

TESTIRANJE POLIMERNIH ZOBNIKOV IN INTEGRACIJA MATERIALNIH PODATKOV ZA NAPREDNEJŠI PRERAČUN POGONSKIH APLIKACIJ

Matija Hriberšek, Simon Kulovec

Izveček:

Polimerni zobniki so čedalje bolj uveljavljeni in so v vse večjem številu pogonskih aplikacij. Problematika pri dimenzioniranju polimernih zobnikov je nepoznavanje materialnih lastnosti, kot so Woehlerjevi diagrami, obrabni koeficienti zobniških dvojic ipd., ki omogočajo preciznejši izračun pogonske aplikacije. V članku je predstavljena raziskava testiranja polimernih zobnikov na dobo trajanja in merjenje povprečne temperature v coni ubiranja. Po testiranju je bila izvedena analiza različnih polimernih materialov in ojačitvenih vlaken (t. i. polimerni kompozitni zobniki) na doseženo število ciklov in pojava temperatur na zobnikih. Rezultati so pokazali, da se zobniška kombinacija POM-PA izkaže za najustreznejšo s stališča največ doseženih ciklov. V članku je pojasnjeno, da steklena vlakna pomembno vplivajo na izboljšanje natezne trdnosti materiala in s tem posledično na višje povprečne temperature v coni ubiranja.

Ključne besede:

zobniki, testiranje, polimeri, temperatura, dinamična trdnost

1 Uvod

Zadnja desetletja je bilo zaznati povečanje uporabe polimernih kompozitnih materialov na področju zobniških aplikacij z namenom izkoristka pozitivnih lastnosti polimerov [1]. Pri tem je izpostavljen dejstvo, da polimeri niso alternativa kovinskemu materialu, ampak imajo svoja področja uporabe. Na začetku so bili polimerni materiali uporabljeni v nezahtevnih strojniških aplikacijah, kjer niso bili podvrženi visokim mehansko-termičnim obremenitvam. Z razvojem in optimizacijo izdelkov je prišlo do razvoja polimerov (POM, PA6, PA66, PEEK), ki so vsebovali aditive, s katerimi so se izboljšale mehanske, termične in tribološke lastnosti generičnega polimera. To je omogočilo integracijo polimernih kompozitnih zobnikov v področja uporabe, kot so pogonski sistemi za manipulacijo vrat, inteligentni sistemi za avtomatizirano manipulacijo senčil, inovativni aktuatorji za avtomatizirano manipulacijo loput v prezračevalnih sistemih in razvoj pogonskih sistemov za električno mobilnost, kot so električna kolesa in električna navtika.

Pri dimenzioniranju aplikacij je potrebno izbrati primerno polimerno materialno kombinacijo za zobniški par, ki je odvisna od obremenitev, geometrijskih pogojev itd. Z izvajanjem raziskav na področju polimernih kompozitnih zobnikov je možno izboljšati poznavanje polimernih gradiv in pridobiti konkurenčno prednost razvojnih institucij, kar v osnovi pomeni skrajšanje faze prototipiranja in prihranek pri stroških v razvojni fazi. Takšne raziskave zajemajo meritve temperatur na ozobju s termokamerami in karakterizacijo dinamične trdnosti – Woehlerjevi diagrami polimernih kompozitnih materialov. Izpopolnjena materialna baza omogoča preciznejši izračun realne pogonske aplikacije.

Spodaj so povzeta glavna dejstva na področju testiranja polimernih kompozitnih materialov za zobnike, ki opisujejo pregled stanja. Tavčar in ostali (2018) [2] so izvajali študije povečanja dobe trajanja polimerov z ojačitvenimi vlakni, kjer so raziskovali tribološke in toplotne vplive na obratovalne karakteristike polimernih zobnikov. S tribološkega vidika so ugotovili, da ima koeficient trenja vpliv na drsne izgube in posledično zmanjšanje izkoristka prenosnika (Ratanasumawong in ostali, 2012) [3]. Pogačnik in ostali (2012) [4] so ugotovili, da so tribološke karakteristike polimerov materialno odvisne od materialnega para v kontaktu in ne od posameznega polimera. Holmgren in ostali (2014) [5] so ugotovili, da je poliamid (PA) uporaben material za zobniške aplikacije zaradi ugodnih me-

Dr. Matija Hriberšek, univ. dipl. inž., dr. Simon Kulovec, univ. dipl. inž., oba Podkrižnik, d. o. o., Ljubno ob Savinji

hanskih lastnosti s steklenimi vlakni, ki omogočajo obstojnost materiala pri višjih temperaturah. Hlebanja in ostali 2019 [6] so karakterizirali različne polimerne materiale in kombinacije, primerne za polimerne zobniške pare.

