مقاله مروری

فناوری پلیمر ایران

فصلنامه علمی
سال پنجم، شماره ۴، شماره پیاپی ۲۰، زمستان ۱۳۹۹
Vol. 5, No. 4, Issue No. 20
Winter 2021, Quarterly
صفحه ۷۲-۶۷

Iran Polymer Technology: Research and Development

آخرین پیشرفت‌ها برای افزایش عملکرد چرخ‌دنده‌های پلیمری در زمینه اصلاح هندسه دنده

رسول محسن‌زاده*

دانشگاه فنی‌وحرفه‌ای استان آذربایجان‌شرقی، آموزشکده فنی‌وحرفه‌ای میانه، دپارتمان مهندسی مکانیک

چکیده ...

چرخ‌دنده‌ها عموماً درانتقال حرکت و قدرت، تحت بارها و سرعت‌های مختلف استفاده می‌شوند. به‌دلیل امتیازاتی همچون، کارکرد بی‌صدا، سبکی، مقاومت به خوردگی، سهولت تولید انبوه، ضریب اصطکاک پایین و توانایی کارکرد، بدون روانکار خارجی، استفاده از چرخ‌دنده‌های پلاستیکی رو به افزایش است. با این وجود، چرخ‌دنده‌های پلاستیکی به‌دلیل مقاومت محدود در درجه حرارت‌های بالا و خستگی، عمر محدودی نسبت به چرخ‌دنده‌های فلزی دارند. در چرخ‌دنده‌های پلیمری، در بارهای بیش از گشتاور بحرانی، به‌علت افزایش تنش یا دما در سطح دنده، نرخ سایش، افزایش قابل‌توجهی می‌یابد. اصلاح مواد چرخ‌دنده، کنترل شرایط کاری چرخ‌دنده و اصلاح هندسه دنده چرخ‌دنده‌های پلیمری از روش‌های افزایش مقاومت چرخ‌دنده‌های پلیمری در برابر حرارت و سایش است. در این پژوهش به روش‌های اصلاح دنده از جمله جاسازی پین فولادی در دنده، استفاده از سوراخ‌های خنک‌کننده، تغییر شعاع پای دنده، اصلاح پهنای دنده و استفاده از چرخ‌دنده‌های دوگانه اشاره شده‌است.

واژه‌های کلیدی:

