

# VEČKRITERIJSKI PRISTOP PRI KONSTRUIRANJU POLIMERNIH ZOBNIKOV

Jože Tavčar, Borut Černe, Jože Duhovnik, Damijan Zorko

## Izvleček:

Zanesljivo dimenzioniranje polimernih zobnikov do danes ostaja odprt izziv zaradi specifičnih lastnosti polimernih materialov in zapletenih razmerij med različnimi geometrijskimi in obratovalnimi parametri. Za vrednotenje polimernih zobnikov so na voljo nacionalni standardi (BS 6168: 1987, JIS B 1759: 2013) in smernice nemškega inženirskega združenja VDI 2736: 2014, ki pa imajo več omejitev. V večini primerov konstrukterji polimernih zobnikov nimajo popolne slike vseh interakcij med konstrukcijskimi parametri, zato je poleg preračuna potrebno večje število testnih prototipov za doseganje optimalne zasnove in velikosti zobnikov. V prispevku so sistematično analizirani konstrukcijski kriteriji pri valjastih polimernih zobnikih: trdnost v korenu zob, bočna trdnost, temperatura, obraba, deformacija, kakovost zobnikov, kakovost vgradnje, volumen zobnikov in stroški izdelave. Občutljivost in medsebojna povezanost posameznih kriterijev sta za večjo nazornost predstavljeni v diagramih. Članek se zaključi s pregledom oblik poškodb pri različnih pogojih obratovanja in s sistematičnim pregledom, kako izboljšati posamezne kriterije pri zasnovi konstrukcije polimernih zobnikov. V nadaljevanju (v naslednji številki) bosta predstavljena algoritem računalniškega programa za večkriterijsko optimiranje polimernih zobnikov in primer uporabe. Glavni prispevki raziskave so celosten pristop h konstruiranju polimernih valjastih zobnikov in smernice, kako vplivamo na konstrukcijske parametre.

## Ključne besede:

polimerni zobniki, oblike poškodb, obraba, temperaturna obremenitev, obratovalni pogoji, večkriterijski preračun

## 1 Uvod

Polimerni zobniki dobro blažijo tresljaje, lahko obratujejo brez mazanja in so zaradi načina izdelave v velikih serijah s tehnologijo injekcijskega brizganja v večgnezdem orodju praviloma cenejši. Šibka lastnost polimernih zobnikov je njihova občutljivost na višje temperature, pa tudi nove oblike poškodb, ki so odvisne od stopnje obremenitve in številnih drugih parametrov pri obratovanju zobnikov [1–3]. Mehanske lastnosti polimernih zobnikov je mogoče izboljšati z uporabo ojačitev, kot so steklena ali karbonska vlakna. Za zanesljivo delovanje je najbolj pomembno nadzorovati temperaturo zobnikov. Trajnost zobniškega para je mogoče povečati z izbiro tribološko združljivega para polimernih materialov [4]. Za izračun nosilnosti kovinskih zobnikov so na voljo veljavni standardi, kot sta DIN 3990: 1987 [5] in ISO 6336: 2006 [6]. Za polimerne zobnike tako natančno določeni standardi niso na voljo. Najpogosteje uporabljena metoda za dimenzioniranje polimernih zobnikov je bila več let nemška smernica VDI

2545 [7], ki je bila izdana leta 1981 in umaknjena leta 1996. Leta 2014 je bila objavljena nova smernica za konstruiranje plastičnih zobnikov VDI 2736 [8]. Nova smernica vsebuje poenostavljeno različico trdnostnega izračuna kovinskih zobnikov po standardu DIN 3990: 1987 [5] in je dopolnjena z modelom izračuna temperature in obrabe zobnikov. Vendar ima smernica še vedno na voljo le zelo malo podatkov o polimernih materialih. Zato se konstrukterji soočajo s pomanjkanjem podatkov o polimernih materialih in jasnih navodil za preračun nosilnosti.

Polimerni zobniki odpovejo zaradi različnih oblik poškodb. Glavne oblike vključujejo obrabo, utrujanje materiala in poškodbe, ki jih povzroča povišana temperatura [2], [9]. Vrste poškodb se razlikujejo glede na obratovalne pogoje, ki določajo obremenitve, geometrijo zobnikov, parjenje materialov in izbrani način mazanja. Na primer: zobniška dvojica iz polimernih materialov bo pri sorazmerne visoki obremenitvi odpovedala zaradi prekomerne temperature obremenitve, pri manjši obremenitvi zaradi obrabe, v primeru mazanja pa gre pričakovati lom zob zaradi utrujanja materiala [2]. Zaradi velikega nihanja mehanskih lastnosti, triboloških pogojev in toplotne prevodnosti je obnašanje pri odpovedi polimernih zobnikov zelo raznoliko. Bravo et al. so predstavili pregled različnih oblik poškodb. S testiranjem polimernih zobnikov pod različnimi obremenitvami je bilo potrjeno, da je oblika poškodbe

**Dr. Jože Tavčar**, univ. dipl. inž., Univerza v Lundu, Švedska, **dr. Borut Černe**, mag. inž., **prof. dr. Jože Duhovnik**, univ. dipl. inž., **dr. Damijan Zorko**, mag. inž., vsi Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

močno odvisna od obremenitve [10]. Natančnost napovedi loma kot posledice utrujanja je omejena zaradi pomanjkanja podatkov o materialih, kar omejuje nadaljnjo uporabo polimernih zobnikov v težkih pogojih [10]. Pogosto se zgodi, da pride do kombinacije več oblik poškodb – npr. material se stopi in zob se zlomi ali pa se zob obrabi in zlomi zaradi zmanjšane debeline. Različni avtorji so z različnimi metodami raziskovali vrste poškodb in pogoje, v katerih se te pojavijo: taljenje materiala in deformacija zob [2], [11], [12], lom zaradi utrujanja zobnega korena [13], [14], obraba [15], bočne obremenitve na aktivnem delu zoba [16]. Testiranje zobnikov na ustreznem preizkuševališču za izvedbo testov dobe trajanja omogoča napoved, kakšna vrsta poškodbe se lahko pričakuje v aplikaciji. Glede na pričakovano vrsto poškodbe zasnujemo geometrijo zobniške dvojice. O polimernih zobnikih je bilo izvedenih veliko raziskav, vendar je vsaka študija osredotočena na določeno tehnično vprašanje in njihovih rezultatov ne moremo posplošiti oziroma uporabiti za različne industrijske namene in pogoje obratovanja. Trenutno nemška smernica VDI 2736: 2014 [8] za polimerne zobnike ponuja najbolj temeljit pristop – upošteva različne načine odpovedi in predlaga modele za izračun. Pomanjkljivost omenjene smernice je, da poleg pomanjkanja razpoložljivih podatkov o polimernih materialih uporabniku ne daje celostne slike in ne upošteva vseh kriterijev za načrtovanje in povezav med oblikami poškodb. Cilj izvedene raziskave je bil izdelati celovit pristop za konstruiranje in preračun polimernih zobnikov. Predlagani postopek optimizacije temelji na algoritmu z več kriteriji, ki hkrati upošteva vse ključne kriterije za načrtovanje. Predstavljeni večkriterijski pristop upošteva napetosti v korenu zoba, bočne obremenitve, temperaturo venca zobnika/boka, obrabo, deformacije zob, stroške in prostornino zobniške dvojice (enostopenjski prenosnik). Glavna prispevka raziskav sta večkriterijski model in sistematičen pregled medsebojnih povezav med različnimi kriteriji. Predstavljena so konstrukcijska pravila za izboljšanje zasnove zobnikov glede na posamezne kriterije.

## 2 Občutljivost konstrukcijskih parametrov na kriterije sprejemljivosti polimernih zobnikov

Polimerni zobniki imajo zaradi specifičnosti in raznolikosti materialov več omejitev, ki jih je potrebno preveriti med načrtovanjem: korenska trdnost, bočna trdnost, temperatura pri obratovanju, obraba, deformacija, kakovost zobnikov in končna kakovost vgradnje zobniške dvojice. Zasnova polimernih zobnikov mora upoštevati vse prej navedene kriterije. Najbolj kritični kriteriji in oblika poškodb so določeni z nivojem obremenitve, uporabljenim parom materialov in pogoji delovanja (hitrost vrtenja, temperatura okolja, mazanje). Zasnova polimernih zobnikov je zahteven iterativen postopek,

ki mora upoštevati in uravnotežiti več kriterijev [2]. Konstrukter mora razumeti in poznati osnovne pristope, kako izboljšati posamezne kriterije polimerne zobniške dvojice [17]. Za bolj nazorno predstavitev je bil raziskan vpliv konstrukcijskih parametrov in analizirana njihova občutljivost z računalniškim programom OptiTooth, ki so ga razvili avtorji tega prispevka in je predstavljen v več diagramih spodaj (*slike 2, 5, 6 in 8*). V naslednjih odsekih so povzeti računski modeli za posamezne kriterije v skladu z VDI 2736: 2014 [8].