V članku bo predstavljen postopek testiranja polimernih materialov. Pri tem bodo predstavljeni in analizirani rezultati izmerjenih povprečnih temperatur v coni ubiranja (kontakta) za različne kombinacije polimernih kompozitnih zobniških parov v odvisnosti od dosežene dobe trajanja. Predstavljeni in opisani bosta najpogostejši vrsti porušitve polimernih zobnikov: lom v korenu zaradi dinamične obremenitve in termična pretalitev materiala. Na koncu bo ovrednoten Woehlerjev diagram za materialni kombinaciji na osnovi materialov POM in PA.

2 Lastnosti ubiranja polimernih zobniških dvojic

Polimerni zobniki se lahko izdelajo s postopkom injekcijskega brizganja, kar jim daje določeno prednost pred kovinskimi zobniki. Polimerni materiali imajo v primerjavi s kovinami manjšo gostoto, boljšo absorpcijo vibracij, manjše emisije hrupa in boljšo korozijsko obstojnost [7]. Za zobniške prenose najpogosteje uporabljani inženirski polimeri bazirajo na polimerih, kot so poliacetal (POM), poliamid (PA), polibutilentereftalat (PBT) in polieter eter ketone (PEEK). *Tabela 1* predstavlja lastnosti omenjenih materialov pri sobni temperaturi.

Ubiranje zobnikov je dinamični proces, pri katerem lahko nastanejo velike deformacije in posledično visoke temperature. Z naraščanjem temperature

se posledično rahljajo vezi med molekulami, kar pomeni manjšanje odpornosti polimera. Z dosežanjem večjega števila ciklov pri dani dinamični obremenitvi se zmanjšuje trdnost polimernega materiala. Večje število doseženih ciklov ali večje dilatacije materiala prinesejo dodatno zmanjšanje lastnosti zaradi viskoelastičnega obnašanja polimera in nastalo toploto, ki je posledica omenjenega dejavnika. Pomembno dejstvo pri uporabi polimernih materialov predstavlja stopnja absorpcije vlage polimera, kar v večini primerov negativno vpliva na zagotavljanje dimenzijskih toleranc uporabljenih materialov. Znano je, da imajo materiali na osnovi poliamidov najvišjo absorpcijo vlage med osnovnimi polimernimi materiali, ki se uporabljajo za zobniške aplikacije. Ta je od 1 % do 3 %, kar pri POM-u znaša okoli 0,2 % v ravnovesnem stanju, ki je okarakterizirano s temperaturo 23 °C in 50 % relativne vlažnosti. Za boljšo odpornost materialnih lastnosti pri povišanih temperaturah se pri proizvodnji polimerov lahko vključijo aditivi v obliki toplotnih stabilizatorjev, ki omogočajo vzdrževanje mehanskih lastnosti polimerov tudi pri višjih temperaturah od steklastega prehoda.

Za izboljšanje mehanskih, termičnih in triboloških lastnosti se k polimernim matricam dodajajo različna vlakna in notranji mazalni aditivi. S steklenimi, ogljikovimi in aramidnimi vlakni se povečajo togost, natezna trdnost in upogibna trajno dinamična trdnost. Negativni učinek omenjenih polnil je zmanjšanje udarne trdnosti polimera. Steklена vlakna med drugim omogočajo zmanjšanje linearne termične deformacije polimera. S sredstvom PTFE - polytetrafluoroethylene (teflon), grafitom, borovim nitridom in silikonskim oljem se zmanjša koeficient trenja in posledično obraba zobniškega para. Z mineralnimi dodatki se doseže povečanje odpornosti na termične dilatacije polimera [7].

Tabela 1: Materialne lastnosti osnovnih polimernih materialov za zobnike [7, 8, 9, 10, 11, 12].

Lastnost materiala	POM	PA66	PBT	PEEK
Vrsta polimera	Delno kristaliničen	Delno kristaliničen	Delno kristaliničen	Delno kristaliničen
Gostota, ρ [g/cm ³]	1,39...1,42	1,13...1,16	1,30...1,32	1,26...1,30
Elastični modul, E [Mpa]	2600-3200	3000	2500...2800	3500...3900
Natezna trdnost, Rm [Mpa]	60	85	50...60	95
Napetost tečenja, Re [Mpa]	67	84	56	60
Raztezek na meji tečenja, ϵ [%]	9	5...7	3,5...7	5
Poissonovo število, ν [-]	0,42...0,45	0,38...0,42	0,39	0,4
Delovna temperatura (krajše obdobje), T_m [°C]	110...140	140...170	160	300
Delovna temperatura (daljše obdobje), T [°C]	90...100	80...100	100	250
Termični raztezek (CLTE), α [K ⁻¹]	13...14·10 ⁻⁵	11...12·10 ⁻⁵	10,8 · 10 ⁻⁵	4,7 · 10 ⁻⁵
Toplotna prevodnost, λ [W/mK]	0,25...0,39	0,23...0,36	0,21	0,29
Specifična toplota, c [J/gK]	1,40	1,50	1,42	1,1

