskim prešanjem mogu se prerađivati svi polimerni materijali i najvažniji je ciklički postupak preradbe polimera. Injekcijsko prešanje polimera analogno je tlačnom lijevanju kod metala. Polimer u granulama se zagrijavanjem na temperaturu od 150 – 425°C pretvara u taljevinu odgovarajuće viskoznosti koja se zatim ubrizgava u temperiranu kalupnu šupljinu. Hlađenjem nastaje otpresak podoban za vađenje iz kalupa. Sustav za injekcijsko prešanje prikazan je na Slici 2.6. Injekcijskim prešanjem ostvaruje se velika dimenzijska točnost (uske tolerancije) i pogodno je za proizvodnju kompleksnih otpresaka. Nedostaci koji se mogu pojaviti u strukturi i izgledu nastaju kao posljedica naprezanja zbog neravnomjernog hlađenja otpreska po presjeku. Sloj taljevine neposredno uz stijenku kalupa naglo očvrstne i sprječava stezanje još uvijek tople jezgre. Zato se otpresci visoke kvalitete prerađuju pri visokim temperaturama stijenke kalupa.



Slika 2.6. Pojednostavljeni prikaz sustava za injekcijsko prešanje [8]

Relativnim gibanjem između alata i obratka dolazi do smanjenja povezanosti među česticama te odvajanja dijelova materijala s obratka. Postupcima mehaničkog odvajanja čestica, rezanjem geometrijski određenog alata, kao što su tokarenje, glodanje, blanjanje i dubljenje nastaje gotovi proizvod. Na obrađivanoj površini se primarno zbog trenja razvija velika toplina pa je često potrebna naknadna obrada površine koja se vrši postupcima odvajanja s geometrijski neodređenim oblikom reznog alata, brušenje ili poliranje. Polimerni zupčanici se, kao i metalni, izrađuju

postupcima odvalnog dubljenja i blanjanja (Maag i Fellows), odvalnim glodanjem ili kopirnim glodanjem pločastim glodalom, Slika 2.7.



Slika 2.7. Postupci odvajanja: (a) Maag, (b) Fellows, (c) odvalno glodanje i (d) kopirno glodanje pločastim glodalom [9]

Aditivna proizvodnja odnosi se na proizvodnju predmeta nanošenjem čestica u vrlo tankim slojevima. Proces započinje izradom trodimenzionalnog modela, uglavnom korištenjem CAD programa za modeliranje, koji se zatim transformira u određen broj horizontalnih poprečnih presjeka. Ti se presjeci na uređajima za aditivnu proizvodnju printaju sloj po sloj do gotovog proizvoda. U postupcima aditivne proizvodnje primjenjuju se brojne tehnologije, među kojima su najpoznatije fotopolimerizacija ili stereolitografija (SLA), trodimenzionalno tiskanje (3D Printing), taložno sraščivanje (FDM ili FFF) i selektivno lasersko sraščivanje (SLS). Tehnologija se primjenjuje u automobilskoj i zrakoplovnoj industriji, medicini i u proizvodnji elektroničkih komponenti. Aditivni proizvodni postupci stari su tek nešto više od 30 godina i još uvijek su u razvoju. Kratko vrijeme izrade predmeta, niska cijena, kvaliteta izradaka i prilagodljivost procesa upućuju na sve veću upotrebu i zastupljenost ove tehnologije te kako bi ona mogla postati budućnost proizvodnje proizvoda od polimernih materijala. U posljednje vrijeme teži se povećanju preciznosti uređaja za aditivnu proizvodnju kako bi se mogli proizvoditi predmeti koji zahtijevaju visoku točnost dimenzija, bez dodatne završne obrade [10].

2.4. Razgradnja i uporaba polimera

Polimerni materijali se razgrađuju zbog promjena u strukturi koje su posljedica fizičkih ili kemijskih utjecaja. Procesima razgradnje pogoršavaju se uporabna svojstva polimera, a oni se događaju u uvjetima proizvodnje, prerade i uporabe. Polimeri su tijekom proizvodnje i prerade izloženi utjecaju topline i raznih opterećenja, dok su u okolini izloženi kisiku, vlazi, svjetlosti, UV zračenju te drugim atmosferskim i kemijskim utjecajima. Procesi razgradnje nisu poželjni a usporavaju se dodavanjem raznih stabilizatora u osnovni polimerni materijal. Razgradnja

polimera zbog utjecaja okoline može se iskoristiti kako bi se polimerni otpad iz okoliša samostalno razgradio. Zato se danas nastoji proizvoditi biorazgradive polimere koji pridonose zaštiti i očuvanju okoliša [11].

Oporabljivost polimera podrazumijeva energijsku i materijalnu uporabu. Kako su nafta, ugljen i zemni plin osnovne sirovine od kojih se proizvode polimeri, njihovom energijskom uporabom oslobađa se velika toplinska energija. Uglavnom se spaljuju da bi im se smanjio obujam na odlagalištima otpada, a njihova toplinska vrijednost iznosi oko 35 MJ/kg. Energijska uporaba koristi se za dobivanje električne energije. Materijalna uporaba može biti mehanička i kemijska. Mehaničkom uporabom ili recikliranjem se usitnjavanjem početnog proizvoda stvaraju novi proizvodi. Polimeri se ne mogu neograničeni broj puta reciklirati jer se svakim sljedećim procesom recikliranja izgubi dio svojstava. Kemijska uporaba obuhvaća postupke pirolize, hidrolize, hidriranja i uporabe otapanjem. Navedenim postupcima polimerni materijal se razlaže na početne sastojke, plin ili ulje. Kvaliteta uporabljenih polimernih materijala potpuno je jednaka kvaliteti prvi put proizvedenih polimernih proizvoda. Proizvodi od polimernih materijala mogu se i obnavljati tako da im se zadrži oblik i funkcija.

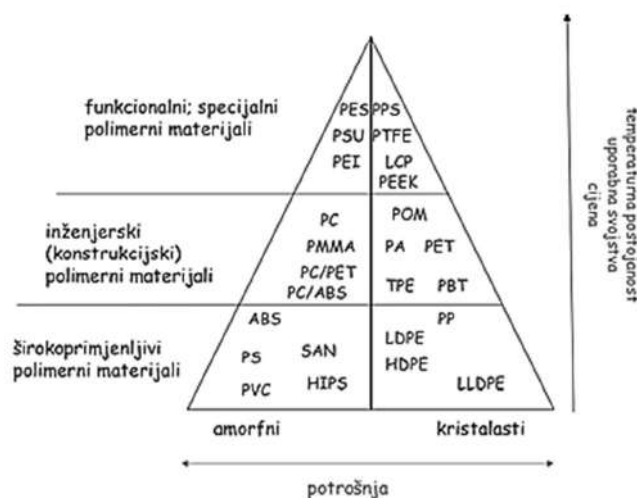
2.5. Poliamidi

Kao što je u prethodnim poglavljima spomenuto, plastomeri se zbog izvrsnih mehaničkih, toplinskih i triboloških svojstava u odnosu na druge polimerne materijale često koriste u konstrukcijama. Brže i lakše se obrađuju u odnosu na metale, a imaju i duži vijek trajanja. Zbog velike žilavosti primjenjuju se za preuzimanje udarnih opterećenja, kada je potrebna otpornost na trošenje zbog nižeg koeficijent trenja od metala, gdje god se pojavljuju nečistoće, kada je potrebna otpornost na koroziju i u uvjetima gdje podmazivanje nije moguće, jer je većina plastomera samopodmaziva.

Nedostatak plastomera je ograničena primjena jer gube postojanost pri povišenim temperaturama. Podnose radnu temperaturu do 100°C, kratkotrajno do 150°C. Toplinska vodljivost im je oko 200 puta lošija, a koeficijent toplinskog širenja 6-7 puta veći u odnosu na konstrukcijske čelike.

Na Slici 2.8. prikazani su bitniji plastomeri koji se koriste kao elementi konstrukcija. Preporučeni plastomeri od kojih se često proizvode polimerni zupčanici su akrilonitril/butadien/stiren (ABS), poli(butilen-tereftalat) (PBT), poli(oksimetilen) (POM)

poznat i kao poliacetal, poliamid (PA), poliimid (PI) i poli(eter-eter-keton) (PEEK) [12]. Ipak, poliamidi se izdvajaju kao najznačajnija skupina konstrukcijskih plastomera.

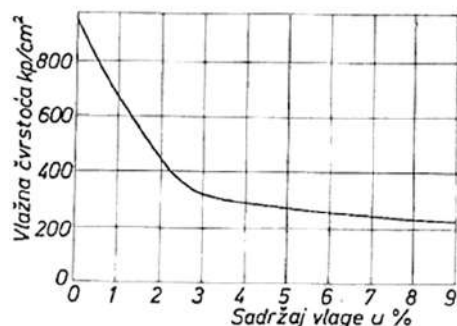


Slika 2.8. Piramida plastomernih materijala [5]

Poliamidi, poznatiji i kao najloni, su plastomeri kojima ponavljane jedinice sadrže aromatske ili alifatske segmente povezane amidnim vezama $-CO-NH-$. Aromatski poliamidi ili aramidi nastaju polikondenzacijom kiselinskih klorida i diamina, a od njih se izrađuju aramidna vlakna (Kevlar). Alifatski poliamidi označavaju se prema broju ugljikovih atoma (4 do 13 ugljikovih atoma) u osnovnom dijelu ponavljajuće jedinice. Promjenom ponavljajuće jedinice, monomera, nastaju poliamidi PA 6, PA 11, PA 12, PA 46, PA 66, PA 610, PA 612, PA 6/66, PPA. Ipak, konstrukcijski najznačajniji su: poliamid na osnovi ϵ kaprolaktana (PA 6) i poliamid na osnovi heksametilendiamin adipinske kiseline (PA 66). Razlika između dva navedena poliamida je u njihovoj strukturi, PA 6 ima jedan monomer dok PA 66 ima 2 monomera koji sadrže ugljikove atome. Razlika u strukturi utječe na mehanička svojstva i postojanost na povišenim temperaturama, gdje je PA 66 nešto bolji u odnosu na PA 6. Poliamidi su kristalasti plastomeri sa stupnjem kristalnosti od 10-60%. Kristalna područja visoke molekularne privlačnosti i pokretljiva amorfna faza rezultiraju visokim talištem, zadovoljavajućom čvrstoćom i tvrdoćom, otpornosti prema abraziji i zamoru kod poliamida.

Svi poliamidi skloni su apsorpciji vode koja vodi ka dimenzijskim promjenama odnosno bubrenju. Poliamidi s većim udjelom amorfne faze odnosno manjim stupnjem kristalnosti skloniji su upijanju vode. Voda slabi međumolekulne sile i uzrokuje pokretljivost makromolekulnih segmenata u poliamidu što utječe na mehanička svojstva poliamida: čvrstoću, tvrdoću, žilavost, koeficijent trenja i brzinu trošenja. Slika 2.9. prikazuje promjenu čvrstoće

poliamida PA 6 sa sadržajem vlage. Apsorpcija vode ovisi o veličini uzorka, stupnju kristalnosti, vremenu izloženosti i relativnoj vlažnosti okoline.



Slika 2.9. Ovisnost čvrstoće o sadržaju vlage – PA 6 [13]

Izratke od poliamida potrebno je kondicionirati, osim ako se izradak ne primjenjuje u okolini s relativnom vlažnošću od 0%. Kondicioniranje se izvodi na okolnom zraku, u vodi ili vodenoj pari temperature do 100°C, a služi kako bi se izradak prisilno navlažio i doveo u ravnotežno stanje s okolinom. Vrijeme koje je potrebno za kondicioniranje izratka ovisi o njegovoj debljini, temperaturi i relativnoj vlažnosti okoline, odnosno temperaturi vode ako se kondicioniranje izvodi u vodi. Koncentracija vode najveća je uz stijenku i opada po dubini izratka. Dodaci polimerima u obliku staklenih (GF) ili karbonskih (CF) vlakana smanjuju apsorpciju vode.

Poliamidi su viskoelastična tijela što znači da je deformacija ovisna o vremenu djelovanja opterećenja. Ukupna deformacija ε_u sastoji se od 3 komponente i vrijedi

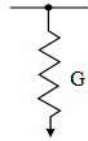
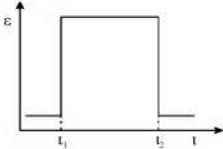
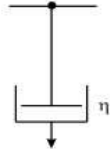
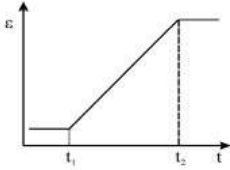
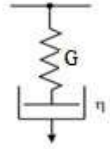
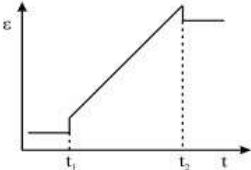
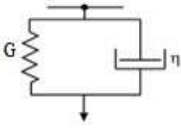
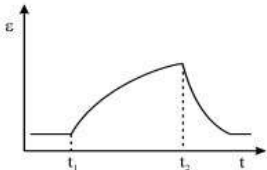
$$\varepsilon_u = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{en} + \varepsilon_p \quad (2.1)$$

gdje je ε_{el} elastična ili energijska deformacija, ε_{en} entropijska ili viskoelastična deformacija i ε_p plastična ili viskofluidna deformacija. Udio svake komponente u ukupnoj deformaciji ovisi o temperaturi, iznosu opterećenja i trajanju opterećenja.

Elastična deformacija ε_{el} je povratna deformacija, javlja se ispod temperature staklišta T_g , ne ovisi o brzini deformacije i odlikuje je linearna ovisnost naprezanja i deformacije. Entropijska deformacija ε_{en} je također povratna deformacija, ali deformacije ovise o vremenu djelovanja opterećenja, a ovisnost naprezanja i deformacije je nelinearna. Javlja se iznad temperature staklišta T_g . Plastična deformacija ε_p je nepovratna, a nastaje zbog pomicanja makromolekulnih lanaca koji se pregrupiraju djelovanjem opterećenja. Veza naprezanja i deformacije je nelinearna. Djelovanjem opterećenja poliamidi se mogu ponašati na jedan od tri načina:

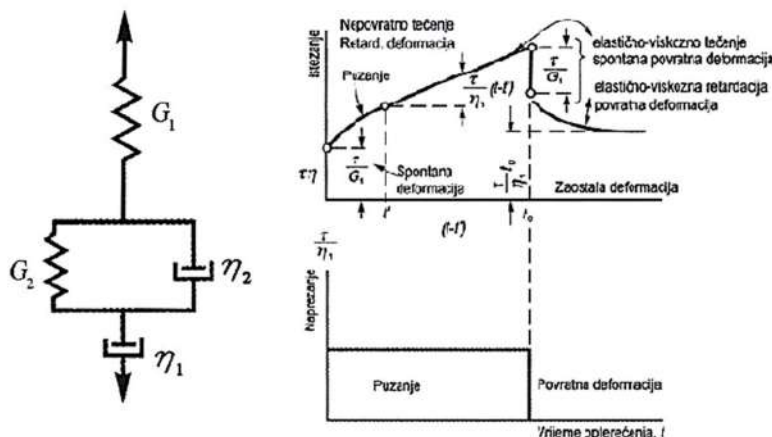
- 1) Tijelo reagira brzo i to se očituje u visokom modulu elastičnosti. Takva reakcija se očekuje u području ispod temperature staklišta T_g .
- 2) Zbog djelovanja opterećenja ili radi povećanja temperature dolazi do viskoznog tečenja koje se očituje niskim modulom elastičnosti. Dolazi do nepovratnog klizanja segmenata lanaca makromolekule. Viskozno tečenje javlja se kod amorfni plastomera iznad temperature staklastog prijelaza T_g .
- 3) Tijelo se ponaša entropijski elastično, a očituje se u niskom modulu elastičnosti i velikim udjelom povratnog klizanja segmenata lanaca makromolekula. Deformacija je velika i dolazi do izravnavanja lanaca makromolekula u smjeru djelovanja opterećenja, a proces je usporen djelovanjem viskoznih sila trenja.

Tablica 2.1. Reološki modeli [2, 4, 14]

Naziv modela	Reološki model	Dijagram deformacije u funkciji vremena
Hookeov		
Newtonov		
Maxwellov		
Voight-Kelvinov		

Za prikaz ponašanja polimernih materijala pod opterećenjem koriste se reološki modeli. Elastično ponašanje prikazuje se oprugom, a viskozno tečenje prigušnim elementom. Tablica 2.1. prikazuje reološke modele koji objašnjavaju ponašanje polimera.

Ponašanje poliamida djelovanjem opterećenja moguće je opisati Burgerovim modelom za čvrsta tijela pri sobnoj temperaturi, koji je kombinacija Maxwellovog i Voight-Kelvinovog modela povezanih u seriju a opisuje pojavu puzanja (Slika 2.10.).



Slika 2.10. Burgerov model [15]

Prema Burgerovom modelu, izraz za ukupnu deformaciju ϵ_u viskoelastičnog tijela iznosi:

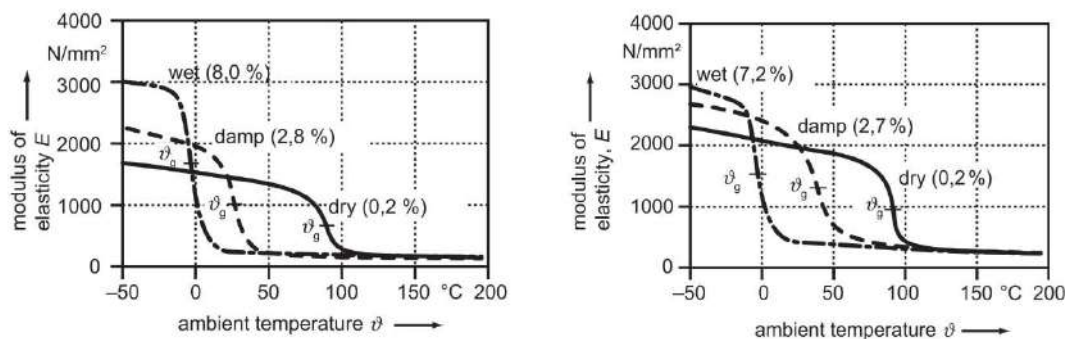
$$\epsilon_u = \frac{\tau}{G} + \epsilon_\infty \cdot [1 - e^{(-t/t_r)}] + \frac{\tau}{\eta} \cdot t \quad (2.2)$$

gdje je τ smično naprežanje, G modul smicanja, ϵ_∞ najveća zabilježena deformacija, t vrijeme trajanja opterećenja, t_r vrijeme retardacije i η prigušenje. Pri niskim temperaturama, nižim od temperature staklišta T_g , viskoznost prigušnog elementa je visoka i poliamid reagira brzo i elastično te ovisi o modulu elastičnosti opruge G_1 . Tu prevladava prvi član izraza 2.2. Daljnjim povećanjem temperature iznad staklišta T_g , poliamid postaje mekši i dolazi do utjecaja viskoznost prigušnog elementa η_2 i modula elastičnosti opruge G_2 . U ukupnoj deformaciji prevladava drugi član izraza 2.2. Pri još višim temperaturama materijal nepovratno teče uz malu elastičnost i to opisuje prigušni element η_1 . Tada u ukupnoj deformaciji prevladava treći član izraza 2.2. U praksi, javljaju se sve tri vrste reakcija, ali jedna uvijek dominira. Kada je u pitanju udarno opterećenje ne dolazi do viskozne deformacije dok se kod dugotrajnog opterećenja javlja viskozna deformacija koja se očituje puzanjem materijala. Mehanička i toplinska svojstva te karakteristične temperature prijelaza za poliamide PA 6 i PA 66 prikazuje Tablica 2.2.

Tablica 2.2. Svojstva poliamida PA 6 i PA 66 [12, 16, 17, 18]

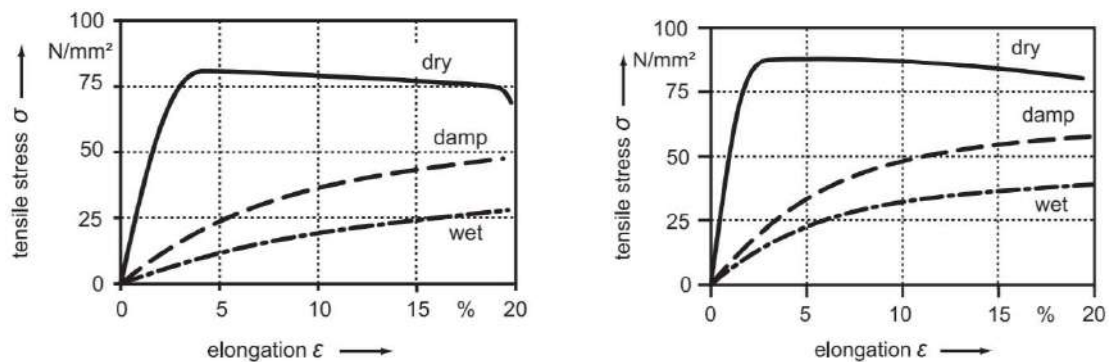
Svojstvo	PA 6	PA 66
Gustoća, kg/dm ³	1,13-1,16	1,12-1,15
Stupanj kristalnosti, %	30-40	35-45
Temperatura staklišta, °C	78	90
Temperatura tališta, °C	225-235	225-265
Vlačna čvrstoća, MPa	80	85
Tvrdoća - Brinell	6,25	7,25
Modul elastičnosti, GPa	2,8	3
Poissonov koeficijent	0,44	0,46
Koeficijent trenja	0,38-0,45	0,35-0,42
Trošenje, µm/km	0,23	0,09
Granična temperatura upotrebe – kratkotrajno, °C	140-160	140-170
Granična temperatura upotrebe – dugotrajno, °C	100-120	100-120
Toplinska vodljivost, W/mK	0,29	0,23
Upijanje vlage, %	9,5	8,5

Svojstva i njihove vrijednosti u Tablici 2.2. odgovaraju uvjetima pri temperaturi 23°C i relativnoj vlažnosti 50%. Na Slici 2.11. prikazan je dijagram ovisnosti modula elastičnosti o temperaturi za suhi (engl. dry), vlažni (engl. damp) i mokri (engl. wet) poliamid PA 6 i PA 66. Vrijednosti modula elastičnosti u dijagramima dobivene su dinamičko-mehaničkom analizom pa imaju niže vrijednosti nego u Tablici 2.2. Modul elastičnosti za poliamide PA 6 i PA 66 iz Tablice 2.2. dobiven je ispitivanjem vlačne čvrstoće na kidalici.



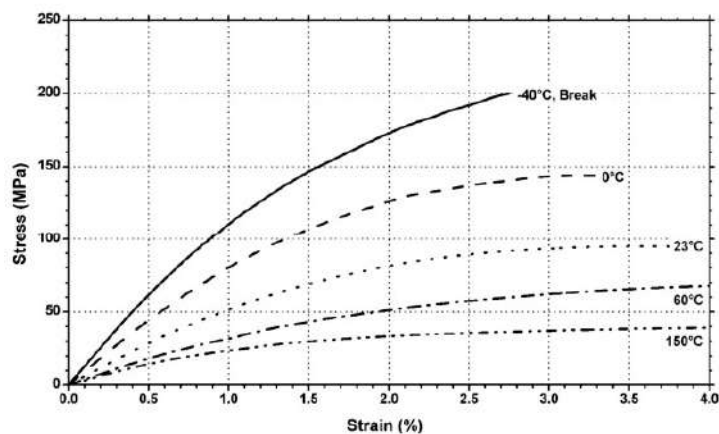
Slika 2.11. Ovisnost modula elastičnosti o temperaturi, PA 6 (lijevo) i PA 66 (desno) [17]

Povećanje sadržaja vlage u poliamidu snižava modul elastičnosti ali i vlačnu čvrstoću, Slika 2.12. Prema dijagramu ovisnosti naprezanja o deformaciji na Slici 2.13., povećanjem temperature dolazi do rasta deformacije te konačno do loma materijala. Obzirom na izgled dijagrama naprezanje-deformacija, poliamidi pripadaju skupini tvrdih i žilavih plastomera [18].



Slika 2.12. Ovisnost vlačne čvrstoće o udjelu vlage u materijalu, PA 6 (lijevo) i PA 66 (desno)

[17]



Slika 2.13. Ovisnost naprezanja o deformaciji pri različitim temperaturama za PA 6-GF 25

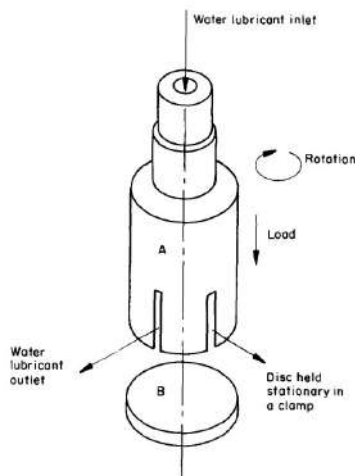
[18]

3. POLIMERNI ZUPČANICI – PREGLED ISTRAŽIVANJA

Zupčani prijenosnici su vrsta prijenosnika koji se danas najviše upotrebljavaju. Ekonomski su povoljni, jednostavno se održavaju bez obzira na uvjete rada i mogu prenositi velike snage. Opterećenje prenose oblikom pa se osim za prijenos snage, koriste i kao prijenosnici točnog gibanja te kada je potrebno ostvariti velik broj okretaja. Također, imaju visok stupanj korisnog djelovanja. Moderno doba prati brz razvoj znanosti, tehnologije i proizvodnje pa se proizvođači zupčanih prijenosnika snage i gibanja suočavaju sa sve većim izazovima. Prijenos snage i gibanja uz veću točnost, pouzdanost i učinkovitost uz istovremeno smanjenje troškova i mase zahtjev je koji se stavlja pred proizvođače. Porast cijene energije i materijala predstavlja sve veći problem, pa metalne zupčanike u današnje vrijeme sve više zamjenjuju polimerni, čija je proizvodnja brža i jeftinija. Zadovoljavaju zahtjeve ekološki podržane proizvodnje i proširuju primjenu zupčanika na mjesta gdje se metalni zupčanici nisu koristili, bilo radi ekonomskih ili funkcionalnih razloga. Iako se već primjenjuju, zbog nedostatka iskustvenih vrijednosti i standarda, i dalje se provode brojna znanstvena istraživanja na polimernim zupčanicima.

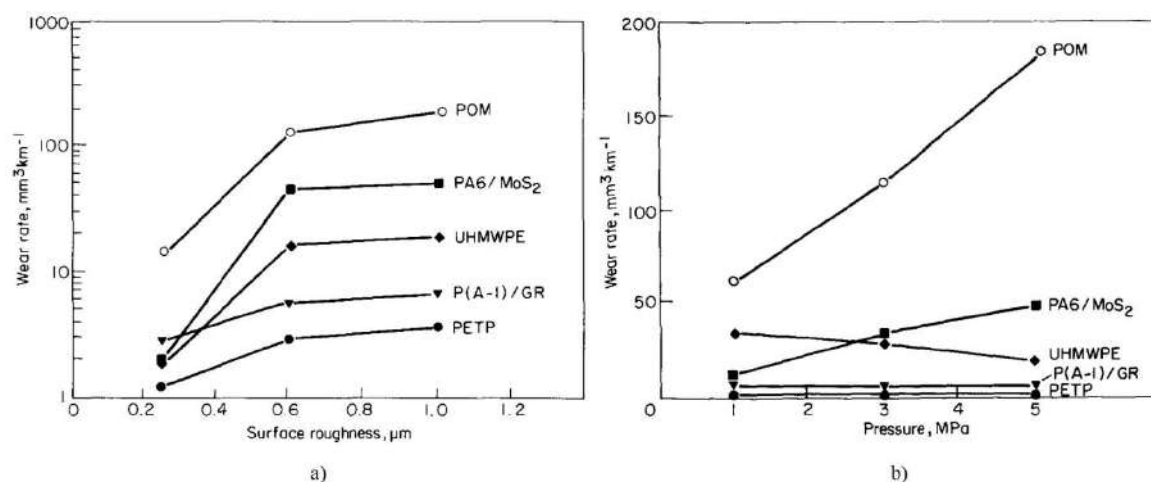
3.1. Ispitivanje polimernih zupčanika uparenih s metalnim

Zbog svoje kompatibilnosti i zadovoljavajućih mehaničkih svojstava, polimerni zupčanici se često uparuju s metalnim zupčanicima. Clarke i Allen [19] istražili su utjecaj površinske hrapavosti, tlaka i brzine klizanja za različite polimerne materijale uparene s čelikom za poboljšavanje AISI 431, konstantno podmazivane vodom. Istraživanje je provedeno za brzine klizanja od 0,13 – 2,27 m/s, tlakove od 1,3 – 5 MPa i srednje aritmetičko odstupanje profila čeličnog valjka R_a od 0,25 – 1 μm .