### 2.1 Korenska napetost in bočni tlak ( $\sigma_F$ , $\sigma_H$ )

Večji modul ali širina zobnika linearno vplivata na zmanjšanje napetosti v korenu zoba (enačba 1). Takšni ukrepi povečajo tudi velikost pogona (zobnikov), kar večkrat ni sprejemljivo. Alternativna rešitev je mogoča z uporabo zmogljivejšega ali ojačanega polimernega materiala, ki omogoča višjo raven dovoljenih obremenitev [14]. Napetost v korenu zoba lahko zmanjšamo s spreminjanjem oblike zoba – na primer s pozitivnim premikom profila ali z uporabo večjega vpadnega kota profila. Korenska napetost je odvisna tudi od zaokrožitve v korenu, ki je pri izdelavi z odrezavanjem pogojena z radijem zaokrožitve rezalnega roba vrha zobnice. Pri izdelavi z injekcijskim brizganjem imamo pri oblikovanju korenske zaokrožitve nekoliko več svobode in jo lahko ustrezno prilagodimo. Algoritem za večkriterijsko optimizacijo neposredno ne upošteva različnih tehnik, uporabljenih za izboljšanje zmogljivosti polimernih zobnikov, kot so: asimetrični zobni profil [18], spremenljiva širina zobnika [19], [20] ali hladilni vložki [21]. Da povečamo robustnost izvedene zobniške dvojice, lahko z določanjem mejnih vrednosti vsakega od navedenih kriterijev dosežemo različne izboljšave.

*Slika 2a* prikazuje vpliv normalnega modula zoba na napetosti v korenu. V primeru konstantne medosne razdalje se z zmanjšanjem normalnega modula (število zob se povečuje) napetost v korenu znatno poveča. Obratno vpliva povečanje modula na zmanjšanje korenske napetosti. Napetost v korenu sicer ni edini parameter, ki definira zmogljivost polimerne zobniške dvojice. Povečan modul sočasno negativno vpliva na temperaturo zobnika, zlasti na manjši zobnik v paru. Večje število zob (manjši modul) izboljša izkoristek prenosa in zato zmanjša telesno temperaturo zobnika (*slika 2b*). Takšno obnašanje predvideva tudi model za izračun telesne temperature zobnikov po smernici VDI 2736, hkrati je bilo to potrjeno tudi na meritvah temperature testnih zobnikov [14]. Iz navedenega sledi, da lahko v primeru, ko visoka temperatura kritično vpliva na poškodbo zobnika, povečanje velikosti modula stanje še poslabša. Velikost napetosti in temperatura zobnega korena sta bili izračunani v skladu s smernico VDI 2736. Nihanje korenske napetosti na *sliki 2a* je posledica različnih premikov profila ( $x_{p,2}$ ) kot mehanizma za prilagajanje določeni medosni razdalji.

**Napetost v korenu zoba:**

$$\sigma_F = K_F \cdot Y_{Fa} \cdot Y_{Sa} \cdot Y_\epsilon \cdot Y_\beta \cdot \frac{F_t}{b \cdot m_n} \quad (1)$$

- $K_F$  faktor dinamičnih obremenitev v korenu zoba
- $Y_{Fa}$  faktor oblike zoba
- $Y_{Sa}$  faktor koncentracije napetosti
- $Y_\epsilon$  faktor vpliva prekrivanja
- $Y_\beta$  faktor vpliva kota poševnosti
- $F_t$  nazivna tangencialna sila
- $b$  širina zobnika
- $m_n$  normalni modul

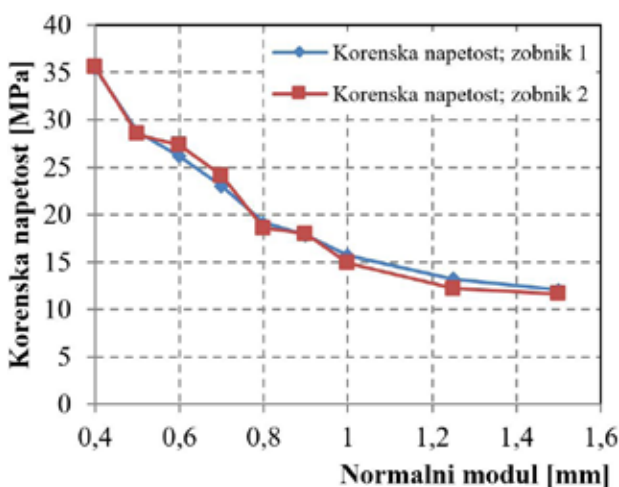


**Slika 1:** Lom v korenu zoba zaradi utrujenosti materiala (PPS z ogljikovimi vlakni)

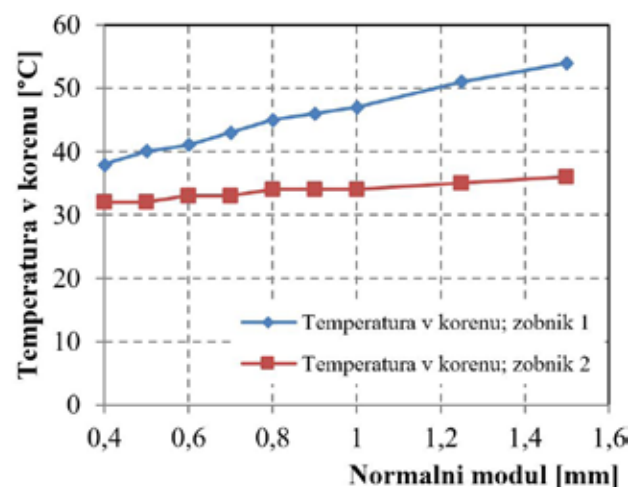
Plak na boku zob pri tribološko kompatibilnih materialih ni kritičen [2]. V skladu z VDI 2736 bočnega tlaka ni potrebno preverjati v primeru majhnega števila obremenitvenih ciklov (<1000) ali pri suhem teku brez mazanja. Bočni tlak lahko zmanjšamo s skrbnim izborom geometrije zobnika (stopnja prekrija in ukrivljenost kontaktnih bokov zob) [13] in z dodajanjem ustreznih korekcij profila [22]. Povečanje širine in premera zobnika zmanjšuje bočni tlak s potenco 0,5, zato je njun vpliv zmanjšan glede na doseženi volumen zobniške dvojice. Enačba 2 predstavlja model VDI 2736 [8] za izračun tlaka na bok zoba.

Za celovitejše razumevanje problematike večkriterijske optimizacije moramo razumeti fizikalno ozadje posamičnega mehanizma okvare. Na osnovi primerne števila preizkusov (izbranih zobniških dvojic), pregleda poškodb različnih izvedb v industrijski praksi in pregleda literature ugotavljamo, da različne stopnje obremenitve in različni pogoji pri obratovanju ustvarjajo različne oblike poškodb [2]. Za boljše razumevanje naj navedemo nekaj značilnih primerov poškodb: (1) nenadne pulzne obremenitve lahko povzročijo trenutni lom v korenu zob (slika 1); (2) kratkotrajna preobremenitev ustvarja trenutne visoke temperature, še posebej, če je hitrost vrtenja (in posledično drsenja v kontaktu) visoka, kar povzroči deformacijo zob (slika 4) ali celo taljenje polimernega zobnika; (3) mazani polimerni zobniki v paru z jeklenim pastorkom obratujejo dlje, na koncu je oblika poškodbe največkrat jamičenje (pitting) ali lom zob v korenu zaradi utrujanja [16] [23] in (4) obraba zob v primeru nemazanih zobniških dvojic [15].