3 Eksperimentalno delo

3.1 Eksperimentalno mesto

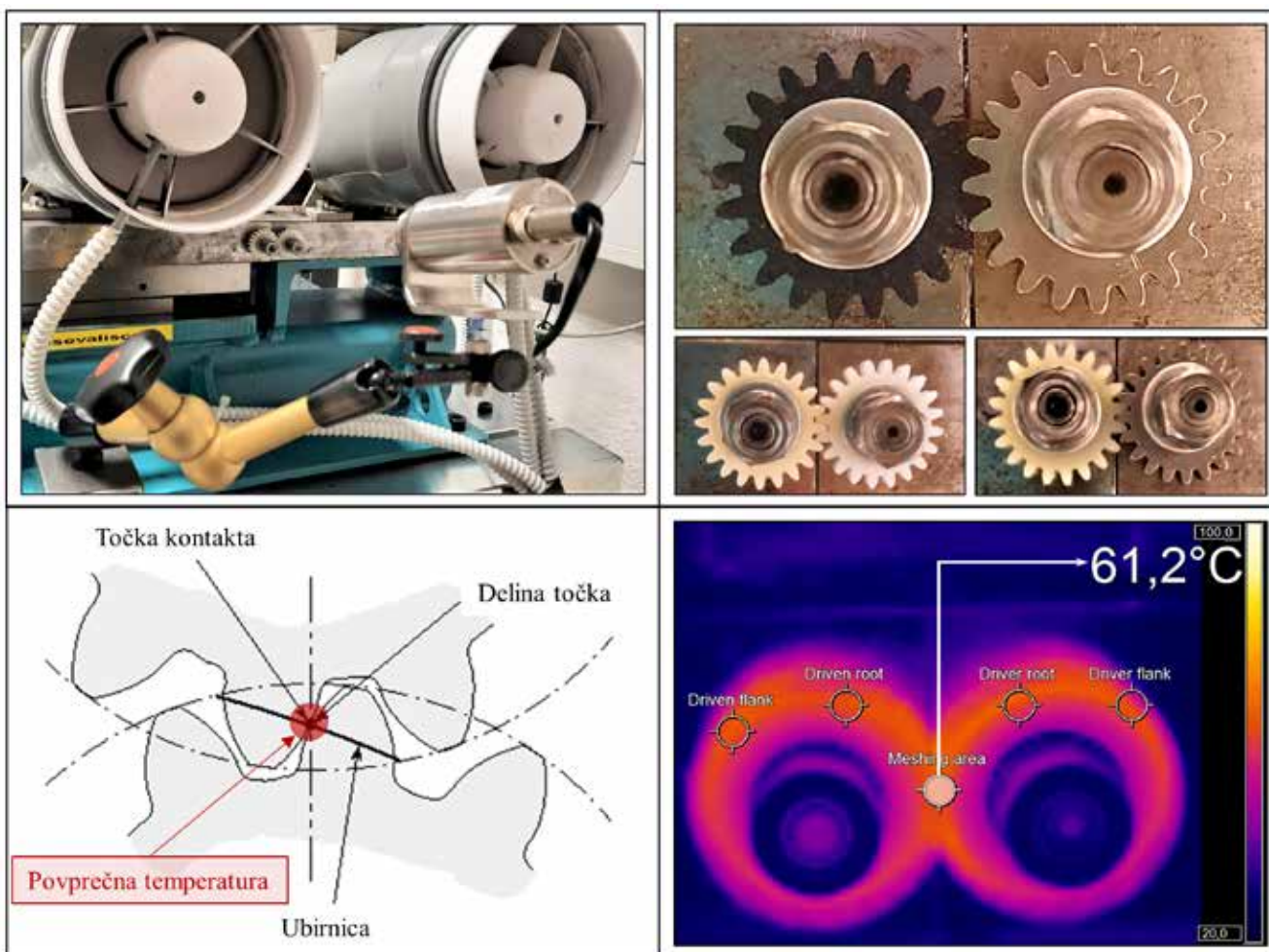
Testi dobe trajanja zobnikov z evolventnim profilom so se izvajali z različnimi polimernimi materialnimi kombinacijami. Pri tem se je s termokamero merila povprečna temperatura v coni ubiranja med obema zobnikoma. Testirali so se materiali na osnovi POM in PA, ojačani tudi z vlakni. Pri tem se je v nekaterih kombinacijah uporabilo jeklo-polimer. Testirani vzorci so bili izdelani s tehnološkim postopkom injekcijskega brizganja valjastih polizdelkov. V naslednji fazi so se v manjših količinah z namenom zagotavljanja primerne kvalitete razreda s postopkom rezkanja izdelali končni zobniki. Jeklen zobnik je bil izdelan s postopkom rezkanja iz jeklenega polizdelka. Za izboljšanje površinske hrapavosti se je zobnik na koncu poliral, s čimer se je dosegla površinska hrapavost R_a 0,4 μm . Geometrija končno izdelanih zobnikov je bila preverjena na 3D koordinatnem merilnem stroju Wenzel LH54 z namenom doseganja predvidenega kvalitete razreda (jeklen zobnik: 5 in polimerni zobnik: 8)