Slika 3.1. Eksperimentalno postolje s čeličnim valjkom (A) i polimernim uzorkom (B) [19]

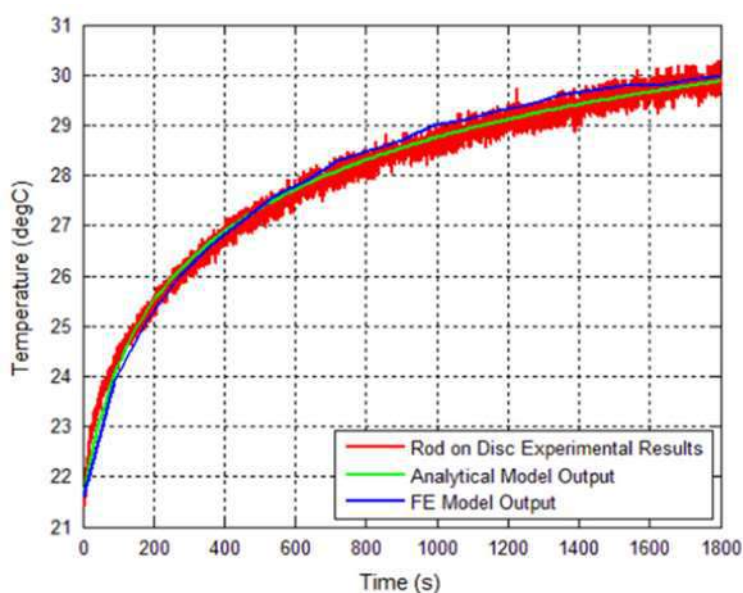
Ispitivani polimeri su polietilen ultra visoke molekulske težine (PE-UHMW), POM, poliester na osnovi poli (etilen-tereftalata) (PET-P), PA 6 s dodatkom molibden disulfida (MoS_2) i poli (amid-imid) ojačan staklenim vlaknima (PAI-GF). Shematski prikaz eksperimentalnog postolja prikazan je na Slici 3.1, a sastoji se od rotirajućeg šupljeg valjka izrađenog od čelika kroz kojeg se dovodi medij za podmazivanje, u ovom slučaju voda, i nepomičnog polimernog diska. Povećanjem površinske hrapavosti dolazi do povećanog trošenja svih polimernih uzoraka, posebno kod uzorka od POM-a, Slika 3.2. (a). Pretpostavka je da POM nije u mogućnosti stvoriti polimerni sloj na metalnoj površini koji rezultira sniženom površinskom hrapavosti, kao što je to slučaj kod ostalih ispitivanih uzoraka. Visoko trošenje poliamida PA 6 s dodatkom molibden disulfida (MoS_2) uzrokovano je apsorpcijom vode i bubrenjem uzorka.



Slika 3.2. Ovisnost trošenja o: (a) površinskoj hrapavosti (tlak 5 MPa i brzina klizanja 0.13 m/s), (b) tlaku ($R_a=1 \mu\text{m}$ i brzina klizanja 0.13m/s) [19]

Promjenom tlaka primijećeno je linearno povećanje trošenja materijala kod svih uzoraka osim PE-UHMW. PET-P i PAI-GF karakterizira visoka čvrstoća i tvrdoća te na njihovo trošenje ne utječe promjena pritiska. Promjenom brzine klizanja pokazalo se da su kompozitni materijali, PA 6 s dodatkom molibden disulfida (MoS_2) i PAI-GF, otporniji na trošenje u odnosu na ostale ispitivane polimerne materijale. POM pokazuje najlošiju otpornost trošenju za sve uvjete ispitivanja. Evans i Keogh [20] predstavili su 2 eksperimentalna modela, analitički model te numeričku simulaciju za procjenu temperature na boku zuba zupčanika. Pogonski zupčanik izrađen je iz čelika EN 1.1186, EN8, dok je gonjeni polimerni zupčanik od POM-a (POM Delrin 100). U prvom eksperimentalnom modelu provedena su ispitivanja na stvarnim zupčanicima, dok je drugi eksperimentalni model pojednostavljen i sastoji se od mirujućeg čeličnog vratila po kojem se odvaljuje polimerni disk. Vratilo od čelika i polimerni disk su takvi da im radijusi

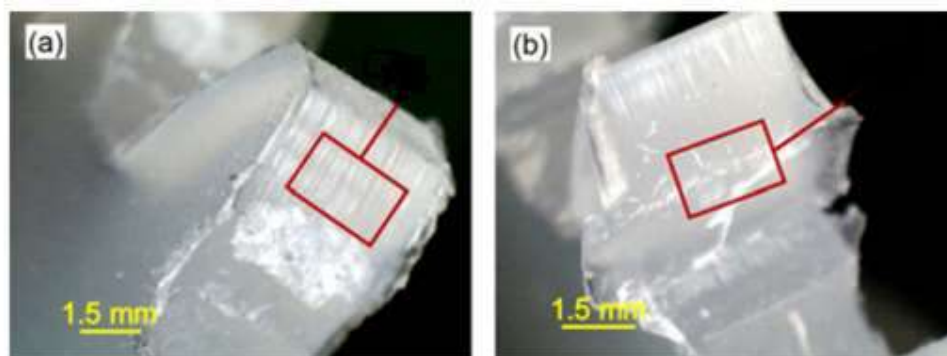
odgovaraju radijusima zaobljenja sparenih zupčanika u točki dodira. Ispitivanje je izvršeno pri brzini vrtnje pogonskog elementa, zupčanika odnosno vratila, od $n = 168$ o/min, a moment koji se prenosi iznosi $T = 0,85$ Nm. Koeficijent trenja između dodirnih površina iznosi $\mu = 0.34$. Rezultati eksperimentalnih modela pokazuju jako dobro podudaranje uz odstupanje od 9% ($\pm 2,5$ °C). Također, predstavljen je analitički model i numerička simulacija koja primjenjuje metodu konačnih elemenata (FEM). Podudaranje između različitih metoda ispitivanja prikazano je na Slici 3.3., te proizlazi zaključak da je moguće odrediti približnu temperaturu na boku zuba jednostavnijom metodom pomoću vratila i diska, eksperimentalno, numerički ili analitički.



Slika 3.3. Usporedba temperature eksperimentalnog, analitičkog i numeričkog modela [20]

Mertens i Senthilvelan [21] proveli su ispitivanje metalnih zupčanika u paru s polimernim zupčanikom izrađenim od polipropilena (PP). PP zupčanik dobiven je injekcijskim prešanjem i sušen je 4 sata na zraku temperature 80 °C kako bi se uklonila vlaga iz njega. Metalni zupčanici izrađeni su od čelika SS 316 različitim tehnologijama. Jedan zupčanik je proizveden konvencionalnim postupkom odvalnog glodanja i naknadno brušen, dok je drugi proizveden nekonvencionalnim postupkom – elektroerozijskom obradom žicom (WEDM). Kvaliteta tolerancija PP zupčanika prema DIN-u je 10, kvaliteta tolerancija WEDM zupčanika je 8 dok je kvaliteta tolerancija zupčanika dobivenog obradom odvajanja 5. Metalni zupčanici imaju veću širinu od polimernog kako se pod opterećenjem rub tvrdog metalnog zupčanika ne bi urezao u polimerni i na taj način istog ošteti. Elektroerozijskom obradom pomoću žice na površini zupčanika često ostaju kapljice otopljenog metala koji hlađenjem očvrstne i formira

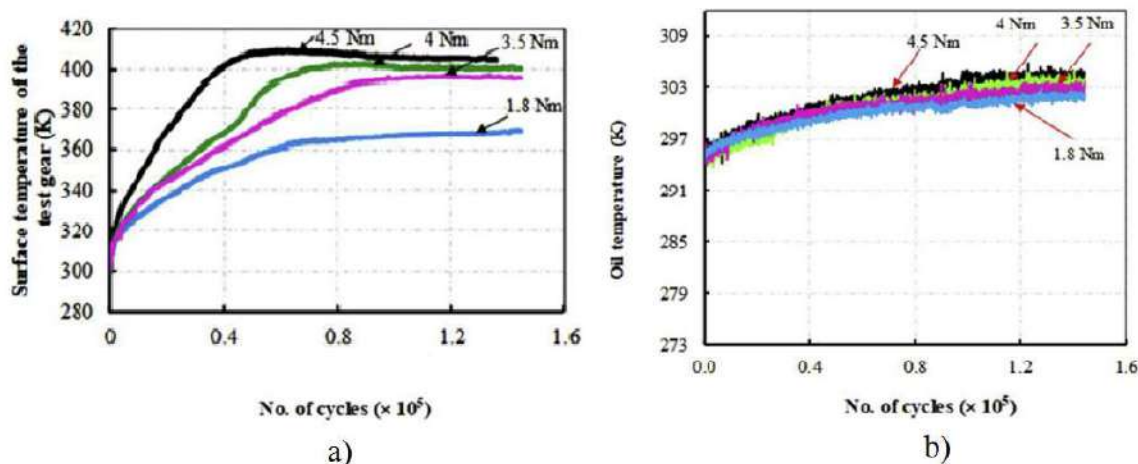
nakupine krhotina. Uz lošiju kvalitetu površine, zbog velikog unosa topline dolazi do zakaljivanja površine što rezultira većom tvrdoćom. Zupčanici prenose okretni moment iznosa 2, 2,5 i 3 Nm. Uočeno je povećanje temperature s povećanjem okretnog momenta na PP zupčaniku u oba slučaja, međutim, kada je polimerni zupčanik uparen s WEDM metalnim zupčanikom temperatura je veća 10 – 15 °C u odnosu na konvencionalno izrađen zupčanik. Više topline se generira zbog trenja, a uzrok je veća površinska hrapavost i tvrdoća WEDM zupčanika. Slika 3.4. (a) prikazuje stanje zuba PP zupčanika u zahvatu sa zupčanikom proizvedenim odvalnim glodanjem nakon 144 000 ciklusa, a Slika 3.4. (b) isti zupčanik ali sparen s metalnim zupčanikom dobivenim WEDM postupkom nakon 154 000 ciklusa. Pri prijenosu okretnog momenta od 3 Nm u oba slučaja vidljiva su oštećenja površine, a drugom slučaju, Slika 3.4. (b), je čak došlo i do taljenja materijala.



Slika 3.4. Stanje površine boka zuba PP zupčanika uparenog s metalnim zupčanikom izrađenog (a) konvencionalnim i (b) WEDM postupkom [21]

Chernets i dr. [22] dokazali su da kompozitni poliamidi ojačani karbonskim vlaknima otporniji na trošenje od kompozitnih polimera ojačanih staklenim vlaknima. Dodatkom staklenih ili karbonskih vlakana polimernom materijalu smanjuje se trošenje i povećava nosivost. U testu igle na disku, engl. pin on disc, uočeno je da postoje razlike u trošenju između poliamida s dodatkom 30% staklenih (PA 6-GF 30) i poliamida s dodatkom 30% karbonskih (PA 6-CF 30) vlakana. PA 6-CF 30 pokazuje 4 puta bolju otpornost prema trošenju uslijed klizanja u odnosu na PA 6-GF 30. Materijal diska u testu je čelik AISI 1045. Također, provedeno je ispitivanje na stvarnim zupčanicima pri brzini vrtnje $n = 1000$ o/min i okretnom momentu $T = 4$ Nm gdje je PA 6-CF 30 zupčanik pokazao 8 puta duži radni vijek u odnosu na zupčanik izrađen od PA 6-GF 30. Sarita i Senthilvelan [23] istražili su utjecaj maziva na povećanje temperature i trošenje te vrste oštećenja injekcijski prešanog PA 66 zupčanika uparenog s identičnim metalnim zupčanikom od čelika AISI 316. U radu je za podmazivanje korišteno sintetičko ulje

oznake SAE 75W85, a brzina vrtnje zupčanika i okretni moment koji se prenosi iznose $n = 800$ o/min i $T = 1,8 - 4,5$ Nm. Zupčanici su djelomično uronjeni u ulje (5 mm), ali se podmazuju cirkulacijski, prskanjem ulja u zahvat. PA 66 zupčanik je prije i nakon ispitivanja sušen 2 sata pri temperaturi zraka $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ kako bi se uklonio utjecaj vlage. Slika 3.5 prikazuje promjenu temperature zuba zupčanika, odnosno temperaturu ulja, za različita opterećenja.

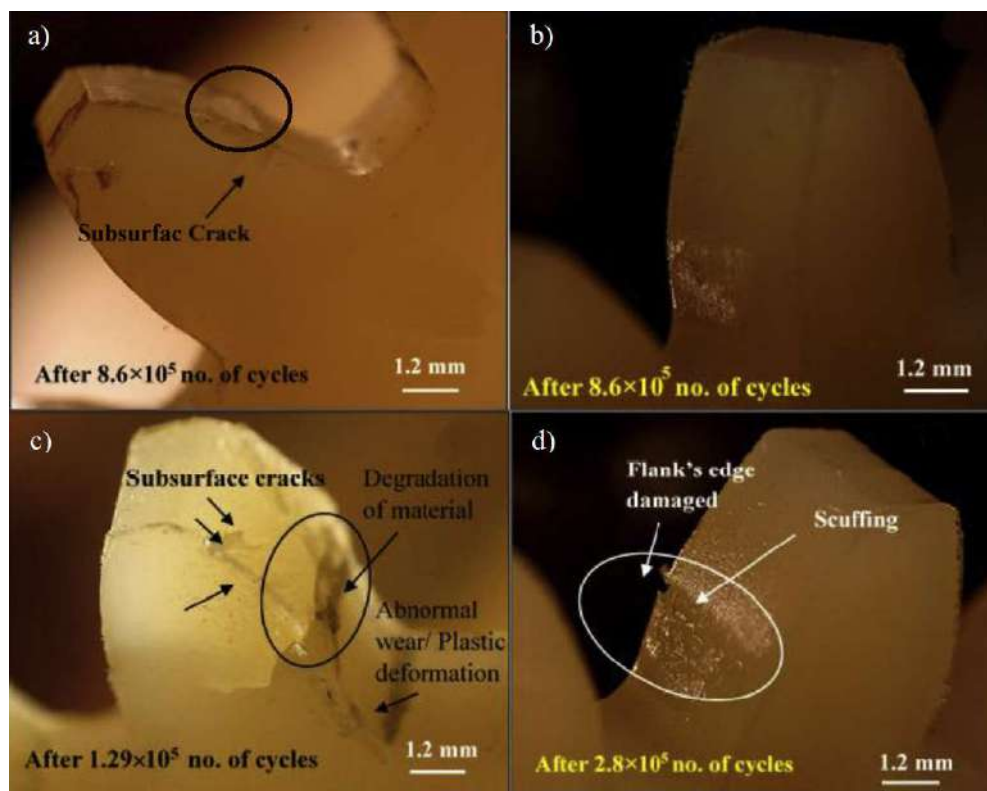


Slika 3.5. Promjena temperature (a) zupčanika i (b) ulja s povećanjem okretnog momenta

[23]

Iako je povećanjem opterećenja porast temperature zbog većih kontaktnih naprezanja uočen kod oba slučaja, vidljivo je da podmazivanje smanjuje temperaturu u zahvatu zupčanika čime se produljuje radni vijek polimernih zupčanika. Temperatura ulja porasla je svega $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ulja i maziva smanjuju trenje, odvođe toplinu iz sustava na okolinu te time smanjuju trošenje zupčanika. U radu je mjerena i masa zupčanika prije i nakon ispitivanja te je izmjereno da je PA 66 zupčanik koji nije bio podmazivan izgubio 56% više svoje mase u odnosu na podmazivani pri momentu $T = 1,8$ Nm, odnosno 59% pri momentu $T = 3,5$ Nm. Kod PA 66 zupčanika sa suhim podmazivanjem pri manjem opterećenju, $T = 1,8$ Nm, nakon 860 000 ciklusa uočena je pojava oštećenja na površini boka zuba, engl. pitting, te nastajanje inicijalne pukotine ispod površine u blizini kinematske kružnice (Slika 3.6. (a)). Uljem podmazivani PA 66 zupčanik pri istim uvjetima opterećenja i istom broju ciklusa pretrpio je značajno manja oštećenja. Vidljiv je proces početnog oštećivanja dodirnih površina bokova zuba koji kasnije može dovesti do zaribavanja (Slika 3.6. (b)). Povećanjem opterećenja, $T = 4,5$ Nm, kod podmazivanih zupčanika vidljivo je zaribavanje zupčanika u blizini korijena zuba (Slika 3.6. (d)). Zaribavanje je oblik destruktivnog adhezijskog trošenja koje nastaje kada se probije sloj ulja koji se nalazi između dva boka zuba spregnutih zupčanika te dolazi do mikrozavarivanja

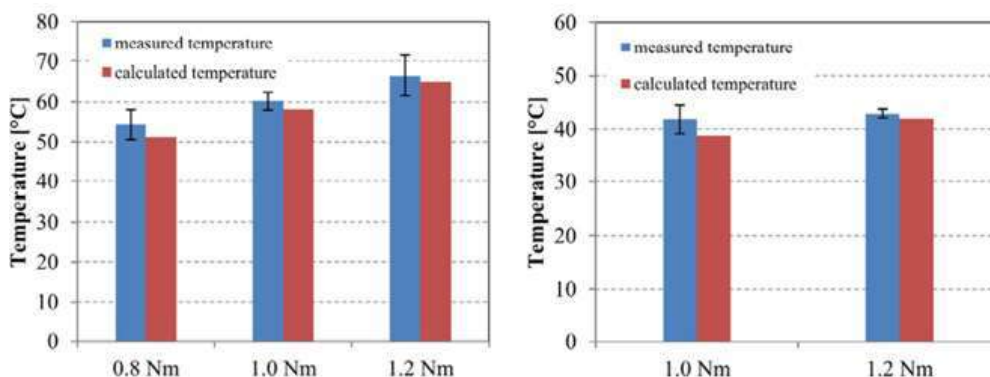
materijala na tom mjestu. Rotacijom zupčanika zavareni djelići boka zuba se otkidaju i nastaju udubljenja i brazde u smjeru klizanja. Pri povećanom opterećenju kod nepodmazivanog polimernog zupčanika došlo je do pretjeranog trošenja, katastrofalnih plastičnih deformacija, a mjestimično i do taljenja materijala.



Slika 3.6. Oštećenja zuba PA 66 zupčanika: (a) bez podmazivanja i (b) podmazivan pri $T = 1,8 \text{ Nm}$, (c) bez podmazivanja i (d) podmazivan pri $T = 4,5 \text{ Nm}$ [23]

Zorko i dr. [24] proveli su istraživanje na zupčanicima od PEEK-a uparenim sa zupčanicima od čelika DIN 42CrMo4 od kojih jedan nije naknadno mehanički obrađivan dok je na drugom izvršen postupak fine površinske obrade – engl. super finish. Metalni zupčanici i PEEK zupčanik su izrađeni postupkom odvalnog glodanja i oba imaju kvalitetu tolerancija 10, prema ISO 1328. Eksperimentalna ispitivanja su izvršena bez maziva i s mazivom oznake ISOFLEX TOPAS NB 52 pri brzinama vrtnje $n = 1600 \text{ o/min}$ i pri opterećenjima $T = 0,8 - 1,2 \text{ Nm}$. Dodatkom maziva u sustav produljuje se vijek trajanja PEEK zupčanika sparenog s metalnim zupčanikom za 23%. U slučaju uparivanja PEEK i metalnog zupčanika s naknadnom površinskom obradom koji se podmazuju životni vijek je čak 2,54 puta veći. Na podmazivanim zupčanicima izmjerene temperature su oko 20 °C niže u odnosu na nepodmazivane. Naknadna površinska obrada značajno ne utječe na temperaturu zupčanika, ali smanjuje trošenje površine.

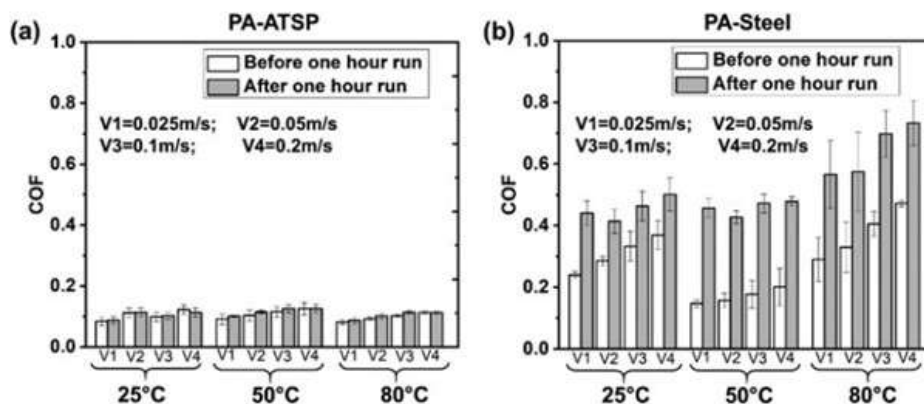
Mjerenja temperature u korijenu zuba PEEK zupčanika pri različitim opterećenjima uspoređena su s proračunom temperature prema smjernicama koje propisuje VDI 2736-2 [25]. Uočeno je da su izmjerene temperature više od izračunatih, a odstupanje je od 2% do 10%. Rezultati su prikazani na Slici 3.7. Zaključeno je kako PEEK ima bolja mehanička i tribološka svojstva od polimernih materijala koji se puno češće koriste kao što su PA i POM, čak i ako su isti ojačani karbonskim ili staklenim vlaknima.



Slika 3.7. Izmjerena (crveno) i proračunata temperatura u korijenu zuba (plavo): bez maziva (lijevo) i s mazivom (desno) [24]

Bashandeh i dr. [26] ispitali su tribološka svojstva, primarno koeficijent trenja, polimera PA 66 u odnosu na AISI 416 čelik, te isti čelik premazan aromatičnim termoreaktivnim kopoliesterom (ATSP) pri temperaturi okoline 20, 50 i 80 °C. ATSP premaz sadrži poli (tetrafluoretilen) (PTFE) koji zbog svoje niske površinske energije snižava koeficijent trenja i nanosi se na pjeskareni metalni disk u debljini od 30 μm . Ispitivanje je provedeno pin on disc testom bez dodatnog podmazivanja. Koeficijent trenja je mjeren na dva načina, prvo s konstantnim opterećenjem PA 66 igle na rotirajući disk i drugo sa stupnjevanim opterećenjem. Konstantno opterećenje iznosi 97 N za slučaj ispitivanja PA 66 i metalnog diska, a 483 N u slučaju PA 66 i ATSP-om premazanog diska od čelika. Stupnjevano opterećenje se povećava linearno svakih minutu za iznos od 129 N. Iznosi koeficijenta trenja pri različitim brzinama klizanja i konstantnom opterećenju prikazani su na Slici 3.8. (a) i (b). Uočen je 70% do 80% niži koeficijent trenja kod PA 66 igle koja kliže po metalnom disku s ATSP premazom u odnosu na klizanje igle po običnom metalnom disku. Zanimljivo je da je pri temperaturi okoline od 80 °C koeficijent trenja između PA 66 i ATSP-om premazanog diska manji za sve brzine nego pri nižim ispitivanim temperaturama. 80 °C je jako blizu temperature staklišta T_g poliamida PA 66 i dolazi do omekšavanja materijala i smanjenja modula elastičnosti što rezultira nižim koeficijentom trenja. Iz ispitivanja sa stupnjevanim opterećenjem uočeno je da metalni disk s

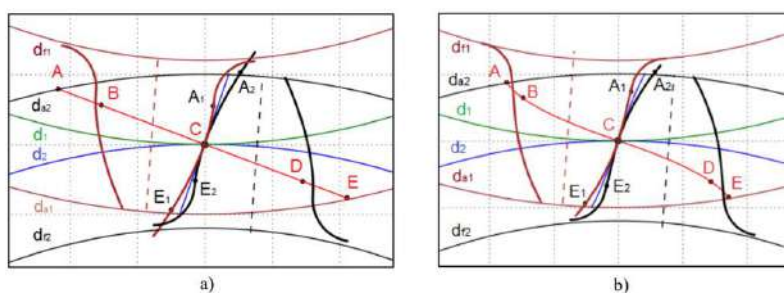
ATSP premazom može podnositi visoka kontaktna naprezanja bez značajnog trošenja te da koeficijent trenja opada s povećanjem opterećenja, jer dolaze do izražaja viskoelastična svojstva polimera, i poliamida PA 66 i ATSP premaza.



Slika 3.8. Promjena koeficijenta trenja za različite brzine klizanja i temperature okoline PA 66 s (a) ATSP-om premazanim diskom i (b) diskom bez premaza [26]

3.2. Utjecaj geometrije na rad polimernih zupčanika

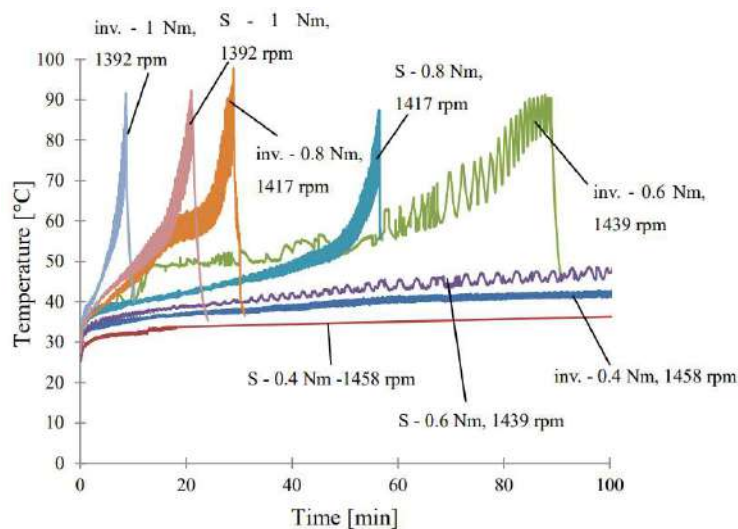
Zorko i dr. [27] eksperimentalno su dokazali kako promjena geometrije kod zupčanika može utjecati na zagrijavanje istih te su istražili kompatibilnost polimera koji se često koriste u proizvodnji zupčanika, POM i PA 66. Zupčanici POM i PA 66 su proizvedeni odvalnim glodanjem jer se injekcijskim prešanjem ne bi mogla ostvariti potrebna preciznost geometrije. Prema ISO 1328 kvaliteta tolerancija zupčanika je 10. Zupčanici s modificiranom geometrijom u odnosu na evolventne zupčanike, gdje je zahvatna linija pravac, ostvaruju zahvatnu liniju u obliku slova S pa se nazivaju S-zupčanici (Slika 3.9.).



Slika 3.9. Geometrija i zahvatna linija (od točke A do E): (a) evolventnog zuba i (b) S-zuba [27]

Kod takvih zupčanika početak i kraj zahvata karakterizira konveksno-konkavni kontakt između bokova zuba, dok je kod evolventnih zupčanika taj kontakt konveksno-konveksan. Takav

kontakt rezultira manjim klizanjem boka po boku, smanjenim kontaktnim naprezanjem i manjom generiranom toplinom u zahvatu. Prednost evolventnih u odnosu na *S*-zupčanike je neosjetljivost na promjene u osnom razmaku. Ispitane su dvije kombinacije zupčanih parova, POM i POM te POM i PA 66, pri različitim opterećenjima i brzinama vrtnje. U oba slučaja POM zupčanik je pogonski. Rezultati ispitivanja kombinacije POM i POM zupčanika prikazani su na Slici 3.10. i uočeno je manje zagrijavanje *S*-zupčanika u odnosu na evolventne, a isto je potvrđeno i za POM – PA 66 par zupčanika.



