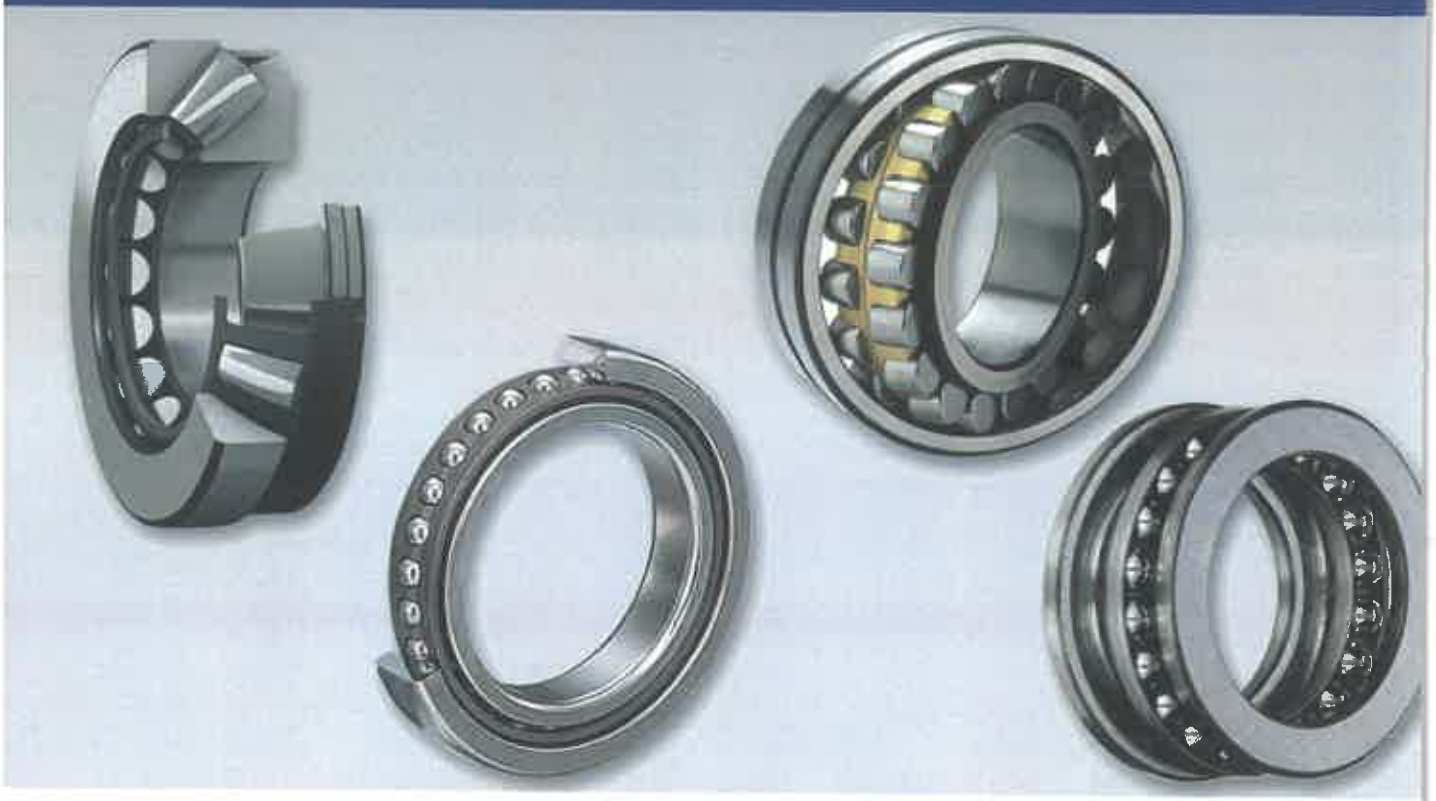
اجزاء ماشین و تجهیزات - ۲

ویرایش دوم

بلبیرینگ‌ها و رولربیرینگ‌ها

تئوری، طراحی و کاربرد

مولف : L. Hasbargen, K. Weigand J. Brändlein, P. Eschmann,



مترجم : مهندس رضا جعفری باسمنج، مهندس اکبر شیر خورشیدیان

ویراستار : مهندس اکبر شیر خورشیدیان

به نام خداوند جان و خرد
خداوند نام و خداوند جای

کزین برتر اندیشه برنگذرد
خداوند روزی ده رهنمای

بلبرینگ ها و رولربیرینگ ها

تئوری - طراحی - کاربرد

مولف : J. Brändlein – P. Eschmann
L. Hasbargen – K. Weigand

مترجم : مهندس اکبر شیرخورشیدیان
مهندس رضا جعفری باسمنج

ویراستار : مهندس اکبر شیرخورشیدیان

انتشارات پویا
خیابان سعدی بازارچه کتاب طبقه همکف شماره ۲۱
۳۲۲۵۷۳۲۷

عنوان و نام پدیدآور	: بلبیرینگ‌ها و رولربیرینگ‌ها: تئوری – طراحی – کاربرد/ مولف [یوهانس براندلین ...[و دیگران]]؛ مترجم رضا جعفری باسمنج، اکبر شیرخورشیدیان؛ ویراستار اکبر شیرخورشیدیان.
مشخصات نشر	: تهران: نشر طراح، ۱۳۹۷.
مشخصات ظاهری	: ۳۲۰ص.: مصور، جدول.
شابک	: 978-600-8666-23-3
وضعیت فهرست نویسی	: فیپا
فروست	: اجزاء ماشین و تجهیزات؛ ۲.
یادداشت	: عنوان اصلی: Wälzlagerpraxis
یادداشت	: کتاب حاضر از متن انگلیسی با عنوان " Ball and roller bearings: theory, design, and application" به فارسی ترجمه شده است.
موضوع	: بلبرینگ‌ها – یاتاقان‌های غلتکی ——Ball-bearings - - Roller bearings
شناسه افزوده	: براندلین، یوهانس، ۱۹۳۳ – م. Brandlein, Johannes
شناسه افزوده	: شیرخورشیدیان، اکبر، ۱۳۳۸ – ، مترجم
رده‌بندی کنگره	: ۱۳۹۷ ۸ ب۴ب/TJ۱۰۷۱
رده‌بندی دیویی	: ۶۲۱/۸۲۲
شماره کتابشناسی ملی	: ۵۴۳۰۴۱۵

این اثر، مشمول قانون حمایت مؤلفان و مصنفان و هنرمندان مصوب ۱۳۴۸ است، هرکس تمام یا قسمتی از این اثر را بدون اجازه مؤلف (ناشر) نشر یا پخش یا عرضه کند مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت.

نشر طراح

شابک ۳-۲۳-۸۶۶۶-۶۰۰-۹۷۸

ISBN 978- 600 -8666 - 23-3

- نام کتاب : بلبیرینگ‌ها و رولربیرینگ‌ها تئوری – طراحی – کاربرد
- مولفین : L. Hasbargen – K. Weigand – J. Brändlein – P. Eschmann
- مترجم : مهندس اکبر شیرخورشیدیان و مهندس رضا جعفری باسمنج
- ویراستار : مهندس اکبر شیرخورشیدیان
- صفحه‌آرا : فاطمه یوزباشی – فاطمه نیکبختیان
- ناشر : طراح
- تیراژ : ۵۰ جلد
- نوبت چاپ : سوم، بهار ۱۴۰۲

کلیه حقوق برای نشر طراح محفوظ است.

آدرس انتشارات : خیابان انقلاب – مقابل دانشگاه.تهران – ساختمان فروزنده – طبقه دوم واحد ۵۰۶

آدرس پخش : خیابان انقلاب – مقابل دانشگاه تهران – ساختمان فروزنده – طبقه منفی یک واحد ۲۰۸

(تلفن : ۶۶۴۶ ۷۹۹۹ و ۶۶۹۵۱۸۳۲ و ۶۶۹۵۱۸۳۱-۰۲۱ - فکس : ۶۶۹۵ ۳۶۲۶-۰۲۱ و ۰۹۱۲ ۱۱۲ ۱۱۲۳)

مقدمه

این کتاب ترجمه ویرایش سوم کتاب "Ball and Roller Bearings" است. طی بیش از چهل سال که از ویرایش اول و چهارده سالی که از ویرایش دوم کتاب می‌گذرد، این کتاب به‌صورت یک کتاب استاندارد در زمینه بیرینگ‌های غلتشی برای طراحان، تعمیرکاران و دانشجویان درآمده است. علاوه بر زبان آلمانی، این کتاب به زبان‌های انگلیسی، ایتالیایی، چینی و ژاپنی نیز ترجمه شده است. ساختار این ویرایش، شبیه به ویرایش دوم کتاب است. البته یافته‌ها و پیشرفت‌های سال‌های اخیر نیز در روزآمد کردن بعضی مطالب و تکمیل بعضی از قسمت‌های کتاب استفاده شده است. از میان این مطالب جدید، شاید مهمترین مطلب این باشد که در اوایل دهه ۱۹۸۰ از طرف شرکت FAG برای اولین بار مطرح گردید که دستیابی به استحکام دوام توسط بیرینگ‌های غلتشی نیز امکانپذیر است. انعکاس این مطلب در محاسبات اصلاح شده عمر بیرینگ‌ها که به تفصیل در مثال‌های فصل ۸ ارائه شده است، دیده می‌شود.

علاوه بر آن، قسمت‌های مهم دیگر مانند روانکاری، مواد، طراحی بدنه و نشیمنگاه، آسیب‌ها، کنترل و مراقبت از بیرینگ‌ها نیز به اندازه کافی بسط داده شده‌اند و بدین ترتیب ویرایش سوم این کتاب می‌تواند مرجع خوبی برای مطالعه و بررسی در زمینه‌های عملی مربوط به بیرینگ‌ها باشد.

اگرچه این امکان وجود داشت که تمام جدول‌هایی که امروزه در کاتالوگ‌های مختلف بیرینگ‌ها وجود دارند را نیز از کتاب حذف کرد، معهذا نویسندگان تصمیم گرفتند این جدول‌ها باقی بمانند و به‌علاوه، به دلیل گنجاندن مطالب جدید، حجم کتاب حتی ۱۵۰ صفحه دیگر نیز اضافه شده است. نویسندگان ویرایش اول این کتاب، آقایان دکتر Karl Weigand و Paul Eschmann که هر دو سالیان درازی است که بازنشسته شده‌اند، با غرور شاهد انتشار ویرایش سوم کتاب نیز بوده‌اند، ولی متاسفانه این فرصت از آقای Ludwig Hasbargen که در سنین جوانی در سال ۱۹۷۵ از دنیا رفت، گرفته شد. ویراستاران این کتاب مایلند از کادر مهندسی شرکت FAG Kugelfischer Georg Schafer AG برای در اختیار داشتن تجربیاتشان و انجام حمایت‌های لازم در هماهنگی قسمت‌های مختلف کتاب در ویرایش سوم که توسط آقای Günther Heurich انجام شد، تشکر کنند. این ویرایش همچنین تحت نظارت و رهبری پروفسور Dr. Johannes Brändlein به پایان رسیده است که بدین وسیله از ایشان نیز قدردانی می‌شود.

ویراستاران

Schweinfurt

فصل ۱ مفاهیم عمومی ..... (۱-۷۷)

۱-۱ انواع بیرینگ‌های غلتشی ۱
۱-۱-۱ بلبیرینگ‌های شعاعی ۲
۱-۱-۲ رولربیرینگ‌های شعاعی ۱۲
۱-۱-۳ بلبیرینگ‌های کف گرد ۲۴
۱-۱-۴ رولربیرینگ‌های کف گرد ۲۸
۱-۱-۵ بیرینگ‌های ویژه ۳۱
۱-۲ مواد و عملیات حرارتی ۳۴
۱-۲-۱ رینگ‌ها و اجزاء غلتنده ۳۴
۱-۲-۲ مواد اولیه قفسه‌ها ۵۲
۱-۲-۳ مواد اولیه حلقه‌های آب‌بند ۵۲
۱-۳ ابعاد خارجی ۵۴
۱-۴ تلرانس‌ها و روش‌های کنترل ۵۷
۱-۴-۱ بیرینگ‌های غلتشی با دقت کاری عادی (کلاس تلرانس PN) ۵۸
۱-۴-۲ بیرینگ‌های غلتشی با دقت دورانی بالا (کلاس‌های تلرانسی UP, SP, P2, P4, P5, P6 و HG) ۶۰
۱-۴-۳ روش‌های کنترل ۶۱
۱-۵ لقی بیرینگ ۷۲
۱-۶ کدهای فنی بیرینگ‌های غلتشی ۷۳

فصل ۲ اصطکاک، دما و روانکاری ..... (۷۹-۱۵۴)

۲-۱ اصطکاک ۷۹
۲-۱-۱ اصطکاک تماس غلتشی ۸۰
۲-۱-۲ اصطکاک لغزشی ۸۱
۲-۱-۳ اصطکاک روانکار ۸۲
۲-۱-۴ ممان اصطکاکی ۸۳
۲-۱-۵ محاسبه ممان اصطکاکی ۸۴
۲-۲ دما ۹۰
۲-۲-۱ دمای کاری ۹۰
۲-۲-۲ اختلاف دما بین رینگ‌های داخلی و خارجی ۹۳
۲-۳ اصول روانکاری ۹۴
۲-۳-۱ خصوصیات روانکار ۹۵
۲-۳-۲ روانکاری هیدرودینامیکی ۹۶
۲-۳-۳ روانکاری الاستوهیدرودینامیکی ۹۷
۲-۳-۴ فیلم روانکاری در روانکاری با گریس ۹۹
۲-۳-۵ روانکاری با روانکار خشک ۱۰۱
۲-۳-۶ عملیات روی سطح تماس و مواد ویژه ۱۰۲
۲-۴ سیستم‌های روانکاری ۱۰۳
۲-۴-۱ روانکاری با گریس ۱۰۳
۲-۴-۲ روانکاری با روغن ۱۰۶
۲-۴-۳ روانکاری خشک ۱۰۶
۲-۴-۴ انتخاب یک سیستم روانکاری ۱۰۶
۲-۴-۵ چند مثال ۱۰۷
۲-۵ انتخاب روانکار ۱۱۱
۲-۵-۱ گریس‌های روانکاری ۱۱۳
۲-۵-۲ روغن‌های روانکاری ۱۲۰
۲-۵-۳ روانکاری خشک ۱۲۳
۲-۶ تأمین روانکار ۱۲۵
۲-۶-۱ تأمین گریس ۱۲۵
۲-۶-۲ تأمین روغن ۱۳۰
۲-۶-۳ کاربرد روانکار خشک ۱۵۳

فصل ۳ اصول طراحی بیرینگ ..... (۱۵۵-۲۰۲)

۳-۱ چیدمان بیرینگ‌ها ۱۵۵
۳-۱-۱ بیرینگ‌های ثابت و شناور ۱۵۵
۳-۱-۲ چیدمان قابل تنظیم بیرینگ ۱۵۷
۳-۱-۳ چیدمان بیرینگ شناور ۱۶۰
۳-۲ جهت و جریان نیرو ۱۶۰
۳-۳ سرعت‌های مجاز ۱۶۳
۳-۴ حداقل بار لازم برای بیرینگ‌های کف گرد و شعاعی ۱۶۹
۳-۵ جبران نابه‌جایی ۱۷۱
۳-۶ آلودگی صوتی در دوران ۱۷۳
۳-۷ دقت دورانی ۱۷۷
۳-۸ انطباق ۱۸۱
۳-۸-۱ محل نشیمن بیرینگ‌های شعاعی ۱۸۱
۳-۸-۲ محل‌های نشیمن بیرینگ کف گرد ۱۸۵
۳-۸-۳ جداول انطباق ۱۸۷
۳-۸-۴ تنش‌ها و کرنش‌های ناشی از جازنی پرسی ۱۸۷
۳-۹ لقی شعاعی قبل از جازنی و هنگام کارکرد ۲۰۰

فصل ٤ طراحی محل نصب بیرینگ ..... (۲۰۳-۲۷۸)

۴-۱ ثابت‌کردن رینگ‌های بیرینگ ۲۰۳
۴-۱-۱ جهت‌های ثابت کردن ۲۰۳
۴-۱-۲ روش‌های ثابت کردن بیرینگ ۲۰۶
۴-۲ ابعاد تکیه‌گاه (استاندارد DIN 5418) ۲۱۷
۴-۲-۱ پهنای لبه‌ها در شفت و نشیمنگاه ۲۱۷
۴-۲-۲ ارتفاع پله در شفت و نشیمنگاه ۲۱۷
۴-۲-۳ رولربیرینگ‌های استوانه‌ای ۲۱۹
۴-۲-۴ رولربیرینگ‌های مخروطی و رولربیرینگ‌های کروی کف‌گرد ۲۱۹
۴-۲-۵ بیرینگ‌های با شیار محیطی و خار فنری ۲۲۰
۴-۳ طراحی قطعات دربرگیرنده بیرینگ‌ها و بدنه‌ها ۲۲۰
۴-۳-۱ تأثیر نشیمنگاه‌های الاستیک روی تنش‌های بیرینگ ۲۲۱
۴-۳-۲ موقعیت نقاط مهار نشیمنگاه ۲۲۶
۴-۳-۳ مهار مماسی بدنه نشیمنگاه ۲۲۹
۴-۳-۴ بدنه نشیمنگاه‌هایی که در راستای شعاعی مهار شده‌اند ۲۳۴
۴-۳-۵ اعمال بار تحت زاویه به یک‌بدنه نشیمنگاه ۲۳۸
۴-۳-۶ نشیمنگاه‌های رولربیرینگ‌های اعوجاج یافته ۲۴۱
۴-۳-۷ نتیجه‌گیری ۲۴۱
۴-۴ آب‌بندی بیرینگ ۲۴۲
۴-۴-۱ حلقه‌های آب‌بندی بدون تماس ۲۴۲
۴-۴-۲ حلقه‌های آب‌بندی تماسی ۲۴۶
۴-۴-۳ مشکلات مربوط به حلقه‌های آب‌بندی و چاره آنها ۲۵۱
۴-۵ نصب کردن و بیرون آوردن ۲۵۱
۴-۵-۱ ابزارها و تجهیزات مورد نیاز نصب ۲۵۱
۴-۵-۲ تنظیم لقی بیرینگ حین نصب ۲۶۳
۴-۵-۳ ابزارها و تجهیزات بیرون آوردن بیرینگ‌ها ۲۶۸

۴-۵-۴ روش‌های خاص در نصب و بیرون آوردن بیرینگ‌ها ۲۷۰
۴-۵-۵ تجهیزات اندازه‌گیری مورد نیاز برای نصب بیرینگ‌ها ۲۷۴

فصل ۵ آسیب‌دیدگی بیرینگ‌های غلتشی ..... (۳۱۴-۲۷۹)

۵-۱ کلیات ۲۷۹
۵-۲ علل ایجاد صدمات در بیرینگ‌ها ۲۸۱
۵-۲-۱ خستگی ۲۸۱
۵-۲-۲ سایش ۲۸۶
۵-۲-۳ صدمه نشای از خوردگی ۲۸۷
۵-۲-۴ صدمات ناشی از لغزش ۲۸۸
۵-۲-۵ فرورفتگی‌های موضعی در سطوح غلتش رینگ‌ها ۲۸۹
۵-۲-۶ نصب نادرست ۲۹۲
۵-۲-۷ عیوب‌ناشی‌ازروش‌های‌نادرست‌نصب ۲۹۷
۵-۲-۸ صدمات ناشی از روانکاری ضعیف ۲۹۹
۵-۲-۹ صدمات ناشی از طراحی نادرست ۳۰۱
۵-۳ نظارت بر عملکرد بیرینگ‌ها ۳۰۲
۵-۳-۱ معیارهای نظارت بربیرینگ‌ها قبل از خرابی ۳۰۳
۵-۳-۲ اندازه‌گیری درجه حرارت ۳۰۴
۵-۳-۳ اندازه‌گیری ارتعاش ۳۰۷
۵-۳-۴ اندازه‌گیری سایش ۳۱۰
۵-۳-۵ چه وقت باید یک بیرینگ آسیب دیده را بیرون آورد ۳۱۲

فصل ۱

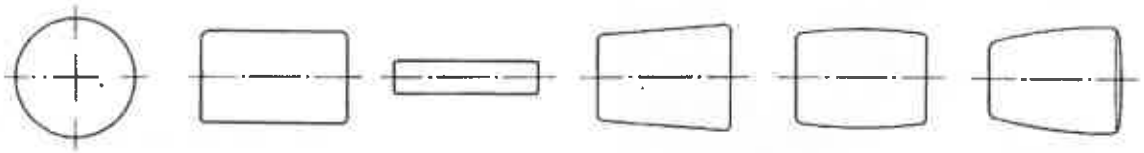
مفاهیم عمومی

۱-۱ انواع بیرینگ‌های غلتشی

به‌طورکلی تمام بیرینگ‌های غلتشی از دو عدد رینگ و مجموعه‌ای از اجزاء غلتنده که در مسیر مشخصی داخل رینگ‌ها حرکت می‌کنند، تشکیل شده‌اند. شکل‌های استاندارد این اجزاء شامل ساچمه، رولراستوانه‌ای، رولرسوزنی، رولرمخروطی، رولر بشکه‌ای متقارن و رولر بشکه‌ای *نامتقارن* می‌باشند (**شکل ۱-۱**).

همچنین اجزای غلتنده، با قفسه‌ای مهار شده‌اند تا همواره فاصله آنها از هم ثابت مانده و از برخورد و تماس آنها جلوگیری شود. در رولربیرینگ‌های سوزنی و رولربیرینگ‌های کروی خود تنظیم بدون لبه برآمده (روی رینگ داخلی)، قفسه باید موقعیت مناسب محور دوران رولرها را نیز تضمین نماید. در بیرینگ‌های قابل تفکیک، قفسه‌ها وظیفه دیگری نیز دارند که نگه داشتن مجموعه اجزاء کنار هم می‌باشد. این امر باعث تسهیل در نصب بیرینگ‌ها می‌شود. اکثراً رینگ‌ها و اجزاء غلتنده را از فولادهای کرم‌دار می‌سازند که توانایی سختی‌پذیری تا مغز قطعه را داشته باشند.

در بعضی موارد نیز از فولادهای سخت شونده سطحی استفاده می‌گردد. قطعات بیرینگ‌های غلتشی بزرگ، مثل بیرینگ‌های مفصلی بزرگ، از کونچ و تمپرکردن فولاد با قابلیت سختی‌پذیری سطحی، تولید می‌شوند و فقط سطوح تماس سخت می‌گردند. در بیرینگ‌های



شکل ۱-۱ انواع اجزای غلتنده بلبیرینگ‌ها و رولربیرینگ‌ها

ویژه که تحت بار، سرعت، حرارت و یا خوردگی بالایی کار می‌کنند از فولادهای مقاوم به حرارت یا فولادهای زنگ‌نزن به همراه پلاستیک، سرامیک یا مواد مخصوص دیگر بنا به مورد کاربرد، استفاده می‌شود (ر.ک به بخش ۱-۲-۱). قفسه‌های تولید شده به روش پرسکاری، معمولاً از ورق‌های فولادی ساخته می‌شوند. البته در بعضی موارد، از ورق برنجی نیز استفاده می‌گردد. قفسه‌های یکپارچه نیز از پلاستیک، برنج، آلیاژهای سبک یا فولاد و در بعضی موارد از آهن زینتر شده (تف جوشی شده) یا از رزین فنولی با لایه‌های الیاف نخی ساخته می‌شوند.

البته اکثراً قفسه‌های یکپارچه از مواد ترموپلاست تزریق شده در قالب، خصوصاً از پلی‌آمید تقویت شده با الیاف شیشه تولید می‌شوند (ر.ک به بخش ۱-۲-۲).

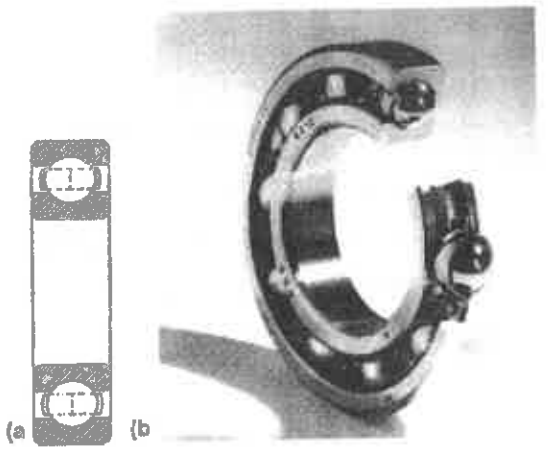
انواع بیرینگ‌های غلتشی با توجه به طراحی و موارد کاربرد، دسته‌بندی می‌شوند. مشخصه اصلی تمایز بین بیرینگ‌های شعاعی و بیرینگ‌های محوری، راستای اعمال بار اصلی به آنها می‌باشد و همچنین شکل اجزای غلتنده، نشانه اصلی تمایز بین بلبیرینگ‌ها و رولربیرینگ‌ها می‌باشد. مشخصه مهم دیگر جهات مهارکردن حرکت شفت توسط بیرینگ غلتشی است. مثلاً آیا بیرینگ امکان جابه‌جایی محوری به شفت می‌دهد؟ یا آیا بیرینگ اجازه حرکت زاویه‌ای به شفت می‌دهد تا بتواند خود را با انحراف شفت به هنگام دوران رینگ‌ها تطبیق دهد؟

۱-۱-۱ بلبیرینگ‌های شعاعی

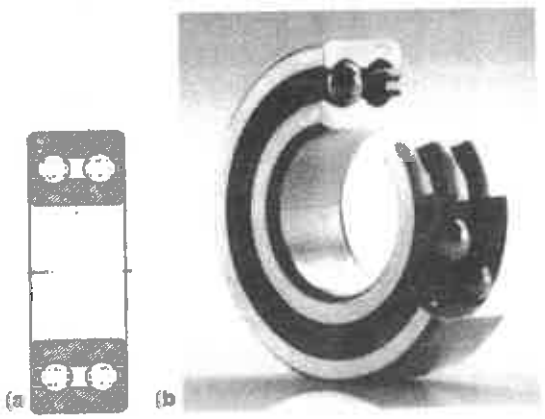
بلبیرینگ‌های شیار عمیق

در این نوع بلبیرینگ‌ها، در هر رینگ یک شیار عمیق دایره‌ای یا شعاعی برابر با شعاع ساچمه وجود دارد. به خاطر وجود همین شیار و ایجاد سطح تماس بالا بین ساچمه‌ها و رینگ‌ها، این نوع بلبیرینگ‌ها توان تحمل بارهای شعاعی زیاد به همراه نیروهای محوری را دارند (به شکل‌های ۱-۲ و ۱-۳ توجه شود).

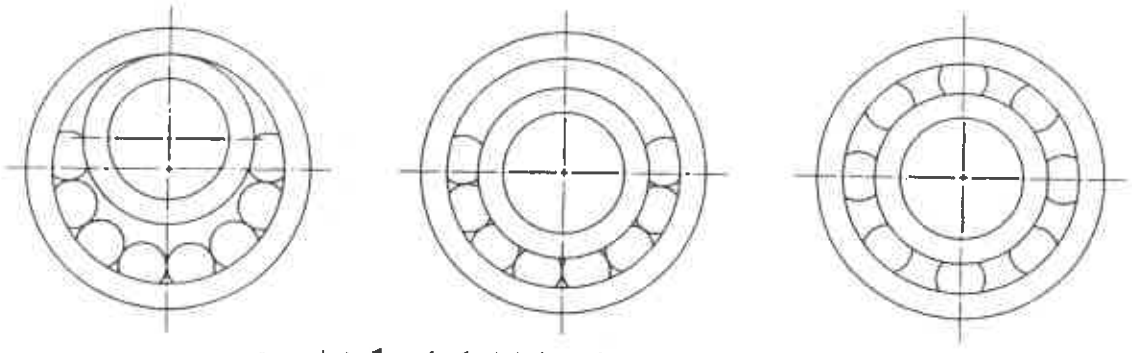
شکل ۱-۴ نحوه مونتاژ ساچمه‌ها بین رینگ‌ها را نشان می‌دهد. در ابتدا، فضای خالی ناشی از خارج از مرکز



شکل ۱-۲ بلبیرینگ شیار عمیق یک ردیفه



شکل ۱-۳ بلبیرینگ شیار عمیق دو ردیفه



شکل ۱-۴ مراحل جازنی ساچمه‌ها داخل یک بلبیرینگ شیار عمیق

قرارگرفتن رینگ‌ها نسبت به هم، امکان قراردادن ساچمه‌ها داخل رینگ‌ها را ایجاد می‌کند. لازم به ذکر است اندازه و تعداد ساچمه‌ها توسط معادلات مربوط و با توجه به الاستیسیته رینگ‌ها محاسبه می‌گردد. پس از قرارگیری تمامی ساچمه‌ها، رینگ داخلی را در موقعیت هم مرکز با رینگ خارجی قرار می‌دهیم، سپس ساچمه‌ها را در فضای بین رینگ‌ها با فواصل مساوی مرتب می‌کنیم، در این حالت می‌توان قفسه را روی ساچمه‌ها مونتاژ نمود.

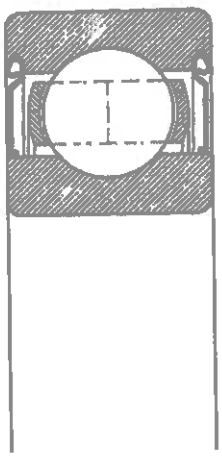
اکثراً در بلبیرینگ‌های شیار عمیق از قفسه‌های دو تکه استفاده می‌شود، این قفسه‌ها معمولاً از پرسکاری ورق فولادی یا برنجی ساخته می‌شوند. نیمه‌های قفسه از دو طرف در بلبیرینگ قرار گرفته و توسط پرچ یا خم‌کردن لبه‌های خار مانند روی آنها به هم متصل می‌گردند.

در برخی موارد از قفسه‌های پلاستیکی نیز استفاده می‌شود. در نمونه‌های پلاستیکی، لبه‌های نگهدارنده قابل انعطافی تعبیه شده‌که به همین جهت براحتی و با فشار می‌توان آن را داخل بلبیرینگ و ساچمه‌ها چفت‌کرد. در بلبیرینگ‌هایی‌که کاربرد ویژه داشته باشند از قفسه‌های یکپارچه‌ای مشابه قفسه‌های دو تکه پرسی‌که ساچمه‌ها را ثابت می‌کنند استفاده می‌شود. قفسه‌های یکپارچه این نوع بلبیرینگ‌ها که برای کار در سرعت بالا طراحی شده‌اند، می‌توانند توسط لبه‌های رینگ داخلی یا خارجی نیز در جای خود ثابت شوند. برای این نوع قفسه‌ها، باید لبه‌های رینگ‌ها سنگ زده شود.

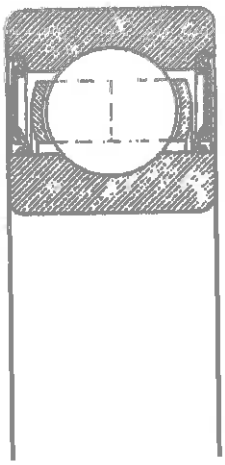
به دلیل توانایی تحمل بارهای شعاعی و محوری، اصطکاک کم و توانایی تحمل سرعت‌های بالا، بلبیرینگ‌های شیار عمیق کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف پیدا کرده‌اند. بلبیرینگ‌های شیار عمیق دو ردیفه قابلیت تحمل بارهای خمشی را نیز دارند.

بلبیرینگ شیار عمیق دو ردیفه برای شفت‌های کوتاهی که بخواهیم فقط از یک بلبیرینگ در انتهای آن استفاده کنیم مناسب است.

امروزه، بلبیرینگ‌های شیار عمیق با حفاظ فلزی (شکل ۱-۵) یا مجهز به حلقه آب‌بندی پلاستیکی (شکل ۱-۶) در حجم بسیار بالایی به‌کار می‌روند. به دلیل وجود حفاظها یا حلقه‌های آب‌بندی، داخل بلبیرینگ پاکیزه



شکل ۱-۵ بلبیرینگ شیار عمیق مجهز به حفاظ فلزی



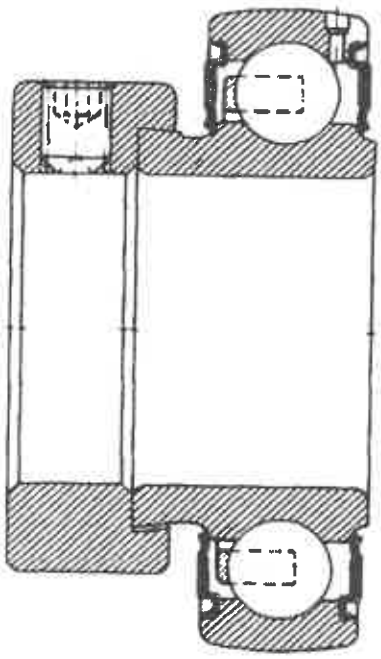
شکل ۱-۶ بلبیرینگ شیار عمیق مجهز به حلقه آب‌بند لاستیکی

مانده و این امر باعث افزایش عمر بلبیرینگ می‌گردد (ر.ک. به بخش ۲-۵-۵ از جلد دوم). این بلبیرینگ‌ها خصوصاً برای طراحی ماشین‌های جمع و جور مناسب هستند زیرا دیگر نیاز به در نظر گرفتن فضایی برای نصب کاسه نمد جهت محافظت از بلبیرینگ‌ها *نمی‌باشد*.

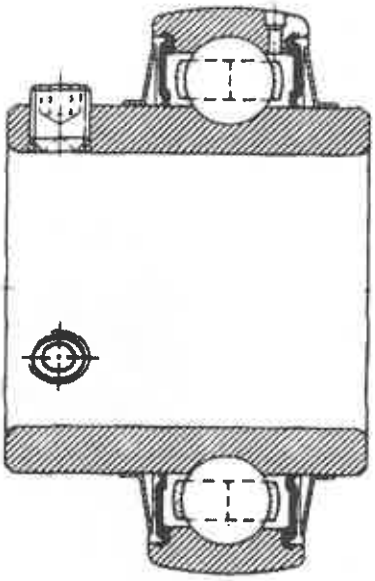
حفاظ‌ها با پرس کردن واشرهای فولادی داخل شیار مربوطه در رینگ خارجی و فرم‌دهی لبه پایین به صورتی که با لبه رینگ داخلی فاصله کمی داشته باشد روی بلبیرینگ نصب می‌شوند. حلقه‌های آب‌بند از لاستیک یا واشر پلاستیکی که به یک حلقه فلزی جهت جازدن چسبانده شده باشد ساخته می‌شوند. لبه داخلی حلقه آب‌بندی فرم مخصوصی دارد تا بتواند روی لبه سنگ خورده رینگ داخلی بلغزد. این لبه به نحوی با سطح لبه رینگ‌داخلی تماس دارد که هیچگونه باراولیه‌ای را بر بلبیرینگ اعمال *نمی‌کند*. طرح‌های مختلف بلبیرینگ‌ها با حلقه آب‌بندی یا حفاظدار به صورت یک طرفه یا دو طرفه در بازار موجود می‌باشند. داخل بلبیرینگ‌هایی که در هردوطرف، حلقه آب‌بندی داشته باشند، توسط تولیدکننده، به میزان لازم گریس تزریق می‌گردد و این میزان به نحوی در نظر گرفته شده است که تا پایان عمرمفید بلبیرینگ، نیازی به گریسکاری مجدد *نباشد*.

بلبیرینگ‌های نوع S

بلبیرینگ‌های با شیار عمیق که رینگ داخلی آنها دنباله داشته باشد را بلبیرینگ نوع S می‌نامند. این طرح فقط برای بعضی از موارد خاص به‌کار می‌رود. در این نوع از بلبیرینگ به یک طرف رینگ داخلی، یک رینگ قفل‌کن خارج از مرکز نصب می‌شود (شکل ۱-۷) و یا خود رینگ داخلی بلندتر طراحی شده و روی آن دو پیچ تنظیم تعبیه می‌شود (شکل ۱-۸). عموماً این نوع رینگ‌ها حلقه آب‌بند لاستیکی دو طرفه داشته و حتی در مواردی از زبانه‌های نصب شده روی رینگ داخلی (شکل ۱-۸) جهت حفاظت از حلقه آب‌بند استفاده می‌شود.



شکل ۱-۷ بلبیرینگ نوع S با رینگ خود قفل کن خارج از مرکز

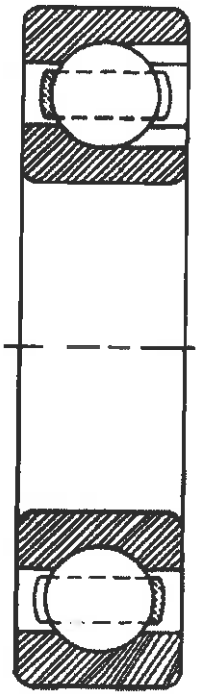


شکل ۱-۸ بلبیرینگ نوع S با دو پیچ تنظیم مغزی

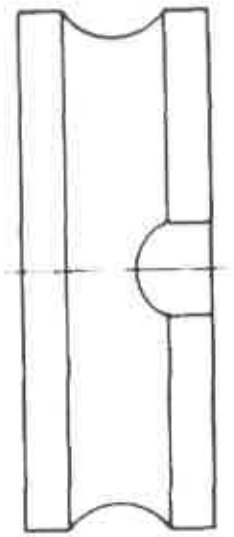
معمولاً در این نوع بلبیرینگ‌ها سطح خارجی رینگ بیرونی به شکل کروی سنگ زده می‌شود تا با چرخش داخل محفظه چدنی یا فولادی مخصوص خود، بتواند خود را با خطاهای احتمالی عدم تراز بودن شفت یا اشکال موقعیت‌قرارگیری بلبیرینگ، تطبیق دهد. این بلبیرینگ‌ها عموماً در ماشین‌آلات کشاورزی، نوار نقاله‌ها و ماشین‌آلات ساختمانی به‌کار می‌روند.

بلبیرینگ‌های شیار عمیق با شیار جازنی ساچمه‌ها

این نوع بلبیرینگ در واقع نسل اول بلبیرینگ‌های شیار عمیق بدون شیار جازنی می‌باشند (شکل‌های ۱-۹ و ۱-۱۰).



شکل ۱-۹ بلبیرینگ شیار عمیق با شیار جازنی ساچمه‌ها



شکل ۱-۱۰ رینگ داخلی یک بلبیرینگ شیار عمیق با شیار جازنی ساچمه‌ها

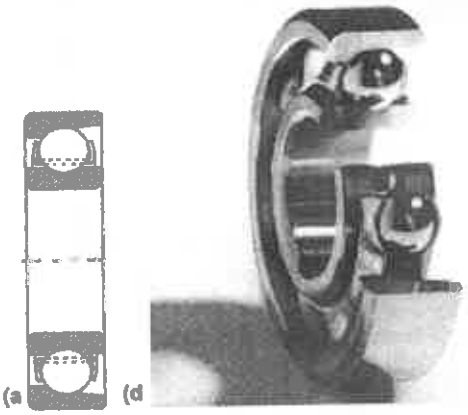
در یک طرف این بلبیرینگ‌ها روی لبه هر دو رینگ داخلی و خارجی، شیارهایی تعبیه شده که از طریق این شیارها می‌توان به‌راحتی ساچمه‌ها را داخل بلبیرینگ جازد.

این بیرینگ‌ها جهت تحمل بارهای محوری زیاد مناسب نیستند، زیرا در آن صورت ساچمه‌ها از شیارهای جازنی خارج خواهند شد. چون تقریباً به تمام بیرینگ‌ها بار محوری نیز وارد می‌شود، بیرینگ‌های بدون شیارجازنی کاربرد بیشتری دارند.

بیرینگ‌های دینام

ساختمان بیرینگ‌های مخصوص دینام و ژنراتورها بسیار شبیه بلبیرینگ‌های شیار عمیق بدون شیار جازنی است. اما چون در رینگ خارجی فقط یک لبه وجود دارد، اجزاء آن می‌توانند به‌راحتی از بیرینگ جدا شوند.

پروفیل دایره‌ای شکل شیار در رینگ خارجی، از مرکز رینگ به‌بعد، تبدیل به پروفیل خطی می‌شود (شکل ۱-۱۱). بیرینگ‌های دینام بار محوری را فقط در یک جهت می‌توانند تحمل کنند. به همین دلیل برای مهار نمودن شفت در راستای محوری باید از دو بیرینگ رو در روی هم استفاده نمود. معمولاً در این حالت بیرینگ‌ها را با لقی محوری کمی مونتاژ می‌نمایند تا امکان انطباق با تغییرات جزئی در طول شفت و محفظه بیرینگ وجود داشته باشد. از آنجا که اجزاء بیرینگ‌های دینام قابل جداشدن هستند، می‌توان رینگ داخلی با ساچمه‌ها و قفسه را جداگانه در جایگاهشان نصب نمود. ساچمه‌ها توسط قفسه‌ای با مقطع U شکل از جنس برنج یا فولاد نگه داشته می‌شوند، البته از قفسه‌های یکپارچه از جنس پلی آمید تقویت شده با الیاف شیشه نیز استفاده می‌شود. قفسه، ساچمه‌ها و رینگ داخلی، یک مجموعه را تشکیل می‌دهند. گرچه قطر خارجی تمام رولربیرینگ‌ها تلرانس منفی دارند، ولی تمام بیرینگ‌های دینام تلرانس 0.01 mm + دارند. منشاء این تفاوت به گذشته باز می‌گردد.



شکل ۱-۱۱ بیرینگ دینام

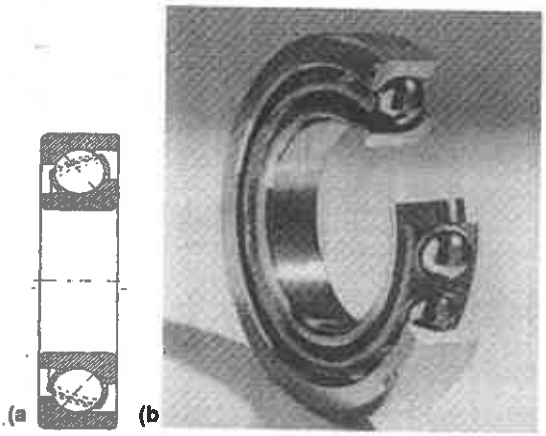
بیرینگ‌های دینام در انواع لوازم الکتریکی کوچک از قبیل دینام، استارت خودرو، جارو برقی، قطب نما و... استفاده می‌شوند، ولی رفته‌رفته جای خود را به بلبیرینگ‌های شیار عمیق می‌دهند.

بلبیرینگ یک ردیفه با تماس زاویه‌ای

در بلبیرینگ‌های یک‌ردیفه با تماس زاویه‌ای ، همانگونه که در شکل ۱-۱۲ نشانداده شده است، شیارها به نحوی قرار گرفته‌اند که نیروها تحت زاویه تماس مشخصی از یک رینگ به رینگ دیگر منتقل می‌شوند، زاویه‌ای که بین خط اعمال نیرو و صفحه شعاعی تشکیل شده است.

بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای در انواع مختلف با زاویه تماس 15° و25° و 40° ساخته می‌شوند.

به‌خاطر همین زاویه تماس، بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای یک ردیفه خیلی بهتر از بلبیرینگ‌های شیاردار، قادر به تحمل بارهای محوری بالا می‌باشند. این بلبیرینگ‌ها فقط زمانی قادر به تحمل بارهای شعاعی‌هستند که تحت بارهای‌محوری نیز باشند.

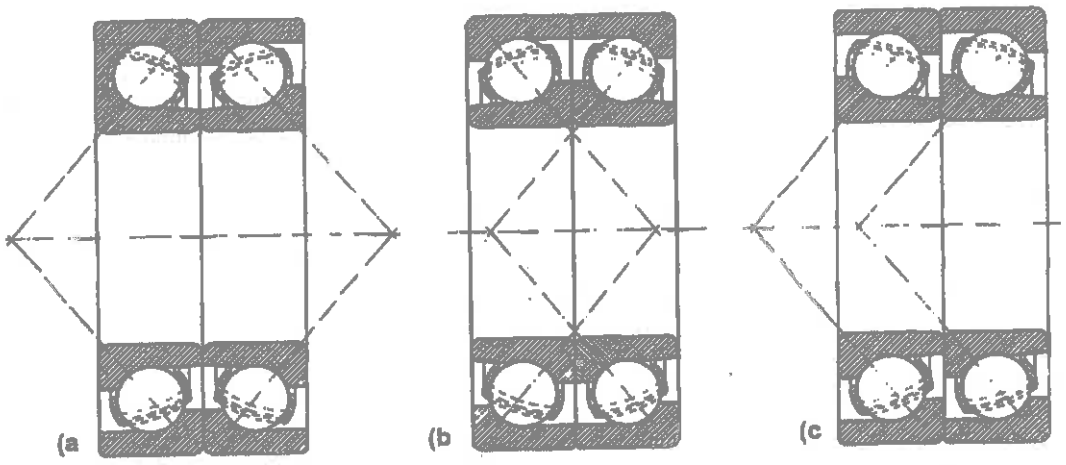


شکل ۱-۱۲ بلبیرینگ یک ردیفه با تماس زاویه‌ای

اگر بار محوری اعمالی، دائمی *نباشد* و یا نسبت بار شعاعی به بار محوری از مقدار مجاز تعیین شده به واسطه زاویه تماس، بالاتر باشد، باید از دو بلبیرینگ روبه‌روی هم در شفت استفاده شود تا شفت در هر دو جهت محوری ثابت شود. جهت دست یافتن به بهترین وضعیت تقسیم بار و غلتش ساچمه‌ها، باید هنگام مونتاژ کردن، موقعیت محوری این دو بلبیرینگ را دقیقاً تنظیم کرد. تنظیم موقعیت محوری بلبیرینگ‌ها، مانع جدا شدن بیش از حد بلبیرینگ‌ها، در اثر اختلاف حرارتی شفت و نشیمنگاه بلبیرینگ‌ها می‌گردد. این اختلاف حرارت که باعث انبساط و انقباض در راستای محور می شود، می‌تواند باعث تغییر لقی بین اجزاء بلبیرینگ شود (ر.ک. به بخش ۳-۱-۲). با یک قطعه تنظیم لاستیکی می‌توان تغییرات فاصله بلبیرینگ‌ها را جبران کرد.

بلبیرینگ‌های یک ردیفه با تماس زاویه‌ای، به شکل O و X و یا پشت سرهم (شکل ۱-۱۳) کنار هم مونتاژ می‌شوند. این بلبیرینگ‌ها در چند طرح مختلف طراحی می‌شوند که با پیشوند U نمایش داده می‌شوند. این بلبیرینگ‌ها را می‌توان بنا به نیاز در شکل‌های مختلفی حتی بدون قطعه تنظیم نیز کنار هم چید و بسته به نوع طرح انتخابی (UA، UO و UL) بلبیرینگ‌های جفت شده، لقی یا بار اولیه مختلفی خواهند داشت.

بلبیرینگ‌های بسیاردقیقی که اصطلاحاً بلبیرینگ محور نامیده می‌شوند، در واقع بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای، با زاویه تماس $\alpha_0 = 15°$ یا $\alpha_0 = 25°$ می‌باشند. این نوع بلبیرینگ غالباً در محور کارگیر ماشین‌های ابزار با سرعت دوران بالا و همچنین در تجهیزاتی با محور دوران دقیق و بدون لقی و لنگی، به‌کار می‌روند.



شکل ۱-۱۳ a) دوبلبیرینگ با تماس‌زاویه‌ای با چیدمان O. b) دو بلبیرینگ با تماس زاویه‌ای با چیدمان X. c)دو بلبیرینگ با تماس زاویه‌ای با چیدمان پشت سر هم.

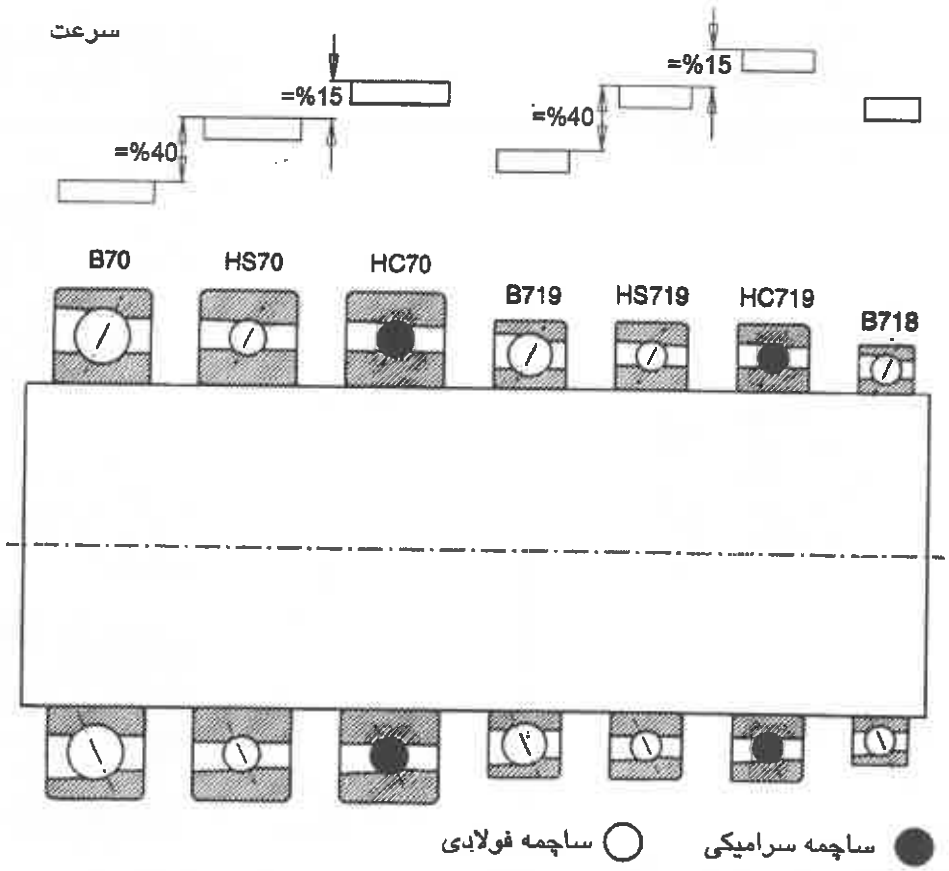
طرح‌های با زاویه تماس °15 برای سرعت‌های بسیار بالا و طرح‌های با زاویه °25 جهت‌تحمل بارهای‌محوری بالا مناسب هستند. بلبیرینگ‌های با چیدمان مختلف در شکل ۱-۱۳ آورده شده‌اند.

سرعت دوران بالا باعث اعمال نیروی گریز از مرکز بیشتری در ساچمه‌ها می‌شود. این نیروها به بارهای کاری وارده افزوده می‌شوند و در نتیجه تأثیر قابل توجهی در محدود نمودن سرعت دارند.

کاهش نیروهای گریز از مرکز و در نتیجه امکان افزایش سرعت مجازکاری، توسط طرح‌های جدید و پیشرفته HS70 و HS719 در بلبیرینگ‌های‌با تماس زاویه‌ای میسرگشته که در آنها نسبت به بلبیرینگ‌های هم اندازه خود، ساچمه‌های‌کوچکتری به‌کار رفته است. شرایط تماس ویژه بین ساچمه و سطوح تماس، اصطکاک و دمای کاری را پایین نگه می‌دارد. در سال‌های اخیر، جهت افزایش بیشتر سرعت مجازکاری، در طرح‌های HC70 و HC719 از ساچمه‌های سرامیک استفاده شده است (شکل ۱-۷۱). در شکل ۱-۱۴ مقطع بلبیرینگ‌های محوری، از نوع استاندارد با مقاطع‌بلبیرینگ‌های نوع HS و HC مقایسه شده است.

در مدل‌های امروزی بلبیرینگ‌های یک ردیفه با تماس زاویه‌ای، لبه‌های سطوح تماس به شکلی طراحی شده‌اند که اجزاء بلبیرینگ کنار هم ثابت‌اند و دیگر قابل تفکیک *نمی‌باشند*.

