کد مقاله: SBI-CLA-0012

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۲/۲۹

بسمه تعالی

شبکه بلبرینگ ایران

دپارتمان تحقیق و توسعه

بررسی راهکارهای اتخاذ شده در طراحی و ساخت بلبرینگ‌های سرعت‌بالا

چکیده:

با پیشرفت صنعت، سرعت چرخش شفت در برخی از کاربردهای صنعتی افزایش قابل توجهی پیدا کرده است. بیرینگ‌هایی که در این ماشین‌آلات به کار برده می‌شوند، بیرینگ‌های ویژه‌ای هستند که برای استفاده در سرعت‌های بالا طراحی و ساخته شده‌اند و اصطلاحاً با عنوان بلبرینگ‌های سرعت‌بالا شناخته می‌شوند. در این مقاله برخی از چالش‌های استفاده از بیرینگ‌ها در سرعت‌های بالا از قبیل افزایش نیروی گریز از مرکز وارد بر غلتک‌ها، مسئله توزیع حرارت و کاهش stiffness بیرینگ تبیین شده‌اند. همچنین برخی از راهکارهای اتخاذ شده در طراحی و ساخت بلبرینگ‌های سرعت‌بالا مورد از قبیل کاهش ابعاد غلتک‌ها، استفاده از غلتک‌های سرامیکی و انتخاب روانکار مناسب مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج این مطالعه نشان داد که با استفاده از راهکارهای ذکر شده، می‌توان بسیاری از چالش‌های ناشی از سرعت‌های بالای بیرینگ‌ها را مدیریت نمود.

کلمات کلیدی:

بلبرینگ‌های سرعت‌بالا، تنش حرارتی، غلتک‌های سرامیکی، نیروی گریز از مرکز.

۱- مقدمه

امروزه با پیشرفت صنعت و طراحی ماشین‌آلات جدید، سرعت چرخش شفت در برخی از کاربردهای صنعتی افزایش قابل توجهی پیدا کرده است. این امر، بیرینگ‌های را در شرایط عملکردی جدیدی قرار می‌دهد و چالش‌های مضاعفی در طراحی و تولید بیرینگ‌ها ایجاد می‌نماید.

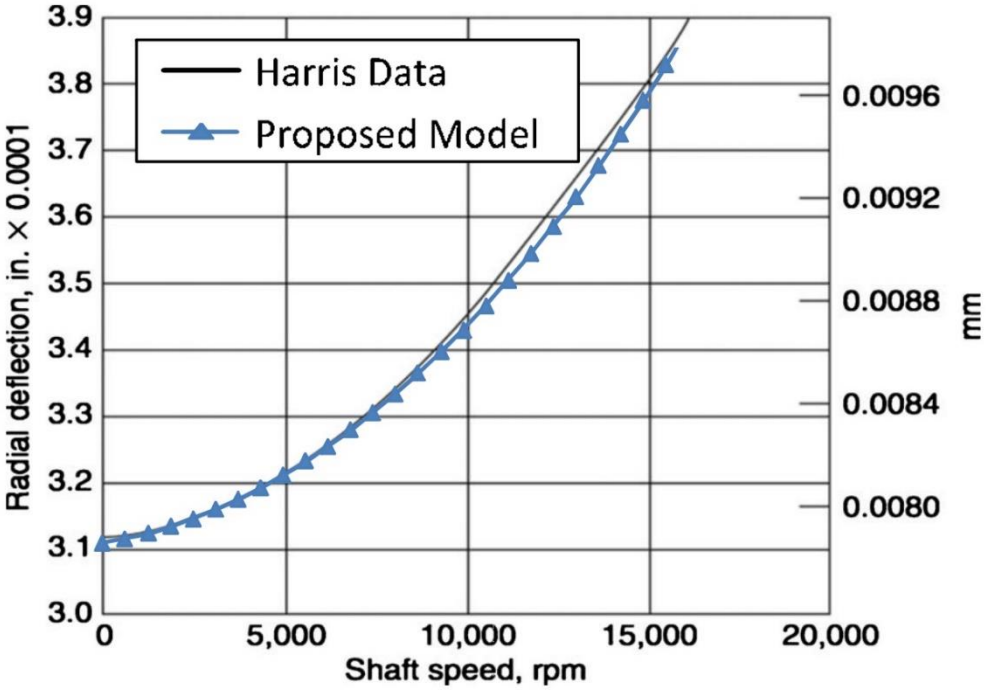
به بیرینگ‌هایی که برای استفاده در سرعت‌های بالا طراحی و ساخته شده‌اند، اصطلاحاً بلبرینگ‌های سرعت‌بالا گفته می‌شود. این بیرینگ‌ها از نظر هندسه اجزاء، متریال و روانکاری، تفاوت‌هایی با بیرینگ‌های عادی دارند که به آن‌ها اجازه می‌دهد در سرعت‌های بالا عملکرد مناسبی داشته باشند.