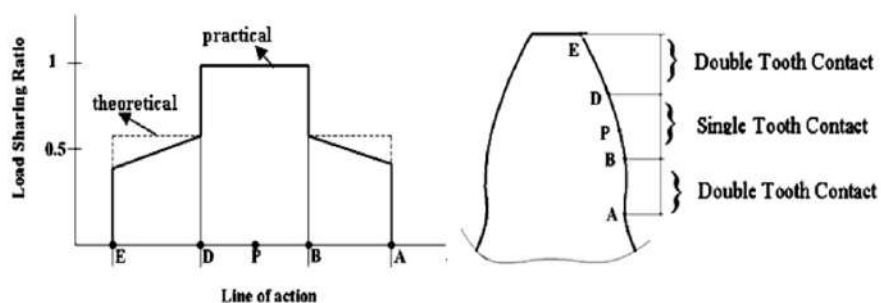
Slika 3.10. Rezultati mjerenja temperature POM – POM zupčanog para [27]

Kombinacija POM i PA 66 zupčanik pokazala se povoljnijom jer su se pri većem opterećenju od onog kojem su podvrgnuti POM – POM zupčanici manje zagrijavali. Razlog tome je nekompatibilnost istorodnih materijala kada se uparuju jer se javljaju velike adhezijske sile među dodirnim površinama koje rezultiraju većim trenjem i zagrijavanjem te konačno trošenjem. Hlebanja i Kulovec [28] proširili su istraživanje Zorka i dr. [27] na POM – PA 66 zupčanom paru. Analitički su odredili prosječnu snagu trenja P_{fr} koja se pretvori u toplinu prema izrazu

$$P_{fr} = \frac{\mu \cdot F_t}{\cos \alpha_w} \cdot v_g \quad (3.1)$$

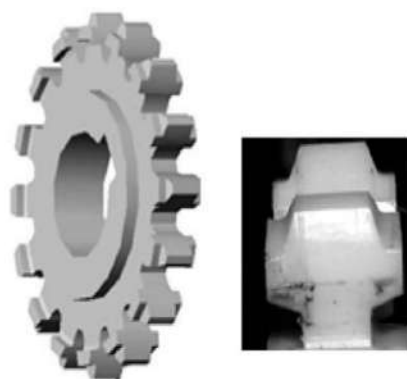
gdje je $\mu = 0.18$ koeficijent trenja bez podmazivanja, F_t tangencijalna sila na diobenom promjeru zupčanika, v_g brzina klizanja i α_w pogonski zahvatni kut koji iznosi 20° za evolventno ozubljenje dok se za *S*-zupčanik mijenja od 18° do $26,8^\circ$ duž zahvatne linije. Prosječna snaga koja se potroši uslijed trenja P_{fr} je oko 23% veća kod evolventnog ozubljenja, što potkrjepljuje veće zagrijavanje kod zupčanika s navedenim ozubljenjem. Eksperimentalno su odredili broj

ciklusa zupčanika do otkaza pri opterećenju $T = 0,6 \text{ Nm}$ i brzini vrtnje $n = 1428 \text{ o/min}$ te $T = 0,7 \text{ Nm}$ i brzini vrtnje $n = 1428 \text{ o/min}$. Zupčani par s S -ozubljenjem preživio je 2,75 puta veći broj ciklusa za prvi navedeni slučaj opterećenja, odnosno 2,55 puta veći broj ciklusa za drugi navedeni slučaj opterećenja u odnosu na evolventni zupčanik. Također, upozorili su da se proračun temperature u korijenu zuba zupčanika prema [25] ne može primijeniti na S -ozubljenje jer proračun ne uzima u obzir oblik boka profila zuba, već postoji samo za evolventno ozubljenje. Duzcukoglu [29] je dao doprinos u istraživanju utjecaja geometrije polimernih zupčanika na kontaktna naprezanja i njihovo zagrijavanje. U ovom radu je prikazano kako povećanje širine zupčanika b u području jednostrukog zahvata pozitivno utječe na rad istih. Slika 3.11. prikazuje raspodjelu opterećenja i područje jednostrukog i dvostrukog zahvata zahvata zupčanika duž zahvatne linije.



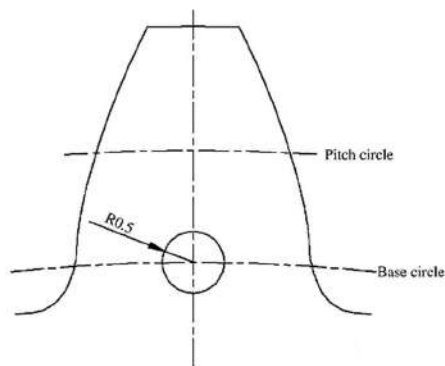
Slika 3.11. Raspodjela opterećenja zubi u zahvatu [29]

Od točke A do B te od točke D do E dva zuba zupčanika su istovremeno u zahvatu, dok je od točke B do D samo jedan zub zupčanika u zahvatu i preuzima cijelo opterećenje. Povećanjem širine b s 4 na 8 mm staklenim vlaknima ojačanog poliamida PA 66-GF 30 u području jednostrukog zahvata smanjila su se Hertzova kontaktna naprezanja u odnosu na standardni nemođificirani zupčanik iste geometrije.



Slika 3.12. PA 66-GF 30 zupčanik s modificiranom širinom boka zuba [29]

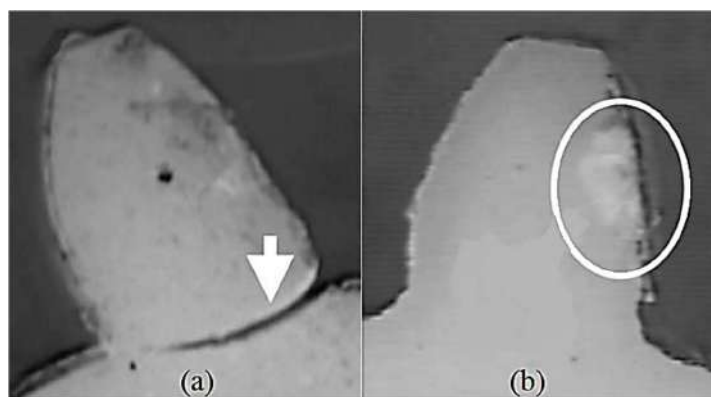
Ovakvim konstrukcijskim rješenjem ostvarena su niža kontaktna naprezanja u području jednostrukog zahvata modificiranog zupčanika u odnosu na nemodificirani zbog smanjenja specifične sile po boku zuba F/b , uz zanemarivo povećanje mase i cijene proizvoda. Zupčanik s modificiranom širinom boka zuba prikazan je na Slici 3.12. Izmjerena temperatura PA 66-GF 30 modificiranog zupčanika pri opterećenju $T = 8,5$ Nm nakon početnog uhodavanja i ostvarenja toplinske ravnoteže je oko 15 °C, odnosno oko 20 °C niža pri $T = 13$ Nm i brzini vrtnje $n = 1500$ o/min. Kim [30] je prikazao metodu kojom se može produžiti radni vijek polimernog zupčanika. U istraživanju je koristio POM i PA 6 polimerni zupčanik kao pogonski, dok je gonjeni zupčanik izrađen iz čelika S45C i svi zupčanici su kvalitete tolerancija 6 prema JIS-u. Zupčanici su sušeni 48 sati na zraku temperature 40 °C prije ispitivanja. Eksperimentalno ispitivanje je provedeno na tri varijante POM i PA 6 polimernih zupčanika: nemodificiranom zupčaniku, zupčaniku s provrtom na zubu i zupčanikom s provrtom na zubu u koji je umetnut čelični zatik (Slika 3.13.).



Slika 3.13. Polimerni zupčanik s provrtom na zubu [30]

Provrt je izrađen na sjecištu simetrale zuba i temeljne kružnice zupčanika i promjera je 1 mm. Izmjerena temperatura na površini boka zuba PA 6 zupčanika s provrtom na zubu nije se značajno smanjila dok je umetanje čeličnog zatika rezultiralo nižom temperaturom 3 °C do 10 °C ovisno o opterećenju. Snižanjem temperature trošenje PA 6 zupčanika s umetnutim čeličnim zatikom smanjilo se trošenje za oko 30% , a ostvaren je 415% veći broj ciklusa. Umetanje metalnog zatika veće toplinske vodljivosti pospješilo je odvođenje generirane topline i pozitivno utjecalo na radni vijek PA 6 zupčanika. Suprotno, izrada provrta na krtijem POM zupčaniku odrazila se negativno jer je oslabila poprečni presjek u području korijena zuba. Umetanjem čeličnog zatika povećana je krutost zuba zupčanika što je smanjilo mogućnost plastičnog deformiranja POM zupčanika pod opterećenjem te povećalo trošenje. Zaključak je da je ova metoda primjenjiva za poliamide i druge viskoelastične materijale. Senthilvelan i

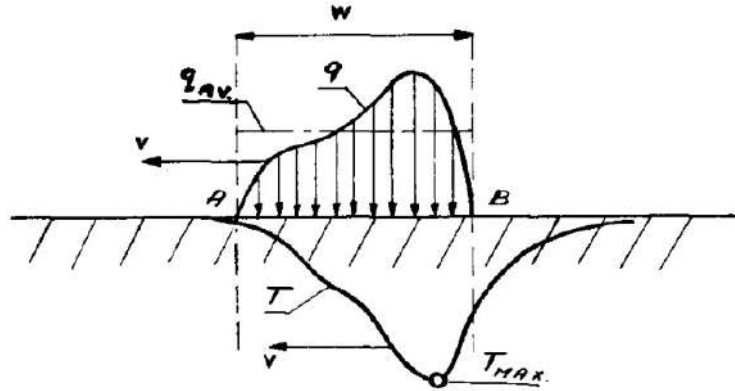
Gnanamoorthy [31] proveli su istraživanje na PA 66 zupčanicima s različitim polumjerima zaobljenja prijelazne krivulje u korijenu ρ_F proizvedenih injekcijskim prešanjem uparenim sa zupčanicom od čelika SS 316 iste geometrije. Ispitivani su zupčanci s polumjerima zaobljenja prijelazne krivulje u korijenu zuba $\rho_F = 0,25$ mm i $\rho_F = 0,75$ mm, odnosno najmanji i najveći preporučeni polumjeri zaobljenja prijelazne krivulje za zupčanic s modulom $m = 2$ mm. Eksperimentalno ispitivanje provedeno je pri brzini vrtnje $n = 1428$ o/min i opterećenjima $T = 1,5 - 3$ Nm i provodi se do otkaza polimernog zupčanika. Povećanjem polumjera zaobljenja prijelazne krivulje u korijenu zuba ρ_F smanjuje se koncentracija naprezanja što vodi ka ravnomjernijoj raspodjeli naprezanja i usporava nastajanje inicijalne pukotine u korijenu zuba zupčanika. Kod PA 66 zupčanika s većim polumjerom zaobljenja veća je površina pa se toplina brže predaje okolini te se oni manje zagrijavaju, a uočeno je i manje savijanje zuba. Na Slici 3.14. (a) vidljivo je da je do otkaza zupčanika s polumjerom zaobljenja prijelazne krivulje $\rho_F = 0,25$ mm pri opterećenju $T = 1,5$ Nm došlo uslijed loma u korijenu zuba, dok je kod zupčanika s polumjerom zaobljenja $\rho_F = 0,75$ mm, Slika 3.14. (b), pri istom opterećenju došlo do rupičanja, pitting, u području kinematske kružnice. Pri većim opterećenjima kod oba zupčanika dolazi do pregrijavanja, mekšanja materijala i velikih plastičnih deformacija uslijed savijanja.



Slika 3.14. Oštećenja PA 66 zupčanika s polumjerom zaobljenja prijelazne krivulje u korijenu zuba: (a) $\rho_F = 0,25$ mm i (b) $\rho_F = 0,75$ mm [31]

3.3. Određivanje temperature i zagrijavanje polimernih zupčanika

Blok [32] je predložio model za proračun maksimalne temperature T_{\max} koja nastaje uslijed relativnog klizanja dviju površina, jedne po drugoj. Na kontaktnoj površini dolazi do lokalnog povećanja temperature. Na Slici 3.15. prikazan je vremenski nepromjenjiv, stacionarni, izvor topline koji nastaje zbog trenja između dodirnih površina te je pretpostavka da je kontakt duž linije i neprekidan je.



Slika 3.15. Pokretni izvor topline duž linije kontakta [32]

Ako se konstantni toplinski tok q , s prosječnom vrijednosti q_{av} , giba konstantnom brzinom v po ravnoj površini, maksimalna temperatura T_{max} može se odrediti prema izrazu:

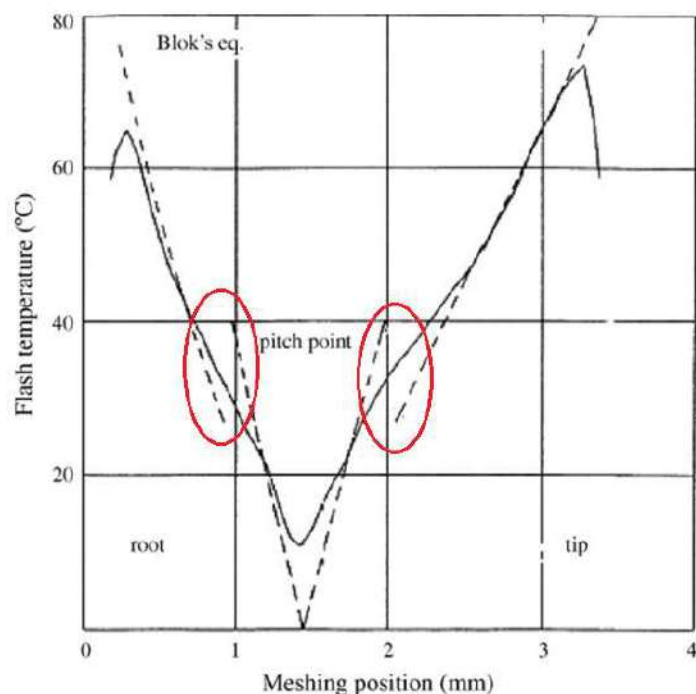
$$T_{max} = A \cdot \frac{q_{av}}{\sqrt{k \cdot \rho \cdot c}} \cdot \sqrt{\frac{\omega}{v}} \quad (3.2)$$

gdje je k koeficijent toplinske vodljivosti, ρ gustoća, c specifični toplinski kapacitet, ω širina toplinskog toka i A je faktor oblika koji ovisi o obliku distribucije toplinskog toka. Kada se izraz 3.2. primjeni na zupčanike trenutna temperatura dodira boka zuba T_{flash} računa se iz izraza:

$$T_{flash} = 1,11 \cdot \mu \cdot T \cdot \frac{\sqrt{v_1} - \sqrt{v_2}}{r \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot k \cdot \rho \cdot c \cdot a}} \quad (3.3)$$

gdje je μ koeficijent trenja, T okretni moment koji se prenosi, v_1 i v_2 brzine klizanja zupčanika 1 i 2, r referentni polumjer, b širina zupčanika i a polovica širine kontaktne površine. Brzine klizanja v_1 i v_2 , koeficijent trenja μ , referentni polumjer r kao i širina kontaktne površine $2a$ koja ovisi o Hertzovom tlaku mijenjaju se prolaskom zupčanika kroz zahvat pa se može zaključiti da se proračunom temperature prema izrazu (3.3.) neće dobiti precizna rješenja. Mao [33] je predstavio numerički model za proračun trenutne temperature dodira boka zuba T_{flash} , ali je za razliku od Blokovog [32] modela pretpostavio nestacionarni izvor topline koji se mijenja duž zahvatne linije. Numerička analiza je primijenjena korištenjem metode konačnih diferencija na POM zupčanike sa standardnom geometrijom za brzinu vrtnje $n = 1000$ o/min i okretni moment koji se prenosi $T = 10$ Nm. Slika 3.16. prikazuje rezultate numeričke analize i Blokovog modela. Trenutna temperatura T_{flash} je najviša na dijelovima zahvatne linije gdje su najveće brzine klizanja i referentni polumjeri, na početku i kraju zahvata. Rješenja Blokovog modela na početku i kraju zahvata odstupaju od numeričkog modela za oko 20%. Također,

vidljivo je odstupanje kod prijelaza iz dvostrukog u jednostruki zahvat zupčanika (označeno crvenom bojom).



Slika 3.16. Usporedba numeričkog i Blokovog modela [33]

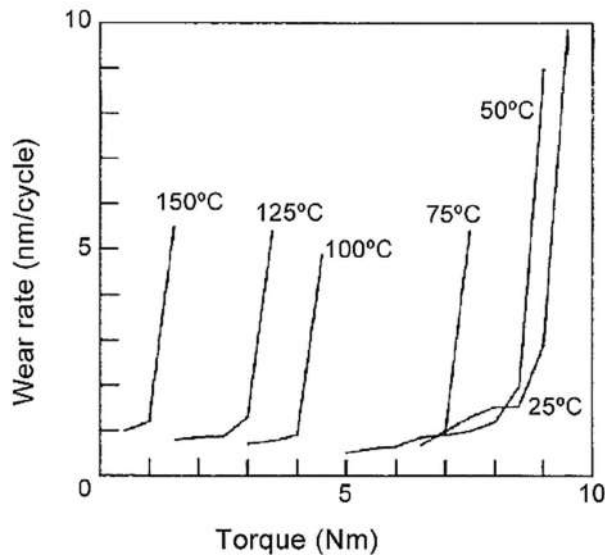
Izvedeni su zaključci da Blok model daje zadovoljavajuće rezultate i može se koristiti za izračun prosječne trenutne temperature dodira između dva boka zuba. Ipak, precizno određivanje temperature je jako bitno kod polimernih zupčanika, zbog značajne ovisnosti njihovih svojstava o istoj, pa se preporuča koristiti predloženu numeričku metodu. Viskoelastičnost polimera nije uzeta u obzir kod ove metode pa se ne može primijeniti na poliamide, ali kod polimera poput POM-a koji nemaju izražene relaksacijske procese, primjereno je koristiti ovu metodu. Mao [34] je nastavio istraživanje na POM zupčanicima te je usporedio numeričke rezultate s eksperimentalnim. Razradio je model za procjenu maksimalne temperature na površini zuba zupčanika T_{surface} koja je podijeljena na tri temperature: temperaturu okoline T_{amb} , temperaturu tijela zupčanika T_{bulk} i trenutnu temperaturu dodira boka zuba T_{flash} i vrijedi

$$T_{\text{surface}} = T_{\text{amb}} + T_{\text{bulk}} + T_{\text{flash}} \quad (3.4)$$

gdje je model za određivanje trenutne temperature T_{flash} predstavljen u radu [33], a temperatura tijela zupčanika T_{bulk} se računa prema izrazu:

$$T_{\text{bulk}} = \frac{0,625\mu T}{c\rho Zb(r_a^2 - r^2)} \quad (3.5)$$

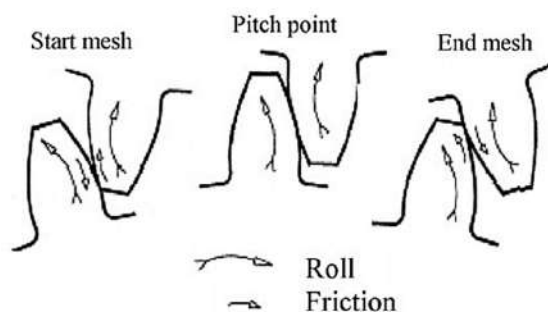
gdje je Z broj zubi promatranog zupčanika i r_a polumjer tjemene kružnice, dok su ostali članovi izraza (3.5) ranije navedeni. Rezultati eksperimentalnog ispitivanja pokazuju zadovoljavajuće slaganje s rezultatima predloženog modela za različite geometrije zupčanika i temperature okoline. Povećanjem modula zuba POM zupčanika smanjuje se opteretivost zbog većih brzina klizanja pri istoj brzini vrtnje. Veće brzine klizanja dovode do viših temperatura tijela i bokova zupčanika, kao i većeg trošenja. Ispitivanjem trošenja POM zupčanika pri različitim temperaturama okoline T_{amb} uočeno je da se povećanjem temperature okoline smanjuje opteretivost zupčanika, vidljivo na Slici 3.17. Kako se temperatura okoline približava temperaturi taljenja POM-a koja iznosi $T_t = 175 \text{ }^\circ\text{C}$, okretni moment koji se može prenositi postaje jednak nuli.



Slika 3.17. Opteretivosti POM zupčanika pri različitim temperaturama okoline T_{amb} [34]

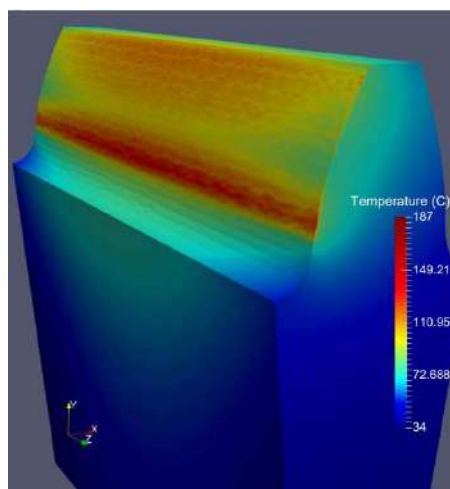
Rezultati eksperimentalnog ispitivanja i rezultati proračuna temperature uspoređeni su s važećim smjericama za polimerne zupčanike BS 6168 [35] te je uočen velik nesrazmjer. Također, u radu je provedeno ispitivanje trošenja kompozita poliamida s 30% udjela staklenih vlakana i 15% PTFE-a te su uočene tri faze trošenja. Prva faza je kratka i odnosi se na uhodavanje nakon čega slijedi faza linearnog povećanja trošenja do završne faze u kojoj se doseže maksimalna temperatura koja vodi do loma poliamidnog zupčanika. Lom se pojavio na pogonskom zupčaniku u području ispod kinematske kružnice. Razlog tome je promjena smjera sile trenja za vrijeme odvaljivanja zupčanika (Slika 3.18.). Trošenje u korijenu zuba pogonskog

zupčanika veće je u odnosu na gonjeni zupčanik jer je sila trenja prilikom primicanja veća nego prilikom odmicanja. Na početku zahvata, prilikom primicanja zuba jedan drugom, kotrljanje zupčanika je takvo da su usmjereni jedan prema drugom, dok su na kraju zahvata zubi odmiču i kotrljanje bokova zuba je jedan od drugog. Slično kao što je kod pomicanja tereta kada sila kojom djelujemo nije paralelna s podlogom, lakše ga je povući nego gurnuti ga.



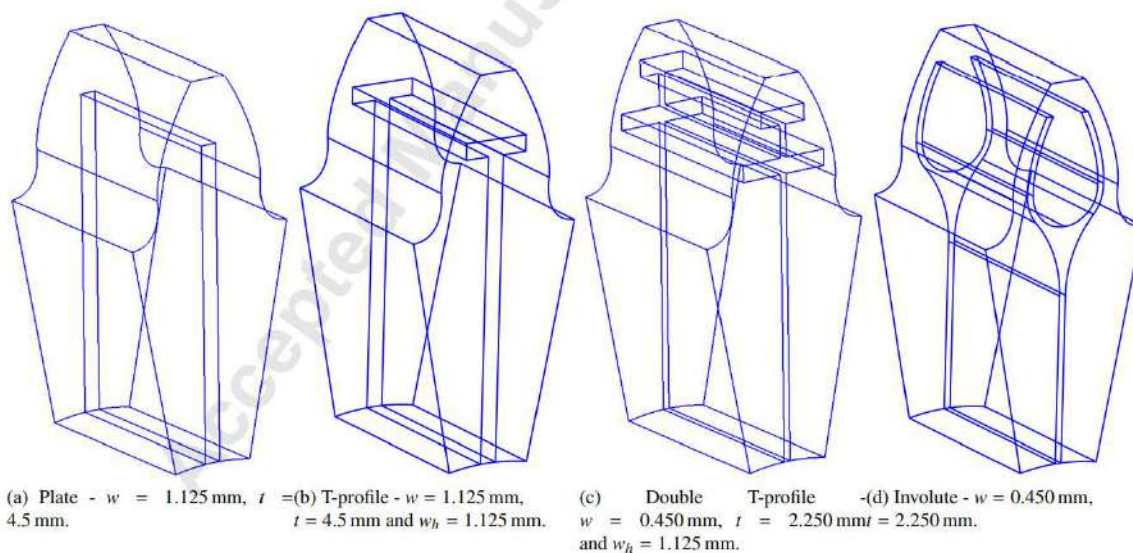
Slika 3.18. Smjer sile trenja za vrijeme odvajanje boka zuba zupčanika [34]

Fernandes i dr. [36] izradili su FEM model za predviđanje temperature tijela i trenutne temperature dodira boka zuba zupčanika za slučaj podmazivanja uranjanjem, podmazivanja prskanjem i bez podmazivanja te su ga usporedili s rezultatima iz literature. Simulacija je izvršena u programu ElmerFem uz sljedeće pretpostavke: deformacije boka zuba su isključivo elastične i izotropne su, u uvjetima podmazivanja zanemaruju se trenje i kompresibilnost fluida na površini tijela u kontaktu, brzine klizanja su u smjeru vrtnje zupčanika. U uvjetima podmazivanja ispitivani su metalni zupčanici od čelika 20MnCr5 i korišten je FZG – A test zaribavanja, prema DIN 51534. Najveća greška između FEM modela i eksperimentalnih rezultata iz literature manja je od 6,5% što je zadovoljavajuće.



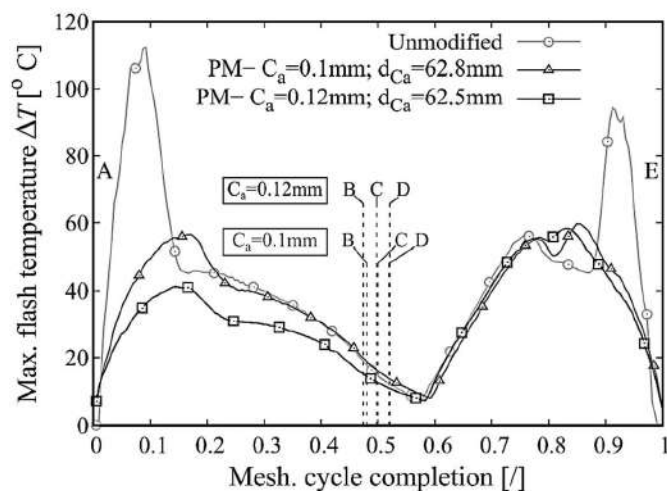
Slika 3.19. Temperatura površine POM zupčanika pri $T = 10 \text{ Nm}$ i $n = 1000 \text{ o/min}$ [36]

Temperature površine boka zuba dobivene FEM modelom za POM zupčanik bez podmazivanja uspoređen je s rezultatima numeričkog modela koje je predstavio Mao [33, 34]. Pri opterećenju $T = 10 \text{ Nm}$, brzini vrtnje $n = 1000 \text{ o/min}$ te temperaturi okoline $T_{\text{amb}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatura površine T_{surface} prema FEM modelu iznosi $187 \text{ }^\circ\text{C}$, Slika 3.19., dok prema [34], iz izraza (3.3 – 3.5) ista iznosi $175 \text{ }^\circ\text{C}$. Fernandes i dr. [37] ispitali su mogućnost dodavanja metalnog umetka u jezgru zuba zupčanika kako bi poboljšali toplinska svojstva istog, primarno kako bi povećali toplinsku vodljivost i time smanjili temperaturu tijela polimernog zupčanika. Koristili su postojeći numerički model [36] kojeg su prilagodili novoj geometriji zupčanika. Najveća mana polimernih materijala je njihova loša toplinska vodljivost koja nepovoljno utječe na radnu temperaturu polimernih zupčanika. Dodavanjem umetka od materijala s većom toplinskom vodljivošću poput bakra, aluminijske ili čelika potiče se odvođenje topline iz zahvata zuba zupčanika. Implementacija metalnog umetka predstavlja izazov sa tehnološkog stajališta, ali u ovom radu provedena je samo FEM analiza bez eksperimentalnog ispitivanja temperature tijela zupčanika T_{bulk} . Pretpostavka je da je temperatura tijela zupčanika jednaka na svim mjestima dovoljno udaljenima od zone na koju utječe kratkotrajna trenutna temperatura dodira boka zuba T_{flash} . Rezultati FEM analize polimernog zupčanika s umetkom u obliku trake, Slika 3.20. (a), pokazali su da bakar najviše snižava temperaturu tijela zupčanika. Međutim, ako se osim smanjenja temperature tijela uzme u obzir masa metalnog umetka, kao i tehnoložnost i cijena ispitivanih umetaka, aluminijski je najbolji izbor. Zbog toga je u nastavku istraživanja samo provedena FEM analiza različitih oblika umetka od aluminijske (Slika 3.20. (a) – (d)).