Tabela 2 : Geometrijske značilnosti testiranih zobnikov

Pogonski/ gnan zobnik	
Število zob, z [-]	20
Širina zobnika, b [mm]	6
Modul, m [mm]	1
Vpadni kot normalnega profila, α [°]	20
Temenski premer, d_a [mm]	22
Delilni premer, d [mm]	20
Vznožni premer, d_f [mm]	17,5
Profilni pomik, x [-]	0,00

ozobja po standardu DIN 3961/62 oziroma DIN ISO 1328-1. V tabeli 2 so prikazane podrobnejše geometrijske značilnosti pogonskega in gnanega zobnika.

Testiranje zobnikov se je izvajalo pri standardnih pogojih s temperaturo 23 °C in relativno vlago 50 %. Eksperimenti so bili izvedeni na treh različnih obremenitvenih točkah – momentih (1,5; 1,3; 1,1 Nm) pri enaki vrtilni hitrosti pogonskega in gnanega zobnika, ki je bila 1400 obratov/min⁻¹. Za vizualizacijo



Slika 1 : Levo zgoraj: preskuševališče za testiranje polimernih zobniških dvojic, desno zgoraj: predstavitev testiranih zobniških dvojic, levo spodaj: prikaz točke merjenja v coni ubiranja med zobnikoma in desno spodaj: zajem slike s termokamero

povprečne temperature v coni ubiranja med testiranjem je bil uporabljen računalniški program za vizualizacijo temperatur. Po koncu testiranja je bilo izvedeno vrednotenje povprečne temperature, pri kateri je nastala porušitev enega izmed zobnikov. Na *sliki 1* je predstavljeno preskuševališče za testiranje polimernih zobnikov (zgoraj levo) s prikazanimi zobniškimi dvojicami (levo desno) in ponazorjeno točko merjenja povprečne temperature v coni ubiranja (levo spodaj) ter sliko, zajeto s termokamero (desno spodaj).

3.2 Eksperimentalni rezultati

Slika 2 prikazuje meritve povprečnih temperatur v coni ubiranja v odvisnosti od doseženih ciklov pri testiranju zobnikov iz različnih polimernih materialov pri momentu 1,1 Nm.

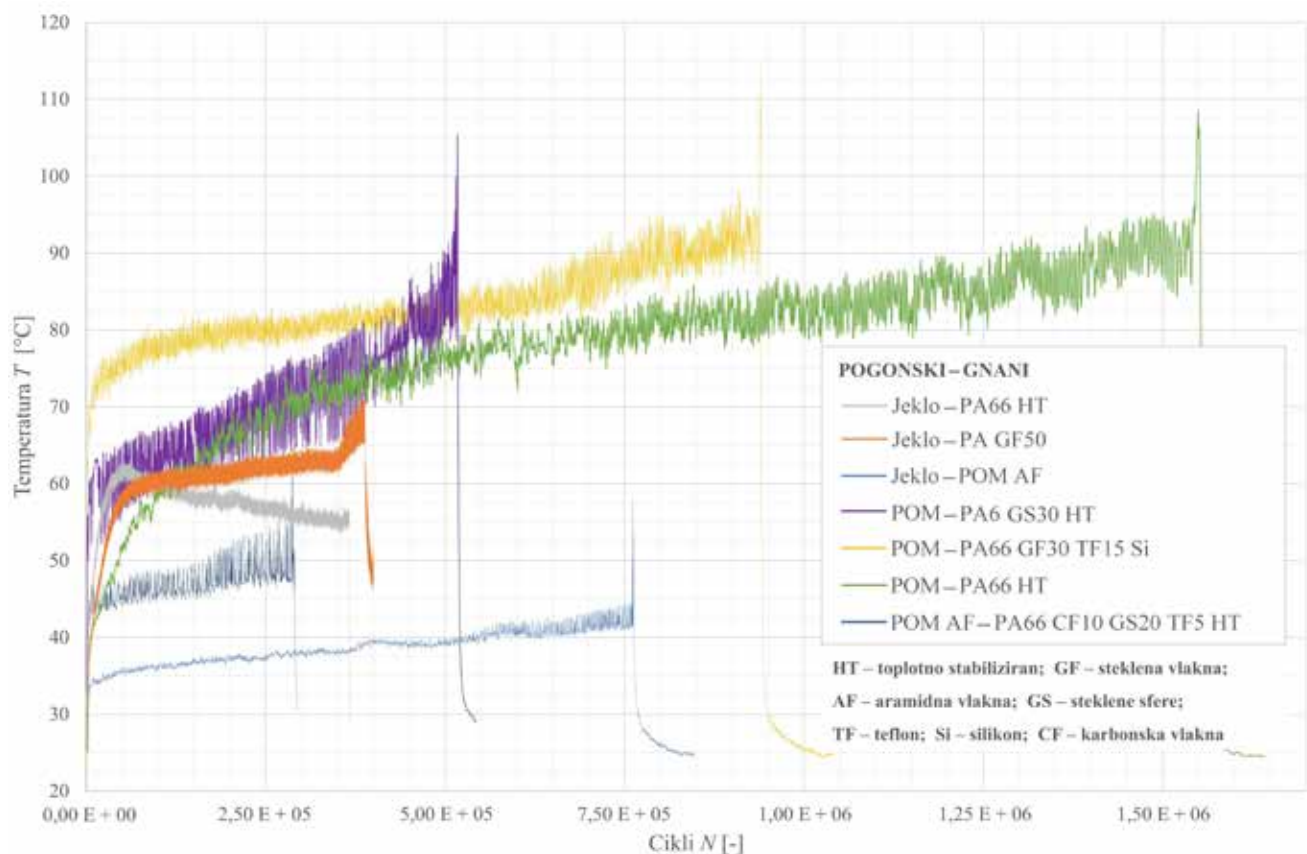
Na osnovi dobe trajanja se POM-PA66 HT izkaže za primerne zaradi ustreznega razmerja med trdnostjo in žilavostjo obeh polimerov, kar odločilno vpliva na odpornost proti dinamičnim obremenitvam. Pri analizi dobe trajanja zobniškega para s pogonskim jeklenim zobnikom in z gnanim polimernim zobnikom se izkaže kot ustrezna kombinacija jeklo-POM AF. Rezultat je logičen, saj aramidna vlakna vplivajo na izboljšane tribološke razmere in nizko povprečno temperaturo v coni ubiranja. Vzrok za omenjeno dejstvo je v ustreznem razmerju med žilavostjo in trdnostjo materiala POM.