Model napovedovanja odpovedi je bil na primeru zobniške dvojice, z jeklenim pogonskim zobnikom



a)



b)

**Slika 2:** (2a) Napetost v korenu zob. Povečevanje širine in modula linearno vpliva na zmanjšanje napetosti. (2b) Telesna temperatura zobnika v odvisnosti od normalnega modula. Parametri zobniškega para: medosna razdalja  $a = 50$  mm, širina zobnika  $b = 10$  mm, obremenilni moment  $T_d = 0.5$  Nm, hitrost vrtenja  $n = 2400$  1/min, prestavno razmerje  $i = 4$ , koeficient trenja  $\mu = 0.18$  (POM/ PA66 par materialov). Podatki so izračunani v OptiTooth.

in gnanim zobnikom iz polioksimetilena (POM), analiziran z metodo končnih elementov (MKE) in potrjen s testi na preizkuševališču [24]. Zaradi krajšega zapisa bomo v nadaljevanju zobniške dvojice označevali po principu pogonski / gnani (npr. jeklo / POM), kjer bo najprej naveden material pogonskega zobnika, nato pa material gnanega. Rezultati testov so povzeti na *sliki 3*. Ugotavljamo, da za vsak par materialov zobniške dvojice lahko določimo mejno vrednost števila obremenitvenih ciklov, kjer se prelomi kritični kriterij trajnostnega loma v korenu zoba (korenska trdnost) v kritični kriterij jamičenja na boku zoba (bočni površinski tlak). Poškodbe zaradi utrujanja na bokih zob, na primer jamičenje ali obraba, se lahko pojavijo v pogojih zmernih obremenitev, medtem ko se poškodba utrujanja zaradi korenske obremenitve zob pojavi pri večjih obremenitvah, kot je opaženo pri POM [24] in PEEK [25]. V primeru zmanjšanja obremenitve se oblika poškodbe spremeni iz trenutnega loma zaradi preobremenitve v korenu v lom zaradi utrujanja v korenu. Dodatno zmanjšanje stopnje obremenitve podaljša dobo trajanja in oblika poškodbe se spremeni v obrabo ali utrujanje na boku zoba (jamičenje) (*slika 3*). Utrujanje boka zob je v večini primerov mogoče doseči le z oljnim mazanjem, sicer prej nastopi odpoved zaradi povečane obrabe na boku zoba [16].

Podobne rezultate so dosegli Lu et al. [23] na paru materiala jeklo / PEEK. Meritve obrabe in mikrotopografija površine zoba so pokazale, da mikrojamice v bližini kotalne točke vodijo do končnega loma zob pri zmernih obremenitvenih pogojih [23]. Material zobnika določa tudi načine odpovedi, Sarita et al. [26] so opazili jamičenje v bližini kotalne točke pri suhih razmerah, ko so bili preizkušani zobniški pari jeklo / PA66 izpostavljeni majhni obremenitvi. Ojačitev polimernih materialov s steklenimi vlakni znatno poveča največjo dopustno obremenitev v primeru dobe trajanja dolge nekaj milijono-

nov obremenitvenih ciklov [14]. Polimerni materiali brez ojačitev so v primerjavi z ojačanimi v primeru dolgotrajnega delovanja več deset milijonov ciklov (pri nižjih obremenitvah) manj občutljivi na oblike poškodb z utrujanjem [14]. Zaradi navedenih ugotovitev je potrebno zobnike, izdelane iz ojačanih polimerov, posebej skrbno preizkusiti pri različnih pogojih obratovanja.

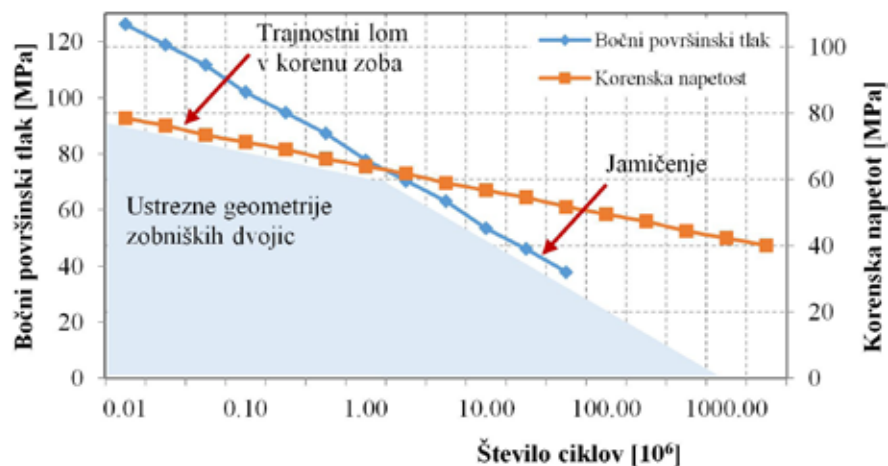
## 2.2 Temperatura zobnikov

Temperatura pri obratovanju zobniške dvojice vpliva na dobo trajanja polimernih zobnikov, saj že sorazmerno majhne spremembe v temperaturi lahko pomembno vplivajo na mehanske lastnosti polimerov. Temperaturo zobnika med obratovanjem je mogoče zmanjšati z nižjim koeficientom trenja, boljše toplotno prevodnostjo materialov ali z zmanjšanjem moči, ki se prenaša preko zobniške dvojice (enačba 3). Zmanjšanje trenja dosežemo s primernim izborom materialov zobniške dvojice in mazanjem [26], zmanjšanje moči pa z nižanjem momenta ali kotne hitrosti [27]. Če je postavljena zahteva, da mora zobniška dvojica obratovati brez mazanja, je možna uporaba materiala z notranjim mazivom. Koeficient trenja ni lastnost posameznega materiala, temveč para materialov, zato je potrebno tega skrbno izbrati [14], [28]. Večanje polimernega zobnika izboljša odvajanje toplote in tako zmanjša temperaturo zobnika, zato je navadno kritičen manjši zobnik v paru. V več aplikacijah korenska temperatura zobnika in kontaktna temperatura določata obliko poškodbe. Zato je natančno modeliranje temperaturnega stanja zobniške dvojice ključnega pomena [3]. Černe et al. [22] so upoštevali vpliv geometrijske kakovosti zobnikov na generacijo toplote. Dobra zasnova profila boka zoba lahko dodatno zniža temperaturo zobnika [15]. Več raziskovalcev je dokazalo tudi možnost implementacije modelov po meto-

Bočni tlak na zobniku:

$$\sigma_H = (Z_{HX}) \cdot \sqrt{\frac{F_t \cdot K_H \cdot (i + 1)}{(b \cdot d_l \cdot i)}} \quad (2)$$

$Z_{HX}$  skupina faktorjev  
 $K_H$  faktor za bočno obremenitev  
 $i$  prestavno razmerje



*Slika 3* : Korelacija med obliko poškodbe korenskega in bočnega utrujanja glede na raven obremenitve in število obremenitev za POM-zobnike. Podatki so povzeti po Luju [24].

di končnih elementov (MKE) za modeliranje telesne in bočne obratovalne temperature polimernih zobnikov v suhem teku [2, 29] in mazalnih pogojih [29]. Deformacija zob, kot je prikazano na *sliki 4*, ali celo taljenje zobnikov sta tipični obliki poškodbe, ki ju pospeši oz. povzroči termična preobremenitev zobnikov.

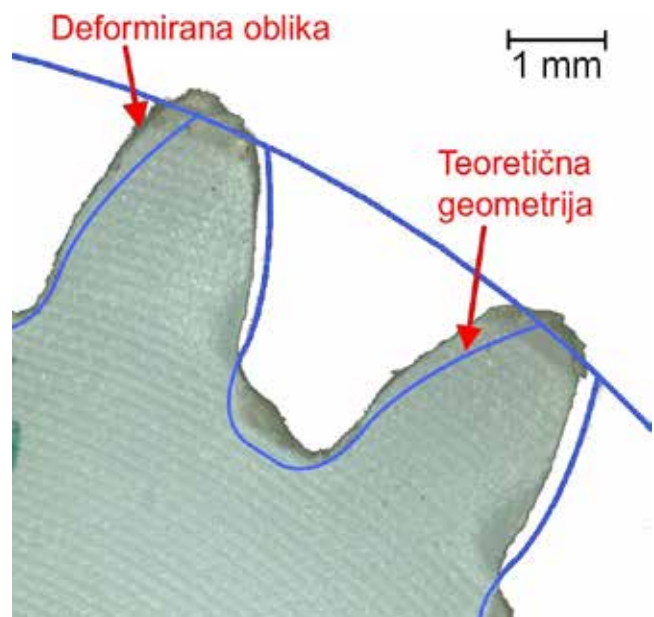
Pogonski pastorek je v primeru redukcije hitrosti ( $i > 1$ ) obremenjen bistveno bolj kot gnani zobnik. Korenska temperatura zobnika je višja v primeru majhne medosne razdalje (*slika 5a*), prav tako pa je število obremenitvenih ciklov za faktor prestavnega razmerja večje na pogonskem (malem zobniku) kot na gnanem (velikem). V industrijski praksi je zato pri reduktorjih pogosto uporabljena rešitev, da je za pastorek uporabljen bolj kakovosten material (npr. jeklo, aluminij itd.), ki ima večjo dopustno obremenitev (korensko in bočno) in dobro prevaja toplotni tok iz aktivnega boka zoba ter tako posredno znižuje temperaturo na gnanem zobniku.