Slika 3.20. Različiti oblici metalnih umetaka s pripadajućom geometrijom: (a) traka, (b) T profil, (c) dvostruki T profil i (d) evolventni profil [37]

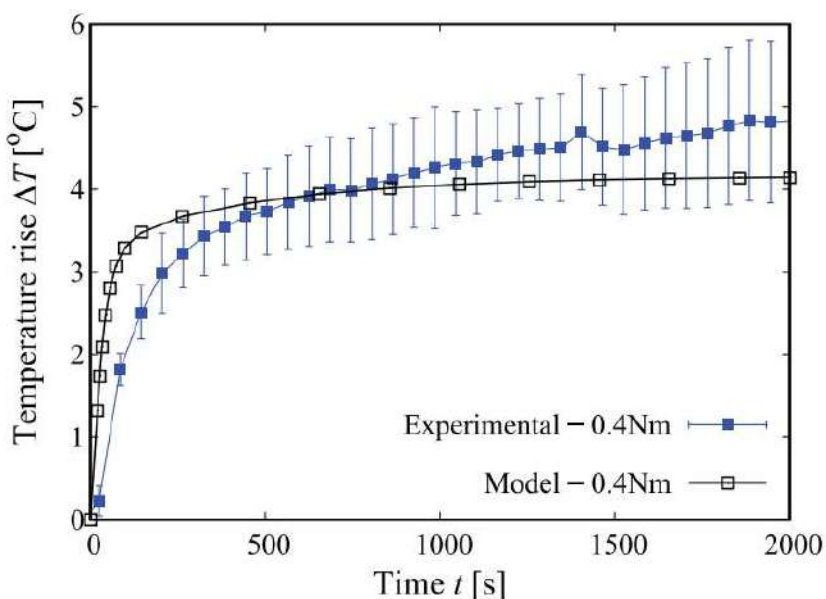
Osim ranije spomenutog umetka u obliku trake korišten je umetak u obliku T profila, dvostrukog T profila i evolventnog profila. Radi ispravne evaluacije, svi navedeni oblici umetaka su takve geometrije da imaju jednaku masu. Kod polimernog zupčanika s umetkom u obliku evolvente uočeno je smanjenje temperature tijela za 28%, kao i kod dvostrukog T profila. Černe i dr. [38, 39] predstavili su numeričko – analitički model za predviđanje temperature polimernih zupčanika. Simulacija je provedena na POM i PA 66 polimernim zupčanicima i pretpostavljen je linearno elastični model. Najslabija točka ovog modela je pretpostavka da mehanička svojstva polimera ne ovise o promjeni temperature. Predstavljeni model daje zadovoljavajuća rješenja za srednja opterećenja, odnosno kada se u zupčaniku ostvari stacionarno stanje. Međutim, pri većim opterećenjima, kada dolazi do velikih deformacija zuba zupčanika koje vode do nepravilnog zahvata i povećanih kontaktnih naprezanja rezultati modela nisu prihvatljivi, pogotovo kod PA 66 zupčanika s izraženim viskoelastičnim svojstvima i temperaturom staklišta iznad očekivane radne temperature okoline. U radu je ispitan utjecaj modifikacije vrha zuba na trenutnu temperaturu T_{flash} . Poželjno je izvesti modifikaciju vrha zuba kod POM zupčanika jer može doći do sprječavanja značajnih deformacija pa čak i lomova u korijenu zuba uslijed savijanja, te kako bi se smanjila kontaktna naprezanja na početku i kraju zahvata zuba.



Slika 3.21. Trenutna temperatura T_{flash} POM zupčanika s i bez modifikacije vrha zuba duž zahvatne linije [38]

Slika 3.21. prikazuje razliku u trenutnoj temperaturi POM zupčanika s i bez modifikacije vrha zuba te su uočene značajno niže temperature kod zupčanika s modificiranim zubom. Također, provedeno je eksperimentalno ispitivanje polimernih zupčanika te su rezultati uspoređeni s

rezultatima numeričkog modela za procjenu temperature. Temperatura tijela zupčanika T_{bulk} mjerena je u korijenu zuba zupčanika kako bi se izbjegao utjecaj trenutne temperature T_{flash} i mjerenje je izvršeno infracrvenom termalnom kamerom visoke razlučivosti. Kako bi smanjili refleksiju koja bi utjecala na mjerenje infracrvenom kamerom, površine iza ispitivanih zupčanika obložene su folijom niske reflektivnosti. Uočeno je zadovoljavajuće podudaranje numeričkog modela i eksperimentalnog mjerenja temperature tijela zupčanika, iako je primijećen porast temperature pri produljenom vremenu eksperimentalnog ispitivanja uslijed geometrijskih odstupanja koja se javljaju u radu (Slika 3.22.).

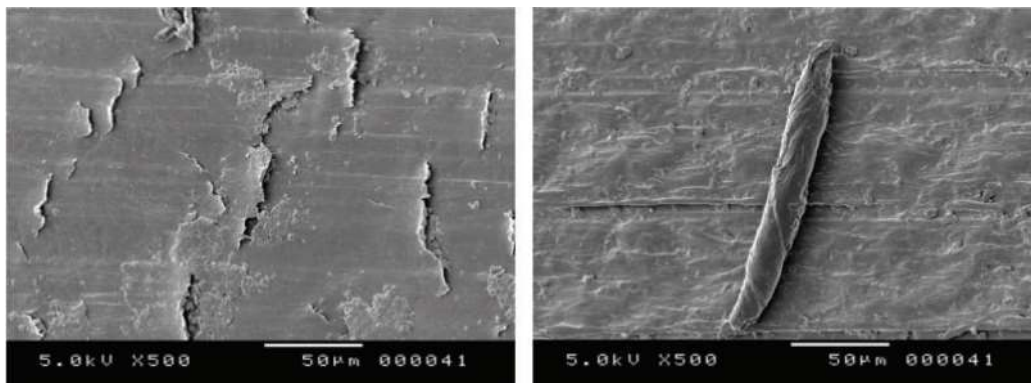


Slika 3.22. Promjena temperature tijela zupčanika T_{bulk} POM zupčanika pri $T = 0,4 \text{ Nm}$ i $n = 956 \text{ o/min}$ [39]

3.4. Mehanizmi trošenja polimernih zupčanika

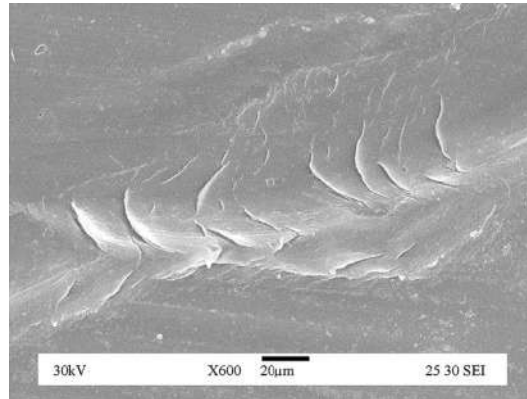
Mbarek i dr. [40] proveli su eksperimentalno ispitivanje triboloških svojstava PA 66 polimera uparenog s čelikom C45. Ispitivanje je provedeno testom s dva diska (engl. disc on disc) za različite omjere klizanja (4%, 12%, 20% i 28%) između polimernog i metalnog diska pri brzini vrtnje $n = 300 \text{ o/min}$ i konstantnom Hertzovom tlaku 34 MPa. U radu su korišteni diskovi različitih promjera kako bi se simulirao kontakt bokova zuba zupčanika u području ispod i iznad kinematske kružnice. PA 66 diskovi su sušeni u vakuumu oko 6 sati pri temperaturi 70 °C kako bi se uklonila vlaga. Uočeno je da se koeficijent trenja povećava s povećanjem omjera klizanja. Koeficijent trenja na početku naglo raste zbog kontakta polimer – metal dok se kasnije, nakon što se stvorio prijelazni sloj polimera na metalnom disku, ustali na određenoj vrijednosti. Za

vrijeme ispitivanja, termalnom kamerom je snimana temperatura zupčanika te je uočeno da temperatura, kao i koeficijent trenja, raste s povećanjem omjera klizanja. Također, zupčanicima je nakon ispitivanja izmjerena masa, koja je uspoređena s početnom kako bi se izmjerilo trošenje. Povećanje omjera klizanja popraćeno je povećanjem trošenja polimernih diskova. Slika 3.23. prikazuje stanje površine polimernog diska takvog promjera da simulira trošenje područja ispod kinematske kružnice (lijevo) odnosno iznad kinematske kružnice (desno). Površina je snimljena pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM).



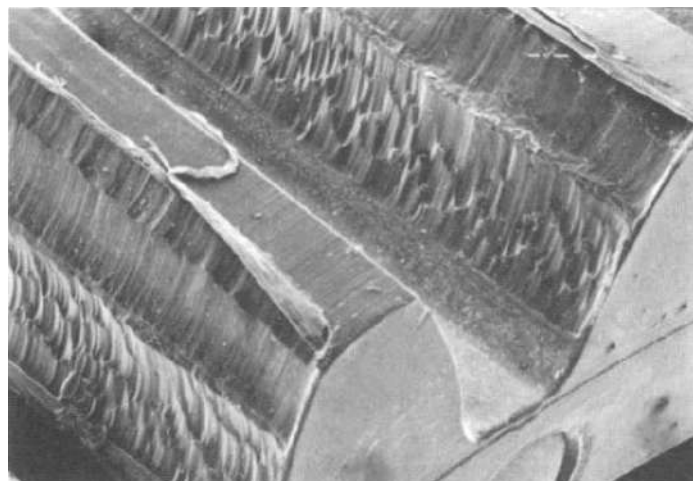
Slika 3.23. Stanje površine boka zuba u području ispod kinematske kružnice (lijevo) i iznad kinematske kružnice (desno) pri omjeru klizanja 28% [40]

U području ispod kinematske kružnice uočene su pukotine i grublja površina uzrokovana različitim smjerovima kotrljanja i klizanja u tom području. Iznad kinematske kružnice kotrljanje i klizanje je u istom smjeru, površina je glatka, ali su uočene krhotine koje su nastale od dijelova prijelaznog sloja polimera koji se nije primio na površinu metalnog diska. Evans i Keogh [41] istražili su trošenje površine boka zuba POM zupčanika kada je uparen s metalnim zupčanikom. Eksperimentalno istraživanje provedeno je pri niskom opterećenju $T = 0,85 \text{ Nm}$ i brzini vrtnje $n = 168 \text{ o/min}$, a rezultati su uspoređeni s analitičkim modelom. Ispitivanje je prekinuto nakon otprilike 10^7 ciklusa, a zatim je izvršena SEM analiza kako bi se pregledalo stanje površine boka zuba i eventualna oštećenja. Slika 3.24. prikazuje površinu boka zuba zupčanika, uvećanu 600 puta na SEM uređaju, na kojoj su uočeni tragovi trošenja koji ostavljaju dojam kao da je površina razmazana. To su plastične deformacije koje isključivo nastaju zbog klizanja bokova zubi uparenih zupčanika, a ne zbog opterećenja ili kontaktnih naprezanja jer su ona su relativno niska. Nakon navedenog broja ciklusa zupčanik je skeniran nakon čega je iz skeniranog modela izračunat volumen zupčanika, a nakon toga i izračunata 77 mg manja masa u odnosu na početnu masu zupčanika, dok je prema analitičkom modelu predstavljenom u ovom radu izračunat gubitak mase od 67 mg.



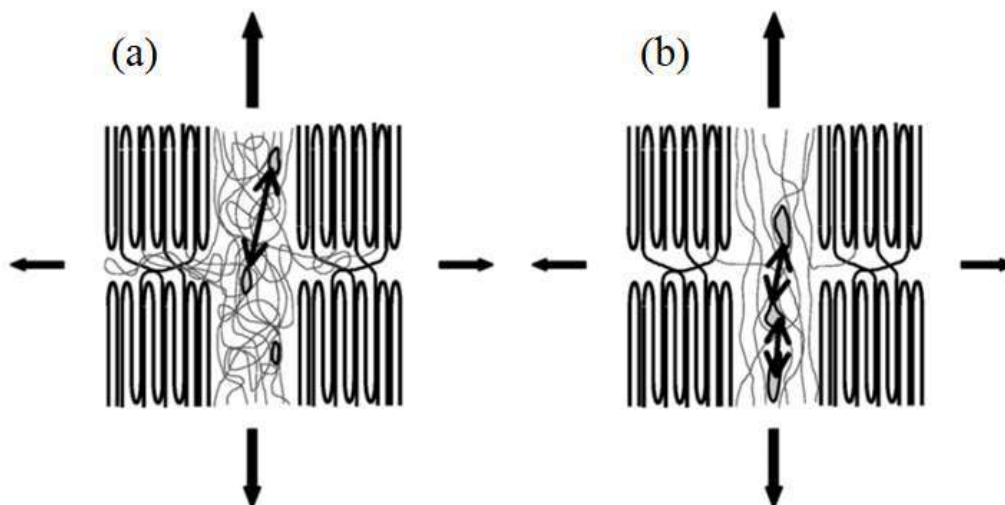
Slika 3.24. Stanje površine boka zuba POM zupčanika nakon $6 \cdot 10^6$ ciklusa [41]

Breeds i dr. [42] istražili su trošenje POM para i PA 66 para polimernih zupčanika koji su proizvedeni injekcijskim prešanjem. Po završetku ispitivanja izmjerena je masa zupčanika kako bi se odredilo trošenje, a površina boka zuba je snimljena SEM uređajem kako bi se utvrdili mehanizmi trošenja koji se javljaju u radu zupčanika. Eksperimentalno ispitivanje provedeno je za različita opterećenja gdje je uočeno da je radni vijek POM zupčanika pri nižim opterećenjima ograničen trošenjem, dok je pri većim opterećenjima radni vijek ograničen najvećom dozvoljenom temperaturom zupčanika, temperaturom tališta T_t , te plastičnim deformacijama. SEM optičkom analizom uočeno je različito trošenje površine boka zuba kod pogonskog i gonjenog POM zupčanika. Slika 3.25. prikazuje stanje boka zuba gonjenog zupčanika nakon 100 000 ciklusa. Vidljivo je da površina boka zuba u području ispod kinematske kružnice značajno potrošena i oštećena, a u području iznad kinematske kružnice površina boka zuba je zaglađena s manjim oštećenjima.



Slika 3.25. Stanje površine boka zuba gonjenog POM zupčanika pri $T = 8 \text{ Nm}$ i $n = 1500$ o/min [42]

Takvo trošenje uzrokovano je različitim smjerovima kotrljanja i klizanja bokova za vrijeme trajanja zahvata (Slika 3.18.). Na kinematskoj kružnici nema klizanja što znači da oštećenja gotovo ne bi trebala biti, međutim, na tom mjestu nastaje greben zbog gomilanja materijala. Suprotno gonjenom, na pogonskom zupčaniku u području oko kinematske kružnice nastala je udubina, a stanje iznad kinematske kružnice i ispod kinematske kružnice jednako je stanju kao kod gonjenog zupčanika. U radu je uočena razlika u načinu trošenju kod PA 66 para u odnosu na POM par zupčanika, kao i razlika u rezultatima ispitivanja trošenja kod testa s dva diska (disc on disc), igle i diska (pin on disc) ili ispitivanja polimernih zupčanika uparenih s metalnim. Cayer-Barioz i dr. [43] istražili su mikro mehanizme trošenja kristalastih PA 6 vlakana te utjecaj molekulne mase i orijentiranosti makromolekula unutar amorfne faze na trošenje. Polimerna vlakna su prebačena preko čeličnog diska s premazom od tvrde keramike koji rotira i odgovarajuće hrapavosti kako bi se simuliralo klizanje polimera po metalu. Jedan kraj vlakna je pričvršćen, dok je na drugom kraju preko koloture obješen uteg kako bi se izazvala vlačna naprezanja u vlaknima. Dio vlakna koji je u direktnom kontaktu s abrazivnim diskom je uronjen u vodu kojoj se održava temperatura kako bi se izbjegao utjecaj zagrijavanja na trošenje. Istraživanjem je utvrđeno da molekulna masa ne utječe na trošenje, a orijentiranost i uređenost molekula unutar amorfne faze utječu na otpornost prema trošenju.



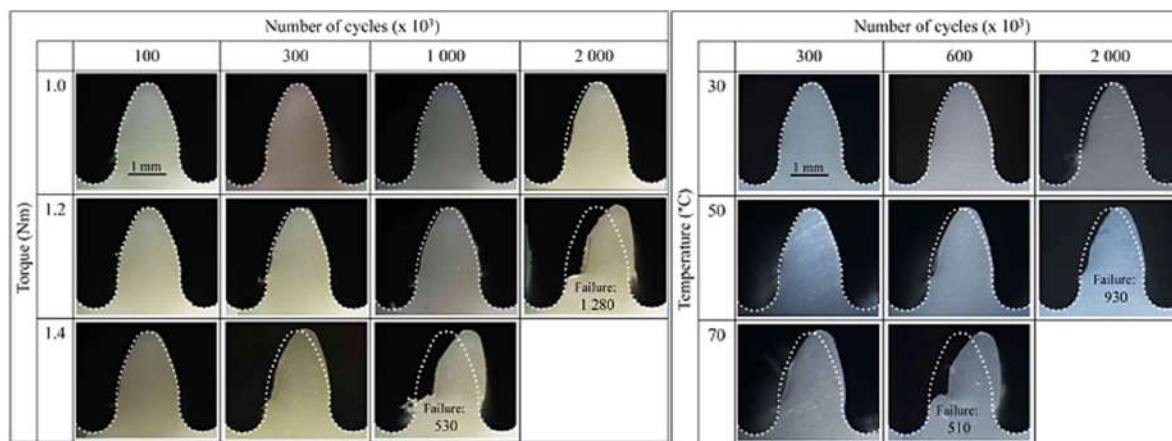
Slika 3.26. Nastajanje i širenje mikro šupljine u amorfnoj fazi (a) s manjom i (b) većom orijentiranosti [43]

Veća orijentiranost amorfne faze olakšava nastajanje i širenje mikro šupljina koje nastaju otkidanjem mikro vlakana što dovodi do bržeg odvajanja čestica materijala i bržeg trošenja (Slika 3.26.). Trošenje se može podijeliti u dvije faze: prva faza s izraženim abrazivnim

trošenjem i druga faza u kojoj zbog smanjenja presjeka uslijed abrazivnog trošenja dolazi i do puzanja materijala uslijed kombinacije vlačnih, tlačnih i smičnih naprezanja što vodi do konačnog pucanja vlakna.

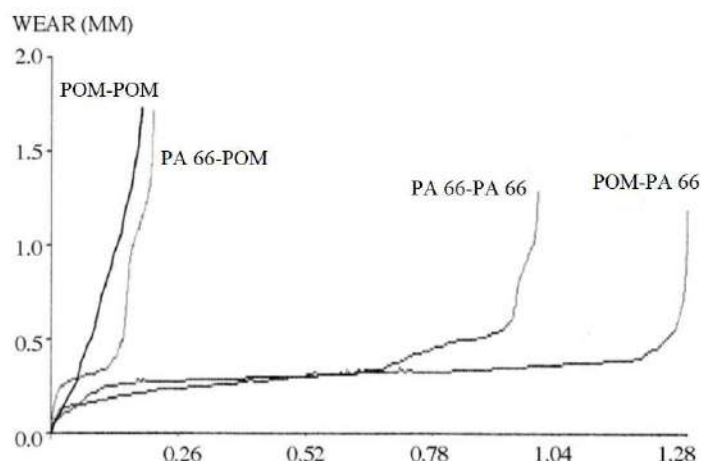
Marcellan i dr. [44] također su istražili utjecaj mirko mehanizama trošenja polimernog materijala, ali poliamida PA 46 koji je dobiven injekcijskim prešanjem. Eksperimentalno ispitivanje trošenja provedeno je između polukugle od safira koja kliže po polimernoj podlozi za različita preklapanja. Smjer klizanja je okomit na smjer kojim je izvršeno injekcijsko prešanje. Preklapanje je omjer amplitude pomaka u odnosu na promjer zajedničke dodirne površine. Za preklapanja do 20% primijećeno je nastajanje krhotina u obliku mikro vlakana, promjera 10 – 30 μm , na polimernoj podlozi koja su pravilno raspoređena i orijentirana okomito na smjer klizanja. Nastale krhotine u obliku mikro vlakana imaju ulogu krutog maziva koje sprječava direktan kontakt između dvije podloge te sprječava brzo razvijanje topline na površini i usporava trošenje PA 46 uzorka. Kod većih preklapanja, iznad 20%, primijećeno je da nema “trećeg tijela“ koje se stvara između površina u kontaktu već su sve krhotine izbačene iz kontakta, a izgledaju poput pahuljica. DSC (engl. Differential Scanning Calorimetry) i SEC (engl. Size Exclusion Chromatography) analizom uočeno je da je došlo do promjene u strukturi i smanjenja molekulne mase uslijed kidanja makromolekulnih lanaca, zbog porasta naprezanja, između početnog PA 46 uzorka i uzoraka čestica koje su se odvojile od osnovnog materijala. Kalin i Kupec [45] proveli su ispitivanje na POM zupčanicima dobivenim injekcijskim prešanjem uparenim s metalnim zupčanicom od čelika 40CrMnMoS8-6 kako bi istražili utjecaj okolne temperature na vijek trajanja i trošenje polimernih zupčanika. Eksperimentalno ispitivanje je provedeno pri brzini vrtnje $n = 1500$ o/min i opterećenjima $T = 1, 1,2$ i $1,4$ Nm. Zupčanci su ispitivani u dva različita uvjeta: na sobnoj temperaturi okolnog zraka $T_{\text{amb}} = 24 \pm 2$ °C, te u kontroliranim uvjetima gdje se regulira temperatura komore u kojoj se nalaze zupčanci na način da se temperatura u korijenu zuba održava konstantnom $T_{\text{bulk}} = 30$ °C, 50 °C i 70 °C. Ispitivanje je provedeno u trajanju do 2 milijuna ciklusa ili do otkaza zupčanika, što god se dogodi prije, a temperature su mjerene pomoću infracrvene termalne kamere. Slika 3.27. (a) prikazuje trošenje i oštećenja POM zupčanika pri različitim opterećenjima i nekontroliranim uvjetima, odnosno pri sobnoj temperaturi. Pri nižim opterećenjima polimerni zupčanik je preživio 2 milijuna ciklusa uz blago trošenje boka zuba dok se povećanjem opterećenja povećava i trošenje, dolazi do smanjenja debljine zuba što uzrokuje savijanje zuba i nepravilan zahvat zubi te vodi prema plastičnoj deformaciji zuba i konačno otkazivanju zupčanika. Sve navedene promjene zuba uzrokovane su povećanjem temperature zupčanika. Na Slici 3.27. (b)

prikazano je stanje zuba POM zupčanika u kontroliranim uvjetima i pri opterećenju $T = 1,4$ Nm. Kada je temperatura korijena zuba održavana na $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ uočeno je manje trošenje, ali je zupčanik preživio čitavo ispitivanje, odnosno 2 milijuna ciklusa. Pri temperaturi od $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do otkaza zupčanika je došlo nakon 930 000 ciklusa dok je pri temperaturi u korijenu zuba zupčanika od $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ zupčanik preživio 510 000 ciklusa.



Slika 3.27. Trošenje i oštećenja zuba POM zupčanika (a) pri sobnoj temperaturi za različita opterećenja i (b) u kontroliranim uvjetima pri opterećenju $T = 1,4$ Nm [45]

Uočeno je da kod zupčanika ispitivanih u nekontroliranim uvjetima nije došlo do stabilizacije temperature već je ona neprestano rasla što znači da se akumulirana toplina nije mogla odvesti prirodnim putem pa su se zupčanici zagrijavali i ubrzano trošili, dok se kontroliranjem temperature zupčanika smanjilo zagrijavanje i produžio njihov radni vijek. Također, u radu je na temelju izmjerenog ulaznog i izlaznog momenta izračunata učinkovitost zupčanog para pri različitim uvjetima ispitivanja. Učinkovitost iznosi od 90% do 97%, a opada povećanjem opterećenja i porastom temperature zupčanika. Mao i dr. [46] proširili su istraživanja provedena u radovima [33, 34, 42] ispitivanjem trošenja POM i PA 66 zupčanika dobivenih injekcijskih prešanjem. Slika 3.28. prikazuje usporedbu trošenja i vijeka trajanja za različite načine uparivanja polimernih POM i PA 66 zupčanika. Kombinacije POM – POM i PA 66 – PA 66 su obrađene u ranije spomenutom radu [42], dok su kombinacije uparivanja POM – PA 66 i PA 66 – POM prvi put istražene. Uočena je velika razlika u trošenju kada je pogonski PA 66 a gonjeni POM zupčanik u odnosu na obrnuti slučaj. Kada je pogonski zupčanik PA 66, došlo je do otkaza gonjenog POM zupčanika uslijed povećanog zagrijavanja, slično kao kod kombinacije POM – POM [34]. Međutim, kada je pogonski POM zupčanik, a gonjeni PA 66, vidljive su značajna smanjenje trošenja zupčanika u usporedbi sa svim drugim istraženim kombinacijama.

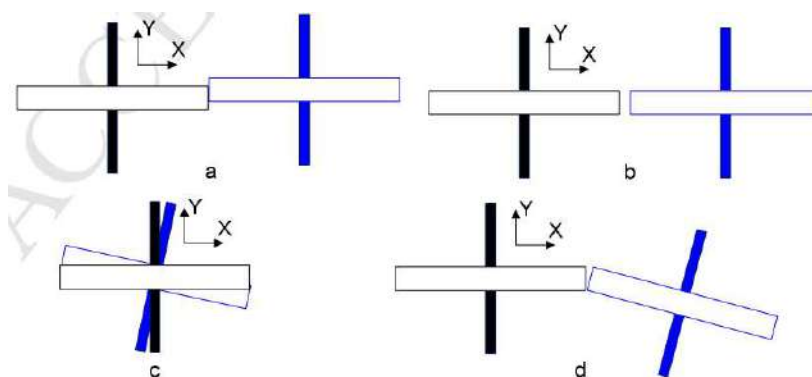


Slika 3.28. Radni vijek i trošenje POM i PA 66 polimernih zupčanika (ciklusi $\cdot 10^6$) [46]

U radu je prikazan i model za proračun temperature tijela zupčanika T_{bulk} , koji proizlazi iz (3.5), a prilagođen je PA 66 zupčanicima i kombinaciji POM – PA 66 te vrijedi

$$T_{\text{bulk}} = \frac{3,927 \mu T}{c \rho Z b (r_a^2 - r^2)} \quad (3.6)$$

Hu i Mao [47] proveli su istraživanje utjecaja geometrijskih odstupanja, tolerancija položaja, na trošenje polimernih POM zupčanika proizvedenih odvalnim glodanjem pri brzini vrtnje $n = 1000$ o/min i opterećenju $T = 7,2$ Nm. Polimerni zupčanici su ispitivani u 4 različita načina odstupanja od položaja: aksijalno, radijalno i odstupanja od paralelnosti osi u dvije okomite ravnine (Slika 3.29.).