در آنها عموماً از قفسه‌های یکپارچه از جنس پلی‌آمید تقویت شده با الیاف شیشه یا رزین فنولی با لایه‌های نخی استفاده می‌شود، در بلبیرینگ‌های بزرگتر، از قفسه‌های‌برنجی ماشینکاری شده استفاده می‌شود.

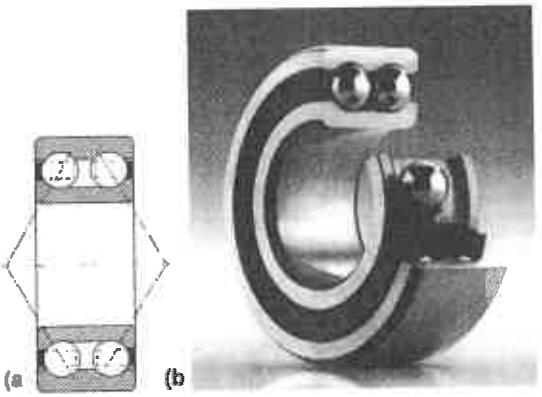


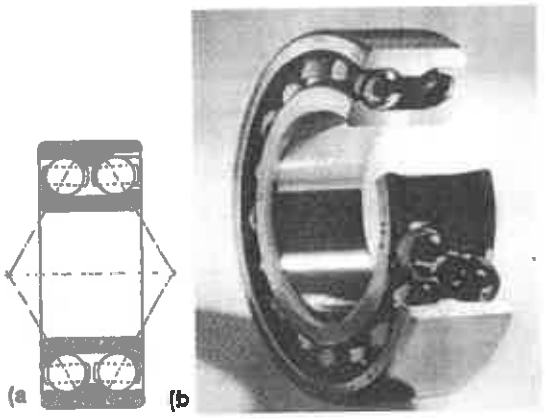
شکل ۱-۱۳ مقایسه مقاطع و قابلیت تحمل سرعت‌های بالا بین بلبیرینگ‌های محوری استاندارد و طرح‌های HS و HC

بلبیرینگ‌های با تماس زاویه ای دو ردیفه

طرح آنها مشابه بلبیرینگ‌های یک ردیفه جفت شده با چیدمان O می‌باشد، به شکلی که راس مخروط فرضی تشکیل شده از خطوط راستای تماس ساچمه‌ها، همواره در بیرون بلبیرینگ تشکیل می‌شود. بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای دو ردیفه قادر به تحمل بارهای سنگین شعاعی و محوری هستند. به ویژه آنها برای ثابت کردن شفت در راستای محوری مناسب هستند.

بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای دو ردیفه کوچک، شیار مونتاژ ساچمه *ندارند* (**شکل‌های ۱-۱۵\b و a**) بنابراین توانایی تحمل بار محوری در هر دو جهت را دارند. قفسه‌های آنها از جنس پلی‌آمید تقویت شده با الیاف شیشه است. اما بلبیرینگ‌های بزرگتر، در یک‌طرف شیار مونتاژ دارند (**شکل ۱-۱۵\c و d**) و در آنها از قفسه‌های برنجی ماشینکاری شده و یا ورق فولادی موجدار برای

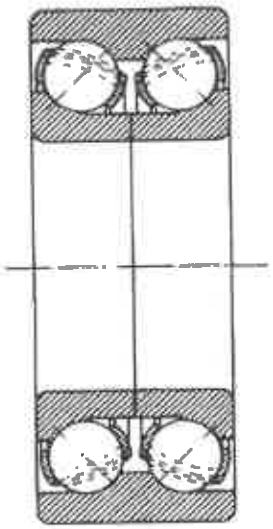




شکل ۱-۱۵ a)، b) بلبیرینگ با تماس زاویه‌ای دو ردیفه بدون شیار مونتاژ ساچمه، سری B..32 و B..33، d)، c) بلبیرینگ با تماس زاویه‌ای دو ردیفه با شیار مونتاژ ساچمه سری 32 و 33

هرردیف از ساچمه‌ها استفاده شده است. برای تحمل همزمان بارهای شعاعی و محوری، بلبیرینگ باید به نحوی مونتاژ شود که بار محوری به طرف بدون شیار وارد شود.

بلبیرینگ با تماس زاویه‌ای دو ردیفه با رینگ داخلی دو تکه (شکل ۱-۱۶) جهت تحمل بارهای سنگین و یا

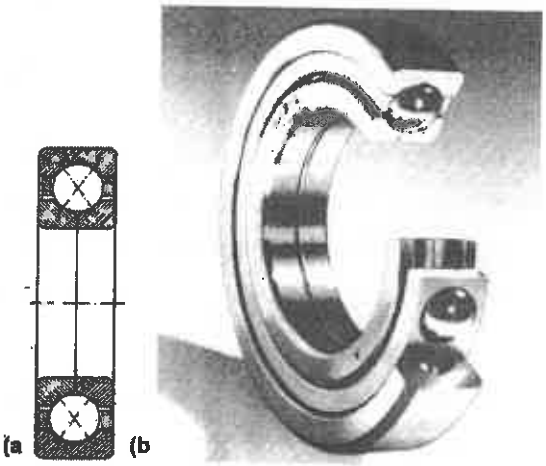


شکل ۱-۱۶ بلبیرینگ با تماس زاویه‌ای دو ردیفه با رینگ داخلی دو تکه سری 33..DA

بارهای محوری با تغییر جهت تناوبی، طراحی شده است. این بلبیرینگ‌ها زاویه تماس بزرگتری داشته و در آنها شیار مونتاژ وجود ندارد. این بیرینگ‌ها در طرح‌های بدون حلقه آب‌بند یا با حلقه آب‌بند و رینگ داخلی این بلبیرینگ‌ها در دو نوع قابل جداسازی و غیر قابل جداسازی ارائه شده‌اند.

بیرینگ‌های با تماس چهار نقطه‌ای

پروفیل شیار هر یک از رینگ‌های داخلی و خارجی در این نوع بلبیرینگ‌ها از دو کمان تشکیل شده است که مراکز آنها بر هم منطبق *نمی‌باشند*، به همین دلیل هنگام اعمال بارهای شعاعی، ساچمه‌ها در چهار نقطه با شیارها تماس پیدا می‌کنند. جهت جازدن ساچمه‌ها یکی از رینگ‌ها را که معمولاً رینگ داخلی است، دو تکه می‌سازند (شکل ۱-۱۷).



شکل ۱-۱۷ بیرینگ با تماس چهار نقطه‌ای و رینگ داخلی دو تکه

این بلبیرینگ‌ها برای تحمل بارهای خالص محوری یا بارهای محوری غالب بر بارهای شعاعی در هر دو جهت مناسب می‌باشند. تحت بارهایی از این قبیل، ساچمه‌ها با هر رینگ در یک نقطه‌تماس خواهند داشت، مشابه حالتیکه در بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای تحت بار محوری اتفاق می‌افتد.

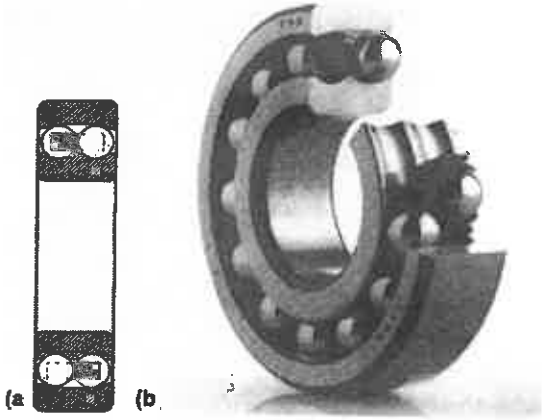
زاویه تماس بیرینگ‌های با تماس چهار نقطه‌ای، بزرگ است (معمولاً 35°). بنابراین، این بیرینگ‌ها توانایی تحمل بارهای محوری بالایی را در هر دو جهت دارند. کاربرد اصلی آنها در زمینه تجهیزات انتقال قدرت می‌باشد، جایی که بار محوری در هر دو جهت اعمال می‌شود و باید حرکت محوری کاملاً مهار شود و همچنین در کاربردهایی که باید از بیرینگ با پهنای کم استفاده کرد. بیرینگ‌های با تماس چهار نقطه‌ای به هیچوجه برای تحمل بارهای شعاعی غالب بر بارهای محوری مناسب نیستند زیرا تحت بار شعاعی نقاط تماس به چهار نقطه افزایش و در نتیجه میزان اصطکاک افزایش می‌یابد.

در بیرینگ‌های با تماس چهار نقطه‌ای از قفسه‌های یکپارچه از جنس پلی آمید تقویت شده با الیاف شیشه یا برنج استفاده می‌شود.

بلبیرینگ‌های خود تنظیم

در یک بلبیرینگ خود تنظیم (**شکل ۱-۱۸**) پروفیل شیار رینگ خارجی کروی شکل است. همچنین رینگ داخلی دو شیار با
مقطع دایره‌ای دارد. قفسه، هر دو ردیف ساچمه‌ها را روی رینگ داخلی ثابت کرده و تشکیل یک مجموعه را می‌دهد . این مجموعه داخل رینگ خارجی به صورت مفصلی می‌چرخد و خود را با وضعیت شفت تنظیم می‌کند.

در نتیجه مشکلات هم راستا *نبودن* نشیمنگاه بلبیرینگ، عدم توازی شفت با محور رینگ خارجی و یا خیز شفت، اثر *نامطلوبی* بر بیرینگ *نمی‌گذارند*.



شکل ۱-۱۸ بلبیرینگ خود تنظیم

عموماً، در بلبیرینگ‌های خودتنظیم با قطر سوراخ داخلی 90 mm – 60 از قفسه‌های پرس شده از ورق فولادی استفاده می‌شود. در بیرینگ‌های بزرگتر، قفسه‌های برنجی ماشینکاری شده به‌کار می‌روند.

بلبیرینگ‌های خود تنظیم با ابعاد متوسط و پرمصرف با حلقه آب‌بند با گریس کافی تا پایان عمر مفید نیز ارائه می‌شوند. عموماً بلبیرینگ‌های خود تنظیم در ماشین آلات کشاورزی، نوار نقاله‌ها، ماشین‌های ساده، صنایع چوب و هواکش‌ها کاربرد دارند.

بیرینگ‌های مقطع باریک

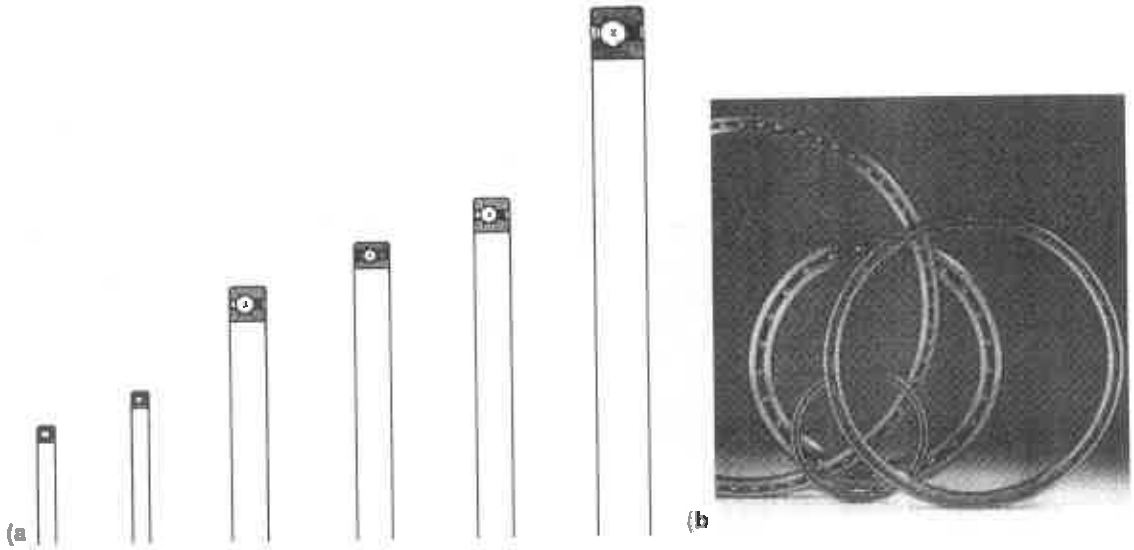
ابعاد مقطع این بیرینگ‌ها، نسبت به قطرشان بسیار کوچک و همین امر باعث صرفه‌جویی در فضا و وزن به‌همراه صلبیت و دقت دوران بالا می‌گردد. برخلاف رولربیرینگ‌های استاندارد طبق DIN ISO، که مقطع‌شان با افزایش قطر، افزایش می‌یابد، تمام اندازه‌های یک سری از بیرینگ‌های مقطع باریک دارای مقاطع یکسانی می‌باشند.

بیرینگ‌های مقطع باریک در انواع با تماس چهار نقطه‌ای، بلبیرینگ شیار عمیق و بلبیرینگ با تماس زاویه‌ای، با قطر خارجی بین 1000 mm – 25 ساخته شده‌اند (شکل ۱-۱۹). مصارف عمدهٔ آنها در صنایع هوا فضا، فیکسچرهای جوشکاری، روبات‌های صنعتی، ماشین‌آلات نساجی و رنگرزی، صنایع اپتیک و اپترونیک می‌باشد.

۱-۱-۲ رولربیرینگ‌های شعاعی

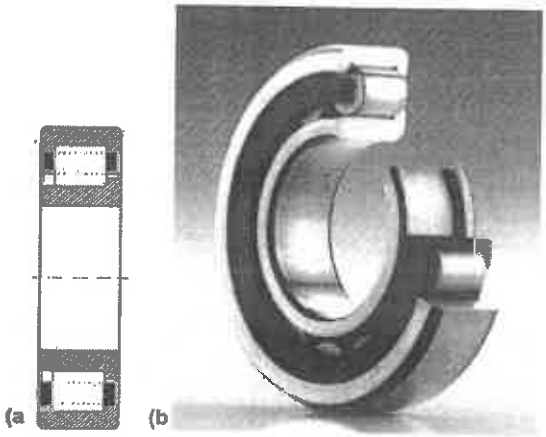
رولربیرینگ‌های استوانه‌ای

در تمام انواع مختلف رولربیرینگ‌های استوانه‌ای، رولرها توسط لبه‌های یکی از رینگ‌ها، مهارمی‌شوند و با قفسه مربوطه و رینگ لبه‌دار تشکیل یک مجموعه را می‌دهند. رینگ دیگر می‌تواند در صورت نیاز جدا شود.

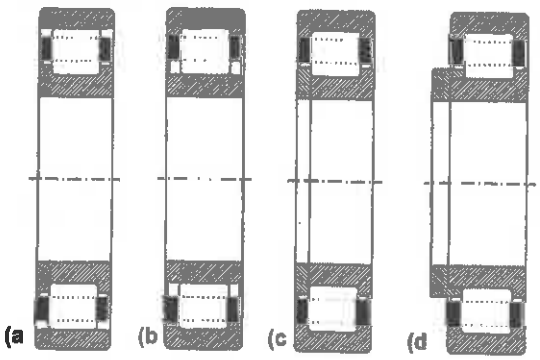


شکل ۱-۱۹ بیرینگ‌های مقطع باریک

در نتیجه می‌توان رینگ‌ها را جدا جدا و به صورت فشاری در جای خود جازد. این مسئله نقش مهمی در افزایش صلبیت بیرینگ داشته و باعث بالا رفتن دقت مهار شعاعی شفت می‌شود. برای مصارف ویژه، رولربیرینگ‌های استوانه‌ای با تمام ضمایم ارائه می‌شوند. طرح‌های مختلف رولربیرینگ‌های استوانه‌ای در **شکل‌های ۱-۲۰ و ۱-۲۱ آورده شده است.**



شکل ۱-۲۰ رولربیرینگ استوانه‌ای طرح NJ



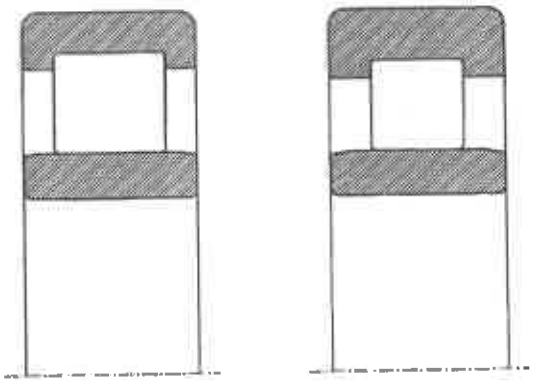
شکل ۱-۲۱ انواع رولربیرینگ‌های استوانه‌ای a) طرح N، b) طرح NU، c) طرح NUP، d) طرح NJ با رینگ زاویه‌دار

انواع رولربیرینگ‌های استوانه‌ای بسته به طرز قرارگیری لبه‌ها روی رینگ‌ها، از هم متمایز می‌شوند. طرح NU (**شکل ۱-۲۱b**) دولبه روی رینگ خارجی دارد. در این نوع، رینگ داخلی بدون لبه است. در طرح N (**شکل ۱-۲۱a**)، رینگ‌داخلی دولبه دارد و رینگ خارجی بدون لبه است. طرح‌های N و NU جزو بیرینگ‌های شناور محسوب می‌شوند، زیرا رولرها می‌توانند روی رینگ بدون لبه، در راستای محوری به‌راحتی جابه‌جا شوند. رولربیرینگ‌های طرح NJ (شکل ۱-۲۰) دو لبه روی رینگ خارجی و یک لبه روی رینگ داخلی دارند و آنها می‌توانند بار محوری را در یک جهت تحمل کنند.

طرح NUP (**شکل ۱-۲۱c**) یک بیرینگ موقعیت‌دهنده جهت تحمل بارهای محوری با تغییر جهت تناوبی می‌باشد. رینگ خارجی آن دو لبه و رینگ داخلی‌اش یک لبه ثابت و یک لبه قابل تفکیک دارد. یک رولربیرینگ استوانه‌ای با طرح NJ به همراه یک رینگ زاویه‌دار HJ (**شکل ۱-۲۱d**) یک بیرینگ موقعیت‌دهنده مشابه طرح NUP را تشکیل می‌دهند.

عموماً، در طراحی داخلی مدل‌های رایج رولربیرینگ های استوانه‌ای، برای تحمل بارهای بیشتر، اصلاحاتی انجام شده است. در این بیرینگ‌ها، که با پسوند E مشخص می‌شوند، قطر خارجی یکسان با انواع بدون پسوند E دارند اما در آنها از رولرهای قطورتر استفاده شده است، که این امر باعث افزایش قابل توجه ظرفیت تحمل بار شده است (**شکل ۱-۲۲**).

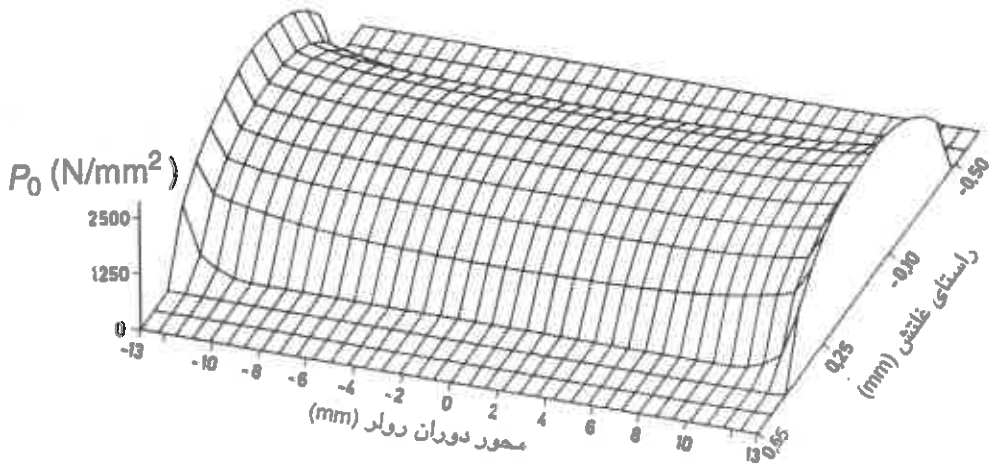
در رولربیرینگ‌های استوانه‌ای، با اندازه متوسط به پایین، قفسه‌هایی از جنس پلی‌آمید تقویت شده با الیاف شیشه یا ورق فولادی پرس شده به‌کار می‌رود. قفسه‌های فلزی ماشینکاری شده برای نمونه‌های بزرگتر مناسب هستند،



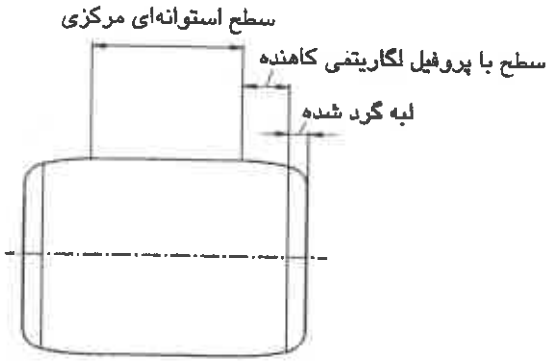
شکل ۱-۲۲ رولربیرینگ‌استوانه‌ای مخصوص بارهای سنگین *(سمت چپ)* در مقایسه با نوع عادی *(سمت راست)*

این قفسه‌ها از جنس برنج، فولاد یا آلیاژهای سبک بوده و با رولرها داخل رولربیرینگ ثابت می‌شوند. در رولربیرینگ‌های سرعت بالا، قفسه‌ها، با لبه‌های سنگ خورده رینگ داخلی یا خارجی، داخل رولربیرینگ مهار می‌شوند.

شکل اصلی رولرها و شیارها در رولربیرینگ‌استوانه‌ای، استوانه‌ای است. هرچند، شکل دقیقاً استوانه‌ای آنها، باعث ایجاد بیشترین تنش در دو سر رولرها و شیارها می‌گردد (شکل ۱-۲۳) و این مسئله ممکن است باعث کاهش عمر بیرینگ شود. جهت پرهیز از این مشکل، مدتهاست که رولرها را با فرم سطحی لگاریتمی می‌سازند (شکل ۱-۲۴). هدف، دستیابی به خط تماس اصلاح شده می‌باشد. امروزه در بعضی موارد، حتی سطح شیارهای رینگ داخلی و خارجی را نیز با پروفیل لگاریتمی ماشینکاری می‌نمایند [191a]، این پروفیل با تنش‌های ویژه اعمالی بیرینگ‌ها، سازگاری دارد. بیرینگ های با سطح تماس لگاریتمی تحمل کمتری در مقابل خیز شفت و نابه‌جایی آن دارند. پروفیلها به شکلی محاسبه شده‌اند، که تحت شرایط بارگذاری عادی تا انحراف زاویه‌ای چهار دقیقه‌ای بین رینگ داخلی و خارجی در دو انتهای رولرها، تنش‌های لبه‌ها که باعث کاهش عمر می‌شوند ایجاد نشود (ر.ک. به جدول ۳-۲).



شکل ۱-۲۳ توزیع بار در یک رولر با پروفیل دقیقاً استوانه‌ای روی سطح استوانه‌ای رینگ

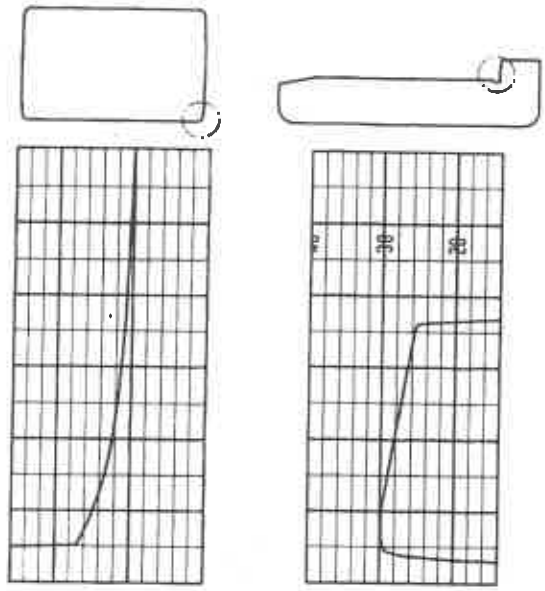


شکل ۱-۲۴ پروفیل لگاریتمی یک رولر استوانه‌ای

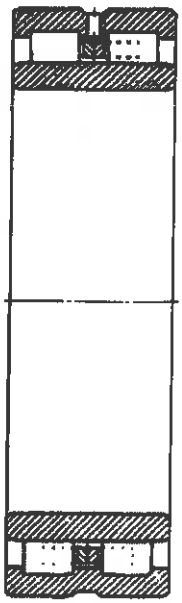
سطح داخلی لبه‌های رینگ‌ها شیب کمی به بیرون دارد (شکل ۱-۲۵). این شیب و سطح اصلاح شدهٔ رولرها که باعث ایجاد روانکاری هیدرودینامیک و ایجاد فیلم روغن بین پیشانی رولرها و لبه‌ها هنگام کار می‌شوند، موجب دوران کم اصطکاک و افزایش تحمل در برابر بارهای محوری می‌شوند.

رولربیرینگ‌های استوانه‌ای در ماشین‌های ابزار، تجهیزات انتقال نیرو، ماشین‌های لرزاننده (ویبراتورها) و به عنوان چرخ در وسایل نقلیه ریلی به‌کار می‌روند. آنها به‌عنوان بیرینگ شناور در موتورهای الکتریکی با توان متوسط به بالا و در ماشین‌آلات عمومی ساختمانی نیز به‌کار می‌روند. رولربیرینگ‌های استوانه‌ای، به دلیل وضعیت خوب غلتش رولرها و اصطکاک کم، به همراه قفسه مربوطه، جهت کار در سرعت‌های بالاتر مناسب هستند.

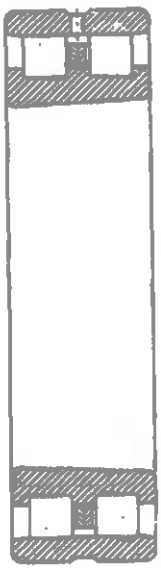
نمونه‌های یک ردیفه (سری 10 و 19) و دو ردیفه (شکل ۱-۲۶ و ۱-۲۷) در کلاس‌های با دقت بالاتر نیز قابل دسترسی‌اند. این بیرینگ‌ها سطح مقطع کوچکی داشته و صلبیت شعاعی بالایی دارند. کاربرد آنها در محور کارگیر ماشین ابزارها، شفت‌های دستگاه‌های برش



شکل ۱-۲۵ هندسه تماس پیشانی و لبه رولر در رولربیرینگ‌های استوانه‌ای

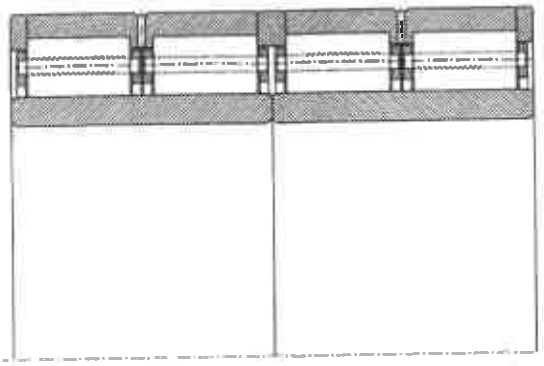


شکل ۱-۲۶ رولربیرینگ استوانه‌ای دو ردیفه طرح NNU49



شکل ۱-۲۷ رولربیرینگ استوانه‌ای دوردیفه، طرح NN30..K

و غیره می‌باشد. در نمونه‌های با سوراخ داخلی مخروطی (با پسوند K)، لقی شعاعی توسط جابه‌جا نمودن رینگ داخلی روی شفت مخروطی، قابل تنظیم است (ر.ک. به بخش ۴-۴-۱). غالباً، در غلتک‌های نورد و غلتک‌های پشت‌بند آنها در ماشین‌های نورد، از رولربیرینگ‌های استوانه‌ای چند ردیفه مطابق شکل ۱-۲۸ استفاده می‌شود. رولرهای این نوع بیرینگ‌ها، یک سوراخ راه بدر در راستای محورشان دارند و توسط پین‌های موجود در قفسه‌ای مخصوص که اصطلاحاً قفسه پین‌دار نام دارد، از داخل مهار می‌شوند. در اینگونه بیرینگ‌ها به دلیل استفاده از قفسه پین‌دار و صرفه‌جویی در فضای بین رولرها امکان جا دادن رولرهای بیشتری داخل بیرینگ به‌وجود آمده است که در نتیجه ظرفیت تحمل بارهای فوق سنگین مهیا شده است.



شکل ۱-۲۸ رولربیرینگ چهارردیفه مورداستفاده در غلتک‌های نورد

رولربیرینگ‌های تک ردیفه و چند ردیفه با ضمائم کامل (با پسوند V) را معمولاً جهت تحمل بارهای سنگین با سرعت دورانی پایین به کار می‌برند.

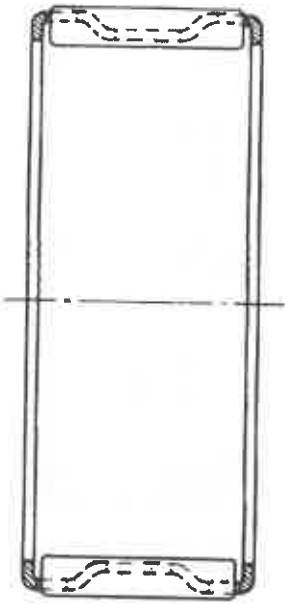
در طرح NJ که با ضمائم کامل ارائه می‌شود، اجزا قابل تفکیک می‌باشند (با پسوند VH). مجموعه رولرها به انضمام رینگ خارجی، تشکیل دهنده یک واحد خود نگهدارنده هستند. در نتیجه، رینگ داخلی و رینگ خارجی را می‌توان جداگانه در جای خود نصب نمود. طرح‌های دیگر قابل تفکیک *نمی‌باشند*.

رولربیرینگ‌های سوزنی

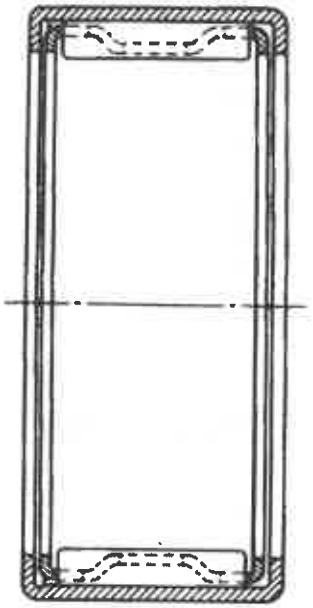
در واقع بیرینگ‌های سوزنی، رولربیرینگ استوانه‌ای با رولرهای بلند و کم قطر هستند. آنها فقط قادر به تحمل بارهای شعاعی می‌باشند. نسبت قطر به طول رولرهای سوزنی، بین 1 به 2.5 تا 1 به 10 می‌باشد. قطر رولر سوزنی در انتهای آن کاهش پیدا می‌کند. پیشانی دو سر رولر سوزنی تخت یا گرد است. جابه‌جایی محوری آنها توسط قفسه‌ها یا لبه‌های ماشینکاری شده رینگ‌ها

کنترل می‌شود. با توجه به ضخامت کم سطح مقطع‌شان، این نوع بیرینگ‌ها، معمولاً در تجهیزات کم وزن و یا در مواردی که فضای کمی در دسترس باشد، به‌کار می‌روند.

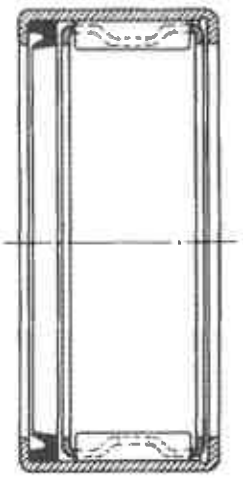
در نمونه‌های اولیه رولربیرینگ‌های سوزنی، در انواع با ضمائم کامل، مجموعه رولرها توسط قفسه مهار نمی‌شدند. از آنجا که در طرح‌های اولیه رولرهای سوزنی با دقت مناسب مهار نمی‌شدند و تماس بین رولرها، اصطکاک را افزایش می‌داد، رولربیرینگ‌های سوزنی *نتوانستند* جایگاه مطلوب خود را به عنوان بیرینگ‌های مخصوص تحمل تنش‌های دینامیکی بالا پیدا کنند. موارد کاربرد رولربیرینگ‌های سوزنی با ضمائم کامل، تحمل بارهای بسیار سنگین با سرعت دوران نسبتاً کم یا با حرکت چرخشی رفت و برگشتی می‌باشد. امروزه اکثر رولربیرینگ‌های سوزنی مجهز به قفسه هستند که باعث مهار حرکتی رولرهای سوزنی و موازی نگه داشتن آنها نسبت به محور دوران می‌شود. قفسه‌ها در طرح‌های یک ردیفه و دو ردیفه طراحی شده‌اند و از ورق فولادی پرسکاری شده یا پلی‌آمید تقویت شده با الیاف شیشه ساخته می‌شوند. در قفسه‌های ویژه، از مواد دیگری هم استفاده می‌شود (برای مثال پلاستیک PEEK یا آلومینیم). رولربیرینگ‌های سوزنی در طرح‌های بیشماری ساخته شده‌اند از جمله : مجموعه رولرهای سوزنی با قفسه بدون رینگ (شکل ۱-۲۹)، رولربیرینگ سوزنی با رینگ خارجی از جنس ورق کشیده شده با دو انتهای باز یا با یک انتهای بسته (شکل‌های ۱-۳۰ تا ۱-۳۲) و رولربیرینگ سوزنی با رینگ‌های داخلی و خارجی ماشینکاری شده (شکل ۱-۳۳).



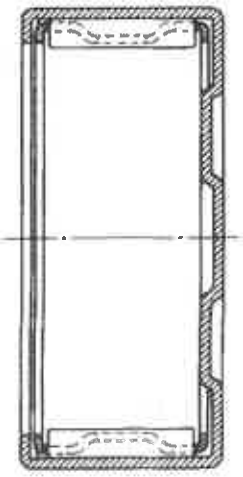
شکل ۱-۲۹ مجموعه رولرهای سوزنی با قفسه



شکل ۱-۳۰ رولربیرینگ سوزنی با رینگ خارجی از جنس ورق کشیده شده با دو انتهای باز

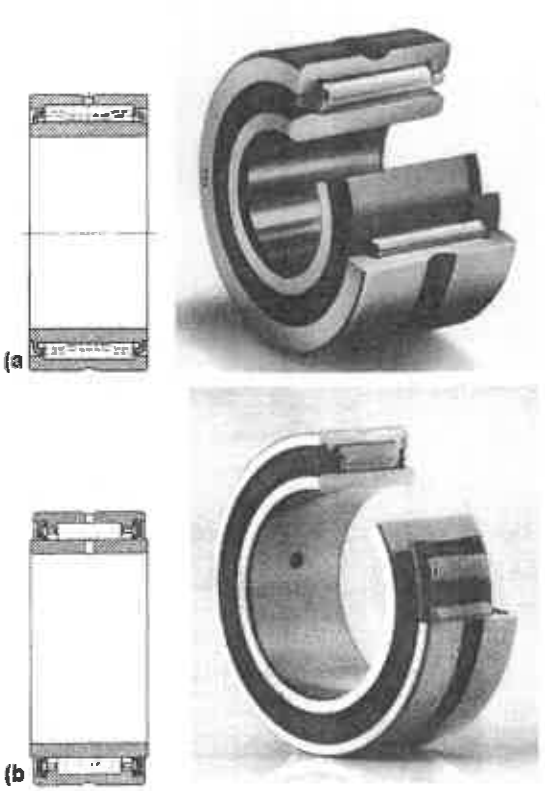


شکل ۱-۳۱ رولربیرینگ سوزنی با رینگ خارجی‌از جنس ورق کشیده شده با دو انتهای باز، مجهز به حلقه آب‌بندی



شکل ۱-۳۲ رولربیرینگ سوزنی با رینگ خارجی از جنس ورق کشیده شده با یک انتهای بسته

رولربیرینگ‌های سوزنی در انواع مجهز به حلقه آب‌بندی یک طرفه و دو طرفه نیز در دسترس می‌باشند (شکل ۱-۳۱ و ۱-۳۳b).



شکل ۱-۳۳ رولربیرینگ سوزنی با رینگ‌های داخلی و خارجی ماشینکاری شده، a) بدون حلقه آب‌بند b) با حلقه آب‌بند

مجموعه رولرهای سوزنی با قفسه، بدون رینگ، مستقیماً روی شفت و محفظهٔ بیرینگ قرار می‌گیرند.

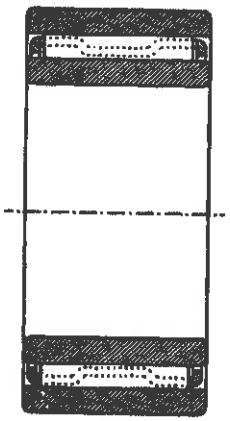
سطح داخل محفظه و سطح روی شفت سخت‌شده و سنگ زده می‌شود. با این روش می‌توان بیرینگ‌های دقیق با لقی شعاعی کم را با هزینه مقرون به صرفه و در حداقل فضای به‌کار رفته، تولید نمود.

رولربیرینگ‌های سوزنی با رینگ خارجی از جنس ورق کشیده شده با دو انتهای باز یا یک انتهای بسته

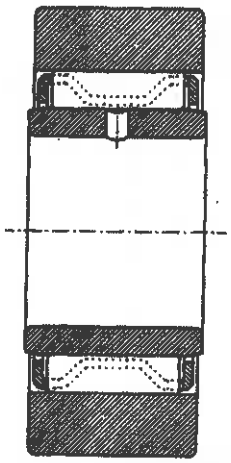
(شکل‌های ۱-۳۰ تا ۱-۳۲)، یک رینگ خارجی سخت شده ولی سنگ نزده داردکه توسط پرسکاری فرم داده شده است.

با پرسی جازدن رینگ خارجی داخل نشیمنگاه مربوطه، بار وارده بر بیرینگ باعث تغییر شکل رینگ *نخواهد* شد. این نوع بیرینگ‌ها، ارزان قیمت و اقتصادی بوده و سطح مقطع بسیار کوچکی دارند، از این رو در اکثر جعبه دنده‌های وسایل نقلیه موتوری به‌کار می‌روند.

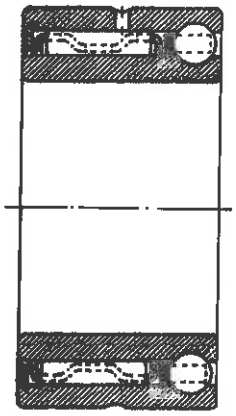
در رولربیرینگ‌های سوزنی با رینگ‌های ماشینکاری شده، معمولاً رینگ خارجی دو لبه بر جستهٔ یکپارچه دارد (شکل ۱-۳۳)، اما نمونه‌های بدون لبه نیز وجود دارند (**شکل‌های ۱-۳۴ و ۱-۳۵**). رولربیرینگ‌های سوزنی کوچکتر، معمولاً رینگ داخلی *ندارند*، سطح سخت شده و سنگ خورده شفت، و ظیفه رینگ داخلی را انجام می‌دهند. رولربیرینگ‌های‌سوزنی شعاعی به‌عنوان بیرینگ شناور نیز به‌کار می‌روند. برای مواردی که بار محوری نیز وجود دارد، از رولربیرینگ سوزنی مرکب استفاده می‌شود (**شکل ۱-۳۶**) که مجموعه‌ای از دو بیرینگ شعاعی و محوری می‌باشد.



شکل ۱-۳۴ رولربیرینگ سوزنی با رینگ خارجی بدون لبه

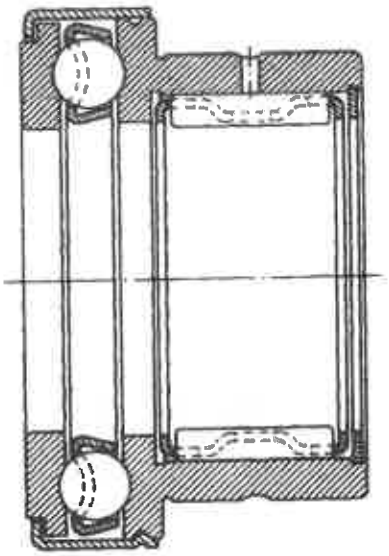


شکل ۱-۳۵ رولربیرینگ چرخی بدون محور، با رینگ‌های بدون لبه



شکل ۱-۳۶ رولربیرینگ سوزنی مرکب، سری NJA 59 مطابق استاندارد DIN 5429 بخش دوم

این نوع بیرینگ از یک رولربیرینگ سوزنی شعاعی به همراه یک بلبیرینگ کف‌گرد (**شکل ۱-۳۷**)، یا یک بلبیرینگ با تماس زاویه‌ای، یا یک رولربیرینگ استوانه‌ای کف‌گرد و یا یک رولربیرینگ سوزنی کف‌گرد، تشکیل شده است.

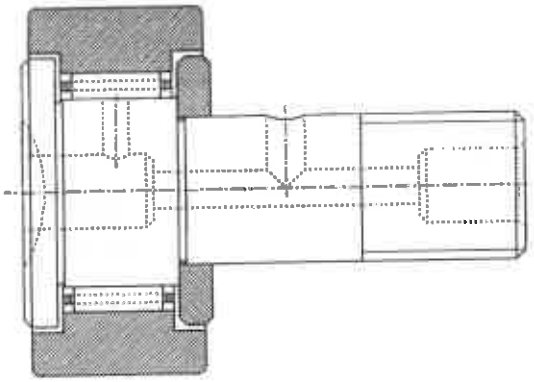


شکل ۱-۳۷ رولربیرینگ‌سوزنی مرکب با بلبیرینگ ساچمه‌ای کف گرد سری NAXK مطابق DIN 5429 بخش اول

طرح‌های ویژه دیگری از رولربیرینگ‌های سوزنی با رینگ‌های ماشینکاری شده وجود دارند که اصطلاحاً رولربیرینگ چرخی بدون محور و رولربیرینگ چرخی با محور رزوه‌دار نامیده می‌شوند.

به دلیل ضخامت بالای رینگ خارجی، این نوع بیرینگ‌ها توانایی تحمل بارهای سنگین به همراه شوک را هنگام تماس مستقیم رینگ خارجی با سطوح صاف یا انحنا دار، دارند. در رولربیرینگ چرخی بدون محور (شکل ۱-۳۵) رینگ داخلی مشابه رینگ‌های معمولی است.

اما در رولربیرینگ‌های چرخی با محور رزوه‌دار (شکل ۱-۳۸)، به جای رینگ داخلی یک محور رزوه‌دار جهت نصب بیرینگ در محل موردنظر، قرار دارد.

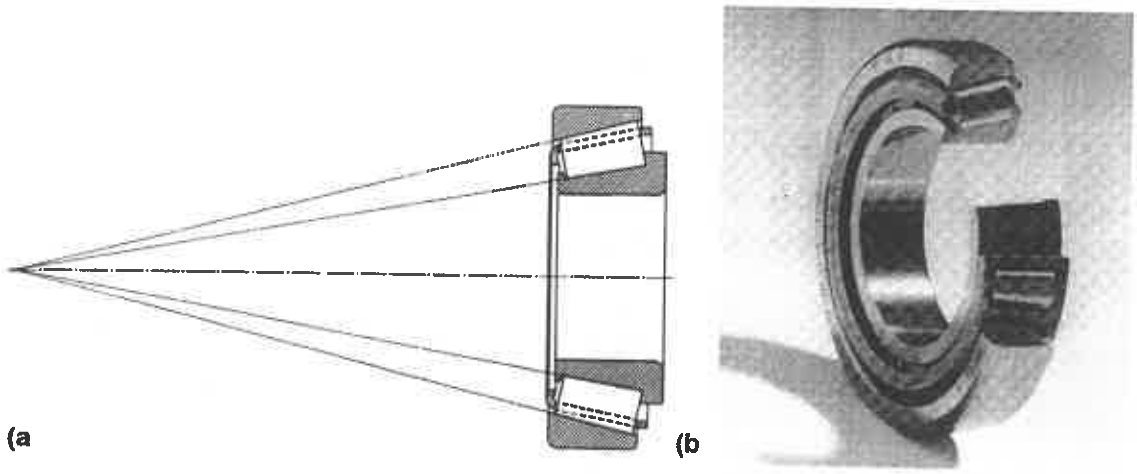


شکل ۱-۳۸ رولربیرینگ چرخی با محور رزوه‌دار

رولربیرینگ‌های مخروطی

یک رولربیرینگ مخروطی، شامل یک رینگ داخلی با دو لبه، یک رینگ خارجی بدون لبه و مجموعه‌ای از رولرهای مخروطی شکل می‌باشد. راستای خطوط تماس بین رولرها و سطوح تماس در رینگ‌ها، در نقطهٔ مشترکی محور دوران بیرینگ را قطع می‌نماید (شکل ۱-۳۹a). یک قفسه، تمام رولرها را به شکل یک مجموعه واحد نگاه می‌دارد. رینگ خارجی را می‌توان از ورق کشیده شده ساخت.

دو لبه رینگ داخلی، وظایف مختلفی به شرح زیر دارند. در هنگام تماس با قفسه، لبه کوچکتر، رولرها را در جای خود ثابت می‌کند، لبه بزرگتر نیز وظیفه تحمل بارهای محوری ناشی از فرم مخروطی رولرها را دارد. هنگام دوران پیشانی آنها نیز روی سطح لبه بزرگتر می‌لغزد. جهت تشکیل یک لایه فیلم از روانکار در این منطقه، لبه پیشانی رولر، گرد شده و سطح تماس در لبه، با فرم پیشانی رولر کاملاً جفت می‌شود. جهت جلوگیری از ایجاد تنش ماکزیمم در سطح تماس رولرها و رینگ‌ها،

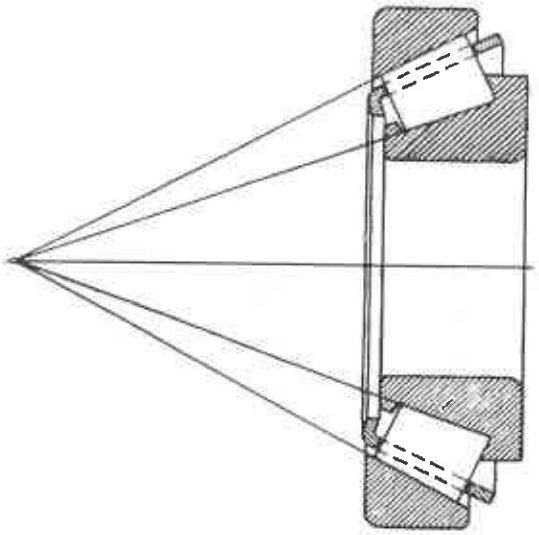


شکل ۱-۳۹ رولربیرینگ مخروطی

مشابه فرم نشانداده شده در شکل ۱-۲۴ برای رولرهای استوانه‌ای، فرم سطوح تماس را به شکل لگاریتمی می‌سازند.

زاویه تماس اکثر رولربیرینگ‌های مخروطی بین 20°–10° می‌باشد. یک سری رولربیرینگ مخروطی با زاویه تماس 28° نیز تولید شده است (سری 313، **شکل ۱-۴۰**). این سری بیرینگ‌ها توان تحمل بارهای محوری بیشتری را دارند.

با توجه به شیب‌دار بودن سطوح تماس در رینگ‌ها، یک رولربیرینگ مخروطی یک ردیفه، توان تحمل بارهای شعاعی خالص را *ندارد*. این نوع بیرینگ حتماً باید تحت بار محوری نیز باشد و یا در جهت محوری ثابت شود. معمولاً رولربیرینگ‌های مخروطی را به صورت جفت و به شکلی که همدیگر را در راستای محور مهار نمایند به کار می‌برند (با چیدمان O یا X؛ به شکل‌های ۳-۳ و ۳-۲ و توضیحات مربوطه رجوع شود).



شکل ۱-۴۰ رولربیرینگ مخروطی با زاویه تماس بالا، مطابق استاندارد DIN ISO 355

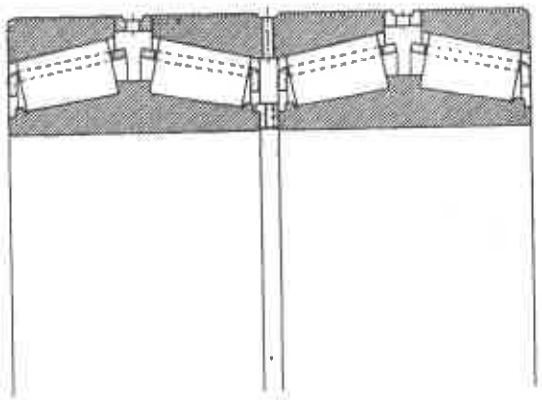
عموماً در رولربیرینگ‌های مخروطی، از قفسه پرسکاری شده از ورق فولادی و یا قفسه‌ای از جنس پلی‌آمید

تقویت شده با الیاف شیشه استفاده می‌شود. در بیرینگ‌های بزرگتر ممکن است از قفسه‌های یکپارچه استفاده شود.

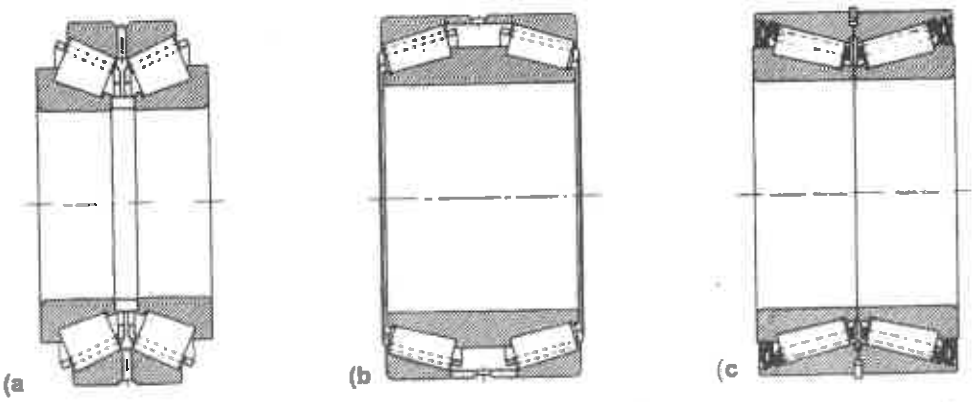
رولربیرینگ‌های‌مخروطی، معمولاً در ماشین‌آلات صنعتی، خودرو و جعبه دنده، به‌کار می‌روند. اصلی‌ترین مزیت آنها، ظرفیت بالای تحمل بارهای شعاعی و محوری و قابلیت تفکیک آنها می‌باشد. رینگ‌ها را می‌توان جداگانه در محل خود نصب نمود. لقی بین اجزای بیرینگ نیز قابل تنظیم است. نمونه‌های دو ردیفهٔ رولربیرینگ‌های مخروطی به‌عنوان بیرینگ چرخ در وسایل نقلیه ریلی به‌کار می‌روند. رولربیرینگ‌های مخروطی ویژه، مطابق شکل ۱-۴۱c از یک طرف گریسکاری شده و توسط حلقه آب‌بند، آب‌بندی شده‌اند. آنها معمولاً با چیدمان O بصورت جفت کنار هم مونتاژ می‌شوند. اگر تلرانس ابعادی نشیمنگاه طبق میزان توصیه شده رعایت شود، لقی مناسب در بیرینگ به دست خواهد آمد. این بیرینگ‌ها اکثراً در قرقره‌های طناب‌گیر بالابر استفاده می‌شوند. توسط یک رینگ قفل‌کن، می‌توان موقعیت رینگ‌های خارجی را در راستای محوری نشیمنگاه‌ها تنظیم کرد.