هر ساله تعداد بیشتری از بیرینگ‌ها در سرعت‌های بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند و بنابراین توجه به مکانیزم‌های مؤثر در تحمل سرعت‌های بالا توسط بیرینگ‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مقاله به بررسی راهکارهای اتخاذ شده در طراحی و ساخت بلبرینگ‌های سرعت‌بالا می‌پردازیم.

۲- اصلی‌ترین چالش‌های بیرینگ‌ها در سرعت‌های بالا

هنگامی که یک بیرینگ در سرعت‌های بالا به چرخش درمی‌آید، نیروی گریز از مرکز قابل توجهی به غلتک‌های آن اعمال میشود. این امر منجر به جابه‌جا شدن غلتک‌ها به سمت رینگ خارجی می‌شود؛ به گونه‌ای که میزان فشار در سمت رینگ خارجی افزایش و در سمت رینگ داخلی کاهش می‌یابد. این امر در بلبرینگ‌های تماس‌زاویه‌ای که رایج‌ترین نوع بلبرینگ‌های سرعت‌بالا هستند، موجب تغییر در زاویه تماس در رینگ داخلی و خارجی می‌گردد. به دلیل این تغییرات، غلتک‌ها به سمت رینگ خارجی تمایل پیدا می‌کنند و میزان لغزش بین غلتک‌ها و رینگ داخلی افزایش پیدا می‌کند که این امر تأثیر منفی روی stiffness بیرینگ دارد [۱].

با افزایش سرعت چرخش بیرینگ، میزان تغییر شکل اجزای بیرینگ افزایش می‌یابد. به عنوان مثال نمودار شکل شماره ۱، تغییر در deflection شعاعی یک بیرینگ در اثر تغییر سرعت چرخش شفت را نشان می‌دهد. همان طور که در این نمودار مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت چرخش شفت، میزان deflection شعاعی بیرینگ افزایش می‌یابد.



شکل ۱: تغییرات deflection شعاعی یک بیرینگ در اثر تغییر سرعت چرخش شفت [۲].

تأثیرات نیروی گریز از مرکز روی قفسه نیز قابل توجه است و منجر به تغییر شکل آن می‌گردد که این امر باید در محاسبات طراحی و ساخت بلبرینگ‌های سرعت‌بالا لحاظ شود. طبق برخی از مطالعات به هم خوردن ثبات ساختاری قفسه، یکی از دلایل اصلی خرابی بیرینگ‌ها در سرعت‌های بالا محسوب می‌گردد [۳] و [۴].

معمولاً در سرعت‌ها بالا، افزایش دمای بیرینگ شدیدتر است. بنابراین باید توزیع مناسب حرارت مد نظر قرار گیرد تا از افزایش بیش از حد گرادیان دما و ایجاد تنش‌های حرارتی مخرب پیش‌گیری شود. همچنین در سرعت‌های بالا به دلیل ویژگی الاستوهیدرودینامیکی روانکاری در بیرینگ‌های غلتشی، توزیع روانکار ممکن است دچار اختلال شود.

۳- استفاده از غلتک‌های کوچکتر در بلبرینگ‌های سرعت‌بالا

یکی از راهکارهای کاهش اندازه نیروهای گریز از مرکز، استفاده از ساچمه‌های سبکتر است. این امر با کاهش سایز ساچمه‌ها و یا استفاده از مواد دارای چگالی کمتر در تولید غلتک‌ها به دست می‌آید. به عنوان مثال یک بیرینگ با کد فنی 7014 CD ساخت شرکت SKF با ساچمه‌هایی با قطر حدود ۱۲/۷ mm را در نظر بگیرید.