چرخ‌دنده
اصلاح هندسه دنده
چرخ‌دنده
مقاومت حرارتی
عملکرد چرخ‌دنده

---

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:
r_mohsenzadeh@tvu.ac.ir

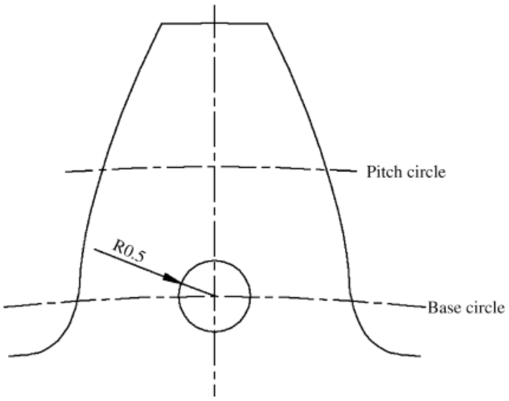
۱ مقدمه

اساساً چرخ‌دنده‌ها، شکل تکامل‌یافته چرخ‌های اصطکاکی هستند که برای جلوگیری از لغزش و اطمینان از یکنواختی حرکت نسبی، دندانه به آن‌ها اضافه شده است. در گذشته، چرخ‌دنده‌ها بر حسب کاربردشان، از چوب یا فلز ساخته می‌شدند. با پیشرفت صنایع و پا به عرصه گذاشتن پلاستیک‌ها، ساخت چرخ‌دنده از پلیمر نیز توسعه یافت [۳-۱]. مقاومت خوردگی، قابلیت قالب‌گیری تزریقی، عملکرد بدون روانکار و صدای کم از جمله مزایای چرخ‌دنده‌های پلیمری است. با این وجود، استحکام مکانیکی، مقاومت حرارتی و دوام در چرخ‌دنده‌های پلیمری نسبت به چرخ‌دنده‌های فلزی کم‌تر است [۳-۱]. سازوکار واماندگی در چرخ‌دنده‌های فلزی، متفاوت با چرخ‌دنده‌های پلیمری است. از جمله آسیب‌های مهم که منجر به واماندگی چرخ‌دنده‌های پلیمری می‌شود، تغییر شکل حرارتی است که در چرخ‌دنده‌های فلزی وجود ندارد [۴،۵]. در چرخ‌دنده‌های پلیمری، به‌دلیل ماهیت گرانروکشسان و پلاستیک پلیمرها، در طی درگیری دنده‌ها حرارت زیادی ایجاد شده، دما افزایش می‌یابد [۶]. افزایش دما باعث نرم شدن دنده‌ها و درنتیجه تغییر شکل آن‌ها می‌شود. خستگی و سایش از دیگر عواملی هستند که منجر به واماندگی چرخ‌دنده‌های پلیمری می‌شوند. سایش، خستگی، نوع و سازوکار ایجاد آن‌ها نه‌تنها به گشتاور اعمال‌شده بستگی دارند بلکه تحت تأثیر ماده اولیه چرخ‌دنده نیز هستند. تحقیقات زیادی برای افزایش عملکرد و مقاومت چرخ‌دنده‌های پلیمری در برابر این آسیب‌ها انجام گرفته است. از جمله روش‌های افزایش دوام، عمر و عملکرد چرخ‌دنده‌های پلیمری، اصلاح ظاهری دنده چرخ‌دنده‌ها است. در این پژوهش به روش‌های اصلاح دنده چرخ‌دنده‌ها برای افزایش مقاومت چرخ‌دنده‌های پلیمری در برابر آسیب‌های حرارتی، پرداخته شده است.

۲ روش‌های اصلاح دنده چرخ‌دنده‌های پلیمری

۲-۱ قرار دادن پین فولادی در سوراخ ایجاد شده در دنده چرخ‌دنده

در این روش، از پین فولادی تعبیه‌شده در سوراخ دنده چرخ‌دنده برای انتقال حرارت استفاده شد [۷]. با توجه به شکل ۱، برای جاسازی پین، سوراخی در قسمت مرکزی دنده و متقاطع با دایره مبنا ایجاد شد. جنس چرخ‌دنده‌های مورد آزمایش از پلی‌آمید و پلی‌استال انتخاب شده که تحت گشتاورها و دورهای مختلف مورد آزمایش قرار گرفتند. نرخ سایش با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد [۸].



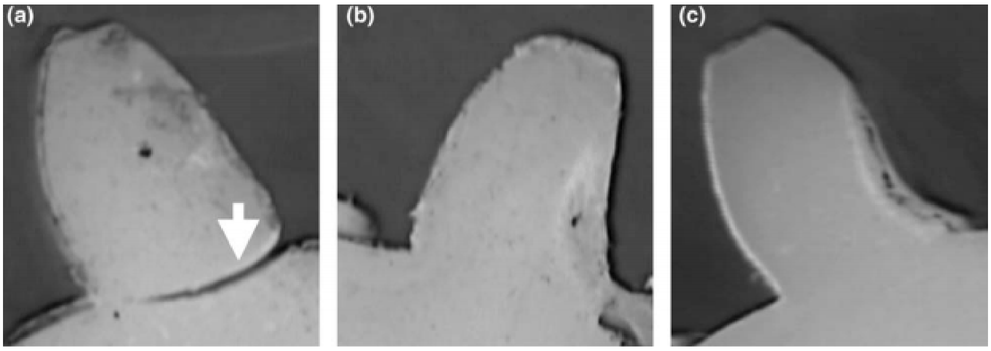
شکل ۱ طرح‌واره محل قرارگیری پین فولادی در عرض دنده چرخ‌دنده [۷].

$$W_s = \frac{W_v}{2zmbN_T} \qquad (۱)$$

نتایج، افت چشمگیر دمای سطحی دنده و در نتیجه کاهش نرخ سایش را نشان داد. بنابراین، جاسازی پین فولادی در دنده چرخ‌دنده منجر به انتقال حرارت و افزایش قابل‌توجه در عمر چرخ‌دنده‌های مورد آزمایش شد.