رولربیرینگ با رولرهای بشکه‌ای

این نوع رولربیرینگ‌ها به گروه بیرینگ‌های خود تنظیم تعلق دارند. رینگ خارجی این بیرینگ‌ها مشابه



شکل ۱-۴۲ رولربیرینگ مخروطی چهار ردیفه

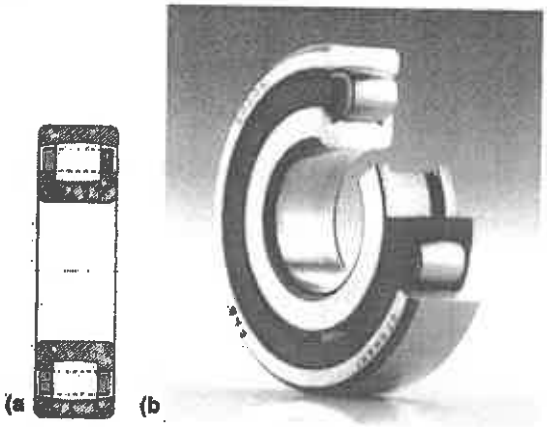


شکل ۱-۴۱ انواع رولربیرینگ‌های مخروطی دو ردیفه : a) با رینگ داخلی دو تکه با چیدمان O، b) با رینگ خارجی دوتکه و چیدمان X، c) با رینگ داخلی و خارجی دو تکه با چیدمان O، گریس خورده و حلقه آب‌بندی خورده در هر دو طرف با تنظیم اولیه لقی

بلبیرینگ‌های خود تنظیم و رولربیرینگ‌های کروی خود تنظیم، پروفیل کروی دارند. در نتیجه محور تقارن رینگ داخلی به‌راحتی می‌تواند با محور تقارن رینگ خارجی به‌صورت زاویه دار قرار گیرد که این موضوع باعث می‌شود رولربیرینگ خود را با اشکالات مونتاژی ناشی از زاویه‌ای شفت یا خیز شفت تطبیق دهد (شکل ۱-۴۳).

رولرهای این نوع رولربیرینگ، بشکه‌ای شکل می‌باشند. پروفیل سطح آنها کاملاً با فرم سطح تماسشان در رینگ‌های خارجی و داخلی مطابق است. این رولرها توسط لبه‌های برجسته رینگ داخلی و قفسه‌های نگهدارنده در موقعیت خود ثابت شده‌اند. قفسه‌ها عموماً از دو جنس برنج یا پلی‌آمید تقویت شده با الیاف شیشه ساخته می‌شوند.

رولربیرینگ‌های بشکه‌ای بسیار مستحکم هستند. توانایی تحمل بارهای سنگین همراه با شوکه‌ای شدید، آنها را برای استفاده در ماشین آلات معدن، غلتک‌های پشت‌بند و ... مناسب نموده است. البته توانایی تحمل بارهای محوری در این نوع بیرینگ‌ها پایین است.

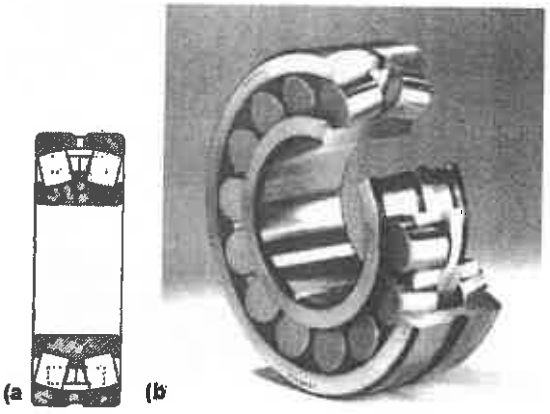


شکل ۱-۴۳ رولربیرینگ با رولرهای بشکه‌ای

رولربیرینگ کروی

یک رولربیرینگ کروی، دو ردیف رولر بشکه‌ای دارد که به‌صورت زاویه‌دار داخل رینگ‌ها قرار گرفته‌اند به صورتی که راستای محور دوران رولرها راستای محور دوران رینگ‌ها را قطع می‌نماید. مشابه مدل یک ردیفه، محل تماس رولرها در رینگ خارجی به شکل کروی ساخته شده است، که این مسئله باعث گردیده این بیرینگ‌ها نیز خود تنظیم باشند و در موارد خیز شفت یا اشکالات و خطاهای مونتاژ بتوان رینگ داخلی را با آن تطبیق داد. در این بیرینگ‌ها نیز پروفیل محل تماس در رینگ‌ها مشابه پروفیل سطح رولرهای بشکه‌ای می‌باشد. امروزه رولربیرینگ‌های کروی در طرح‌های بسیار متنوع طراحی و ساخته شده‌اند.

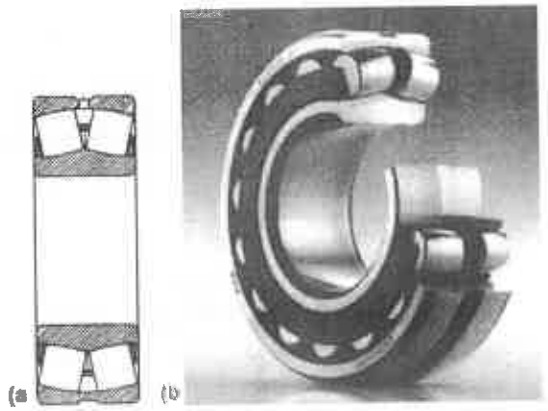
طرح نشانداده شده در شکل ۱-۴۴ سه لبه برآمده روی رینگ داخلی دارد. لبه مرکزی از یک طرف و دو لبه خارجی از طرف دیگر هر دو ردیف رولرها را در جای خود ثابت نگه می‌دارد و برای هر ردیف نیز قفسه‌ای ماشینکاری شده از جنس برنج یا ورق پرس‌کاری شده با یک طرف باز در نظر گرفته شده است.



شکل ۱-۴۴ رولربیرینگ کروی

بازبودن یک طرف از قفسه‌ها امکان روغنکاری مناسب و کار آمد را در این نوع بیرینگ‌ها ممکن می‌سازد.

در طرح‌های نشانداده شده در شکل ۱-۴۵ (با پسوند E) رینگ داخلی لبه برآمده ندارد به همین دلیل می‌توان در مقایسه با بیرینگ‌های هم اندازه دیگر (از لحاظ ابعاد خارجی) از رولرهای قطورتر و بلندتر در آنها استفاده کرد. این موضوع باعث افزایش ظرفیت تحمل بار در این نوع بیرینگ‌ها می‌گردد. در این نوع رولربیرینگ‌های کروی، از قفسه‌های پنجره‌ای شکل استفاده می‌شود. این قفسه‌ها به سه شکل ساخته می‌شوند : ۱) پرس ورق فولادی، ۲) قالب‌گیری از جنس پلی‌آمید تقویت شده با الیاف شیشه و ۳) ماشینکاری از جنس برنج. اندازه پهنای لبه‌های داخلی قفسه تلرانس ابعادی بسته‌ای دارد تا هر دو ردیف رولرها در مسیر دقیقی قرار گیرند. در این نوع رولربیرینگ‌ها، قفسه‌ها به شکلی طراحی شده‌اند که بتوانند در هنگام زاویه‌دار قرار گرفتن محور خارجی نسبت به رینگ داخلی (مشابه لبه‌های بیرونی رینگ داخلی در طرح استاندارد قبل) رولرها را در جای خود نگه داشته و از بیرون پریدن آنها جلوگیری نماید.



شکل ۱-۴۵ رولربیرینگ کروی از نوع E (طراحی مخصوص جهت دستیابی به بیشترین ظرفیت تحمل بار)

عموماً رولربیرینگ‌های کروی بر روی رینگ‌های خارجیشان (با پسوند S) یک شیار و سه سوراخ شعاعی مخصوص روانکاری دارند. این حالت باعث تضمین روغنکاری مناسب و بهینه می‌شود.

رولربیرینگ‌های کروی، از ظرفیت تحمل بار بالایی برخوردارند. آنها جهت تحمل بارهای لحظه‌ای و شوک‌ها به همراه نابه‌جایی و خیز شفت بسیار مناسب‌اند. کاربردهای مهم این نوع بیرینگ‌ها، غلتک‌های پشت‌بند، شفت‌های انتقال نیرو، کنترل سکان در کشتی، سنگ‌شکن‌ها، میل‌لنگ‌ها، چرخدنده‌ها، صفحات لرزاننده، ماشین‌آلات نورد، آسیاب‌ها و خردکن‌ها می‌باشند.

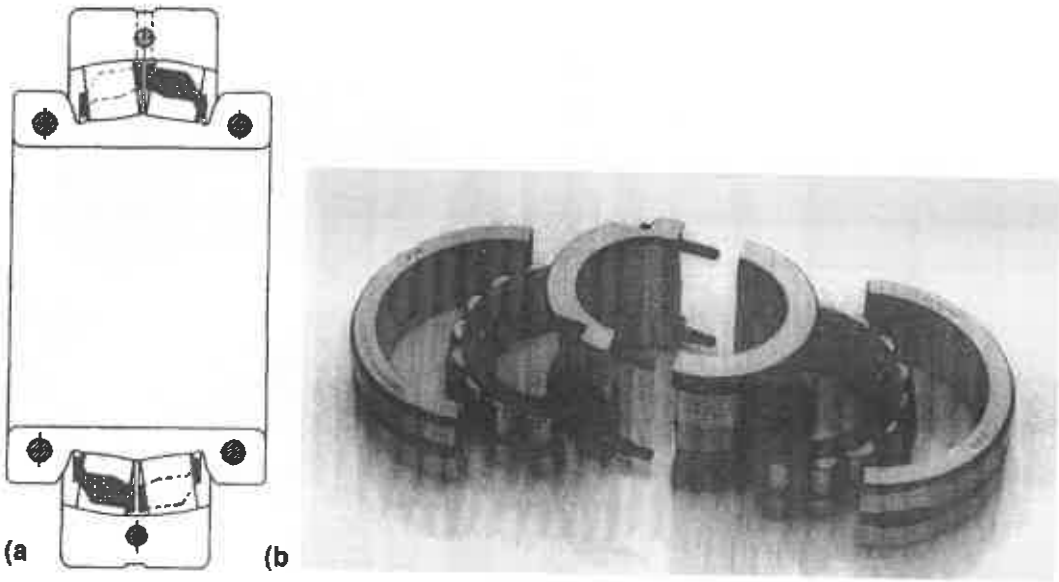
رولربیرینگ‌های کروی دو تکه، در سایزهای با سوراخ داخلی 55 mm به بالا در دسترس هستند (شکل ۱-۴۶). صرف‌نظر از پهنای رینگ داخلی، تمامی ابعاد اینگونه بیرینگ‌ها، مطابق طرح استاندارد است. در مواردی که نصب بیرینگ به دلایلی از قبیل سنگینی یک شفت بلند که اجزاء ماشین را نگه می‌دارد، با مشکل همراه باشد از این نوع بیرینگ‌های دو تکه استفاده می‌شود.

۱-۱-۳ بلبیرینگ‌های کف گرد

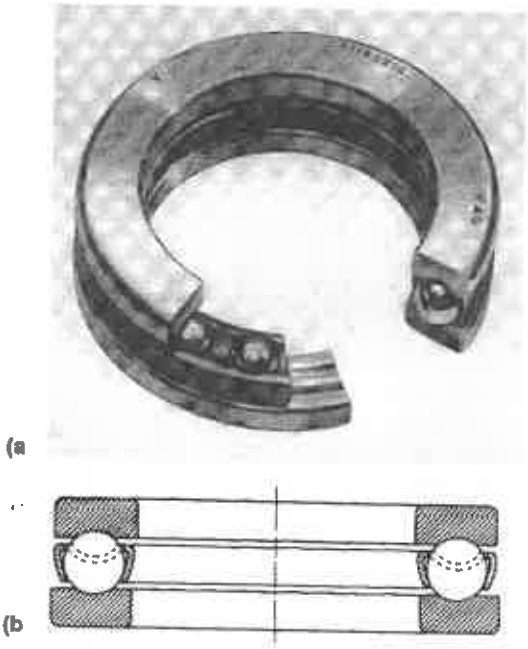
بلبیرینگ‌های کف گرد با سطح تماس شیاردار

این بلبیرینگ‌ها در انواع یک طرفه و دو طرفه ارائه شده‌اند.

بلبیرینگ‌های کف گرد یک طرفه (شکل ۱-۴۷)، از دو عدد واشر شیاردار و یک دست ساچمه به همراه قفسه تشکیل شده است. تحت بار محوری و شرایط مناسب غلتش، ساچمه‌ها توسط لبه‌های شیارها، مهار می‌شوند.

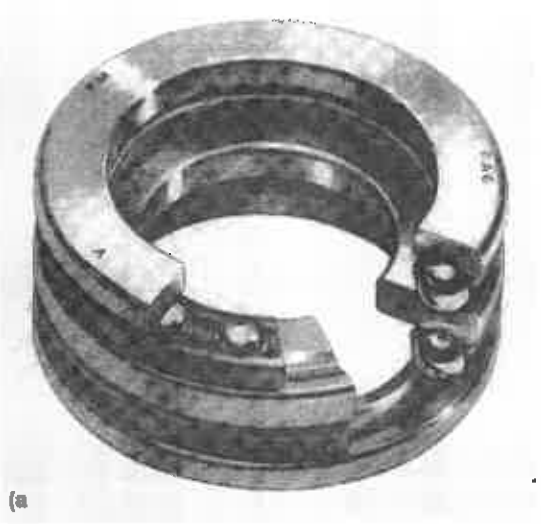


شکل ۱-۴۶ رولربیرینگ کروی دو تکه طرح E



شکل ۱-۴۷ بلبیرینگ کف‌گرد یک طرفه

توان مهار نمودن ساچمه‌ها توسط لبه‌ها، در وضعیتی که نیروی گریز از مرکز ناشی از سرعت بالای دوران بر ساچمه‌ها وارد شود و همچنین هنگامی که نیروی محوری کم باشد، به میزان نامطلوبی کاهش خواهد یافت (ر.ک. به بخش ۳-۴). بلبیرینگ‌های کف‌گرد دو طرفه جهت تحمل بارهای محوری با جهات مثغیر به‌کار می‌روند (شکل ۱-۴۸). این بلبیرینگ، دو واشر جهت نصب در نشیمنگاه بیرینگ، دو دست ساچمه به همراه قفسه و یک واشر میانی نصب روی شفت دارد. طرح‌های برتر امروزی را با واشرهای نشیمنگاه با سطح تکیه‌گاه تخت می‌سازند. البته نمونه‌های یک طرفه بلبیرینگ‌های کف‌گرد با سطح تکیه‌گاه کروی شکل نیز ساخته شده‌اند که به همراه واشر تکیه‌گاه اضافی ارائه می‌شوند (شکل ۱-۴۹).



شکل ۱-۴۸ بلبیرینگ کف‌گرد دو طرفه

شکل ۱-۴۹ بلبیرینگ کف‌گرد یک طرفه با سطح واشر کروی به همراه واشر تکیه‌گاه اضافی

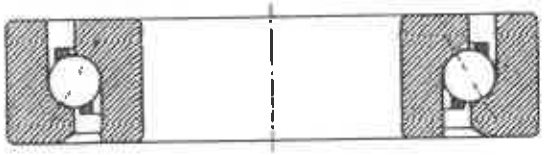
این نوع بلبیرینگ می‌تواند خود را با خطاهای موقعیتی ناشی از گونیا نبودن سطح نشیمنگاه بیرینگ، تطبیق دهد. البته این قابلیت، در صورتی که شفت لنگی داشته باشد، باعث بروز مشکل خواهد شد زیرا باعث بروز اصطکاک اضافی در سطح کروی تکیه‌گاه خواهد شد.

در سایزهای کوچک و متوسط بلبیرینگ‌های کف‌گرد معمولی، قفسه پرسکاری شده از ورق فولادی به‌کار می‌رود. انواع بزرگتر، قفسه ماشینکاری شده از جنس فولاد یا برنج دارند.

بلبیرینگ‌های کف‌گرد جهت تحمل بارهای محوری طراحی شده‌اند. آنها در مواردی که بار محوری بسیار بیشتر از حد تحمل بیرینگ‌های شعاعی باشد، به‌کار می‌روند. آنها مهار محوری شفت را کاملاً تضمین می‌نمایند.

بلبیرینگ‌های کف گرد با تماس زاویه‌ای

این نوع بیرینگ‌ها نیز در انواع یک طرفه و دو طرفه طراحی شده‌اند (شکل‌های ۱-۵۰ و ۱-۵۱). آنها در محور کارگیر ماشین‌های ابزار که نیازمند یک مهارکنندهٔ



شکل ۱-۵۰ بلبیرینگ کف‌گرد با تماس زاویه‌ای یک طرفه

شکل ۱-۵۱ بلبیرینگ کف گرد با تماس زاویه‌ای دو طرفه

صلب محوری هستند، به‌کار می‌روند. به دلیل کاربرد آنها در ساخت ماشین ابزار، هر دو نوع یک طرفه و دو طرفه، فقط در انواع با دقت بالا ساخته می‌شوند.

بر خلاف بلبیرینگ‌های کف‌گرد شیاردار، نیروی اعمالی در بلبیرینگ کف‌گرد با تماس زاویه‌ای، تحت زاویه تماس (معمولاً °60) از یک سطح تماس به سطح تماس دیگر منتقل می‌شود. برآمدگی یک طرف از پروفیل سطح تماس در رینگ‌ها به اندازه‌ای مرتفع است که ساچمه‌ها تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز در سرعت‌های بالا و یا تحت بارهای محوری، از موقعیت خود خارج *نشوند*.

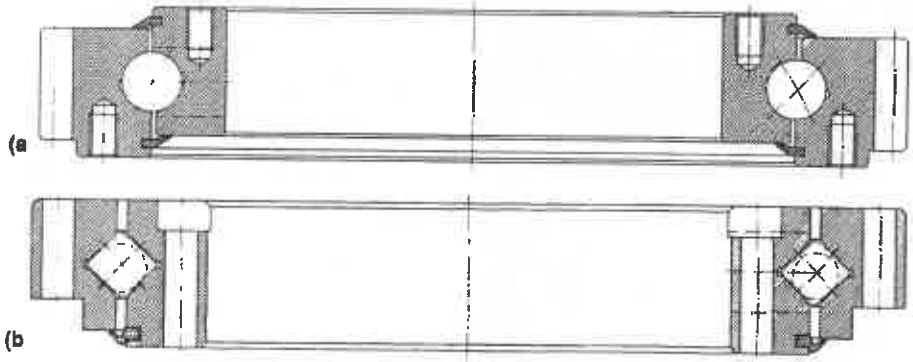
در بلبیرینگ‌های کف گرد با تماس زاویه‌ای یک طرفه، از قفسه‌های طرح پنجره‌ای سوار بر ساچمه، از جنس پلی‌آمید تقویت شده با الیاف شیشه استفاده شده است. این بلبیرینگ‌ها در مجموعه پیچ و مهره ساچمه‌ای مخصوص حرکت میز ماشین‌های ابزار نیز به‌کار می‌روند. طرح‌های جفت از این بیرینگ‌ها با بار اولیه محوری و دقت چیدمان X یا O ارائه‌دهندهٔ صلبیت بالای محوری و دقت بالا می‌باشد. تعداد بیرینگ‌هایی که کنار هم نصب می‌شوند، بار اولیّه و صلبیت مجموعه بیرینگ‌ها را افزایش می‌دهد.

هردست از ساچمه‌ها در بلبیرینگ‌های کف گرد با تماس زاویه‌ای دوطرفه، با یک قفسه برنجی ماشینکاری شده سوار بر ساچمه‌ها، نگه‌داشته می‌شوند. یک رینگ فاصله‌دهنده با سایز ویژه که بین واشرهای شفت قرار می‌گیرند باعث تضمین ایجاد بار اولیه مناسب محوری در مجموعه می‌شود.

اجزاء یک بلبیرینگ کف گرد با تماس زاویه‌ای دو طرفه تفکیک‌پذیر، کاملاً با هم جفت و جور ساخته می‌شوند و *نمی‌توان* آنها را با اجزاء دیگر بیرینگ‌های مشابه تعویض کرد.

بیرینگ‌های مفصلی (پاشنه‌ای)

بیرینگ‌های مفصلی (شکل ۱-۵۲) بیرینگ‌های غلتشی بزرگی هستند که در ماشین آلات حفاری، جرثقیل‌ها و تجهیزات مشابه در ماشین‌آلات سنگین به‌کار می‌روند. در تمامی این کاربردها، فضای نصب کمی در اختیار است و بار زیادی به بیرینگ وارد می‌شود و از طرفی قابلیت اطمینان به آن از اهمیت زیادی برخوردار است. این بیرینگ‌ها توانایی تحمل بارهای شعاعی و محوری را به همراه گشتاورهای خمشی را دارند.



شکل ۱-۵۲ انواع بیرینگ‌های مفصلی : **a)** بیرینگ با تماس چهار نقطه‌ای، **b)** رولربیرینگ ضربدری

آنها معمولاً به شکل افقی نصب شده و تحت بارهای محوری و گشتاورهای بزرگ خمشی قرار می‌گیرند. بارهای شعاعی معمولاً کم اهمیت هستند.

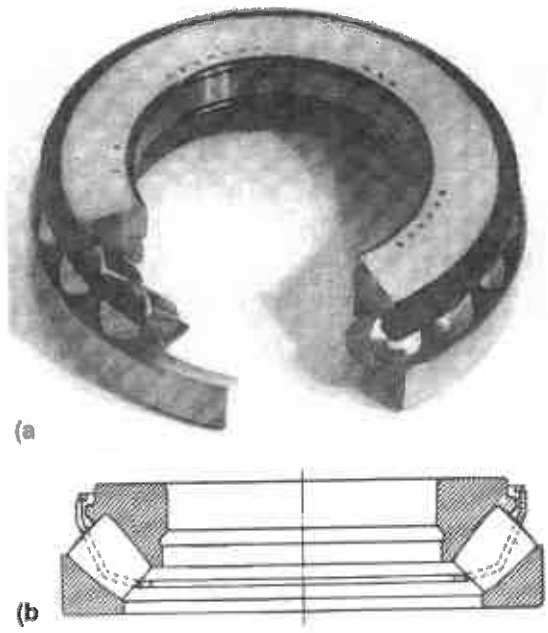
بیرینگ‌های مفصلی در انواع ساچمه‌دار یا رولردار طراحی شده‌اند. قفسه از تعدادی اجزاء فاصله‌انداز تشکیل شده است که بین اجزاء غلتنده فاصله می‌اندازند. رینگ‌های بیرینگ‌های مفصلی با قطرهای مختلف را در مواردی، جهت تسهیل درحمل و نقل یا نصب، به چند قسمت تقسیم می‌کنند.

بیرینگ مفصلی نشانداده شده در شکل ۱-۵۲a، یک بیرینگ با تماس چهار نقطه‌ای مجهز به حلقه آب‌بند است. بیرینگ با تماس چهار نقطه‌ای جهت تحمل بارهای خمشی در یک سطح مقطع کوچک، مناسب است. در مواردی مثل مفاصل روبات‌های صنعتی که ظرفیت تحمل بار و صلبیت بلبیرینگ‌ها کافی *نباشد*، از رولربیرینگ‌های ضربدری (شکل ۱-۵۲b) استفاده می‌شود. در این بیرینگ‌ها از یک دست رولر با قطر و طول مساوی استفاده می‌شود که به‌صورت یک در میان نسبت به محورشان، ضربدری چیده شده‌اند. در بعضی از این بیرینگ‌ها از اجزاء فاصله‌انداز استفاده می‌شود ولی در بعضی موارد، رولرها را کنار هم می‌چینند. در بعضی موارد بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای دو ردیفه نیز به عنوان بیرینگ مفصلی، استفاده می‌شوند. معمولاً بیرینگ‌های مفصلی به صورت مستقیم به محل خود پیچ می‌شوند. آنها را می‌توان به عنوان یک مفصل دورانی ارزان‌قیمت بدون شفت در ساختمان بعضی وسایل استفاده کرد. برای چرخاندن این بیرینگ‌ها، معمولاً رینگ خارجی (شکل ۱-۵۲a) یا داخلی را دندانه‌دار می‌سازند. سطح تماس در رینگ‌ها و دندانه‌های آن، به‌صورت القایی و یا با شعله سخت می‌گردد. رینگ‌ها (برای اطلاعات بیشتر در مورد جنس آنها، به جدول ۱-۴ ر.ک.)، بسته به میزان تنش ایجاد شده روی آنها و فشار اعمالی از طرف مناطقی که بالاترین بار را تحمل می‌کنند، به روش‌های متفاوتی عملیات حرارتی می‌شوند.

۱-۱-۴ رولربیرینگ‌های کف گرد

رولربیرینگ کف گرد کروی

یک رولربیرینگ کف‌گرد، یک دست رولر بشکه‌ای *نامتقارن* دارد که دور محور دوران بیرینگ چیده شده‌اند و به همین دلیل می‌تواند بارهای محوری بالا به‌همراه بارهای شعاعی قابل توجهی ($F_{rmax} = 0.55F_a$) را تحمل نماید (شکل ۱-۵۳).



شکل ۱-۵۳ رولربیرینگ کف‌گرد کروی

رولرهای بشکه‌ای، توسط لبه بالایی رینگ داخلی در جای خود و در تماس دائم با سطح تماس رینگ خارجی قرار گرفته‌اند. این حالت باعث می‌شود بیرینگ خود تنظیم باشد تا بتواند خود را با اشکالات مونتاژی یا خیز شفت تطبیق دهد.

معمولاً در رولربیرینگ‌های کف گرد از قفسه‌های برنجی ماشینکاری شده و یا ورق فولادی پرسکاری شده استفاده می‌شود. هر دو نوع قفسه‌ها، رولرها و رینگ داخلی را به شکل یک مجموعه واحد در کنار هم نگه می‌دارند.

موارد مصرف اینگونه بیرینگ‌ها شامل موارد زیر است : ستون گردان جرثقیل‌ها، بلوک‌های تحمل‌کنندهٔ نیروی محوری اعمالی از پروانه کشتی، بیرینگ‌های مفصلی در ستون‌های گردان ماشین‌آلات سنگین، شفت‌های عمودی پیش گرم‌کن‌های هوا در مراکز تولید برق و چرخدنده‌های سنگین.

رولر بیرینگ‌های کف‌گرد استوانه‌ای

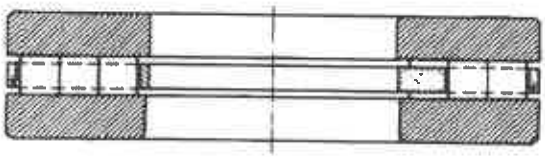
اکثر رولربیرینگ‌های کف‌گرد استوانه‌ای، فقط بار محوری را در یک جهت تحمل می‌کنند. آنها دو واشر بدون لبه به‌همراه یک یا چند دست رولر استوانه‌ای دارند. رولرها به‌صورت ستاره‌ای چیده می‌شوند و توسط یک قفسه یکپارچهٔ پنجره‌ای شکل از جنس پلی آمید تقویت شده با الیاف شیشه یا برنج به یک مجموعه تبدیل می‌شوند (شکل ۱-۵۴). این بیرینگ‌ها می‌توانند در جهت شعاعی جابه‌جا شوند.

هنگام دوران، در انتهای رولرها حرکت لغزشی یا سرش ایجاد می‌شود و این پدیده با افزایش طول رولرها، افزایش می‌یابد. در نتیجه، در بیرینگ‌های با سطح مقطع بزرگ، به جای استفاده از یک رولر بلند، از چند رولرکوتاه پشت سرهم استفاده می‌شود. این رولرها توسط قفسه در جای مناسبشان مهار می‌شوند.

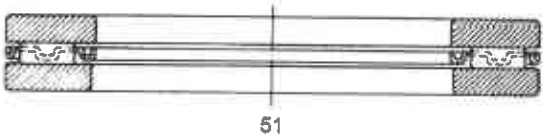
رولربیرینگ‌های کف‌گرد سوزنی

این بیرینگ‌ها در جاهایی که فضای کمی برای نصب در دسترس باشد، به‌کار می‌روند (شکل ۱-۵۵).

طرح آنها کاملاً مشابه رولربیرینگ‌های کف‌گرد استوانه‌ای است. مشابه رولربیرینگ‌های سوزنی شعاعی، اگر سطح شفت و نشیمنگاه سنگ خورده و سخت باشد، رولربیرینگ‌های کف‌گرد سوزنی را می‌توان با یک واشر یا فقط به صورت مجموعه رولرهای سوزنی با یک قفسه، به‌کاربرد. معمولاً در این موارد از واشرهای پرسکاری شده و سخت‌شده از جنس فولاد فنری با ضخامت 1 mm استفاده می‌شود. از آنجا که این واشرها را سنگ نمی‌زنند، قیمت بالایی *ندارد*. در جایی که دقت بالا یا سطوح تماس ناصاف نشیمنگاه یا شفت ایجاب نماید که از واشرهای ضخیم‌تری استفاده شود، از واشرهای شفت و نشیمنگاه رولربیرینگ‌های کف‌گرد استوانه‌ای، استفاده می‌شود.



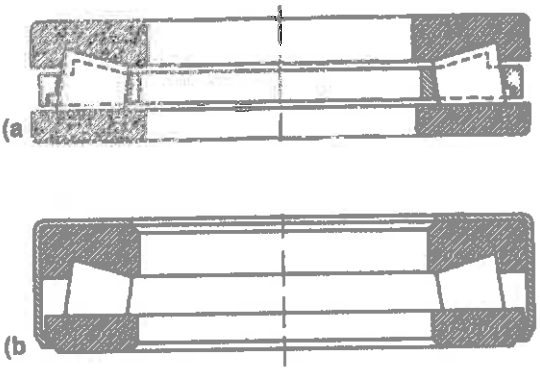
شکل ۱-۵۴ رولربیرینگ کف گرد استوانه‌ای یک طرفه



شکل ۱-۵۵ رولربیرینگ کف‌گرد سوزنی

رولربیرینگ‌های کف‌گرد مخروطی

طرح‌های بسیاری از این نوع بیرینگ ساخته می‌شوند. در طرح پر مصرف این نوع بیرینگ (شکل ۱-۵۶)، سطح تماس واشر شفت، مخروطی است و سطح تماس واشر نشیمنگاه، تخت می باشد. برای اجتناب از لغزش، مشابه حالتی که در رولربیرینگ‌های کف گرد استوانه‌ای ایجاد می‌شود، زاویه مخروط در رولرها به شکلی انتخاب شده است که راستای خطوط تماس، همدیگر را در محور بیرینگ قطع نمایند. رولرها توسط لبه واشر شفت و همچنین توسط قفسه‌هایی غالباً از برنج ماشینکاری شده، در جای خود مهار می‌شوند. بیرینگ‌ها توانایی جابه‌جایی و تنظیم در جهت محوری را دارند (شکل ۱-۵۶a). آنها در ماشین‌آلات نورد به‌کار می روند. نوع کامل آنها، توسط یک کلاهک پرس شده از ورق، کنار هم نگه داشته می‌شوند (شکل ۱-۵۶b). ترجیحاً این نوع کامل به‌عنوان بیرینگ سگدست فرمان در وسایل نقلیه موتوری استفاده می‌شود.

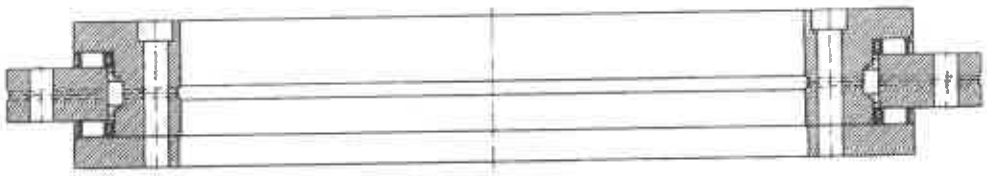


شکل ۱-۵۶ انواع رولربیرینگ‌های کف‌گرد مخروطی : a) با قفسه، قابل تفکیک؛ b) نوع کامل با کلاهک پرسکاری شده از ورق فولادی

رولربیرینگ‌های محوری ـ شعاعی

رولر بیرینگ‌های محوری شعاعی، یک طرح ویژه از بیرینگ‌های مفصلی است. این بیرینگ شامل یک رولربیرینگ کف‌گرد استوانه‌ای دو طرفه با دو ردیف رولر و یک رولربیرینگ استوانه‌ای شعاعی یک ردیفه کامل می‌باشد (شکل ۱-۵۷). در دو ردیف رولرهای بیرینگ کف‌گرد از قفسه یک پارچه برنجی یا از فاصله‌اندازهای پلی آمید استفاده می‌شود.

سوراخ‌های راه بدر در رینگ‌های بیرینگ، امکان پیچ‌کردن بیرینگ‌ها به سطح بالایی و پایینی سازه را ایجاد کرده است. در طرح‌های ویژه، می‌توان یک ابزار داخلی یا خارجی ارائه کرد تا سازهٔ محوری شعاعی توان تحمل بارهای محوری و شعاعی و گشتاورهای خمشی بالا را داشته باشد. بیرینگ‌های مشابه نمونه نشان داده شده در شکل ۱-۵۷، در میزهای گردان یا میزهای تقسیم زاویه‌ای (Index) به‌کار می‌روند.

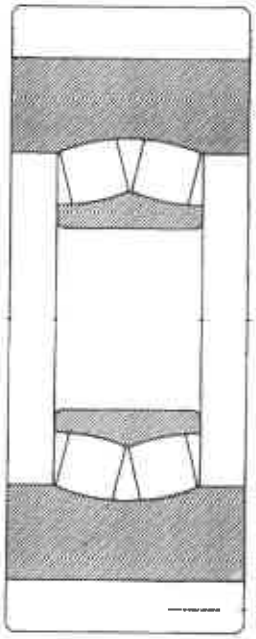


شکل ۱-۵۷ رولربیرینگ محوری ـ شعاعی

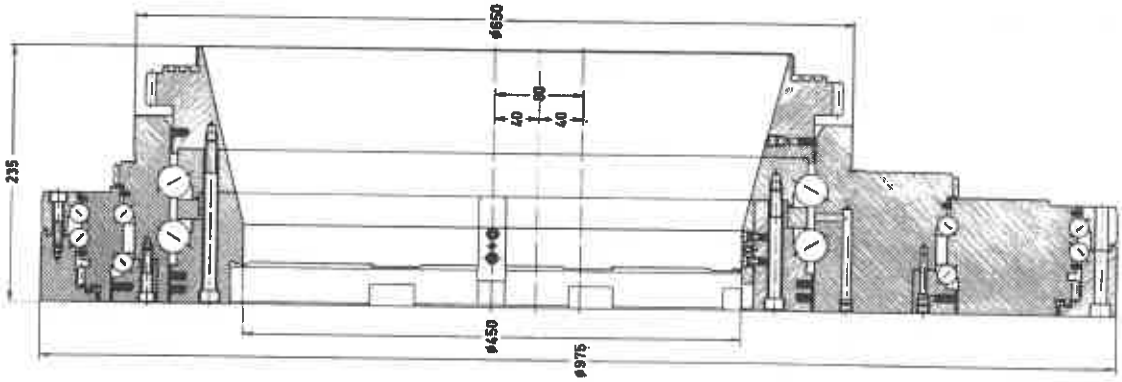
تعداد و بار اولیه اعمالی رولرها در هر سه ردیف، به‌گونه‌ای تعیین می‌شوند تا بتوان به بالاترین صلبیت ممکن دست یافت.

۱-۱-۵ بیرینگ‌های ویژه

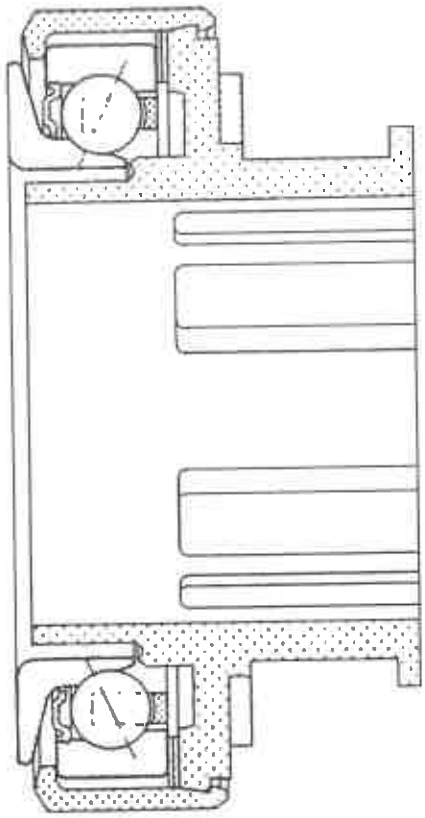
بیرینگ‌های شرح داده شده در بخش‌های قبل را می‌توان در محدودهٔ وسیعی از طرح‌های ویژه به‌کار برد. ولی آنها را به‌صورت سفارشی برای مصارف ویژه‌ای نیز طراحی کرده و می‌سازند و امکان دارد ابعادشان خارج از استاندارد باشد و یا برای افزایش قابلیت‌های آنها از قطعات اضافی استفاده شود. امکان دارد بیرینگ های ویژه، فنج، توپی‌های یک‌پارچه، حلقه‌های آب‌بندی ویژه، چرخدنده، پولی‌های یک‌پارچه ویا کلاهک‌های محافظ داشته باشند و یا امکان دارد دو تکه باشند، یعنی هر دورینگشان از دو نیمه تشکیل شده باشند. مثال‌هایی از اینگونه بیرینگ‌ها در شکل ۱-۵۸ آورده شده است.



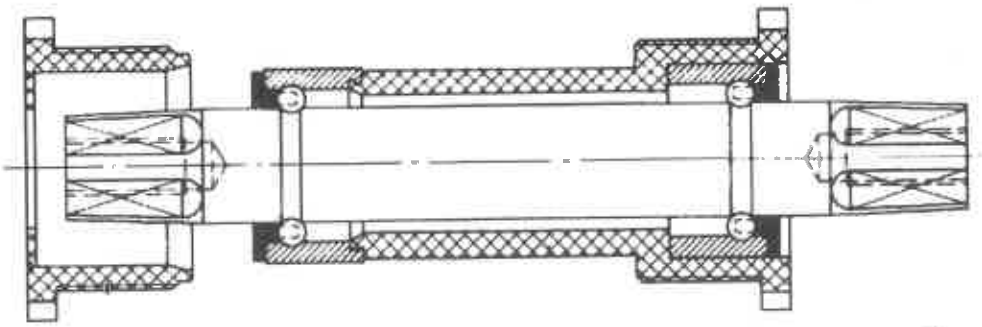
شکل ۱-۵۸b یک چرخدنده از یک جعبه‌دنده خورشیدی. یک رولربیرینگ کروی از نوع E، با یک رینگ خارجی بزرگ دندانه‌دار



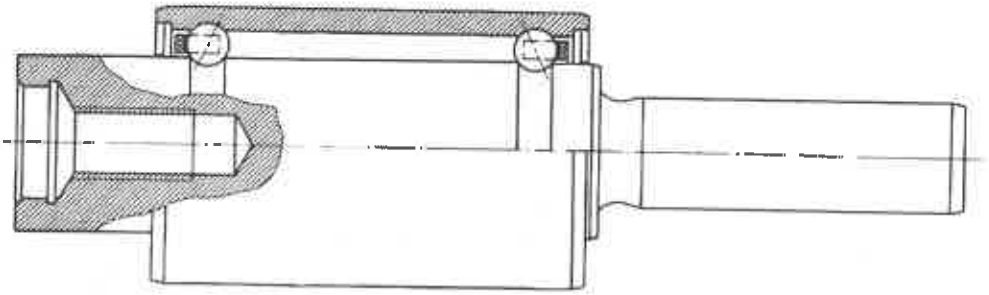
شکل ۱-۵۸a یک مجموعهٔ بیرینگ برای استفاده در یک ماشین فرزکاری میل‌لنگ. سه بلبیرینگ با تماس زاویه‌ای دو ردیفه، به‌صورت خارج از مرکز در یک طرف سوراخ داخل یکدیگر قرار گرفته‌اند، که مجهز به چرخدنده جهت دوران محور و حرکت پیشروی ماشین می‌باشند.



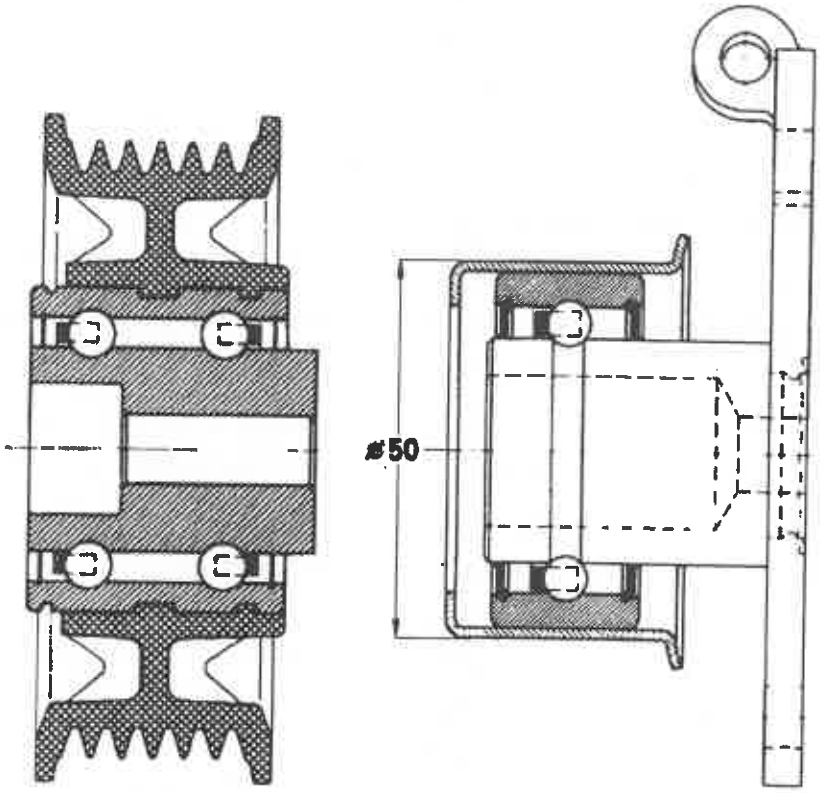
شکل ۱-۱۵۸c بیرینگ آزاد کننده کلاچ. یک بلبیرینگ با تماس زاویه‌ای مربوط به یک مجموعه تشکیل شده از جنسPA66.GF و فولاد که می‌تواند به‌صورت شعاعی خود را تنظیم کند. این بیرینگ وقتی به گردش در می‌آید، خود را در مرکز قرار می‌دهد.



شکل ۱-۱۵۸d بیرینگ توپی چرخ دوچرخه. مونتاژ آن آسان است و قفسه‌های آن نقش حلقه آب‌بندی را نیز بازی می‌کند. این مجموعه که دوران نرمی را ایجاد می‌کند بیش از میلیون‌ها بار با موفقیت تست شده است.



شکل ۱-۵۸e بیرینگ واتر پمپ خودرو و با شفت بیرون زده از رینگ خارجی جهت نصب پولی و پروانه پمپ. این بیرینگ ارائه‌دهندهٔ دوران نرم با لقی پایین است.



شکل ۱-۵۸f پولی تسمه سفت‌کن برای تسمه‌های خودرو، مجهز به پولی از جنس پلاستیک، فولاد یا مواد کامپوزیت. قطعات مکانیزم تنظیم کنندهٔ سفتی تسمه‌ها را می‌توان با بیرینگ یکپارچه کرد.

۱-۲ مواد و عملیات حرارتی

۱-۲-۱ رینگ‌ها و اجزاء غلتنده

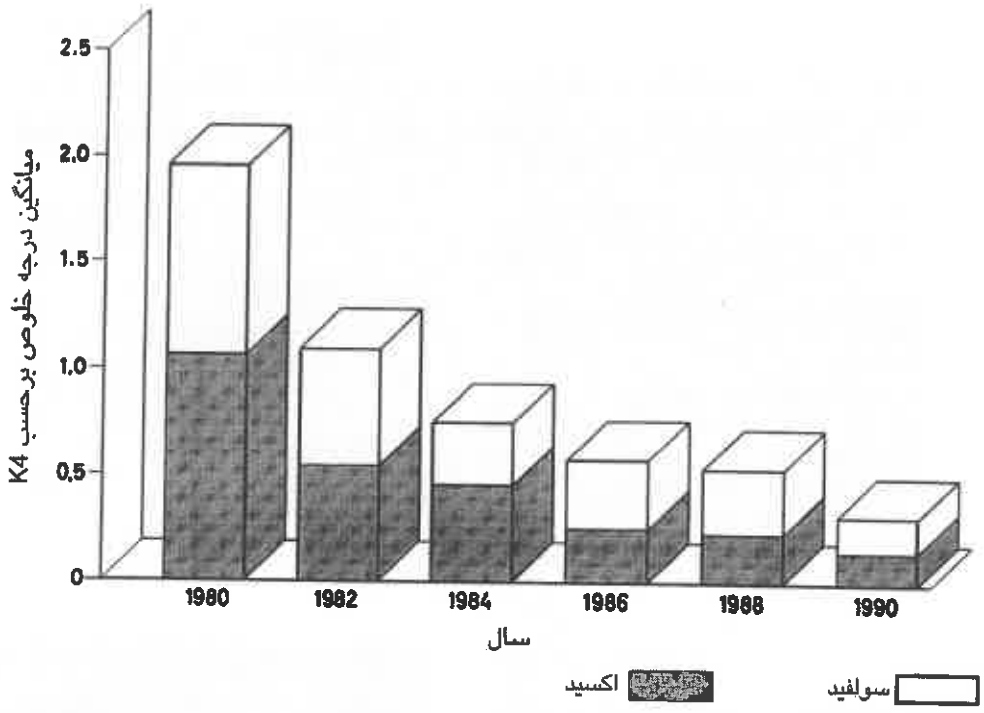
انتخاب ماده مناسب برای طرح‌ها و کاربردهای مختلف بیرینگ‌های غلتشی، مستلزم بررسی معیارهای مختلفی است. اصلی‌ترین معیار، ظرفیت تحمل بار است. اما سودآوری، قابل دسترس بودن و امکان ساخت نیز نقش‌های مهمی در انتخاب مواد بازی می‌کنند. اگر بیرینگ غلتشی وظیفهٔ مهمتری داشته باشد، مشابه مجموعه بیرینگ چرخ وسایل نقلیه مسافرتی که اصطلاحاً مجموعه توپی نام دارد، باعث تغییر معیارهای انتخاب شده و در این صورت امکانات طراحی وابسته به مواد انتخابی نیز باید مورد توجه قرار گیرد. جنس مواد بیرینگ‌های غلتشی امروزی در استاندارد DIN 17230 شرح داده شده است.

فشارهای اعمالی بر مواد رینگ‌ها و اجزاء غلتنده

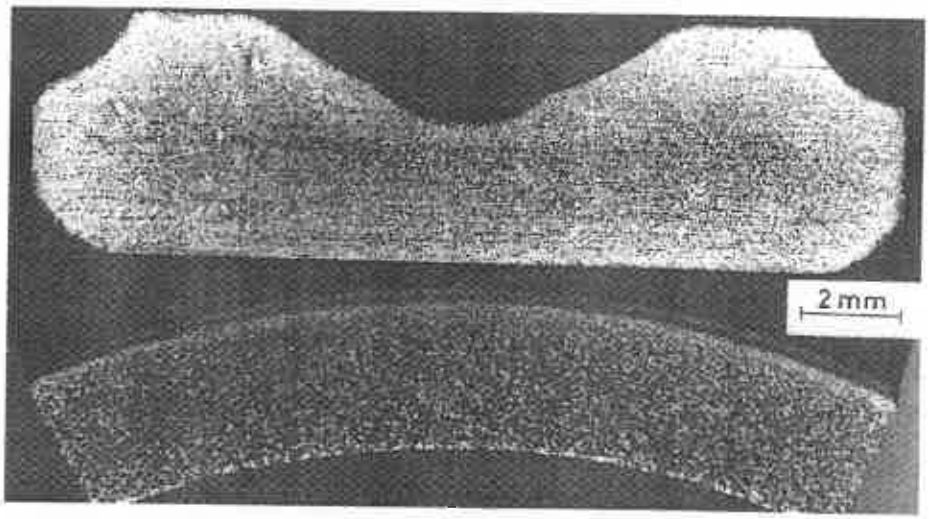
تنش اصلی وارده بر ماده، تنش ناشی از فشار قطعات در نقاط تماس غلتشی آنها به علت وجود نیروهای خارجی وارده بر بیرینگ می‌باشد ولی تنش‌های دیگری از جمله: تنش‌های مکانیکی، شیمیایی و حرارتی نیز بر این تنش اضافه می‌شوند. تنش‌های مکانیکی، تنش‌های محیطی ناشی از جازدن رینگ‌ها یا ناشی از نیروهای گریز از مرکز در سرعت‌های دورانی بالا می‌باشند؛ تنش‌های حرارتی معمولاً در مواردی مشابه بیرینگ‌های موتور هواپیما و تحت حرارت بالا ایجاد می‌شود و تنش‌های شیمیایی معمولاً در بیرینگ‌های به‌کار رفته در ماشین‌آلات صنایع غذایی یا شیمیایی ظاهر می‌شود.

تحمل تنش‌های داخلی به‌وجود آمده در قطعات غلتشی تحت فشار تماسی، نیازمند ماده‌ای با استحکام استاتیکی و دینامیکی بالا به همراه بیشترین چقرمگی ممکن است. با انتخاب مواد مناسب و انتخاب پروسه صحیح عملیات حرارتی می‌توان به توازن ایده‌آلی بین این دو خاصیت دست یافت. از این گذشته، درجه خلوص یک ماده، عامل تعیین کننده استحکام خستگی آن در تماس غلتشی و همچنین ظرفیت تحمل‌بار توسط بیرینگ می‌باشد. *ناخالصی‌های* غیرفلزی و غیرقابل اجتناب در پروسه‌های تولید فولاد، عامل اصلی ناهمگن شدن مواد می‌شوند. آنها عامل اصلی ایجاد خستگی زودرس در قطعه شده و مقدمه‌ای بر ایجاد و انتشار ترک و نهایتاً ایجاد فرورفتگی در منطقه وسیعی از قطعه می‌شوند که در نتیجه باعث کاهش عمر مفید بیرینگ خواهند شد. ارتباط بین میزان درجه خلوص فولاد (برای مثال عاری بودن از اکسیدها، سولفیدها و دیگر *ناخالصی‌ها*) و عمر مفید بیرینگ‌های غلتشی در همان اوایل کشف شد و از آن به بعد باعث ایجاد انگیزه در افزایش کیفیت در تولید فولاد گردید (شکل ۱-۵۹).

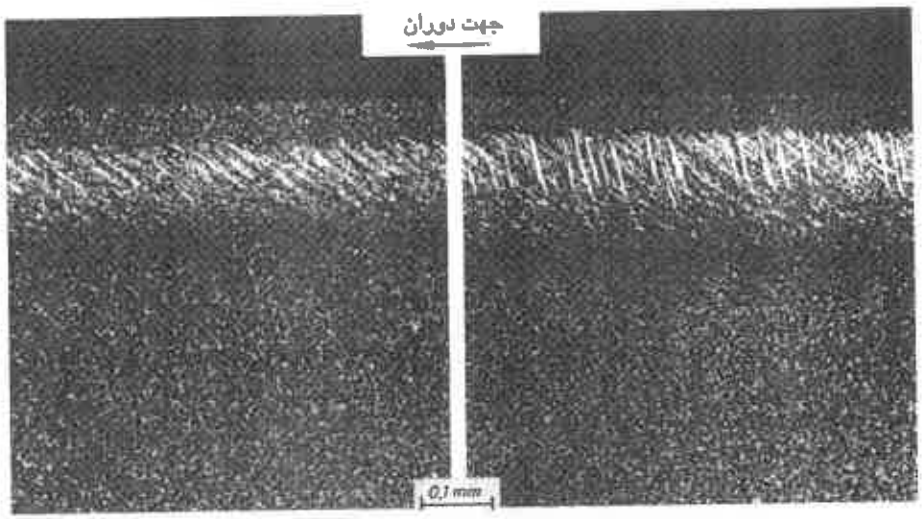
تغییرات ساختاری ماده ناشی از پدیده خستگی، موضوع انجام تحقیقات زیادی گردید (شکل‌های ۱-۶۰ تا ۱-۶۲). رشد تغییرات ساختاری مواد، به بزرگی و مدت اعمال بار وابسته است (شکل ۱-۶۳) و توسط منحنی‌های S-N می‌توان این مسئله را توضیح داد. بر پایهٔ این کشف بنیادی و به علت ارتقاء قابل توجه کیفیت در تولید فولاد، شرکت تولیدکنندهٔ بیرینگ‌های غلتشی FAG، اولین شرکتی بود که در سال ۱۹۸۱ ثابت کرد که بیرینگ‌های غلتشی نیز مشابه دیگر اجزاء ماشین، می‌توانند تحت وضعیت کاری مشخصی، با قابلیت اطمینان بالا و بدون بروز هیچ عیب فنی کار کنند.