اگر این بیرینگ با سرعت ۱۵۰۰۰ rpm بچرخد، نیروی گریز از مرکز وارد به هر ساچمه معادل ۱۷۴ N خواهد بود. حال اگر در یک طراحی جدید قطر ساچمه‌ها تا ۷/۹۳۸ mm کوچک شود و بیرینگ با همان سرعت ۱۵۰۰۰ rpm بچرخد، محاسبات نشان می‌دهد که نیروی گریز از مرکز وارد به هر ساچمه به ۷۹ N کاهش می‌یابد. یعنی با حدوداً ۳۸ درصد کاهش قطر ساچمه، میزان نیروی گریز از مرکز وارد به بیرینگ حدوداً ۵۵ درصد کاهش می‌یابد. این کاهش تأثیر زیادی در تحمل سرعت‌های بالا توسط بیرینگ دارد. به همین دلیل کوچکتر کردن سایز غلتک‌ها یکی از راهکارهای مورد نظر شرکت SKF در طراحی جدید بلبرینگ‌های تماس‌زاویه‌ای سری 70 CE و 719 CE این شرکت بوده است [۱].

۴- استفاده از غلتک‌های سرامیکی در بلبرینگ‌های سرعت‌بالا

غلتک‌های سرامیکی به دلیل وزن کمتری که نسبت به غلتک‌های فولادی هم‌اندازه خود دارند، در هنگام چرخش بیرینگ، نیروی گریز از مرکز کمتری ایجاد می‌کنند. رایج‌ترین نوع سرامیک مورد استفاده در تولید غلتک‌های بیرینگ‌ها سیلیکون نیترید با فرمول شیمیایی Si_3N_4 است. برخی از مزیت‌های سیلیکون نیترید عبارتند از [۱]:

* ۴۰ درصد دانسیته کمتر نسبت به فولاد؛
* ضریب انبساط حرارتی کوچک، حدوداً ۲۹ درصد فولاد؛
* مدول الاستیسیته بزرگ، حدوداً ۱۵۱ درصد فولاد؛
* سختی بیشتر نسبت به فولاد؛
* تولید اصطکاک کمتر نسبت به فولاد؛
* تحمل بهتر دماهای بالا و حفظ سختی در دماهای بالا در مقایسه با فولاد؛
* مقاومت در برابر خوردگی شیمیایی؛
* عایق الکتریکی.

با مراجعه مجدد به مثال بیرینگ با کد فنی 7014 CD با ساچمه‌های با قطر حدوداً ۱۲/۷ mm که با سرعت ۱۵۰۰۰ rpm می‌چرخد، در صورت استفاده از ساچمه‌های سرامیکی به جای ساچمه‌های فولادی، نیروی گریز از مرکز وارد به هر ساچمه از ۱۷۴ N به ۷۱ N کاهش می‌یابد؛ یعنی تنها با تغییر جنس ساچمه، میزان نیروی گریز از مرکز، حدوداً ۵۹ درصد کم می‌شود. حال اگر قطر ساچمه‌های سرامیکی تا ۷/۹۳۸ mm کوچک شود،

نیروی گریز از مرکز وارد به هر ساچمه به N ۳۲ کاهش می‌یابد. یعنی با استفاده از ساچمه‌های سرامیکی با ابعاد کوچکتر، میزان نیروی گریز از مرکز وارد به ساچمه‌ها حدوداً ۸۲ درصد کاهش می‌یابد [۱].

در سرعت‌های بالا معمولاً از میزان stiffness بیرینگ کاسته می‌شود. اما در صورت استفاده از غلتک‌های سرامیکی، به دلیل مدول الاستیسیته بیشتری که نسبت به فولاد دارند، میزان این کاهش تا حدی کنترل می‌شود و این یکی دیگر از مزایای استفاده از غلتک‌های سرامیکی در بلبرینگ‌های سرعت‌بالا است [۱].