۲-۲ اصلاح شعاع پای دنده چرخ‌دنده

در این پژوهش چرخ‌دنده‌های پلیمری با شعاع‌های مختلف پای دنده (۰/۲۵ mm تا ۰/۷۵ mm)، قالبگیری شدند و عملکردشان با استفاده از دستگاه آزمون چرخ‌دنده مورد بررسی قرار گرفت [۹]. چرخ‌دنده‌ها تحت گشتاورهای متفاوت قرار گرفتند. آزمون‌ها تحت شرایط خشک و استفاده از روانکار انجام گرفتند. نتایج، نشان‌دهنده تأثیر قابل‌توجه شعاع پای دنده بر عملکرد چرخ‌دنده بودند. نتایج حاصل از آزمون چرخ‌دنده در گشتاورهای متفاوت برای دو نوع چرخ‌دنده (شعاع ۰/۲۵ mm تا ۰/۷۵ mm) در شکل‌های ۲ و ۳ به‌ترتیب نشان داده شده است. در چرخ‌دنده‌های با شعاع پای دنده کم، ترک پای دنده به‌دلیل تمرکز تنش بیش‌تر در پای دنده و دمای سطحی بیش‌تر به‌دلیل خم‌شدگی زیاد دنده مشاهده شد. افزایش دمای سطحی دنده ناشی از اصطکاک و اثر پسماند تحت بارگذاری نوسانی دنده است. در گشتاورهای کم‌تر، نوع واماندگی برای چرخ‌دنده‌های با شعاع پای دنده بالا، ایجاد و رشد ترک و در نتیجه شکست از ناحیه پیچ دنده مشاهده شد. درحالی‌که نوع واماندگی برای چرخ‌دنده‌های با شعاع پای دنده کم‌تر، شکست از ناحیه پای دنده بود. در تمام گشتاورها و شرایط کاری، چرخ‌دنده‌های با

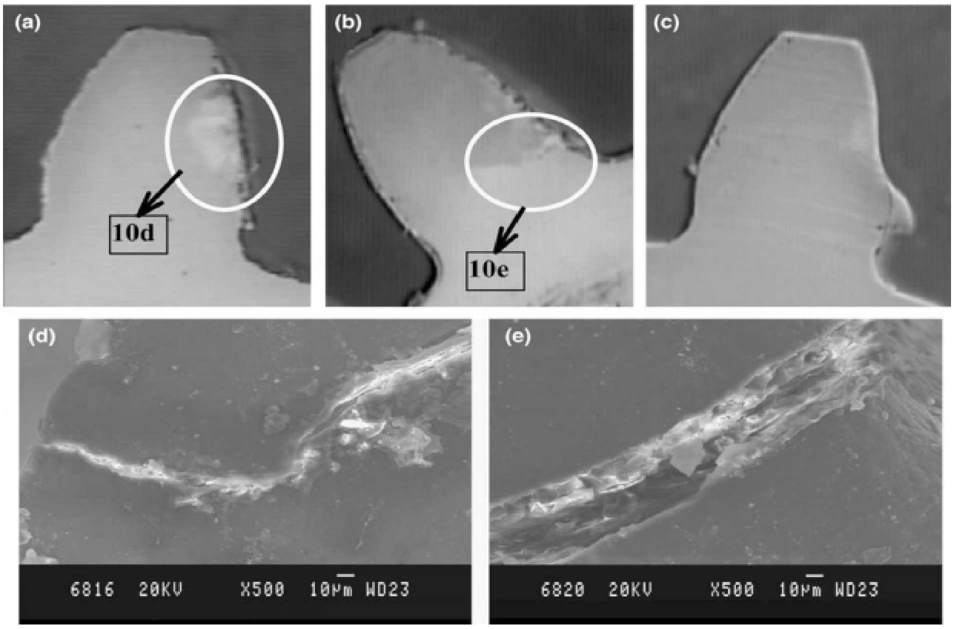


شکل ۲ واماندگی برای چرخ‌دنده با شعاع پای دنده ۰/۲۵ mm برای گشتاورهای: (a) ۱/۵، (b) ۲، (c) ۳ نیوتن متر [۹].

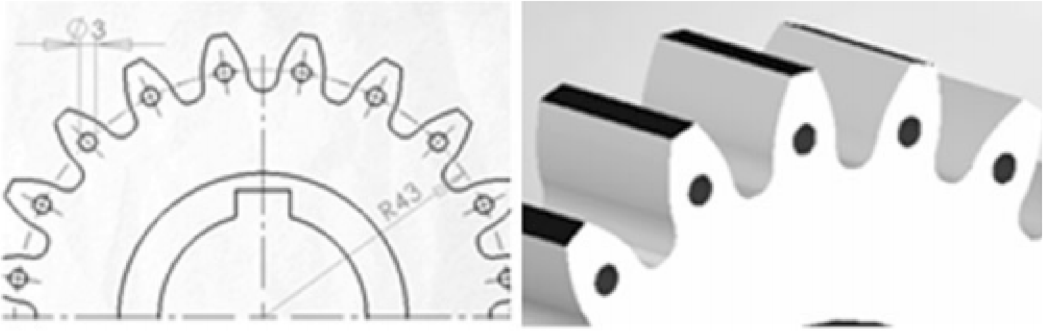
شعاع پای دنده زیاد، عملکرد بهتر و عمر زیادتری نسبت به چرخ‌دنده‌های با شعاع پای دنده کم‌تر نشان دادند.