Na *sliki 5a* je prikazano, kako se temperatura zobnikov zmanjšuje s povečevanjem medosne razdalje. Večji zobniki omogočajo odvajanje toplote pri nižji temperaturi zaradi večje površine. Pogonski zobnik mora imeti znatno višjo temperaturo, da omogoča enak pretok toplote kot večji zobnik 2. Večji zobnik ima tudi manjšo napetost v korenu zoba (*slika 5b*). Model za izračun kontaktne temperature po VDI 2736 ni realen [36], [39], saj je izračunana temperatura pogosto nad tališno temperaturo polimernih materialov. Kontaktno temperaturo je tudi težko izmeriti, zato je iz predstavljenih primerov večkriterijske optimizacije izključena.

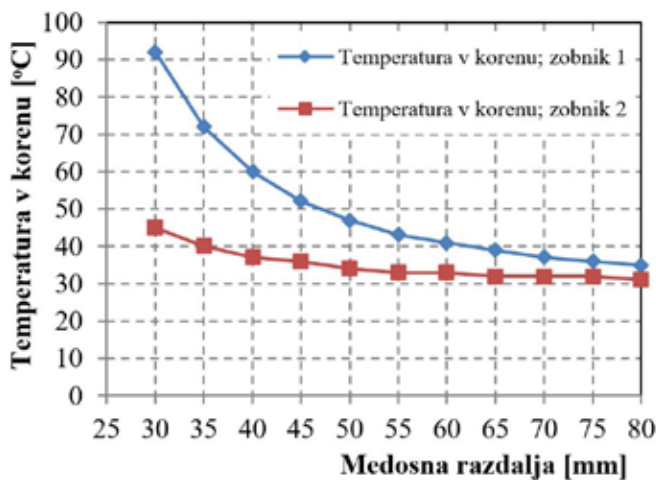
**Temperatura zobnikov:**

$$\vartheta_{\text{bulk}} = \vartheta_o + P \cdot \mu \cdot H_v \cdot \frac{k_f}{b \cdot z \cdot (v \cdot m_n)^{0.75}} \quad (3)$$

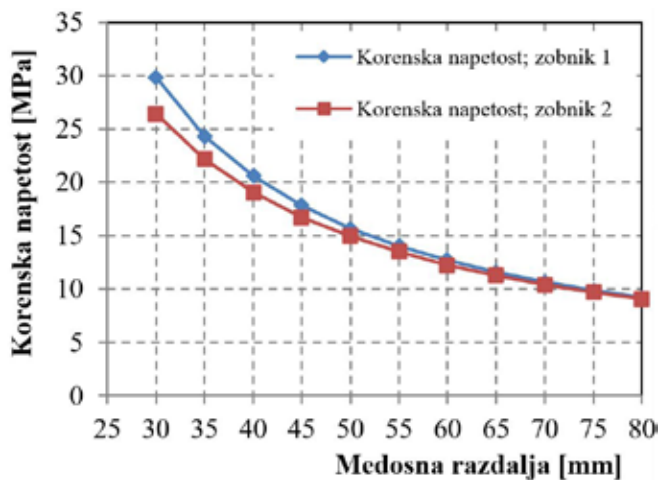
- $\vartheta_o$  temperatura okolice
- $P$  moč
- $\mu$  koeficient trenja
- $H_v$  stopnja izgub
- $k_f$  koeficient prenosa toplote
- $z$  število zob
- $v$  tangencialna hitrost



*Slika 4 : Deformacija zob zaradi temperaturne preobremenitve*



a)



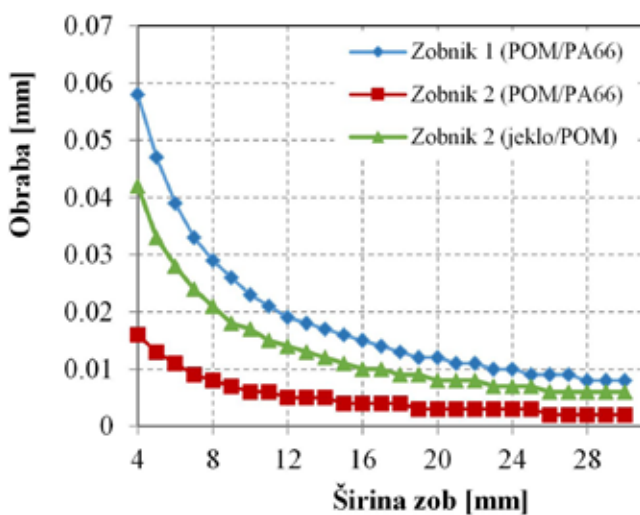
b)

*Slika 5 : (5a) Temperatura zobnika in (5b) Napetost v korenu zoba glede na medosno razdaljo med zobniki. Parametri para zobnikov: modul  $m = 1,0$  mm, širina zobnika  $b = 10$  mm, nivo obremenitve  $T_d = 0,5$  Nm, hitrost  $n = 2400$  1/min, temperatura okolice  $\vartheta_o = 30$  °C, koeficient trenja  $\mu = 0,18$  (POM/PA66), prestavno razmerje  $i = 4$ . Preračun je bil izveden v OptiTooth*

## 2.3 Obraba zobnikov

Povečana stopnja obrabe je značilna za zobniško dvojico, sestavljeno iz kovinskega in polimernega zobnika, kjer sta trdoti kontaktnih površin zelo različni. Pravilna obdelava kovinskih zobnikov in ustrezna oblika vrha zoba bistveno zmanjšata stopnjo obrabe [15]. V primeru povečane obrabe se poškoduje geometrija zobnega profila. V prvi fazi se zaradi nepravilnega ubiranja povečajo vibracije, raven hrupa in temperatura, kasneje se zaradi povečane obrabe presek zob znatno zmanjša, kar vodi do loma zoba [15].

Znani so trije mehanizmi obrabe, ko je polimer v stiku s kovino: adhezivna, abrazivna in termična obraba [30]. Pričakovalo bi se, da manjša hrapavost bokov zob jeklenih zobnikov zmanjša obrabo.



**Slika 6 :** Obraba glede na širino zobnika za POM / PA66 in za zobniški par materiala jeklo / POM. Parametri zobniškega para:  $z_1 = 20$ ,  $z_2 = 80$ ,  $m = 1$  mm,  $N_L = 10^7$ ;  $T_d = 0,5$  Nm. Preračun izveden v OptiTooth.

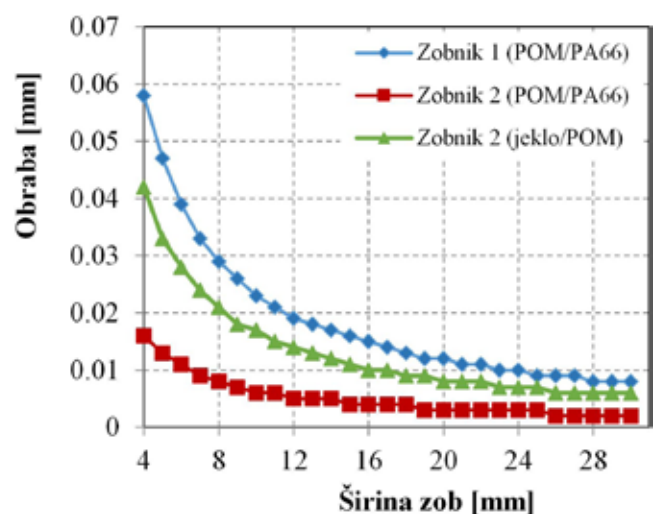


**Slika 7 :** Izrazita obraba zobnika iz PEEK-a, ki je bil testiran v paru z jeklenim zobnikom.

Študije so pokazale, da je obraba izredno gladkih površin primerljiva z obrabo sorazmerno hrapavih površin [31]. Kadar je površina pregroba, to pospeši obrabo polimera, saj hrapava površina trde kovine abrazivno obrablja polimer [31]. Obraba polimerov je odvisna od tega, kako globoko prodirajo vrhovi hrapave kovinske površine, od strižnega kota in drsne dolžine. V praksi se stopnja obrabe spreminja, saj se doline postopoma napolnijo z odstranjenim polimernim materialom, ki tvori prenosni sloj, kar zmanjša prodiranje kovinske površine, zato se posledično upočasni odnašanje materiala [31].