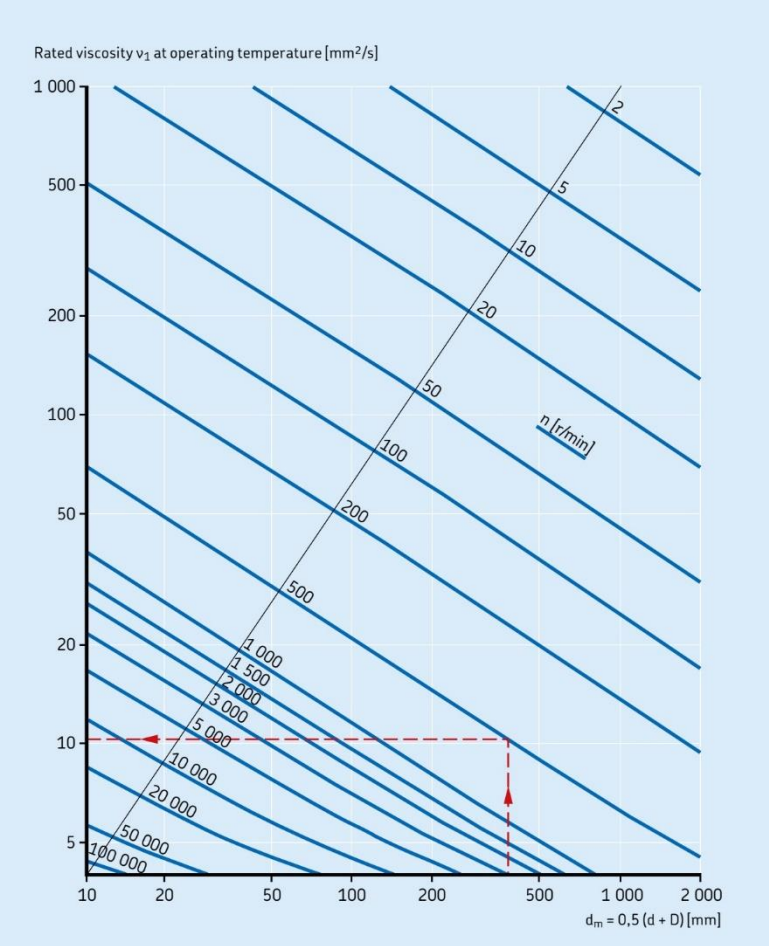
می‌دانیم که در اغلب کاربردهای بیرینگ‌ها، دمای رینگ داخلی نسبت به رینگ خارجی بیشتر افزایش می‌یابد. این امر موجب اختلاف در میزان انبساط حرارتی این دو رینگ می‌شود. این تفاوت در میزان انبساط با افزایش سرعت بیرینگ، افزایش می‌یابد. از طرفی بسیاری بلبرینگ‌های سرعت‌بالا از قبیل بیرینگ‌های اسپیندل با پیش‌بار نصب می‌شوند. بنابراین در سرعت‌های بالا میزان به دلیل تغییرات دمایی، فشارهای ناشی از پیش‌بار افزایش می‌یابد و این خود موجب بالاتر رفتن هرچه‌بیشتر دما می‌گردد. بنابراین یک چرخه خطرناک ایجاد می‌شود که در آن به طور مرتب دما و فشار افزایش می‌یابد. به همین دلیل، کنترل انبساط حرارتی در بلبرینگ‌های سرعت‌بالا از اهمیت زیادی برخوردار است. غلتک‌های سرامیکی، ضریب انبساط حرارتی کوچک‌تری نسبت به غلتک‌های فولادی دارند. بنابراین در کنترل چرخه افزایش دما، عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند [۱].

۵- استفاده از روانکار مناسب برای سرعت‌های بالا

یکی دیگر از فاکتورهای مؤثر در عملکرد بلبرینگ‌ها در سرعت‌های بالا، نوع روانکار به‌کاررفته در آن‌ها است. با افزایش سرعت چرخش بیرینگ، باید در انتخاب گریس مناسب برای آن دقت لازم صورت گیرد.