شکل ۱-۵۹ در جه خلوص : اصلاحات کیفی در فولاد بیرینگ غلتشی : ارزیابی مطابق استاندارد DIN 50602



شکل ۱-۶۰ سطح اچ شده به روش DEA (Dark Etching Area) برش خورده به موازات و عمود بر محور رینگ داخلی یک بلبیرینگ شیار عمیق



شکل ۱-۶۱ منطقه نزدیک به سطح تماس در مقطع برش خورده عمود بر محور دوران یک بلبیرینگ؛ به نوارهای سفید (WB) توجه کنید

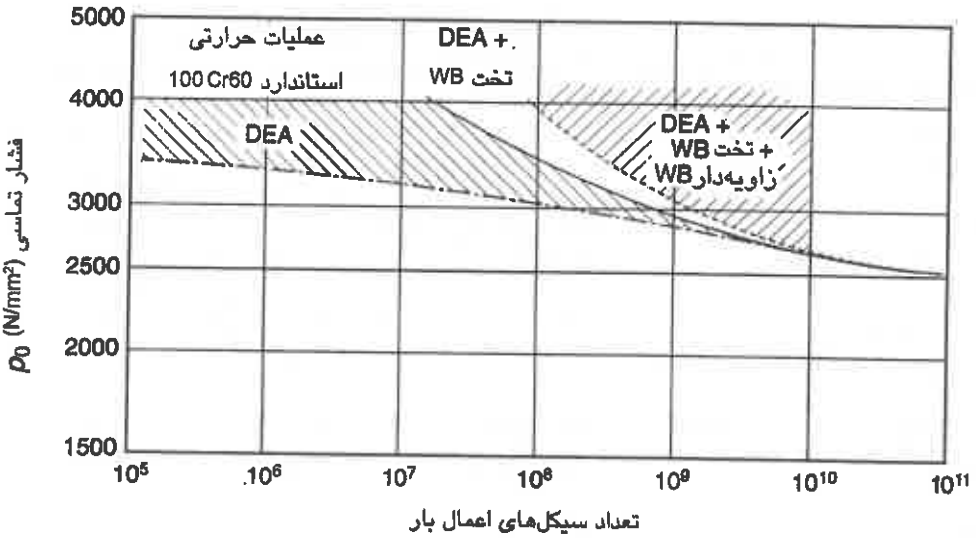
شکل ۱-۶۲ تغییر ساختار پروانه‌ای (Butterfly) در ساختار مادهٔ یکی از قطعات تحت تنش در تماس غلتشی

این دانش، سال‌ها پیش وارد محاسبات اصلاح یافته عمر مفید بیرینگ‌های غلتشی شد. امروزه مواد استاندارد به کار رفته در بیرینگ‌های غلتشی باید درجه خلوص بالایی داشته باشند؛ یکی از راه‌های دست یافتن به فولاد با خلوص بالا، خارج کردن گازهای مضر توسط خلاء می‌باشد، این روش امروزه در تمام دنیا رایج شده است.

استاندارد نمودن مواد و پروسه‌های عملیات حرارتی، تضمین کنندهٔ تولید اقتصادی و درعین حال، فراوانی مواد می‌شود.

مواد ویژه برای کاربردهای ویژه به‌کار می‌روند، مشابه بیرینگ‌های بزرگ یا بیرینگ‌های به‌کار رفته در صنایع هوا فضا. این مواد در کدگذاری بسیاری از بیرینگ‌ها، علامت مشخصه مخصوص دارند.

بنابراین در کنار فولادهای کرم‌دار فهرست شده در جدول ۱-۱، فولادهای دیگر به شرطی استفاده می‌شوند که خصوصیات مورد نیاز را داشته باشند.



شکل ۱-۶۳ ارتباط بین فشارتماسی، تعداد سیکل‌های اعمال بار و ایجاد تغییرات ساختاری D EA و WB (شکل‌های ۱-۶۰ و ۱-۶۱)

تولیدکننده‌های بیرینگ‌های غلتشی که در نقاط مختلف جهان، کارخانجات تولید داشته باشند و از نقاط مختلف مواد اولیه خود را تأمین کنند، باید استانداردهای ملی مربوط به شرایط مورد نیاز مواد بیرینگ‌های غلتشی که امکان دارد بین کشورهای مختلف متفاوت باشد، را رعایت کنند. تفاوت‌ها معمولاً در عناصر شیمیایی تشکیل‌دهنده می‌باشند، گرچه این تفاوت‌ها بسیار ناچیزاند.

فولادهای بیرینگ‌های غلتشی با قابلیت سختکاری عمقی

اکثر رینگ‌ها و اجزاء غلتنده را از موادی می‌سازند که عناصر شیمیایی اصلی آنها تقریباً از سال ۱۹۰۰ که توسط Stribeck تعیین شده است (تقریباً 1% کربن و 1.5%کرم)، تغییر نیافته‌اند (جدول ۱-۱).

تفاوت‌های ساختاری در آلیاژهای 100 Cr 6 (مشابه آلیاژ بااستاندارد آمریکایی 52100) تا 100 CrMnMo 8، تضمین‌کننده توانایی سختکاری عمقی در تمام مقاطع کوچک تا بزرگ می‌باشد.

میزان عناصر تشکیل‌دهندهٔ فولاد بیرینگ غلتشی توصیه شده در جدول‌ها، مطابق استانداردهای اجرایی مربوطه می‌باشند. پیروی از استانداردها، حتی برای تولیدکنندگان بیرینگ‌های غلتشی باعث بسته‌تر شدن محدودهٔ تغییرات عناصر در آنالیز ترکیبی مواد می‌شود که در نتیجه، قابلیت ساخت و مصرف بیرینگ‌ها به وضعیت ایده‌آلی می‌رسد. اجزاء با ضخامت کم، مشابه واشرهای پرسکاری شدهٔ رولربیرینگ‌های کف‌گرد سوزنی و مجموعهٔ قفسه یا واشرهای کف‌گرد برای بیرینگ‌های با نشیمنگاه فنری از فولادهای غیرآلیاژی کربن‌دار مشابه Ck 67 یا C 75 تولید می‌شود (جدول ۱-۲).

جدول ۱-۱ فولادهای بیرینگ غلتشی با قابلیت سختکاری عمقی

درجه‌بندی فولاد کد یا شماره ماده	DIN	ترکیب شیمیایی (wt%)							
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
100 Cr 6	17230	0.90	0.15	0.25	0	0	1.35	–	0
1.3505		1.05	0.35	0.45	0.030	0.025	1.65	–	0.30
100 CrMn 6	17230	0.90	0.50	1.00	0	0	1.40	–	0
1.3520		1.05	0.70	1.20	0.030	0.025	1.65	–	0.30
100 CrMo 7	17230	0.90	0.20	0.25	0	0	1.65	0.15	0
1.3537		1.05	0.40	0.45	0.030	0.025	1.95	0.25	0.30
100 CrMo 73	17230	0.90	0.20	0.60	0	0	1.65	0.20	0
1.3536		1.05	0.40	0.80	0.030	0.025	1.95	0.35	0.30
100 CrMnMo 8	17230	0.90	0.40	0.80	0	0	1.80	0.50	0
1.3539		1.05	0.60	1.10	0.030	0.025	2.05	0.60	0.30
SAE 52100		0.98	0.20	0.25	0	0	1.30	–	–
		1.10	0.35	0.45	0.025	0.025	1.60	–	–
SUJ 2		0.95	0.15	0	0	0	1.30	–	0
		1.10	0.35	0.50	0.025	0.025	1.60	–	0.25

جدول ۱-۲ فولادهای غیرآلیاژی یا کم آلیاژ با قابلیت سختکاری عمقی

درجه‌بندی فولاد کد یا شماره ماده	DIN	ترکیب شیمیایی (wt%)							
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Ck 67	17222	0.65	0.15	0.60	0	0	–	–	–
1.1231		0.72	0.35	0.90	0.035	0.035			
C 75	17222	0.70	0.15	0.60	0	0	–	–	–
1.0605		0.80	0.35	0.80	0.045	0.045			
D 85-2	17140	0.83	0.10	0.30	0	0	–	–	–
1.0616		0.88	0.30	0.70	0.040	0.040			

رینگ‌ها و اجزاء غلتنده معمولاً حداقل 58 HRC سختی دارند. سختی بالاتر عمرمفید بیرینگ را بالا نمی‌برد. میزان کمتر سختی، که امکان دارد به دلیل نوع ماده یا پروسه ایجاد شود، توسط فاکتور کاهش سختی fH در محاسبات عمر مفید تأثیر داده می‌شود.

اجزاء تحت تماس غلتشی را معمولاً با کونچ سریع قطعه حرارت داده شده در حمام روغن یا نمک، تا مغز سخت می‌نمایند. این نوع عملیات حرارتی ساختار میکروسکوپی ماده را (از فاز آستنیت، وقتی سرخ شده است) به فاز مارتنزیت تغییر می‌دهد.

بعداز این مرحله، جهت آزاد ساختن تنش‌های به‌وجود آمده در قطعه، آن را در درجه حرارت پایین، تمپر می‌نمایند (**شکل ۱-۶۴a**). با تغییر درجه حرارت سخت کاری و تمپر، می‌توان خصوصیات متفاوتی در ماده ایجاد کرد، در **شکل‌های ۱-۶۵** و **۱-۶۶** سختی ویژه و دمای آستنیته کردن نشانداده شده است؛ برای مثال، اگر 100 Cr 6 را تا 850 °C حرارت دهیم، سختی پس از کوئنچ‌کردن بین 66–65 HRC خواهد شد. همچنین با تمپرکردن آن در 200 °C سختی به عددی حدود 62 HRC کاهش خواهد یافت. از آنجا که باید. پارامترهای تأثیرگذار دیگری نیز در نظر گرفته شوند (از قبیل : آرایش ساختار میکروسکوپی، چقرمگی، پایداری ابعادی و غیره)، از محدودهٔ کامل منحنی‌های موجود در شکل‌های ۱-۶۵ و ۱-۶۶ *نمی‌توان* استفاده کرد. دستیابی به خواص مثبت دیگر، نیازمند یک آنالیز دقیق از تنش‌های احتمالی اعمالی به قطعه هنگام کار و تعیین خواص مورد نیاز ماده می‌باشد.

پروسه عملیات حرارتی رینگ‌ها و اجزاء غلتنده، مثلاً قطعات مربوط به رولربیرینگ‌های استوانه‌ای و مخروطی، به نحوی انتخاب می‌شود که حتی با سایش ناشی از وجود آلودگی‌های معدنی، عملکرد بیرینگ و ظرفیت تحمل بار آن در بالاترین میزان ممکن باقی بماند.

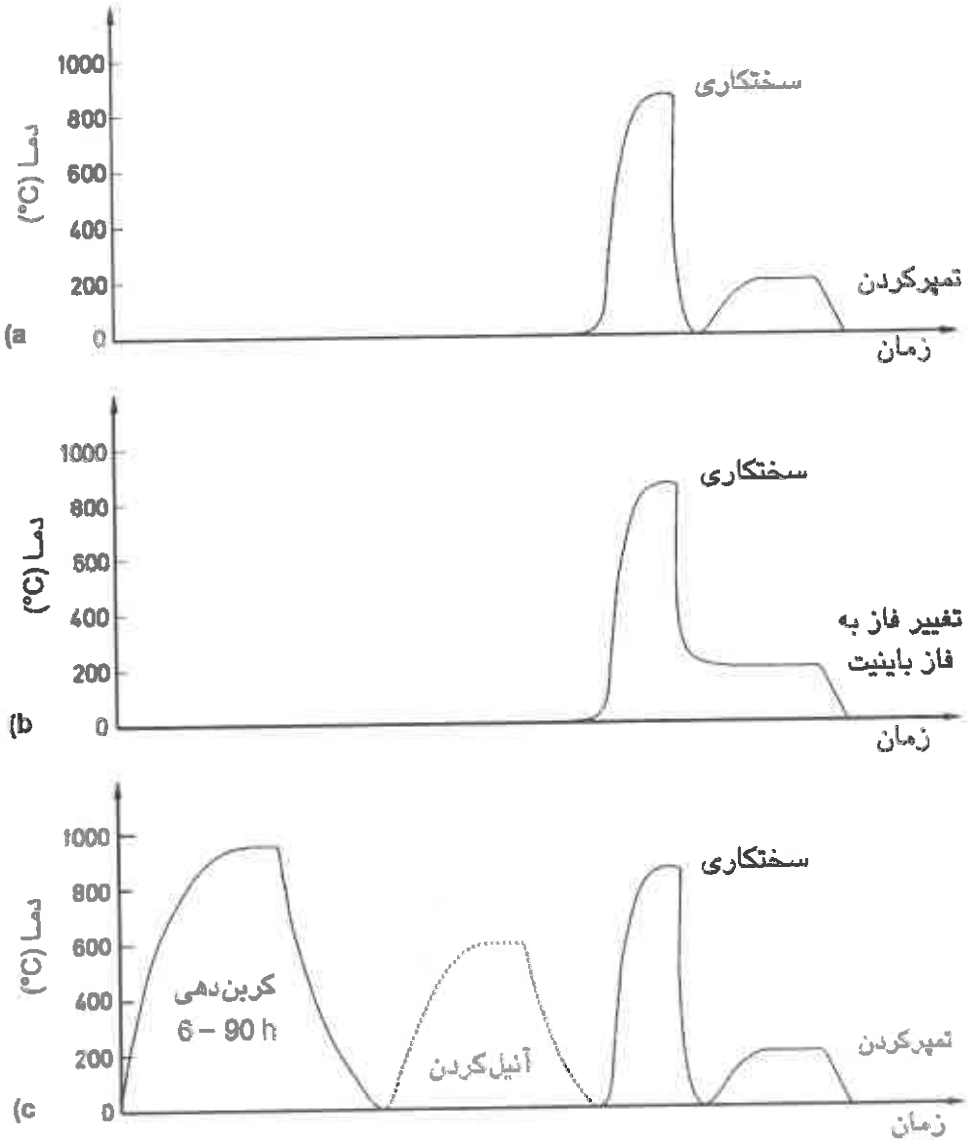
خصوصیت مهم دیگر، انتشار تنش پس‌ماند در قطعه است که یکی از علل آن عملیات‌حرارتی است. سختکاری‌باینیتی (سختکاری هم دما) باعث انتشار مطلوب تنش پس‌ماند درقطعات بیرینگ‌های غلتشی می‌شود. این حالت با نگه داشتن قطعهٔ کوئنچ شده در دمای تغییر فاز به فاز باینیت حاصل می‌شود، اندازهٔ این دما به نوع مواد بستگی دارد (**شکل ۱-۶۴b**). نگه داشتن قطعه در دمای مطلوب به‌صورت همگن و برای چند ساعت، باعث تغییرات فازی تدریجی در ساختار میکروسکوپی قطعه خواهد شد. طی این پروسه، تنش‌های پس‌ماند فشاری در لایه سطحی قطعه ایجاد می‌شوند.

این تنش‌های فشاری، باعث کاهش برآیند تنش‌های اعمالی به قطعه تحت تماس غلتشی گشته و رشد ترک‌ها را هزاران سیکل به تأخیر می‌اندازد. بعضی از بیرینگ‌های غلتشی را با روش‌های نسبتاً پیچیده‌ای عملیات حرارتی می‌کنند.

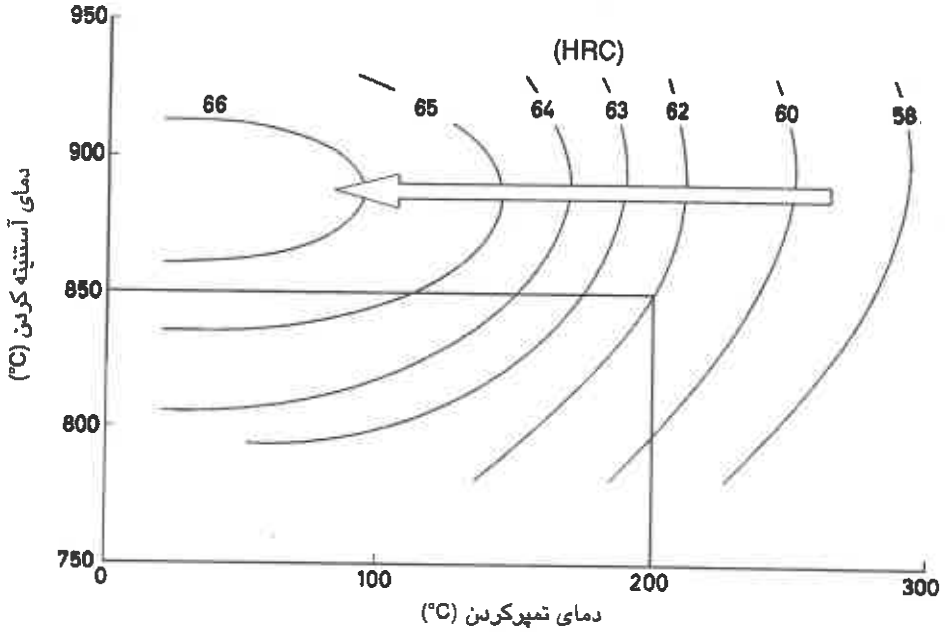
جهت تکمیل بحث لازم به ذکر است، فولادهای کرم‌دار با قابلیت سختکاری عمقی برای سختکاری القایی نیز مناسب هستند. این روش در طرح‌های مختلفی از توپی‌های بیرون زده از رینگ به‌کار می‌روند.

فولادهای با قابلیت سختکاری سطحی

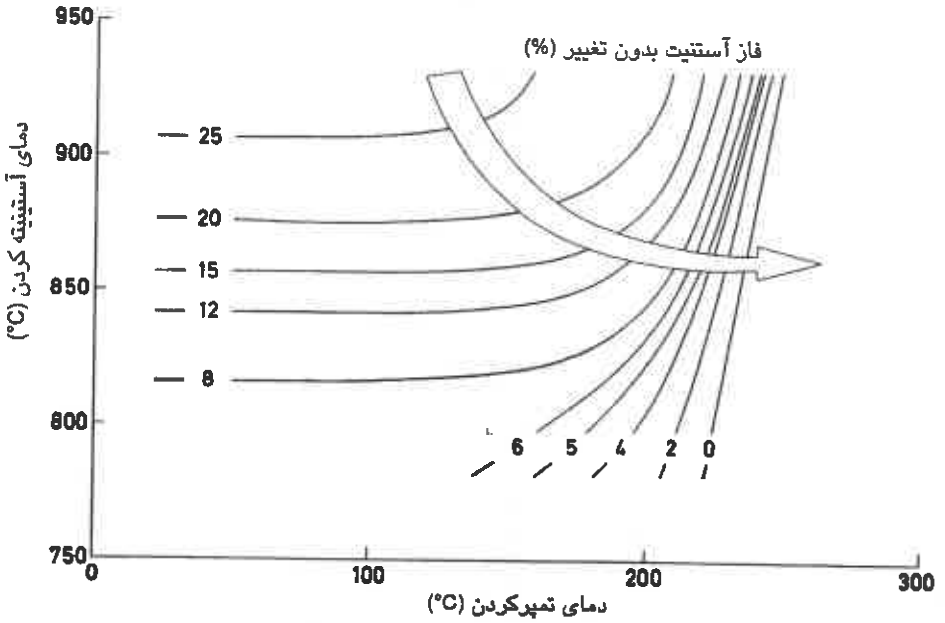
بیرینگ‌های‌غلتشی که تحت‌شوک یا تنش‌های‌خمشی تناوبی هستند را می‌توان از فولادهای مخصوص سختکاری سطحی، مطابق جدول ۱-۳ تولید کرد.



شکل ۱-۶۴ پروفیل تغییرات دما برای عملیات حرارتی متفاوت : a) فولاد کرم‌دار مارتنزیتی، b) فولاد کرم‌دار باینیتی، c) فولاد با قابلیت سختکاری سطحی



شکل ۱-۶۵ میزان سختی فولاد 100 Cr 6 با توجه به نوع عملیات حرارتی



شکل ۱-۶۶ درصد فاز آستنیت بدون تغییر در فولاد 100 Cr 6 با توجه به نوع عملیات حرارتی

جدول ۱-۳ فولادهای با قابلیت سختکاری سطحی

درجه فولاد / کد یا شماره ماده	DIN	ترکیبات شیمیایی (wt%) C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
17 MnCr 5 1.3521	17230	0.14 0.19	0 0.40	1.00 1.30	0 0.035	0 0.035	0.80 1.10	–	–
19 MnCr 5 1.3523	17230	0.17 0.22	0 0.40	1.10 1.40	0 0.035	0 0.035	1.00 1.30	–	–
16 CrNiMo 6 1.3531	17230	0.15 0.20	0 0.40	0.40 0.60	0 0.035	0 0.035	1.50 1.80	0.25 0.35	1.40 1.70
17 NiCrMo 14 1.3533	17230	0.15 0.20	0 0.40	0.40 0.70	0 0.035	0 0.035	1.30 1.60	0.15 0.25	3.25 3.75
SAE 8620		0.18 0.23	0.20 0.35	0.70 0.90	0 0.035	0 0.040	0.40 0.60	0.15 0.25	0.40 0.70
SAE 4320		0.17 0.22	0.20 0.35	0.45 0.65	0 0.035	0 0.040	0.40 0.60	0.20 0.30	1.65 2.00
SAE 9310		0.08 0.13	0.20 0.35	0.45 0.65	0 0.025	0 0.025	1.00 1.40	0.08 0.15	3.00 3.50
St 4 1.0338	1623	0 0.08	0.03 0.10	0 0.40	0 0.025	0 0.025	–	–	–
C 15 1.0401	17210	0.12 0.18	0 0.4	0.3 0.6	0 0.045	0 0.045	–	–	–
15 Cr 3 1.7015	17210	0.12 0.18	0.15 0.40	0.40 0.60	0 0.035	0 0.035	0.40 0.70	–	–

رولربیرینگ‌های مخروطی چهاردیفه روی شفت به‌صورت لق مونتاژ می‌شوند. حالت مشابه در رولربیرینگ‌های استوانه‌ای بکار رفته در ماشین‌های نورد، نیز مشاهده می‌شود.

نشیمنگاه لق امکان جابه‌جایی بین قطعات بیرینگ و شفت را ایجاد نموده و باعث گرم شدن فوق‌العاده موضع و تشکیل ترک می‌شود. در نتیجه، برای جلوگیری از این پدیده تمام قطعات و یا بخشی از قطعات این بیرینگ‌ها و بیرینگ‌های ماشین‌آلات نورد، که قطر خارجیشان به بیش از 450 mm نیزمی‌رسد، از فولادهای مخصوص سختکاری سطحی ساخته می‌شود.

پس از کربن‌دهی گازی، که گاهی توسط کامپیوتر کنترل می‌شود، قطعات را جهت دستیابی به ساختار میکروسکوپی با فاز مارتنزیت با سطح سخت و مغز نرم،

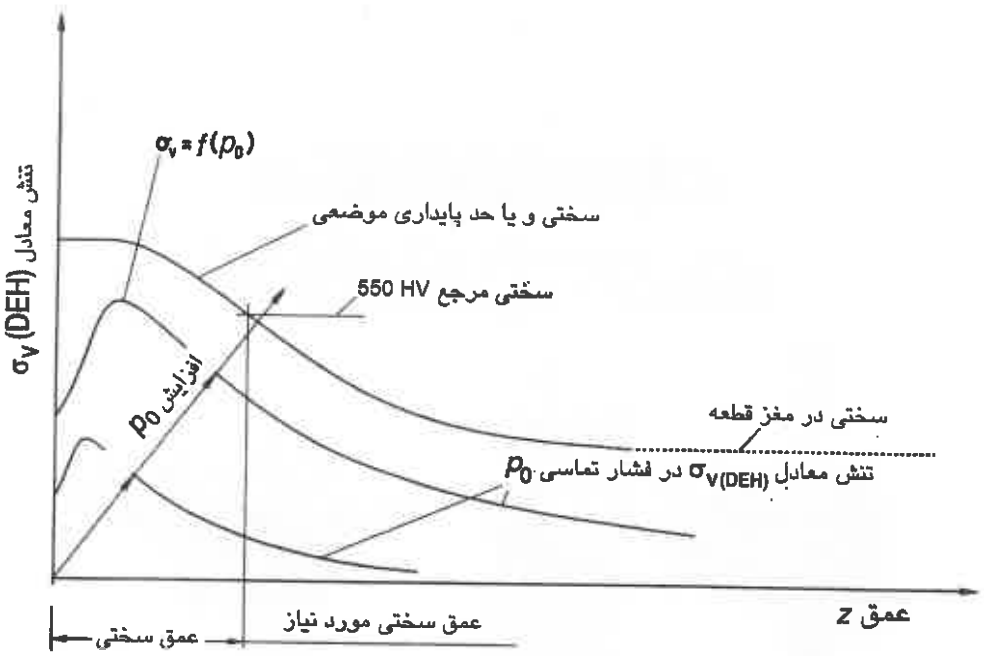
عملیات حرارتی می‌کنند. در خلال این عملیات، تنش‌های پس‌ماند فشاری در لایه‌های نزدیک سطح ایجاد می‌شوند.

کاربرد اصلی فولادهای پر آلیاژ موجود در جدول ۱-۳، در سختکاری سطحی قطعات با سطح مقطع بزرگ است که در آنها نرخ سرد شدن قطعه هنگام کونچ کردن پایین می‌باشد. فولادهای کم آلیاژ یا غیرآلیاژی، از قبیل St 4 یا 15 Cr 3 ، در قطعاتی با ضخامت کم مثل رینگ خارجی رولربیرینگ سوزنی کشیده شده دو سر باز یا یک سر بسته استفاده می‌شوند.

از آنجا که در عملیات سختکاری سطحی، سختی و استحکام قطعه هر چه به مرکز حرکت کنیم کاهش می‌یابد، لذا لازم است نسبت به میزان بار وارده و هندسه تماس (قطر سطح تماس، ضریب انحناء) عمق مناسب نفوذ سختی در قطعه تعیین و ایجاد شود تا تأثیر صدمات ناشی از خستگی و تغییر شکل‌های پلاستیک نزدیک منطقه تماس در وضعیت کاری استاتیکی و دینامیکی در بیرینگ، خنثی گردد. شکل ۱-۶۷ نشاندهندهٔ منحنی محاسبه عمق نفوذ سختی مناسب می‌باشد. عمق نفوذ سختی مورد نیاز را می‌توان توسط فرمول زیر تخمین زد :

(۱-۱)

قطرجزء غلتنده ×(0.07–0.21) ≥ عمق سختی 550 HV



شکل ۱-۶۷ عمق نفوذ سختی مورد نیاز برحسب فشار تماسی هرتزی : نمایش نموداری (DEH = قضیه انرژی تغییر شکل یا معیار Von Mises)

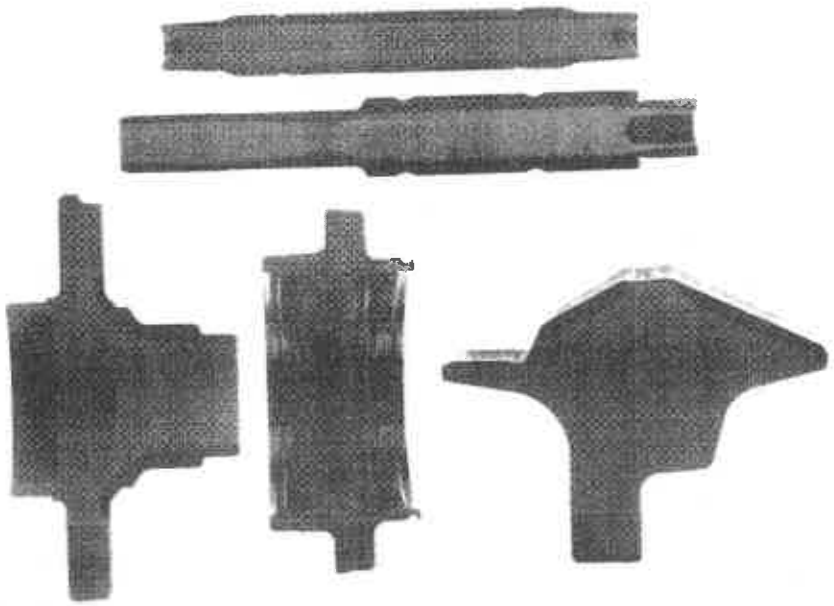
فولادهای مخصوص سختکاری سطحی به روش القایی

در بعضی موارد بخشی از قطعات بیرینگ‌ها سخت می‌شوند، خصوصاً در مواردی که وظیفه‌ای خاص در مجموعه داشته باشند. مثال‌های بارز آن، رینگ‌های داخلی و خارجی در مجموعه توپی با فلنج یکپارچه در خودروهای سواری و کامیون‌ها، شفت‌های واتر پمپ (شکل ۱-۶۸) و محورهای رزوه‌دار در رولربیرینگ‌های چرخی با محور رزوه‌دار (شکل ۱-۳۸) می‌باشند. در این موارد فقط سطوح تماس با اجزاء غلتنده و محل‌های تماس با حلقه‌های آب‌بند به روش القایی سخت می‌شوند. می‌توان از سختکاری شعله‌ای به جای روش القایی استفاده کرد. در موارد بسیار نادری از روش‌های مدرن از قبیل سختکاری توسط پرتوهای یونی یا لیزر استفاده می‌شود. سطوح تماس بیرینگ‌های مفصلی نیز سختکاری سطحی می‌شوند. دندانه‌های آنها سختکاری سطحی و یا تا ریشهٔ دندانه‌ها، سختکاری عمقی می‌شوند.

فولادهای بیرینگ غلتشی مناسب برای سختکاری با شعله یا القایی (جدول ۱-۴)، یا از نوع فولادهای کونچ و تمپرشده و یا فولادکرم‌دار با قابلیت سختکاری عمقی (جدول ۱-۱) می‌باشند. درجه خلوص بالای فولاد، شرط اولیّه برای دستیابی به استحکام خستگی بالا در قطعه می‌باشد. باید در محاسبه عمق نفوذ سختی مورد نیاز، میزان بار اعمالی و هندسه تماس در نظر گرفته شود (شکل ۱-۶۹). به‌عنوان یک راه‌حل تجربی، می‌توان از فرمول زیر برای محاسبه استفاده کرد :

(۱-۲)

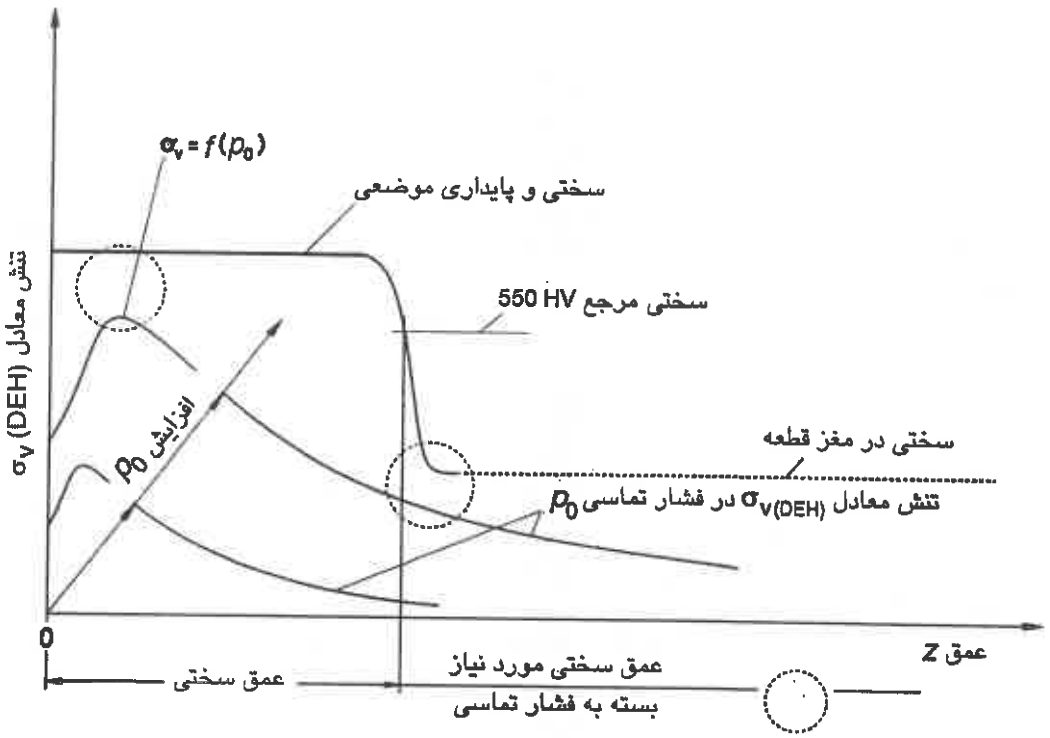
قطر جزء غلتنده × (0.1–0.15) ≥ عمق سختی 550 HV



شکل ۱-۶۸ قطعات ویژهٔ بیرینگ‌ها که سطحشان به روش القایی سخت شده‌اند

جدول ۱-۴ فولادهای کوئنچ و تمپر شده، فولادهای مناسب برای سختکاری القایی یا با شعله

درجه فولاد کد یا شماره ماده	DIN	ترکیبات شیمیایی (wt%) C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
43 CrMo 4	17230	0.40	0	0.60	0	0	0.90	0.15	–
1.3563		0.46	0.40	0.90	0.025	0.035	1.20	0.30	
SAE 4340		0.38	0.20	0.60	0	0	0.70	0.20	1.65
		0.43	0.35	0.80	0.035	0.040	0.90	0.30	2.00
Cf 54	17230	0.50	0	0.40	0	0	–	–	–
1.1219		0.57	0.40	0.70	0.025	0.035			
SAE 1070		0.65	0.20	0.60	0	0	–	–	–
		0.75	0.40	0.90	0.040	0.050			



شکل ۱-۶۹ عمق نفوذ سختی وابسته به فشار تماسی هرتزی : نمایش نموداری (DEH = قضیه انرژی تغییر شکل)

برای رسیدن به سختی سطحی پایین‌تر از 58 HRC، می‌توان از فولادهای با سختی‌پذیری کمتر که در جدول ۱-۴ آورده شده‌اند، استفاده کرد. این مورد را می‌توان در محاسبات عمر مفید بیرینگ داخل کرد.

باید با در نظر گرفتن تنش‌های وارده و قابلیت تولید قطعه، در کنار دیگر پارامترها، نوع مادهٔ اولیه را از بین فولادهای کونچ و تمپر شده، فولادهای نرمالیزه شده و یا فولادهای آنیل شده انتخاب کرد.

فولادهای مقاوم در برابر خوردگی

تعدادی از فولادهای مقاوم در برابر خوردگی مناسب برای مصرف در بیرینگ‌های غلتشی با محیط کاری خورنده در دسترس می‌باشند (جدول ۱-۵).

مقاومت این مواد زمانی به میزان رضایت‌بخش می‌رسد که آنها را در کمترین درجه حرارت ممکن، کوئنچ و تمپر نماییم و همچنین صافی سطح بالایی داشته باشند. اطلاعات دقیق‌تر در مورد مقاومت فولاد را می‌توان از تولیدکننده‌های فولاد و سازندگان بیرینگ‌های غلتشی، به‌دست آورد.

فولادهای مقاوم به خوردگی را می‌توان به دوگروه تقسیم کرد : فولادهایی‌که به‌خاطر کربن کم، توان سختکاری سطحی پایین‌تری داشته و در نتیجه ظرفیت تحمل بارکمتری نسبت به فولادهای استاندارد بیرینگ‌های غلتشی‌دارند (مثل X 45 Cr 13)، و فولادهایی که این نقیصه را *نداشته* ولی به خاطر داشتن کربن بالا و کرم، کاربید زیادی در ساختارشان دارند (مثل X 102 CrMo 17). هنگام سنگ‌زنی سطح تماس قطعات، کاربیدهای موجود ظاهر شده و از سطح آن جدا می‌شوند که باعث پاره‌پاره شدن سطح می‌گردد.

جدول ۱-۵ فولادهای مقاوم به خوردگی

درجه فولاد کد یا شماره ماده	DIN	ترکیب شیمیایی (wt%)							
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
X 45 Cr 13 1.3541	17230	0.42 0.50	0 1.00	0 1.00	0 0.040	0 0.030	12.5 14.5	–	0 1.00
X 65 Cr 13		0.60 0.70	0 0.35	0.60 0.80	0 0.025	0 0.020	12.5 13.5	–	–
X 102 CrMo 17 1.3543 ≈ AISI 440C	17230	0.95 1.10	0 1.00	0 1.00	0 0.040	0 0.030	16.0 18.0	0.35 0.75	0 0.50
X 115 CrMoV 15 4		1.10 1.20 Vanadium 1.10–1.30	0.20 0.40	0.30 0.60	0 0.015	0 0.010	14.0 15.0	3.75 4.25	0 0.40
X 30 CrMoN 15		0.28 0.34 additionally N: 0.35–0.44 and V: 0.03–0.06	0.30 0.80	0.30 0.60	0 0.020	0 0.010	14.5 16.0	0.95 1.10	0 0.30

نتیجه، افزایش صدای ایجاد شده هنگام غلتش است. جهت پیشگیری از این عارضه، فولاد مقاوم به خوردگی X 65 Cr 13 سال‌هاست که به‌کار می‌رود. این فولاد به حد کافی سخت می‌شود و اشکالات ساختاری کمتری دارد. دو نمونه جدید پیشرفته که در صنایع هوا فضا و صنایع غذایی به‌کار می‌روند، فولادهای پر نیتروژن مارتنزیتی X 30 CrMoN 15 و X 15 CrMoN 15 می‌باشند، که مقاومت بالایی در برابر خوردگی دارند.

بعضی از بیرینگ‌ها را با پوشش‌دهی، در مقابل خوردگی حفاظت می‌کنند. یک پوشش نازک از کرم، غالباً برای بیرینگ‌هایی که سطح تماسشان نیز باید پوشش داده شود، مؤثر است.

مواد مقاوم به حرارت (مواد نسوز)

در مواردی که دمای محیط کاری بالا باشد و استفاده از بیرینگ‌های ساخته شده از فولادهای کرم دار با قابلیت سختکاری عمقی که ابعاد ثابتی دارند *نامناسب* باشد، از بیرینگ‌های ساخته شده از مواد مقاوم به حرارت استفاده می‌شود.

عناصر تشکیل‌دهندهٔ مواد مقاوم به حرارت مخصوص بیرینگ‌ها، مشابه فولادهای ابزاری است (جدول ۱-۶). از این مواد در ساخت بیرینگ‌های موتور هواپیما استفاده می‌شود. این فولادها نسبت به دیگر فولادهای بیرینگ سختی بالاتری در دماهای بالا دارند (شکل ۱-۷۰). یک نمونه پیشرفته، از این مواد، فولاد

مارتنزیتی پر نیتروژن X 30 CrMoN 15 (HNS) است، که با سختکاری ثانویه در دمای تمپراسیون بالا، می‌توان سختی در دمای بالای آن را به میزان مشابه در فولاد M50 رساند. ضمناً این فولاد مقاومت بالایی در مقابل خوردگی دارد. مجموع این خواص باعث شده این فولاد برای کاربردهای صنایع هوا و فضا ایده‌آل باشد. معمولاً رینگ‌های بیرینگ‌های به‌کار رفته در صنایع هوا و فضا را تا عمق سخت می‌کنند. ولی در مواردی که بیرینگ تحت تنش بالایی باشد، مثل دوران با سرعت بالا، از فولادهای مقاوم به حرارت با قابلیت سختکاری سطحی استفاده می‌شود. فولاد M50NiL یکی از نمونه‌های برجسته از این نوع فولادها است که در سال‌های اخیر با موفقیت در صنعت معرفی شده است. عملیات حرارتی این فولادها نیازمند اطلاعات فنی خاص، ماشین‌آلات پیشرفته و مهندسی پروسهٔ پیشرفته‌ای است. آلیاژهای زینتر شدهٔ استلایت برای دماهای بالای 600 °C نیز به‌کار می‌روند.

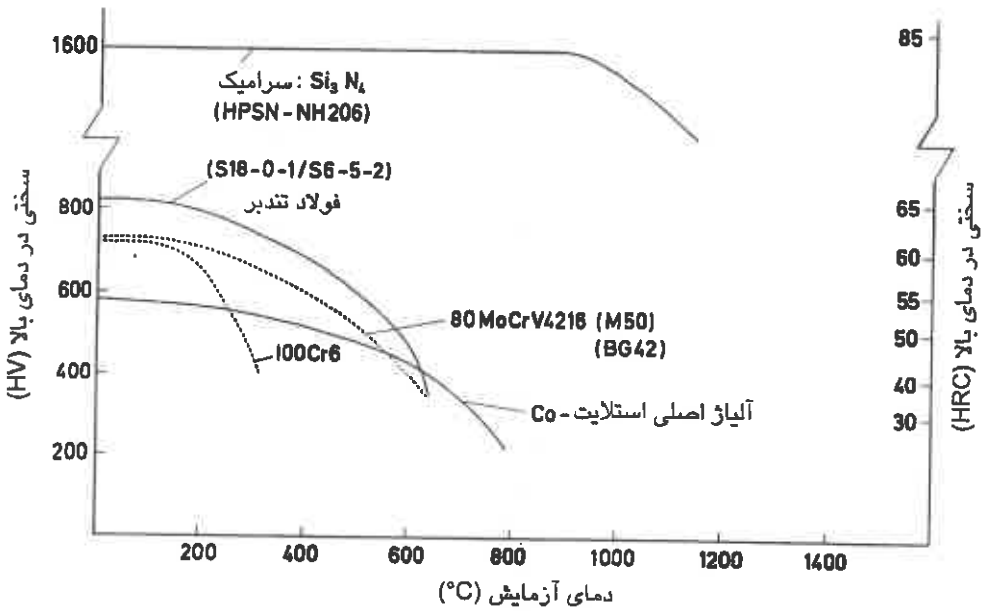
مواد مخصوص کاربردهای ویژه

طیف گسترده طرح‌ها و کاربردهای بیرینگ‌ها، ما را به سوی مصرف موادی هدایت می‌کند که *نمی‌توان* آنها را به تفصیل شرح داد. بیرینگ‌های غلتشی مورد استفاده در صنایع شیمی و صنایع غذایی، جزو این دسته از بیرینگ‌ها می‌باشند. در مواردی با بار اعمالی پایین، می‌توان آنها را از فولاد زنگ نزن غیر قابل سختی‌پذیری یا مواد پلاستیکی ساخت. سرامیک‌ها گروه دیگری از مواد مهم هستند که جایگاه خوبی دارند، نیترید سیلیکون (Si_3N_4) را معمولاً در ساخت ساچمه به‌کار می‌برند (شکل ۱-۷۱). خصوصیات ویژهٔ سرامیک‌ها از قبیل: وزن کم (وزن قطعات سرامیکی تنها 40% وزن قطعات مشابه فولادی است)، انبساط حرارتی کم،

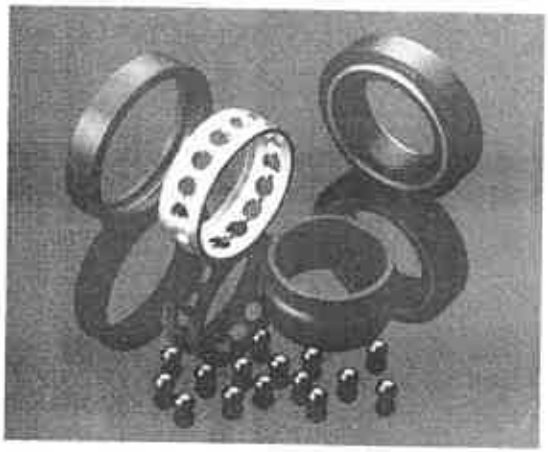
سختی بالا، مقاومت در برابر حرارت (شکل ۱-۷۰)، ثبات ابعادی عالی، مقاومت بسیار خوب در برابر خوردگی، مدول الاستیسیته بالا و غیرمغناطیسی بودن، برای بعضی از کاربردها بسیار ایده‌آل است.

جدول ۱-۶ فولادهای مقاوم به حرارت، آلیاژهای استلایت

درجه فولاد کد یا شماره ماده	DIN	ترکیب شیمیایی (wt%) C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	W
M50											
(80 MoCrV 42 16)	17230	0.77	0	0	0	0	3.75	4.0	–	0.90	–
1.3551 ≈ AISI M 50		0.85	0.25	0.35	0.015	0.015	4.25	4.5		1.10	
X 75 WCrV 18 4 1	17230	0.70	0	0	0	0	3.80	0	–	1.0	17.5
1.3558 ≈ AISI T1		0.78	0.45	0.40	0.030	0.030	4.50	0.60		1.2	18.5
X 12 MoCrNiV 443	M50NIL	0.11	0.10	0.15	0	0	4.0	4.0	3.2	1.13	0
	AMS 6278	0.15	0.25	0.35	0.015	0.010	4.25	4.5	3.6	1.33	0.15
X 20 WCr 10 3		0.16	0	0.20	–	–	2.75	–	0.50	0.35	9.5
(RBD)		0.21	0.35	0.40			3.25		0.90	0.50	10.5
X 15 CrMoN 15		0.15	0.30	0.30	0	0	14.5	0.95	0	0	–
		0.30	0.80	0.60	0.02	0.01	16.0	1.10	0.30	0.50	
		به همراه N: 0.35–0.43									
Stellite		1.50	0	0	–	–	29.5	–	0	–	9.5
Alloy Nr. 19 PM		2.25	1.0	1.0			32.5		3.0		11.5
		Fe: 0–2.0 B: 0–1.0 Co: کل بقیه									
Stellite		0.05	0	1.0	–	–	19.0	–	9.0	–	14.0
Alloy Nr. 25 PM		0.15	1.0	2.0			21.0		11.0		16.0
		Fe: 0–2.0 Co: کل بقیه									



شکل ۱-۷۰ سختی در دمای بالا : مواد مقاوم به حرارت، در مقایسه با فولاد 100 Cr 6

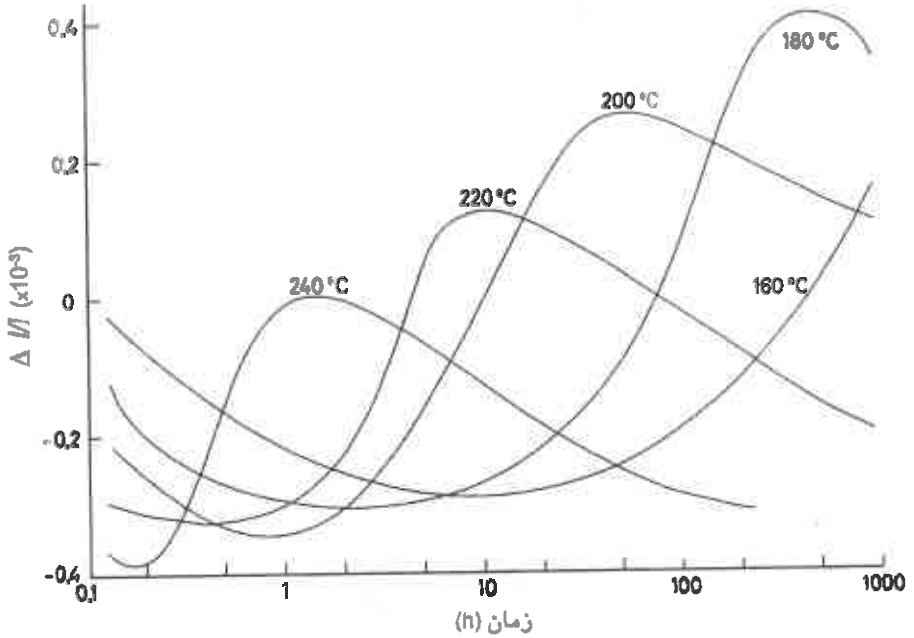


شکل ۱-۷۱ قطعات بیرینگ‌های غلتشی ساخته شده از نیترید سیلیکون (Si3 N4)

هنگام بررسی‌های دقیق در مورد کاربردهای بیرینگ، باید دید آیا در آن مورد خاص، استفاده از سرامیک به جای فولاد مناسب است یا نه. اقتصادی بودن این جایگزینی یکی از موارد مهم و قابل توجه است.

ثبات ابعادی بیرینگ‌های غلتشی

ابعاد بیرینگ‌های غلتشی باید تا دمای کاری خاصی ثابت بماند تا بتواند در محدوده حرارتی تعریف شده و حتی فراتر از آن به‌خوبی کار خود را ادامه دهد. عدم ثبات ابعادی فولاد بیرینگی که سختکاری شده باشد ولی عملیات ثانویه‌ای روی آن انجام نشده باشد، باعث می‌شود در دمای کاری بالا، تغییرات ابعادی بسرعت آشکار شوند (شکل ۱-۷۲). تاثیرات منفی این پدیده، عبارتند از: تغییر در میزان لقی بیرینگ، کاهش بار اولیه یا ایجاد بارهای زیان‌آور، کاهش نیروی جازنی و از کار افتادگی زودرس بیرینگ.



شکل ۱-۷۲ تغییرات طول در فولاد 100 Cr 6 سختکاری شده و تمپر نشده، برحسب زمان و دما. وضعیت اولیه فولاد 20 °C و 0 = Δ l/l می‌باشد.

تغییرات ابعادی، ناشی از تغییرات در دو جزء تشکیل دهندهٔ ساختار میکروسکوپی فولاد، یعنی آستنیت و مارتنزیت می‌باشد. تأثیر دما و گذشت زمان، باعث تغییر شکل فاز آستنیت موجود در فولاد بیرینگ سختکاری شده و باعث افزایش حجم این فاز می شود. از طرفی رسوب کربن موجود در فاز مارتنزیت، باعث کاهش حجم فاز مارتنزیت می‌شود. تغییر ابعادی نهایی، تفاضل تغییرات ابعادی خالص این دو فاز خواهد بود (شکل ۱-۷۲). این تغییرات ابعادی تابع قانون کوچکترین محدودیت (Law of the Smallest Constraint) می‌باشند. تنش‌های کششی، که مثلاً در رینگ به خاطر جازدن بر روی شفت ایجاد شده باشد، باعث تسهیل در افزایش قطر می‌شوند.

سازندگان بیرینگ‌های غلتشی، توسط یک پروسه مخصوص تمپراسیون، بعد از سختکاری، اینگونه تغییرات ابعادی را حذف می‌کنند. در این پروسه تمپراسیون، میزان آستنیت باقیمانده، کاهش یافته و کاربیدها در فاز مارتنزیت رسوب داده می‌شوند. اگر بیرینگ‌ها در حرارت‌های بالاتر از حد مجاز (جدول ۱-۷) قرار نگیرند، تغییرات طولی نشانداده شده در شکل ۱-۷۲ ایجاد نخواهد شد.

بسته به سازنده بیرینگ غلتشی، بیرینگ‌های استاندارد تا دماهای 120 °C یا 150 °C ثبات ابعادی دارند.