Ugotovitev več raziskovalcev je, da tribološki testi, kot je test »pin-on-disk«, ne dajejo dobre napovedi za obrabo zobnikov in da so testi z zobniškimi pari najboljša možnost za opredelitev koeficienta obrabe [32–34]. Cathelin [33] je predlagal izboljšave tehnik merjenja trdnosti, utrujanja in obrabe. Namesto testiranja po metodi »pin-on-disk« se dobijo primerljivejši rezultati za določitev koeficienta obrabe in koeficienta trenja s preskušanjem z dvema valjema [33]. Moder [35] je predstavil napredno napravo za izvajanje testa valj na valj z napredno tehnologijo nadzora za suho in mazano obratovanje.

Obraba v primeru tribološko združljivega para polimernih materialov, kot je POM / PA66, ni kritična oblika poškodbe [11]. Pogonski zobnik ima v primeru večjih obremenitev znatno višjo stopnjo obrabe v primerjavi z gnanim zobnikom (slika 6). Zato je za pogonski zobnik priporočljiva uporaba odpornjšega materiala; pogosto uporabljena rešitev je uporaba kovinskega zobnika, ki omogoča bolj kompaktno zasnovo pogona [15]. Vendar kovinski zobnik na splošno poveča stopnjo obrabe polimernega zobnika v paru, kar pomeni, da je potrebno obrabo polimernega zobnika preveriti (slika 6).



**Slika 8 :** Napredovanje obrabe po modelu VDI 2736 na pogonu z gnanim POM-zobnikom v odvisnosti od števila obremenitvenih ciklov (par jeklo / POM,  $z_1 = 20$ ,  $z_2 = 80$ ,  $m = 1$  mm,  $T_d = 0,5$  Nm,  $b = 10$  mm,  $k_w = 3,4 \cdot 10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/(N·m)).

**Obraba:**

$$W_m = \frac{T_d \cdot 2 \cdot \pi \cdot N_L \cdot H_V \cdot k_w}{(b \cdot z \cdot l_{FI})} \quad (4)$$

- $T_d$  moment obremenitve
- $N_L$  število obremenitvenih ciklov
- $H_V$  stopnja izgub
- $k_w$  koeficient obrabe
- $b$  širina zobnika
- $z$  število zob
- $l_{FI}$  dolžina aktivnega boka

Model obrabe (enačba 4) iz VDI 2736 je linearno povezan z velikostjo obremenitve, s številom obremenitvenih ciklov ( $N_L$ ) in koeficientom obrabe ( $k_w$ ). V večini primerov obraba ni kritična do nekaj milijonov obremenitvenih ciklov. Pri številu obremenitvenih ciklov nad  $10^6$  pa obraba postane pomembna tudi pri majhnem koeficientu obrabe ( $k_w$ ) (slika 8). Nad  $10^6$  obremenitvenih ciklov je napredek obrabe pogosto bolj kritičen kot lom zaradi korenske obremenitve, zlasti pri kombinacijah kovina / polimer pri suhem teku, kot je prikazano na sliki 7. Različni obratovalni pogoji določajo način okvare v paru materiala jeklo / PEEK. Pri suhem teku ali mazanju z mastjo je obraba prevladujoča oblika poškodbe [15]. Zobnik iz PEEK-materiala se zlomi v korenu zaradi zmanjšane debeline zob in ne zaradi utrujanja ali povišane temperature. Če zobniška dvojica iz materialov jeklo / PEEK obratuje v olju, se vzdržljivost izboljša in jamičenje na boku zoba postane značilna oblika poškodbe [25].

**2.4 Deformacija zob**

Deformacije polimernih zobnikov so v primerjavi s kovinskimi zobniki bistveno večje. Če želimo zmanjšati raven hrupa ali če je zahtevana toleranca napake pri prenosu momenta majhna, moramo izračunati deformacije zob pogonskega in gnanege zobnika [36], [37]. Pri konstruiranju zobnikov iz enakih ali podobnih materialov (podoben elastični modul materialov) se napaka pri prenosu zmanjša s povečanjem stopnje prekritja. Kadar se uporabljajo pomembno različni materiali (večkratna razlika elastičnega modula), je eden od načinov za zmanjšanje velikosti napak pri ubiranju zagotavljanje uravnotežene togosti zob med pogonskim in gnanim zobnikom [38]. Če so izpolnjene ostale konstrukterske zahteve, deformacija zoba ni kritična. Deformacija zoba je večja pri večji obodni sili in manjša pri večji širini zobnika ter pri večjem modulu elastičnosti. Model za izračun deformacije zob po VDI 2736 je predstavljen v enačbi 5. *Tabela 1* primerja deformacije vrhov zob, določene po modelu VDI 2736 in z MKE-analizo. V primeru večjega števila zob ( $m = 0,6$  mm) je deformacija zob izračunana z MKE bistveno manjša kot po modelu VDI 2736, saj VDI-model ne upošteva povečanja stopnje prekrivanja. Deformacija je predstavljena kot pomik vrha zoba,

zato je deformacija večjega zoba ( $m = 1$  mm) večja, čeprav je kot deformiranega zoba v resnici manjši kot pri  $m = 0,6$  mm (*tabela 1*). Razlike med predloženim poenostavljenim izračunom in MKE so od 10 % do 55 %, zato jih je pri natančnejših preračunih potrebno upoštevati oziroma moramo za natančno analizo deformacije zoba uporabiti MKE.

**Deformacija zoba:**

$$\lambda = \frac{7.5 \cdot F_t}{(b \cdot \cos(\beta))} \cdot \left( \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \quad (5)$$

- $F_t$  tangencialna sila
- $b$  širina zobnika
- $\beta$  kot poševnosti
- $E_{1,2}$  modul elastičnosti (1. zobnik, 2. zobnik)

*Tabela 1 : Primerjava deformacije zob za različne stopnje obremenitve med modelom VDI 2736 in analizo MKE (par POM / PA66, širina zobnika  $b = 6$  mm,  $d_1 = d_2 = 20$  mm)*

Obremenitev [Nm]	modul = 1,0 mm $z_1 = z_2 = 20$		modul = 0,6 mm $z_1 = z_2 = 40$	
	deform. VDI 2736 [mm]	deform. FEM [mm]	deform. VDI 2736 [mm]	deform. FEM [mm]
0,4	0,027	0,031	0,031	0,020
0,5	0,039	0,034	0,039	0,025
0,6	0,046	0,040	0,046	0,030

**2.5 Stroški in volumen**

V večini primerov so podane konstrukcijske zahteve po visokozmogljivih zobnikih z nizkimi stroški in v majhnem prostoru. Značilni parametri, ki določajo zmogljivost zobniške dvojice, kot so korenska napetost, temperatura, obraba in deformacije, se spreminjajo s povečevanjem velikosti zobnikov. Praviloma zagotavljajo večjo zmogljivost pri prenosu moči, obratno sorazmerno pa povečajo stroške izdelave in volumen (porabo materiala) za posamezno konstrukcijsko rešitev. Uporaba visokozmogljivih polimerov z notranjim mazanjem in ojačitvenimi vlakni lahko zmanjša prostornino, posredno pa lahko znatno vpliva na višje stroške zobniških dvojic. K višji zmogljivosti zobnikov lahko pomembno prispevata tudi večja kakovost zobnikov in kakovost namestitve [22]. Zato se v primeru zahtevanih večjih natančnosti geometrije polimernih zobnikov namesto tehnologije brizganja praviloma uporablja tehnologija rezkanja. Za kompaktno izvedbo z manjšimi dimenzijami je za pogonski zobnik pogosto uporabljen kovinski material.

Predstavljeni model za izračun stroškov izdelave zobniške dvojice je zmnožek prostornine, gostote

materiala, stroškov materiala zobnika in stroškov izdelave (enačba 6). Konstrukter mora najti ravnovesje med funkcionalnimi zahtevami, značilnostmi materialov, prostornino in stroški. Avtorji predlagajo določitev stroškov izdelave in materialov glede na kontekst uporabe in kompetence dobavitelja zobnikov. Poznavanje stroškov in parametrov, ki vplivajo na stroške, je pomembno že v fazi idejne zasnove, zato je potrebno čim prej preveriti ključne parametre pri načrtovanju. Hkratno upoštevanje tehničnega in stroškovnega vidika pri polimernih zobnikih je glede na vedenje avtorjev izviren pristop v znanstvenih publikacijah.

