

EKSPLOATACIJSKE SPECIFIČNOSTI I TENDENCIJE RAZVOJA POLIMERNIH ZUPČANIKA

EXPLOITATION SPECIFICS AND TENDENCIES OF DEVELOPMENT PLASTIC GEARS

Branimir Markulin Grgić, Vladimir Markulin Grgić¹, Vesna Alić Kostešić²

¹*Novamini, d. o. o*

²*Tehničko veleučilište u Zagrebu*

Sažetak

Polimerni zupčanici zauzimaju sve važnije mjesto u strojogradnji te postaju ozbiljna alternativa metalnim zupčanicima u mnogim primjenama. Sve češće se koriste ne samo za prijenos gibanja, već i za prijenos značajnih snaga. Granice primjene polimernih zupčanika se stalno pomiču. Za razliku od metalnih materijala, čiji napredak je usporen te se ne očekuju revolucionarna nova saznanja, kada je riječ o polimernim materijalima situacija je potpuno drugačija. Značajan je i napredak reverzibilnog inženjerstva osobito u prilikama kad se postojeći objekti mogu rekonstruirati u nekom od CAD sustava i ispisati 3D pisačem. Kontinuirano se stječu nova znanja na temelju kojih ih se, zahvaljujući pogodnim mehaničkim svojstvima polimera, unapređuje te čini sve poželjnijim za zupčaničku primjenu.

Ključne riječi: *polimerni zupčanici, radni vijek zupčanika, maziva, podmazivanje, temperatura, trenje, tribologija, mehanička svojstva, tolerancije, trošenje, površinska obrada, dimenzijska stabilnost, zamor, apsorpcija vode.*

Abstract

Plastic gears are getting ever more important in mechanical engineering and are becoming an alternative to metal gears in many applications. They are increasingly used not only for transmitting motion but power as well. The field of their application is constantly spreading. There is significant progress in reverse engineering, especially in situations when the existing parts can be traced in some of the CAD system and send to 3D print. Unlike metal materials, whose

development is slowing down, thanks to the favorable mechanical properties of polymers, plastic materials are constantly improving. Due to their continuing advancement, they are becoming more desirable in gear trains.

Keywords: *plastic gears, gear life, lubricants, lubrication, temperature, friction, tribology, mechanical properties, tolerances, wear, surface finishing, dimensional stability, fatigue, water absorption*

1. Uvod

1. Introduction

Za razliku od metalnih zupčanika, kod kojih nema više velikih nepoznanica, niti što se tiče materijala, niti što se tiče tehnologije izrade, niti što se tiče konstrukcijskih rješenja, kod polimernih zupčanika je situacija suprotna - nepoznanica je napretek. Brojne su prednosti polimernih zupčanika u odnosu na metalne. Lakši su, s manjim momentima inercije, a i puno su jeftiniji. Dobro prigušuju vibracije i udare te su tiši u radu. Ne zahtijevaju antikorozivne premaze. Zbog dobrih reoloških svojstava polimernih materijala, pogodni su za masovnu proizvodnju, npr. injekcijskim prešanjem. Izbjegavanjem izrade obradom odvajanjem čestica postižu se velike uštede. Polimerni zupčanici mogu naći svoju primjenu i prilikom održavanja sustava nastalih kvarom. Zbog niske čvrstoće u odnosu na metale, polimerni zupčanici pogodni su za primjenu u preciznoj mehanici, gdje je važniji prijenos gibanja od prijenosa snage. Nefunkcionalni

zupčanik moguće je rekonstruirati primjenom trodimenzionalne digitalizacije optičkim mjernim sustavom u nekom od CAD sustava, kako bi se dobio računalni model prikladan za 3D ispis. Taj postupak naziva se reverzibilno inženjerstvo (reverse engineering).

Kod manje zahtjevnih primjena, zbog manjeg faktora trenja u odnosu na metalne zupčanike, ne zahtijevaju podmazivanje. Često je mazivo inkorporirano u materijal zupčanika. Razvoj novih polimernih materijala se intenzivirao, sve ih je više na tržištu pa njihovo istraživanje za zupčaničku primjenu često kasni. S obzirom na brzi razvoj materijala i tehnologije proizvodnje polimernih zupčanika, postojeće norme brzo zastarijevaju te ih je potrebno ažurirati, što je u ovoj fazi razvoja polimernih zupčanika kontinuirani proces.