درجه‌بندی‌های ثبات ابعادی استاندارد بیرینگ‌های غلتشی به همراه بالاترین درجه حرارت کاری قابل

تحمل، در جدول ۱-۷ آورده شده‌اند. مقادیر موجود در جدول، مربوط به فولادهای بیرینگ با قابلیت سختکاری عمقی، خصوصاً فولادهای کرم‌دار سختکاری عمقی شونده می‌باشند. امکان دارد تغییرات ابعادی در لایه‌های سطحی سختکاری شده قطعات که معمولاً در دماهای پایین تمپر می‌شوند، اتفاق بیافتد. این نوع تغییرات ابعادی، ناشی از تغییرات ساختاری در لایه‌های سطحی است. در دماهای کاری بالا، باید تمام موارد در نظر گرفته شود تا متوجه شویم که آیا به عملیات ویژه‌ای جهت ثبات ابعادی نیاز داریم یا خیر.

پروسه‌های عملیات سطحی

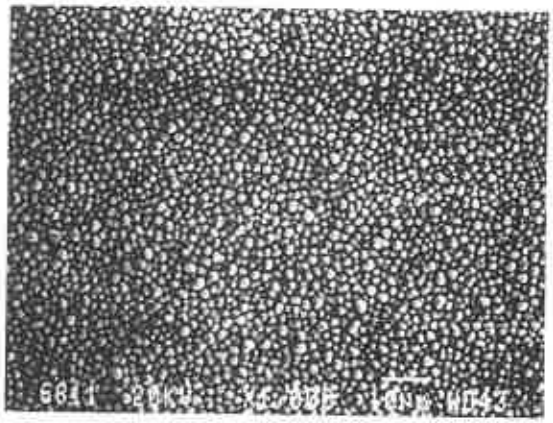
بعضی اوقات، هزینه‌های گزافی صرف توسعه و پیشرفت پوشش‌های بیرینگ‌های غلتشی می‌شود. برخی از اهداف تکنولوژی‌های عملیات سطحی، بهبود رفتارهای سایشی قطعات است (ر. ک. به بخش ۲-۳-۶) که بعضی اوقات با پوشش‌دهی سطح تماس فقط یکی از اعضاء تحت تماس، می‌توان به هدف مورد نظر دست یافت. اهداف دیگر عبارتنداز : افزایش مقاومت به خوردگی و یا عایق‌بندی در مقابل جریان برق.

جدول ۱-۷ ثبات ابعادی بیرینگ‌ها

حداکثر دمای کاری (°C)	پسوند برای بیرینگ‌های با ثبات ابعادی
120	بدون پسوند
150	S0
200	S1
250	S2
300	S3

پروسه‌های سیاه کاری اکسیدی و فسفاته‌کردن، جهت بهبود خاصیت آب‌بندی سطوح تحت سایش یا ایجاد قابلیت دوران بدون روانکاری، مدتهاست که بکار می‌روند. یک پروسه پیشرفته‌تر که در کاربردهای مختلف آزمایش‌شده است، پوشش‌دهی لایه نازکی از کروم به روش کاتدی است (شکل ۱-۷۳). این پوشش عمر سطوح تماس غلتشی را افزایش می‌دهد و مقاومت آنها را در مقابل سایش، خصوصاً تحت شرایط اصطکاکی مختلط، بالا می‌برد. لایه کرم پوشش داده شده، *نباید* پس از یک دورهٔ طولانی گردش بیرینگی که روغنکاری مناسبی دارد، کنده شود، زیرا لایهٔ پوششی کرم بسیار سخت است، و ذرات کنده شده به سرعت سطح تماس را خراب خواهند کرد.

یک پوشش کرم سرتاسری به شکلی که کل سطح قطعه را فراگرفته باشد، باعث افزایش مقاومت به خوردگی فولادهای معمولی بیرینگ سختکاری عمقی شده می‌شود. پوشش‌دهی به روش رسوب فیزیکی بخار (PVD)، پوشش‌دهی به‌روش رسوب شیمیایی بخار (CVD) و

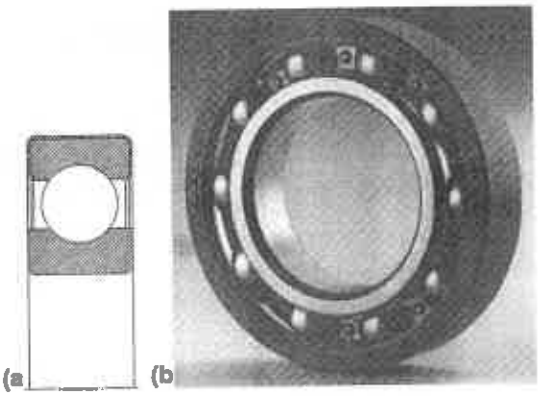


شکل ۱-۷۳ سطح پوشش داده شده با لایه نازکی از کرم با بزرگنمایی 1000 برابر

اصلاح سطح به روش کاشت یونی، روش‌هایی هستند که آزمایش شده‌اند و در بعضی موارد به‌کار می‌روند. البته در کنار قواعد فنی، مقرون به صرفه بودن بیرینگ نقش قاطعی در انتخاب پروسه پوشش‌دهی بازی می‌کند. صدمات ناشی از عبور جریان برق در موارد ویژه را می‌توان با عایق‌بندی بیرینگ با پوشش لایه‌های سرامیکی روی سطح خارجی رینگ خارجی از بین برد (شکل ۱-۷۴). این لایه‌ها توسط روش پاشش شعله‌ای و یا پلاسما ایجاد شوند.

۱-۲-۲ مواد اولیه قفسه‌ها

قفسه‌های بیرینگ‌های غلتشی را از فلز یا پلاستیک می‌سازند. در ساخت قفسه‌های فلزی بیرینگ‌های کوچک، از ورق‌های فولادی و برنجی استفاده می‌شود. قفسه‌های بیرینگ‌های متوسط و بزرگ را به روش آهنگری سرد یا ماشینکاری از فولاد یا برنج می‌سازند. در موارد ویژه نیز امکان دارد قفسه‌ها را از برنز یا آلیاژ آلومینیم بسازند.



شکل ۱-۷۴ بلبیرینگ شیار عمیق عایق‌بندی شده در مقابل جریان برق

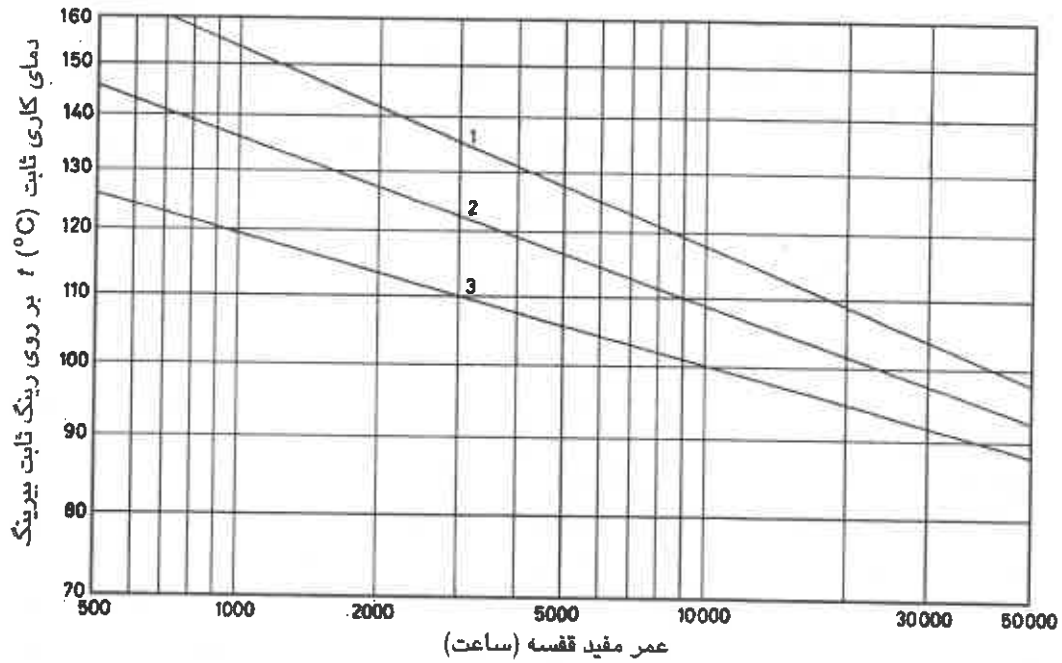
سال‌هاست که در انواع زیادی از بیرینگ‌های غلتشی، از قفسه‌های پلاستیکی استفاده می‌شود. امروزه ترموپلاست‌ها، به خاطر خواص لغزشی مناسب، وزن کم و خاصیت الاستیسته، تبدیل به مواد اوّلیه پراهمیتی جهت ساخت قفسه‌ها شده‌اند. قفسه‌های ترموپلاستی حتی با شکل‌های پیچیده را می‌توان با روش‌های ارزان و اقتصادی تزریق پلاستیک تولید نمود.

اکثر قفسه‌های پلاستیکی از ماده ترموپلاست پلی آمید 66 (PA66.GF) که توسط الیاف شیشه تقویت شده است، ساخته می‌شوند، این ماده به حرارت نیز مقاوم است. این قفسه‌ها برای دمای ثابت تا 120 °C مناسب هستند. در بیرینگ‌هایی که با روغن روانکاری می‌شوند، عمر قفسه پلاستیکی به خاطر وجود احتمالی افزودنی‌های داخل روغن و همچنین تأثیر روغن کهنه در حرارت‌های بالا، کاهش خواهد یافت. در نتیجه، باید فواصل تعویض روغن سیستم روانکار، کاملاً رعایت شود. تأثیر دمای دائمی کاری، بر عمر قفسه، در شکل ۱-۷۵ نشان داده شده است.

قفسه‌های ویژه را از دیگر مواد ترموپلاست و دیورو پلاست (کامپوزیت)، تولید می‌نمایند: قفسه‌های تحت تنش‌های حرارتی بالا از ترموپلاست PEEK ساخته می‌شوند و یا در ساخت قفسه‌های بیرینگ‌های محور کارگیر ماشین‌های ابزار، از رزین فنولی با لایه‌های بافته استفاده می‌شود.

۱-۲-۳ مواد اولیه حلقه‌های آب‌بند

حفاظ‌های گردگیر تقویتی به‌کار رفته در حلقه‌های آب‌بند را از ورق فولادی می‌سازند (شکل‌های ۱-۵، ۱-۶، ۱۴۳b و ۴-۴۵).



شکل ۱-۷۵ عمر مفید قفسه پلاستیکی از جنس PA66.GF نسبت به دمای ثابت کاری و نوع روانکار. اگر حرارت‌های بالا به‌صورت مقطعی اعمال شوند، عمر مفید قفسه افزایش خواهد یافت: 1 روغن موتور، روغن ماشین یا گریس نوع K مخصوص بیرینگ غلتشی مطابق استاندارد DIN 51825. 2 روغن چرخدنده یا گیربکس، 3 روغن چرخدندهٔ نوع هیپویید یا روغن دیفرانسیل

نوع مواد پلاستیکی به‌کار رفته در اکثر حلقه‌های آب‌بند لاستیکی، آکریلونیتریل بوتادین (NBR) است که به نام‌های لاستیک نیتریل یا بونا N نیز معروف است. برای حلقه‌های آب‌بند تحت وضعیت‌های حرارتی یا شیمیایی ویژه، نیاز به انواع لاستیک‌های گرانقیمت‌تر می‌باشد. در جدول ۱-۸ لیستی از مواد لاستیکی پراهمیت در ساخت حلقه‌های آب‌بند، به‌همراه میزان درجه حرارت کاری مجاز، آورده شده است. این مواد در برابر روانکاری‌های عمومی مقاوم هستند.

اطلاعات مربوط به تأثیر مواد شیمیایی خورنده، خصوصاً موادی که از بیرون حلقه آب‌بند با آن در تماس هستند را می‌توان از دفترچه‌های دستورالعمل مصرف حلقه‌های آب‌بند یا از طریق تولیدکننده‌های لاستیک به‌دست آورد. از تولیدکننده‌های بیرینگ‌های غلتشی هم می‌توان اطلاعات مشابه‌ای به‌دست آورد. ماده به‌کار رفته در یک حلقه آب‌بند را می‌توان از روی پسوند داخل کد بیرینگ و مشاهده رنگ لاستیک تشخیص داد (جدول ۱-۸).

جدول ۱-۸ مواد اولیه حلقه‌های آب‌بند به همراه محدوده دمایی مجاز کاری آنها

لاستیک	کد مطابق ASTM D1418	کد مطابق ISO 1629	FAG پسوند [a]	FAG رنگ	محدوده دمای کاری [b] (°C)
مواد استاندارد مخصوص حلقه‌های آب‌بندی لاستیکی					
لاستیک آکریلونیتریل بوتادین	NBR	NBR	RSR RSD	سیاه	−40 to −30 (+100 to +120)
لاستیک‌های مخصوص کاربردهای ویژه					
لاستیک آکریلایت	ACM	ACM	HSR HSD	آبی	−30 to −15 (+125 to +150)
لاستیک فلئورو [c]	FKM	FPM	VSR VSD	قهوه‌ای	−40 to −15 (+150 to +200)

a پسوند مربوط به نوع لاستیک حلقه‌آب‌بند، در انتهای کد بیرینگ غلتشی آورده می‌شود، پسوندهای شرکت‌های مختلف با هم متفاوت هستند.

b این مقادیر فقط جهت راهنمایی می‌باشد : محدوده پایین (محدوده بالا)، مقادیر محدوده پایین فقط در مواردی که لاستیک تغییر فرم‌های کوچک مکانیکی داشته باشد صدق می‌کنند. این مقادیر مربوط به وضعیت‌های کاری با دمای دائمی و ثابت می‌باشند، مقادیر محدوده بالا فقط در صورت اعمال کوتاه مدت دما صادق هستند.

c این ماده در درجه حرارت‌های بالای 300 °C، بخارهای سمی تولید می‌کند.

۱-۳ ابعاد خارجی

یک بیرینگ غلتشی، یک قطعه آماده برای نصب در ماشین است، ابعاد خارجی تعیین‌کننده ابعاد فضای نصب در ماشین بوده و به طراحان اجازه می‌دهد که در تمام زمینه‌های کاربردی مهندسی، به‌راحتی از بیرینگ‌های غلتشی استفاده نمایند.

در تمام نقاط دنیا می‌توان با کدهای استاندارد، بیرینگ‌های اصلی و یدکی ماشین آلات را براحتی سفارش داد. فقط ابعاد خارجی بیرینگ‌ها که تعیین کننده ابعاد فضای نصب می‌باشند، استاندارد شده‌اند.

طراحی داخلی، مثل ابعاد و تعداد اجزاء غلتنده، استاندارد *نشده‌اند*، اما تولیدکنندگان مختلف پس از دهها سال تحقیق جهت دستیابی به بهترین طرح، به ابعاد داخلی مشابهی رسیده‌اند. در استانداردهای آلمانی و بین‌المللی (ISO, DIN)، ابعاد خارجی بیرینگ‌های غلتشی تجاری، مطابق نقشه‌های ابعادی، طبق سری‌های مختلف بیرینگ‌های غلتشی تولید شده در آغاز قرن بیستم، تهیه و تنظیم شده‌اند، که ابعاد خارجی مشترکی داشته‌اند. این سری‌ها توسط سری‌های اضافه شده دیگر، به‌صورت سیستماتیک توسعه و گسترش یافته‌اند.

جهت جلوگیری از ازدیاد تعداد طرح‌های مختلف با ابعاد خارجی متفاوت، نقشه‌های ابعادی استاندارد، نه تنها شامل بیرینگ‌های غلتشی استاندارد در حال تولید است، بلکه شامل بیرینگ‌هایی که احتمال دارد در آینده تولید می‌شود نیز می‌باشد. استانداردهای ISO در مستندات مجزایی که در زیر آورده شده‌اند، نقشه‌های ابعادی انواع مختلف بیرینگ‌ها را آورده است :

- بیرینگ‌های شعاعی (به استثنای رولربیرینگ‌های مخروطی) در استاندارد ISO 15،
- رولربیرینگ‌های مخروطی در استاندارد DIN ISO 355 و
- بیرینگ‌های کف گرد در استاندارد ISO 104.

استاندارد DIN 616 محتوی نقشه‌های ابعادی بیرینگ‌های شعاعی و بیرینگ‌های کف گرد به‌استثنای رولربیرینگ‌های سوزنی می‌باشد. نقشه‌های ابعادی رولربیرینگ‌های سوزنی در استانداردهای زیر آورده شده‌اند :

DIN 617 رولربیرینگ‌های سوزنی با رینگ‌های ماشینکاری شده، سری‌های NA49 و NA48،

DIN 618 رولربیرینگ‌های سوزنی با رینگ‌های از ورق کشیده شدهٔ دو سر باز و یک سر بسته، سری‌های HK و BK،

DIN 5402 قسمت سوم : رولرهای سوزنی،

DIN 5405 قسمت اول : رولرسوزنی شعاعی و مجموعه قفسه،

قسمت دوم : رولرسوزنی کف‌گرد و مجموعهٔ قفسه،

قسمت سوم : واشرهای کف‌گرد،

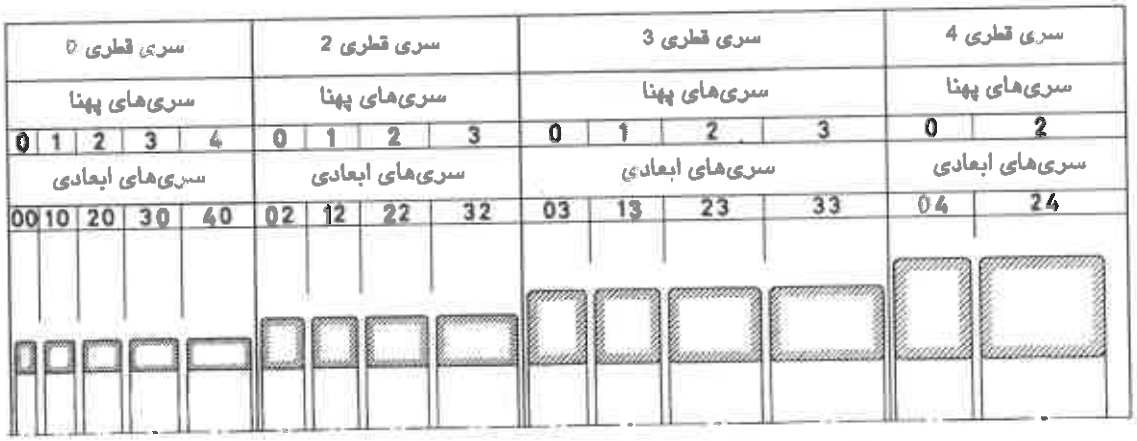
DIN 5429 قسمت اول : رولربیرینگ‌های سوزنی مرکب با مجموعه ساچمه‌ها و مجموعه رولرها،

قسمت دوم : رولربیرینگ‌های سوزنی مرکب، سری‌های NKJA59

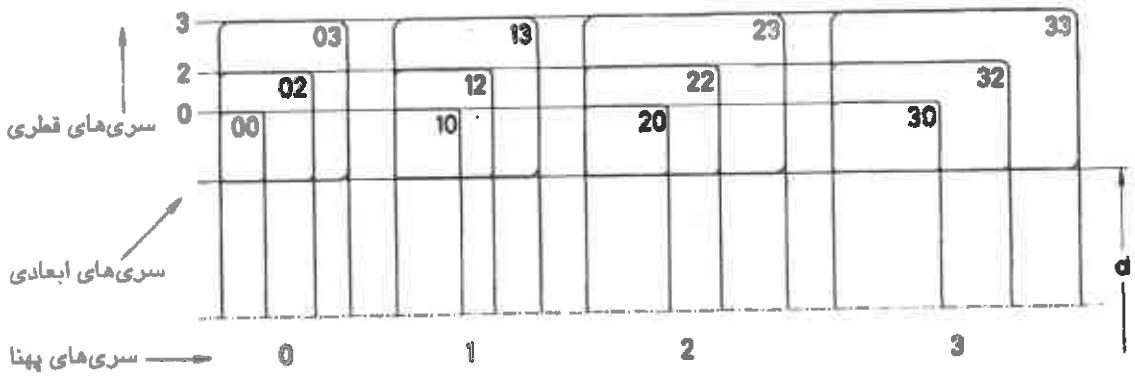
ISO6278 رولربیرینگ‌های چرخی ساده و رولربیرینگ‌های چرخی با محور رزوه‌دار.

به‌استثنای رولربیرینگ‌های‌مخروطی (شکل ۱-۷۸) و رولربیرینگ‌های سوزنی (شکل ۱-۷۹)، نقشه‌های ابعادی استاندارد، به طرح‌های خاصی محدود *نشده‌اند*. این به آن معناست که طرح‌های مختلف بیرینگ‌های غلتشی را می‌توان با ابعاد خارجی مشابهی تولید کرد. این موضوع دست طراحان را در انتخاب طرح‌های مختلف بیرینگ‌ها، با فضای نصب مشابه، باز می‌گذارد. در نقشه‌های ابعادی، برای هر قطر سوراخ داخلی، چندین قطر خارجی و پهنای متفاوت اختصاص داده شده است (به شکل‌های ۱-۷۶ تا ۱-۷۸ و جدول ۱-۹ ر.ک.). در نتیجه، با قطر سوراخ داخل ثابت، می‌توان برای دستیابی به ظرفیت‌های مختلف تحمل بار، از بیرینگ‌های با طراحی مشابه ولی با قطرهای خارجی متفاوت استفاده کرد. قبلاً، به بیرینگ‌ها، بر حسب قطر خارجی، عبارات فوق سبک، سبک، متوسط و سنگین و بر حسب پهنا، عبارات باریک و پهن اطلاق می‌شد. از آنجا که این عبارات، هنگام توسعه نقشه‌های ابعادی، نارسا و ناکافی تشخیص داده شدند، اعداد جای آنها را گرفت. در بیرینگ‌های شعاعی، در استاندارد DIN 616، از اعداد 8, 9, 0, 1, 2, 3, 4 برای تعیین سری‌های قطری و از اعداد 6, 5, 4, 3, 2, 1, 0, 8 برای تعیین سری‌های مختلف پهنا استفاده می‌شود. هر سری قطری، سری پهنای مشخصی دارد. ترکیب شماره سری پهنا و شماره سری قطری، تشکیل‌دهنده سری ابعاد است.

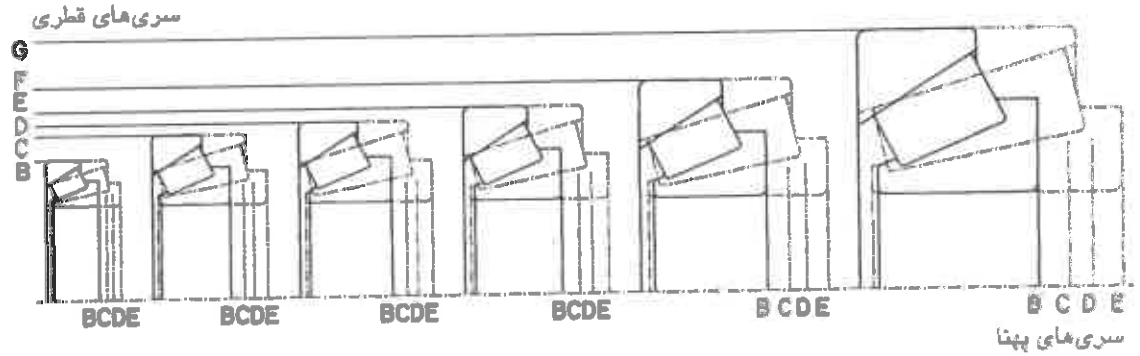
برای مثال، سری ابعادی 23، نشاندهنده سری پهنای 2 و سری قطری 3، در یک بیرینگ شعاعی است (شکل ۱-۷۷).



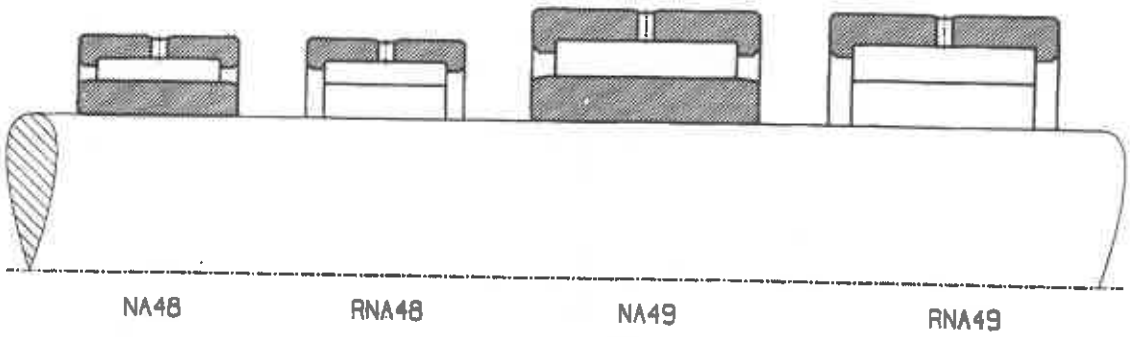
شکل ۱–۷۶ برگزیده‌ای از نقشه‌های ابعادی بیرینگ‌های شعاعی: مقاطع مختلف در بیرینگ‌های با قطر سوراخ داخل d =120 mm



شکل ۱–۷۷ شماره سری‌های ابعادی تشکیل شده از ترکیب شماره سری‌های پهنا و شماره سری‌های قطری



شکل ۱–۷۸ برگزیده‌ای از نقشه ابعادی رولربیرینگ‌های مخروطی



شکل ۱-۷۹ گزیده‌ای از نقشه‌های ابعادی رولربیرینگ‌های سوزنی DIN 617، مقاطع بیرینگ‌های با قطر سوراخ داخل 110 mm

با اضافه نمودن شماره مرجع دو رقمی سوراخ داخلی بیرینگ، مشخصه‌های تعیین‌کنندهٔ ابعاد بیرینگ، کامل خواهد شد (البته برای قطرهای بالاتر از 500 mm مقادیر به طور کامل به کد اضافه می‌شوند). یک پسوند مثل NU برای رولربیرینگ استوانه‌ای، تعیین کنندهٔ نوع طرح می‌باشد. در این صورت، کد NU2308 مشخص کنندهٔ یک رولربیرینگ استوانه‌ای با قطر سوراخ داخل 40 mm می‌باشد (ر.ک. به بخش ۱-۶).

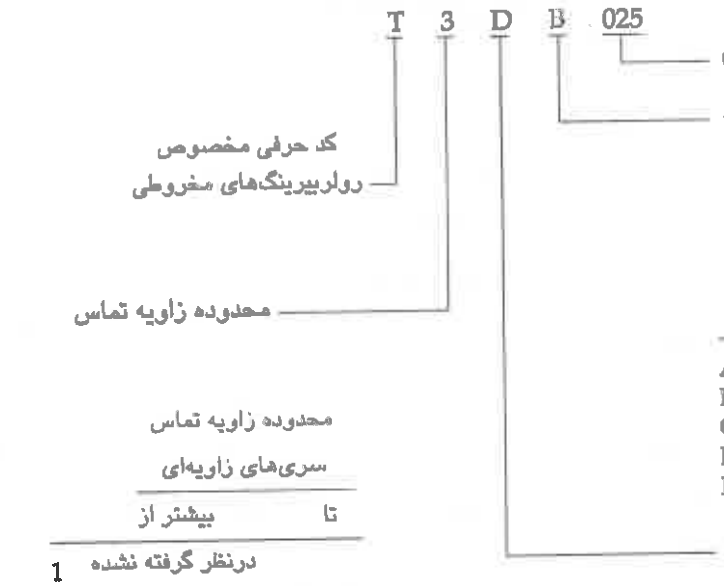
نقشه‌های ابعادی رولربیرینگ‌های مخروطی، عموماً در استاندارد DIN ISO 355 آورده شده‌اند. در این استاندارد سری‌های ابعادی از سه مشخصه تشکیل شده‌اند. برای مثال در کد 3DB : 3، مشخص‌کننده میزان زاویه تماس است (مطابق جدول ۱-۹)، D تعیین‌کنندهٔ سری قطری است (هر سری قطری، نسبت D/d مشخصی دارد) و B نیز مربوط به سری پهنا می‌باشد. هر سری پهنا، نسبت پهنا (T) به ارتفاع سطح مقطع بیرینگ مشخصی دارد (جدول ۱-۹). با افزودن پیشوند T (برای رولربیرینگ‌های مخروطی) و یک شمارهٔ سه رقمی مربوط به قطر سوراخ داخل برحسب mm به انتهای کد، کد کامل T3DB 025 (اگر قطر سوراخ داخل 25 mm باشد) به‌دست خواهد آمد. در کاتالوگ‌های بعضی از سازندگان بیرینگ‌های غلتشی، کدهای رولربیرینگ‌های مخروطی مطابق استاندارد DIN 720 به همراه کدهای جدید استاندارد DIN ISO 355 آورده شده‌اند (ر.ک. به بخش ۱-۶).

توسعه سری‌های جدید بیرینگ‌ها و حتی بیرینگ‌های غلتشی خاص، بر پایهٔ سری‌های ابعادی، مزایا و فواید قابل توجهی را برای مصرف‌کنندگان و سازندگان به ارمغان می‌آورد. بنابراین، هرگونه توسعه و اصلاح در آینده نیز بر پایهٔ نقشه‌های ابعادی خواهد بود.

۱-۴ تلرانس‌ها و روش‌های کنترل

تلرانس‌های بیرینگ‌های غلتشی عادی و دقیق در استانداردهای ISO 492 و DIN 620 قسمت دوم و سوم، آورده شده‌اند. کاتالوگ‌های سازندگان بیرینگ‌های غلتشی

جدول ۱-۹ کدبندی رولربیرینگ‌های مخروطی متریک مطابق استاندارد DIN ISO 355



محدوده زاویه تماس

	سری‌های زاویه‌ای	
	بیشتر از	تا
1	درنظر گرفته نشده	
2	10°	13°52′
3	13°52′	15°59′
4	15°59′	18°55′
5	18°55′	23°
6	23°	27°
7	27°	30°

سری‌های پهنا $\frac{T}{(D-d)^{0.95}}$

	بیشتر از	تا
A	در نظر گرفته نشده	
B	0.50	0.68
C	0.68	0.80
D	0.80	0.88
E	0.88	1.00

سری‌های قطری $\frac{D}{d^{0.75}}$

	بیشتر از	تا
A	در نظر گرفته نشده	
B	3.40	3.80
C	3.80	4.40
D	4.40	4.70
E	4.70	5.00
F	5.00	5.60
G	5.60	7.00

نیز محتوی جدول تلرانس‌ها می‌باشند. در مورد ابعاد و علامت‌های تلرانس مطابق DIN ISO1132 در بخش ۱-۴-۱ توضیح داده شده است و روش‌های مهم کنترل ابعاد و کیفیت دورانی مطابق استاندارد DIN 620 قسمت اول (1991) نیز در بخش ۱-۴-۳ آورده شده است.

۱-۴-۱ بیرینگ‌های غلتشی با دقت کاری عادی (کلاس تلرانس PN)

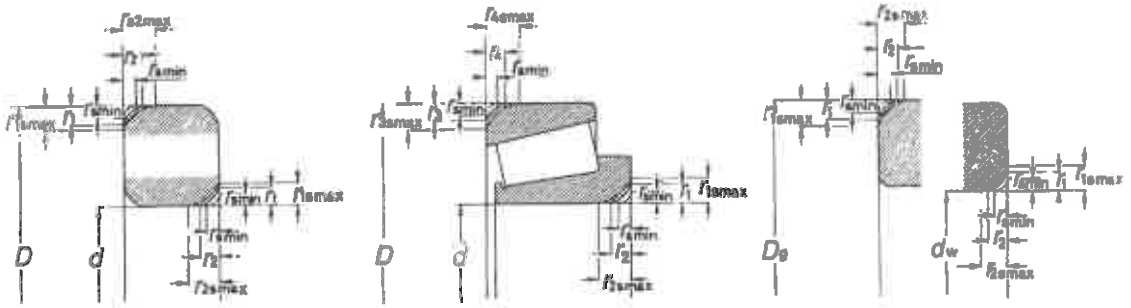
در بیرینگ‌های غلتشی با ابعاد متریک، قطر متوسط سوراخ داخل و قطر متوسط خارجی، d_{mp} و D_{mp}، همواره تلرانس منفی دارد. ابعاد نامی، همواره بزرگترین ابعاد مجاز می‌باشد. از طرفی، در رولربیرینگ‌های

مخروطی اینچی، ابعاد، تلرانس مثبت دارد، در این حالت، اندازه نامی، کوچکترین اندازه مجاز می‌باشد. هنگام بررسی تلرانس‌های قطری، توجه داشته باشید که رینگ‌های با ضخامت کم در بیرینگ‌های شعاعی، امکان دارد پس از سنگ خوردن کمی تغییر فرم پیدا کنند. از آنجا که این نوع رینگ‌ها، پس از مونتاژ خود را با فرم کاملاً دایره‌ای نشیمنگاه خود، تطبیق می‌دهند، در نتیجه این امر، تأثیری بر عملکرد رینگ پس از مونتاژ نخواهد داشت ولی هنگام اندازه‌گیری ابعاد رینگ قبل از مونتاژ، باید این مسئله در نظر گرفته شود. بنابراین، تلرانس‌های مطرح در جدول تلرانس بیرینگ‌های غلتشی، به دو دسته تقسیم می‌شوند : ۱- انحرافات مجاز ابعادی (Δ) و ۲- انحرافات از فرم هندسی ایده‌آل ، که اصطلاحاً اختلافات (V) نام دارد.

در جدول مربوط به بیرینگ‌های شعاعی، علاوه بر تلرانس‌های ابعادی مجاز قطرهای نامی (ΔD_{mp}, Δd_{mp})، تلرانس‌های مربوط به حداکثر و حداقل قطر یک رینگ (V_{dp}، V_{DP}) موجود در صفحه مرجع عمود بر محور نیز آورده شده است. اختلاف مجاز قطری (Vd_{mp}، VD_{mp}) نیز تلرانس مربوط به حداکثر و حداقل قطرهای نامی موجود در صفحه مرجع عمود بر محور است.

انحراف مجاز پهنای رینگ (Δ_{BS}) نیز درجداول تلرانس، برای رینگ‌های داخلی و خارجی آورده شده است (مثلاً Δ_{CS} برای رینگ خارجی رولربیرینگ مخروطی، مطابق کلاس تلرانس P6X). اختلاف پهنای V_{BS} (V_{CS}) برای رینگ خارجی بیرینگ‌های به‌کار رفته در محور کارگیر ماشین ابزار، مطابق تلرانس HG) تفاوت بین اندازه‌های ماکزیمم و مینیمم پهنای رینگ در نقاط مختلف آن است. عبارت انحراف مجاز دورانی، شامل تمام تلرانس‌هایی که در دقت دورانی بیرینگ تأثیر گذار هستند، از جمله : لنگی شعاعی، لنگی سطح دو طرف رینگ نسبت به سطح تماس با اجزاء غلتنده و لنگی نسبت به سوراخ داخل رینگ است. در بیرینگ‌های شعاعی، لنگی شعاعی (K_{ia} و K_{ea}) و در بیرینگ‌های کف‌گرد، تغییرات ضخامت مجاز رینگ در مرکز سطح تماس (S_e, S_i) باید مطابق تلرانس معینی باشند. تمام تلرانس‌های‌بیرینگ‌های شعاعی، رولربیرینگ‌های مخروطی و بیرینگ‌های کف‌گرد، در کاتالوگ‌های بیرینگ‌های غلتشی آورده شده است. در استانداردهای DIN 620 قسمت ششم و ISO 582، محدوده ابعادی گوشه‌های انواع مختلف بیرینگ‌ها، نسبت به قطر خارجی رینگ، آورده شده است (شکل ۱-۸۰).

ابعاد گوشه‌ها به شکل سطح گوشه ارتباطی *ندارد* ولی پروفیل آن نباید بیش از یک چهارم دایره‌ای به شعاع r_{smin}، برآمدگی داشته باشد. مشابه شکل ۱-۸۰ که مقادیر گوشه‌های بیرینگ‌های شعاعی را نشان می‌دهد، مقادیر مربوط به رولربیرینگ‌های مخروطی و بیرینگ‌های کف‌گرد در کاتولوگ‌های بیرینگ‌های غلتشی، آورده شده است. حداقل شعاع مجاز r_{smin} مربوط به اندازه‌های خاصی از بیرینگ‌ها که کنار هم مونتاژ می‌شوند، در جدول‌های ابعادی کاتالوگ‌های بیرینگ‌های غلتشی، یافت می‌شود. شیب استاندارد در بیرینگ‌هایی که سوراخ داخلی‌اشان مخروطی باشد، یک به دوازده است، این میزان معادل زاویه نامی مخروط $\alpha = 4° 46' 18.8''$ می‌باشد. البته زاویه مخروط در رولربیرینگ‌های کروی سری‌های ابعادی 40، 41 و 42 استثناء هستند، در این بیرینگ‌ها شیب مخروط 1 به 30 است. تلرانس تعیین شده در استاندارد DIN 620

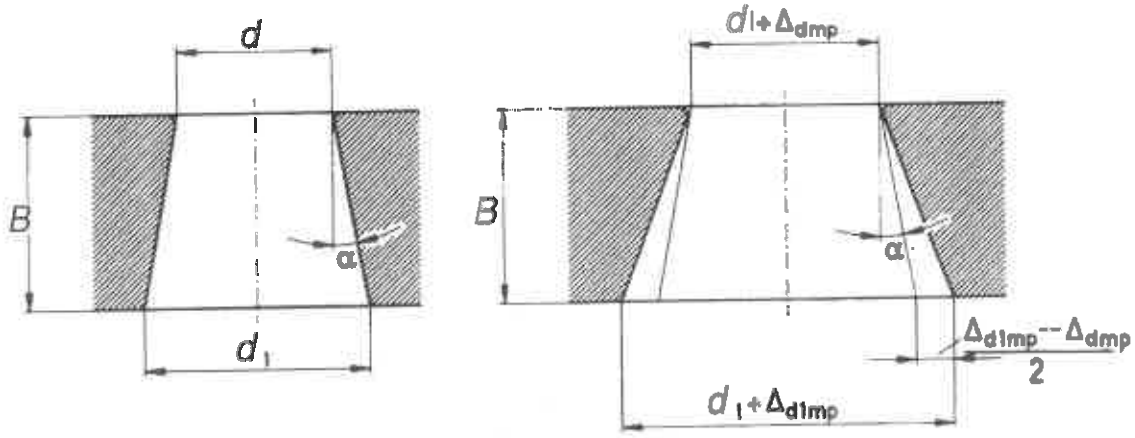


شکل ۱-۸۰ پارامترهای محدودکنندهٔ ابعاد گوشه‌ها: r_{1s}، r_{3s} = شعاع یک گوشه در راستای شعاعی؛ r_{2s} و r_{4s} = شعاع یک گوشه در راستای محوری؛ r_{smin} = علامت عمومی حداقل اندازه‌های گوشه؛ r_{1min}، r_{2min}، r_{3min}، r_{4min}، r_{1max} و r_{3max} = ماکزیمم اندازهٔ گوشه‌ها در جهت شعاعی؛ r_{1min} و r_{3min} = ماکزیمم اندازه گوشه‌ها در جهت شعاعی؛ = r_{2max}، r_{4max} ماکزیمم اندازهٔ گوشه‌ها در جهت محوری

قسمت دوم و ISO 492 برای شیب مخروط 1 به 12، در شکل ۱-۸۱ آورده شده است. مقادیری نامی نیز در کاتالوگ‌های بیرینگ‌های غلتشی آورده شده است. جزئیات دیگر مربوط به تلرانس‌ها، در بخش ۱-۴-۳ توضیح داده شده است.

۱-۴-۲ بیرینگ‌های غلتشی با دقت دورانی بالا (کلاس‌های تلرانسی UP, SP, P2, P4, P5, P6 و HG)

عموماً بیرینگ‌های غلتشی با دقت استاندارد، مثل کلاس تلرانسی P0، جوابگوی تمام نیازهای کیفی صنایع



شکل ۱-۸۱ تلرانس‌های بیرینگ‌های با سوراخ داخل مخروطی، با شیب مخروط 1 به 12

مهندسی می‌باشند. اما در بعضی موارد، مثل ماشین‌های ابزار و تجهیزات اندازه‌گیری، کارکرد با دقت بالا، با سرعت دورانی بالا یا دوران نرم و روان از اهمیت بالایی برخوردار است. این خواست‌ها با استفاده از بیرینگ‌های با دقت بالاتر قابل دسترسی هستند. به جز کلاس تلرانسی P0 (تلرانس عادی)، استاندارد محدوده تلرانسی باریک‌تری را برای کلاس‌های تلرانسی P5, P6X, P6 و P4 در نظر گرفته است، کلاس تلرانسی P2 نیز برای مواردی با تلرانس‌های بسیار بسته تعیین شده است. تولیدکنندگان بیرینگ‌های غلتشی، بیرینگ‌های دقیق را تحت کلاس‌های تلرانسی استاندارد فوق به‌همراه کلاس‌های تلرانسی SP (دقت‌های ویژه) و UP (دقت‌های فوق‌العاده بالا)، تولید می‌نمایند. رولربیرینگ‌های مخروطی اینچی، مطابق تلرانس استاندارد و در کلاس تلرانسی Q3 تولید می‌شوند (جهت مشاهده مقادیر، به استاندارد DIN 620 قسمت سوم یا کاتالوگ‌های بیرینگ‌های غلتشی ر.ک.).

استاندارد ANSI\AFBMA کدهای زیر را در کلاس‌های مختلف دقت ابعادی به‌کار برده است :

AFBM Std 20-1977	DIN 620
ABEC1 تقریباً معادل است با	PN
ABEC5 تقریباً معادل است با	P5
ABEC7 تقریباً معادل است با	P4
ABEC9 تقریباً معادل است با	P2

دقت کاری یک ماشین، نه تنها به دقت بیرینگ بستگی دارد، بلکه به دقت قطعات دربرگیرنده بیرینگ نیز بستگی دارد. کاربرد بیرینگ‌های فوق دقیق، فقط زمانی کارآیی دارد که تلرانس گردی، کیفیت سطح و موقعیت شفت و نشیمنگاه مربوطه نیز مطابق با استاندارد کیفی مربوطه باشد (ر.ک. به بخش‌های ۳-۷ و ۳-۸). از کلاس تلرانس P5 به بعد، در کلاس‌های تلرانسی بسته، مقادیر تلرانس ابعادی پهنای رینگ خارجی (V_{Cs}) در کنار تلرانس‌های لنگی طرفین رینگ‌های داخلی و خارجی نسبت به سطح تماس اجزاء غلتنده و سوراخ (S_B, S_I, S_D, S_d)، آورده شده‌اند.

۳-۴-۱ روش‌های کنترل

انحراف‌های ابعادی و دقت دورانی بیرینگ‌های غلتشی، با روش‌های اندازه‌گیری مطمئنی، کنترل می‌شوند. این روش‌ها در استاندارد DIN 620 قسمت اول تعیین شده‌اند، ولی جهت حذف تناقضهایی که احتمال دارد در به‌کار بردن روش‌های مختلف، ایجاد شود، این روش‌ها در اینجا مطرح می‌گردد.

شرایط اندازه‌گیری

قبل از اندازه‌گیری، بایدبیرینگ‌ها را از گریس یا موادنگهدارنده پاک کرد. این کار را می‌توان با مواد پاک‌کنندهٔ آلی و معدنی انجام داد :

مواد پاک‌کنندهٔ معدنی شامل محلول‌های قلیایی رقیق شده با آب می‌باشند. پس از پاک کردن، باید بیرینگ را به سرعت داخل محفظه از بین‌برنده آب فرو ببریم. محلول‌های قلیایی برای بیرینگ‌هایی که جنس قفسه‌شان آلومینیمی است، مناسب *نمی‌باشند*. مواد پاک کننده‌آلی، از پارافین و مواد نفتی عاری از اسید و آب به همراه 3% روغن ماشین تشکیل شده‌اند. اگر فقط از مواد نفتی استفاده شود، تمام گریس‌ها از بین رفته و

بیرینگ شروع به زنگ زدن خواهد کرد. پس از اندازه‌گیری، باید بیرینگ‌ها بلافاصله روغن‌کاری یا گریسکاری شوند.

از طرفی باید ابعاد قطعه در دمای مرجع 20 °C اندازه‌گیری شود. بسته به اندازه قطعات و اختلاف دما، امکان دارد ساعت‌ها وقت نیاز باشد تا قطعات به دمای مرجع مورد نظر برسند تا شرایط اندازه‌گیری ایجاد شود. بسریعترین راه دستیابی به دمای مرجع، قراردادن تجهیزات اندازه‌گیری و قطعه‌کار کنار یکدیگر در محیط اندازه‌گیری می‌باشد. جهت جلوگیری از بروز خطا، باید تجهیزات و قطعات در مقابل تأثیر حرارت دست عایق شوند.

انحراف ابعادی سوراخ و قطر خارجی باید با پروسه‌های شرح داده شده کنترل شود، زیرا رینگ‌های با ضخامت کم براحتی تغییر فرم می‌دهند. لنگی شعاعی و محوری هر کدام از رینگ‌ها را در بعضی موارد *نمی‌توان* مستقیماً اندازه‌گیری کرد، مثل بلبیرینگ‌های شیار عمیق. احتمال بروز خطا در اندازه‌گیری لنگی شعاعی کم است ولی در مورد لنگی محوری احتمال خطای اندازه‌گیری وجود دارد. هنگام ارزیابی نتایج، میزان اشکالات محور (Arbor) مورد استفاده در اندازه‌گیری از لحاظ اشکال گرد بودن (Roundness) باید در محاسبات در نظر گرفته شود. میزان بار و شعاع مجاز نوک سوزن ساعت اندیکاتور مورد مصرف در اندازه‌گیری مطابق استاندارد DIN 620 قسمت اول در جدول ۱–۱۰ نشانداده شده است.

تجهیزات اندازه‌گیری

- گیج بلوک مطابق استاندارد DIN 861، درجه دقت 1،
- پلاک گیج با دو انتهای استوانه‌ای برو نرو مطابق استاندارد DIN 7150،
- پلاک‌گیج با دو انتهای مخروطی با نرخ کاهش قطری 2 – 5 µm در هر 10 mm طول،
- رینگ‌های سنجه از فولاد سخت شده با ضخامت دیوارهٔ 20 mm با سوراخ داخلی استوانه‌ای به قطر معادل محدودهٔ پایین کلاس تلرانسی N6. اندازهٔ حقیقی قطر داخلی رینگ سنجه را باید در تعیین ابعاد در نظر گرفت،
- ساعت اندیکاتور با سیستم اندازه‌گیری مکانیکی مطابق استاندارد DIN 879 قسمت اول و
- تجهیزات اندازه‌گیری الکتریکی طول با حسگر القایی و نشانگر مطابق استاندارد DIN 32876 قسمت اول.

جدول ۱–۱۰ بار مورد نیاز اندازه‌گیری و شعاع نوک سوزن ابزار اندازه‌گیری

شعاع نوک سوزن ابزار اندازه‌گیری (mm)	بار مورد نیاز اندازه‌گیری F (N)	محدوده تا می اندازه‌گیری (mm)		ابعادی که کنترل می شوند
		تا	بیشتر از	
0.8–1.0	1.2–1.5	10		قطر سوراخ داخل d
2.5–3.2	1.2–1.5		10	
2.5–3.2	1.2–1.5		تمام ابعاد	قطر خارجی D

خطای اندازه‌گیری در تجهیزات اندازه‌گیری مورد استفاده *نباید* نسبت به تلرانس تعیین شده برای ابعاد قطعه، بیش از 10% باشد. خطای بالای 10% فقط در گیج‌های بررسی فرم، مجاز است.

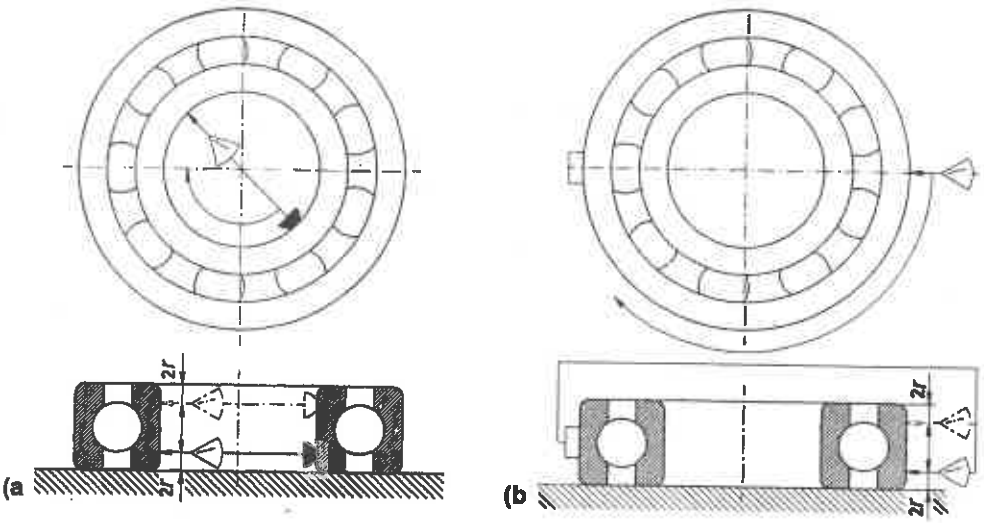
سطح مرجع

در رینگ‌ها و بیرینگ‌های متقارن، تلرانس‌ها باید نسبت به یکی از دو طرف رینگ‌ها، سنجیده شود. در رینگ‌های نامتقارن، طرفی که سطح پهن‌تری داشته باشد، سطح مرجع خواهد بود. در بعضی موارد، سطح مرجع توسط سازنده علامت‌گذاری می‌شود.

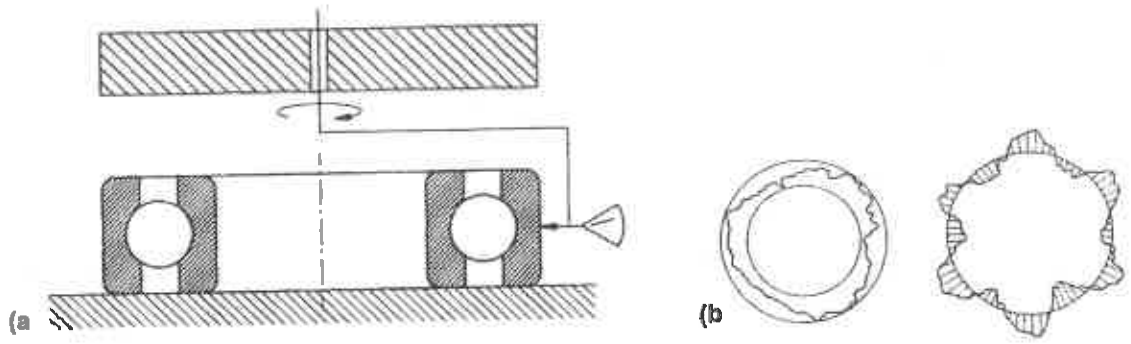
روش‌های اندازه‌گیری پارامترهای مختلف بیرینگ‌های غلتشی و قطعات آنها

روش‌های‌اندازه‌گیری بیرینگ‌های غلتشی، در استاندارد DIN 620 قسمت اول، تعیین شده‌اند. استاندارد نمودن این روش‌ها، احتمال به‌دست آمدن نتایج متفاوت ابعادی برای یک قطعه یا قطعات مشابه را که ناشی از کاربرد روش‌های متفاوت توسط سازندگان یا مصرف‌کنندگان است، از بین می‌برد. حال به شرح روش‌های اندازه‌گیری استاندارد می‌پردازیم.