#### Stroški zobnikov:

$$C = \sum_{i=1}^2 V_i \cdot \rho_i \cdot (C_{kg i} + C_{p i}) \quad (6)$$

$V_{1,2}$	volumen zobnikov 1,2
$\rho_{1,2}$	gostota materialov zobnikov 1,2
$C_{kg 1,2}$	strošek materiala na kg
$C_{p 1,2}$	strošek predelave materiala na kg

### 3 Povzetek o oblikah poškodb in kriteriji za optimizacijo

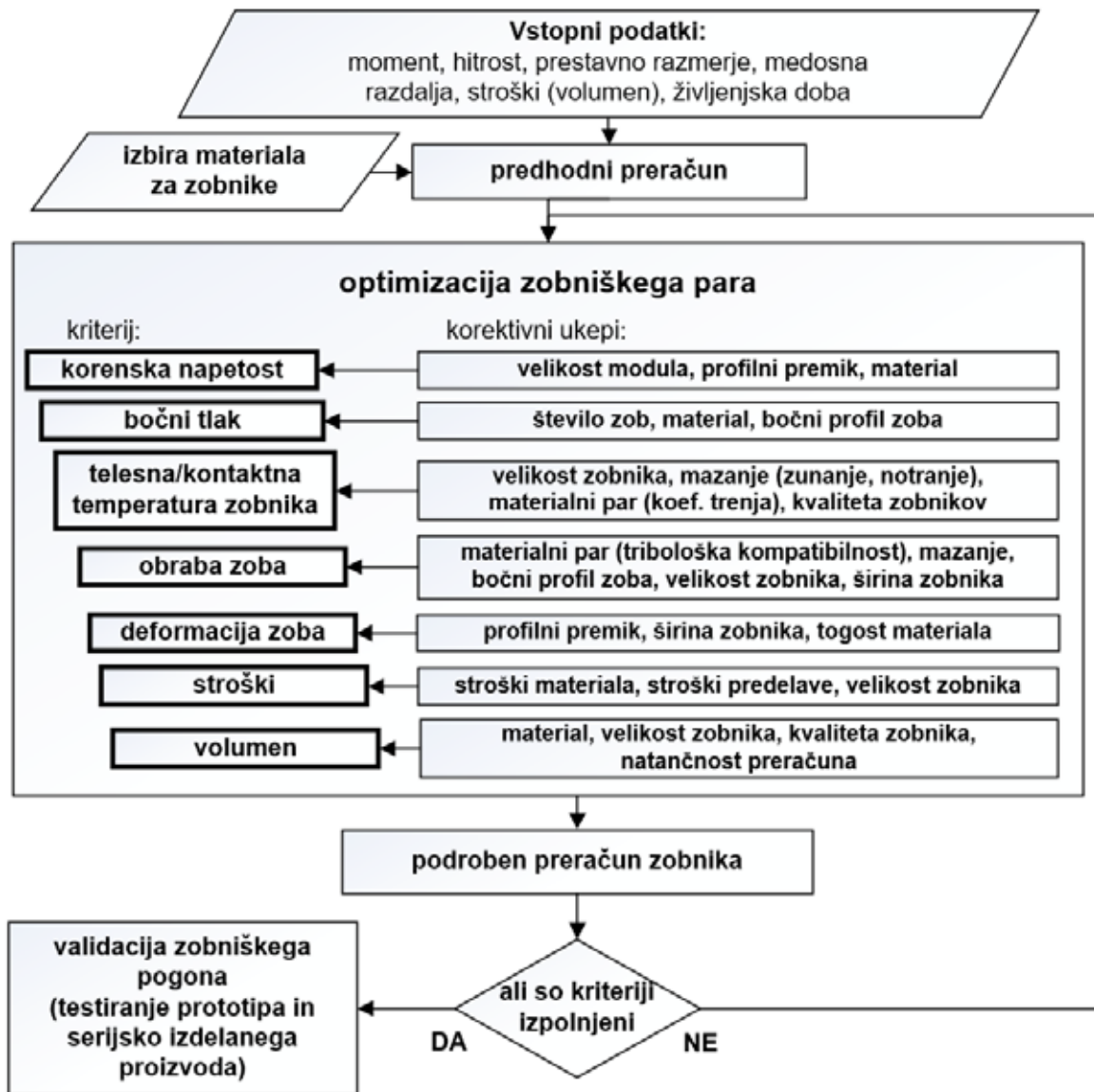
Povzetek o oblikah poškodb polimernih zobnikov in reference na izvedene raziskave so predstavljeni v tabeli 2. Oblike poškodb so določene s stopnjo obremenitve, vrsto mazanja, hitrostjo obratovanja in dvojico materialov v ubiranju. Med različnimi polimernimi materiali obstajajo nekatere razlike, vendar je mogoče določiti splošna pravila za konstruiranje. Temperaturna preobremenitev z deformacijo zobnikov je značilna za pare polimernih zobnikov v primeru suhega teka, visoke stopnje obremenitve in velike vrtilne hitrosti. Delovanje v olju zmanjša trenje, bolje odvaja toploto in tako preprečuje toplotne poškodbe. Doba trajanja se znatno podaljša, jamičenje (pitting) je tipična oblika poškodbe za delovanje v olju. Lom v korenu zoba ali v kotalni točki je pričakovana poškodba pri visoko obremenjenih polimernih zobnikih, ki so mazani z mastjo. Oblika poškodbe z obrabo je značilna za polimerne zobnike ki obratujejo v paru z jeklenim zobnikom, v primeru zmerne obremenitve in suhega teka ali celo pri mazanju z mastjo.

**Tabela 2 :** Primerjava med obratovalnimi pogoji in oblikami poškodb z referencami na izvedene raziskave

Pogoji obratovanja	Oblika poškodbe, par materiala v ubiranju in reference
<b>Zelo visoka obremenitev</b> Suhi tek, če ni določeno	<b>Taljenje zaradi visoke temperature:</b> jeklo/PA66 [1]; PA66-GF30/PA66-GF30 [39]; jeklo/PA66 [26]; jeklo/PEEK [23] <b>Lom v korenu zoba zaradi preobremenitve:</b> jeklo/POM – oljno mazanje [40],[16]; različni materiali [10]; POM/PA6 [11]; POM/PA6 [12]; POM/POM [41]; POM/PA6 [42]; POM/POM [27] <b>Termična deformacija zob:</b> POM/PA6 [11]; POM/PA6 [12]; jeklo/POM – mazano z oljem [16] <b>Lom zoba v kotalni točki:</b> PA66/PA66 [4]; jeklo/PA66 [26] <b>Obraba zob:</b> PA66/POM, POM/PA66 [4]
<b>Visoka obremenitev</b> Suhi tek, če ni določeno	<b>Plastična deformacija zob:</b> jeklo/PA66 [1]; jeklo/PA66 [26]; POM/PA6 [11] <b>Lom v korenu zoba zaradi preobremenitve:</b> jeklo/ABS, jeklo/HDPE, jeklo/POM [2]; POM/PA6 [11]; POM/PA6 [42]; jeklo/PA66 [26]; PA66-GF*/POM, PPS-CF*/POM [14]; jeklo/POM – mazano z oljem [16], [40]; jeklo/PEEK – mazano z oljem [23]; jeklo/POM – mazano z oljem [24] <b>Obraba zob:</b> jeklo/ABS, jeklo/HDPE, jeklo/POM [2]; POM/POM [43]
<b>Nizka obremenitev</b> Dolgotrajno obratovanje Suhi tek	<b>Lom zoba v korenu zaradi utrujanja:</b> jeklo/PEEK [15]; jeklo/PEEK; jeklo/PA66-GF, jeklo/PA66-CF [1]; PA66-GF/POM [14], PPS-CF/POM [14]; POM/PA6 [11]; POM/PA6 [12] <b>Obraba zob:</b> jeklo/PEEK [15], [44]; jeklo/PA66-GF[1]; jeklo/PA66-CF [1]; POM/POM [9]; različni materiali [10] <b>Razpoke v predelu kotalne točke:</b> jeklo/PA66 [1] <b>Jamičenje v predelu kotalne točke:</b> jeklo/PA66 [26]
<b>Nizka obremenitev</b> Dolgotrajno obratovanje Mazano z oljem	<b>Jamičenje v predelu kotalne točke in na bokih zoba:</b> jeklo/PEEK [23]; jeklo/PEEK [25] <b>Lom zaradi utrujanja v predelu kotalne točke in proti vrhu zoba:</b> jeklo/POM [45] [FII, 2020]; jeklo/POM [24] <b>Poškodbe zaradi obrabe v področju blizu korena zoba:</b> jeklo/PA66 [26]