2. Povijesni razvoj

2. *Historical Development*

Prirodni polimerni materijali, poput drva i kože, koriste se od pamtivijeka. Važnost polimernih materijala je kontinuirano opadala sve do sredine dvadesetog stoljeća i otkrića sintetičkih polimera. Prvi sintetski polimer bio je fenol-formaldehid, poznatiji pod trgovačkim imenom "bakelit" [1]. Od tada se njihova važnost iz godine u godinu povećava. Od izuma poliamida prošlo je osamdeset godina. Danas je najzastupljeniji materijal za izradu polimernih zupčanika, a slavu je stekao prije drugog svjetskog rata - od njega su se proizvodile ženske čarape, popularne "najlonke". Broj polimernih materijala se neprestano povećava, glavni razlog je oplemenjivanje osnovnog polimerizata mnogim dodacima zahvaljujući kojima se svojstva uvelike mijenjaju. Nepovjerenje prema polimernim materijalima, koje je u početku bilo veliko, temeljem sve većeg iskustva krajnjih korisnika jenjava.

3. Osnovna podjela

3. *Basic Division*

Polimerni materijali dijele se na plastomere, elastomere i duromere. Plastomeri, koji su interesantni kao materijal za zupčanike, mogu biti amorfne i kristalaste strukture. Poliamid (PA), kao

najčešći izbor materijala za zupčanike, kristalaste je strukture. Inače, u ukupnoj svjetskoj proizvodnji polimera, plastomeri sujeluju s oko 90 % [2]. Polimerni materijali pogodni za izradu zupčanika prema [3] su poliamidi (PA), poli(oksi-metilen) (POM) ili acetal, poli(butilen-tereftalat) (PBT), polikarbonat (PC), poliimid (PI), poli(fenilen-sulfid) (PPS), polietilen vrlo visoke molekularne mase (PE-UHMW). U praksi su PA i POM najzastupljeniji.

4. Prednosti i nedostaci

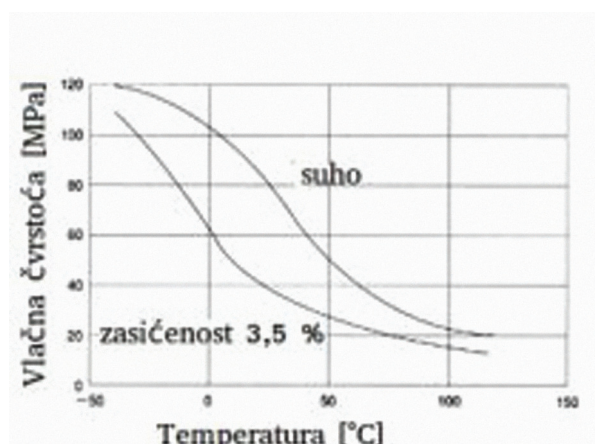
4. *Advantages and Disadvantages*

Prednosti polimera su mnoge: niska gustoća, otpornost prema koroziji, zadovoljavajuća čvrstoća, jednostavno recikliranje, niska cijena samog materijala te njegovog oblikovanja. Osnovnim polimernim materijalima oplemenjenim raznim dodacima drastično se mijenjaju svojstva te ih je lako prilagoditi nekoj konkretnoj primjeni. Mehanička svojstva polimernih zupčanika su temperaturno vrlo osjetljiva (Slika 1), toplinska provodnost im je niska te su skloni puzanju [4]. Pri 150 °C su znatno degradirana i kada je riječ o najkvalitetnijim materijalima. Modul elastičnosti osnovnih polimernih materijala je stotinjak puta manji nego kod čelika (deformacija, za isto naprezanje, toliko je veća), vlačna čvrstoća je desetak puta manja. Temperaturno područje rada im je osjetno manje nego kod metalnih zupčanika. Mehanička svojstva nekih polimernih materijala, poput poliamida, znatno ovise i o stupnju zasićenosti vodom (Slika 2). Trenja između zuba uparenih zupčanika najviše utječe na povišenje temperature zupčanika te se podmazivanjem postignutim smanjenjem trenja osiguravaju niže radne temperature pri kojima su mehnička svojstva bolja, a trošenje manje, što omogućuje dulji životni vijek zupčanika. Toplinska provodnost polimernih materijala je 100 do 200 puta lošija nego kod čelika, u zupčaničkoj primjeni to je veliki nedostatak - toplina generirana trenjem između zuba te njeno odvođenje predstavljaju veliki problem. Zanimljivo je, kada je o stručnoj literaturi riječ, da uz nekoliko doktorskih disertacija i znanstvenih članaka, postoji samo jedna knjiga o polimernim zupčanicima [5], koja je izdana prije skoro trideset godina te je zastarjela.