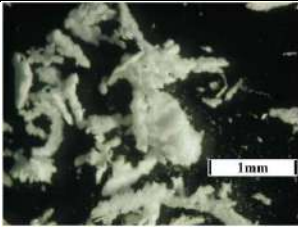
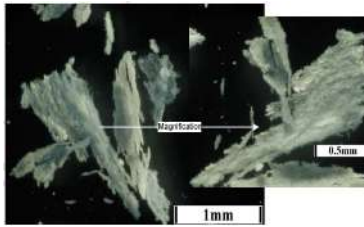
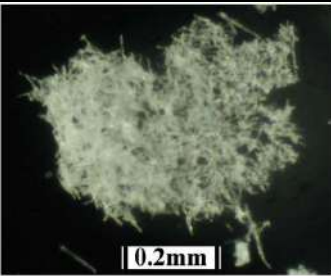
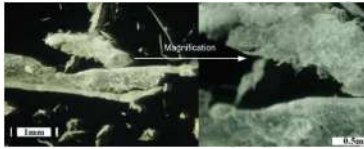
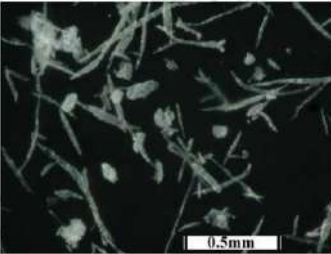

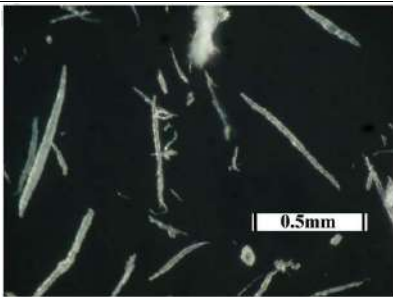


Slika 3.29. Odstupanja od položaja polimernih zupčanika: (a) aksijalno, (b) radijalno te (c) i (d) paralelnost osi [47]

Odstupanja položaja kod zupčanika uzrokuju nepravilnost zahvata što vodi ka trošenju i nastajanju oštećenja. Kod ispitivanih POM zupčanika uočene su tri faze trošenja: inicijalno uhodavanje, prijelazna faza i faza stabilnog kontinuiranog trošenja do otkaza. Korištenjem SEM

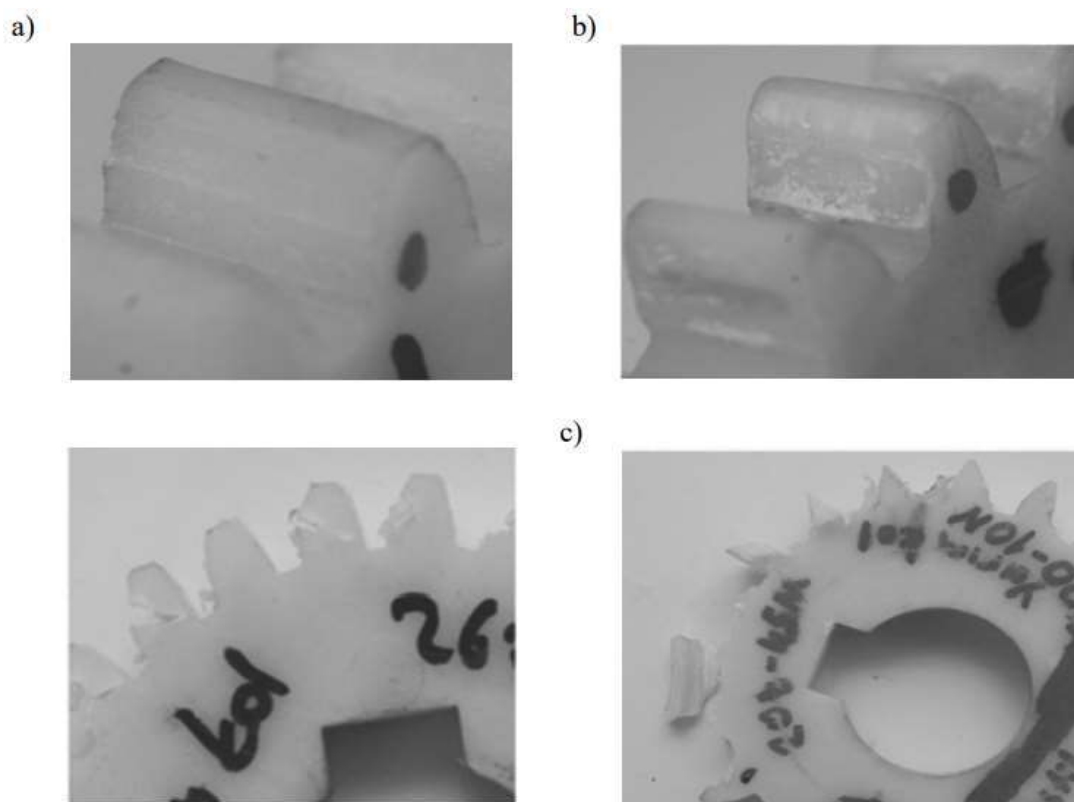
uređaja uočeni su različiti tipovi trošenja zupčanika kao i različiti oblici čestica odvojenih s površine bokova zubi zupčanika. U Tablici 3.1. prikazani su oblici odvojene čestice, krhotine, za različite vrste odstupanja polimernih zupčanika.

Tablica 3.1. Oblik odvojenih čestica za različita odstupanja od položaja POM zupčanika [47]

Odstupanje	Oblik odvojene čestice	
Bez odstupanja		
Aksijalno		
Radijalno		
Paralelnost – slučaj 1		
Paralelnost – slučaj 2		

Kada je zupčani par uparen tako da nema odstupanja od položaja izvan dopuštenih tolerancija, uočena su dva oblika odvojene čestice, jedan praškasti i drugi u obliku zrnaca ili granula koji se javio samo u prijelaznoj fazi trošenja. Kod aksijalnog odstupanja uočene su kraće trakice koje imaju oblik drvene strugotine te sitnije čestice koje imaju oblik pahuljice. Kod radijalnog odstupanja odvojena čestica ima oblik duguljaste trakice, ali se u fazi stabilnog trošenja pojavila i odvojena čestica igličastog oblika. U prvom slučaju odstupanja od paralelnosti uočena je odvojena čestica pahuljastog oblika, ali veća u odnosu na odvojenu česticu istog oblika koja se javlja kod aksijalnih odstupanja. Drugi slučaj odstupanja od paralelnosti karakterizira odvojena vretenasta igličasta odvojena čestica. Sve vrste odstupanja uzrokuju povećano trošenje, ipak odstupanje od paralelnosti osi kod POM zupčanika uzrokuje najveću štetu jer takva odstupanja standardni evolventni bok zuba ne može kompenzirati. Oblik odvojene čestice može pomoći detektirati greške u zahvatu nastale u zbog nepravilne izrade ili montaže zupčanika. Ghazali i dr. [48] i Zorko i dr. [49] uzeli su u razmatranje mogućnost primjene drugih polimernih materijala, konkretno biopolimera, kao elemenata prijenosnika snage. Upotrebom biopolimera umjesto sintetskih polimera, čija je proizvodnja bazirana na nafti, ugljenu i prirodnom plinu, potiče se održiva i ekološki prihvatljiva proizvodnja u svrhu zaštite i očuvanja okoliša. Zupčanicu su proizvedeni injekcijskim prešanjem [48] i odvalnim glodanjem [49], a ispitivani su pri različitim opterećenjima i brzinama vrtnje. Uočeni su jednaki tipovi trošenja, oštećenja i otkaza biopolimernih zupčanika kao i kod konvencionalnih polimernih zupčanika. U radu [49] provedeno je ispitivanje radnog vijeka biopolimernog zupčanika od poliamida PA 610, a rezultati su uspoređeni s radnim vijekom POM i PA 66 zupčanika. PA 610 zupčanik ostvario je 3,5 puta veći broj ciklusa u odnosu na POM zupčanik i čak 10 puta u odnosu na PA 66 zupčanik. Pri većim opterećenjima kod PA 610 zupčanika dolazi do povećanog trošenja, a do prestanka rada je došlo uslijed loma u korijenu zuba zupčanika, istog kao kod metalnih zupčanika. Yakut i dr. [50] proveli su istraživanje trošenja i određivanja opteretivosti zupčanika od materijala koji je mješavina 60 % polikarbonata (PC) i 40% ABS-a proizvedenih injekcijskim prešanjem. PC je tvrd materijal postojan na povišenim temperaturama, a ABS je mekši materijal kojeg je lako obrađivati i oblikovati ga. PC/ABS pogonski zupčanicu su upareni s gonjenim metalnim zupčanicom od čelika AISI 8620. Pri nižim opterećenjima $T = 10$ Nm i brzinama vrtnje $n = 750$ o/min uočeno je trošenje boka zuba zupčanika bez značajnih oštećenja površine, što je pogodovano dobrom toplinskom vodljivosti čelika. Povećanje opterećenja i brzine vrtnje uzrokuje povećano zagrijavanje PC/ABS zupčanika te dolazi do taljenja površine boka zuba u blizini kinematskog promjera, loma u korijenu zuba zupčanika ili čak potpunog otkidanja zuba zupčanika (Slika 3.30. (a) – (c)). Do taljenja površine boka zuba dolazi uslijed

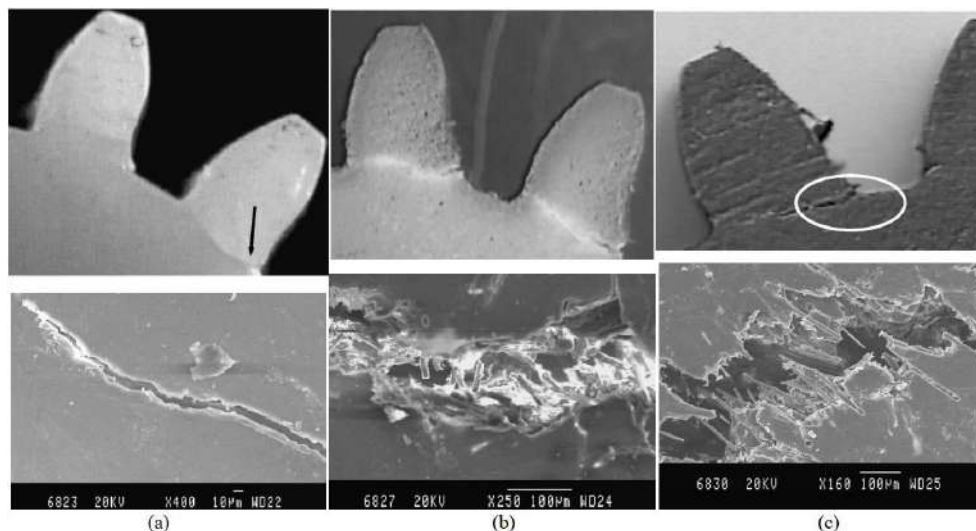
povećanog kontaktnog pritiska te povećane brzine vrtnje zbog čega nema dovoljno vremena da se toplina generirana na zupčaniku preda okolini, a lom u korijenu zuba i otkidanje zuba zupčanika posljedica je krтости PC/ABS polimernog materijala. Proizlazi zaključak da se mješavina polimera PC/ABS može primijeniti kod zupčanika koji se koriste za prijenos manjih opterećenja pri manjim brzinama vrtnje, a duži radni vijek i otpornost trošenju bi se potencijalno mogli ostvariti dodavanjem aditiva ili promjenom udjela PC i ABS polimera u mješavini.



Slika 3.30. Oštećenja PC/ABS zupčanika pri opterećenju $T = 18,5 \text{ Nm}$ i brzinama vrtnje: (a) $n = 750 \text{ o/min}$, (b) $n = 1000 \text{ o/min}$ i (c) $n = 1500 \text{ o/min}$ [50]

Senthilvelan i Gnanamoorthy [51] istražili su trošenje i oštećenja kod PA 66 zupčanika proizvedenih injekcijskim prešanjem te istih s dodatkom 20% staklenih ili 20 % karbonskih vlakana. Dodavanjem vlakana u osnovni polimerni materijal mijenjaju se njegova mehanička i toplinska svojstva pa i tipovi otkaza zupčanika. Eksperimentalna ispitivanja su provedena pri brzini vrtnje $n = 1000 \text{ o/min}$ i opterećenjima $T = 1,5 - 3 \text{ Nm}$ gdje je polimerni zupčanik pogonski, a gonjeni zupčanik je metalni od čelika SS 316. Vrsta oštećenja zupčanika i njegovo trošenje ovise o sastavu materijala i opterećenju kojem je podvrgnut. Kod PA 66 zupčanika koji nisu ojačani vlaknima već pri nižim opterećenjima dolazi do pojave pukotina u području oko kinematske kružnice dok se kod vlaknima ojačanih zupčanika to nije dogodilo. Kod većih

opterećenja dolazi do loma u korijenu zuba zupčanika, kao i kod metalnih, a PA 66-GF 20 i PA 66-CF 20 imaju veću otpornost na lom u korijenu zuba u odnosu na PA 66 zupčanik, pogotovo ako je smjer vlakana okomit na smjer djelovanja sile na bok zuba zupčanika. Slika 3.31. prikazuje razliku u izgledu pukotine uslijed loma u korijenu zuba između PA 66, PA 66-GF 20 i PA 66-CF 20 zupčanika. SEM analizom je kod PA 66 zupčanika uočena glatka putanja širenja pukotine dok je kod PA 66-GF 20 i PA 66-CF 20 zupčanika pukotina gruba, uzrokovano otporom vlakana prema savijanju zuba i širenju pukotine.

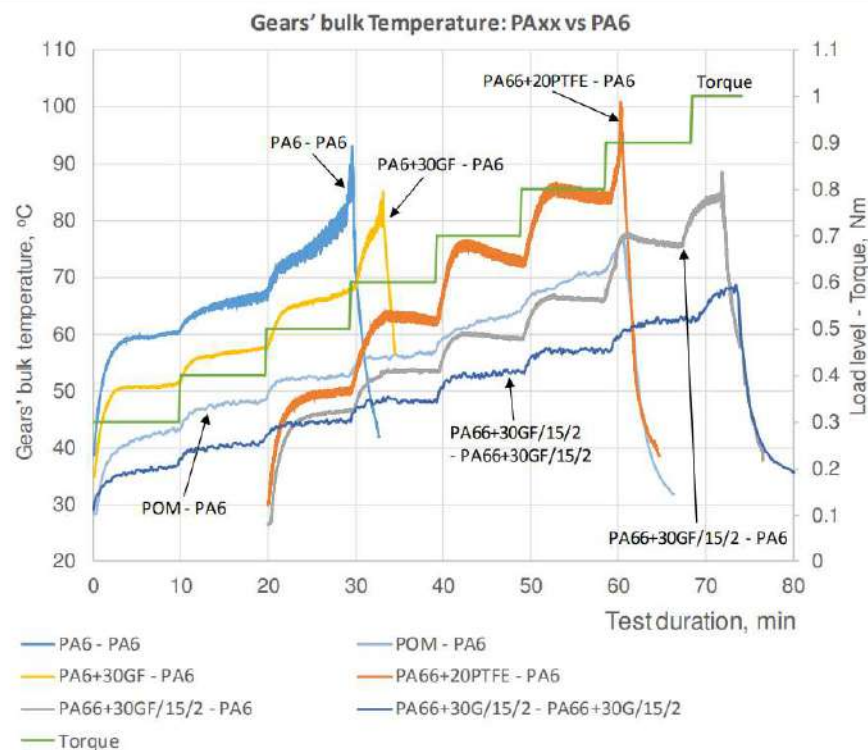


Slika 3.31. Lom u korijenu zuba: (a) PA 66, (b) PA 66-GF 20 i (c) PA 66-CF 20 zupčanika [51]

Zbog slabijih adhezivnih sila između karbonskih vlakana i osnovnog polimernog materijala dolazi do pojave mikropukotina na boku zuba, što nije slučaj kod staklenih vlakana. Temperatura izmjerena na površini zupčanika veća je kod PA 66 zupčanika nego kod vlaknima ojačanih zupčanika pri svim opterećenjima kojima su zupčanici bili podvrgnuti. Temperatura na površini zupčanika PA 66-CF 20 je niža u odnosu na PA 66-GF 20 što se pripisuje većoj krutosti, nižem koeficijentu trenja i boljoj toplinskoj vodljivosti PA 66-CF 20. Nedostatak vlaknima ojačanih zupčanika je otpornost boka zuba na trošenje. Pružanje vlakana kod injekcijskog prešanja je uglavnom okomit na smjer djelovanja sile, ali je paralelan sa smjerom klizanja bokova zuba. Dodavanjem vlakana polimernom materijalu smanjuje se njegova duktilnost, a krta vlakna usmjerena paralelno sa smjerom klizanja jednostavno se odvajaju od osnovnog materijala i ostaju zarobljena između bokova zuba te uzrokuju povećano trošenje. Vlaknima ojačani zupčanici ostvaruju dulji radni vijek zbog boljih mehaničkih i toplinskih svojstava.

3.5. Dodavanje vlakana i podmazivanje polimernih zupčanika

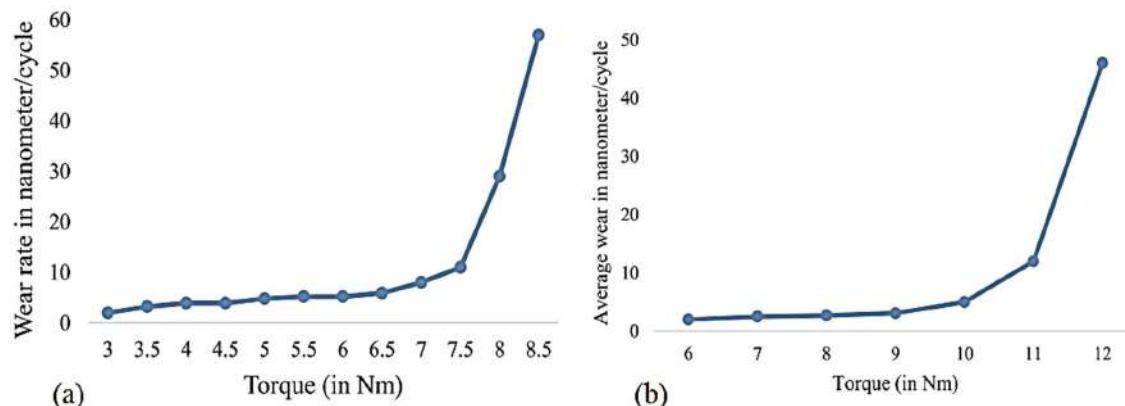
Karthi i Marimuthu [52] proveli su ispitivanje mehaničkih svojstava staklenim vlaknima ojačanog poliamida PA 6-GF 30 te su rezultate usporedili sa svojstvima PA 6-GF 20 te svojstvima neojačanog PA 6. Ispitivanja tlačne, vlačne i savojne čvrstoće kao i udarne žilavosti provedena su prema ASTM standardima. Ispitni uzorci, epruvete, su proizvedene injekcijskim prešanjem, a SEM analizom je utvrđeno da su staklena vlakna ravnomjerno raspoređena uzduž presjeka. Dodavanjem staklenih vlakana osnovnom materijalu polimera PA 6 povećava se tlačna čvrstoća materijala, ali se smanjuje vlačna čvrstoća jer krta staklena vlakna smanjuju duktilnost poliamida. Zub zupčanika je u radu opterećen na savijanje, a svaki ulazak zuba u zahvat izaziva kratkotrajni udar pa su savojna čvrstoća i udarna žilavost zanimljivije karakteristike u odnosu na vlačnu i tlačnu čvrstoću. Eksperimentalnim ispitivanjem je potvrđena veća savojna čvrstoća PA 6-GF 30 polimera u odnosu na PA 6-GF 20 te gotovo 5 puta veća udarna žilavost. Tavčar i dr. [53] predstavili su unaprijeđeni postupak ubrzanog ispitivanja zupčanika sa stupnjevitom promjenom opterećenja kojim se skraćuje vrijeme ispitivanja radnog vijeka zupčanika, a samim time se smanjuju i troškovi ispitivanja. Stupnjevito opterećenje, moment T , se povećava s korakom od 0,1 Nm svakih 10 minuta i raste dok ne dođe do otkaza zupčanika.



Slika 3.32. Temperatura tijela raznih zupčanika uparenih s PA 6 zupčanikom [53]

Eksperimentalno ispitivanje je provedeno na zupčanicima od polimera POM, PA 6 i PA 66, s i bez dodataka i vlakana i drugih aditiva, a koriste se i različite kombinacije zupčanika, sa stajališta pogonske i gonjene strane. Kao što je već poznato, zagrijavanje polimernih zupčanika glavni je razlog njihovog trošenja, pa je za vrijeme ispitivanja mjerena temperatura tijela zupčanika. Slika 3.32. prikazuje promjenu temperature tijela zupčanika s porastom opterećenja za različite vrste polimernih pogonskih zupčanika uparenih s PA 6 zupčanicom. Zagrijavanje PA 6 – PA 6 kombinacije zupčanika je najveće zbog visokog koeficijenta trenja između dodirnih površina dok se dodavanjem staklenih vlakana u osnovni polimerni materijal, PA 6 ili PA 66, smanjuje zagrijavanje zupčanika zbog veće toplinske vodljivosti stakla te manjih deformacija zuba. Uz dodatak staklenih vlakana, dodavanjem 20% do 30% PTFE polimera i do 2% silikona (SI) smanjuje se i trenje pa je, očekivano, i zagrijavanje najmanje. Međutim, kada se PTFE doda osnovnom POM polimeru, zagrijavanje se ne smanjuje u tolikoj mjeri kao što je to slučaj kod PA 6. Sa stajališta zagrijavanja, najpovoljniji je slučaj kada su međusobno upareni PA 66-GF 30 zupčanicima s 15% PTFE i 2% SI. Staklom ojačani PA 6, PA 66 i POM bez aditiva koji djeluju kao lubrikanti, poput PTFE, imaju veću opteretivost u odnosu na neojačane polimere, ali im se značajno povećava trošenje, uzrokovano većom tvrdoćom i krutosti dodanih vlakana. Proizlazi zaključak da je kod velikih opterećenja opravdano odabrati staklenim vlaknima ojačane zupčanike, ali kada je zahtjev dug radni vijek, preko 10^7 ciklusa, rješenje su ipak neojačani zupčanicima. Mao i dr. [54] proveli su eksperimentalno ispitivanje trošenja POM zupčanika ojačanog s 28% težinskog udjela staklenih vlakana, POM-GF 28, te su rezultate usporedili s trošenjem neojačanog POM zupčanika. Kratka staklena vlakna su duljine između 200 μm i 500 μm i promjera od 5 μm do 10 μm , a orijentacija im nije usmjerena što je karakteristično za injekcijsko prešanje [51]. Zupčanicima su proizvedeni injekcijskim prešanjem, ali s dovodima taline po obodu kalupa, a ispitivanje je provedeno pri brzini vrtnje $n = 2000$ o/min dok se opterećenje T mijenja stupnjevito kao i u radu [53]. Opterećenje se mijenja svakih 20 000 ciklusa, a korak opterećenja je 0,5 Nm za POM zupčanike, odnosno 1 Nm za POM-GF 28 zupčanike. Početno opterećenje iznosi $T = 3$ Nm za POM zupčanike dok za POM-GF 28 zupčanike iznosi $T = 6$ Nm. Slika 3.33. prikazuje stopu trošenja boka zuba POM i POM-GF 28 zupčanika po ciklusu za različita opterećenja. Može se uočiti da je kod POM zupčanika pri opterećenju $T = 7,5$ Nm uslijedilo višestruko veće trošenje, dok je kod POM-GF 28 zupčanika isto uslijedilo pri opterećenju $T = 11$ Nm, što znači da POM-GF 28 zupčanik ima gotovo 50% veću opteretivost. Kritično opterećenje nastupa kada temperatura zupčanika dosegne točku taljenja materijala. Ako se promatra stopa trošenja do kritičnih opterećenja, ona je jako slična kod POM i POM-GF 28 zupčanika, što znači da pri opterećenjima nižim od kritičnih dodavanje

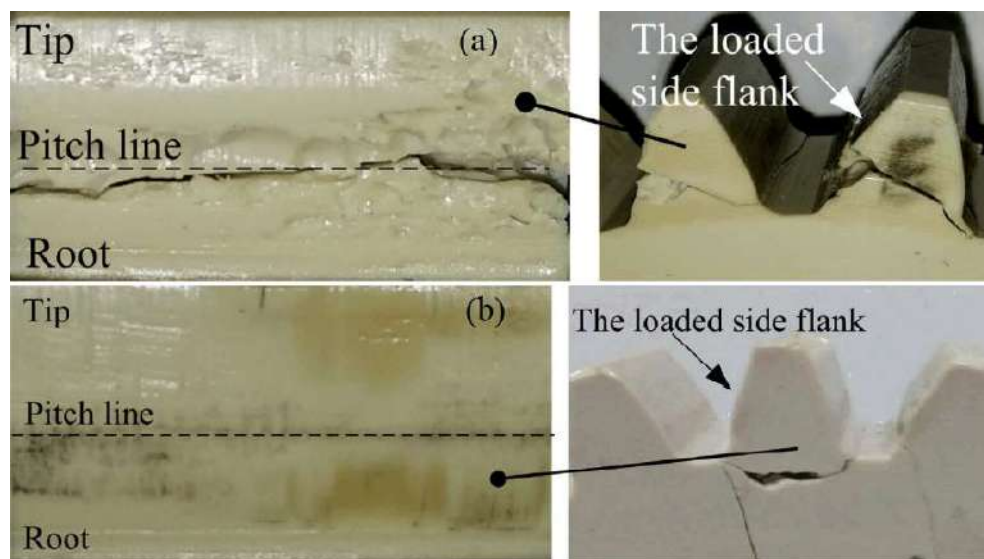
staklenih vlakana osnovnom materijalu nema utjecaja na trošenje. Također, nakon ispitivanja POM-GF 28 zupčanika, izmjerena je duljina staklenih vlakana i stupanj kristalnosti polimera. Duljina staklenih vlakana ispitivanih zupčanika određena je SEM analizom i iznosi od 30 μm do 100 μm . To ukazuje da je uslijed povećanog opterećenja došlo do kidanja vlakana, a na mjestima u blizini pokidanih vlakna su uočene i šupljine. Isto tako je uočeno da kod POM-GF 28 zupčanika nije došlo do značajnije promjene u stupnju kristalnosti, dok se kod POM zupčanika isti smanjio do čak 20%, najvjerojatnije uslijed velikog lokalnog zagrijavanja.



Slika 3.33. Stopa trošenja boka zuba zupčanika: (a) POM i (b) POM-GF 28 [54]

Lu i dr. [55] istražili su utjecaj podmazivanja na opteretivost i tipove otkaza PEEK zupčanika uparenog s pogonskim metalnim zupčanikom od čelika C45. U eksperimentalnom ispitivanju je korišten FZG – C test, a podmazivanje se vrši cirkulacijski, prskanjem ulja u zahvat. Za podmazivanje je korišteno sintetičko ulje oznake MOBILGEAR SHC 627, pogodno za velike kontaktne tlakove, a protok ulja iznosi 1 l/min. Rezultati istraživanja pokazuju da tipovi otkaza PEEK zupčanika ovise o opterećenju i podmazivanju, a zupčanici su ispitivani pri opterećenju $T = 5 - 50 \text{ Nm}$ i brzini vrtnje $n = 1000 \text{ o/min}$. Kod rada PEEK zupčanika bez podmazivanja pri srednjem opterećenju $T = 15 \text{ Nm}$ dolazi do pojave pukotina na boku zuba zupčanika u području između kinematske kružnice i korijena zuba, a zatim i taljenja zuba zupčanika uslijed pretjeranog zagrijavanja nakon otprilike 50 000 ciklusa. Pri istom opterećenju te nakon jednakog broja ciklusa kod podmazivanih zupčanika uočena je pojava pittinga na boku zuba zupčanika u području oko kinematske kružnice. Nakon otprilike milijun ciklusa, pri niskim i srednjim opterećenjima $T = 5 - 20 \text{ Nm}$, dolazi do progresivnog pittinga gdje se pojavljuju pukotine dubine čak 1 do 2 mm. Pukotina se širi prema korijenu neopterećenog boka zuba zupčanika i dolazi do loma boka zuba zupčanika. Kod velikih opterećenja, $T = 30 - 50 \text{ Nm}$, nije uočena pojava pittinga već dolazi do naglog loma u korijenu zuba, karakterističnog za

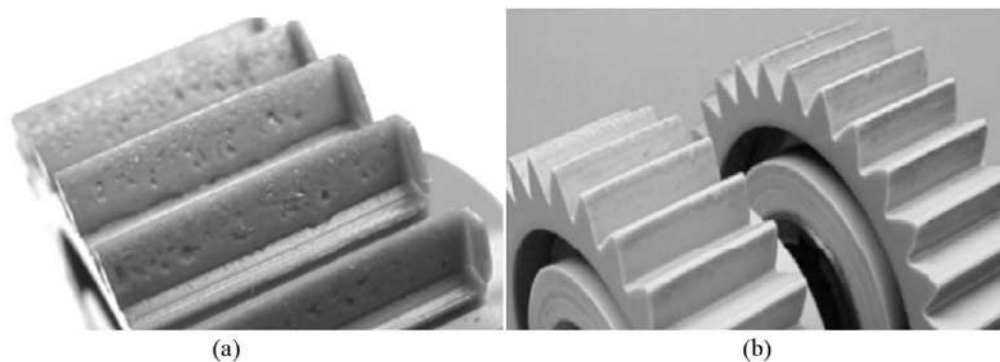
metalne zupčanike. Slika 3.34. prikazuje tipove otkaza PEEK zupčanika pri malim i srednjim te pri velikim opterećenjima.