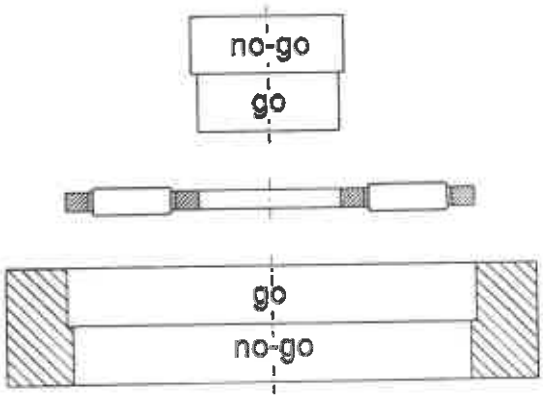
اندازه‌گیری قطر و بررسی گرد بودن (Roundness)



شکل ۱-۸۲ اندازه‌گیری دو نقطه‌ای قطر سوراخ داخل d و قطر خارجی D. قطعه مورد نظر با گیج بلوک‌ها یا تنظیم‌کننده‌های استاندارد، در موقعیت مورد نظر تنظیم می‌شود. قطر نامی در یک سطح تراز مورد اندازه‌گیری (D_{mP}, d_{mP})، با مقادیر حداقل و حداکثر قطر اندازه‌گیری شده در آن سطح تراز، محاسبه می‌شود. اختلاف قطر نامی (V_{DmP}, V_{dmP})، تفاوت بین حداقل و حداکثر قطرهای نامی به‌دست آمده در اندازه‌گیری‌های مشابه در سطوح تراز مختلف در راستای محوری، می‌باشد. سطوح تراز باید حداقل به میزان دو برابر شعاع گوشه رینگ (2r)، از لبه رینگ فاصله داشته باشند.



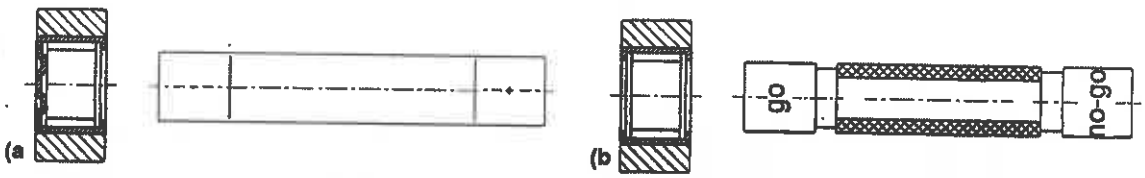
شکل ۱-۸۳ بررسی گرد بودن. نتایج قابل اطمینان در این سنجش، توسط تجهیزات مخصوص به‌دست می‌آید. (شکل‌های ۳-۹۳ و ۴-۹۴): a) انحراف‌های از گردی توسط اندازه‌گیری فواصل شعاعی نقاط مختلف سطح دایروی رینگ، b) انحراف‌های از گردی نشانداده شده نسبت به دایره مرجع



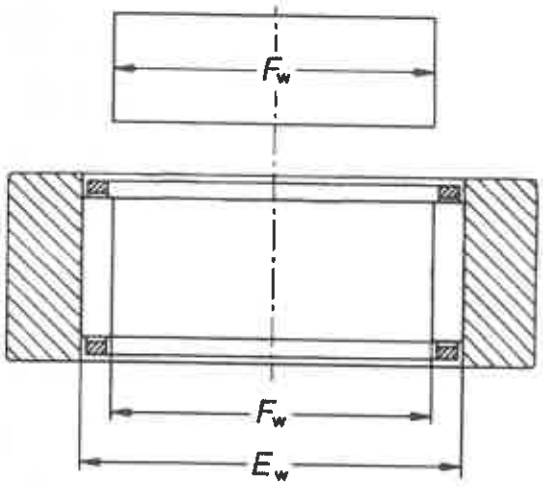
◀ شکل ۱-۸۴ اندازهٔ قطر خارجی و سوراخ داخل مجموعهٔ اجزاء غلتنده و واشرهای بیرینگ‌های کف گرد، توسط رینگ‌های سنجه و پلاگ گیج‌ها بررسی می‌شود. قطعاتی که انتهای پرو گیج بتوانند با نیرویی کمتر از 5 0 N کاملاً در آنها وارد شود، تأیید می‌شوند

اندازه‌گیری دایرهٔ پوشش‌دهنده محیط

شکل ۱-۸۵ قطر دایره پوشش‌دهنده محیط داخلی Fw رولربیرینگ‌های استوانه‌ای و رولربیرینگ‌های سوزنی، با رینگ خارجی ماشینکاری شده، به کمک یک پلاگ گیج مخروطی با نرخ افزایش قطری µm 2 به ازای هر 10 mm طول، اندازه‌گیری می‌شود.

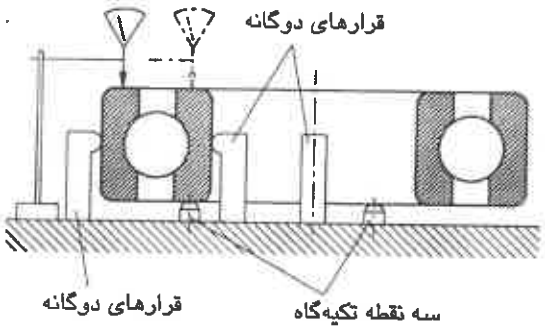


شکل ۱-۸۶ جهت‌اندازه‌گیری قطر دایره پوشش‌دهنده محیط داخلی رولربیرینگ‌های سوزنی دو سر باز یا یک سربسته، باید آنها را داخل یک رینگ سنجه پرس نماییم. سپس به دو روش زیر اندازه‌گیری را انجام می‌دهیم: a) با یک پلاگ گیج مخروطی با نرخ افزایش قطری 5 µm در هر 10 mm طول، یا با یک پلاگ گیج بدون شکاف، b) با یک پلاگ گیج برو نروی استوانه‌ای

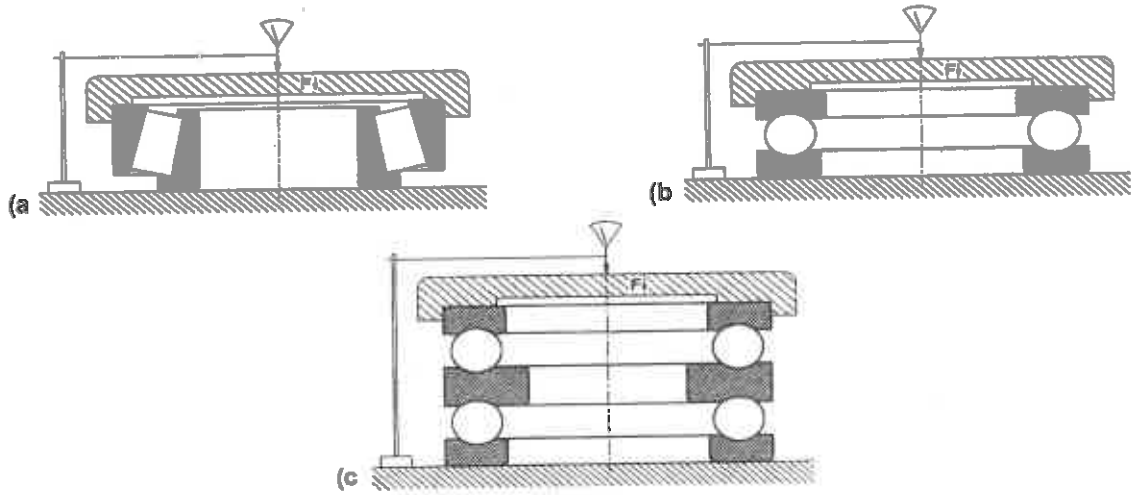


شکل ۱-۸۷ قطرهای دوایر پوشش‌دهنده محیط داخلی و بیرونی (F_w, E_w) مجموعه رولرهای استوانه‌ای یا رولرهای سوزنی مونتاژ شده در قفسه‌ها، با یک رینگ سنجه با قطری به اندازهٔ قطر نامی E_w به علاوه حد پایین محدوده تلرانسی G6، کنترل می‌شود. بعد از قرار گرفتن مجموعه در رینگ سنجه، قطر داخلی با یک پلاگ گیج با قطر نامی F_w کنترل می‌شود. قطعاتی تأیید می‌شوند که پلاگ گیج بتواند داخل مجموعه شود و در این حالت مجموعه بتواند بدون هیچگونه گیر دوران کند. قطر دایرهٔ پوشش‌دهنده محیط بیرینگ‌های بزرگتر، توسط تجهیزات مخصوص اندازه‌گیری این پارامتر اندازه‌گیری می‌شود، جهت اطلاعات بیشتر به بخش ۴-۵-۵ رجوع کنید

اندازه‌گیری پهنا و ارتفاع

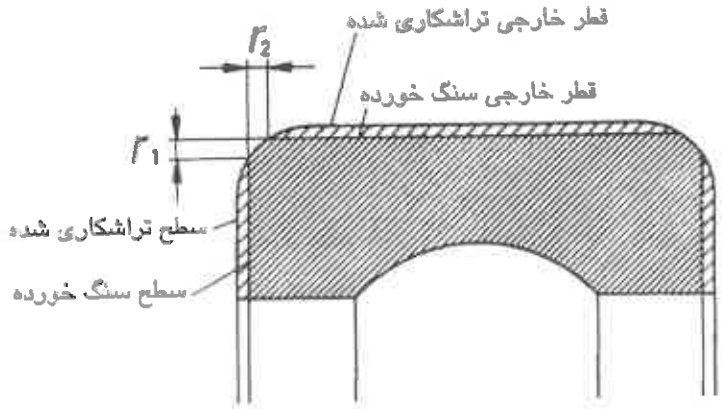


شکل ۱-۸۸ پهنای B یا C یک رینگ بیرینگ به کمک تجهیزات اندازه‌گیری با تماس دو نقطه‌ای، مطابق استاندارد DIN 879 قسمت اول یا DIN 32876 قسمت اول، تعیین می‌شود. بیرینگ روی تکیه‌گاه‌های سه گانه قرار گرفته و توسط قرارها موقعیت مرکزیش تنظیم می‌شود. باید نوک سوزن ابزار اندازه‌گیری، دقیقاً بر بالای تکیه‌گاه‌ها قرار گیرد. پس از صفرکردن ساعت اندیکاتور توسط یک گیج مادر، انحرافات مقادیر پهنا از مقادیر نامی (Δ_{Ts}, Δ_{Bs}) و اختلاف (V_{Ts}, V_{Bs})، هنگام چرخاندن رینگ، ثبت می‌شوند.

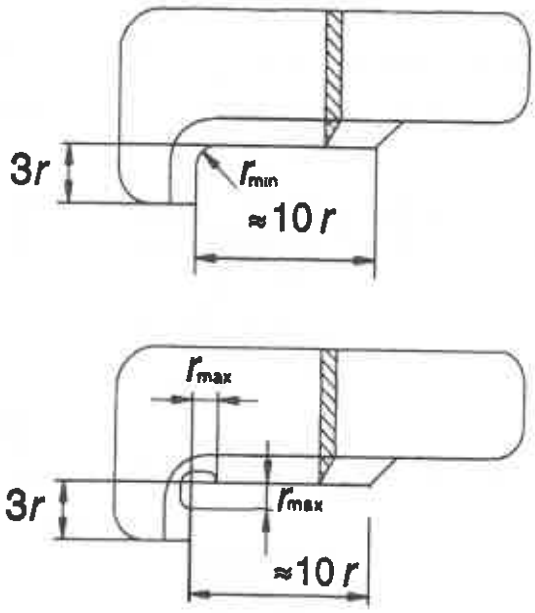


شکل ۱-۸۹ پهنای T رولربیرینگ‌های مخروطی و ارتفاع T بیرینگ‌های کف گرد، در راستای محور عمودی اندازه‌گیری می‌شود. ساعت اندیکاتور، توسط یک گیج مادر، روی پهنای نامی T تنظیم می‌شود. به بیرینگ‌ها باری معادل 50 ±5N (به غیر از وزن خود بیرینگ) وارد شده و قبل از اندازه‌گیری، چند بار چرخانده می‌شوند. رولرهای مخروطی رولربیرینگ‌های مخروطی، باید در این حالت به لبه بزرگ رینگ داخلی بچسبند. اندازهٔ واقعی Ts (اندازه‌گیری تک نقطه‌ای) در وضعیتی که بیرینگ تحت بار باشد، خوانده می‌شود: a) رولربیرینگ مخروطی، b) بلبیرینگ کف گرد، بلبیرینگ کف‌گرد دو طرفه

اندازه‌گیری شعاع لبه‌ها



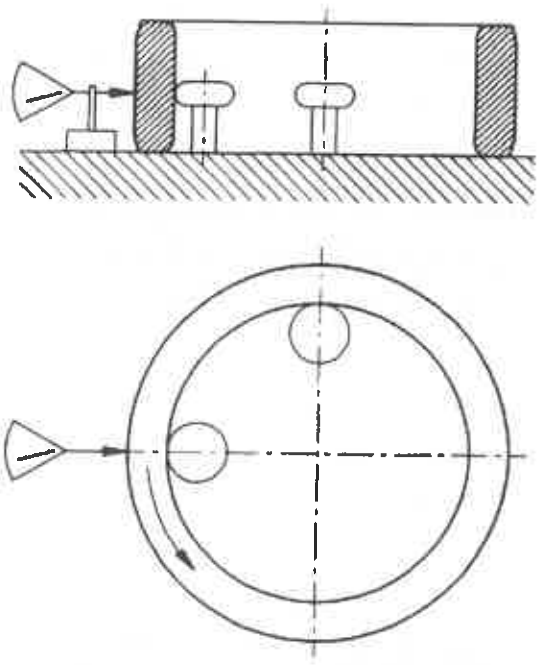
شکل ۱-۹۰ به دلایل مسائل ماشینکاری، پروفیل گوشه رینگ‌ها، نمی‌تواند دقیقاً ربعی از دایره باشد. طی عملیات سنگ‌زنی، بخشی از پخ دایروی ایجاد شده در مرحله تراشکاری، از بین خواهد رفت



شکل ۱-۹۱ اندازهٔ شعاع r با دو گیج فرم، که یکی از آنها یک گاه کوچک دارد، اندازه‌گیری می‌شود. می‌توان از اشکالات موضعی فرم گوشه صرف‌نظر کرد. حداکثر اندازه گوشه در جهت محوری، همواره بزرگتر از حداکثر اندازهٔ گوشه‌ها در جهت شعاعی می‌باشد

اندازه‌گیری دقت دورانی

دقت دورانی تعیین شده برای بیرینگ‌ها، در کلاس‌های دقت مختلف متفاوت است. لنگی شعاعی بیرینگ، که با چرخاندن رینگ داخلی سنجیده می‌شود، به تغییرات ضخامت دیواره رینگ داخلی K_i بستگی دارد و میزان این لنگی در حالتی که با چرخاندن رینگ خارجی سنجیده شود، به تغییرات ضخامت دیواره رینگ خارجی K_e بستگی دارد (ر.ک. به شکل ۱-۹۲).



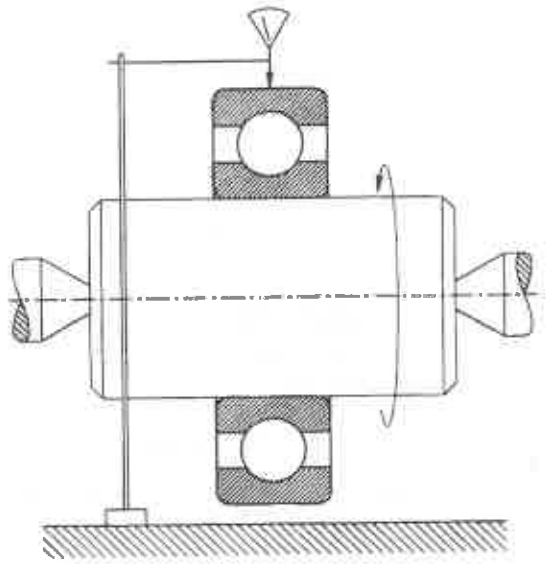
شکل ۱-۹۲ یک رینگ از انواع بیرینگ‌های قابل دمونتاژ که مقادیر تغییرات ضخامت دیواره آنها، یعنی K_i و K_e را می‌توان مستقیماً اندازه‌گیری کرد. این مقادیر مطابق استاندارد DIN 879 قسمت اول و یا DIN 32876، با دو قرار و اندازه‌گیری تک نقطه‌ای با ساعت اندیکاتور، اندازه‌گیری می‌شوند. تفاوت بین مقادیر حداکثر و حداقل اندازه‌گیری شده در یک دور دوران رینگ، تغییرات ضخامت دیوارهٔ K_i یا K_e خواهد بود.

قطر خارجی بیرینگ D (mm)	بار محوری لازم هنگام اندازه‌گیری F (N)
<50	35–45
50–80	70–90
80–180	110–130
180–250	135–165
>250	130–170

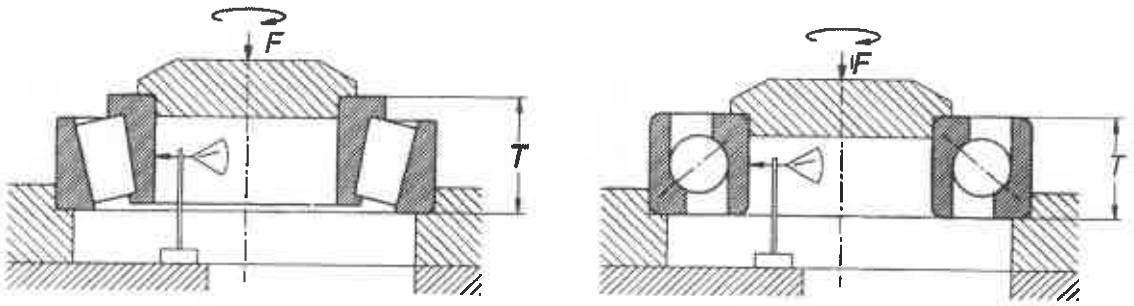
دربیرینگ‌های غیرقابل دمونتاژ و رولربیرینگ‌های مخروطی، لنگی‌های K_{ea}، K_{ia}، در حالت مونتاژ شده اندازه‌گیری می‌شوند (شکل ۱-۹۳). لنگی K_{ea} در بیرینگ شعاعی کامل، مشابه روشی که در شکل ۱-۹۳ نشانداده شده است، با چرخاندن رینگ خارجی اندازه‌گیری می‌شود. میزان لنگی، در دو دور دوران اندازه‌گیری می‌شود. در این‌حالت رینگ داخلی ثابت است. میزان اختلاف بین حداکثر و حداقل مقادیر اندازه‌گیری شده، لنگی عملی رینگ خارجی K_{ea} خواهد بود. برای اندازه‌گیری لنگی بیرینگ‌های خود تنظیم، رینگ قابل جابه‌جایی را باید در موقعیت مرکزی خود ثابت کرد.

قطر خارجی بلبیرینگ شیار عمیق D (mm)	بار محوری لازم هنگام اندازه‌گیری F (N)
<30	4–6
30–50	7–9
50–80	14–16
80–120	34–38
120–180	65–75
>180	130–150

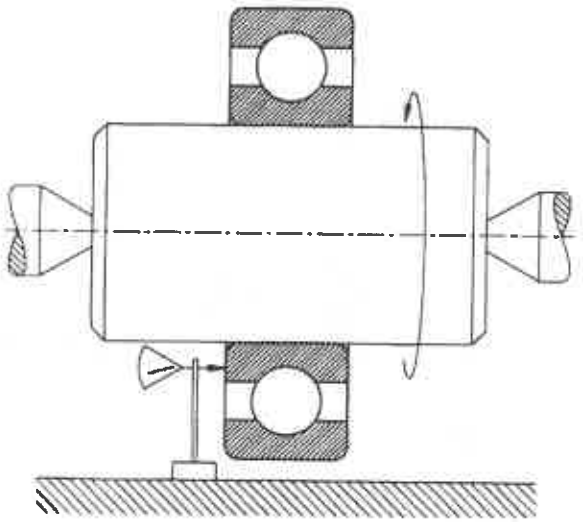
بعضی اوقات، نتایج اندازه‌گیری به‌دست آمده، مطابق روش اندازه‌گیری در شکل ۱-۹۵، بخوبی تکرارپذیر نیستند، زیرا رینگ‌های باریک، هنگام جازنی روی محور اندازه‌گیری تمایل به بیضی شدن دارند. با روش نشان داده شده در شکل ۱-۹۶، نتایج قابل اطمینان‌تری به‌دست می‌آید، در این روش، لنگی سطح طرفین بیرینگ، به‌صورت غیرمستقیم اندازه‌گیری می‌شوند.



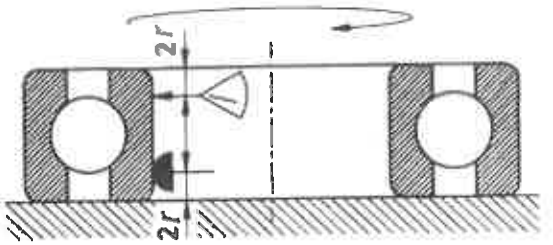
شکل ۱-۹۳ جهت اندازه‌گیری لنگی K_{ia} یک بیرینگ شعاعی کامل، در شکل ۱-۹۴ روش اندازه‌گیری مربوط به رولربیرینگ‌های مخروطی و بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای یک ردیفه نشانداده شده است. ابتدا آن را روی یک پلاگ گیج مخروطی با نرخ افزایش قطری 0.01–0.02 mm به ازای 100 mm در راستای طولی، مونتاژ کرده و پلاگ گیج را بین دو مرغک قرار می‌دهند، سپس با چرخاندن رینگ داخلی، در وضعیتی که رینگ خارجی ثابت است، میزان لنگی ایجاد شده در رینگ خارجی اندازه‌گیری می‌شود. تفاوت بین مقادیر حداکثر و حداقل ثبت شده در دو دور دوران رینگ داخلی، لنگی عملی رینگ داخلی K_{ia} خواهد بود



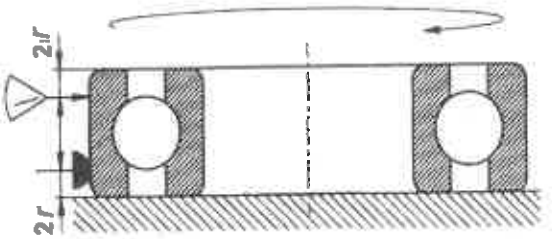
شکل ۱-۹۴ لنگی K_{ia} در رولربیرینگ‌های مخروطی و بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای یک ردیفه، با قراردادن بیرینگ روی سطحی عمود بر محور آن اندازه‌گیری می‌شود. پس از قرار دادن بیرینگ در سطح عمود بر محور بار محوری مخصوص اندازه‌گیری F (میزان این نیرو در جدول آمده است) از مرکز بر رینگ داخلی اعمال می‌شود. سپس، رینگ آنقدر چرخانده می‌شود تا تمام رولرها به لبه بزرگ نگهدارنده رینگ داخلی بچسبد. در این وضعیت، نوک سوزن ساعت اندیکاتور، روی مرکز سطح داخلی رینگ داخلی قرار گرفته و مقادیر تغییرات طی دو دور دوران رینگ، ثبت می‌شوند. تفاوت بین مقادیر حداقل و حداکثر، لنگی عملی K_{ia} می‌باشد



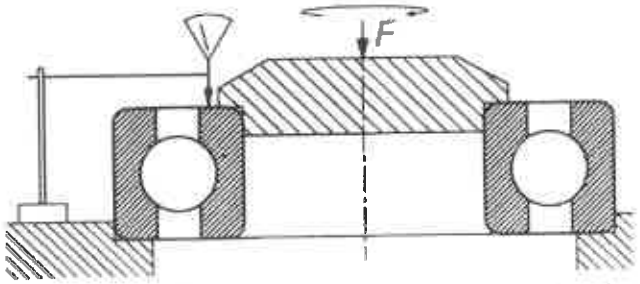
شکل ۱-۹۵ لنگی دو طرف بیرینگ، S_d، نسبت به دوران رینگ داخلی از ناحیه سوراخ داخلی، با مونتاژ آن روی پلاگ گیج مخروطی با نرخ افزایش قطری 0.02 mm – 0.01 به ازای 100 mm طول، و قرار دادن پلاگ گیج بین دومرغک، اندازه‌گیری می‌شود. باید بیرینگ را از طرفی روی پلاگ گیج جا زد که بخش بیشتری از آن در بیرینگ وارد شود. ساعت اندیکاتور نیز روی سطح جانبی بیرینگ قرار می‌گیرد. تفاوت بین مقادیر حداقل و حداکثر اندازه‌گیری شده طی یک دور دوران رینگ، مقدار عملی لنگی S_d خواهد بود



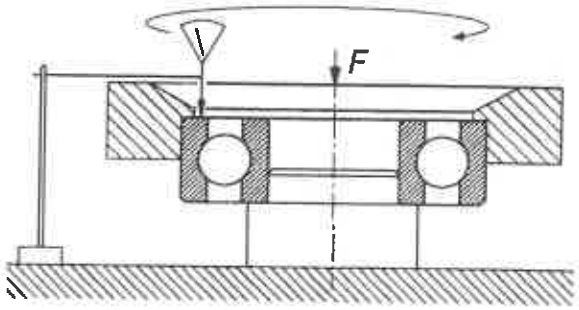
شکل ۱-۹۶ اندازه‌گیری تغییرات انحرافات خطوط مولد سوراخ داخل (S_{dt}) به کمک سطح مرجع (انحرافات سوراخ داخل). برای اندازه‌گیری، بیرینگ را از طرف سطح جانبی مرجع روی ابزاراندازه‌گیری قرار می‌دهیم. رینگ داخلی به کمک دو قرار با فاصله زاویه‌ای 90°، در مرکز قرار می‌گیرد (شکل ۱-۱۰۰). این قرارها از فاصله دو برابر شعاع گوشه‌رینگ (2r) به سطح سوراخ داخل تماس پیدا می‌کند. نوک سوزن ساعت اندیکاتور نیز با فاصله 2r از لبه بالای رینگ و دقیقاً بالای محل تماس قرار، به سطح داخل تماس دارد. اختلاف بین مقادیر حداکثر و حداقل اندازه‌گیری شده طی یک دور دوران رینگ، مقدار عملی انحراف سوراخ داخل S_{dt} خواهد بود (مقدار S_d مجاز > مقدار S_{dt} مجاز)



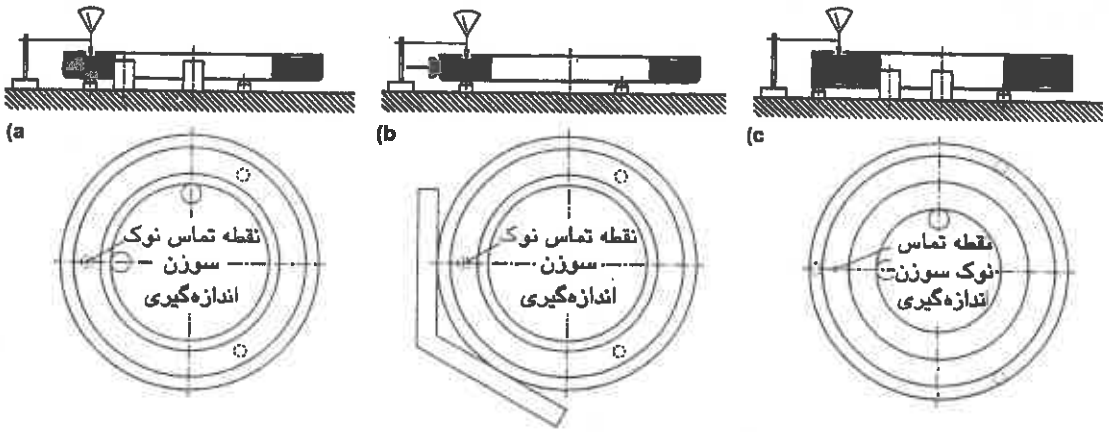
شکل ۱-۹۷ اندازه‌گیری تغییرات انحرافات خطوط مولد سطح قطر خارجی به کمک سطح مرجع (انحراف سطح خارجی). جهت اندازه‌گیری، رینگ خارجی را از طرف سطح مرجع، روی ابزار اندازه‌گیری قرار می‌دهیم. با دو قرار که با زاویه 90° نسبت به هم قرار گرفته‌اند، رینگ خارجی در مرکز نگه داشته می‌شود. محل تماس قرارها با رینگ، در فاصله دو برابر شعاع پخ لبه (2r) از لبه پایین می‌باشد. نوک سوزن ساعت اندیکاتور نیز در فاصله دو برابر شعاع پخ از لبه بالا و درست در بالای محل تماس قرار، تنظیم می‌شود. اختلاف بین مقادیر حداکثر و حداقل ثبت شده طی یک دور دوران رینگ، مقدار عملی S_D خواهد بود



شکل ۱-۹۸ اندازه‌گیری لنگی سطح جانبی رینگ داخلی نسبت به سطح تماس داخلی (S_{ia}) در یک بلبیرینگ شیار عمیق، بلبیرینگ با تماس زاویه‌ای یا رولربیرینگ مخروطی. جهت اندازه‌گیری S_{ia}، بار F را از مرکز به رینگ داخلی، اعمال می‌کنیم (مقادیر F برای بلبیرینگ‌های شیار عمیق در جدول پایین صفحه ۶۸ آمده است و مقادیر F برای بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای و رولربیرینگ‌های مخروطی نیز در جدول بالایی صفحه ۶۸ که مربوط به شکل ۱-۹۴ است، آمده است). در مورد رولربیرینگ‌های مخروطی، باید رینگ داخلی را آنقدر بهرخانیم تا رولرها به لبه بزرگ رینگ داخلی بچسبند. نوک سوزن ساعت اندیکاتور باید در مرکز ضخامت سطح جانبی بالایی رینگ داخلی تنظیم شود. ثبت مقادیر باید طی دو دور دوران رینگ داخلی تحت بار، انجام شود. اختلاف بین مقادیر حداکثر و حداقل ثبت شده، مقدار عملی S_{ia} خواهد بود



شکل ۱-۹۹ اندازه‌گیری لنگی سطح جانبی رینگ خارجی نسبت به سطح تماس داخلی (S_{ea}) بلبیرینگ شیار عمیق، بلبیرینگ با تماس زاویه‌ای یک ردیفه یا رولربیرینگ مخروطی. برای اندازه‌گیری S_{ea}، به رینگ خارجی، بار مرکزی F وارد می‌شود (میزان بار F برای بلبیرینگ‌های شیار عمیق در جدول پایین صفحه ۶۸ و برای بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای و رولربیرینگ‌های مخروطی در جدول بالای صفحه ۶۸ که مربوط به شکل ۱-۹۴ است آمده است). در مورد رولربیرینگ‌های مخروطی، باید رینگ خارجی را آنقدر بچرخانیم تا تمام رولرها به لبه بزرگ رینگ داخلی بچسبند. نوک سوزن ساعت اندیکاتور نیز باید در مرکز ضخامت سطح جانبی رینگ خارجی تنظیم شود. اختلاف مقادیر حداکثر و حداقل اندازه‌گیری شده طی دو دور دوران رینگ تحت بار F، مقدار عملی S_{ea} خواهد بود



شکل ۱-۱۰۰ دقت دورانی بیرینگ‌های غلتشی کف گرد، به میزان اختلاف ضخامت سطح تماس در واشرها (S_i برای واشرهای شفت و S_e برای واشرهای نشیمنگاه) بستگی دارد (جدول ۳-۳). جهت اندازه‌گیری این پارامتر، سطح صاف واشر روی تکیه‌گاه‌های سه نقطه‌ای قرار می‌گیرد. واشرهای شفت با دو قرار از داخل سوراخ و واشرهای نشیمنگاه با یک V بلوک از سطح خارجی واشر، در مرکز نگه داشته می‌شوند. دو نقطهٔ تماس قرارها، 90° با هم زاویه دارند. نقطه تماس نوک سوزن ساعت اندیکاتور باید بالا یا هم راستای یکی از تکیه‌گاه‌ها باشد. در مورد واشرهایی که در هر دو طرف شیار دارند، تکیه‌گاه‌ها نزدیک لبه رینگ قرار دارند : **a)** واشر شفت یک بلبیرینگ کف‌گرد یک طرفه، **b)** واشر نشیمنگاه یک بلبیرینگ کف‌گرد یک طرفه، **c)** واشر شفت یک بلبیرینگ کف‌گرد دو طرفه

۱-۵ لقی بیرینگ

لقی بیرینگ عبارت است از میزان جابه‌جایی یک رینگ نسبت به دیگری در راستای شعاعی (لقی شعاعی) یا در راستای محوری (لقی محوری). لقی بیرینگ در حالت مونتاژ نشده، یا لقی در حالت مونتاژ شده در نشیمنگاه و در درجه حرارت کاری (لقی در حال کارکرد)، متفاوت است. برای دوران دقیق، اصولاً باید بیرینگ مونتاژ شده و در درجه حرارت‌کاری، لقی شعاعی خیلی کمی داشته باشد.

البته لقی شعاعی بیرینگ مونتاژ نشده باید بیشتر باشد، زیرا این میزان هنگام پرسی جازدن بیرینگ در نشیمنگاه کاهش خواهد یافت.

همچنین هنگام کار بیرینگ، به خاطر اختلاف انبساط حرارتی رینگ‌ها، لقی شعاعی باز هم کمتر خواهد شد. معمولاً شرایط خنک‌کاری نامطلوب باعث می‌شود رینگ داخلی گرم‌تر از رینگ خارجی باشد (ر.ک. به بخش ۳-۹). استاندارد DIN 620 قسمت چهارم گروه‌های متفاوتی را برای شرایط کاری متفاوت تعیین کرده است. گروه‌های لقی شعاعی با پسوندهایی که از حرف C و یک عدد (جدول ۱-۱۱) تشکیل شده است، مشخص می‌شوند. در گروه لقی شعاعی CN ، "Normal" یا گروه لقی عادی (C0)، پسوندی به شماره سریال بیرینگ اضافه نمی‌شود. بیرینگ‌هایی با لقی معمولی، در شرایط حرارتی معمولی و با تلرانس‌های جازنی عمومی به‌کار می‌روند (جدول ۱-۱۲).

در مورد نحوه برگزیدن گروه‌های لقی مختلف برای مصارف دیگر در بخش ۳-۹ توضیح داده شده است. اگر رینگ‌های قابل تعویض رولربیرینگ‌های استوانه‌ای و رولربیرینگ‌های سوزنی را با رینگ‌هایی با گروه لقی مشابه تعویض نماییم، لقی شعاعی بیرینگ‌ها تغییری نخواهد داشت. ولی یک استثناء وجود دارد : در رولربیرینگ‌های استوانه‌ای با کلاس تلرانسی SP و گروه لقی شعاعی C1 مورد استفاده در ماشین‌های ابزار، این مسئله صدق *نمی‌کند*.

در کاتالوگ‌های سازندگان بیرینگ‌های غلتشی، گروه‌های لقی شعاعی و محوری برای طرح‌های مختلف بیرینگ‌ها، موجود است. گروه‌های لقی محوری برای بیرینگ‌های با تماس چهار نقطه‌ای و بلبیرینگ‌های با

جدول ۱-۱۱ گروه‌های لقی شعاعی بیرینگ‌های غلتشی مونتاژ نشده

ویژگی	پسوند
کوچک‌تر از C2	C1
کوچک‌تر از میزان عادی	C2
لقی عادی، معمولاً بدون پسوند است	CN (C0)
بزرگ‌تر از لقی عادی	C3
بزرگ‌تر از C3	C4

جدول ۱-۱۲ تلرانس‌های انطباقی و شرایط کاری معمول[a]

نشیمنگاه	شفت	نوع
J6	j5 تا k5	بلبیرینگ‌ها
K6	k5 تا m5	رولربیرینگ‌ها و رولربیرینگ‌های سوزنی

a لقی معمولی CN به نحوی محاسبه می‌شود که پس از جازدن بیرینگ مطابق تلرانس انطباقی مربوطه و تحت شرایط کاری معمول، لقی شعاعی مناسب ایجاد شود.

تماس زاویه‌ای دو ردیفه ارائه می‌شود زیرا این بیرینگ‌ها برای مهار حرکت محوری در دو جهت به‌کار می‌روند و باید مطابق گروه لقی محوری مناسب انتخاب شوند.

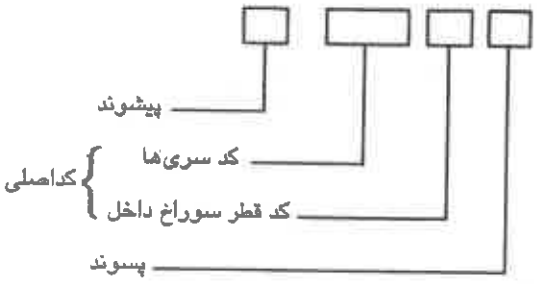
۱-۶ کدهای فنی بیرینگ‌های غلتشی

هر بیرینگ غلتشی مطابق یک کد فنی طراحی شده است که با آن کد نوع ساختار، ابعاد، تلرانس‌ها، لقی و بعضی اوقات مشخصه‌های بیشتری مشخص می‌شوند. بیرینگ‌هایی که کدهای استاندارد مشابه داشته باشند را می‌توان به جای همدیگر به‌کار برد، البته بیرینگ‌های قابل انفصال که معمولاً از امکان عوض کردن قطعات آنها با دیگر قطعات محصول سازنده دیگر مطمئن نیستیم، از این قاعده مستثنی هستند. در کشور آلمان، کد فنی بیرینگ‌ها مطابق استاندارد DIN 623، استاندارد شده‌اند ولی بسیاری از کشورهای دیگر نیز از کدهای یکسان استفاده می‌کنند.

شکل ۱-۱۰۱ ساختار تشکیل‌دهنده کدهای فنی بیرینگ غلتشی را نشان می‌دهد. کد اصلی، متشکل از شماره سری‌ها و کد قطر سوراخ داخل است. معمولاً پیشوند نشاندهنده قطعات اصلی بوده و همچنین در بعضی موارد نشاندهنده طرح‌های ویژه و مشخصه‌های آنها می‌باشد.

کدهای مربوط به سری‌های مختلف بیرینگ

کدهای سری‌های مختلف بیرینگ، از اعداد، حروف و یا از هر دوی آنها تشکیل شده است. این کدها نشان‌دهنده ساختار بیرینگ، سری قطری و در اکثر موارد نشاندهنده سری پهنا نیز می‌باشد (جدول ۱-۱۳).



شکل ۱-۱۰۱ ساختار کدهای فنی بیرینگ‌های غلتشی

کدهای مربوط به قطر سوراخ داخل d

قطر سوراخ داخل مطابق شماره سوراخ داخل محاسبه می‌شود. در تمام بیرینگ‌های غلتشی به استثنای بیرینگ‌های کف گرد دو طرفه، شماره سوراخ داخل برای قطرهای داخلی d = 20 mm تا d = 480 mm از تقسیم قطر سوراخ بر عدد پنج به‌دست می‌آید. برای مثال، شماره سوراخ داخل برای قطر سوراخ داخل 360 mm، 72 = 5\360، عدد 72 خواهد بود. برای سوراخ‌های داخلی از قطر 10 mm تا 17 mm به شکل زیر خواهد بود :

برای d = 10 mm، شماره سوراخ داخل 00
برای d = 15 mm، شماره سوراخ داخل 02
برای d = 12 mm، شماره سوراخ داخل 01
برای d = 17 mm، شماره سوراخ داخل 03

از قطر d = 500 mm به بالا، کدی به قطر سوراخ داخل تعلق نمی‌گیرد و خود اندازه به همراه یک ممیز، به‌عنوان شماره سوراخ داخل در کد فنی به‌کار می‌رود. مثلاً برای قطر سوراخ داخل d = 670، شماره سوراخ داخل برابر است با 670/. در بیرینگ‌های مغناطیسی نیز از قطر نامی سوراخ داخل به‌عنوان شماره سوراخ داخل استفاده می‌شود.

جدول ۱-۱۳ لیست کدهای سری‌های مهم بیرینگ‌ها

نوع بیرینگ	کدهای مربوطه
بلبیرینگ شیار عمیق	42; 43; 60; 62; 63; 64; 160
بلبیرینگ با تماس زاویه‌ای	32; 33; 72; 73; 173; QJ2; QJ3
بلبیرینگ خود تنظیم	12; 13; 22; 23; 112; 113
بیرینگ مغناطیسی	BO; E; L; M
رولربیرینگ استوانه‌ای	N2; N3; N4; NJ2; NJ3; NJ4; NJ22; NJ23; NU2; NU3; NU4; NU10; NU22; NU23; NUP2; NUP3; NUP4; NUP22; NUP23; NN30; NNU49; CF29; NCF30; NNC48; NNC49
رولربیرینگ سوزنی	K; HK; BK; NKJ; NA48; NA49; NA69; NAO; STO; NA22; NATR; NUTR; KR; NUKR
ترکیب رولربیرینگ سوزنی با بلبیرینگ با تماس زاویه‌ای	NJA59; DNJB59; NKJA59; NKJB59
ترکیب رولربیرینگ سوزنی با بلبیرینگ کف‌گرد و رولربیرینگ سوزنی مرکب با رولربیرینگ استوانه‌ای کف گرد	NAXK; NAXR
رولربیرینگ مخروطی	302; 303; 313; 320; 322; 323; 329; 330; 331; 332
رولربیرینگ بشکه‌ای	202; 203; 204
رولربیرینگ کروی	213; 222; 223; 230; 231; 232; 233; 239; 240; 241
بلبیرینگ کف گرد	511; 512; 513; 514; 532; 533; 534; 522; 523; 524; 542; 543; 544
بلبیرینگ با تماس زاویه‌ای کف گرد یک طرفه	7602; 7603
بلبیرینگ با تماس زاویه‌ای کف گرد دوطرفه	2344; 2347
رولربیرینگ کروی کف گرد	292; 293; 294
رولربیرینگ استوانه‌ای کف گرد	811; 812
رولربیرینگ سوزنی کف گرد	AXK

کدهای اصلی

کدهای بیرینگی که فقط شامل کد اصلی بدون پیشوند و پسوند باشند، نشان‌دهنده بیرینگ‌های عادی با شکل عادی و دقت دورانی و لقی شعاعی عادی است. انحرافات از ساختار عادی توسط پیشوندها و پسوندها مشخص می‌شوند (جدول ۱-۱۴).

جدول ۱-۱۴ مثال‌هایی از کدهای اصلی

3315	شماره سوراخ داخل
	قطر سوراخ داخل d = 15 × 5 = 75
	سری‌های بیرینگ 33
	بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای یک ردیفه
	سری‌های پهنا 3
	سری‌های قطری 3
6203	شماره سوراخ داخل
	قطر سوراخ داخل d = 17 mm
	سری‌های بیرینگ 62
	بلبیرینگ شیار عمیق
	سری‌های پهنا 0
	سری‌های قطری 2
NU2314	شماره سوراخ داخل
	قطر سوراخ داخل d = 14 × 5 = 70 mm
	سری‌های بیرینگ NU23
	رولربیرینگ استوانه‌ای با دو لبه در رینگ خارجی
	سری‌های پهنا 2
	سری‌های ارتفاع 1
2201	شماره سوراخ داخل
	قطر سوراخ داخل d = 12 mm
	سری‌های بیرینگ 22
	بلبیرینگ‌های خود تنظیم
	سری‌های پهنا 2
	سری‌های قطری 2
51268	شماره سوراخ داخل
	قطر سوراخ داخل d = 68 × 5 = 340 mm
	سری‌های بیرینگ 512
	بلبیرینگ کف‌گرد
	سری‌های ارتفاع 1
	سری‌های قطری 2
239\800	شماره سوراخ داخل
	قطر سوراخ داخل d= 800 mm
	سری‌های بیرینگ 239
	رولربیرینگ کروی
	سری‌های پهنا 3
	سری‌های قطری 9

پیشوندها

پیشوندهای مربوط به قطعات اصلی بیرینگ عبارتند از :

R رینگ یک رولربیرینگ استوانه‌ای یا مخروطی با اجزاء غلتنده و قفسه ولی بدون رینگ قابل تفکیک،

WS واشر شفت یک بیرینگ کف‌گرد (به استثنای بلبرینگ‌های کف‌گرد)،

GS واشر نشیمنگاه یک بیرینگ کف‌گرد (به استثنای بلبرینگ‌های کف‌گرد) و

K قفسه با اجزاء غلتنده.

پیشوندهای دیگر در کاتالوگ‌های بیرینگ‌های غلتشی موجود می‌باشند.

پسوندها

پسوندها نشاندهنده طرح‌های ویژه فرم خارجی، حلقه آب‌بندی، قفسه، دقت ابعادی، دقت فرم قطعات، دقت دورانی، لقی بیرینگ و دیگر پارامترها مثل تولید صدا یا عملیات حرارتی انجام شده هستند. تعداد پسوندها بسیار زیاد هستند، بنابراین، در اینجا فقط به پسوندهای بسیار

مهم و عمومی اشاره می‌شود. اکثر آنها فقط جهت تعیین نوع طراحی بیرینگ به‌کار می‌روند، با ترکیب کدهای اصلی و پسوندها، می‌توان به ترکیب‌های بسیار زیادی رسید ولی تنها تعداد کمی از این ترکیبات در بیرینگ‌های تجاری به‌کار می‌روند.

پسوندهای طرح‌های داخلی بیرینگ‌ها

A، B، C، D این پسوندها مربوط به ویژگی‌های خاص طرح داخلی بیرینگ هستند.

مثال : کد 7206B نشان‌دهنده یک بلبیرینگ با تماس زاویه‌ای با زاویه تماس 40° است.

E بیرینگ‌های با ظرفیت تحمل بار بالاتر از استاندارد

UA طرح عمومی بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای یک ردیفه

UO حروف A، O، L به میزان لقی یا بار اولیه بیرینگ بستگی دارند.

UL UA = بار اولیه محوری بالا، UO = بدون لقی و UL = بار اولیه سبک

پسوندهای ابعاد و فرم سطوح خارجی

X بیرینگ‌هایی که ابعاد خارجی‌شان مطابق استاندارد بین‌المللی باشد : این علامت فقط در دوره تغییر ابعادی بیرینگ استفاده می‌شود

K بیرینگ‌های با سوراخ داخلی مخروطی با شیب مخروط 1 به 12

N بیرینگ‌های با شیار حلقوی در رینگ خارجی

NR بیرینگ‌های با شیار حلقوی و حلقه ضامن

U بلبیرینگ‌های کف‌گرد با واشر نشیمنگاه با سطح کروی و واشر تکیه‌گاه

پسوندهای حلقه‌های آب‌بند

ZR, 2ZR بیرینگ‌های با یک یا دو حفاظ فلزی

RSR, 2RSR بیرینگ‌های با یک یا دو حلقه آب‌بند

پسوندهای جنس مواد قفسه

J قفسه فولادی پرسکاری شده

Y قفسه برنجی پرسکاری شده

M قفسه برنجی ماشینکاری شده

F قفسه فولادی ماشینکاری شده

L قفسه از آلیاژهای سبک ماشینکاری شده

T, TV قفسه‌های یکپارچه از رزین فنولی تقویت شده با الیاف نخی یا پلی‌آمید تقویت شده با الیاف شیشه

پسوندهای ابعادی و دقت دورانی

PN(P0) کلاس تلرانسی عادی (معمولاً به‌کار نمی‌رود)

P6 تلرانس بسته‌تر از P0

P5 تلرانس بسته‌تر از P6

P4 تلرانس بسته‌تر از P5

P2 تلرانس بسته‌تر از P4

پسوندهای لقی بیرینگ

C1 لقی کمتر از C2

C2 لقی کمتر از میزان عادی

CN(C0) لقی عادی (معمولاً به کار نمی‌رود)

C3 لقی بیشتر از میزان عادی

C4 لقی بیشتر از C3

C5 لقی بیشتر از C4

پسوندهای مرکب دقت دورانی و لقی بیرینگ

برای بیرینگ‌هایی که دقت دورانی بالا و لقی کمتر یا بیشتر از حد عادی داشته باشند، پسوندهای ذکر شده در بالا، با هم ترکیب می‌شوند برای مثال :

P63 = P6 + C3 = کلاس تلرانسی P6 + لقی بیرینگ C3

پسوندهای بیرینگ‌های با ثبات‌ابعادی

SN رینگ‌های داخلی و خارجی با ثبات ابعادی برای دمای کاری تا 120 °C (معمولاً به‌کار نمی‌رود)

S0 رینگ‌های داخلی و خارجی با ثبات ابعادی برای دمای کاری تا 150 °C

S0B رینگ داخلی با ثبات ابعادی برای دمای کاری تا 150 °C (معمولاً به‌کار نمی‌رود)

S1 رینگ‌های داخلی و خارجی با ثبات ابعادی برای دمای کاری تا 200 °C

C2 رینگ‌های داخلی و خارجی با ثبات ابعادی برای دمای کاری تا 250 °C

S3 رینگ‌های داخلی و خارجی با ثبات ابعادی برای دمای کاری تا 300 °C

S4 رینگ‌های داخلی و خارجی با ثبات ابعادی برای دمای کاری تا 350 °C

برای آشنایی با پسوندهای بیشتر به کاتالوگ‌های بیرینگ‌های غلتشی مراجعه کنید.

فصل ۲

اصطکاک، دما و روانکاری

اصطکاک کم و عموماً نیاز به روانکاری محدود و کم، دو مزیت مهم بیرینگ‌های غلتشی هستند. شرایط اصطکاک متغیر است. هرچند در طرح‌های خاص، در کنار اصطکاک تماس غلتشی، درجات متغیری از اصطکاک‌های تماسی لغزشی نیز وجود دارد. اصطکاک روانکار نیز در بیرینگ‌ها مطرح است. لازم به ذکر است حرارت ناشی از اصطکاک در دمای کاری یک مجموعه بیرینگ تأثیر می‌گذارد. در بیرینگ‌های غلتشی، مشابه بیرینگ‌های دیگر، عملکرد اصلی روانکاری، جلوگیری یا کاهش تماس فلز به فلز بین سطوح در حرکت غلتشی یا لغزشی است، که درنتیجه اصطکاک و سایش به حداقل خواهد رسید. همچنین، روانکاری باید بیرینگ را از خوردگی محافظت کند و در بعضی اوقات باعث خنک‌کاری و پخش حرارت شود.

۲-۱ اصطکاک

مقاومت در مقابل دوران یک بیرینگ غلتشی، ترکیبی است از اصطکاک‌های غلتشی و لغزشی و اصطکاک روانکار. اصطکاک غلتشی زمانی به وجود می‌آید که اجزاء غلتنده روی سطح تماس رینگ‌ها بغلتند. اصطکاک لغزشی در سطوح مهارکنندهٔ اجزاء غلتنده در قفسه‌ها و در محل تماس پیشانی رولرها با سطح لبه‌ها در رینگ‌های رولربیرینگ‌ها به وجود می‌آید. اصطکاک داخلی روانکار بین سطوح در تماس همچنین تأثیر به هم خوردن و کارکرد روانکار است. طرح داخلی برخی بیرینگ‌های خاص، با درنظر گرفتن ضرایب اصطکاک متغیر طراحی شده‌اند.

مقاومت کل دورانی بیرینگ‌های غلتشی، در مقایسه با نیروی انتقالی بسیار ناچیز است، بنابراین معمولاً در طراحی ماشین نیازی به در نظر گرفتن تلفات اصطکاکی نمی‌باشد. هرچند، اصطکاک تعیین‌کنندهٔ میزان حرارت تولید شده در بیرینگ است و توسط آن دمای کاری قطعات و روانکار تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

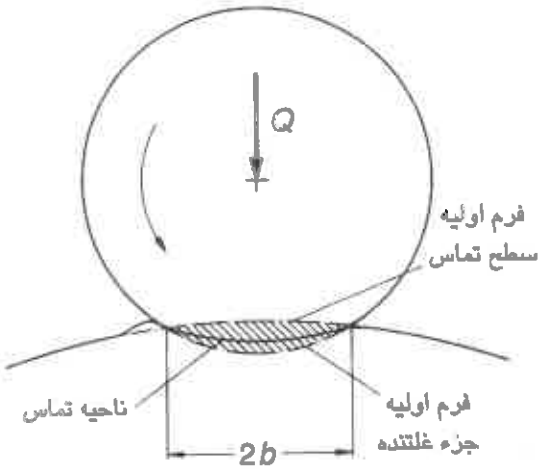
۲-۱-۱ اصطکاک تماس غلتشی

اصطکاک تماس غلتشی در یک بیرینگ غلتشی تحت بار، بین اجزاء غلتنده و سطوح تماس رینگ‌ها، یک پدیدهٔ مرکب از چند جزء می‌باشد، بخشی ناشی از پسماند الاستیک و قسمتی از آن مقاومت‌های لغزشی به هم پیوسته هستند. در شکل ۲-۱ چگونگی تماس بین یک جزء غلتنده و سطح تماس نشان داده شده است. هر دوی آنها در سطح تماسی با پهنای 2b تغییر شکل می‌دهند، در جزء غلتنده فرورفتگی ایجاد شده و سطح تماس کش می‌آید. تغییر شکل‌های مختلف، باعث حرکت لغزشی هنگام دوران غلتشی می‌شوند که این امر باعث تولید اصطکاک می‌شود.