Slika 2 Toplinsko zaribavanje poliamidnog zupčanika s lomovima u korijenu zuba

Figure 2 Thermal seizing polyamide gear with breaks in the tooth root



Slika 3 Utjecaj zasićenosti vodom na čvrstoću

Figure 3 Influence of water saturation on strength

5. Podmazivanje polimernih zupčanika

5. Lubrication of plastic gears

Podmazivanje polimernih zupčanika može biti vanjsko i unutarnje. Osnovni vidovi podmazivanja su granično podmazivanje, mješovito podmazivanje i podmazivanje potpunim slojem maziva. Posljednje se dijeli na hidrodinamičko podmazivanje, elastohidrodinamičko podmazivanje i hidrostatičko podmazivanje [6]. Od podmazivanja punim slojem maziva, zbog geometrije zupčanika, moguće je elastohidrodinamičko (EHP) podmazivanje. Kod EHP-a dodirni pritisci mogu biti i do tisuću puta veći nego kod hidrodinamičkog podmazivanja. Još je moguće granično podmazivanje te, kada je o plastičnim zupčanicima riječ, tzv. podmazivanje

unutarnjim mazivom. Kod takvog rješenja mazivo je sastavni dio materijala zupčanika.

Kao unutarnja maziva koriste se PTFE (politetrafluoretilen) u sinteriranom ili ozračenom obliku [7], molibden-disulfid (MoS₂) i grafit. Svima im je zajednički mali otpor smicanju [8]. Prednost takvog podmazivanja je izostanak sustava za podmazivanje, a i ne zagađuju okolinu. Mana je smanjivanje čvrstoće zupčanika. PTFE ima najmanji faktor trenja od svih poznatih krutih maziva i što je postotak PTFE u osnovnom polimernom materijalu veći, faktor trenja je manji. Ipak, specifično trošenje polimernog materijala je najmanje kada je maseni udjel PTFE-a između 15 i 20 % pa povećanje udjela preko tog iznosa povećava trošenje, bez obzira na daljnje smanjivanje faktora trenja. Istraživanja [9] su također pokazala da PTFE negativno utječe na čvrstoću i krutost kompozita (15 % PTFE-a smanjuje čvrstoću za 15 %). Veličina čestica PTFE-a također utječe na trošenje, što su čestice manje i trošenje je manje.

S obzirom na to da se kod podmazivanja unutarnjim mazivom ono nalazi u cjelokupnoj strukturi zupčanika, a potrebno je samo u površinskim slojevima koji će doći u kontakt s drugim zupčanicom, pojavila su se rješenja u kojima se unutarnje mazivo nalazi samo u površinskom sloju. Na taj način je i riješen problem smanjivanja čvrstoće i krutosti zupčanika unutarnjim mazivom. Kod izrade injekcijskim prešanjem ono se izvodi u dva koraka. Jezgra i površinski sloj u kojem se nalazi unutarnje mazivo imaju istu matricu da ne bi došlo do delaminacije jezgre i površinskog sloja. Za razliku od metalnih zupčanih parova, polimerni mogu raditi na suho. To svojstvo polimernih zupčanika se često zloupotrebljava pa se ne podmazuju niti oni zupčanicima koji rade u uvjetima gdje uporaba maziva nije kontraindicirana, što im nepotrebno skraćuje životni vijek. S obzirom na to da su polimerni materijali osjetljivi na mnoge kemikalije, izbor maziva zahtijeva posebnu pozornost. Toplinski su nepostojani te je od presudne važnosti da radna temperatura bude u odgovarajućem području. Dimenzijska stabilnost im je osjetno slabija u usporedbi s metalnim zupčanicima te je potrebno uzeti u obzir i utjecaj maziva na nju.