Slika 3.34. Tipovi otkaza PEEK zupčanika pri opterećenju (a) $T = 20 \text{ Nm}$ i (b) $T = 50 \text{ Nm}$
[55]

Dearn i dr. [56] su proveli analitičko i eksperimentalno istraživanje utjecaja geometrije podmazivanih zupčanika na učinkovitost i trošenje PEEK zupčanika. PEEK zupčanici su upareni međusobno, ali i s metalnim zupčanikom, a ispitivanje je provedeno pri opterećenjima do $T = 27 \text{ Nm}$ i brzini vrtnje do $n = 3000 \text{ o/min}$. Zupčanici su podmazivani uranjanjem, a korišteno je sintetičko ulje oznake SAE 15W50. Ispitivani su PEEK zupčanici s različitim zahvatnim kutevima, $\alpha_w = 20^\circ$ i $\alpha_w = 30^\circ$. Stupanj korisnog djelovanja odnosno učinkovitost zupčanog para međusobno uparenih PEEK zupčanika nije se značajno promijenila bez obzira na iznos zahvatnog kuta. Kod PEEK zupčanika uparenih s metalnim zupčanikom učinkovitost je niža te se također ne mijenja značajno s promjenom zahvatnog kuta α_w . Eksperimentalno je dokazano, a analitički potvrđeno, da se povećanjem brzine vrtnje povećava učinkovitost zupčanog para dok porastom opterećenja ona opada. Razlog je debljina uljnog filma kojom se određuje je li riječ o suhom, mješovitom ili hidrodinamičkom podmazivanju, a koja raste povećanjem brzine vrtnje te opada porastom opterećenja. Uljni film sprječava direktan kontakt površina boka zuba čime se smanjuje trenje i zagrijavanje zupčanika. Na Slici 3.35. je prikazano stanje površine boka zuba podmazivanog PEEK zupčanika s različitim zahvatnim kutevima te pri različitim opterećenjima nakon 20 milijuna ciklusa rada. Zupčanici sa zahvatnim kutem $\alpha_w = 30^\circ$ se u pravilu ne koriste jer se povećanjem zahvatnog kuta smanjuje duljina zahvatne linije

te su zbog toga jako bučni. Međutim, kod polimernih zupčanika buka ne predstavlja problem jer imaju izvrsna prigušna svojstva pa je kod njih primjena većeg zahvatnog kuta opravdana.



Slika 3.35. Stanje površine boka zuba PEEK zupčanika pri opterećenju (a) $T = 17 \text{ Nm}$ i $\alpha_w = 20^\circ$ te (b) $T = 17 \text{ Nm}$ (lijevo) i $T = 22 \text{ Nm}$ (desno) i $\alpha_w = 30^\circ$ [56]

Jia i dr. [57] eksperimentalno su dokazali da se dodavanjem karbonskih vlakana te 5% dodataka, PTFE, grafita i MoS_2 , poliidmidu (PI) smanjuje koeficijent trenja i stopa trošenja, kada je PI blok uparen s metalnim prstenom od čelika oznake 1Cr18Ni9Ti pri sili utiskivanja od 200 N. Kada se tribološki par podmazuje vodom trenje i trošenje se dodatno smanjuje u odnosu na ispitivanje bez podmazivanja. Podmazivanje vodom pogoduje smanjenju trošenja polimera PI jer polarni imidni radikali upijaju vodu na sebe što vodi ka bubrenju materijala. Bubrenjem se smanjuje smična čvrstoća PI te polimer postaje razmaziv što smanjuje koeficijent trenja između dodirnih površina. Među svim navedenim dodacima PI-CF 15 polimeru, sa stajališta trošenja, PTFE se pokazao kao najbolji aditiv osnovnom materijalu. Proizlazi zaključak da je PI-CF 15 uz dodatak 5% PTFE izvrstan izbor kod uparivanja s čelikom u uvjetima podmazivanja vodom. Baena i dr. [58] istražili su otpornost POM i PA 66 polimera prema različitim kemikalijama te utjecaj na mehanička svojstva i strukturu istih zbog kontakta s kemikalijama. POM i PA 66, ali i još neki poput polietilena visoke gustoće (PE-HD), polimeri su od kojih se često izrađuju dijelovi pumpi ili tankovi kod raznih strojeva i u neposrednom su kontaktu s gorivom ili uljem. U ispitivanju polimerni uzorci u obliku kvadra uronjeni su u biodizel (B100) i mješavine biodizela s oleinskom, palmitinskom, octenom, miristinском i stearinskom kiselinom na 14 do 19 tjedana u kontroliranim uvjetima pri temperaturi od 55°C te im se nakon toga mjeri masa, stupanj kristalnosti te mehanička svojstva. Istraživanjem nije uočeno promjena u masi POM uzorka bez obzira na vrstu kemikalije u kojoj je uzorak bio uronjen, kao ni značajna promjena u stupnju kristalnosti. Međutim, došlo je do porasta tvrdoće i čvrstoće, a time i porasta krutosti ispitivanog POM uzorka uslijed apsorpcije kemikalija. Na PA 66 uzorku uočeno je smanjenje mase od 2%,

ali mnogo značajnije, stupanj kristalnosti porastao je s 15% na 35% kada je uronjen u mješavine biodizela s kiselinama što je utjecalo na povećanje tvrdoće uzorka. Pretpostavka je da je do promjene stupnja kristalnosti došlo zbog nastajanja novih sekundarnih vodikovih veza u prisutnosti polarne amidne skupine koja se nalazi u biodizelu. Stvaranjem novih vodikovih veza smanjuje se fleksibilnost lanaca čime se povećava krutost polimera. Promjena stupnja kristalnosti utjecala je i na povećanje temperature tališta T_t PA 66 uzorka. Preporuke za korištenje polimera koji su u kontaktu s uljem, gorivima, kiselinama ili pak vodom mogu se pronaći i u smjernicama VDI 2736-1 [17].

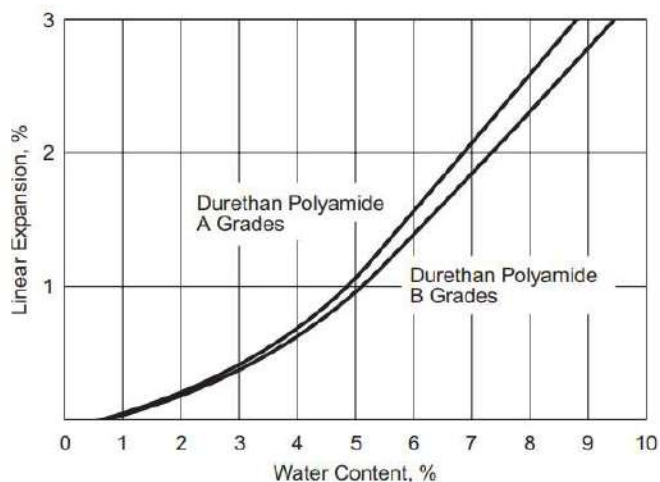
3.6. Apsorpcija vlage i razina buke

Domitran [59] je u svom radu istražio utjecaj upijanja vlage i brzine vrtnje na opteretivost PA 6 zupčanika. Apsorpcijom vlage dolazi do bubrenja materijala odnosno promjena dimenzija i mase kod PA 6 polimera. Ispitivanje je provedeno na međusobno uparenim PA 6 zupčanicima pri opterećenjima $T = 20 - 30$ Nm i brzinama vrtnje $n = 1000 - 2100$ o/min. Zasićenost ispitivanih zupčanika je minimalna 0%, 50% te potpuna zasićenost materijala od 100%. Potvrđeno je da se povećanjem zasićenosti materijala smanjuje opteretivost PA 6 zupčanika. Kod PA 6 zupčanika koji su potpuno zasićeni vlagom u materijalu pri opterećenjima $T = 20 - 23$ Nm i brzini vrtnje $n = 1000$ o/min izmjerena je temperatura na boku zuba u iznosu 126 °C pri kojoj je došlo do zaribavanja zupčanika uslijed taljenja materijala (Slika 3.36.). Iako su zupčanici zadovoljili radni vijek od 3 milijuna ciklusa uočena su značajna oštećenja na boku zuba zbog taljenja materijala kojem je prethodilo povećano trošenje.



Slika 3.36. Stanje površine boka zuba pogonskog i gonjenog PA 6 zupčanika nakon izvršenih 3 milijuna ciklusa ispitivanja [59]

Povećanjem brzine vrtnje zupčanika smanjuje se njegova opteretivost pa tako pri brzini vrtnje $n = 1500$ o/min opteretivost iznosi $T = 17$ Nm, a pri brzini vrtnje $n = 2100$ o/min najveća opteretivost je $T = 12$ Nm. Povećanje udjela vlage u PA 6 zupčanicima pozitivno je utjecalo na smanjenje buke u radu zupčanika. Istraživanjima [60, 61] provedeno je ispitivanje na Durethanu A i B, komercijalnom nazivu proizvođača LANXESS za PA 66 i PA 6. Eksperimentalnim ispitivanjima na ispitivanim uzorcima veličine 120 x 10 x 4 mm istražena je promjena dimenzija uzorka zbog upijanja vlage.

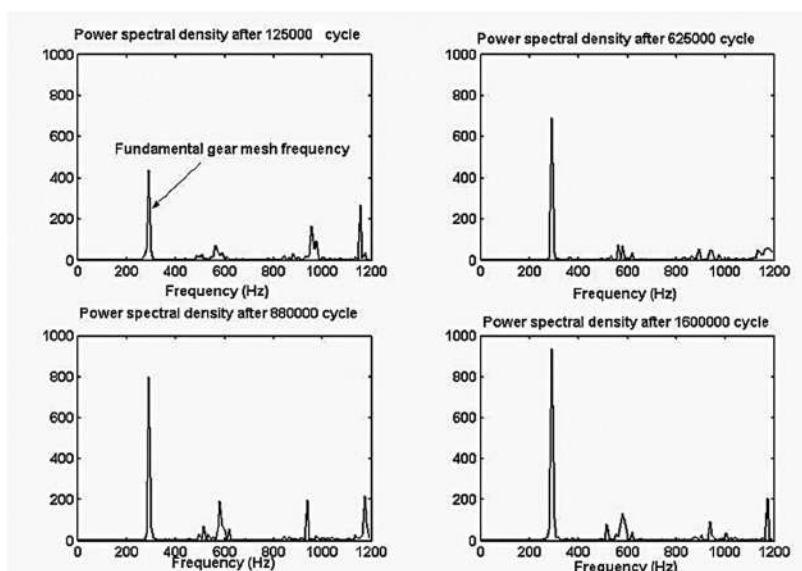


Slika 3.37. Linearno širenje polimera PA 66 i PA 6 s promjenom udjela vlage u materijalu pri temperaturi 23 °C [60]

Slika 3.37. prikazuje promjenu dimenzija PA 66 i PA 6 polimera s promjenom udjela vlage u osnovnom materijalu. Da bi se poništio utjecaj promjene dimenzija zbog upijanja vlage iz okoline na poliamidima se izvodi kondicioniranje. Kondicioniranje može biti pasivno, na način da poliamid apsorbira vlagu iz okoline, ili aktivno ako se primjenjuju tehnike kojima se prisilno unosi voda u osnovni materijal. Uranjanje u toplu ili hladnu vodu i izlaganje vodenoj pari poliamida najčešći su načini aktivnog kondicioniranja. Kondicioniranje izratka se vrši prije nego se pusti u rad do iznosa zasićenosti poliamida koji odgovara eksploatacijskim uvjetima u kojima će se PA 66 ili PA 6 izradak koristiti. Broj sati potreban za kondicioniranje PA 66 i PA 6 izratka ovisi o vrsti medija u kojem se nalazi i njegovoj temperaturi, debljini izratka te o stupnju kristalnosti poliamida.

Senthilvelan i Gnanamoorthy [62, 63] proveli su istraživanje utjecaja trošenja boka zuba na promjene u vibracijama kod ispitivanih injekcijski prešanih PA 6 zupčanika uparenih sa zupčanicom od čelika. Ispitivanje je provedeno pri brzini vrtnje $n = 1000$ o/min i opterećenjima

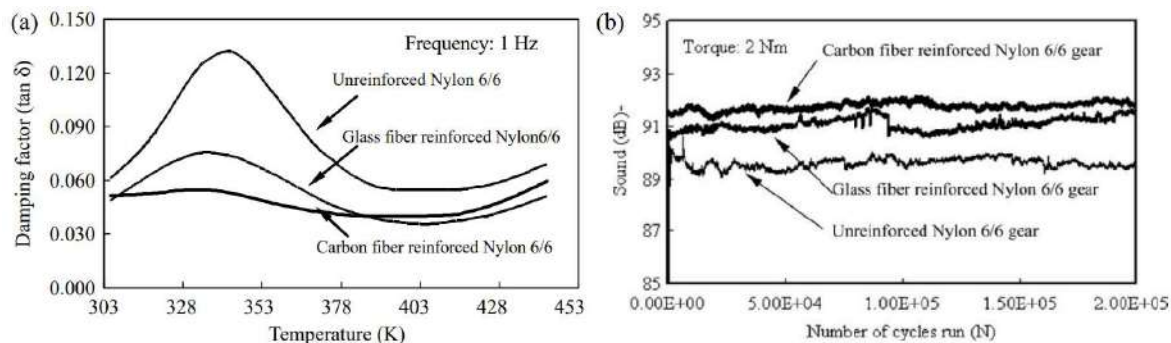
$T = 0,8 - 3 \text{ Nm}$, a zupčanici nisu podmazivani. Za mjerenje vibracija za vrijeme eksperimentalnog ispitivanja korišten je piezoelektrični akcelerometar. Uočeno je da uslijed povećanog trošenja površine boka zuba zbog zagrijavanja polimernih zupčanika, što je jedan od najčešćih tipova oštećenja, dolazi do povećanja vibracija i razine buke. To je posebno izraženo pri manjim opterećenjima gdje trošenje boka zuba uzrokuje povećanje zračnosti između para zubi u zahvatu, zbog koje dolazi do nekontinuiranog prijenosa snage te povećanog udarnog opterećenja. Slika 3.38. prikazuje rezultate spektralne analize gustoće šuma iz koje se može uočiti povećanje amplitude vibracija s promjenom broja ciklusa opterećenja zupčanika.



Slika 3.38. Spektralna analiza gustoće šuma PA 6 zupčanika [62]

Također, istražili su prigušna svojstva i utjecaj dodavanja staklenih i karbonskih vlakana injekcijski prešanim PA 66 zupčanicima. U radu su eksperimentalno ispitani PA 66, PA 66-GF 20 i PA 66-CF 20 zupčanik upareni s metalnim zupčanikom od čelika SS 316 pri opterećenjima $T = 1,5$ i 2 Nm i brzini vrtnje $n = 1000 \text{ o/min}$ u trajanju od 5 milijuna ciklusa ili do otkaza, što se prije dogodi. Dinamičko-mehaničkom analizom, prema ISO 6721-5, primijenjenom na polimerne zupčanike uočeno je povećanje modula elastičnosti E i smanjenje faktora prigušenja dodavanjem staklenih i karbonskih vlakana osnovnom materijalu. Faktor prigušenja ovisan je o temperaturi, a najveće vrijednosti ostvaruje u blizini temperature staklastog prijelaza T_g (Slika 3.39. (a)). Dodavanjem staklenih ili karbonskih vlakana PA 66 zupčaniku povećava se krutost, a smanjuje se viskoelastična značajka materijala što znači da će se zub zupčanika pod opterećenjem manje deformirati i da će imati manji elastični povrat što će pogodovati manjem

zagrijavanju PA 66-GF 20 i PA 66-CF 20 zupčanika, ali će istovremeno slabije prigušivati vibracije zbog čega će njihov rad biti popraćen većom razinom buke.



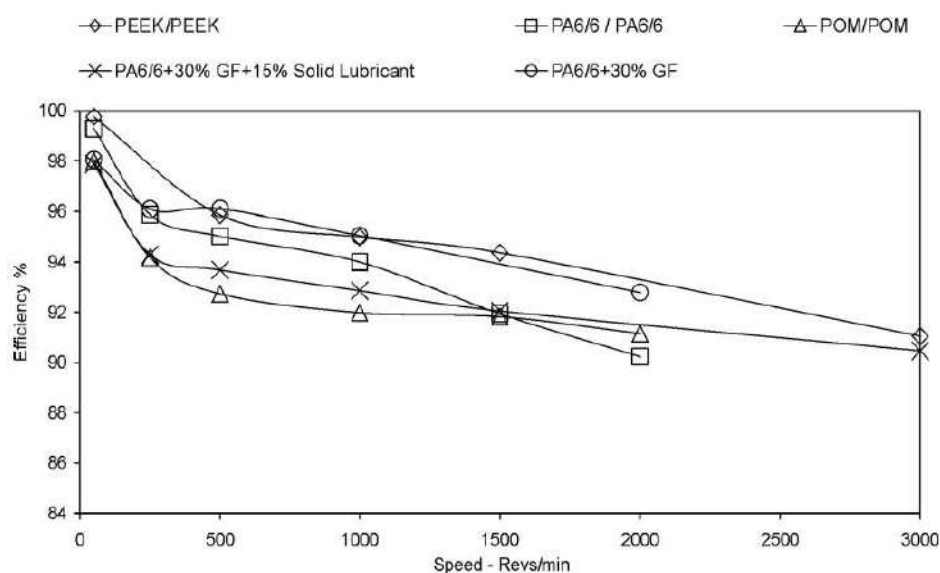
Slika 3.39. (a) Faktor prigušenja u ovisnosti o promjeni temperature i (b) promjena razine buke PA 66, PA 66-GF 20 i PA 66-CF 20 zupčanika [62]

Takva pojava se zove histereza, a predstavlja zaostajanje deformacije za naprežanjem, ali i količinu energije koja se potroši na unutarnje trenje u polimeru i pretvori u toplinu što se manifestira dodatnim zagrijavanjem boka zuba zupčanika. Karbonska vlakna su veće krutosti od staklenih vlakana pa su i prigušna svojstva PA 66-CF 20 zupčanika lošija u odnosu na PA 66-GF 20 zupčanik. Izmjerena razina buke PA 66, PA 66-GF 20 i PA 66-CF 20 zupčanika pri opterećenju $T = 2$ Nm prikazana je na Slici 3.39. (b). Dearn i Walton [64] proveli su eksperimentalno istraživanje razine buke uparivanjem raznih polimernih zupčanika, POM, PA 66, PA 66-GF 30 s dodatkom 15% PTFE, te metalnih zupčanika od čelika. Ispitivanje je provedeno pri opterećenjima $T = 3, 5, 7$ i 10 Nm i brzinama vrtnje $n = 500 - 2000$ o/min s korakom od 500 o/min, a ispitivani zupčanici su postavljeni u zasebnu zvučno izoliranu drvenu kutiju obloženu pjenu kako bi se minimizirao utjecaj buke koju stvaraju pokretni dijelovi eksperimentalnog postolja poput ležajeva, spojki i elektromotora. Međusobno upareni POM zupčanici generiraju najviše buke dok se uparivanjem POM s PA 66 zupčanikom razina buke značajno snižava. Kombinacija međusobno uparenih PA 66 zupčanika jako je povoljna sa stajališta generirane buke, a dodavanjem staklenih vlakana i PTFE koji djeluje kao lubrikant razina buke se dodatno snižava. Izmjerena razina buke uparenih PA 66 zupčanika s metalnim nije se značajno promijenila u odnosu na PA 66 – PA 66 kombinaciju za razliku od POM zupčanika uparenog s metalnim gdje je došlo do osjetnog pada razine buke. Dodatnim podmazivanjem uparenih zupčanika mašću nije uvelike doprinijelo smanjenju razine buke, osim kod POM – POM kombinacije zupčanika. Kod svih ispitivanih kombinacija uparivanja zupčanika uočeno je povećanje razine buke s povećanjem opterećenja i brzine vrtnje. Općenito, iz [62, 63, 64], može se zaključiti da se povećanjem opterećenja, brzine vrtnje i krutosti

materijala smanjuje prigušenje polimera, a promjena razine buke i vibracija za vrijeme rada može ukazivati na trošenje ili oštećenje polimernih zupčanika.

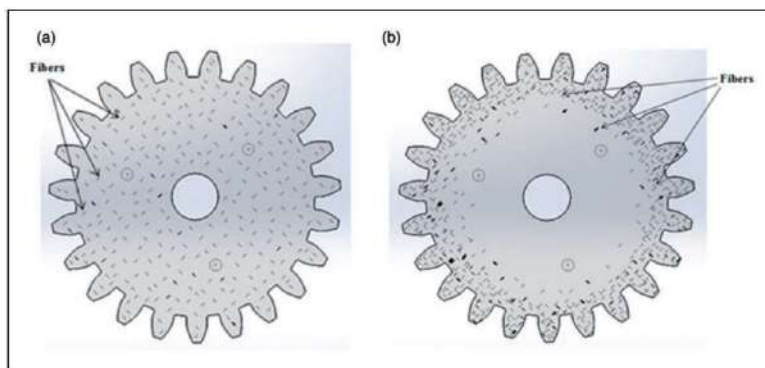
3.7. Učinkovitost, raspodjela opterećenja i utjecaj opterećenja i brzine vrtnje

Walton i dr. [65, 66] eksperimentalno su odredili učinkovitost zupčanog para na temelju izmjerenog momenta na ulazu i izlazu iz prijenosnika umanjenog za gubitke u ležajevima. Istraživanje je provedeno na POM, PA 66, PA 66-GF 30 i PA 66-CF 30, oba vlaknima ojačani i s dodatkom 15% aditiva koji služi kao lubrikant, te PEEK polimernim zupčanicima uparenim međusobno, ali i s metalnim zupčanikom od čelika, pri opterećenjima do $T = 10 \text{ Nm}$ i brzinama vrtnje do $n = 3000 \text{ o/min}$. Uočeno je da izbor materijala ima velik utjecaj na učinkovitost polimernog zupčanog para. Kod međusobno uparenih POM zupčanika uočena je ovisnost učinkovitosti o opterećenju i brzini vrtnje, pri većem opterećenju i manjim brzinama vrtnje učinkovitost POM zupčanog para je veća. PA 66 zupčani par pokazuje ovisnost učinkovitosti o promjeni brzine vrtnje, ali je ista neosjetljiva na promjene opterećenja. Za slučaj podmazivanja mašću svih ispitivanih zupčanika povećava se učinkovitost zupčanog para, kao i dodavanjem vlakana PA 66 polimeru, a razlike gotovo nema bilo da se dodaju karbonska ili staklena vlakna. PEEK zupčanici ostvaruju najveću učinkovitost u ispitivanim uvjetima, a uparivanjem polimernih zupčanika s metalnim uočeno je smanjenje učinkovitosti pri nižim brzinama vrtnje, dok je pri većim brzinama uglavnom ostala ista, kao i kod međusobno uparenih polimera. Slika 3.40. prikazuje promjenu učinkovitosti nekih od ispitivanih zupčanih parova s promjenom brzine vrtnje.



Slika 3.40. Učinkovitost pri opterećenju $T = 5 \text{ Nm}$ [65]

Također, istražen je utjecaj geometrije zupčanika na učinkovitost prijenosnika te je uočeno da zupčanik s većim modulom m , ima nižu učinkovitost. Povećanje osnovnog razmaka a ne utječe na učinkovitost, ali se smanjenjem istog smanjuje zračnost potrebna za širenje polimernih zupčanika zbog zagrijavanja što nepovoljno utječe na učinkovitost. Ispitani su i polimerni zupčanici s kosim zubima, kut nagiba boka zuba iznosi $\beta = 8^\circ$, te je uočena veća učinkovitost kod polimernih zupčanika s ravnim u odnosu na one s kosim zubima. Singh i Siddhartha [67] proveli su ispitivanje učinkovitosti PBT, PBT-GF 15 i PBT-GF 30 zupčanika proizvedenih injekcijskim prešanjem uparenih s metalnim zupčanikom od čelika pri brzinama vrtnje $n = 500 - 1400$ o/min i opterećenjima $T = 0,8 - 2,6$ Nm. Slika 3.41. prikazuje dvije vrste staklenim vlaknima ojačanih zupčanika koji su ispitani u ovom radu, PBT s homogenom raspodjelom vlakana po presjeku zupčanika i PBT s funkcionalno gradiranim materijalom (FGM). FGM je kompozit s kontinuiranom promjenom svojstava materijala po presjeku. Staklena vlakna kod FGM zupčanika imaju veći udio u području zuba zupčanika u odnosu na osnovni PBT materijal, dok im udio opada prema središtu zupčanika. Time je ostvarena veća čvrstoća, tvrdoća, krutost i bolja toplinska vodljivost zuba zupčanika što utječe na vijek trajanja i učinkovitost zupčanog para. Uočena je ovisnost učinkovitosti o opterećenju, dok se promjenom brzine ista tek neznatno promijenila. Najlošija učinkovitost uočena je kod PBT zupčanika, dok se dodavanjem staklenih vlakana te povećanjem njihovog udjela u osnovnom polimeru učinkovitost povećala. Najveća učinkovitost zupčanog para ostvarena je kod PBT-GF 30 FGM zupčanika. Veća zastupljenost staklenih vlakana u području zuba zupčanika s FGM povoljno utječe na odvođenje topline, manje generiranje topline u zubu zbog histereze što rezultira manjim zagrijavanjem zupčanika.

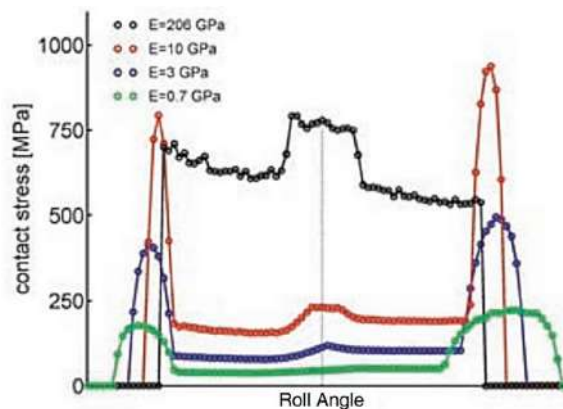


Slika 3.41. Shematski prikaz PBT-GF 15 (a) homogenog i (b) FGM zupčanika [67]

Senthilvelan i Gnanamoorthy [68] eksperimentalno su istražili utjecaj opterećenja i brzine vrtnje na radni vijek i tipove oštećenja PA 6 i PA 6-GF 20 zupčanika uparenih s metalnim

zupčanikom od čelika AISI SS 316. Ispitivanje je provedeno pri brzinama vrtnje $n = 600 - 1200$ o/min s korakom 200 o/min i opterećenjima $T = 0,8, 1,5, 2, 2,5$ i 3 Nm i zupčanicima nisu podmazivani. Povećanjem brzine vrtnje zupčanika povećava se učestalost ulaska zuba u zahvat što utječe na povećanje opterećenja i zagrijavanje polimernih zupčanika, a time i na vijek trajanja istih. Toplina koja se generira uzrokovana je trenjem između dodirnih površina bokova zuba i toplinskom histerezom, a zbog veće brzine vrtnje smanjeno je vrijeme u kojem se toplina može predati okolini. U radu je uočen porast temperature boka zuba PA 6 zupčanika s povećanjem brzine vrtnje, kao i kod PA 6-GF 20 zupčanika, ali ipak u manjoj mjeri u odnosu na PA 6 zupčanik. Još jednom je potvrđeno da staklena vlakna povoljno utječu na zagrijavanje zupčanika. Utjecaj brzine vrtnje na vijek trajanja zupčanika je izražen pri većim opterećenjima, dok pri malim opterećenjima gotovo i ne postoji. Rast brzine vrtnje zupčanika nije uzrok oštećenja PA 6 i PA 6-GF 20 zupčanika, dok promjena opterećenja definitivno jest. Pri nižim opterećenjima dolazi do pojave loma u korijenu zuba i trošenja boka zuba zupčanika i ne ovisi o promjeni brzine vrtnje dok je pri većim opterećenjima utjecaj brzine vrtnje vidljiv, a zupčanicima trajno gube funkciju uslijed taljenja materijala i plastičnih deformacija zuba zupčanika zbog kojih nisu više u mogućnosti prenositi opterećenje. Zupčanicima ojačanim staklenim vlaknima su u svim uvjetima ispitivanja ostvarili dulji radni vijek te su se sva oštećenja na istima pojavila pri većim opterećenjima u odnosu na neojačane zupčanike.

Van Melick [69] je numerički, FEM analizom, istražio utjecaj krutosti na savijanje zuba polimernog zupčanika te kako savijanje zuba utječe na trajanje zahvata odnosno raspodjelu opterećenja između zubi te na kontaktna naprezanja na boku zuba zupčanika. Numerička simulacija izvršena je u programu MSC.MARC i provedena je na PA 46, PA 46-GF 30 pri sobnoj temperaturi, ali i pri temperaturi od 140 °C, uparenih s metalnim zupčanikom od čelika uz pretpostavku da su deformacije linearno elastične. Simulacijom prolaska zuba kroz zahvat uočeno je produljeno trajanje zahvata uzrokovano savijanjem zuba pa zub ranije ulazi, a kasnije izlazi iz zahvata. Produljenjem trajanja zahvata kod PA 46-GF 30 zupčanika prepolovljeno je vrijeme trajanja jednostrukog zahvata, dok je kod PA 46 zupčanika pri sobnoj i povišenoj temperaturi jednostruki zahvat potpuno nestao što znači da su najmanje dva zuba zupčanika konstantno u zahvatu. Raspodjela opterećenja više nije jednolika raspoređena iznad i ispod kinematske kružnice kao što je to kod metalnih zupčanika, već dio ispod kinematske kružnice zuba prenosi veći dio opterećenja. Kontaktna naprezanja značajno ovise o krutosti zuba zupčanika, odnosno o modulu elastičnosti, a uočeno je da manja krutost znači manja kontaktna naprezanja na kinematskoj kružnici, gdje su inače maksimalna.