Steklena vlakna vplivajo na višjo temperaturo v coni ubiranja, in sicer zaradi povečanja trdnosti in krhkosti polimernega materiala. Odstotek deleža steklenih vlaken pri materialu PA GF50 (50 %) se izkaže za prevelik zaradi doseganja kratke dobe trajanja omenjenega polimera v primerjavi z ostalimi.

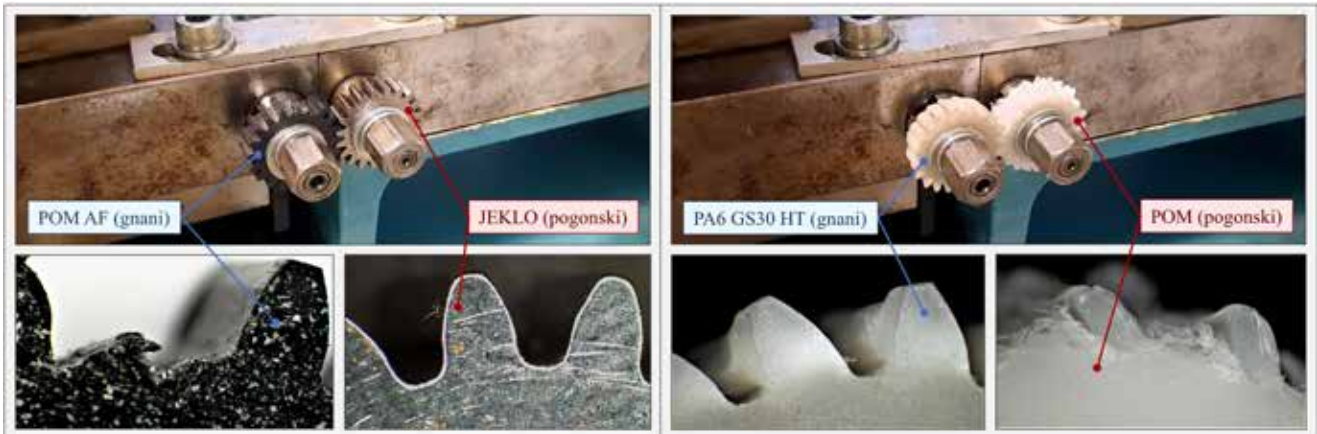
Največja disipacija povprečne temperature je pri kombinaciji POM-PA6 GS30 HT, kjer je prišlo do negativnega vpliva naključno porazdeljenih steklenih sfer na površini materiala PA v kontaktu s materialom POM. To poveča koeficient trenja in s tem povzroči višje temperature v kontaktu med zobnikoma. Pri kombinaciji se zazna največji temperaturni gradient, kar rezultira v termični porušitvi materiala POM in nato polimera PA6 GS30 HT.