Bez obzira na to što polimerni zupčanici mogu raditi na suho, gdje god je moguće trebalo bi ih podmazivati (barem jednokratno) čime se smanjuje trenje i trošenje, a produljuje im se životni vijek. Čak je dobro podmazivati i zupčanike kod kojih je osnovnom polimerizatu dodano neko unutarnje mazivo poput PTFE-a, molibden-disulfida ili grafitu. Prednost vanjskog podmazivanja je dvojaka - smanjuje se trenje, a time i zagrijavanje boka zuba, a i ta, podmazivanjem smanjena, oslobođena toplina lakše se odvodi zahvaljujući mazivu (pogotovo ako je riječ o mazivom ulju). Odvođenje topline je izrazito bitno za polimerne materijale zbog njihove temperaturne osjetljivosti [10].

Pozornost treba posvetiti kompatibilnosti maziva s polimernim materijalom od kojeg je zupčanik izrađen. Kompatibilnost mora biti potvrđena u svim radnim uvjetima (različita kombinacije opterećenja, brzine vrtnji, temperatura, vlažnosti...). Postoje tablice kompatibilnosti između maziva i polimernih materijala, ali su vrlo šture, odnose se na mali broj kombinacija koje nisu ispitane u svim radnim uvjetima. Procjene kompatibilnosti se uglavnom iskazuju formulacijama poput ovih: kompatibilno, uglavnom kompatibilno, djelomično kompatibilno, nije kompatibilno, nije testirano. Sve formulacije osim "kompatibilno" ne pružaju sigurnost primjene te zahtijevaju dodatna istraživanja koja bi jasno precizirala dopuštene kombinacije primjene.

Često se inkompatibilnost maziva i polimernog materijala manifestira tek kod visokih temperatura. Problem zna biti u aditivima dodanim mazivima. Problem predstavlja mali broj maziva koja su razvijena baš za polimerne materijale pa se često koriste maziva napravljena za podmazivanje metala. Aditivi dodani takvim mazivima koji poboljšavaju maziva svojstva kada je o metalima riječ, mogu vrlo negativno djelovati na polimerni materijal. Npr. aditivi za podnošenje ekstremnih pritisaka (EP aditivi), koji su u metalnoj primjeni vrlo poželjni, nisu preporučljivi kod polimernih materijala. Razni antikorozivni aditivi su također nepoželjni.

Otkriveno je da starenjem nekih maziva koja kao nova nisu bila agresivna prema polimernom materijalu, razvijaju se kemijski procesi koji razgrađuju polimerni materijal. Zato se

preporučuju sintetička maziva koja su puno otpornija na procese starenja. Najpoznatija bazna sintetička ulja za polimerne materijale su PAO (poli-alfa-olefin) i PFAE (perfluoropolieter). Silikonska maziva su se također pokazala dobrima za polimerne materijale.

Pri izboru maziva valja voditi računa o odgovarajućoj viskoznosti za postizanje minimalne debljine sloja maziva, očekivanim temperaturama, kemijskoj stabilnosti te već spomenutoj kompatibilnosti s polimernim materijalom.

6. Norme

6. Standards

Za plastične zupčanike postoji malo normi, a i one brzo zastarijevaju. Jedan razlog zašto ih je malo je relativno kratko razdoblje njihovog vrlo intenzivnog razvoja kojeg norme nisu uspjele slijediti, a drugi je razlog varijabilnost polimernih materijala - postoji bezbroj kombinacija raznih dodataka (punila, ojačala) koja znatno mijenjaju svojstva osnovnog polimernog materijala. Uz to veliki je utjecaj temperature i vlažnosti (na neke poliamide pogotovo) na svojstva polimernih materijala [11]. Sve navedeno pisanje normi čini vrlo zahtjevnim poslom.

Zasad postoji američka norma ANSI/AGMA 1106-A97 (metrička varijanta) iz 1997. g.

Naziv joj je "Tooth Proportions for Plastic Gears". Britanci imaju svoju normu BS 6168

(Specifications for Non-Metallic Spur Gears)

iz 1987. g. koja je vrlo slična njemačkoj normi VDI 2545 (Zahnraeder aus thermoplastischen Kunststoffen) iz 1981. g., koja je izvan snage.

Valja spomenuti da je u primremi nova norma VDI 2736 čija radna verzija je dostupna.