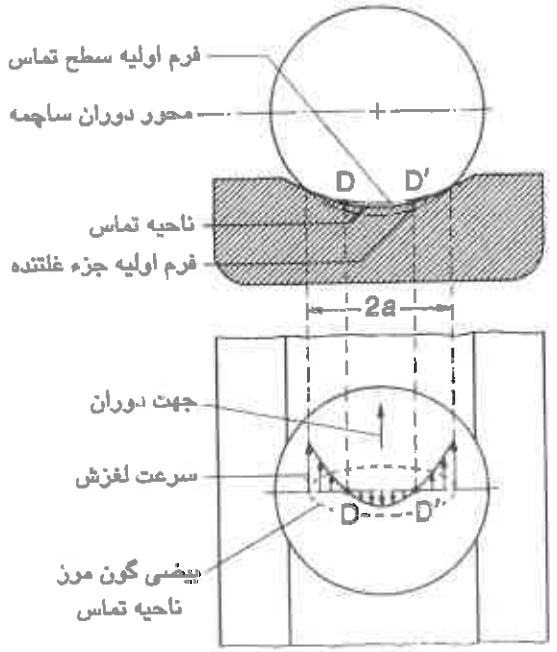
اگر جزء غلتنده داخل یک شیار در حال غلتش باشد و منحنی منطقه تماس نسبت به راستای دوران به‌صورت عرضی باشد، حرکات لغزشی دیگری نیز به وجود می‌آیند (شکل ۲-۲). از آنجاییکه فاصله محور دوران ساچمه تا نقاط مختلف ناحیه تماس متفاوت است، سرعت نقاط کنار هم در پیرامون ساچمه نیز متفاوت است.

از این رو، سطح بخش وسطی ساچمه در خلاف جهت غلتش، حرکت لغزشی دارد و در بخش‌های بیرونی، در جهت غلتش حرکت لغزشی به وجود می‌آید. در نقاط D و D' هیچگونه لغزشی به وجود نمی‌آید. حرکت لغزشی و اصطکاک ناشی از آن بین جزء غلتنده و پروفیل سطح تماس با رشد ضریب انجنا و بار اعمالی، افزایش می‌یابد.

بخش مهم دیگری از اصطکاک غلتشی ناشی از پسماند ماده است. هنگام حرکت غلتشی در راستای محیط (شکل ۲-۱)، مقاطع حاوی جزء غلتنده تغییر شکل می‌دهند.



شکل ۲-۱ تغییر شکل یک جزء غلتنده در حال دوران و سطح تماس مربوطه



شکل ۲-۲ حرکات لغزشی ناشی از فرم انحنایی ناحیه تماس

فقط بخشی از انرژی موردنیاز برای این تغییر شکل، توسط انرژی آزاد شده از بازگشت مقطع تغییر شکل یافته به فرم قبلی در پشت جزء غلتنده که آن را به جلو فشار می‌دهد، تأمین می‌شود. مابقی انرژی مورد مصرف به انرژی تبدیل می‌شود. در بیرینگ‌های با زاویه $\alpha > 0°$ (بلبرینگ‌های تحت بار محوری، رولربیرینگ‌های مخروطی) اصطکاک چرخشی را باید به این اثرات اصطکاکی اضافه کرد. این اصطکاک همراه با حرکت‌های لغزشی ناشی از چرخش جزء غلتنده حول خط عمود بر سطح تماس می‌باشد.

به مجموعهٔ انواع این مقاومت‌ها، اصطکاک تماس غلتشی گفته می‌شود. دانشمندان بسیاری تلاش‌های زیادی نموده‌اند تا بتوانند با روش‌های ریاضی سهم هر کدام از پارامترهای تولید اصطکاک را برآورد نموده و از طریق آزمایش مقادیر آنها را به‌دست آورند. نیروهای ویژه اصطکاک تماس غلتشی و گشتاورهای اعمالی بر جزء غلتنده، با فرض در نظر گرفتن یک ضریب اصطکاک ثابت μ محاسبه می‌شود. تحقیقات دیگر، ثابت کرده‌اند که تلفات ناشی از پسماند و اصطکاک چرخشی در ساچمه‌های ویژه بلبرینگ‌ها به میزان $Q^{4/3}$ افزایش یافته و دیگر تلفات ناشی از اصطکاک تماس غلتشی به میزان $Q^{5/3}$ افزایش می‌یابند، که Q بار اعمالی بر ساچمه می‌باشد. مطابق این معادلات، اصطکاک بلبرینگ‌های با تماس زاویه‌ای و بلبرینگ‌های خودتنظیم، به شکل تابعی از زاویه اعمال بار β برآورد می‌شوند.

هرچند دانش به دست آمده از این تحقیق برای تعیین مقادیر اجزاء مختلف اصطکاک به وجود آمده کافی نیست، ولی ارتباط بینشان شناخته شده است. در بلبرینگ‌های با چهار نقطه تماس یا سه‌نقطه تماس، اصطکاک بیشتری نسبت به بیرینگ‌های با دو نقطه تماس تولید می‌شود. انحنای ناحیه تماس در رولربیرینگ‌های بشکه‌ای و کروی نسبت به رولربیرینگ‌های استوانه‌ای از فرورفتگی کاملاً قابل مشاهده‌ای برخوردار است. ضمناً یک ساچمه با مطابقت انحنای بسیار نزدیک بین ساچمه و شیار، اصطکاک بیشتری نسبت به ساچمه و شیاری که انحنایشان با هم مطابقت کمی داشته باشد، ایجاد می‌کند. اصطکاک تماس غلتشی، معمولاً، با ابعاد سطح تماس بین اجزاء غلتنده و سطوح تماس تناسب دارد اندازهٔ زاویه تماس α نیز بر میزان اصطکاک تأثیر دارد زیرا اصطکاک چرخشی با افزایش زاویه تماس، بیشتر می‌شود.

۲-۱-۲ اصطکاک لغزشی

اضافه بر حرکت لغزشی مورد بحث در بخش ۲-۱-۱، حرکت لغزشی دیگری در سطوح مهارکننده در قفسه نیز ایجاد می‌شود. در بیرینگ‌های بدون قفسه، این حرکت در محل تماس اجزاء غلتنده با هم ایجاد می‌شود. در رولربیرینگ‌هایی که رینگ‌هایشان به لبه دارند، حرکت بین پیشانی رولر با سطح تماس در لبه‌ها نیز باید اضافه شود.

سطوح اصلی مهارکننده در قفسه‌ها، سطوح داخلی پنجره هستند، ولی در بیرینگ‌هایی که قفسه‌شان توسط لبه رینگ در محل خود ثابت شده‌اند، سطح لبه و سطح خارجی به‌عنوان سطح مهارکننده عمل می‌کند. در بعضی اوقات، سطوح پیشانی قفسه‌ها به‌عنوان مهارکنندهٔ محوری استفاده می‌شود، برای مثال، مجموعه‌های قفسه

و یک دست از اجزاء غلتنده از نوع رولر سوزنی، به عنوان مجموعه‌های مستقل به‌کار می‌روند.

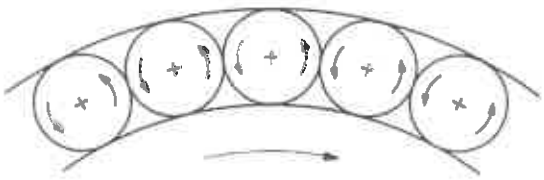
نیروهای وارده بر این سطوح مهارکننده، به چند نوع تقسیم می‌شوند که به قرار زیر است : بخشی ناشی از وزن قفسه است. تغییر مکان مرکز ثقل قفسه از مرکز به خاطر وجود لقی بین جزء غلتنده و پنجره قفسه که به سرعت دوران بستگی دارد، باعث ایجاد نیروی گریز از مرکز می‌شود و درنهایت به خاطر شتاب‌گیری و کاهش سرعت دوران، نیروهایی از اجزاء غلتنده به قفسه وارد می‌شود که باعث می‌شود این اجزاء از محدودهٔ اعمال بار خارج یا به این محدوده وارد گردد.

البته نیروی اینرسی که هنگام شروع، پایان و یا تغییر سرعت دوران به وجود می‌آید را نیز باید در نظر گرفت. در بلبیرینگ‌ها، هنگامی که به بلبیرینگ گشتاور خمشی وارد شود، به خاطر حرکت جلو و عقب ساچمه‌ها نسبت به قفسه ناشی از حرکت رینگ داخلی نسبت به رینگ خارجی، نیروهای دیگری تولید می‌شوند.

نیروهای مؤثر بر قفسه، تحت شرایط کاری عادی و روانکاری مناسب، مقادیر کوچکی دارند. بنابراین، مقاومت اصطکاکی در اینجا مقدار کمی دارد. هرچند، در اثر روانکاری ضعیف به همراه آلودگی یا سرعت دورانی بالا، اصطکاک به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. این وضعیت (افزایش اصطکاک) به ویژه در شرایط دورانی آشفته مثل حالتی که زاویه بین محورهای دوران رینگ داخلی و خارجی زیاد باشد، به‌وجود می‌آید. در بیرینگ‌های بدون قفسه که به آنها اصطلاحاً بیرینگ پرساچمه یا پر رولر می‌گویند، به جای اصطکاک لغزشی بین اجزاء غلتنده و قفسه، بین خود اجزاء غلتنده که به هم چسبیده‌اند، اصطکاک لغزشی ایجاد می‌شود. مقدار اصطکاک لغزشی در این بیرینگ‌ها، بیش از مقدار ایجاد شده بین اجزاء غلتنده و قفسه می‌باشد، زیرا در این حالت جهت حرکت دو سطح در تماس، در خلاف جهت یکدیگر است (شکل ۲-۳). در رولربیرینگ‌هایی که رولرها با لبه رینگ‌ها مهار می‌شوند، اصطکاک لغزشی بین سطح پیشانی رولرها و سطح لبه‌ها نیز ایجاد می‌شود.

۲-۱-۳ اصطکاک روانکار

اصطکاک روانکار در بیرینگ غلتشی، ترکیبی است از اصطکاک داخلی روانکار بین سطوح در حال کار و تأثیرات ناشی از کارکرد و تلاطم روانکار که در صورت وجود روانکار اضافی و نیز در سرعت‌های بالا بروز می‌کند. اصطکاک روانکار کل، بیشتر به میزان لزجت روانکار بستگی دارد. ابعاد بیرینگ (ابعاد اجزاء غلتنده، پهنای فاصله بین لبه‌های قفسه تا لبه‌های رینگ، آزادی جریان یافتن روانکار از یک طرف به طرف دیگر بیرینگ) نیز به میزان اصطکاک روانکار بستگی دارند. در سرعت‌های پایین، عموماً اصطکاک روانکار کم است. هرچند، بسته به لزجت روغن یا غلظت گریس با افزایش سرعت، میزان آن به شکل محسوسی افزایش می‌یابد. همچنین در مواردی که برای پراکنده نمودن حرارت،



شکل ۲-۳ وضعیت حرکتی در بیرینگ‌های بدون قفسه

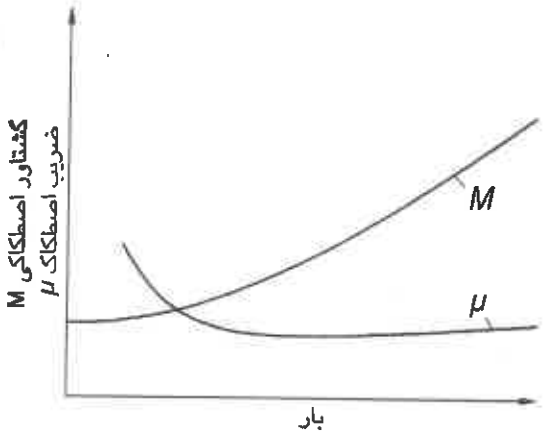
مقدار زیادی روغن داخل بیرینگ پمپ شود نیز اصطکاک روانکار زیاد می‌شود. در مواردی که از گریس برای روانکاری استفاده می‌شود، اگر تمام حفره‌های بیرینگ کاملاً با گریس پر شده باشند، باید انتظار اصطکاک بالایی را داشت، زیرا هنگام حرکت قطعات دیگر فضای کافی برای گریس‌های اضافی نخواهد بود. در این وضعیت گریس با تمام سطوح قفسه و اجزاء غلتنده در تماس دائم بوده و باعث افزایش اصطکاک روانکار خواهد شد. این افزایش اصطکاک روانکار نشان می‌دهد که در بیرینگ‌های با روانکار اضافی، خطر گرم شدن بیش از حد آنها وجود دارد. هرچند گریس اضافی با چرخش قفسه و اجزاء غلتنده از طرفین بیرینگ خارج می‌شود، می‌توان با روانکاری با گریس به اصطکاک روانکار بسیار پایینی دست یافت؛ این میزان را شاید بتوان با مقدار ایجاد شده در روش روانکاری با روغن به صورت جاری، مقایسه کرد.

۲-۱-۴ ممان اصطکاکی

اصطکاک کل به وجود آمده در یک بیرینگ - که مجموع اصطکاک‌های غلتشی و ناشی از روانکار است - به‌عنوان مقاومت اعمالی بیرینگ در مقابل حرکت، اندازه‌گیری می‌شود. این مقاومت باعث ایجاد گشتاوری می‌شود که به آن ممان اصطکاکی M گفته می‌شود. در شکل ۲-۴ یک منحنی نمونه اصطکاک و منحنی ممان اصطکاکی مربوطه، نشان داده شده است.

تخمین ممان اصطکاکی

معادلهٔ ۲-۱ و مقادیر ضریب اصطکاک M که در جدول ۲-۱ آورده شده‌اند، در تخمین ممان اصطکاکی کل یک



شکل ۲-۴ گشتاور اصطکاکی M و ضریب اصطکاک μ

جدول ۲-۱ ضریب اصطکاک μ برای طرح‌های مختلف در شرایط بار اعمالی P/C ≈ 0.1

نوع بیرینگ	ضریب اصطکاک μ
بلبیرینگ‌های شیار عمیق	0.0015
بلبیرینگ‌های خود تنظیم	0.0013
بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای، یک ردیفه	0.0020
بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای، دو ردیفه	0.0024
بلبیرینگ‌های با چهار نقطه تماس	0.0024
رولربیرینگ‌های استوانه‌ای	0.0013
رولربیرینگ‌های استوانه‌ای، با کل ضمائم	0.0020
رولربیرینگ‌های سوزنی	0.0025
رولربیرینگ‌های کروی	0.0020
رولربیرینگ‌های مخروطی	0.0018
بلبیرینگ‌های کف گرد	0.0015
رولربیرینگ‌های کروی کف گرد	0.0020
رولربیرینگ‌های استوانه‌ای کف گرد	0.0040
رولربیرینگ‌های سوزنی کف گرد	0.0050

بیرینگ غلتشی به‌کار می‌رود. این معادله در شرایط زیر اعتبار دارد:

- بار میانگین ($P/C \approx 0.1$) یا متوسط اعمال شده باشد.
- تنش اضافی دیگری به خاطر وجود بار اولیه محوری و یا شعاعی یا گشتاور خمشی بر بیرینگ اعمال نشده باشد،
- زاویه اعمال بار β (شکل ۲-۴ از جلد دوم) به میزان عمومی موجود در بیرینگ‌های مخصوص باشد،
- شرایط خوب روانکاری ($\kappa = \nu/\nu_1 \approx 1$) و محدوده سرعت میانگین (0.3 تا 0.7 برابر مقدار سرعت مجاز سینماتیکی) برقرار باشد و
- بیرینگ حلقه آب‌بند لاستیکی *نداشته* باشد.

هنگام به دست آوردن β، برای بیرینگ‌های شعاعی از بار شعاعی غالب، برای رولربیرینگ‌های استوانه‌ای و سوزنی از بار خالص شعاعی و برای بیرینگ‌های کف‌گرد از بار خالص محوری استفاده کنید. فرمول ۲-۱ به قرار زیر است :

$$M = \mu F d/2 \qquad (۱-۲)$$

که در آن :

M گشتاور اصطکاکی کل بیرینگ (Nmm)،

μ ضریب اصطکاک (جدول ۲-۱)،

F بار برآیند وارده بر بیرینگ $(N) = \sqrt{F_r^2 + F_a^2}$

d قطر سوراخ داخل بیرینگ (mm).

میزان ضریب اصطکاک به‌عوامل بسیاری بستگی دارد. عوامل مؤثر مهم عبارتنداز: نوع طرح و ابعادبیرینگ، شرایط روانکاری، زاویه بار β، بار (تأثیر اندک در رولربیرینگ‌های استوانه‌ای و سوزنی) و سرعت. با افزایش مدت زمان کارکرد ماشین‌آلات، ضریب اصطکاک بیرینگ‌های غلتشی به کار رفته در آنها امکان دارد به دو تا سه برابر مقدار آورده شده در جدول ۲-۱ افزایش یابد. در شرایط‌کاری متفاوت با شرایط ذکر شده در جدول از قبیل: مقدار بار اعمالی، سرعت و لزجت، ضریب اصطکاک امکان دارد چندین برابر مقدار آورده شده در جدول باشد. برای محاسبه دقیق‌تر ممان اصطکاکی مطابق روش شرح داده شده در بخش ۲-۱-۵ عمل می‌شود.

۲-۱-۵ محاسبه ممان اصطکاکی

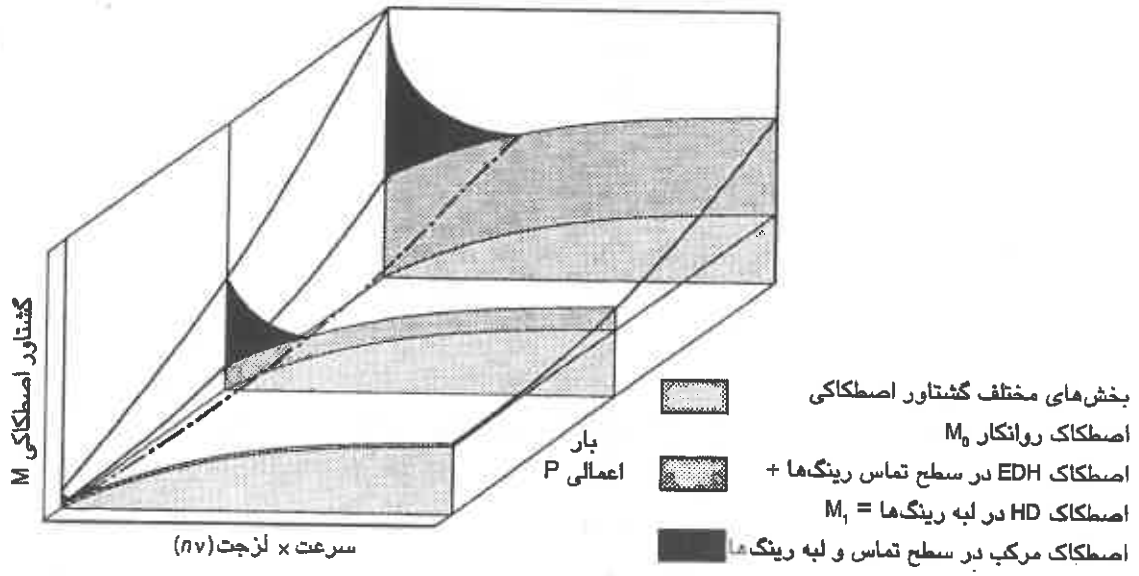
مطابق شکل ۲-۵، ممان اصطکاکی M بیرینگ به بار، سرعت و لزجت روانکار بستگی دارد. قسمت‌های مختلف نشان‌داده شده، مربوط به اندازه‌های مختلف از انواع مختلف بیرینگ‌ها می‌باشند. مثلث سیاه امتداد یافته تا طرف چپ خط‌چین، نشان‌دهندهٔ آن است که با سرعت پایین و با بار اعمالی بالا، مقدار قابل توجهی از اصطکاک مرکب می‌تواند به گشتاور اصطکاکی مستقل از بار M_0 و یا گشتاور اصطکاکی وابسته به بار M_1 اضافه شود، زیرا در این ناحیه از نمودار، هنوز سطوح تماس غلتشی، به وسیله فیلم محافظی از روانکار از هم جدا *نشده‌اند*.

ناحیه سمت راست خط‌چین نشاندهندهٔ آن است که با فیلم جداکننده روانکار که تحت شرایط عادی کاری به میزان مناسبی رسیده است، کل گشتاور اصطکاکی فقط از مقادیر M_0 و M_1 تشکیل شده است:

$$M = M0 + M1 \quad (N\,mm) \qquad (۲-۲)$$

که در آن :

M گشتاور اصطکاکی کل بیرینگ (N mm)،



شکل ۲-۵ گشتاور اصطکاکی در بیرینگ‌های غلتشی وابسته به سرعت، لزجت روانکار و بار اعمالی

M_0 بخش مستقل از بار اعمالی گشتاور اصطکاکی (N mm)، معادلهٔ ۲-۴ و

M_1 بخش وابسته به بار اعمالی گشتاور اصطکاکی (N mm)، معادلهٔ ۲-۵.

اصطکاک مرکب در سطوح تماس، لبه‌های رینگ‌ها و در قفسه بیرینگ، بروز می‌کند. تحت شرایط *نامطلوب* کاری، مقدار آن به میزان قابل توجهی می‌رسد. از آنجاییکه تعیین مقدار اجزاء این اصطکاک مشکل است، مقدار آن در اجزاء تشکیل‌دهنده‌اش توزیع *نمی‌شود*. هرچند، با توجه به معادله ۲-۲، می‌توان آن را به‌عنوان یکی از فازهای تشکیل‌دهندهٔ گشتاور اصطکاکی کل M به دست آورد.

در بلبیرینگ‌های شیار عمیق و رولربیرینگ‌های استوانه‌ای که بار خالص شعاعی به آنها وارد می‌شود، مطابق آنچه در شکل ۲-۵ (به گشتاور اصطکاکی در رولربیرینگ‌های استوانه‌ای تحت بار محوری توجه کنید) آورده شده است، مقدار اصطکاک مرکب ایجاد شده ناچیز است.

پس از گذراندن دورهٔ آب‌بندی قطعات بیرینگ، در بیرینگ‌هایی که در آنها نرخ حرکت لغزشی بالاست، مثل رولربیرینگ‌های مخروطی، رولربیرینگ‌های استوانه‌ای، رولربیرینگ‌های استوانه‌ای با کل ضمائم و تمام بیرینگ‌های کف‌گرد، اگر شرایط زیر برآورده شده باشد، میزان اصطکاک مرکب تولیدی از محدوده تعیین شده خارج خواهد شد :

$$nv / (P/C)^{0.5} \geq 9000 \qquad (۳-۲)$$

که در آن :

n سرعت دوران (min^{-1}) و

ν لزجت کاری روغن یا روغن با پایه گریس (شکل ۲-۸) (mm^2/s).

بخش غیروابسته به بار M_0

این بخش به لزجت کاری ν روانکار و سرعت دورانی n بستگی دارد. لزجت کاری تحت تأثیر اصطکاک بیرینگ که تولید حرارت می‌کند، مقدار متغیری دارد. همچنین، اندازهٔ d_m بیرینگ و خصوصاً پهنای منطقه تماس غلتشی که در طرح‌های مختلف متفاوت است، بر مقدار M_0 تأثیر می‌گذارند. بخش غیروابسته به بار M_0 مربوط به گشتاور اصطکاکی، با توجه به نتایج آزمایشی از فرمول زیر به دست می‌آید :

$$M_0 = 10^{-7} \times f_0 (\nu n)^{2/3} d_m^3 \ (N\ mm) \qquad (۲-۴)$$

که در آن :

f_0 شاخصی برای نوع بیرینگ و نوع روانکار به کار رفته (جدول ۲-۲)،

ν لزجت کاری (mm^2/s) روغن یا روغن با پایهٔ گریس (شکل ۲-۸)،

n سرعت دورانی دایره (min^{-1}) و

d_m قطر دایره گام (D+d)/2 بیرینگ (mm).

شاخص f_0 تعیین شده در جدول ۲-۲ برای شرایط روانکاری در حمام روغن که در آن سطح روغن تا نیمهٔ پایین‌ترین جزء غلتنده بالا باشد، آورده شده است (شکل ۲-۲۲). برای یک d_m ثابت، f_0 با افزایش قطرساچمه‌ها یا طول رولرها، افزایش می‌یابد، برای مثال، این شاخص به‌طور غیرمستقیم با افزایش ابعادی سطح مقطع بیرینگ نیز افزایش می‌یابد. از این رو، جدول ۲-۲ برای سری‌های پهن و سری‌های باریک بیرینگ‌ها، مقادیر f_0 متفاوتی را تعیین کرده است، سری‌های پهن بیرینگ‌ها مقادیر f_0 بزرگتری دارند. اگر بیرینگ‌های شعاعی در شفت عمودی و تحت بار شعاعی به کار روند، باید دو برابر مقدار داده شده در جدول ۲-۲ در محاسبات در نظرگرفته شود. وضعیت مشابه باید در بیرینگ‌های با نرخ جریان بالای روغن خنک‌کننده و یا در بیرینگی با مقادیر بیش از حد گریس اعمال شود (برای مثال، گریس به حدی باشد که نتواند در جهت عرضی بیرینگ جابه‌جا شود).

در فاز اولیه شروع به کار بیرینگ‌ها، مقادیر f_0 بیرینگ هایی که تازه گریسکاری شده باشند، مشابه مقادیر مربوط به بیرینگ‌های در حمام روغن است (جدول ۲-۲).

بعد از پخش شدن گریس داخل بیرینگ، باید نصف مقادیر f_0 ارائه شده در جدول ۲-۲ در نظر گرفته شود. در این حالت مقادیر معادل مقادیر به دست آمده در بیرینگ‌های با روغنکاری جاری خواهند بود. اگر از گریس مخصوص برای روانکاری بیرینگ استفاده شود، عمدتاً گشتاور اصطکاکی M_0 از مقاومت اصطکاکی درونی روغن پایهٔ آن گریس به‌دست می‌آید.

بخش وابسته به بار گشتاور اصطکاکی M_1

این بخش حاصل اصطکاک غلتشی شرح داده شده در بخش ۲-۱-۱ و اصطکاک لغزشی تولیدی در لبه‌های رینگ‌ها است. محاسبه مقدار M_1، به وسیله فرمول ۲-۵ و شاخص‌های f_1 نشانداده شده در جدول ۲-۳، در شرایطی صادق است که فیلمی از روانکار بین سطوح تماس غلتشی ایجاد شود ($\kappa = \nu/\nu_1 > 1$، به شکل ۲-۳۶ و معادله ۲-۳ توجه کنید).

جدول ۲-۲ شاخص f_0 برای محاسبه M_0، وابسته به نوع بیرینگ و سری مربوطه برای روانکاری در حمام روغن

نوع بیرینگ و سری مربوطه	شاخص f_0 برای روانکاری در حمام روغن	نوع بیرینگ و سری مربوطه	شاخص f_0 برای روانکاری در حمام روغن
بلبیرینگ‌های شیار عمیق	1.5 to 2	رولربیرینگ‌های سوزنی	
بلبیرینگ‌های خود تنظیم		NA48, NA49	5 to 5.5
		NA69	10
12	1.5		
13	2	رولربیرینگ‌های مخروطی	
22	2.5	302, 303, 313	3
23	3	329, 320, 322, 323	4.5
		330, 331, 332	6
بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای			
دو یک ردیفه			
72	2	رولربیرینگ‌های کروی	
73	3	213, 222	3.5 to 4
		223, 230, 239	4.5
بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای		231, 232	5.5 to 6
دو ردیفه		240, 241	6.5 to 7
32	3.5		
33	6		
		بلبیرینگ‌های کف گرد	
بیرینگ‌های با تماس چهار نقطه‌ای	4	511, 512, 513, 514	1.5
رولربیرینگ‌های استوانه‌ای		522, 523, 524	2
با قفسه			
2, 3, 4, 10	2	رولربیرینگ‌های استوانه‌ای کف گرد	
22	3	811	3
23	4	812	4
30	2.5		
با کل ضمائم		رولربیرینگ‌های سوزنی کف گرد	5
NCF18V	5		
NCF22V	8	رولربیرینگ‌های کروی کف گرد	
NCF29V	6	292E	2.5
NCF30V	7	293E	3
NNC48V, NNCL48V	9	294E	3.3
NNC49V, NNCL49V	11		
NJ23VH	12		
NFF50V	13		

* مقادیر موجود در جدول، برای شرایط روانکاری با گریس (بعد از انتشار) و برای روانکاری روغن جاری باید نصف شوند.

تحت این شرایط، M_1 با تغییرات سرعت دوران، به شکل آشکارتری تغییر می‌یابد، البته سرعت بسته به ابعاد، ناحیه تماس و در نتیجه با ضریب انحنای جزء غلتنده و سطح تماس در رینگ و بار اعمالی به بیرینگ نیز تغییر خواهد کرد. پارامترهای مؤثر دیگر، نوع بیرینگ و ابعاد آن است.

ممان اصطکاکی وابسته به بار M_1 به شکل زیرمحاسبه می‌شود :

$$M_1 = f_1 P_1 d_m \ (N\ mm) \qquad (۲-۵)$$

که در آن :

f_1 شاخص مربوط به بزرگی بار اعمالی (جدول ۲-۳)،

P_1 بار (N) اعمالی غالب مؤثر بر M_1 (جدول ۲-۳) و

d_m قطر دایره گام $(D+d)/2$ بیرینگ (mm).

به خاطر انحنای منطقه تماس، شاخص f_1 برای بلبیرینگ‌ها و رولربیرینگ‌های کروی با مقدار عبارت $(P_0/C_0)^s$ متناسب است. مقدار شاخص f_1 برای رولربیرینگ‌ها و رولربیرینگ‌های مخروطی ثابت است.

بزرگی توان s برای بلبیرینگ‌ها، به میزان اصطکاک چرخشی بستگی دارد. برای بلبیرینگ‌هایی با اصطکاک چرخشی، $s = 0.5$ است و برای بلبیرینگ‌هایی با اصطکاک چرخشی بالا، مثلاً بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای با زاویه تماس $\alpha_0 = 40°$، $s = 0.33$ است.

بیرینگ‌های بزرگتر و اجزاء غلتنده کوچکتر، باعث افزایش قطر متوسط d_m بیرینگ خواهند شد. بنابراین اصطکاک چرخشی بین اجزاء غلتنده و سطوح تماس در رینگ‌ها، متناسب با d_m افزایش می‌یابند. بار P_1 که تعیین‌کنندهٔ گشتاور اصطکاکی وابسته به بار M_1 است، با زاویه بار $\beta = \tan^{-1}(F_a/F_r)$ تغییر می‌کند.

برای ساده‌سازی، فاکتور نیروی محوری Y به‌عنوان یک مقدار مرجع که به F_a/F_r و زاویه تماس β بستگی دارد، وارد معادلات شد. هنگام محاسبه گشتاور اصطکاکی در رولربیرینگ‌های استوانه‌ای که تحت بارهای محوری نیز می‌باشند، باید بخش وابسته به بار محوری گشتاور اصطکاکی M_a به مقادیر M_0 و M_1 اضافه شود، در نتیجه:

$$M = M_0 + M_1 + M_a \qquad (۲-۶)$$

$$M_a = f_a \times 0.06\ f_a\ d_m \qquad (۲-۷)$$

شاخص F_a، به بار محوری F_a و شرایط روانکاری بستگی دارد (شکل ۲-۶). توسط این معادلات می‌توان مقدار گشتاور اصطکاکی بیرینگ را با دقت مناسبی تعیین کرد. در حوزه کاربردی، اگر فیلم روانکار به‌صورت کامل ایجاد نشود و اصطکاک مرکب پدیدار شود، امکان دارد برخی انحرافات به وجود آید. همیشه شرایط روانکاری مطلوب در کار ایجاد نمی‌شود.

گشتاور مقاوم اولیه بیرینگ‌ها هنگام شروع به کار دستگاه مخصوصاً در دمای پایین یا در بیرینگ‌هایی که مجهز به حلقه‌های آب‌بند لاستیکی هستند، می‌تواند خیلی بالاتر از مقادیر محاسبه شده باشد. یک بخش مکمل گشتاور اصطکاکی مربوط به حلقه‌های آب‌بند لاستیکی را می‌توان در محاسبات گشتاور اصطکاکی در نظر گرفت. برای بیرینگ‌های کوچکی که با گریس روانکاری بشود، فاکتور مکمل می‌تواند بزرگتر از چهار باشد (مثل سری 6201 با گریس استاندارد). برای بیرینگ‌های بزرگتر این مقدار می‌تواند تقریباً برابر با 1.5 باشد (مثل سری 6216 با گریس استاندارد).

جدول ۲-۳ فاکتورهای محاسباتی گشتاور اصطکاکی وابسته به بار M_1

نوع بیرینگ، سری ها	f_1[a]	P_1[b]
بلبیرینگ‌های شیار عمیق	$0.005–0.009(P_{0*}/C_0)^{0.5}$	F_r or $3.3F_a - 0.1F_r$[c]
بلبیرینگ‌های خود تنظیم	$0.0003(P_{0*}/C_0)^{0.4}$	F_r or $1.37F_a/e - 0.1F_r$[c]
بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای		
یک ردیفه $\alpha = 15°$	$0.0008(P_{0*}/C_0)^{0.5}$	F_r or $3.3F_a - 0.1F_r$[c]
یک ردیفه $\alpha = 25°$	$0.0009(P_{0*}/C_0)^{0.5}$	F_r or $1.9F_a - 0.1F_r$[c]
یک ردیفه $\alpha = 40°$	$0.001(P_{0*}/C_0)^{0.33}$	F_r or $1.0F_a - 0.1F_r$[c]
دو ردیفه یا یک ردیفه جفت	$0.001(P_{0*}/C_0)^{0.33}$	F_r or $1.5F_a - 0.1F_r$[c]
بیرینگ‌های با تماس چهارنقطه‌ای	$0.001(P_{0*}/C_0)^{0.33}$	$1.5F_a + 3.6F_r$
رولربیرینگ‌های استوانه‌ای با قفسه	0.0002–0.0004	F_r[d]
رولربیرینگ‌های استوانه‌ای با کل ضمائم	0.00055	F_r[d]
رولربیرینگ‌های سوزنی		
رولربیرینگ‌های مخروطی یک ردیفه	0.0005	F_r
رولربیرینگ‌های مخروطی دو ردیفه	0.0004	$2YF_a$ or F_r[c]
یا دو بیرینگ یک ردیفه با چیدمان X یا O	0.0004	$1.21F_a/e$ or F_r[c]
رولربیرینگ‌های کروی		
سری‌های 222، 213	$0.0005(P_{0*}/C_0)^{0.33}$	$1.6F_a/e$ if $F_a/F_r > e$ $F_r[1 + 0.6(F_a/eF_r)^3]$ if $F_r \le e$
سری‌های 223	$0.0008(P_{0*}/C_0)^{0.33}$	
سری‌های 240، 231	$0.0012(P_{0*}/C_0)^{0.5}$	
سری‌های 239، 230	$0.00075(P_{0*}/C_0)^{0.5}$	
سری‌های 232	$0.0016(P_{0*}/C_0)^{0.5}$	
سری‌های 241	$0.0022(P_{0*}/C_0)^{0.5}$	
بلبیرینگ‌های کف گرد	$0.0012(F_a/C_0)^{0.33}$	F_a
رولربیرینگ‌های استوانه‌ای کف گرد	0.0015	F_a
رولربیرینگ‌های سوزنی کف گرد	0.0015	F_a
رولربیرینگ‌های کروی کف گرد	0.00023–0.00033	F_a (هنگامی‌که $F_r \le 0.55F_a$)

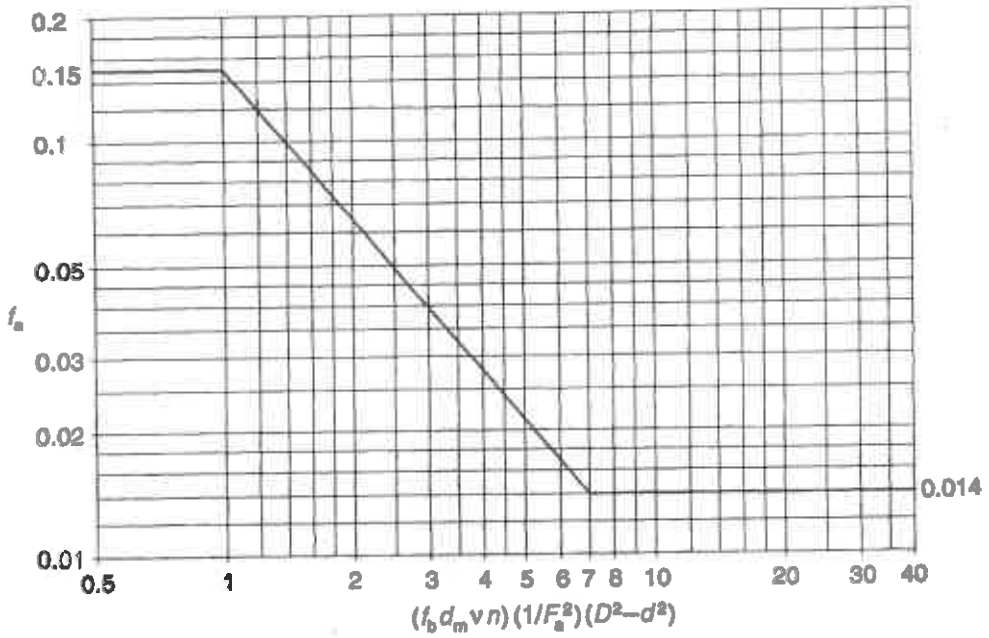
P_{0*} بار معادل (N) در بارکاری — F_a بخش محوری بار دینامیکی بیرینگ (N)

Y , e فاکتور — b جایی که $P_1 < F_1$ باشد، P_1 را برابر با F_r در نظر بگیرید

C_0 نرخ بار استاتیکی (N)، به بخش ۲-۱-۴ از جلد دوم نگاه کنید — F_r بخش شعاعی بار دینامیکی بیرینگ (N)

a مقادیر بیشتر برای سری‌های پهن‌تر به کار می‌روند — c بین دو مقدار موجود، مقدار بزرگتر استفاده می‌شود

d فقط باید تحت بار شعاعی باشد. برای رولربیرینگ‌های استوانه‌ای که تحت بار محوری نیز باشند، M_a را باید به گشتاور اصطکاکی M1 اضافه کنیم : $M = M_0 + M_1 + M_a$. برای به‌دست آوردن M_a به معادله ۲-۷ مراجعه کنید.



شکل ۲-۶ ضریب اصطکاک F_a برای محاسبه گشتاور اصطکاکی وابسته به بار محوری M_a رولربیرینگ‌های استوانه‌ای که تحت بار محوری قرار گرفته باشند. عبارت $(f_b d_m \nu n))1/Fa^2)(D^2-d^2)$ به وسیله پارامترهای زیر به دست می‌آید :

F_a 0.0048 برای بیرینگ‌های با قفسه، 0.0061 برای بیرینگ‌های با کل ضمائم (بدون قفسه).

d_m قطر متوسط $(D+d)/2 \approx$ قطر دایره گام بیرینگ (mm).

ν لزجت کاری (mm^2/s) روغن یا گریس با پایه روغن (شکل ۲-۸).

n سرعت دورانی رینگ داخلی (min^{-1}) و F_a بار محوری (N)

گشتاور اصطکاکی حلقه آب‌بند، همچنین به کلاس نفوذپذیری گریس و سرعت دورانی بستگی دارد. فاکتوری که شامل گشتاور اصطکاکی حلقه آب‌بند باشد، از فاکتور مربوط به روش روانکاری با روغن بسیار کوچکتر است.

۲-۲ دما

دمای کاری در یک مجموعه بیرینگ به اصطکاک بیرینگ، اصطکاک حلقه‌های آب‌بند و در مواردی به منابع حرارتی خارجی مثل انتشار حرارتی ناشی از قطعات متصل به محیط، بستگی دارد. این دما پس از شروع به کار افزایش یافته و هنگامی که بین تولید حرارت و دفع حرارت تعادل برقرار شد، ثابت می‌ماند (شرایط دما ثابت).

۲-۲-۱ دمای کاری

بدون در نظر گرفتن حرارت خارجی، دمای کاری بیرینگ‌های غلتشی در سرعت دورانی متوسط و تحت

بارهای متوسط، به‌خاطر اصطکاک کم تولیدی دربیرینگ، کم است. در **جدول ۲-۴** مقادیر مرجع **دماهای کاری متوسط برای بیرینگ‌هایی که** تحت تنش‌های مختلفی قرار گرفته باشند، آورده شده است. هرچند، دمای کاری تولیدی در بیرینگ‌های غلتشی وقتی تحت تأثیر حرارت‌های خارجی باشند، می‌تواند به میزان قابل توجهی بالاتر باشد.

جدول ۲-۴ دمای کاری بیرینگ‌ها در ماشین‌آلات مختلف در دمای محیط 20 °C

کاربرد بیرینگ	دمای کاری تخمینی (°C)
شفت کاتر ماشین صفحه تراشی	40
شفت درپل رومیزی	40
شفت دستگاه بورینگ افقی	40
شفت اره آتشی (دایره‌ای)	40
دستگاه نورد شمش و لوحه	45
شفت دستگاه تراش	50
ماشین تراش برجکدار عمودی	50
اره آتشی با دو شفت	40
محور دستگاه برش چوب	50
غلتک نورد ماشین کاغذسازی	55
غلتک‌های پشت‌بند دستگاه‌های نورد گرم تسمه	55
دستگاه سنگ تخت	55
دستگاه سنگ‌شکن فک دار	60
بیرینگ‌های جعبه محور/ لوکوموتیو یا واگن مسافربری	60
سنگ‌شکن چکشی	60
غلتک نورد سیم	65
موتور نوسانی	70
دستگاه پیچش طناب	70
صفحه نوسانی	80
آسیاب ضربه‌ای	80
بلوک تکیه‌گاهی ملخ در کشتی‌ها	80
غلتک جاده صاف‌کن لرزشی	90

در **جدول ۲-۵** مقادیر دمای کاری یک سری از بیرینگ‌هایی که تحت اثر حرارت خارجی هستند آورده شده است.

دمای کاری موردنظر بیرینگ، در طراحی بیرینگ، روانکاری، حلقه‌های آب‌بند و غیره بسیار پراهمیت دارد. دمای ثابت t یک بیرینگ را می‌توان با معادله (۲-۸) مربوط به انتقال حرارت $Q_R(W)$ که توسط بیرینگ تولید شده است و معادله (۲-۹) انتقال حرارت $Q_L(W)$ انتشار یافته به محیط، محاسبه کرد. دمای بیرینگ t به شرایط میزان انتقال حرارت بین بیرینگ، قطعات متصل و محیط بستگی دارد. معادلات در این بخش توضیح داده شده‌اند. اگر اطلاعات موردنیاز K_t و q_{LB} مشخص باشند (احتمالاً در آزمایش‌ها به دست آمده باشد)، دمای کاری t بیرینگ را می‌توان از معادله بالانس حرارت به دست آورد.

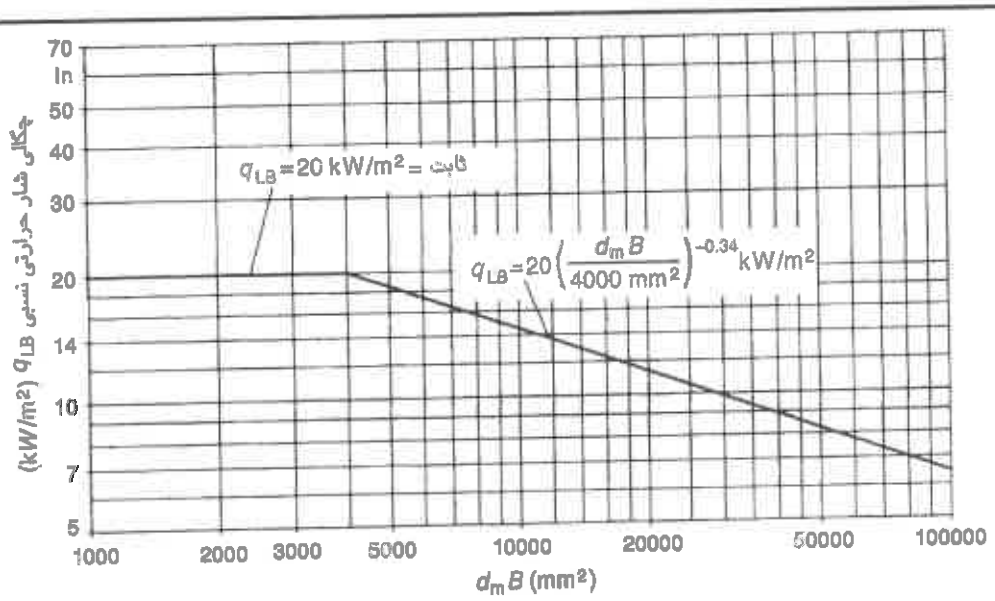
شار حرارتی $Q_R(W)$ تولید شده توسط بیرینگ از گشتاور اصطکاکی M (N mm) و سرعت دورانی $n(min^{-1})$ محاسبه می‌شود. گشتاور اصطکاکی M نیز با توجه به بخش ۲-۱-۵ محاسبه می‌شود:

$$Q_R = 1.047\ 10^{-4} \times nM\ (W) \qquad (۲-۸)$$

شار حرارتی Q_L پراکنده شده به محیط از تفاوت بین دمای بیرینگ t و دمای محیط t_u، ابعاد سطوح ارسال حرارت (قطر خارجی رینگ خارجی ($D\pi B$) و سوراخ داخل رینگ ($d\pi B$) و چگالی شار حرارتی q_{LB} مشابه فاکتور خنک‌کاری K_t معمولاً برای شرایط کاری عادی محاسبه می‌شود (**شکل ۲-۷**). برای شرایط پراکنده شدن حرارت به‌دست آمده در نشیمنگاه‌های پایه‌دار معمولی، مقدار فاکتور خنک‌کاری $K_t = 1$ است.

جدول ۲-۵ دمای کاری بیرینگ‌های در معرض منبع حرارتی خارجی

کاربرد بیرینگ	منبع حرارت خارجی	دمای کاری تخمینی (°C)
موتور وسیله نقلیه الکتریکی	حرارت الکتریکی تولیدی در آرمیچر، حرارت ناشی از جذب حرارت نشیمنگاه به‌وسیله جریان هوا	80–90
غلتک‌های خشک‌کن در ماشین‌های کاغذسازی	حرارت ناشی از عبور بخار داغ با دمای 140–150 °C از داخل بیرینگ	120–130
دمنده‌های گاز داغ	انتقال حرارت به‌وسیله شفت پروانه در معرض گاز داغ	90
واتر پمپ	حرارت ناشی از جذب حرارت آب و موتور	120
توربو کمپرسور	پراکنده شدن حرارت تولیدی از فشرده‌سازی هوا در راستای شفت	120
میل‌لنگ موتورهای احتراق داخلی	پراکنده شدن حرارت تولیدی از احتراق در راستای میل‌لنگ، انتقال حرارت از نشیمنگاه	120
غلتک نورد برای مواد پلاستیک (خمیری)	ایجاد حرارت توسط انتقال‌دهنده حرارت بین 200–400 °C داخل بیرینگ	180
بیرینگ‌های چرخی به‌کاررفته در ارابه داخل کوره	تشعشع و انتقال حرارت از محیط کوره	200–300



شکل ۲-۷ نرخ تعیین شدهٔ چگالی شار حرارتی بیرینگ برای شرایط کاری با دمای رینگ ثابت 70 °C و دمای محیط 20 °C و میزان بار اعمالی 4% تا 6% از C_0

برای شرایطی که پراکنده شدن حرارت در شرایط بهتر یا بدتری باشد، به معادله زیر توجه کنید :

(۹-۲)

$$Q_L = q_{LB} [t\text{-}t_u / 50°] K_t \times 2 \times 10^{-3} \times d_m \pi B \ (W)$$

که در آن :

q_{LB} نرخ تعیین شدهٔ چگالی شار حرارتی بیرینگ (kW/m^2) از شکل ۲-۷،

$d_m = (D + d) / 2$ (mm)،

B پهنای بیرینگ (mm)،

K_t فاکتور خنک‌کاری،

0.5 برای دفع ضعیف حرارت (محیط گرم، منبع حرارتی خارجی)،

1 برای دفع عادی حرارت (نشیمنگاه مستقل) و

2.5 برای دفع بسیار عالی حرارت (جریان هوا).

در روانکاری با روغن مقادیر بیشتری از حرارت موجود پراکنده می‌شود. شار حرارتی Q_{oil} پراکنده شده به دمای ورودی t_E و دمای خروجی t_A، چگالی ρ و ظرفیت حرارتی ویژه c روغن به همراه مقدار جریان m روغن در واحد زمان (cm^3/min). معمولاً چگالی روغن $0.86 - 0.93\ kg/dm^3$ است و آنتروپی c بسته به نوع روغن برابر است با $1.7 - 2.4\ kJ/kg^{-1}K^{-1}$:

$$Q_{oil} = mpc\ (t_A - t_E) / 60 \ (W) \qquad (۱۰-۲)$$

برای یک روغن معدنی استاندارد $\rho = 0.89\ kg/dm^3$ و $c = 2\ kJ\ kg^{-1}K^{-1}$ است در نتیجه معادله ساده شدهٔ زیر به دست می‌آید :

$$Q_{oil} = 30\ V_{oil}\ (t_A - t_E) \ (W) \qquad (۱۱-۲)$$

که در آن V_{oil}، مقدار جریان روغن از داخل بیرینگ (dm^3/min) است. دراین حالت دمای بیرینگ از معادله زیر به دست می‌آید :

$$Q_R = Q_L + Q_{oil} \ (W) \qquad (۱۲-۲)$$

مقادیر دمای محاسبه شده با این روش معمولاً به حد کافی دقیق است ولی مقادیر وارد شده به محاسبات، خصوصاً چگالی شار حرارتی و فاکتور خنک‌کاری K_t عموماً با دقت کافی شناخته نیستند. این مشکل را حتی با روش‌های اصلاح شدهٔ محاسباتی (مثل روش اجزاء محدود) نیز *نمی‌توان* حل کرد، زیرا حرارت تولید شده از ادوات درگیر هم یا تأثیرات دو جانبه بیرینگ‌های متعدد نزدیک هم، بر مقادیر تأثیر می‌گذارند. یک مقدار پایه مفید را فقط با محاسبه دمای ثابت و سپس با محاسبهٔ فاکتور خنک‌کاری می‌توان به دست آورد. این موضوع تخمین دماهای ثابت انواع مختلف بیرینگ‌ها را با دقت کافی تحت شرایط مونتاژ و کاربرد مشابه برای بارهای اعمالی و سرعت‌های مختلف ممکن می‌سازد.

۲-۲-۲ اختلاف دما بین رینگ‌های داخلی و خارجی

در یک بیرینگ تحت دمای کاری، رینگ داخلی معمولاً اندکی گرمتر از رینگ خارجی است، زیرا در اکثر شرایط عادی، خنک‌کاری *نمی‌شود* و به نشیمنگاه حرارت داده *نمی‌شود*. از طرفی به دلیل وجود سطح بیشتر در رینگ خارجی حرارت بیشتری نیز دفع می‌شود، انبساط حرارتی در رینگ داخلی بیشتر از رینگ خارجی است. از این رو لقی شعاعی بیرینگ تحت شرایط دمای کاری،

کوچکتر از وضعیت اولیه نصب می‌باشد. این مسئله حتماً بایستی در طراحی بیرینگ و انتخاب گروه لقی شعاعی، مورد توجه قرار گیرد.