۳-۲ ایجاد سوراخ‌های خنک‌کننده در سطح دنده چرخ‌دنده

در برخی مطالعات، از سوراخ‌های خنک‌کننده هوا در مکان‌های مختلف روی دنده چرخ‌دنده‌های پلاستیکی برای عمل خنک‌کاری استفاده کردند [۱۰،۱۱]. با توجه به شکل ۴ و ۵، از دو مدل سوراخ‌کاری در این روش استفاده شده است. در مدل اول، سوراخ‌هایی در عرض دنده، مواقیت گام و هم‌جهت با پهنای دنده ایجاد شد. در مدل دوم سوراخ‌کاری، سوراخی در عرض دنده، موقعیت دایره مبنا و هم‌جهت با پهنای دنده و دو سوراخ دیگر در قسمت سر دنده و به‌صورت شعاعی ایجاد شد. از چرخ‌دنده‌های استاندارد برای هر دو مدل استفاده و عملکرد آن‌ها مقایسه شد. کم‌ترین دمای سطحی دنده در نوع دوم سوراخ‌کاری به‌دست آمد. این امر به‌دلیل انتقال حرارت مضاعف از طریق سوراخ‌های تعبیه‌شده در جهت شعاع گزارش شد. قرارگیری سوراخ‌ها در جهت‌های متفاوت اثر قابل توجهی در انتقال حرارت و ممانعت از انباشت حرارت در سطح دنده داشته است. چرخ‌دنده‌های حاوی سوراخ‌هایی از مدل دوم،



شکل ۳ واماندگی برای چرخ‌دنده با شعاع پای دنده ۰/۷۵ mm برای گشتاورهای: (a) ۱/۵، (b) ۲، (c) ۳ نیوتن متر و (d) بزرگ‌نمایی از منطقه گام شکل a3 و (e) بزرگ‌نمایی از منطقه پای دنده شکل b3 [۹].



شکل ۴ مدل اول سوراخ‌کاری برای افزایش خنک‌کاری در دنده چرخ‌دنده از دو نمای متفاوت [۱۰].

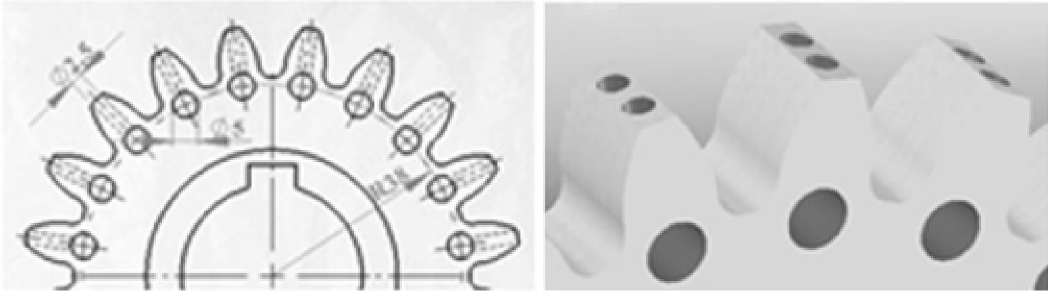
آسیب کم‌تری نسبت به چرخ‌دنده‌های سوراخ‌کاری شده از مدل اول نشان دادند.