Potreba za detaljnijim normama očituje se i iz podatka da BS 6168 daje iscrpne podatke za samo dva materijala: Poli(oksi-metilen) (POM) i Poliamid 66 (PA 66). Posljednih godina AGMA je izdala dva dodatna dokumenta: AGMA 920-A01 (Materials for Plastic Gears) i AGMA 909-A06 (Specifications for Molded Plastic Gears).

Veliki nedostatak postojećih normi je taj što su bazirane na normama za metalne zupčanike, a razlike su u mnogim aspektima velike. Npr. moduli elastičnosti su za dva reda veličine manji u odnosu na čelike te su elastične deformacije

puno veće. Eksperimenti su pokazali da zbog tog svojstva više zuba preuzima opterećenje, površina dodira je veća te su naprezanja i dodirni pritisci manji nego što proračuni po normama sugeriraju [12]. Konstrukcija zupčanika mora biti prilagođena polimernom materijalu, potrebne su modifikacije u odnosu na metalnu izvedbu da se iskoriste sve prednosti polimera [13].

6.1 Hipoteza rada

6.1 Hypothesis of Work

Pravilnim izborom maziva i materijala (i pogodne kombinacije materijala pogonskog i gonjenog zupčanika) s obzirom na radne uvjete zupčanika njihov radni vijek može znatno produljiti. Polimerni materijali svakim danom postaju sve poželjniji materijali za proizvodnju zupčanika. Osnovni razlog je, dakako, cijena. Uz cijenu imaju i druge prednosti poput tihog rada, prigušivanja vibracija, dobrih antikorozivnih svojstava, male težine (stoga i malih momenata inercije) te otpornosti na trošenje prilikom rada na suho. Riječ je o području s izrazitim stupnjem razvoja te norme brzo zastarijevaju. Raspoloživa stručna literatura je vrlo skromna u usporedbi s metalnim zupčanicima. Potencijal novih polimernih materijala i od njih izrađenih zupčanika, kao i sve širi raspon njihove primjene često je u neskladu s ograničenjima postojećih normi te su nužna istraživanja temeljem kojih će norme biti ažurirane. Opravdano je pretpostaviti da će u slučaju vanjskog podmazivanja u puno više kombinacija kritično mjesto biti korijen zuba, a ne bok kao kod rada na suho. Razlog je manje trenje pa time i niže temperature te manje trošenje boka zuba.

6.2 Očekivani znanstveni doprinos

6.2 Expected Scientific Contribution

Temeljem spoznaja do kojih će se doći provedbom sugeriranih istraživanja moći će se:

- Odrediti granicu nosivosti u ovisnosti o mazivu, materijalu i ostalim utjecajnim faktorima te usporediti s radom na suho
- Izvesti analitičke izraze očekivanog broja ciklusa
- Doprinijeti poboljšanju normi

7. Zaključak

7. Conclusion

U početku su se plastični zupčanici koristili samo za prijenos gibanja, ali kako se kvaliteta materijala povećavala, sve više se koriste i za prijenose snaga. Zasad je riječ o snagama do 1,5 kw, ali sljedećih godina se očekuju pet puta veće snage [14]. Polimerni zupčanici su u fokusu industrije koja u njima vidi veliki potencijal. Bradley University i Winzeler Gear razvili su planetarni reduktor za električni auto snage 15 kW izveden pomoću zupčanika izrađenih od poli(oksi-metilena) (POM) koji se podmazuje uljem (Slika 3). Vanjsko podmazivanje polimernih zupčanika predstavlja još neistraženo područje. Još veću primjenu u prijenosu snage koči nedostatak podataka [15].



Slika 3 Prvo vozilo s polimernim zupčanicima za prijenos snage

Figure 3 The first vehicle with a polymer gears for power transmission

Riječ je o području s izrazitim stupnjem razvoja te norme brzo zastarijevaju. Raspoloživa stručna literatura je vrlo skromna u usporedbi s metalnim zupčanicima. Potencijal novih polimernih materijala i od njih izrađenih zupčanika, kao i sve