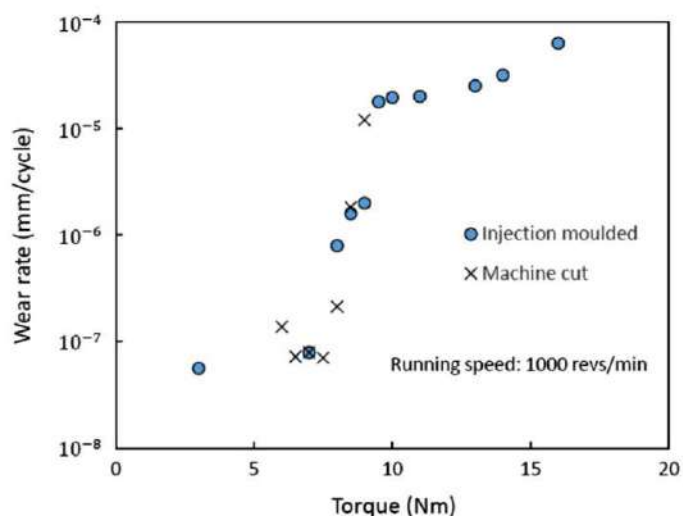
Slika 3.42. Promjena kontaktnih naprezanja prolaskom metalnog (crna), PA 46-GF 30 (crvena), PA 46 (plava) i PA 46 pri 140 °C (zelena) zupčanika kroz zahvat [69]

Problem je što se najveća kontaktna naprezanja, zbog savijanja zuba, javljaju na ulazu i izlazu iz zahvata kod svih ispitivanih zupčanika i veća su od analitički određenih očekivanih kontaktnih naprezanja (Slika 3.42.). Simulacijom je potvrđeno da su kontaktna naprezanja najveća prilikom izlaska zuba iz zahvata te tada dolazi do najvećeg trošenja na dijelu zuba ispod kinematske kružnice, što je uočeno i u radu [42]. Van Melick i van Dijk [70] eksperimentalno su ispitali naprezanje u korijenu zuba PA 46, PA 46-GF 30 i PA 46-CF 30 zupčanika koje je posljedica savijanja zuba i koje vodi prema lomu u korijenu zuba. Također, proveli su ispitivanje uzorka u obliku trake od navedenih materijala na savijanje kako bi vidjeli može li se na taj način predvidjeti radni vijek zupčanika obzirom na zamorni lom. Ispitivanje je provedeno pri raznim opterećenjima i brzinama vrtnje, a zupčanici su podmazivani prskanjem ulja oznake Nuto H-68 te je temperatura ulja održavana na 140 °C. Zbog visokog stupnja kristalnosti od 70%, PA 46 polimer zadržava mehanička svojstva i pri temperaturama većim od temperature staklišta. Kod PA 46 zupčanika je do otkaza došlo uslijed loma u korijenu zuba bez značajnog trošenja boka zuba, dok je kod PA 46-GF 30 i PA 46-CF 30 zupčanika do otkaza došlo zbog trošenja boka zuba. Ispitivanjem uzorka u obliku trake uočena je pojava zamornog loma, analogno lomu u korijenu zuba uočena kod PA 46 zupčanika. Zaključak je da se ispitivanje uzorka, a ne čitavog zupčanika, može primijeniti za procjenu radnog vijeka PA 46 zupčanika bez dodataka vlakana jer kod njega dolazi do otkaza zbog čistog zamornog loma.

3.8. Injekcijski prešani i odvalnim glodanjem proizvedeni polimerni zupčanici

Mao i dr. [71] istražili su kako način proizvodnje POM polimernih zupčanika utječe na njihovo trošenje. U radu su ispitani međusobno upareni POM zupčanici proizvedeni odvalnim glodanjem pri opterećenjima $T = 6 - 9$ Nm i brzini vrtnje $n = 1000$ o/min, a rezultati ispitivanja

uspoređeni su s [34], gdje su ispitivani identični zupčanici, ali proizvedeni injekcijskim prešanjem. Proizvodnja zupčanika postupcima rezanja ekonomičnija je kada je u pitanju maloserijska ili pojedinačna proizvodnja, kao i dimenzijska točnost, u odnosu na POM injekcijski prešane zupčanike. Slika 3.43. prikazuje stopu trošenja POM zupčanika proizvedenih postupkom rezanja te postupkom injekcijskog prešanja pri različitim opterećenjima. Uočeno je da način proizvodnje nema utjecaja na trošenje i da razlike u stopi trošenja boka zuba zupčanika gotovo i ne postoje. Povećano trošenje POM zupčanika



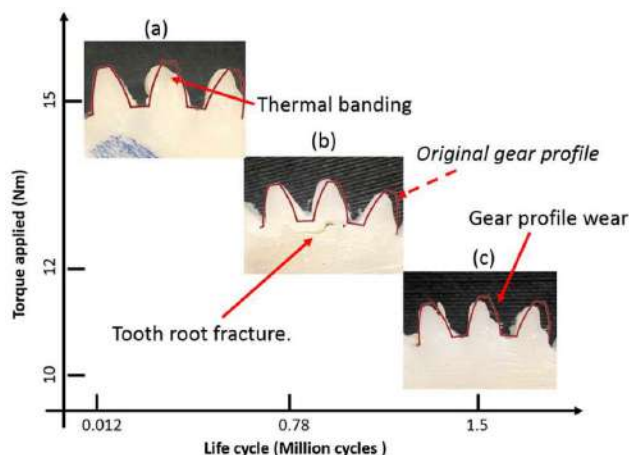
Slika 3.43. Usporedba stope trošenja POM zupčanika proizvedenih postupkom rezanja i injekcijskog prešanja [71]

proizvedenih rezanjem uslijedilo je pri opterećenjima iznad $T = 7 \text{ Nm}$, a do otkaza zupčanika zbog taljenja dolazi uslijed zagrijavanja do temperatura koje odgovaraju temperaturi tališta, $T_t = 175 \text{ °C}$, POM materijala, kao što je to slučaj i kod zupčanika proizvedenih injekcijskim prešanjem. Također, uočeno je adhezijsko trošenje koje je izraženo u području ispod kinematske kružnice kao i karakteristične tri faze trošenja: uhodavanje, linearno trošenje i završno ubrzano trošenje. Isti mehanizmi trošenja i ponašanje POM zupčanika uočeni su i u radu [42]. Alharbi [72] je eksperimentalnim istraživanjem potvrdio da nema značajne razlike između injekcijski prešanih i odvalnim glodanjem izrađenih POM zupčanika, ali je također istražio postoji li razlika u trošenju međusobno uparenih PA 66 zupčanika proizvedenih dvama navedenim postupcima proizvodnje zupčanika. PA 66 zupčanici proizvedeni rezanjem ostvaruju dimenzijsku točnost od 0.01 mm, što je značajno bolje u odnosu na injekcijski prešane PA 66 zupčanike. Ispitivanje je provedeno ubrzanom metodom ispitivanja zupčanika sa stupnjevitom promjenom opterećenja s korakom 0,5 Nm svakih pola sata pri brzini vrtnje $n =$

1000 o/min. Eksperimentalnim ispitivanjem je izmjerena nešto veća maksimalna opteretivost PA 66 zupčanika izrađenih postupkom rezanja koja iznosi $T = 11$ Nm, dok ista kod injekcijski prešanih PA 66 zupčanika iznosi $T = 9,5$ Nm. Razlog je bolja kvaliteta površine zuba te manja zračnost koja je posljedica veće dimenzijske točnosti PA 66 zupčanika proizvedenih rezanjem. Trošenje kod PA 66 zupčanika, kao i kod POM zupčanika, ne ovisi o načinu proizvodnje, međutim, mnogo je kompleksnije nego što je to kod POM zupčanika. Trošenje boka zuba PA 66 zupčanika je u početku veliko dok kasnije linearno raste bez završnog ubranog trošenja prije neposrednog otkaza zupčanika. U fazi linearnog trošenja pri određenim opterećenjima uočeno je smanjeno trošenje, koje je uzrokovano nastajanjem prijelaznog sloja rastaljenog materijala koji ima ulogu ulja ili maziva te sprječavaju direktan kontakt između dva sparena boka zuba zupčanika, a slično je dokazano i radom [40] gdje je ispitivanje provedeno testom s dva diska. Kratkotrajno smanjeno trošenje prestaje kada se nastali rastaljeni prijelazni sloj, zbog relativnog klizanja bokova zubi zupčanika, ukloni iz zahvata zubi zupčanika.

3.9. Aditivna proizvodnja polimernih zupčanika

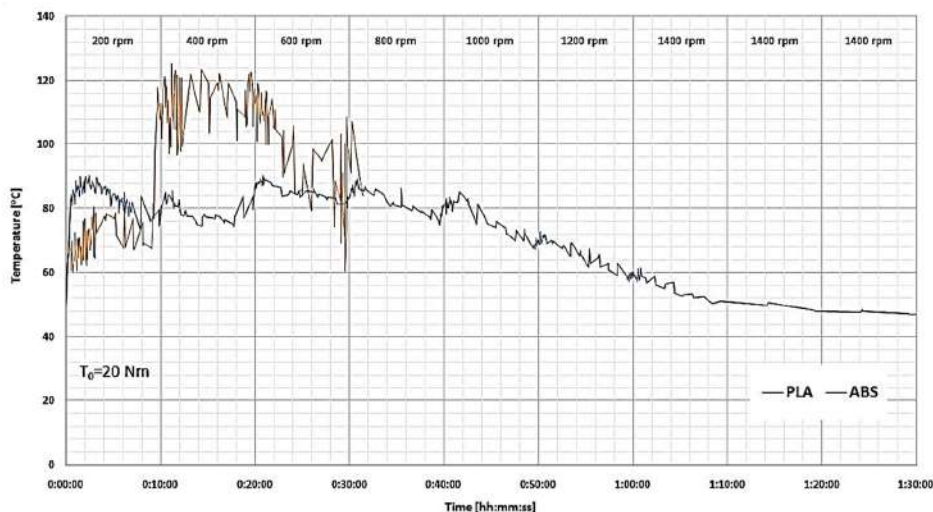
Zhang i dr. [73] proveli su istraživanje na poliamidnim zupčanicima proizvedenim FDM procesom aditivne proizvodnje. Zupčanici su izrađeni na printeru oznake Ultimaker 2, kvaliteta tolerancija zupčanika proizvedenih FDM tehnologijom je 12, prema DIN-u, a stupanj ispune zupčanika je 60%. Veći postotak ispune znači veću masu, ali i veću čvrstoću zupčanika. Eksperimentalno istraživanje je provedeno pri brzini vrtnje $n = 1000$ o/min i opterećenjima $T = 5 - 15$ Nm na više vrsta poliamidnih zupčanika, među kojima se kao najbolji istaknuo zupčanik izrađen od poliamida oznake PA 618. Rezultati ispitivanja trošenja i oštećenja koja se javljaju kod PA 618 zupčanika su uspoređeni s rezultatima ispitivanih injekcijski prešanih PA 66 zupčanika, iz dostupne literature. Uočeno je manje trošenje i dulji radni vijek PA 618 zupčanika pri opterećenjima do $T = 12$ Nm u odnosu na PA 66 zupčanik dok se pri većim opterećenjima PA 66 zupčanik pokazao kao kvalitetniji. Trošenje i tipovi otkaza PA 618 ispitivanih zupčanika prikazani su na Slici 3.44. Pri nižim vrijednostima opterećenja dolazi do trošenja boka zuba u području kinematske kružnice, a nakon određenog smanjenja debljine zuba i do loma zbog savijanja zuba. Odvojena čestica za navedena opterećenja ima oblik pahuljice, a veće trošenje javlja se u području iznad kinematske kružnice dok je kod PA 66 zupčanika veće trošenje ispod kinematske kružnice. Za srednja opterećenja karakterističan je otkaz zupčanika uslijed loma u korijenu zuba koji se javlja nakon otprilike 800 000 ciklusa. Pri opterećenjima većim od 15 Nm javljaju se velika kontaktna naprezanja, kao i povećano zagrijavanje, zbog kojih dolazi do savijanja i plastičnih deformacija zuba.



Slika 3.44. Tipovi otkaza PA 618 zupčanika pri različitim opterećenjima [73]

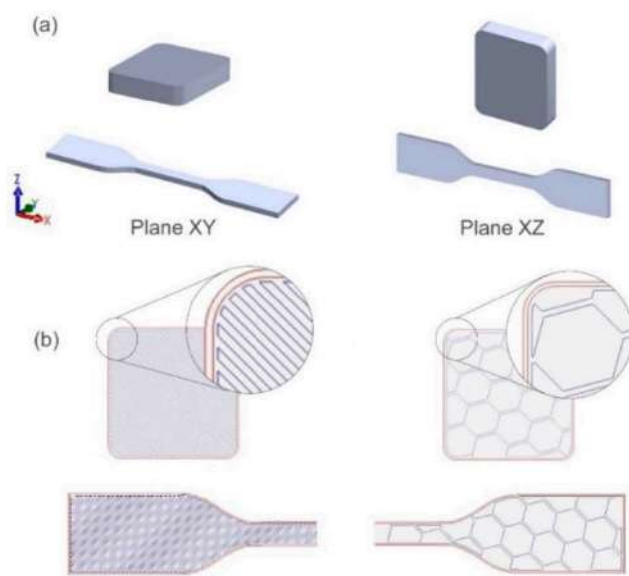
Također, DSC analizom je uočena sličnost između temperature staklišta, temperature tališta i stupnja kristalnosti PA 618 i PA 66 polimera, a isto tako je potvrđeno da izradom zupčanika FDM tehnologijom, prilikom procesa polimerizacije, nastaje više kovalentnih nego van der Waalsovih veza što pozitivno utječe na mehanička svojstva i bolje performanse PA 618 u odnosu na PA 66 zupčanike za određene uvjete ispitivanja. Iako je zastupljeno generalno mišljenje da se aditivnim tehnologijama ne mogu ostvariti rezultati kao drugim konvencionalnim metodama proizvodnje zupčanika, upravo ovaj rad to demantira. Dimić i dr. [74] istražili su opteretivost polimera koji se često koriste u postupcima aditivne proizvodnje, akrilonitril butadien stirena (ABS) i polilaktida (PLA). Eksperimentalno ispitivanje na zupčanicima provedeno je pri konstantnom opterećenju $T = 20 \text{ Nm}$ te pri stupnjevito promjenjivoj brzini vrtnje do $n = 1400 \text{ o/min}$ s korakom 200 o/min svakih 10 minuta. Stupanj ispune ispitivanih ABS i PLA zupčanika je 95%, a ispitivanje je provedeno u uvjetima bez podmazivanja. ABS zupčanici preživjeli su 30 minuta ispitivanja dok su PLA zupčanici izdržali cijeli proces ispitivanja. Drugim riječima, pri brzini vrtnje od $n = 600 \text{ o/min}$ kod ABS zupčanika je došlo do prestanka rada uslijed povećanog trošenja u području kinematske kružnice do trenutka kada se debljina zuba toliko smanjila da je došlo do otkidanja zuba. Kod PLA zupčanika je povećanjem brzine uočeno sve veće trošenje boka zuba, ali do prestanka rada zupčanika nije došlo. Prilikom ispitivanja kod ABS zupčanika najveća izmjerena temperatura na boku zuba iznosila je 125 °C dok se temperatura PLA zupčanika nakon uhodavanja ustalila na 80 °C , iako je u fazi uhodavanja temperatura PLA zupčanika bila oko 20% veća u odnosu na ABS zupčanik (Slika 3.45.). Za vrijeme ispitivanja mjerene su i vibracije u radu zupčanika te je uočeno da je rad međusobno uparenih PLA zupčanika značajno mirniji nego što je to slučaj

kod ABS zupčanika. Ako se sve navedeno uzme u obzir PLA je bolji izbor nego ABS kada je u pitanju proizvodnja zupčanika.



Slika 3.45. Zagrijavanje ABS i PLA zupčanika s promjenom brzine vrtnje [74]

Calignano i dr. [75] istražili su mehanička svojstva karbonskim vlaknima ojačanog poliamidnog filameta PA 612-CF 20 proizvođača Fiber Force Italy kao i utjecaj smjera nanošenja slojeva i stupnja ispune na ista. Ispitivanje tvrdoće, čvrstoće i žilavosti filameta na standardiziranim uzorcima provedeno je u skladu s odgovarajućim standardima, a ispitivani uzorci izrađeni su na uređaju oznake Shareboot NG. Udio karbonskih vlakana promjera $10 \mu\text{m}$ i duljine $30 \mu\text{m}$ u osnovnom materijalu odnosno filamentu je 20%, a smjer nanošenja slojeva i stupanj ispune na ispitivanim uzorcima prikazani su na Slici 3.46. Ispitivanjem je potvrđeno da uzorci koji su izrađeni nanošenjem slojeva u XY ravnini imaju veću tvrdoću u odnosu na uzorke izrađene nanošenjem slojeva u XZ ravnini, ali je kod njih primijećeno da se smanjenjem stupnja ispune sa 100% na 80% tvrdoća nije značajno smanjila. Uzorci izrađeni nanošenjem u XZ smjeru imaju veću vlačnu čvrstoću koja raste povećanjem stupnja ispune. Ovisnost čvrstoće o stupnju ispune nije linearna kako bi se moglo očekivati jer se nanošenjem više materijala javlja veći broj grešaka u materijalu. Uslijed hlađenja i skupljanja materijala javljaju se i zaostala naprezanja koja su veća što je stupanj ispune veći. Uzorci izrađeni u XY ravnini pokazuju znatno veću udarnu žilavost u odnosu na uzorke izrađene nanošenjem slojeva u XZ ravnini, a stupanj ispune gotovo da i nema utjecaja na žilavost polimera. Zhang i dr. [76] proveli su istraživanje na PA 618 zupčanicima proizvedenim FDM procesom aditivne proizvodnje na kojima su ispitali utjecaj temperature printanja, brzine printanja, temperature pomičnog stola na kojem se izvodi printanje i stupnja ispune na performanse zupčanika.



Slika 3.46. (a) Smjerovi nanošenja slojeva i (b) stupnjevi ispune ispitivanih uzoraka [75]

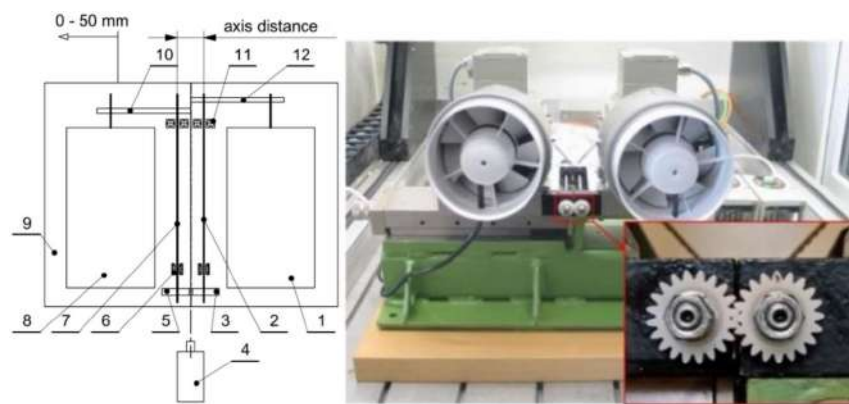
Zupčanici su izrađeni na uređaju Ultimaker 3, a preporučeni parametri proizvođača su sljedeći: temperatura printanja iznosi 250 °C, temperatura stola 30 °C, brzina printanja 45 mm/s i stupanj ispune 60%. Vrijeme za izradu jednog zupčanika s ovakvim postavkama iznosi 6 sati. U svrhu smanjenja vremena izrade i uštede materijala izvršena je optimizacija procesa. Optimizacije je izvršena za širok raspon vrijednosti četiri navedena parametra procesa, a korištenjem umjetne neuronske mreže, genetskog algoritma i Sobolove metode proizašlo je rješenje pri kojem je čvrstoća zupčanika najveća uz najmanju moguću masu i najkraće vrijeme izrade. Za optimalno rješenje određena je temperatura printanja od 250 °C, temperatura stola 25 °C, brzina printanja 70 mm/s i stupanj ispune 80%. PA 618 zupčani par izrađen prema optimiziranim parametrima eksperimentalno je ispitivan te je potvrđena 3 puta veća otpornost trošenju u odnosu na zupčani par izrađen prema parametrima koje je predložio proizvođač. Naposljetku je Garsonovim algoritmom utvrđen utjecaj svakog od parametara na ukupan proces izrade zupčanika kojim je utvrđeno da je najveća ovisnost procesa o stupnju ispune (45.3%), zatim brzine printanja (23.9%) i temperature printanja (22.2%) dok najmanji značaj ima temperatura stola (8.6%). Utjecaj temperature stola očituje se samo na nekolicinu prvih slojeva za vrijeme procesa printanja dok stupanj ispune direktno utječe na masu i mehanička svojstva zupčanika, a samim time i na vrijeme izrade i količinu potrošenog materijala.

4. ISPITIVANJE PRIJENOSNIKA SNAGE I GIBANJA

Zbog nedostatka standarda, normi i iskustvenih vrijednosti pouzdani proračun i dizajniranje polimernih zupčanika nije moguće izvršiti pa ih je potrebno ispitivati, u uvjetima što sličnijim realnim eksploatacijskim uvjetima. Čak i ispitni uređaji s dva diska (disc on disc) ili uređaji igla na disku (pin on disc) s bliskom simulacijom dodira u jednoj točki, kao što je to kod zupčanika, ne daju ispravne i dovoljno precizne rezultate, pa se u praksi polimerni zupčanici ispituju pomoću jedne od dvije navedene vrste uređaja, s otvorenim ili sa zatvorenim tokom snage. Takvim uređajima moguće je ispitivati ponašanje zupčanika u eksploatacijskim uvjetima kao i opteretivost, vijek trajanja, trošenje, zagrijavanje, utjecaj podmazivanja i učinkovitost istih. Uređaji za ispitivanje polimernih zupčanika s otvorenim i zatvorenim tokom snage te njihove glavne prednosti i nedostaci opisani su u nastavku.

4.1. Uređaji s otvorenim tokom snage

Uređaji s otvorenim tokom snage jednostavniji su i posjeduju manje dijelova u odnosu na uređaje sa zatvorenim tokom snage. Takvi uređaji sastoje se od pogonskog stroja, prijenosnika s polimernim zupčanicima koji se ispituju i uređaja koji simulira radni stroj. Pogonski stroj je u pravilu elektromotor, istosmjerne ili izmjenične struje, kojeg je jednostavno regulirati i koji se može primijeniti u širokom rasponu brzina dok su simulatori radnog stroja najčešće kočnice, mehaničke ili hidrauličke, a može biti i elektromotor koji radi u režimu generatora struje. Na ulazno i izlazno vratilo prijenosnika ugrađuju se uređaji za mjerenje okretnog momenta i brzine vrtnje dok se u kućište postavlja uređaj za mjerenje temperature polimernih zupčanika, vibracija, buke i sl. Shematski prikaz s naznačenim glavnim komponentama i primjer uređaja za ispitivanje polimernih zupčanika s otvorenim tokom snage prikazan je na Slici 4.1.



Slika 4.1. Uređaj za ispitivanje polimernih zupčanika s otvorenim tokom snage [27]

Snaga se s pogonskog elektromotora (1) upravljano pomoću frekventnog pretvarača preko zupčastog remena (12) prenosi na pogonsko vratilo (2) na koje je pričvršćen pogonski zupčanik (3). Pogonski zupčanik (3) uparen je s identičnim gonjenim zupčanikom (5) koji se nalazi na gonjenom vratilu (7) koje je zupčastim remenom (10) povezano na elektromotor (8) koji simulira radni stroj. Uležištenje pogonskog vratila (11) nalazi se na nepomičnom dijelu, a uležištenje gonjenog vratila (6) pomičnom dijelu (9) dvodijelnog postolja na kojem se nalazi uređaj za ispitivanje. Dvodijelno postolje služi kako bi se mogao jednostavno podesiti osni razmak zupčanika. Temperatura ispitivanih polimernih zupčanika mjeri se pomoću termalne kamere (4). U slučaju da se želi ispitivati utjecaj podmazivanja na polimerne zupčanike za iste je potrebno izraditi kućište, ali tada ono mora biti posebno izrađeno za svaki različiti ispitivani zupčani par što povećava cijenu ispitivanja. Jednostavnost izvedbe i mogućnost ispitivanja polimernih zupčanika različitih dimenzija na istom uređaju, zbog jednostavnog prilagođavanja osnog razmaka, glavne su prednosti uređaja s otvorenim tokom snage u odnosu na uređaje sa zatvorenim tokom snage. Nedostatak ovih uređaja je što se sva energija proizvedena od strane pogonskog stroja u kočnici pretvori u toplinu. Također, za ispitivanje je potrebno ugraditi pogonski stroj jednake snage kao što je snaga stroja koji se koristi u eksploataciji što može značajno povećati cijenu ispitivanja, što nije slučaj kod uređaja za ispitivanje sa zatvorenim tokom snage.

4.2. Uređaji sa zatvorenim tokom snage

Radi smanjenja potrebne snage za ispitivanje zupčanih prijenosnika, posebno s metalnim zupčanicima, koriste se uređaji sa zatvorenim tokom snage. Veći broj dijelova utječe na nešto veću početnu cijenu ispitivanja, ali kod ispitivanja prijenosnika za velike snage ulaganje je ekonomski opravdano. Uređaji sa zatvorenim tokom snage koriste se jako dugo, npr. za ispitivanje ulja i maziva za zupčanike (FZG uređaj), ali se mogu primijeniti i za ispitivanje polimernih zupčanika. Primjer jednog takvog uređaja prikazan je na Slici 4.2., a sastoji se od dva para zupčanika, od kojih je jedan par polimernih zupčanika koji se ispituje ($Z_1 - Z_2$), a drugi par metalnih zupčanika ($Z_3 - Z_4$). Kućište s metalnim zupčanicima čvrsto je povezano s postoljem, dok se kućištu s ispitivanim polimernim zupčanicima omogućuje zakretanje oko vratila (V) na kojem su pričvršćeni zupčanci Z_1 i Z_3 , a zakretanje može biti i oko središta osnog razmaka. Zupčanci Z_2 i Z_4 međusobno su povezani kardanskim vratilom (KV) koje kompenzira zakret kućišta s polimernim zupčanicima, a koje je ujedno i mjerno vratilo (MV) na kojem se konstantno mjeri moment. Kako je kućište prijenosnika opterećeno zbrojem okretnih momenata



Slika 4.2. Uređaj za ispitivanje polimernih zupčanika sa zatvorenim tokom snage [59]

na pogonskom i gonjenom zupčaniku, odnosno vratilu, zupčanici se mogu opteretiti tako što se moment preko poluge dovede na kućište. Uglavnom se moment na kućište dovodi preko utega (F) koji je obješen na kraj poluge. Na taj način potrebna je mnogo manja snaga pogonskog elektromotora (EM) te je ona manja od snage koja cirkulira u sustavu. Elektromotorom (EM) se upravlja preko frekventnog pretvarača (FP), a podaci i mjerenja prikupljaju se na računalo (PC). Temperatura boka zuba zupčanika u zahvatu mjeri se pomoću infracrvene termalne kamere (IK). Ovakvi uređaji mogu raditi s konstantnim i promjenjivim opterećenjem, a glavni nedostatak im je što se zupčani parovi puštaju u rad i zaustavljaju pri punom opterećenju. Također, nedostatak su unutrašnje dinamičke sile koje uzrokuju vibracije i problem održavanja konstantnog momenta radi trošenja polimernih zupčanika, koji se mogu izbjeći izborom odgovarajućeg konstrukcijskog rješenja.

5. ZAKLJUČAK

U ovom kvalifikacijskom radu pregledom znanstveno-istraživačkih radova i druge literature predstavljena je problematika koja se javlja kada je u pitanju proizvodnja polimernih zupčanika. Metalni zupčanici su poprilično istraženi i razvijeni te ih je moguće projektirati uz veliku pouzdanost, uzimajući u obzir nosivost, trošenje i njihov radni vijek. Zbog velikog broja različitih polimernih materijala koji se koriste za izradu zupčanih prijenosnika i nedostatka iskustvenih parametara i podataka, te nedostatka standarda, pouzdano projektiranje i konstruiranje polimernih zupčanika predstavlja velik izazov za projektante i proizvođače istih. Za projektiranje polimernih zupčanika trenutno je moguće koristiti razne preporuke i smjernice, ali one pokrivaju jako malen broj polimernih materijala, uglavnom POM, PA 6 i PA 66.