Povprečne temperature v coni ubiranja in dosežene dobe trajanja polimernih zobnikov s steklenimi vlakni pojasnijo, da vlakna odločilno vplivajo na temperaturo in na doseženo število ciklov. Za izboljšanje kontaktnih razmer je zaželeno uporabiti mazalno sredstvo PTFE. V večini primerov so polimerni kompozitni zobniki s steklenimi vlakni uporabljeni v aplikacijah, kjer je potrebno zagotoviti precizno dimenzijsko stabilnost zasnovanih strojnih elementov ob manjši trajno dinamični obremenitvi.

Na *sliki 3* sta prikazana dva tipa poškodbe polimernih zobnikov, ki sta lom v korenu zoba (levo:



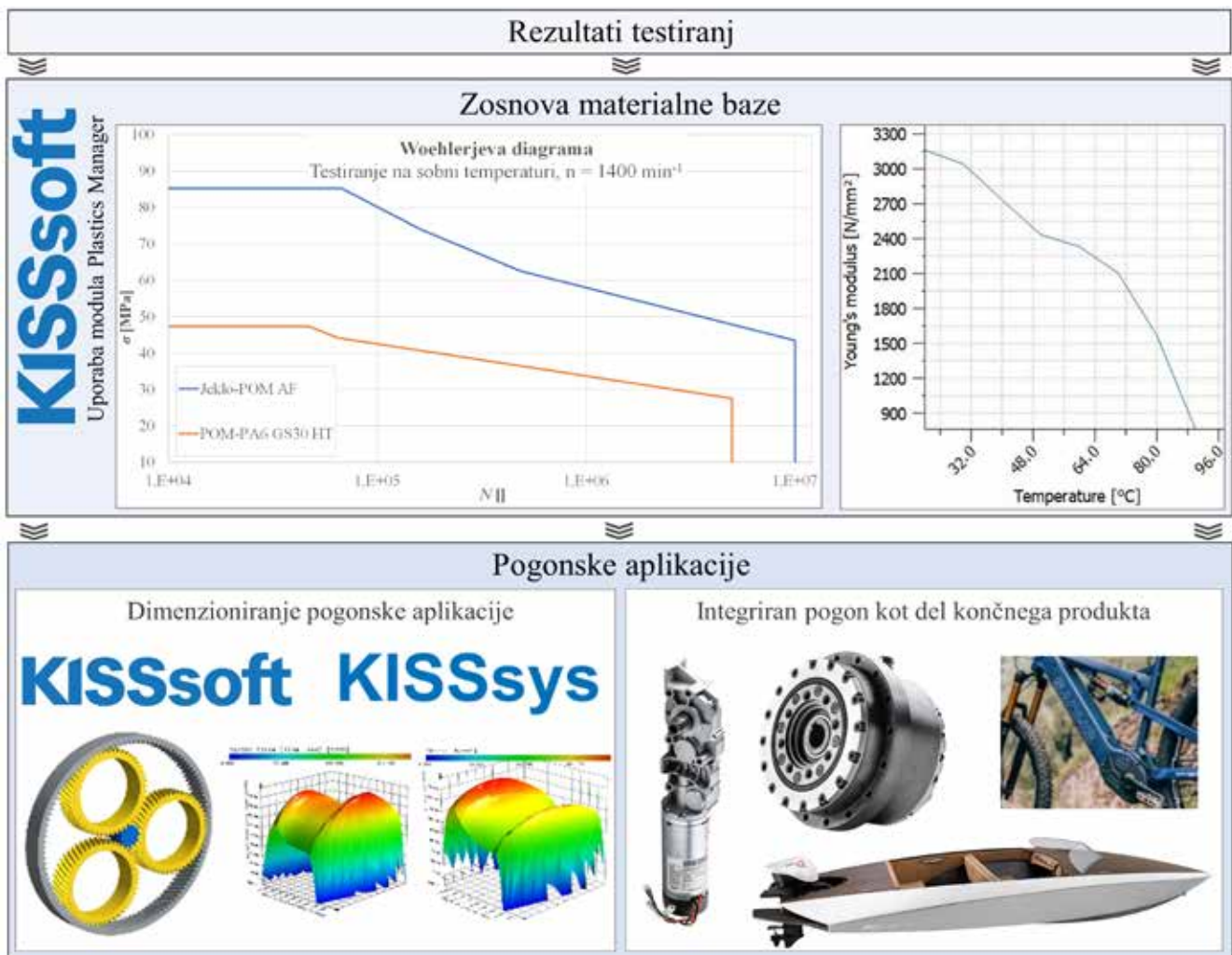
Slika 2 : Meritve povprečnih temperatur na kontaktu (coni ubiranja) med zobniško dvojico pri momentu 1,1 Nm.