\* GF – steklena vlakna, CF – karbonska vlakna





Slika 9 : Postopek optimizacije zobnikov in kako vplivati na kriterije pri zasnovi konstrukcije zobnikov

Trajnost zobnikov se meri kot zmnožek hitrosti vrtenja in časa delovanja tako, da je rezultat število obremenitvenih ciklov. Na dobo trajanja vplivajo različni pogoji delovanja: geometrija in kakovost zobnikov, stopnja obremenitve, temperatura okolice, mazanje in material. Pomembno je vedeti, kako izbrati material zobnikov, z ojačitvenimi vlakni ali brez njih, in kako vplivati na napetost v korenu zob ali na temperaturo zobnika. Pravila, kako vplivati na konstrukcijske kriterije, so povzeta na *sliki 9*. Konstrukter zobniškega pogona kombinira med različnimi kriteriji in konstrukcijskim parametri ter v iterativnem postopku razvije visoko zmogljivo zasnovano pogona. Optimalno načrtovanje in izračun različnih variant je mogoče podpreti z večkriterijsko funkcijo in računalniškim programom, kot bo predstavljeno v drugem prispevku. Večkriterijski pristop upošteva primerno ravnovesje med vsemi omenjenimi kriteriji glede na delovne pogoje in konstrukcijske omejitve.

## 4 Zaključki

Glavni prispevek raziskave je celosten pristop pri konstruiranju polimernih zobnikov. Konstrukter mora razumeti in poznati, katere so predvidene oblike poškodb in kako lahko s spremembo konstrukcijskih parametrov vpliva na različne kriterije. Postopki za opredelitev različnih kriterijev so predstavljeni v uvodnem poglavju, povzetek, kako izboljšati vsakega od kriterijev za načrtovanje, je podan na *sliki 9*. Korektivni ukrepi za konstrukcijske spremembe temeljijo na fizikalnem modelu posameznega kriterija. Konstrukcijska pravila ali smernice za zasnovo polimernih zobnikov in zobniških pogonov temeljijo na izkušnjah avtorjev, zbranih med večletnim preizkušanjem polimernih zobnikov, izvajanja aplikativnih projektov in pregleda publikacij [2], [3], [11], [14], [15].

Kriteriji za načrtovanje so predstavljeni skupaj s tipičnimi oblikami poškodb. Oblike poškodb so odvisne od stopnje obremenitve, števila obremenitvenih ciklov, mazanja, hitrosti vrtenja in izbranega materialnega para. Soodvisnosti med različnimi konstrukcijskimi parametri so predstavljene v več diagramih. Prispevek ilustrativnih diagramov je boljše razumevanje, katere so šibke točke zobniškega para, na primer, da ima manjši zobnik v paru bistveno višjo temperaturo, kar posledično vpliva na trdnost in obrabno odpornost polimernega materiala.

Karakterizacija dobe trajanja in poškodbenega mehanizma zobnika se izvede pri vnaprej izbrani geometriji zobnika, določeni temperaturi in hitrosti vrtenja. Če se geometrija in obratovalni pogoji v aplikaciji in izračunu z natančnimi dimenzijami bistveno razlikujejo od pogojev pri preizkušanih zobnikih, sta zanesljivost predvidevanja dobe trajanja in natančnost izračuna nižji. Optimizacija geometrije zobnikov temelji na poznavanju trdnostnih karakteristik materiala, ki morajo upoštevati temperaturne in snovne transformacije. Brez zanesljivih podatkov o materialu ni mogoče natančno optimirati zobnikov, še posebej v primeru uporabe različnih viskozno-možljivih materialov. Zato se je raziskovalna skupina LECAD usmerila v sistematično testiranje različnih kombinacij polimernih materialov in določanje njihovih karakteristik, ki so pomembne za večkriterijski preračun.

Predstavljeno gradivo je izhodišče za večkriterijski model in algoritem za računalniško podprto optimizacijo polimernih zobnikov. Podrobnejša predstavitev bo podana v naslednji številki revije Ventil.

## Reference

- [1] S. Senthilvelan, R. Gnanamoorthy, Damage Mechanisms in Injection Molded Unreinforced, Glass and Carbon Reinforced Nylon 66 Spur Gears, *Appl. Compos. Mater.* 11 (2004) 377-397. <https://doi.org/10.1023/B:ACMA.0000045313.47841.4e>.
- [2] P. K. Singh, Siddhartha, A. K. Singh, An investigation on the thermal and wear behavior of polymer based spur gears, *Tribol. Int.* 118 (2018) 264-272. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.10.007>.
- [3] B. Černe, M. Petkovšek, J. Duhovnik, J. Tavčar, Thermo-mechanical modeling of polymer spur gears with experimental validation using high-speed infrared thermography, *Mech. Mach. Theory.* 146 (2020) 103734. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.103734>.
- [4] K. Mao, W. Li, C.J. Hooke, D. Walton, Friction and wear behaviour of acetal and nylon gears, *Wear.* 267 (2009) 639-645. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.10.005>.
- [5] DIN 3990: Calculation of load capacity of cylindrical gears, German national standard, (1987).
- [6] ISO 6336: Calculation of load capacity of spur and helical gears, Parts 1-6, International standard, (2006).
- [7] VDI 2545: Zahnräder aus thermoplastischen Kunststoffen, (1981).
- [8] VDI 2736: Blatt 2, Thermoplastische Zahnräder, Stirngetriebe, Tragfähigkeitsberechnung. VDI Richtlinien, (2014).
- [9] M. Jain, S. Patil, S.S. Ghosh, A review on failure characteristics of polymeric gears, *AIP Conf. Proc.* 2148 (2019) 030057. <https://doi.org/10.1063/1.5123979>.
- [10] A. Bravo, D. Koffi, L. Toubal, F. Erchiqui, Life and damage mode modeling applied to plastic gears, *Eng. Fail. Anal.* 58 (2015) 113-133. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.08.040>.
- [11] A. Pogačnik, J. Tavčar, An accelerated multilevel test and design procedure for polymer gears, *Mater. Des.* 1980-2015. 65 (2015) 961-973. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.10.016>.
- [12] B. Trobentar, S. Kulovec, G. Hlebanja, S. Glodež, Experimental failure analysis of S-polymer gears, *Eng. Fail. Anal.* 111 (2020) 104496. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104496>.
- [13] D. Zorko, S. Kulovec, J. Tavčar, J. Duhovnik, Different teeth profile shapes of polymer gears and comparison of their performance, *J. Adv. Mech. Des. Syst. Manuf.* 11 (2017) JAMDSM0083-JAMDSM0083. <https://doi.org/10.1299/jamdsm.2017jamdsm0083>.
- [14] J. Tavčar, G. Grkman, J. Duhovnik, Accelerated lifetime testing of reinforced polymer gears, *J. Adv. Mech. Des. Syst. Manuf.* 12 (2018) JAMDSM0006-JAMDSM0006. <https://doi.org/10.1299/jamdsm.2018jamdsm0006>.
- [15] D. Zorko, S. Kulovec, J. Duhovnik, J. Tavčar, Durability and design parameters of a Steel/PEEK gear pair, *Mech. Mach. Theory.* 140 (2019) 825-846. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.07.001>.
- [16] C. Hasl, C. Illenberger, P. Oster, T. Tobie, K. Stahl, Potential of oil-lubricated cylindrical plastic gears, *J. Adv. Mech. Des. Syst. Manuf.* 12 (2018) JAMDSM0016-JAMDSM0016. <https://doi.org/10.1299/jamdsm.2018jamdsm0016>.
- [17] J. Tavčar, J. Kos, D. Zorko, J. Duhovnik, A multi-criteria polymer gears design optimisation procedure, in: *Proc. 3rd Int. Conf. High Perform. Plast. Gears 2019*, Garching/Munich, Germany, 2019: pp. 1473-1484.
- [18] A. Karthik Pandian, S.S. Gautam, S. Senthilvelan, Experimental and numerical investigation of the bending fatigue performance of symmetric and asymmetric polymer gears, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J. Mater. Des. Appl.* (2020) 1464420720909486. <https://doi.org/10.1177/1464420720909486>.
- [19] H. Düzcükoğlu, PA 66 spur gear durability improvement with tooth width modification, *Mater. Des.* 30 (2009) 1060-1067. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.10.005>.