۲-۴ اصلاح پهنای دنده چرخ‌دنده

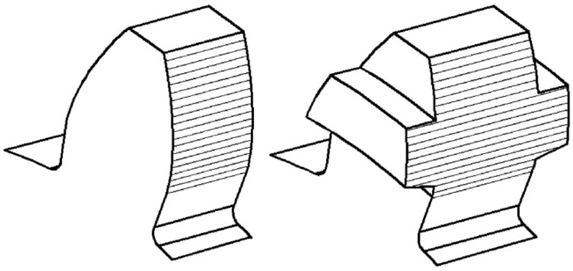
اصلاح پهنای دنده در چرخ‌دنده‌های پلاستیکی یکی دیگر از فنون استفاده‌شده توسط برخی محققان است [۱۰،۱۲،۱۳]. بیش‌ترین تنش تماسی مطابق با نظریه هرتز، در منطقه گام دنده، جایی که درگیری به‌صورت تک‌دنده ایجاد می‌شود، رخ می‌دهد. این تنش‌های زیاد در منطقه تک‌دنده منجر به ایجاد و انباشت حرارت شده، در نتیجه منجر به واماندگی از نوع حرارتی می‌شود. با توجه به شکل ۶، افزایش پهنای دنده در منطقه گام، تنش‌های تماسی در منطقه تک‌دنده را کاهش داده، درنتیجه منجر به کاهش آسیب‌های حرارتی در این منطقه می‌شود. افزایش پهنای دنده، سطح اعمال بار را کاهش داده، با ثابت در نظر گرفتن گشتاور و نیرو، مقدار تنش کاهش می‌یابد. بنابراین، با اصلاع پهنای دنده، توزیع تنش در تمام طول درگیری یکنواخت می‌شود. در پژوهش انجام‌شده در راستای اصلاح پهنای دنده، چرخ‌دنده‌های اصلاح‌شده و چرخ‌دنده‌های اصلاح‌نشده، تحت گشتاور، دور و شرایط کاری یکسان قرار گرفتند. نتایج حاصل از سایش، دما و عملکرد این چرخ‌دنده‌ها با همدیگر مقایسه شد. نتایج، نشانگر تأخیر در آسیب حرارتی چرخ‌دنده‌های اصلاح‌شده نسبت به چرخ‌دنده‌های اصلاح‌نشده بود. همچنین رفتار سایش چرخ‌دنده‌های اصلاح‌شده در مقایسه با چرخ‌دنده‌های اصلاح‌نشده بهبود نشان داد. در چرخ‌دنده‌های معمولی شکست دنده در منطقه گام، منطقه‌ای که تنش تماسی بیشینه است و ناحیه درگیری به‌صورت تک‌دنده است، رخ داد. درحالی‌که برای چرخ‌دنده‌های اصلاح‌شده شکست در منطقه پای دنده، مکانی که تنش خمشی بیشینه است، رخ داد.

۲-۵ پوشش‌دهی ورق پلیمری بر روی چرخ‌دنده فولادی

در این روش، سطح چرخ‌دنده‌های فولادی با لایه نازک پلیمری (۰/۳ mm) پوشش داده‌شدند [۱۴]. پس از پوشش‌دهی، بار برداری پرداخت با عمق بار ۰/۱ mm با استفاده از روش هاب، برروی چرخ‌دنده انجام شد. چرخ‌دنده پوشش داده‌شده با جفت چرخ‌دنده فولادی پوشش داده‌نشده، تحت گشتاورهای متفاوت و دور یکسان درگیر شدند. نتایج، نشانگر کاهش قابل‌توجه صدا با اعمال پوشش‌دهی در طول درگیری بود. بنابراین، فرضیه



شکل ۵ مدل دوم سوراخ‌کاری برای افزایش خنک‌کاری در دنده چرخ‌دنده از دو نمای متفاوت [۱۰].



شکل ۶ نمای چرخ‌دنده اصلاح‌شده و چرخ‌دنده اصلاح نشده [۱۳].

مبنی بر ساخت چرخ‌دنده‌های دوگانه با ایجاد برهم‌کنش قوی بین چرخ‌دنده فلزی و پوشش پلیمری با هدف افزایش عملکرد چرخ‌دنده ایجاد شد. این فرضیه در پژوهش دیگری به کار گرفته شد [۱۵]. سازه فلزی در شکل چرخ‌دنده ساخته شد و در داخل قالب تزریق پلاستیک قرار گرفت. با تزریق پلاستیک در قالب، در نهایت، محصول نهایی با مغز و استخوان‌بندی فلزی و بدنه پلیمری به‌دست آمد (شکل ۷). چرخ‌دنده‌های دوگانه به‌دست آمده تحت آزمون ارتعاش قرار گرفتند. عملکرد این چرخ‌دنده‌ها با چرخ‌دنده‌ای فولاد ضدزنگ بدون پوشش مقایسه شد. چرخ‌دنده‌های دوگانه به‌دست‌آمده از روش تزریق، به‌دلیل صدای کم‌تر، سایش کم‌تر و خودروانکار بودن، عملکرد بهتری نسبت به چرخ‌دنده‌های فولادی ضدزنگ نشان دادند.