Slika 3 : Prikaz dveh vrst porušitev polimernih (kompozitnih) zobnikov

jeklo-POM AF) in termično pretaljevanje materiala (desno: POM-PA6 GS30 HT). Na sliki 3 (levo) pride do loma v korenu zoba zaradi utrujanja polimera – dinamične obremenitve, kar rezultira v porušitvi zoba. Na sliki 3 (desno) je prikazana poškodba – taljenje polimerov, kjer temperatura

v kontaktu doseže temperaturo taljenja enega izmed polimerov in nato drugega. S slike 3 (desno) se lahko razbere večja degradacija materiala POM zaradi nižje temperaturne obstojnosti materiala v primerjavi z materialom PA6 GS30 HT, ki vsebuje steklene sfere in je toplotno stabiliziran.



Slika 4 : Zasnova baze materialnih podatkov v obliki Wochlerjevih diagramov za naprednejši preračun realne aplikacije

3.3 Izris Woehlerjevih krivulj in implementacija podatkov za naprednejši preračun aplikacije

Na *sliki 4* je prikazana materialna baza v obliki dveh Woehlerjevih diagramov na osnovi pridobljenih rezultatov, pojasnjenih na *sliki 2* (kombinaciji jeklo-POM AF in POM-PA6 GS30 HT). Woehlerjeva diagrama sta izrisana na osnovi doseženih ciklov pri testiranju na treh različnih obremenitvenih točkah s tremi ponovitvami testa (pojasnjeno v poglavju 3.1). V naslednji fazi se omenjeni diagrami implementirajo v virtualni model za naprednejši preračun realne aplikacije.

Za definiranje Woehlerjevega diagrama je potrebno definiranje mehanskih in toplotnih lastnosti polimera, ki so pri normalnih pogojih naslednje: gostota, elastični modul, Poissonovo število, toplotna prevodnost, linearni razteznostni koeficient in absorpcija vlage. Za natančnejši popis materialnega modela se lahko dodatno vnesejo vrednosti za temperaturno odvisen elastični modul, natezno trdnost, koeficient trenja in obrabni koeficient zobniškega para. V naslednji fazi se v program uvozijo eksperimentalni rezultati, kot so vrtilna hitrost preskušane zobnika, moment, temperature, doseženi cikli in vrsta porušitve polimernega zobnika. Na osnovi vhodnih podatkov se lahko ustvari Woehlerjev diagram za preskušani zobnik.

Na osnovi primerjave Woehlerjevih diagramov se sklepa, da se materialom znižuje časovna trdnost z doseženim številom ciklov, kar je v skladu s teorijo. Iz rezultatov je razvidno, da je kombinacija jeklo-POM AF primernejša za bolj obremenjene aplikacije, saj nakazuje večjo odpornost in dobo trajanja materiala, ki je izpostavljen dinamični obremenitvi. Vzrok za nižjo dinamično trdnost kombinacije POM-PA6 GF30 HT predstavljajo steklene sfere, ki zmanjšujejo dinamično trdnost materiala in povečujejo krhkost materiala.

V naslednjem koraku se lahko Woehlerjev diagram vnese v zasnovan model za preračun realne aplikacije v KISSsoftu, kjer se napove doba trajanja pogonskega sistema.

Dolgoročni cilj raziskovalnorazvojne skupine je ustvarjanje čim večje baze podatkov iz različnih tržnih materialov, ki se že uporabljajo v obstoječih aplikacijah in v aplikacijah, ki so v fazi razvoja. Poleg omenjenega se vseskozi testirajo alternativni polimerni kompozitni materiali z namenom iskanja stalnih izboljšav in s tem racionalizacije stroškov na obstoječih pogonskih sistemih.

4 Zaključek

V članku je prikazano trajnostno testiranje zobnikov iz različnih vrst polimernih materialov, ki vključujejo

poliacetal (POM) in poliamidne (PA) materiale, kot tudi omenjena materiala, ojačana z vlakni in dodanimi notranjimi mazivi. Pri tem se je izvedla študija vpliva različne vrste polimernih kombinacij na doseženo dobo trajanja in razvoj toplotnih razmer v kontaktu zobnikov. Na osnovi pridobljenih podatkov sta se zasnova in primerjala Woehlerjeva diagrama – časovna trdnost za zobniška para: jeklo-POM AF in POM-PA6 GS30 HT.

Iz rezultatov so razvidne razlike med izmerjenimi povprečnimi temperaturami v coni ubiranja kot tudi različne dobe trajanja polimernih (kompozitnih zobnikov) pri isti obremenitvi. Polnila pomembno vplivajo na obratovalne lastnosti polimernih zobnikov. Pri polimernih zobnikih s steklenimi vlakni se pojavijo višje povprečne temperature v kontaktu v primerjavi z ostalimi materialnimi kombinacijami. Razlog za povišane temperature je v povečanju trdnosti polimernega kompozita in abrazivnega učinka steklenih vlaken, kar rezultira v manjši dobi trajanja. Zaželeno je uporaba mazalnega sredstva PTFE – teflon, ki omogoča izboljšanje triboloških razmer v kontaktu med zobnikoma. Iz rezultatov se lahko sklepa, da višji delež (50 %) steklenih vlaken v polimerni matrici negativno vpliva na dobo trajanja zobnika, saj povečuje krhkost materiala in zmanjšuje žilavost, ki je zelo pomemben faktor pri dinamičnih obremenitvah.