širi raspon njihove primjene često je u neskladu s ograničenjima postojećih normi te su nužna istraživanja temeljem kojih će norme biti ažurirane. Problema je mnogo: od mehaničkih svojstava, temperturne nepostojanosti, nezadovoljavajućih normi, nedovoljno podataka, literature i istraživanja, nezadovoljavajuća ponuda maziva razvijenih baš za polimerne zupčanike, itd. Potreba za istraživanjima koja će rezultirati novim znanjima je velika. Stoga ne čudi da ima slučajeva da jedan istraživač zaključuje da neki dodatak smanjuje radni vijek zupčanika, a drugi zaključuje da ga produljuje. Isti dodatak će u različitim kombinacijama s drugima osnovnim materijalima (polimerizatima), dodacima i vanjskim mazivima rezultirati različitim efektima. Dobar primjer su

staklena vlakna kao ojačala. Dok su neka stručna mišljenja negativna [8], druga su pozitivna [16]. Naime, ako se staklena vlakna nalaze i u površinskom sloju zupčanika, pogotovo u slučaju vanjskog podmazivanja, nastaje abrazivna pasta koja ubrzava trošenje.

Za kraj, primjer koji izvrsno oslikava dubinu problematike polimernih zupčanika: istraživanje je pokazalo da ako je pogonski zupčanik izrađen od poli(oksi-metilena) (POM), a gonjeni od poliamida (PA), radni vijek je neusporedivo dulji nego u obrnutom slučaju [17].

S obzirom na to da je u zadnjih petnaestak godina postignut velebni napredak, budućnost, kada je o polimernim zupčanicima riječ, doima se svijetlom.

8. Reference

8. References

- [1] I. Čatić, *Proizvodnja polimernih tvorevina*, Zagreb, 2006.
- [2] M. Šercer, B. Križan, R. Basan: *Konstruiranje polimernih proizvoda*, Zagreb, 2009.
- [3] ANSI/AGMA 920-A01: *Materials for Plastic Gears*, Alexandria, 2000.
- [4] W. Brostow, V. Kovačević, D. Vrsaljko, J. Whitworth, *Tribology of polymers and polymer-based composites*, *Journal of Materials Education* Vol. 32, 2010.
- [5] C. E. Adams, *Plastics Gearing*, Charlotte, 1986.
- [6] *Maziva i podmazivanje*, JUGOMA, Zagreb, 1986.
- [7] M. S. Khan, D. Lehmann, G. Heinrich, *Modification of PTFE nanopowder by controlled electron beam irradiation: A useful approach for the development of PTFE coupled EPDM compounds*, *eXPRESS Polymer Letters* Vol. 2, No. 4, 2008.
- [8] J. McGuinn, *Plastic Gearing Continues its Unbreakable Run*, *Power Transmission Engineering*, 2012.
- [9] J. White, *The Design and Evaluation of polymer Composite Gears*, PhD Thesis, University of Birmingham, 1998.
- [10] A. Ulrich, Z. Smith, *Exploiting the Potential of Plastic Gears*, *Gear Solutions*, Vol. 12, 2012.
- [11] Z. Domitran, *Utjecaj odstupanja dimenzija na životni vijek polimernih zupčaniča*, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2013.
- [12] J. L. Elmquist, *Deciding When to Go Plastic*, *Gear Technology*, 2014.
- [13] R. Kleiss, *Take a PEEK at Polymer*, *Gear Solutions*, Vol. 11, 2011.
- [14] Z. Smith, D. Sheridan, *A Plastic Gear Design Update*, *Gear Solutions*, Vol. 12, 2013.
- [15] J. H. Chen, F. M. Juarbe, *The Design and Manufacture of Machined Plastic Gears*, *Gear Technology*
- [16] A. B. Cropper, "The Failure Mode Analysis of Plastic Gears", Doktorski rad, The School of Engineering, The University of Birmingham, Birmingham, 1993.
- [17] K. Mao, W. Li, D. Walton, *Friction and wear behaviour of acetal and nylon gears*, *Wear*, 2008

AUTOR · AUTHOR

Branimir Markulin Grgić – nepromjenjena biografija nalazi se u časopisu Polytechnic & Design Vol. 4, No.2, 2016. str. 160.

Vladimir Markulin Grgić – nepromjenjena biografija nalazi se u časopisu Polytechnic & Design Vol. 4, No.2, 2016. str. 160.

Vesna Alić Kostešić – nepromjenjena biografija nalazi se u časopisu Polytechnic & Design Vol. 4, No.2, 2016. str. 160.