۳ نتیجه‌گیری

چرخ‌دنده‌ها از جمله اجزای پرکاربرد برای انتقال دور و قدرت در انواع سازوکارها استفاده می‌شود. چرخ‌دنده‌های پلیمری به‌دلیل هزینه‌های تولید کم، خودروانکاری، کارکرد کم‌صدا و همچنین وزن کم، مورد توجه صنعت قرار گرفته است. مقاومت حرارتی کم‌تر چرخ‌دنده‌های پلیمری نسبت به چرخ‌دنده‌های فلزی از محدودیت‌های این نوع چرخ‌دنده‌ها است. بنابراین، افزایش مقاومت حرارتی این نوع چرخ‌دنده‌ها، از جمله چالش‌های محققان است. روش‌های اصلاح دنده از جمله جاسازی پین فولادی در دنده، استفاده از سوراخ‌های خنک‌کننده، تغییر شعاع پای دنده، اصلاح پهنای دنده و استفاده از چرخ‌دنده‌های دوگانه، در راستای افزایش مقاومت حرارتی و دوام چرخ‌دنده‌های پلیمری استفاده شده است.

شکل ۷ چرخ‌دنده هیبریدی [۱۵].

مراجع

1. Mohsenzadeh R., Majidi H., Soltanzadeh M., Wear and Failure of Polyoxymethylene/calcium Carbonate Nanocomposite Gears, *Proceedings of* the Institution of Mechanical Engineers, Part J: *Journal of Engineering Tribology*, **2019**, DOI: org/10.1177/1350650119867530

2. Soudmand B., Shelesh-Nezhad K., Study on the Gear Performance of Polymer-clay Nanocomposites by Applying Step and Constant Loading Schemes and Image analysis, *Wear*, 458, 203412, **2020**.

3. Soudmand B., Shelesh-Nezhad K., Failure and Wear Analysis of Poly (Butylene Terephthalate) Nanocomposite Spur Gears, *Tribology International*, 151, 106439, **2020**.

4. Zhang Y., Purssell C., Mao K., Leigh S., A physical Investigation of Wear and Thermal Characteristics of 3D Printed Nylon Spur gears, *Tribology International*, 141, 105953, 2020.

5. Černe B., Thermo-mechanical Modeling of Polymer spur Gears with Experimental Validation Using High-speed Infrared Thermography, *Mechanism and Machine Theory*, 146, 103734, **2020**.

6. Letzelter E., Guingand M., Vaujany J.P., A New Experimental Approach for Measuring Thermal Behaviour in the Case of Nylon 6/6 Cylindrical Gears, *Polymer Testing*, 29, 8, 1041-1051, **2010**.

7. Kim C.H., Durability Improvement Method for Plastic Spur Gears, *Tribology International*, 39, 11, 1454-1461, **2006**.

8. Tsukamoto N., Effect of Reducing Friction of Polyacetal in Gears (3rd Report, Polyacetal Homopolymer Filled with Fluorine-Containing Resin), Trans. *Jpn. Soc. Mech. Eng. C*, 58, 545, 231, **1992**.

9. Senthilvelan S., Gnanamoorthy R., Effect of Gear Tooth Fillet Radius on the Performance of Injection Molded Nylon 6/6 gears, *Materials & Design*, 27, 8, 632-639, **2006**.

10. Düzcükoğlu H., Yakut R., and Uysal E., The Use of Cooling Holes to Decrease the Amount of Thermal Damage on a Plastic Gear Tooth, *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 10, 6, 545-555, **2010**.

11. Düzcükoğlu H., Study on Development of Polyamide Gears for Improvement of Load-carrying Capacity, *Tribology International*, 42, 8, 1146-1153, **2009**.

12. İmrek H., Width Modification for Gears with Low Contact Ratio, *Meccanica*, 44, 5, 613-621, **2009**.

13. İmrek H., Performance Improvement Method for Nylon 6 Spur Gears, *Tribology International*, 42, 3, 503-510, **2009**.

14. Nozawa J.i., Tribological Properties of Polymer-sheet-adhered Metal Hybrid Gear, *Wear*, 266, 893-897, **2009**.

15. Nozawa J.i., Suda J., Sofian A.H., Tribology of Polymer Injection-molded Stainless Steel Hybrid Gear, *Wear*, 266, 639-645, **2009**.