S stališča vrednotenja dobe trajanja različnih polimernih materialov se za najustreznejšo kombinacijo izkaže zobniški par, kjer je bil pogonski zobnik iz POM-a, gnani zobnik pa iz PA-ja. Rezultat nakazuje, da kontakt obeh materialov rezultira v ugodnih triboloških razmerah in posledično v najdaljši dobi trajanja zaradi ustreznega razmerja med trdnostjo in žilavostjo materialov. To omogoča dobro odpornost na dinamične obremenitve med delovanjem.

Rezultati potrjujejo, da oba materiala definirata obratovalne značilnosti zobniškega para. Pri izbiri polimernega materiala je zaželeno poznati časovnotrdnostne lastnosti polimera. Pri analizi časovne trdnosti se izkaže material POM za najbolj ustreznega pri snovanju pogonskih sklopov, kar potrjuje dejstvo, da je kombinacija jeklo-POM ena izmed najbolj uporabljenih na področju snovanja zobniških aplikacij.

Glede na omenjeno dejstvo je cilj raziskovalnorazvojnih skupin pridobiti in razširiti materialno bazo v obliki Woehlerjevih diagramov za polimerne kompozitne materiale. To prispeva k skrajševanju števila iteracij pri izboru ustreznega materiala v fazi prototipiranja, saj se material izbere iz ustvarjene ali dopolnjene baze materialnih podatkov. Pri tem se z uporabljenimi podatki izvede preciznejši izračun pogonske aplikacije, kar omogoči izboljšano optimizacijo sistema, to pa je ključno s stališča porabe polimernega materiala.

5 Viri

- [1] Global Plastic Gears Market 2018, Forecast to 2023 (North America, Europe, Asia-Pacific, South America, Middle East and Africa), DecisionDatabases.com, June 2018.
- [2] Tavčar, J., Grkman, G., Duhovnik, J.: Accelerated lifetime testing of reinforced polymer gears, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 12/2018/1.
- [3] Ratanasumawong, C., Asawapichayachot, P., Phongsupasamit, S., Houjoh, H., Matsumura, S.: Estimation of SlidingLoss in a Parallel-Axis Gear Pair, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 6/2012/1, str.: 88-103.
- [4] Pogačnik, A., Kalin, M.: Parameters influencing the running-in and long-term tribological behaviour of polyamide (PA) against polyacetal (POM) and steel, *Wear*, 290-291/2012, str.: 140-148.
- [5] Holmgren, J., L., Kassman, R., A.: Effect of PTFE on the tribological behaviour of PPS with glass fiber, 1st International Conference on Polymer Tribology, 2014, Bled, Slovenia.
- [6] Hlebanja, G., Hriberšek, M., Erjavec M., Kulovec, S.: Experimental determination of plastic gears durability, IRMES 2019 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 659/2019.
- [7] VDI2736 Part 1: 2016: Thermoplastic gear wheels: Materials, material selection, production methods, production tolerances, form design.
- [8] Hlebanja, G., Hriberšek, M., Erjavec, M., Kulovec, S.: Durability Investigation of Plastic Gears, Power transmissions 2019, 6th International BAPT Conference Power Transmissions 287/2019, Varna Bulgaria.
- [9] Ehrenstein G., W.: *Polymeric Materials: Structure-Properties-Applications*, Carl Hanser Verlag, Munich, 2001.
- [10] <https://www.bpf.co.uk/plastipedia/polymers/peek.aspx>, dostopno 4.11.2020.
- [11] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1882>, dostopno 4.11.2020.
- [12] <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=1998>, dostopno 4.11.2020.

Durability testing of polymer gears and integration of material database for more advanced calculation of power train application

Abstract:

In the past decades, polymer materials have been increasingly used in gears. There is lack of fatigue data, such as Woehler diagrams, wear coefficients of polymer gear pairs which allow a more precise calculation for the power train application. The paper presents durability testing of polymer gears with performed average temperature measurements in the meshing zone. After testing, an analysis of the influence of different polymeric materials and reinforcing fibers (i.e. polymer composite gears) on the achieved number of cycles and temperatures was discussed. The results showed that the POM-PA gear combination proved to be the most suitable from the point of view of the most achieved load cycles. The paper explains that glass fibers have a significant effect on improving the tensile strength of the material and abrasive effect, which result in higher average temperatures in the meshing zone.

Keywords:

gears, testing, polymers, temperatures, fatigue stress

Zahvala

Naložbo sofinancirata Republika Slovenija in Evropska unija v okviru Evropskega sklada za regionalni razvoj, št. C3330-18-952014.