Polimerni zupčanici se u pravilu uparuju s metalnim zupčanicima, najčešće od čelika, ali učestalije je međusobno uparivanje. Uparivanje polimernih zupčanika s metalnim povoljno je zbog većeg toplinskog vođenja metala koji pogoduje boljem odvođenju topline sa zupčanika u zahvatu što pozitivno utječe na otpornost trošenju i radni vijek polimernih zupčanika. Površinska hrapavost polimernog zupčanika nema utjecaja na zagrijavanje i trošenje, ali hrapavost uparenog metalnog zupčanika definitivno utječe. Također, nastajanje prijelaznog polimernog sloja koji se stvara na površini metalnih zupčanika rezultira nižim koeficijentom trenja pa se razvijanje topline uslijed klizanja bokova zuba zupčanika smanjuje. Podmazivanje polimernih zupčanika uparenih s metalnim nije nužno, ali se podmazivanjem ipak ostvaruju bolje performanse. Pregledom literature uočeno je da se ispitivanjem triboloških svojstava polimera, testom s dva diska ili igla na disku koji simuliraju dodir bokova zubi zupčanika, može približno odrediti zagrijavanje i mehanizmi trošenja polimernih zupčanika, ali za precizne rezultate koji su neophodni ipak je potrebno provesti ispitivanje na zupčanicima simuliranjem eksploatacijskih uvjeta.

Kod međusobno uparenih polimernih zupčanika najveći nedostatak predstavlja njihova slaba toplinska vodljivost te dolazi do povećanog zagrijavanja. Takav nedostatak se može riješiti dodavanjem vlakana osnovnom materijalu, staklenih ili karbonskih, ili dodavanjem aditiva poput PTFE-a što povećava njihovu cijenu koja ih čini privlačnijim od metalnih zupčanika. Kombinacija međusobno uparenih polimernih zupčanika u kojoj je pogonski POM, a gonjeni PA 66 zupčanik pokazala se kao najbolja, sa stajališta radnog vijeka i opteretivosti zupčanika. Uz navedene POM i PA 66 polimerne materijale za izradu zupčanika istaknuo se i PEEK. Kod svih vrsta polimernih zupčanika uočeno je da trošenje i radni vijek ponajprije ovise o opterećenju odnosno momentu kojeg prenose dok brzina ima značaj samo kod većih

opterećenja. Nadalje, pregledom literature uočena je važnost istraživanja na polimernim zupčanicima kako bi se izradili modeli za procjenu temperature, temperature tijela te kratkotrajne temperature na boku zuba zupčanika. Temperatura i zagrijavanje polimernih zupčanika parametar je koji najviše utječe na njihove performanse.

Tipovi otkaza zupčanika poput loma u korijenu zuba zupčanika i pittinga javljaju se kod polimernih zupčanika kao i kod metalnih. Međutim, kod polimernih zupčanika često je i taljenje zuba te prestanak rada zbog trajnih plastičnih deformacija, a sva oštećenja popraćena su promjenom vibracija i buke. Promjenom geometrije zupčanika, povećanjem točnosti i preciznosti proizvodnje ili dodavanjem umetaka u svrhu boljeg odvođenja topline može se utjecati na njihov radni vijek i otpornost trošenju. Upijanje vlage kod nekih polimernih materijala može dovesti do bubrenja i dimenzijske netočnosti što im smanjuje učinkovitost.

Najbolji proces za masovnu proizvodnju polimernih zupčanika je injekcijsko prešanje dok se za maloserijsku i pojedinačnu proizvodnju mogu koristiti konvencionalni postupci rezanja, a sve češće i aditivni postupci proizvodnje. Brzom i jeftinom aditivnom proizvodnjom na uređajima koji su jednostavni za korištenje mogu se izraditi zupčanicima čija su svojstva jednaka ili bolja od onih proizvedenih injekcijskim prešanjem ili drugim konvencionalnim postupcima. Kvaliteta i mehanička svojstva zupčanika proizvedenih aditivnom proizvodnjom, najčešće FDM procesom, ovisi o stupnju ispune, smjeru nanošenja slojeva i brzini proizvodnje. U svrhu stjecanja novih znanja nužno je provoditi eksperimentalna ispitivanja na realnim polimernim zupčanicima koja se mogu izvršiti na uređajima s otvorenim ili zatvorenim tokom snage.

Iz svega navedenog proizlaze sljedeći koraci za buduća istraživanja: izrada odgovarajućeg eksperimentalnog postolja odnosno uređaja za ispitivanje radnog vijeka polimernih zupčanika proizvedenih FDM procesom aditivne proizvodnje, ispitivanje utjecaja parametara, dimenzijske točnosti te mehaničkih i toplinskih svojstava FDM procesom proizvedenih zupčanika na njihove performanse, radni vijek kao i uvid u mehanizme trošenja pri raznim opterećenjima i brzinama vrtnje.

LITERATURA

- [1] Jensen, W. B.: “The Origin of the Polymer Concept”, *Journal of Chemical Education*. Vol. 88, No. 5, pp. 624 – 625, 2008.
- [2] Kovačić T.: “Struktura i svojstva polimera”, Sveučilište u Splitu, Split, 2010.
- [3] Barić, G.; Pehlec-Pavlović, G.: “Production and Processing of Polymers in the World, in Europe and in Croatia”, *Polymeric materials and additives Conference*, Zagreb – Croatia, 2005.
- [4] Rogić, A.; Čatić, I.; Godec, D.: “Polimeri i polimerne tvorevine”, Denona d.o.o., Zagreb, 2008.
- [5] Andričić, B.: “Prirodni polimerni materijali”, Sveučilište u Splitu, Split, 2008.
- [6] Brizić, M. i dr.: “Polimerni materijali” - Tehnička enciklopedija, Jugoslavenski leksikografski zavod “Miroslav Krleža”, Zagreb, 1986.
- [7] DIN 8580, “Manufacturing processes – Terms and definitions, division”, Berlin, 2003.
- [8] Siminiati, D.; Pomenić, L.; Oršić, F.: “Određivanje osnovnih parametara za injekcijsko prešanje plastike”, *Engineering Review*, Vol. 28, No. 1, pp. 119 – 127, 2008.
- [9] Jelaska, D.: “Elementi strojeva”, Sveučilište u Splitu, Split, 2005.
- [10] Wong, K.V.; Hernandez, A.: “A Review of Additive Manufacturing”, *ISRN Mechanical Engineering*, Vol. 2012, 2012.
- [11] Da Silva, D. J.; Wiebeck, H.: “Current Options for Characterizing, Sorting, and Recycling Polymeric Waste”, *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, Vol. 36, No. 4, 2020.
- [12] ANSI/AGMA 920-A01, “Materials for Plastic Gears”, Alexandria, Virginia, 2000.
- [13] Vlahović, D.: “Termoplasti u strojogradnji”, Željezara Sisak, Zagreb, 1972.
- [14] Alfrević, I.: “Mehanika kontinuuma”, Golden marketing, Zagreb, 2003.
- [15] Čatić, I.: “Proizvodnja polimernih tvorevina”, Denona d.o.o., Zagreb, 2006.
- [16] Oberšmit, E.: “Ozubljenja i zupčanici”, Sveučilišna naklada d.o.o., Zagreb, 1990.
- [17] VDI 2736 – 1, “Thermoplastic gear wheels: Materials, material selection, production methods, production tolerances, form design”, Dusseldorf, 2016.

- [18] McKeen, L. W.: “The effect of temperature and other factors on plastics and elastomers”, William Andrew Inc., Norwich, New York, 2008.
- [19] Clarke, C. G.; Allen, C.: “The Water Lubricated, Sliding Wear Behaviour of Polymeric Materials Against Steel”, *Tribology International*, Vol. 24, No. 2, pp. 109 – 118, 1991.
- [20] Evans, S. M.; Keogh, P. S.: “Efficiency and Running Temperature of a Polymer – Steel Spur Gear Pair from Slip/Roll Ratio Fundamentals”, *Tribology International*, Vol. 97, pp. 379 – 389, 2016.
- [21] Mertens, A. J.; Senthilvelan, S.: “Durability of Polymer Gear-Paired with Steel Gear Manufactured by Wire Cut Electric Discharge Machining and Hobbing”, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 17, No. 2, pp. 181 – 188, 2016.
- [22] Chernets, M. V. i dr.: “Wear Resistance of Glass- and Carbon-Filled Polyamide Composites for Metal-Polymer Gears”, *Journal of Friction and Wear*, Vol. 39, No. 5, pp. 361 – 364, 2018.
- [23] Sarita, B.; Senthilvelan, S.: “Effects of Lubricant on the Surface Durability of an Injection Molded Polyamide 66 Spur Gear Paired with a Steel Gear”, *Tribology International*, Vol. 137, pp. 193 – 211, 2019.
- [24] Zorko, D. i dr.: “Durability and Design Parameters of a Steel/PEEK Gear Pair”, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 140, pp. 825 – 846, 2019.
- [25] VDI 2736 – 2, “Thermoplastic gear wheels: Cylindrical gears – Calculation of the load-carrying capacity”, Dusseldorf, 2014.
- [26] Bashandeh, K.; Lan, P.; Polycarpou, A. A.: “Tribological Performance Improvement of Polyamide against Steel Using Polymer Coating”, *Tribology Transactions*, Vol. 62, No. 6, pp. 1051 – 1062, 2019.
- [27] Zorko, D. i dr.: “Different Teeth Profile Shapes of Polymer Gears and Comparison of Their Performance”, *Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing*, Vol. 11, No. 6, 2017.
- [28] Hlebanja, G.; Kulovec, S.: “Thermal Properties of S-gears in Comparison with Involute Gears”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 393, 2018.
- [29] Duzcukoglu, H.: “PA 66 Spur Gear Durability Improvement with Tooth Width Modification”, *Materials and Design*, Vol. 30, No. 4, pp. 1060 – 1067, 2009.
- [30] Kim, C. H.: “Durability Improvement Method for Plastic Spur Gears”, *Tribology International*, Vol. 39, No. 11, pp. 1454 – 1461, 2006.

- [31] Senthilvelan, S.; Gnanamoorthy, R.: “Effect of Gear Tooth Fillet Radius on the Performance of Injection Molded Nylon 6/6 Gears”, *Materials and Design*, Vol. 27, No. 8, pp. 632 – 639, 2006.
- [32] Blok, H.: “The Flash Temperature Concept”, *Wear*, Vol. 6, No. 6, pp. 463 – 494, 1963.
- [33] Mao, K.: “A Numerical Method for Polymer Composite Gear Flash Temperature Prediction”, *Wear*, Vol. 262, No. 11-12, pp. 1321 – 1329, 2007.
- [34] Mao, K.: “A New Approach for Polymer Composite Gear Design”, *Wear*, Vol. 262, No. 3-4, pp. 432 – 441, 2007.
- [35] BS 6168, “Specification for Non-metallic Spur Gears”, London, 1987.
- [36] Fernandes C. M. C. G. i dr.: “Finite Element Method Model to Predict Bulk and Flash Temperatures on Polymer Gears”, *Tribology International*, Vol. 120, pp. 255 – 268, 2018.
- [37] Fernandes C. M. C. G. i dr.: “Hybrid Polymer Gear Concepts to Improve Thermal Behaviour”, *Journal of Tribology*, Vol. 141, No. 3, 2019.
- [38] Černe, B.; Duhovnik, J.; Tavčar, J.: “Semi-analytical Flash Temperature Model for Thermoplastic Polymer Spur Gears with Consideration of Linear Thermo-mechanical Material Characteristics”, *Journal of Computational Design and Engineering*, Vol. 6, pp. 617 – 628, 2019.
- [39] Černe, B. i dr.: “Thermo-mechanical Modeling of Polymer Spur Gears with Experimental Validation Using High-Speed Infrared Thermography”, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 146, 103734, 2019.
- [40] Mbarek, M. i dr.: “Experimental Simulation of the Friction, Temperature, and Wear Distributions for Polyamide – Steel Gear Contact Using Twin-disc Setup”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, Vol. 230, No. 9, pp. 1127 – 1138, 2016.
- [41] Evans, S. M.; Keogh, P. S.: “Wear Mechanisms in Polyoxymethylene Spur Gears”, *Wear*, Vol. 428, No. 2, pp. 356 – 365, 2019.
- [42] Breeds, A. R. i dr.: “Wear Behaviour of Acetal Gear Pairs”, *Wear*, Vol. 166, No. 1, pp. 85 – 91, 1993.
- [43] Cayer-Barrioz, J. i dr.: “Abrasive Wear Micromechanisms of Oriented Polymers”, *Polymer*, Vol. 45, No. 8, pp. 2729 – 2736, 2004.
- [44] Marcellan, A. i dr.: “Third Body Effects in the Wear of Polyamide: Micro-mechanisms and Wear Particles Analysis”, *Wear*, Vol. 266, No. 9-10, pp. 1013 – 1020, 2009.
- [45] Kalin, M.; Kupec, A.: “The dominant effect of temperature on the fatigue behaviour of polymer gears”, *Wear*, Vol. 376-377, pp. 1339 – 1346, 2017.

- [46] Mao, K. i dr.: “Friction and Wear Behaviour of Acetal and Nylon Gears”, *Wear*, Vol. 267, No. 1-4, pp. 639 – 645, 2009.
- [47] Hu, Z.; Mao, K.: “An Investigation of Misalignment Effects on the Performance of Acetal Gears”, *Tribology International*, Vol. 116, pp. 394 – 402, 2017.
- [48] Ghazali, W. B. M. i dr.: “Investigation on Wear Characteristic of Biopolymer Gear”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 257, No. 1, 2017.
- [49] Zorko, D.; Demšar, I.; Tavčar, J.: “An Investigation on the Potential of Bio-based Polymers for Use in Polymer Gear Transmissions”, *Polymer Testing*, Vol. 93, 106994, 2021.
- [50] Yakut, R.; Duzcukoglu, H.; Demirci, M. T.: “The Load Capacity of PC/ABS Spur Gears and Investigation of Gear Damage”, *Archives of Materials Science and Engineering*, Vol. 40, No. 1, pp. 41 – 46, 2009.
- [51] Senthilvelan, S.; Gnanamoorthy, R.: “Damage Mechanisms in Injection Molded Unreinforced, Glass and Carbon Reinforced Nylon 66 Spur Gears”, *Applied Composite Materials*, Vol. 11, No. 6, pp. 377 – 397, 2004.
- [52] Karthi, V.; Marimuthu, K.: “Experimental Investigations of Nylon 6 Polymer Matrix Composites Material (70:30) for Wear Reduction in Gears”, *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, Vol. 26, pp. 226 – 234, 2019.
- [53] Tavčar, J.; Grkman, G.; Duhovnik, J.: “Accelerated Lifetime Testing of Reinforced Polymer Gears”, *Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing*, Vol. 12, No. 1, 2018.
- [54] Mao, K. i dr.: “The Wear Resistance Improvement of Fibre Reinforced Polymer Composite Gears”, *Wear*, Vol. 426-427, pp. 1033 – 1039, 2019.
- [55] Lu, Z. i dr.: “Identification of Failure Modes of a PEEK-Steel Gear Pair Under Lubrication”, *International Journal of Fatigue*, Vol. 125, pp. 342 – 348, 2019.
- [56] Dearn, K. i dr.: “Lubrication Regimes in High-Performance Polymer Spur Gears”, *Advances in Tribology*, Vol. 2013, 2013.
- [57] Jia, J. i dr.: “A Comparative Investigation of the Friction and Wear Behavior of Polyimide Composites Under Dry Sliding and Water-lubricated Condition”, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 356, No. 1-2, pp. 48 – 53, 2003.
- [58] Baena, L.; Zuleta, E.; Calderon, J.: “Evaluation of the Stability of Polymeric Materials Exposed to Palm Biodiesel and Biodiesel-organic Acid Blends”, *Polymers*, Vol. 10, No. 5, 511, 2018.

- [59] Domitran, Z.: “Utjecaj odstupanja dimenzija na životni vijek polimernih zupčanika”, doktorska disertacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [60] Energizing Chemistry LanXESS: “Moisture absorption in Durethan Polyamide Parts”, s Interneta, https://techcenter.lanxess.com/scp/americas/en/docguard/PIB_Durethan_Moisture_Absorption.pdf?docId=76987, 5. svibnja 2022.
- [61] Energizing Chemistry LanXESS: “Conditioning of Parts made from Durethan Polyamide Resin”, s Interneta, https://techcenter.lanxess.com/scp/americas/en/docguard/PIB_Durethan_Conditioning_of_Parts.pdf?docId=76990, 5. svibnja 2022.
- [62] Senthilvelan, S.; Gnanamoorthy, R.: “Condition Monitoring Of Nylon And Glass Filled Nylon Gears”, Applied Composite Materials, Vol. 11, pp. 377 – 397, 2004.
- [63] Senthilvelan, S.; Gnanamoorthy, R.: “Damping Characteristics of Unreinforced, Glass and Carbon Fiber Reinforced Nylon 6/6 Spur Gears”, Polymer Testing, Vol. 25, No. 1, pp. 56 – 62, 2006.
- [64] Dearn, K. D.; Walton, D.: “Acoustic Emissions from Polymeric Gears”, Proceedings of the World Congress on Engineering 2009, Vol. 2, London – UK, 2009.
- [65] Walton, D. i dr.: “The Efficiency and Friction of Plastic Cylindrical Gears Part 1: Influence of Materials”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering, Part J: Journal of Engineering Tribology, Vol. 216, No. 2, pp. 75 – 92, 2002.
- [66] Walton, D. i dr.: “The Efficiency and Friction of Plastic Cylindrical Gears Part 2: Influence of Tooth Geometry”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering, Part J: Journal of Engineering Tribology, Vol. 216, No. 2, pp. 93 – 104, 2002.
- [67] Singh, A. K.; Siddartha, “Development and Investigation on Transmission Efficiency of Functionally Graded Material-Based Polybutylene Terephthalate Spur Gears”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2019.
- [68] Senthilvelan, S.; Gnanamoorthy, R.: “Effect of Rotational Speed on the Performance of Unreinforced and Glass Fiber Reinforced Nylon 6 Spur Gears”, Materials and Design, Vol. 28, No. 3, pp. 765 – 772, 2007.
- [69] van Melick, H.: “Tooth-bending Effects in Plastic Spur Gears”, Gear Technology, Vol. 24, No. 7, pp. 58 – 66, 2007.
- [70] van Melick, H.; van Dijk, H. K.: “High-Temperature Testing of Stanyl Plastic Gears: A Comparison with Tensile Fatigue Data”, Gear Technology, pp. 59 – 65, 2010.

- [71] Mao, K. i dr.: “The Wear and Thermal Mechanical Contact Behaviour of Machine Cut Polymer Gears”, *Wear*, Vol. 332-333, pp. 822 – 826, 2015.
- [72] Alharbi, K. A. M.: “Wear and Mechanical Contact Behavior of Polymer Gears”, *Journal of Tribology*, Vol. 141, No. 1, 011101, 2018.
- [73] Zhang, Y. i dr.: “A Physical Investigation of Wear and Thermal Characteristics of 3D Printed Nylon Spur Gears”, *Tribology International*, Vol. 141, 105953, 2020.
- [74] Dimić, A. i dr.: “The Influence of Material on the Operational Characteristics of Spur Gears Manufactured by the 3D Printing Technology”, *Strojnicki časopis – Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 68, No. 3, pp. 261 – 270, 2018.
- [75] Calignano, F. i dr.: “Investigation of the Mechanical Properties of a Carbon Fibre-reinforced Nylon Filament for 3D Printing”, *Machines*, Vol. 8, No. 3, 52, 2020.
- [76] Zhang, Y. i dr.: “A Parametric Study of 3D Printed Polymer Gears”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 107, No. 1-4, pp. 4481 – 4492, 2020.

POPIS OZNAKA I KRATICA

3D Printing	trodimenzionalno tiskanje
<i>A</i>	faktor oblika ovisan o obliku distribucije toplinskog toka
<i>a</i>	pola širine kontaktne površine
ABS	akrilonitril/butadien/stiren
AISI	Američki institut za željezo i čelik
ASTM	Američko društvo za ispitivanje i materijale
ATSP	aromatični termoreaktivni kopoliester
B100	biodizel
BS	Britanski standard
<i>b</i>	širina zupčanika
CAD	računalom podržano dizajniranje
CF	karbonska vlakna
<i>c</i>	specifični toplinski kapacitet
DIN	Njemački institut za norme
DSC	diferencijalna pretražna kalorimetrija
<i>E</i>	modul elastičnosti
EM	elektromotor
EN	Europske norme
engl.	engleski
F	uteg
FDM/FFF	taložno srašćivanje
FEM	metoda konačnih elemenata
FGM	funkcionalno gradirani materijal
FP	frekventni pretvarač
FZG	Istraživački centar za zupčanike i konstrukciju zupčanika

F_t	tangencijalna sila na diobenom promjeru zupčanika
F/b	specifična sila na boku zuba zupčanika
G	modul smicanja
GF	staklena vlakna
IK	infracrvena termalna kamera
ISO	Međunarodna organizacija za normizaciju
JIS	Japanski standardi za industriju
KV	kardansko vratilo
k	koeficijent toplinske vodljivosti
MV	mjerno vratilo
MoS ₂	molibden disulfid
m	modul
n	brzina vrtnje
PA	poliamid
PA 11	poliamid na osnovi aminoundekanske kiseline
PA 12	poliamid na osnovi dodekanske kiseline
PA 46	poliamid na osnovi politetrametilen adipinske kiseline
PA 46-CF 30	poliamid na osnovi politetrametilen adipinske kiseline s dodatkom 30% karbonskih vlakana
PA 46-GF 30	poliamid na osnovi politetrametilen adipinske kiseline s dodatkom 30% staklenih vlakana
PA 6	poliamid na osnovi ϵ kaprolaktana
PA 6-CF 30	poliamid na osnovi ϵ kaprolaktana s dodatkom 30% karbonskih vlakana
PA 6-GF 20	poliamid na osnovi ϵ kaprolaktana s dodatkom 20% staklenih vlakana
PA 6-GF 30	poliamid na osnovi ϵ kaprolaktana s dodatkom 30% staklenih vlakana
PA 610	poliamid na osnovi heksametilendiamin sebacinske kiseline
PA 612	poliamid na osnovi heksametilendiamin dodekanske kiseline

PA 612-CF 20	poliamid na osnovi heksametilendiamin dodekanske kiseline s dodatkom 20% karbonskih vlakana
PA 618	poliamid na osnovi PA 6 i PA 66, kopolimer
PA 66	poliamid na osnovi heksametilendiamin adipinske kiseline
PA 66-CF 20	poliamid na osnovi heksametilendiamin adipinske kiseline s dodatkom 20% karbonskih vlakana
PA 66-GF 20	poliamid na osnovi heksametilendiamin adipinske kiseline s dodatkom 20% staklenih vlakana
PA 66-GF 30	poliamid na osnovi heksametilendiamin adipinske kiseline s dodatkom 30% staklenih vlakana
PA 6/66	poliamid na osnovi PA 6 i PA 66, kopolimer (ϵ kaprolaktama i heksametilendiamin adipinske kiseline)
PAI-GF	poli (amid-imid) ojačan staklenim vlaknima
PBT	poli(butilen-tereftalat)
PBT-GF 15	poli(butilen-tereftalat) s dodatkom 15% staklenih vlakana
OBT-GF 30	poli(butilen-tereftalat) s dodatkom 30% staklenih vlakana
PC	polikarbonat
PC	računalo
PE-HD	polietilen visoke gustoće
PE-UHMW	polietilen ultra visoke molekulske težine
PET-P	poliester na osnovi poli (etilen-tereftalata)
PEEK	poli(eter-eter-keton)
P_{fr}	prosječna snaga trenja
PI	poliimid
PI-CF 15	poliimid s dodatkom 15% karbonskih vlakana
PLA	polilaktid
POM	poli(oksimetilen)

POM-GF 28	poli(oksimetilen) s dodatkom 28% staklenih vlakana
PP	polipropilen
PPA	poliftalamid
PS	polistiren
PTFE	poli(tetrafluoretilen), Teflon
PVC	poli(vinil-klorid)
q	toplinski tok
q_{av}	prosječni toplinski tok
R_a	srednje aritmetičko odstupanje profila
r	referentni polumjer
r_a	radijus tjemene kružnice
SEM	pretražni elektronski mikroskop
SEC	kromatografija isključenjem po veličini
SI	silikon
SLA	fotopolimerizacija ili stereolitografija
SLS	selektivno lasersko srašćivanje
SS	nehrđajući čelik
T	moment uvijanja
T_{amb}	temperatura okoline
T_{bulk}	temperatura tijela zupčanika
T_{flash}	trenutna temperatura dodira boka zuba
T_g	temperatura staklišta
T_{max}	maksimalna temperatura
$T_{surface}$	maksimalna temperatura na površini zuba zupčanika
T_t	temperatura tališta
t	vrijeme trajanja opterećenja

t_r	vrijeme retardacije
V	vratilo
VDI	Udruga njemačkih inženjera
v	brzina
v_1	brzina klizanja zupčanika 1
v_2	brzina klizanja zupčanika 2
v_g	brzina klizanja
WEDM	elektroerozijska obrada žicom
Z	broj zubi promatranog zupčanika
Z_{1-4}	zupčanicu na uređaju sa zatvorenim tokom snage
α_w	pogonski zahvatni kut
β	kut nagiba boka zuba
ε_{el}	elastična ili energijska deformacija
ε_{en}	entropijska ili viskoelastična deformacija
ε_p	plastična ili viskofluidna deformacija
ε_u	ukupna deformacija
ε_{∞}	najveća zabilježena deformacija
η	prigušenje
μ	koeficijent trenja
ρ	gustoća
ρ_F	polumjer zaobljenja prijelazne krivulje u korijenu zuba zupčanika
τ	smično naprezanje
ω	širina toplinskog toka

SAŽETAK

Polimeri zbog svoje jednostavne i jeftine obradivosti, široke palete materijala, kao i svojstava koje posjeduju postaju sve zastupljeniji te je njihova primjena sve učestalija. Automobilska i prehrambena industrija, avioindustrija i medicina samo su neka od područja primjene polimernih materijala, a sve češće se koriste kao elementi konstrukcija. Polimerni zupčanici imaju sve veći značaj kao elementi prijenosa snage i gibanja. Kao najznačajniji, ali ne i jedini, polimerni materijali za izradu zupčanika posebno se ističu poliamidi (PA) i poliacetali (POM) koji zbog svoje temperaturne postojanosti pri povišenim temperaturama, izvrsnih mehaničkih svojstava te sjajnih triboloških svojstava zadovoljavaju zahtjeve potrebne za funkcionalnost i pouzdan rad polimernih zupčanika. U ovom radu je prikazan utjecaj geometrije, temperature i zagrijavanja polimernih zupčanika na njihov životni vijek te na mehanizme trošenja i tipove otkaza istih. Dodavanjem karbonskih ili staklenih vlakana ili nekih drugih komponenti osnovnom materijalu utječe se na svojstva, ponašanje i performanse polimernih zupčanika. Također, prikazano je kako promjena opterećenja i brzine vrtnje, raspodjela opterećenja i upijanje vlage utječu na rad i životni vijek polimernih zupčanika. Učinkovitost polimernih zupčanika ovisi o izboru polimernog materijala i opterećenju koje se prenosi, a značajan utjecaj ima i podmazivanje. Konvencionalni postupci poput injekcijskog prešanja i raznih postupaka rezanja najčešći su načini izrade polimernih zupčanika, ali u novije vrijeme zastupljeni su i postupci aditivne proizvodnje. Ispitivanje polimernih zupčanika provodi se uređajima s otvorenim ili zatvorenim tokom snage te su isti predstavljeni i objašnjeni u ovom radu. Radi široke palete polimera, s različitom strukturom i svojstvima, koji se koriste za izradu zupčanika, ali i velikog broj parametara koji utječu na njihova svojstva i ponašanje, u svrhu poznavanja istih nužno je provoditi istraživanja. Upravo zbog navedenih razloga još uvijek ne postoje standardi za proračun polimernih zupčanika, već samo smjernice i preporuke. Pregledom i analizom literature vezane za polimerne zupčanike (oko 60 znanstvenih, konferencijskih i stručnih radova) doneseni su zaključci o problemima koji se javljaju kod polimernih zupčanika te je uočen potencijal i potreba za istraživanjem istih u svrhu znanstvenog doprinosa, kao i pomoći drugim znanstvenicima koji provede istraživanja iz navedenog područja.