اما به طور کلی در سرعت‌های بالا، انتخاب روغن گزینه مناسب‌تری برای روانکاری بیرینگ است [۵]. زیرا در سرعت‌های بالا، روغن بهتر از گریس در داخل بیرینگ توزیع می‌شود و این امر باعث کاهش میزان اصطکاک می‌شود که در سرعت‌های بالا بسیار حیاتی است. همچنین استفاده از روغن به توزیع بهتر دما و حرارت در بیرینگ کمک می‌کند و به همین دلیل در کاهش تنش‌های حرارتی مؤثر است.

در انتخاب روغن مناسب برای روانکاری بیرینگ نیز باید دقت لازم صورت گیرد. به عنوان مثال، همان طور که در نمودار شکل شماره ۲ نشان داده شده است، هر چه سرعت چرخش یک بیرینگ افزایش پیدا کند، باید از روغن با ویسکوزیته پایین‌تری برای روانکاری آن بیرینگ استفاده کرد.



شکل ۲: انتخاب ویسکوزیته روغن بر مبنای ابعاد و سرعت چرخش بیرینگ [۶].

همچنین در برخی از کاربردهای بلبرینگ‌های سرعت‌بالا از ترکیب روغن و هوا برای روانکاری بیرینگ‌ها استفاده می‌شود که این شیوه روانکاری، نتایج مناسبی را در پی داشته است [۷].

۶- بحث و نتیجه‌گیری

همان طور که پیش‌تر اشاره شد، استفاده از بلبرینگ‌های سرعت‌بالا روزبه‌روز افزایش پیدا می‌کند و به دلیل تمایل به افزایش سرعت چرخش شفت در بسیاری از ماشین‌آلات صنعتی، تولیدکنندگان بیرینگ نیز به طور مداوم در حال تلاش برای افزایش حد تحمل سرعت در بلبرینگ‌های سرعت‌بالا هستند.

در این مقاله چالش‌های استفاده از بیرینگ‌ها در سرعت‌های بالا تبیین گردید و برخی از راهکارهای اتخاذ شده در طراحی و ساخت بلبرینگ‌های سرعت‌بالا مورد بررسی قرار گرفتند. به عنوان مثال نشان داده شد که با

کاهش سایز غلتک‌ها و یا تغییر جنس آن‌ها از فولادی به سرامیکی، می‌توان از نیروی گریز از مرکز وارد بر غلتک‌ها کاست. همچنین سایر مزایای استفاده از غلتک‌های سرامیکی بیان شد و در نهایت مروری اجمالی بر انتخاب روانکار مناسب برای بلبرینگ‌های سرعت‌بالا انجام شد.

هر چند راهکارهای مد نظر در طراحی و تولید بلبرینگ‌های سرعت‌بالا محدود به موارد ذکر شده در این مقاله نیستند، ولی آن چه در این مقاله بیان شد، می‌تواند دیدگاهی مناسب در خصوص چالش‌های سرعت بالا برای بیرینگ‌ها و رویکردهای مقابله با این چالش‌ها ایجاد کند.

منابع:

[1] https://evolution.skf.com/bearings-for-high-speed-operations, Date of access:2023.03.18.

[2] Nakhaeinejad; M. & Bryant; M.D. (2011), " Dynamic Modeling of Rolling Element Bearings with Surface Contact Defects Using Bond Graphs", J. Tribol. Jan 2011, 133(1): 011102 (12 pages).

[3] Shuaijun; M. et al. (2022), “A Study on Bearing Dynamic Features under the Condition of Multiball–Cage Collision”, Lubricants 2022, 10(1), 9.

[4] Zhang, T.; Chen, X.; Gu, J.; Li, Q. (2018), "Progress of research on cage stability of high-speed angular contact ball bearings", Hangkong Xuebao/Acta Aeronaut. Astronaut. Sin. 2018, 39, 22026.

[5] https://www.je-bearing.com/news/lubrication-grease oil/#:~:text=Oil%20lubrication%20is%20recommended%20for,must%20be%20taken%20into%20account, , Date of access:2023.03.18.

[6] SKF Group (2018), “Rolling Bearings”.

[7] https://www.ntnglobal.com/en/products/technology/speed.html, Date of access:2023.03.18.