- org/10.1016/j.matdes.2008.06.037.
- [20] H. İmrek, Performance improvement method for Nylon 6 spur gears, *Tribol. Int.* 42 (2009) 503–510. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.08.011>.
- [21] P.K. Singh, Siddhartha, A.K. Singh, An investigation on the effects of the various techniques over the performance and durability of polymer gears, 5th Int. Conf. Mater. Process. Charact. ICMPC 2016. 4 (2017) 1606–1614. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.01.184>.
- [22] B. Cerne, D. Zorko, J. Duhovnik, J. Tavcar, R. Zavbi, Flash Temperature Analysis Method for Polymer Gears With Consideration of Deviations in Meshing Kinematics, in: *IDETC-CIE2019, Volume 10: 2019 International Power Transmission and Gearing Conference*, 2019. <https://doi.org/10.1115/DETC2019-97824>.
- [23] Z. Lu, H. Liu, C. Zhu, H. Song, G. Yu, Identification of failure modes of a PEEK-steel gear pair under lubrication, *Int. J. Fatigue*. 125 (2019) 342–348. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.04.004>.
- [24] Z. Lu, C. Zhu, H. Song, G. Yu, The effect of injection molding lunker defect on the durability performance of polymer gears, *Int. J. Mech. Sci.* in print (n.d.).
- [25] C.M. Illenberger, T. Tobie, K. Stahl, Flank load carrying capacity of oil-lubricated high performance plastic gears, *Forsch. Im Ingenieurwesen*. 83 (2019) 545–552. <https://doi.org/10.1007/s10010-019-00332-x>.
- [26] B. Sarita, S. Senthilvelan, Effects of lubricant on the surface durability of an injection molded polyamide 66 spur gear paired with a steel gear, *Tribol. Int.* 137 (2019) 193–211. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.02.050>.
- [27] D. Miler, M. Hoić, Z. Domitran, D. Žeželj, Prediction of friction coefficient in dry-lubricated polyoxymethylene spur gear pairs, *Mech. Mach. Theory*. 138 (2019) 205–222. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.03.040>.
- [28] B. Černe, J. Duhovnik, J. Tavčar, Semi-analytical flash temperature model for thermoplastic polymer spur gears with consideration of linear thermo-mechanical material characteristics, *J. Comput. Des. Eng.* (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2019.03.001>.
- [29] C. M. C. G. Fernandes, D. M. P. Rocha, R. C. Martins, L. Magalhães, J. H. O. Seabra, Finite element method model to predict bulk and flash temperatures on polymer gears, *Tribol. Int.* 120 (2018) 255–268. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.12.027>.
- [30] G. W. Stachowiak, A. W. Batchelor, *Engineering tribology*, 4. ed, BH, Butterworth-Heinemann/Elsevier, Amsterdam, 2014.
- [31] J. Moder, F. Grün, F. Summer, M. Kohlhauser, M. Wohlfahrt, Application of high performance composite polymers with steel counterparts in dry rolling/sliding contacts, *Polym. Test*. 66 (2018) 371–382. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.01.009>.
- [32] N. A. Wright, S. N. Kukureka, Wear testing and measurement techniques for polymer composite gears, *Wear*. 251 (2001) 1567–1578. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00793-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00793-1).
- [33] J. Cathelin, Material data for advanced plastic gear simulation, *Int. Conf. Gears 2019 GarchingMunich Ger. VDI-Berichte*. 2355 (2019) 1379–1390.
- [34] S. Matkovič, A. Pogačnik, M. Kalin, Comparison between VDI 2736 wear calculation and experimentally obtained results, *Int. Conf. Gears 2019 GarchingMunich Ger. VDI-Berichte*. (n.d.) 1311–1321.
- [35] J. Moder, F. Grün, M. Stoschka, I. Gódor, A Novel Two-Disc Machine for High Precision Friction Assessment, *Adv. Tribol.* 2017 (2017) 1–16. <https://doi.org/10.1155/2017/8901907>.
- [36] J. Cathelin, E. Letzelter, M. Guingand, J.-P. de Vaujany, L. Chazeau, Experimental and Numerical Study of a Loaded Cylindrical PA66 Gear, *J. Mech. Des.* 135 (2013). <https://doi.org/10.1115/1.4023634>.
- [37] B. Banodiya, V. K. Karma, Measurement of transmission error in spur gears, *Int. Res. J. Eng. Technol.* 4 (2017) 2369–2375.
- [38] P. K. Meuleman, D. Walton, K. D. Dearn, D. J. Weale, I. Driessen, Minimization of transmission errors in highly loaded plastic gear trains, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.* 221 (2007) 1117–1129. <https://doi.org/10.1243/09544062JMES439>.
- [39] R. Yakut, H. Düzcükoglu, Examining the Abrasion Behaviour of PA 66 Gears in Different Cycles, *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2014 (2014) 721731. <https://doi.org/10.1155/2014/721731>.
- [40] C. Hasl, P. Oster, T. Tobie, K. Stahl, Bending strength of oil-lubricated cylindrical plastic gears, *Forsch. Im Ingenieurwesen*. 81 (2017) 349–355. <https://doi.org/10.1007/s10010-017-0224-2>.
- [41] J. Duhovnik, D. Zorko, L. Sedej, The effect of tooth flank geometry on the lifetime of injection moulded polymer gears, in: *Proc. Int. Conf. High Perform. Plast. Gears 2015, Garching*, 2015: pp. 1203–1218.
- [42] J. Duhovnik, D. Zorko, L. Sedej, The effect of the teeth profile shape on polymer gear pair properties, *Teh. Vjesn. – Tech. Gaz.* 23 (2016). <https://doi.org/10.17559/TV-20151028072528>.
- [43] K. Mao, P. Langlois, Z. Hu, K. Alharbi, X. Xu, M. Milson, W. Li, C.J. Hooke, D. Chetwynd, The wear and thermal mechanical contact behaviour of machine cut polymer gears, *Wear*. 332–333 (2015) 822–826. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.01.084>.
- [44] M. Kurokawa, Y. Uchiyama, S. Nagai, Performance of plastic gear made of carbon fiber reinforced poly-ether-ether-ketone: Part 2, *Tribol. Int.* 33 (2000) 715–721. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(00\)00111-0](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(00)00111-0).
- [45] Loading capacity of medium-module POM gear under oil lubrication, *Forsch. Im Ingenieurwesen*. (In print).

## Multicriteria approach to polymer gear design

### Abstract:

Reliable polymer gear design remains to date an open challenge due to a lack of data regarding the specific properties of polymer materials and due to complex relationships between the gears' geometric parameters and the applied running loads. Several standards (BS 6168: 1987, JIS B 1759: 2013) and guidelines (VDI 2736) are available for designing polymer gears, however, all of them hold certain limitations. In most cases, engineers do not have the full picture regarding the interactions between all design parameters, which often leads to multiple design iterations and prototypes before an ideal design solution can be obtained. In this contribution, a systematic analysis of the main design criteria for cylindrical polymer gears is presented, i.e. the root and flank strength, temperature, wear, deformation, gear quality, installation quality, volume and production costs. The sensitivity and interdependence between different parameters are presented in a number of illustrative diagrams. The article concludes with an overview of the most typical gear failure modes exhibited by different material pairs at various load levels and a systematic and concise guideline how to improve key design criteria in order to achieve a viable solution. In the subsequent journal edition, a further presentation of a custom developed algorithm for a multicriteria optimization of polymer gears will be presented along with a case study implementation.

### Keywords:

polymer gears, design, failure modes, optimization

### Zahvala

Raziskavo je delno financiral projekt MAPgears (projekt sofinancirata Republika Slovenija in Evropska unija v okviru Evropskega sklada za regionalni razvoj, pogodba št. C3330-18-952014), delno pa Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (pogodba št. 630-33 / 2019-1).

# Projekt 'Razvoj centralnega pogona za e-bike' prejemnik ZLATEGA NACIONALNEGA PRIZNANJA ZA INOVACIJE GZS

Raziskovalci laboratorija LeCAD so prispevali k razvoju pogonskega sistema z ohišjem



### Storitve LeCADa za industrijo:

- svetovanje in ekspertna podpora pri razvoju izdelkov,
- razvoj izdelkov na ključ,
- podatkovna analitika pri razvoju izdelkov,
- napredne numerične simulacije,
- testiranje polimernih zobnikov,
- aplikacije superračunalništva.



Vodilni partner: Partnerji na projektu:

**DOMEL**

PODKRIŽNIK

EmSISO