اگر بیرینگ و ضمائم آن تحت خنک‌کاری یا حرارت نباشد، عموماً تفاوت دمای بین 5 °C تا 10 °C باید در نظر گرفته شود. در مواردی که نشیمنگاه با جریان هوا خنک می‌شود (مثل وسایل نقلیه موتوری) امکان دارد این تفاوت به محدوده 15 °C تا 20 °C نیز برسد. البته *نباید* از این موضوع چشم پوشی کرد که به دلیل پاشش روغن اختلاف دمای رینگ داخلی و خارجی کاهش می‌یابد.

وجود منبع حرارت خارجی اعمالی به شفت یا نشیمنگاه کار تخمین دما را مشکل می‌کند. در اکثر موارد فقط تشخیص اینکه کدام رینگ حین کارکرد به دمای بالاتری دست می‌یابد، امکانپذیر است. در شفت‌های چرخدنده، حرارت از چرخدنده از طریق شفت به رینگ داخلی منتقل می‌شود. بیرینگ‌های یک میل لنگ در موتورهای احتراق داخلی، به دو صورت انتقالی و تابشی تحت تأثیر حرارت تولیدی در محفظه احتراق هستند. در غلتک‌های نورد گرم، مایع انتقال‌دهندهٔ حرارت از داخل سوراخ مقطعی که رینگ داخلی بیرینگ را نگه داشته است منتقل می‌شود. هنگامی که این شرایط را در نظر می‌گیریم، *نباید* از حرارت ناشی از اصطکاک حلقه‌های آب‌بند لاستیکی یا بیرینگ چشم‌پوشی کنیم. در این حالت میزان اختلاف دما را فقط می‌توان برپایه مقادیری که در بیرینگ‌های هم طرح و تحت شرایط بار معادل یا مشابه در ماشین‌آلات و در محل کاربرد آنها اندازه‌گیری شده است، تخمین زد.

۲-۳ اصول روانکاری

بیرینگ‌های غلتشی عموماً با انواع گریس‌ها و گاهی اوقات با روانکاری جامد به شکل مناسبی روانکاری می‌شوند. از آنجا که روانکاری با گریس، نیازی به سیستم‌های تأمین‌کننده روانکار مخصوصی *ندارند* و اجازه استفاده از حلقه‌های آب‌بند بسیار ساده را به ما می‌دهد، اکثر بیرینگ‌ها با گریس روانکاری می‌شوند. ولی مواردی نیز وجود دارد که روانکاری با روغن مزایای بیشتری داشته و یا برای دفع حرارت مناسب‌تر است. در بخش ۲-۴ در مورد جزئیات کاربرد روش‌های روانکاری توضیح داده خواهد شد، اما در این بخش اصول اولیه روانکاری بیرینگ مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در بیرینگ‌های غلتشی لایه بسیار نازک (فیلم) روانکار، ارائه‌دهندهٔ یک عضو انتقال دهنده بار است که کاملاً سطوحی که نسبت به هم در حرکت هستند را از هم جدا می‌سازند. در شرایطی که بار مناسب و ملایمی به بیرینگ وارد شود و فاصله روانکاری شده بین قطعات از درجه پاکی بالایی برخوردار باشد، می‌توان به جدایش کامل سطح در تماس و در نتیجه به بیرینگی ایمن در مقابل خرابی دست یافت. از آنجا که تحت فشار تماسی بالا، تغییر شکل‌های الاستیکی سطوح، شکل‌گیری فیلم روانکار را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد، ما آن را روانکاری الاستوهیدرودینامیک (EHD) می‌نامیم. تشکیل فیلم روانکار انتقال‌دهنده بار، مستقیماً تحت تأثیر خصوصیات روانکار قرار دارد.

۲-۳-۱ خصوصیات روانکار

لزجت

لزجت مقاومت لایه‌های روغن مجاور هم در برابر جابه‌جایی آنها نسبت به هم است. لزجت یک خاصیت تعیین کننده ظرفیت انتقال بار فیلم روغن در بیرینگ است. روغن‌های رقیق لزجت پایینی دارند و روغن‌های غلیظ، لزجت بالایی دارند.

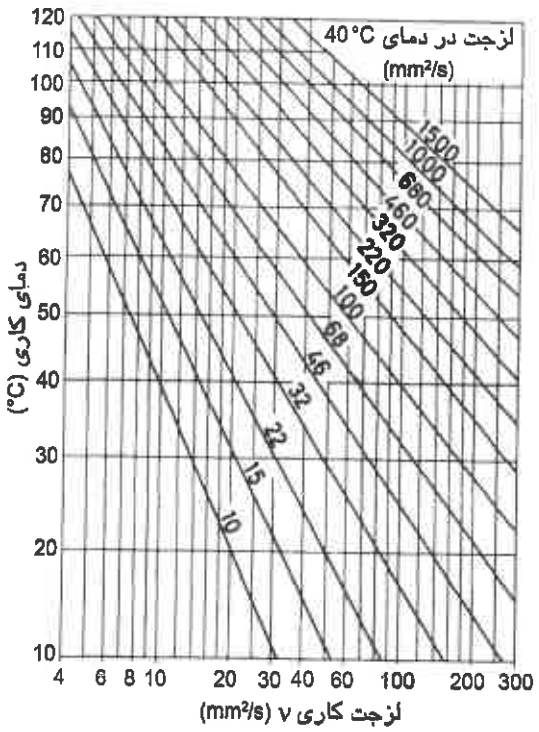
در تحقیقات روانکاری، لزجت دینامیک η برحسب میلی پاسکال ثانیه (mPa s) بیان می‌شود. در کاربردهای صنعتی، استفاده از لزجت سینماتیک ν (mm^2/s) ترجیح داده می‌شود. این دو مشخصه به شکل زیر با هم ارتباط دارند :

$$\eta = \nu\rho(mPa\ s) \qquad (۲-۱۳)$$

که در آن واحد چگالی ρ، kg/dm^3 است و واحد لزجت سینماتیک ν، mm^2/s است. چگالی اکثر روغن‌های روانکاری kg/dm^3 0.86 – 0.93 است و به اجزاء شیمیایی تشکیل دهندهٔ روغن بستگی دارد. چنانچه روغنی را بیشتر پالایش نماییم، چگالی ρ اندکی کاهش می‌یابد. لزجت ν با افزایش دما کاهش می‌یابد و با کاهش دما افزایش می‌یابد، بنابراین برای هر مقداری از لزجت، باید دمای مرتبط با آن ذکر شود. صنایع تولید روغن، لزجت سینماتیک روغن‌ها را برحسب دمای مرجع 40 °C مطابق استاندارد (DIN 51519) ISO 3448 بیان می‌کنند. لزجت روغن‌های رقیق برحسب دمای 20 °C و لزجت روغن‌های غلیظ و سفت برحسب دمای 100 °C بیان می‌شوند. لزجت در دمای 40 °C را لزجت عادی می‌نامند.

لزجت‌کاری

لزجت یک روغن در دمای کاری، لزجت کاری نامیده می‌شود و از طریق دیاگرام لزجت- دما (دیاگرام V-T) قابل محاسبه است. اگر لزجت روغنی در دمای 100 °C، 6 mm^2/s باشد و در دمای 20 °C، 70 mm^2/s باشد، این دو نقطه معلوم در دیاگرام V-T توسط یک خط راست به هم متصل می‌شوند و درنتیجه برای دمای کاری 45°C، لزجت کاری با مقدار تقریبی 24 mm^2/s را می‌توان از روی دیاگرام خواند. اگر دیاگرام V-T روغنی که مورد استفاده قرار می‌گیرد، در دسترس *نباشد*، می‌توان لزجت کاری را از **شکل ۲-۸ محاسبه کرد.**



شکل ۲-۸ دیاگرام لزجت- دما (V-T)

چگالی و لزجت تابع فشار

حتی تحت فشاری با بزرگی هزاران N/mm^2، یک فیلم انتقال‌دهندهٔ بار در منطقه کاری بین اجزای غلتنده و سطح تماس در رینگ‌ها، ایجاد می‌شود. این واقعیت که به‌صورت تئوری و آزمایشی ثابت شده است، ناشی از افزایش چگالی و لزجت به دلیل افزایش فشار است.

چگالی روغن روانکاری وقتی فشار تا $1000\ N/mm^2$ افزایش می‌یابد، تقریباً 20% افزایش می‌یابد. این تغییر در چگالی، تأثیر اندکی در تشکیل فیلم روانکار دارد. از طرف دیگر، لزجت، با افزایش فشار متناسب بوده و شاید تا 10^7 برابر مقدار اولیه‌اش افزایش یابد. رابطه بین لزجت و فشار، تقریباً با معادله زیر مشخص می‌شود :

$$\eta = \eta_0 e^{\alpha p}\ (mPa\ s) \qquad (۱۴-۲)$$

که در آن :

η لزجت دینامیک (m Pa s) در فشار p،

η_0 لزجت دینامیک (mPa s) در فشار اتمسفر،

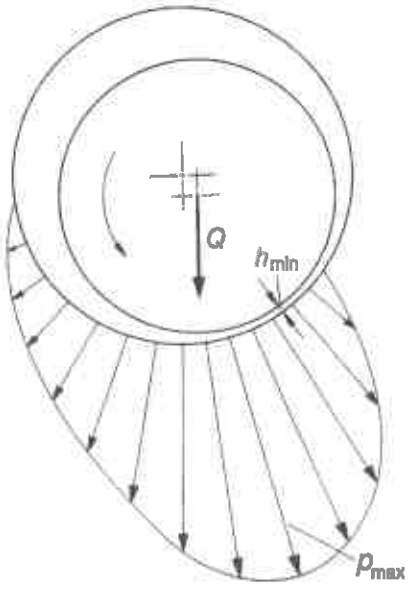
α ضریب فشار- لزجت (mm^2/N) که معمولاً $0.01 - 0.02\ mm^2/N$ است و

p فشار (N/mm^2).

در معادله ۲-۱۴ دما در نظر گرفته نشده است و از این رو در فشارهای بالا به مقادیر فوق‌العاده بزرگ لزجت خواهیم رسید. در تعدادی از تحقیقات معادله اصلاح شده‌ای ارائه شده است که در آن ضریب α به فشار p و دمای t بستگی دارد.

۲-۳-۲ روانکاری هیدرودینامیکی

تئوری روانکاری هیدرودینامیکی، که در اصل برای بیرینگ‌های لغزشی توسعه داده شده است، را می‌توان در بیرینگ‌های غلتشی نیز به کار برد. این تئوری عبارت است از : روانکاری سطوحی که روی هم می‌لغزند، از قبیل، پیشانی رولرها و لبه‌های در تماس با آنها و سطوح نگهدارنده در قفسه‌ها. فرض اولیه تئوری روانکاری هیدرودینامیکی، در یک سطح دو بعدی است، مثلاً یک شفت بلند با طول نامحدود که با یک پوستهٔ استوانه‌ای به پهنای *نامحدود* مهار شده است. ما فیلم روانکار ساکن را فقط در مواردی که نیروهای برشی وابسته به لزجت روانکار مورد توجه قرار گرفته باشد، مورد ملاحظه قرار می دهیم. وقتی شفت داخل پوسته دوران می‌کند، چسبندگی روانکار به سطوح هر دو قطعه باعث کاهش فاصله سطوح و تشکیل فیلم روانکار انتقال‌دهنده بار می‌شود. این مسئله باعث ان‌تشار فشار مطابق شکل ۲-۹ می‌شود.



شکل ۲-۹ انتشارفشار هیدرودینامیکی دریک بیرینگ لغزشی

در راستای این پروسه، شفت تا جایی که بین فشار روانکار و بار خارجی اعمالی تعادل ایجاد شود، جابه‌جا می‌شود. در جهت دوران، حداکثر فشار کمی قبل از باریکترین نقطه فیلم روغن h_{min}، به وجود می‌آید، که به صورت عرضی نسبت به راستای خط بار اعمالی هم راستا نیست. در تئوری روانکاری هیدرودینامیکی، فرض بر این است که لزجت و چگالی روانکار در فاصله بین قطعات تغییر نمی‌کند و در شفت و پوسته هیچ تغییر شکل الاستیکی رخ نمی‌دهد. بیرینگ‌های لغزشی هر دو شرایط را به‌خوبی رعایت می‌کنند، زیرا سطح بزرگ منطقه انتقال‌دهندهٔ بار باعث کاهش فشار می‌شود.

با توجه به تحقیقات، ظرفیت انتقال بار بیرینگ‌های لغزشی هیدرودینامیکی از فرمول زیر محاسبه می‌شود :

$$Q = 4.9\eta\, V l_{eff}/1000 h_{min}\Sigma\rho) \qquad (۱۵-۲)$$

η لزجت دینامیک (mPa s)،

V سرعت حرکت لغزشی (m/s)،

l_{eff} پهنای بیرینگ (mm)،

$\Sigma\rho$ مجموع انحناءها (mm^{-1})

hmin حداقل ضخامت فیلم روانکار (μm).

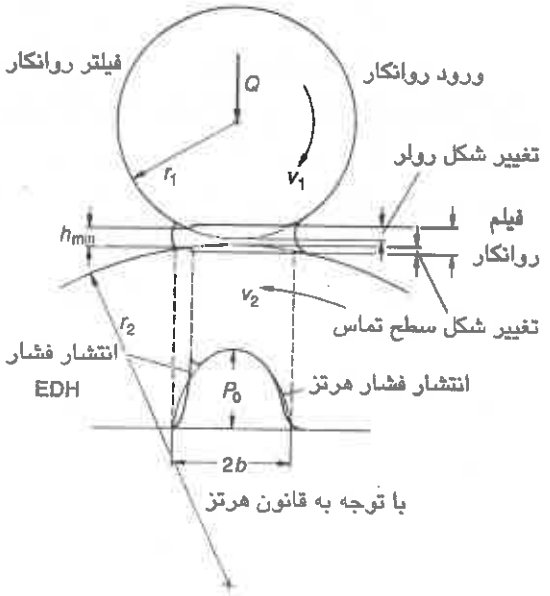
این معادله تا جایی که مقدار فشار تماسی در معادله زیر صدق کند، معتبر است :

$$P_0 \le 80\sqrt{\eta V \sum \rho} \quad (N/mm^2) \qquad (۱۶-۲)$$

مقادیر محاسبه شده به این طریق، کاملاً با مقادیر به دست آمده در آزمایشات مطابقت می‌کند. این واقعیت باعث می‌شود بتوانیم این نتایج را در سطوح مهارکنندهٔ قفسه‌هایی که تحت بارهای سبک قرار دارند، به کار بریم. در مواردی که سطوح لبه‌های نگهدارنده رینگ‌ها و پیشانی رولرها تحت بارهای بالاتری قرار گرفته باشند نیز هنوز مقادیر به دست آمده از معادلات ۲-۱۵ و ۲-۱۶ در محاسبه ظرفیت تحمل بار محوری در رولربیرینگ‌های استوانه‌ای معتبراند. اطلاعات به دست آمده در مورد روانکاری هیدرودینامیک نشان داده است که برای ارتقاء پارامترهای روانکاری، توجه به طراحی لبه رولرهای بیرینگ بسیار اهمیت دارد.

۲-۳-۳ روانکاری الاستوهیدرودینامیکی

تئوری روانکاری الاستوهیدرودینامیکی (EHD) با تشکیل فیلم روانکار بین سطوح در تماس با تنش و تحت شرایط حرکت غلتشی با سرعت بالا سر و کار دارد. شکل ۲-۱۰، یک طرح شماتیک از فیلم روانکار و انتشار



شکل ۲-۱۰ فیلم روانکاری الاستوهیدرودینامیکی و انتشار فشار

فشار بین رولر و سطح تماس خطی و تحت شرایط الاستوهیدرودینامیکی است. رولر و سطح تماس تحت بار Q به میزان مشخصی تغییر شکل می‌دهند. در بیرینگ‌هایی که در حال دوران هستند، بین دو بدنه فاصله‌ای ایجاد می‌شود، زیرا روغن چسبیده به سطوح به داخل محل تماس آنها کشیده می‌شود. از آنجاکه لزجت روغن تحت فشار بالا به‌سرعت افزایش می‌یابد، در سرعت‌های مناسب یک فیلم روانکار انتقال دهنده بار می‌تواند تشکیل شود. روی منطقه وسیعی از سطوح تغییر شکل یافته، ضخامت فیلم روانکار به‌شدت تغییر می‌کند و فقط در سمت خروجی به میزان h_{min} می‌رسد. انتشار فشار در فیلم روانکار نشانداده شده در قسمت پایین شکل ۲-۱۰ و برای مقایسه، انتشار بیضی گون فشار مطابق تئوری هرتز با خط نازک کشیده شده است. در طرف ورودی، فشار فیلم روانکار بآرامی ایجاد شده و سپس تا رسیدن به ماکزیمم فشار هرتز p_0 در مرکز منطقه تماس بسرعت افزایش می‌یابد. سپس فشار شروع به کاهش می‌کند، جایی که فاصله دو قطعه تا میزان h_{min} کم شده است. در بارهای سنگین، انتشار فشار EHD مشابه انتشار فشار مطابق تئوری هرتز می‌شود. این مسئله به این خاطر است که تأثیرگذاری هیدرودینامیکی غالب است.

از این رو بروز ماکزیمم فشار نمایان‌تر و محل بروز آن دقیقاً به طرف مرکز منطقه تماس جابه‌جا می‌شود. حداقل ضخامت فیلم روانکار h_{min} برای تماس نقطه‌ای و خطی و برای روانکاری EHD به وسیله معادلات ۲-۱۶ تا ۲-۲۲ محاسبه می‌شود. برای تماس نقطه‌ای، توجه معطوف به میزان رانده شدن عرضی روغن روانکاری از فاصله بین دو سطح است.

با توجه به قوانین هامروک و داوسون، در نقطه تماس داریم :

(۲-۱۷)

$$h_{min} = 3.63U^{0.68}G^{0.49}\omega^{-0.073}(1-e^{-0.68k})\,R_r \quad (m)$$

با توجه به قانون داوسون، در تماس نقطه‌ای داریم :

$$h_{min} = 2.65U^{0.7}G^{0.54}\omega^{-0.13}\,R_r \quad (m) \qquad (۲-۱۸)$$

به همراه

$$U = \eta_0 V/(E'R_r) \qquad (۲-۱۹)$$

$$G = \alpha E' \qquad (۲-۲۰)$$

$$\omega = Q/(E'R_r^2) \qquad \text{برای تماس نقطه‌ای} \qquad (۲-۲۱)$$

$$\omega' = Q/(E'R_rL) \qquad \text{برای تماس خطی} \qquad (۲-۲۲)$$

که در آن :

h_{min} حداقل ضخامت فیلم روانکاری منطقه تماس غلتشی (m)،

U پارامتر سرعت،

G پارامتر جنس مواد،

ω پارامتر بار برای تماس نقطه‌ای،

ω' پارامتر بار برای تماس خطی،

e 2.71828،

K نسبت نیم محورهای سطوح تماس (a/b)،

α ضریب فشار-لزجت (m^2/N)،

η_0 لزجت دینامیک (Pa s)،

v سرعت دورانی میانگین $(v_1 + v_2)/2$ (m/s)،

v_1 سرعت جزء غلتنده (m/s)،

u_2 سرعت در نقطه تماس در رینگ داخلی و خارجی (m/s)،

E' مدول الاستیسیته موثر $E/[1-(1/m)^2]$ (N/m^2)

E مدول الاستیسیته، N/m^2، 2.08×10^{11} برای فولاد

$1/m$ ضریب پوآسون، 0.3 برای فولاد

R_x شعاع انحنای تقلیل یافته (m)

R_1 $r_1r_2/(r_1+r_2)$ در تماس با رینگ داخلی

R_2 $r_1r_2/(r_2-r_1)$ در تماس با رینگ خارجی

r_1 شعاع جزء غلتنده (m)

r_2 شعاع سطح تماس رینگ داخلی یا خارجی (m)

Q بار جزء غلتنده (N)

L طول فاصله یا طول مؤثر رولر (m)

تغییرات لزجت و سرعت، تأثیر شدیدی بر ضخامت فیلم روانکار دارند، درحالیکه فشار تأثیر بسیار کمی بر h_{min} دارد. به‌وسیله ضخامت فیلم روانکار محاسبه شده، می‌توان تشخیص داد که تحت شرایط داده شده، آیا فیلم روانکار با ضخامت کاملاً مناسب تشکیل خواهد شد یا نه. عموماً، حداقل ضخامت فیلم روانکار باید در محدودهٔ 1 μm تا چند دهم میکرومتر باشد، اما در شرایط ایده‌آل می‌توان به ضخامت چند میکرومتر نیز دست یافت.

۲-۳-۴ فیلم روانکاری در روانکاری با گریس

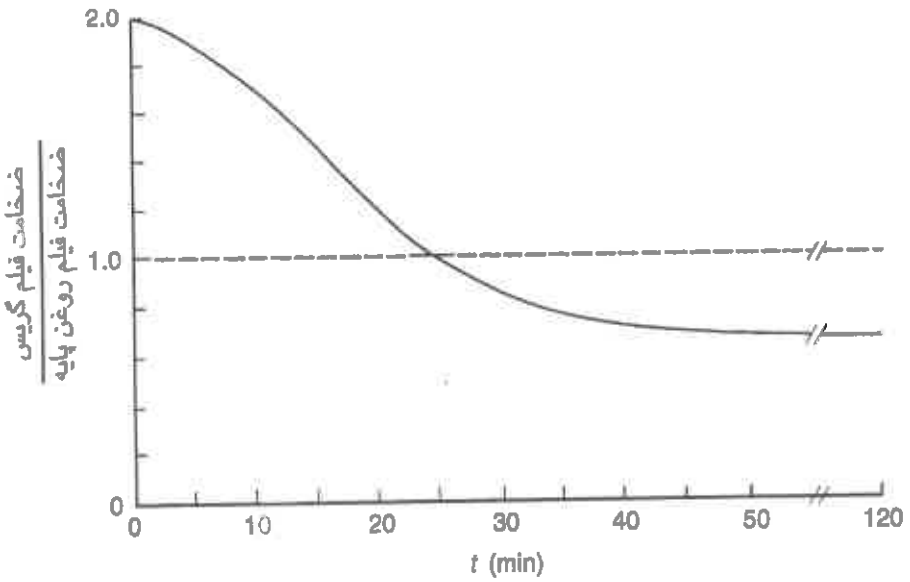
گریس‌های روانکاری شامل دو جزء اصلی هستند: قسمت اعظم آن روغن پایه و قسمت کمتر مواد غلیظ کننده می‌باشد. مشابه روغن‌های روانکاری، گریس‌های روانکاری محتوی مواد افزودنی ویژه می‌باشند (بخش ۲-۵-۱). تأثیر اصلی در روانکاری بیرینگ از جانب روغن پایه است، همان مقادیر کوچکی که به مرور زمان ازمواد غلیظ کننده جدا می‌شوند. اصول تئوری EHD در مورد روانکاری با گریس، صادق است. برای محاسبه نسبت لزجت ν/ν_1، مقدار لزجت کاری روغن پایه به کار می‌رود. برای یک حوزه محدود، مواد غلیظ‌کننده موجود در گریس، به تشکیل فیلم روانکار کمک می‌کنند. پس از چند بار دوران بیرینگ، فقط مقدار کمی از گریس به طور مؤثر در پروسه روانکاری شرکت دارد. با فرض درجه غلظت عادی برای گریس، معمولاً بخش عمده‌ای از گریس یا از بیرینگ بیرون زده می‌شود و در دو طرف بیرینگ تجمع می‌کند یا از طریق حلقه‌های آب‌بندی از نشیمنگاه بیرینگ خارج می‌شود. مقدار گریس باقیمانده در ناحیه دوران و یا چسبیده به داخل و خارج بیرینگ، به طور دائم مقادیر کوچکی از روغن موردنیاز برای روانکاری سطوح در تماس را از خود جدا ساخته و وارد فضای بین سطوح می‌کند. تحت بارهای ملایم، مقدار گریس باقیمانده بین نواحی تحت تماس غلتشی، برای بیش از یک دوره طولانی زمان کافی است.

نرخ آزاد شدن روغن گریس، به نوع گریس، لزجت روغن پایه، اندازه سطح جداکننده روغن، دمای گریس و تنش‌های فیزیکی اعمالی به گریس بستگی دارد. گریس‌هایی که روغن پایه خیلی غلیظی داشته باشند، نرخ آزادسازی روغن پایین‌تری دارند. در اکثر موارد، فقط به شرطی به روانکاری مناسب می‌توان دست یافت که بیرینگ و نشیمنگاه آن را تا حد خاصی از گریس پر کرد، به این ترتیب که یا در دوره‌های کوتاه مدت گریسکاری کرد و یا از گریس‌های نرم استفاده نمود.

شکل ۲-۱۱ نشاندهنده پیشرفت ضخامت فیلم روانکار به صورت تابعی از زمان کارکرد بیرینگ است. در هنگام شروع به کار بیرینگ، ماده غلیظ‌کنندهٔ گریس باعث می‌شود ضخامت فیلم روانکار در نواحی تماس به میزان کاملاً مشخصی بیشتر از ضخامت فیلم روانکار با روغن پایه باشد. فاصله گریس از سطح تماس و تغییرات گریس باعث می‌شود، به سرعت ضخامت فیلم به میزان کمتر از ضخامتی که می‌توان با روانکاری کافی با روغن پایه به‌دست آورد، کاهش یابد.

با وجود کاهش ضخامت فیلم، در فاصله بین دوره‌های روانکاری بیرینگ، روانکاری کارآمد و مناسبی در سطوح تماس بیرینگ باقی می‌ماند. ماده غلیظ‌کننده و مواد افزودنی در گریس تأثیر قاطعی بر روانکاری داشته و بنابراین، *نباید* انتظار هیچگونه کاهش عمر مفیدی را داشت. برای فاصله زمانی روانکاری طولانی، باید گریس بتوانَد فقط به مقدار موردنیاز، روغن پس دهد. در این صورت، جداسازی روغن برای یک دوره طولانی مدت، تضمین می‌شود.

تأثیر ماده غلیظ‌کننده در روانکاری، در کاربرد بیرینگ‌های غلتشی در محدودهٔ اصطکاک مرکب، کاملاً آشکار و مشهود می‌شود. گریس‌های بدون مواد افزودنی EP (فشار بیش از حد) بیرینگ را در مقابل سایش به‌خوبی محافظت می‌کنند البته اگر ماده غلیظ‌کنندهٔ آنها برای کاربرد موردنظر مناسب باشد. وجود مقادیر بیشتری از ماده غلیظ‌کننده در گریس، باعث افزایش نقش و همکاری آن در تأثیرگذاری بر روانکاری دارد. یک مقایسه بین روانکاری با روغن و روانکاری با گریس با روغن پایه یکسان تحت اصطکاک مرکب، نشاندهندهٔ تأثیر ماده غلیظ‌کننده است. سایش در روانکاری با روغن، بیشتر از روانکاری با گریس است.



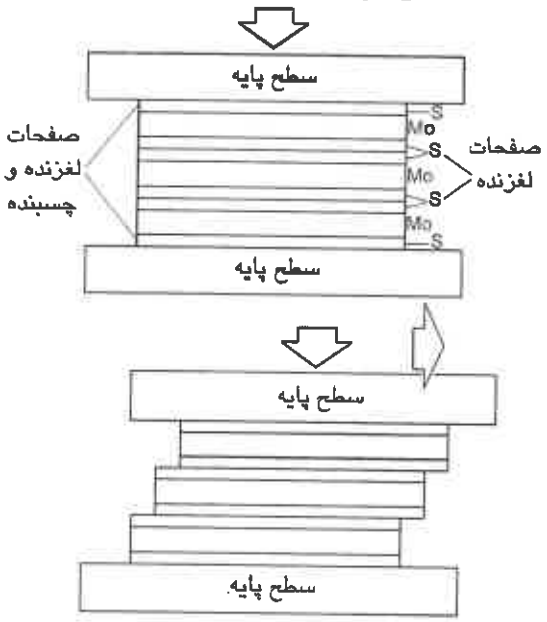
شکل ۲-۱۱ نسبت ضخامت فیلم گریس به‌ضخامت فیلم روغن پایه به شکل تابعی از زمان کارکرد

۲-۳-۵ روانکاری با روانکار خشک

اصلی‌ترین تأثیر روانکاری خشک، جبران روانکار سطح است.

این روش باعث کاهش عمق مؤثر زبری سطوح می‌شود. بسته به بار و نوع جنس، به غیر از اینکه روانکار خشک بر روی سطح فلز ساییده می‌شود، امکان دارد حین لغزش و غلتش روی سطح، واکنش شیمیایی با سطح آغاز کند. در روانکارهای خشک با ساختار لایه- شبکه، مثل MoS_2، ورقه نازک روانکار خشک تحت فشار نسبت به لایه دیگر می‌لغزد. بنابراین، لغزش در جایی دور از سطوح فلزی یعنی در داخل لایه‌های روانکار رخ می‌دهد (شکل ۲-۱۲). لایه تراکم‌پذیر روانکار خشک، فشار را به شکل یکنواختی در سطح بزرگی پخش می‌کند. روانکارهای خشک بدون ساختار لایه - شبکه شامل : فسفات‌ها، اکسیدها، هیدرواکسیدها و اکثر سولفیدها می‌باشد. بقیهٔ روانکارهای خشک، لایه‌هایی از فلز نرم هستند که به دلیل استحکام برشی پایین آنها، رفتار اصطکاکی مثبتی دارند. لایه روانکار خشک تحت فشارهای غلتشی و لغزشی رفته رفته ساییده شده و فرسوده می‌شود. عموماً عمر بیرینگ با روانکاری خشک نسبت به روانکاری با روغن یا گریس به شکل قابل توجهی کوتاه‌تر است، اما با روش روانکاری انتقالی روانکار خشک می‌توان به نتایج بهتری دست یافت (ر.ک. به بخش ۲-۴-۳).

وجود روغن و گریس بسته به رفتار سطح فلزی و نوع روانکار خشک به کار رفته، عمر مفید لایه‌های روانکار خشک را کاهش می‌دهد. لایه‌های لاکی لغزنده نرم شده و ساختارشان تغییر می‌کند، این مسئله باعث افزایش اصطکاک بین سطوح می‌شود. روانکارهای بسیاری به همراه مواد افزودنی از جنس روانکار خشک خصوصاً از جنس MoS_2 در دسترس می‌باشند. در معمولی‌ترین نوع مصرف، افزودن 0.5 تا 3.0 درصد وزنی از MoS_2 کلوئیدی در روغن و 1 تا 10 درصد وزنی در گریس است. جهت افزایش قابل توجه بازده در روانکاری با روغن‌های غلیظ، نیاز به تراکم بیشتری از دی سولفید مولیبدن می‌باشد. پراکندگی این ماده که ذرات آن به ابعاد کمتر از 1μm هستند، بسیار پایدار است و ذرات پراکنده همواره به صورت معلق باقی می‌مانند. در ماشین‌آلاتی که روغن روانکاری در یک مدار جریان دارد فقط باید از فیلترهایی با ابعاد شبکه بزرگتر از 60 μm استفاده شود، در غیر این صورت، پس از مدت کوتاهی MoS_2 ته نشین خواهد شد.



شکل ۲-۱۲ مکانیزم کاری روانکارهای جامد با ساختار لایه- شبکه، مثل MoS_2

روانکارهای خشک افزوده شده به روغن یا گریس فقط در جایی که سطوح تماس کاملاً به وسیلهٔ فیلم روغن از هم جدا *نشده* باشند نقش دارند (روانکاری مرکب)، اصطکاک و سایش در سطوح تماس به کمک این مواد کاهش می‌یابد. روانکار خشک در روغن می‌تواند در مدت زمانی که سطوح در فاز آب‌بندی هستند، مفید باشد، در این مدت به خاطر زبری سطوح فیلم روغن روانکاری به صورت منقطع در فاصله سطوح تشکیل می‌شود. در بیرینگ‌های سرعت بالا، مواد افزودنی از جنس روانکار خشک، می‌تواند تأثیر منفی بر کیفیت روانکاری داشته باشد، زیرا این مواد در سرعت‌های دورانی بالا باعث افزایش اصطکاک و دما می‌شوند. در بخش‌های ۲-۴-۳، ۲-۵-۳ و ۲-۶-۳ اطلاعات بیشتری در مورد روانکاری با روانکار خشک آورده شده است.

۲-۳-۶ عملیات روی سطح تماس و مواد ویژه

در برخی شرایط کاری، با روش‌های روانکاری شرح داده شده در بالا، *نمی‌توان* به‌وسیله فیلم روانکار بین سطوح در تماس غلتشی فاصله کافی را ایجاد کرد. در این موارد، عملیات سطحی ویژه یا به کارگیری مواد ویژه اصطکاک را کاهش داده و باعث افزایش قابلیت کاری در شرایط به کارگیری سریع بیرینگ می‌گردد. از جمله عملیات سطحی پراهمیت برای اجزاء بیرینگ‌های غلتشی عبارتند از: جلادهی، ضدزنگ گردانی، پوشش دهی کرم با تراکم کم (TDC)، رسوب فیزیکی بخار (PVD)، رسوب شیمیایی بخار (CVD) و روش کاشت یونی. به استثنای کاشت یونی، ضخامت این پوشش‌ها به چند میکرومتر می‌رسد. روش جلادهی در قطعاتی که تحت تماس لغزشی بالایی هستند به کار می‌رود. رولرهای جلا خورده را، در شرایط *نامطلوب* روانکاری، در رولربیرینگ‌های استوانه‌ای کامل استفاده می‌کنند.

روش پوشش فسفاته منگنز یکی از دو روش متداول ضدزنگ گردانی است. در مقایسه با روش پوشش فسفاته روی، روش پوشش فسفاته منگنز، کریستال‌های بزرگتر تولید می‌کند و تحمل فشارهای بالاتری را دارد. در نتیجه، از روش پوشش فسفاته منگنز، عمدتاً برای بهبود خاصیت آب‌بندی بیرینگ‌های غلتشی استفاده می‌شود. توانایی محافظت این پوشش در مقابل خوردگی قطعه پایین است. روش پوشش فسفاته روی روش دوم ضدزنگ گردانی است. این روش یک لایه کامل از بلورهای سوزنی روی قطعه ایجاد می‌کند که ارائه‌دهندهٔ محافظت بهتری در مقابل خوردگی می‌باشد، ولی این پوشش عموماً در کیفیت دورانی بیرینگ‌های غلتشی *تأثیر سودمندی ندارد*.

روش پوشش‌دهی کرم با تراکم کم امروزه از اهمیت بالایی برخوردار است. از این روش در بعضی از بیرینگ‌های با مقطع باریک (شکل ۱-۷۳) استفاده می‌شود. تحت شرایط نامناسب روانکاری مشابه، بیرینگ‌های پوشش داده شده با روش TDC، نسبت به بیرینگ‌های پوشش داده *نشده* نرخ سایش بسیار پایین‌تری داشته و عمر طولانی‌تری دارند. بسته به میزان اعمال تنش، عمر مفید بیرینگ می‌تواند چند برابر عمر بیرینگ‌های پوشش داده *نشده* باشد. روش‌های PVD و CVD تأثیری مشابه روش پوشش دهی کرم با تراکم کم را دارند.

در روش کاشت یونی، یون‌ها به ضخامت کسر کوچکی از

میکرومتر روی سطح موردنظر کاشته می‌شوند و تغییر ابعادی قابل توجهی ایجاد نمی‌کنند. هزینه‌های روش‌های کاشت یون، PVD و CVD، این نکته را متذکر می‌شوند که از این روش‌ها فقط در موارد استثنایی استفاده می‌شود. قطعات بیرینگ‌های غلتشی که از مواد سرامیکی ساخته می‌شوند، می‌توانند اصطکاک را کاهش داده و باعث بهبود قابلیت کار در شرایط به کارگیری سریع شوند. بین مواد سرامیکی و فولاد میل ترکیبی بسیار کمی وجود دارد. این مسئله تأثیر مثبتی بر روی کیفیت دوران در جاهایی که گسترش فیلم روانکار ضعیف بوده و لایه‌های مرزی کاهنده اصطکاک وجود *نداشته* باشند، دارد.

۲-۴ سیستم‌های روانکاری

هنگام طراحی یک ماشین جدید، باید ساده‌ترین سیستم روانکاری ممکن را برای بیرینگ‌های غلتشی انتخاب کرد. این سیستم می‌تواند روانکاری با گریس یا روغن باشد. در موارد ویژه، بیرینگ‌ها توسط روانکارهای جامد یا خشک، روانکاری می‌شوند. در جدول ۲-۶ یک بررسی اجمالی از سیستم‌های مرسوم روانکاری ارائه شده است.

۲-۴-۱ روانکاری با گریس

در 90% از بیرینگ‌های غلتشی از سیستم روانکاری با گریس استفاده می‌شود، این روش مزایای بسیاری دارد :

- قیمت مناسب، طراحی ساده،
- گریس باعث افزایش خاصیت آب‌بندی می‌شود،
- دوره سرویس نسبتاً طولانی و بی‌نیازی به تعمیر به دلیل عدم نیاز به تجهیزات روانکاری،
- مناسب برای اندیس سرعت پایین و بالا (nd_m تا 1.8×10^6 mm/min، nd_m = پارامتر حاصل از ضرب سرعت در قطر متوسط بیرینگ)،
- دوره زمانی معلوم تا زمان خرابی بیرینگ بعد از قطع روانکاری در سرعت‌های پایین و
- ممان اصطکاکی پایین.

هنگام طراحی یک آرایش از بیرینگ که باید با گریس روانکاری شوند، باید تصمیم خود را راجع به اینکه آیا لازم است این بیرینگ‌ها دوباره گریسکاری شوند یا خیر بگوییم، و اگر مثبت بود مدت زمان دوره‌های گریسکاری و مقدار گریس لازم را باید مشخص کرد (شکل ۲-۲۳). در شرایط کاری و محیطی عادی، خیلی اوقات یک بار روانکاری برای کل عمر مفید بیرینگ کافی است. اگر تنش‌های بالا بر بیرینگ اعمال می‌شود (سرعت، دما، بار) باید دوره‌های مناسب روانکاری مجدد، برنامه‌ریزی شود. برای این منظور، باید محفظه انبار گریس، مجاری انتقال و محل جمع‌آوری گریس‌های کار کرده در ماشین طراحی شوند. برای دوره‌های کوتاه مدت گریسکاری، باید پمپ گریس و سوپاپ گریس نیز در نظر گرفته شود. اصطلاحاً بیرینگ‌های پاک، مثل بیرینگ‌های مجهز به حلقه آب‌بندی و گریسکاری شدهٔ مورد استفاده در چرخدنده‌ها، اضافه بر گریس داخل خود، توسط روغن جعبه دنده و از طریق فاصله باریک بین حلقه آب‌بندی و بدنهٔ بیرینگ، بدون اینکه تراشه‌ها و براده‌های جدا شده از چرخدنده‌ها داخلشان نفوذ کنند، نیز روانکاری می‌شوند.

جدول ۲-۶ روش‌های روانکاری

روش روانکاری	تجهیزات روانکاری	ملیاس‌های طراحی	اندیس سرعت قابل دستیابی nd_m(mm/min)[a]	انواع بیرینگ‌های مناسب، چگونگی عملکرد
روانکار خشک				
روانکاری برای کل عمر مفید	–	–	≈1500	عمدتاً بلبیرینگ‌های شیار عمیق
با روانکاری مجدد	–	–		
گریس				
روانکاری برای کل عمر مفید	–	–	$\approx 0.5\times10^6$	انواع بیرینگ‌ها
با روانکاری مجدد	پرس دستی، تفنگ گریس	سوراخ‌های ورودی، شیر گریس (اگر لازم باشد)، محفظه ذخیره گریس‌های مستعمل	$\approx 1\times10^6$ برای گریس‌های ویژه مناسب، دوره‌های زمانی روانکاری مجدد مطابق شکل ۲-۲۳	بستگی به سرعت دورانی و نوع گریس دارد، به استثنای رولربیرینگ‌های کروی کف گرد. گریس‌های ویژه با اصطکاک و آلودگی صوتی کم
روانکاری به صورت اسپری	تجهیزات روانکاری مرکزی[b]	لوله‌ها یا سوراخ‌های تغذیه محفظه ذخیره گریس‌های مستعمل		
روغن (مقادیر بیشتر)				
روانکاری در استخر روغن	میله عمق سنج لوله، درجه نشانگر سطح روغن	فضای کافی نشیمنگاه برای حجم روغن تعیین شده، سوراخ‌ای خروجی جریان اضافی متصل به تجهیزات کنترلی	$\approx 0.5\times10^6$	انواع بیرینگ‌ها، قابلیت جذب آلودگی صوتی با توجه به لزجت، احتمال افت انرژی به دلیل افزایش اصطکاک در اثر
روانکاری با روغن به‌صورت مدار بسته به کمک عملکرد پمپاژی بیرینگ یا توسط تجهیزات ویژه انتقال روانکار		سوراخ‌های تأمین روغن، فضای کافی نشیمنگاه برای حجم روغن تعیین شده، تناسب تجهیزات انتقال روغن با لزجت روغن و سرعت دورانی (عملکرد پمپاژ روغن توسط بیرینگ)	باید به‌طور جداگانه محاسبه شود	تلاطم روغن، خنک‌کاری مناسب و جداسازی اجزاء کوچک مواد ناشی از سایش با جریان مدار بسته روغن و روانکاری با جت روغن

جدول ۲-۶ روش‌های روانکاری *(ادامه)*

روش روانکاری	تجهیزات روانکاری	مقیاس‌های طراحی	اندیس سرعت قابل دستیابی nd_m(mm/min)[a]	انواع بیرینگ‌های مناسب، چگونگی عملکرد
روانکاری با مدار روغنکاری	تجهیزات مدار روغنکاری[b]	سوراخ‌های ورودی و خروجی روغن با اندازه مناسب	$\approx 1\times10^6$	
روانکاری با جت روغن	تجهیزات مدار روانکاری با چند نازل[e]	نازل‌های تزریق مستقیم روغن، سوراخ‌های خروجی روغن با اندازه مناسب	بیش از 4×10^6	
روغن (حداقل حجم)				
روانکاری با قطرات متناوب روغن، تغذیه چکه‌ای روغن	تجهیزات روانکاری مرکزی[b] دستگاه روانکار تغذیه چکه‌ای، تجهیزات اسپری روغن	سوراخ‌های خروجی	$\approx 1.5\times10^6$ بسته به نوع بیرینگ، لزجت روغن، حجم روغن طراحی	تمام انواع بیرینگ‌ها خاصیت جذب آلودگی صوتی بسته به لزجت روغن، اصطکاک وابسته به حجم و لزجت روغن
روانکاری با بخار روغن	تجهیزات روانکاری با بخار روغن[c] جداساز روغن (اگر نیاز باشد)	تجهیزات استخراج (اگر لازم باشد)		
روانکاری با مخلوط هوا و روغن	تجهیزات روانکاری با مخلوط هوا – روغن	تجهیزات استخراج (اگر لازم باشد)		

a بستگی به نوع بیرینگ و شرایط مونتاژ دارد.

b دستگاه روانکاری مرکزی شامل: پمپ، مخزن، فیلتر، خطوط لوله، شیرها، محدودکننده‌های جریان است. دستگاه مدار روغنکاری اگر لازم باشد، لوله برگشت روغن و خنک‌کننده نیز خواهد داشت (شکل‌های ۲-۱۳، ۲-۱۴). دستگاه روانکاری مرکزی برای نرخ‌های دبی روغن کوچک (بین $5\ mm^3$ تا $10\ mm^3$ در هر کورس) مجهز به شیرهای اندازه‌گیری نیز می‌شود.

c دستگاه روانکاری با بخار روغن شامل: مخزن، تولیدکننده بخار، خطوط لوله، نازل‌های کمپرس دوباره، واحد کنترل و واحد تأمین هوای فشرده می‌باشند (شکل ۲-۱۵).

d دستگاه روانکاری مرکب هوا – روغن، شامل پمپ، مخزن، خطوط لوله، تجهیزات اندازه‌گیری حجمی هوا – روغن، نازل‌ها، واحد کنترل و واحد تأمین هوای فشرده می‌باشد (شکل ۲-۱۶)

e تعداد و قطر نازل‌ها (شکل ۲-۳۸).

۲-۴-۲ روانکاری با روغن

روانکاری با روغن در اجزاء ماشین‌هایی که با روغن روانکاری می‌شوند و یا جایی که باید روانکار، حرارت تولید شده در بیرینگ کاهش یابد، توصیه می‌شود. در سرعت‌های بالا و یا در بارهای بالا و یا ترکیبی از هر دو شرایط و یا اگر بیرینگ در تماس با منبع حرارتی خارجی است انتقال و دفع حرارت لازم است. سیستم‌های روانکاری با روغن با مقادیر کم روغن (روانکاری با روغن در جریان)، که به شکل‌های تغذیه چکه‌ای روغن، روانکاری با اسپری یا بخار روغن و یا سیستم‌های روانکاری مخلوط روغن- هوا طراحی شده‌اند، باعث به کارگیری دقیق نرخ دبی روغن موردنیاز می‌شوند. این مورد، مزایایی از قبیل دوری جستن از تلاطم روغن و ایجاد اصطکاک کم در بیرینگ را ارائه می‌دهد.

اگر روغن، توسط هوا جابه‌جا شود، روغن را می‌توان دقیقاً به منطقه تعیین شده تغذیه کرد. جریان هوا خاصیت آب‌بندی نیز دارد. به کمک جت روغن یا روانکاری تزریقی، می‌توان مقادیر بیشتری از روغن را برای تأمین مستقیم روغن تمامی سطوح تماس بیرینگی که با سرعت بالا دوران می‌کند، به کار برد. این مسئله باعث خنک‌کاری بهینه بیرینگ نیز می‌شود.

۲-۴-۳ روانکاری خشک

در مواردی که روانکار جامد یا خشک به سطوح تماس چسبیده شده باشد، روانکاری به صورت یک بار برای کل عمر مفید بیرینگ خواهد بود، مثل لاک‌های لغزشی و یا زمانی که لایه روانکار به خاطر شرایط کاری مساعد فقط اندکی سائیده شده باشد. اگر از خمیر یا پودر روانکار خشک استفاده شود، امکان روانکاری دوباره وجود دارد. هرچند، روانکاری اضافی، مانع دوران نرم می‌شود. با روانکاری انتقالی، اجزاء غلتنده مقادیر کمی از روانکار جامد را برداشته و به ناحیه تماس منتقل می‌کنند. روانکارهای جامد هم می‌توانند به همراه اجزاء غلتنده در راستای غلتش تحت عنوان اجرام جامد دوران نمایند (روانکاری‌با مولیکوت (Molykite) SCL، ر.ک. به بخش ۲-۵-۳) و هم در موارد ویژه، به‌عنوان آلیاژ داخل مواد قفسه‌ها به کار روند. روانکاری انتقالی بسیار مفید است و نسبتاً مدت زمان کارکرد بالایی دارد. این روش تضمین کنندهٔ روانکاری مکرر و مداوم تا اتمام روانکار جامد است.

۲-۴-۴ انتخاب یک سیستم روانکاری

همانگونه که تاحدودی در بخش‌های ۲-۴-۱ تا ۲-۴-۳ توضیح داده شد، انتخاب سیستم روانکاری به کمک چند فاکتور امکانپذیر است :

- شرایط کاری برای بیرینگ‌های غلتشی،
- خواسته‌های ما از کیفیت دوران، آلودگی صوتی، اصطکاک و دما در بیرینگ،
- نیازهای ما در کاربرد با اطمینان، مثل ایمن بودن در مقابل خرابی پیش از موعد ناشی از سایش، خستگی یا خوردگی و ایمنی در مقابل صدمات ناشی از مواد خارجی نفوذ کرده به داخل بیرینگ (مثل آب، شن) و
- هزینه نصب و تعمیرات یک سیستم روانکاری.

شرایط اولیه مهم برای کاربردهای با قابلیت اطمینان بالا، یک سیستم تأمین بدون مانع روانکار برای بیرینگ و حضور پایدار روانکار در تمام سطوح تماس است.

کیفیت تأمین روانکار در سیستم‌های روانکاری مختلف، مشابه نیست یک سیستم تأمین روانکار که تحت کنترل باشد، بسیار مطمئن است. اگر بیرینگ‌ها توسط مخزن روغن روانکار شوند، درجه نشاندهندهٔ سطح روغن برای تضمین استانداردهای بالای ایمنی در کار، باید به‌طور مرتب چک شود.

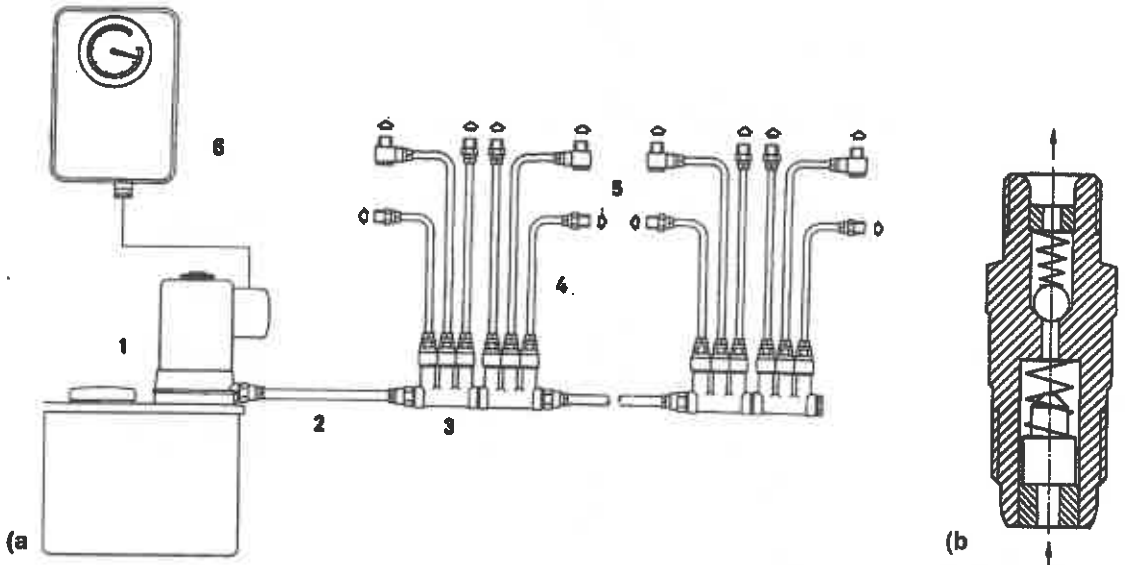
بیرینگ‌هایی که با گریس روانکاری می‌شوند، اگر طول مدت دوره روانکاری مجدد (و یا در بیرینگ‌هایی که برای کل عمر مفید بیرینگ یک بار گریسکاری می‌شوند، عمر مفید در نظر گرفته شده برای بیرینگ) از عمر مفید کاری گریس بیشتر نباشد با قابلیت اطمینان مناسبی کار می‌کنند. اگر روانکار در دوره‌های کوتاهی با روانکار تازه تعویض شود، قابلیت اطمینان کارکرد بیرینگ، به عملکرد مناسب روانکاری اجزاء بیرینگ بستگی خواهد داشت.

در بیرینگ‌های پاک قابلیت اطمینان کارکرد بیرینگ تا به پایان رسیدن عمر مفید گریس به خاطر تأثیر مثبت روانکاری از طریق جعبه‌دنده، تضمین شده است. در جدول ۲-۶ اطلاعات مشروحی از سیستم‌های مرسوم روانکاری آورده شده است.

۲-۴-۵ چند مثال

تجهیزات روانکاری مرکزی

تجهیزات روانکاری مرکزی (شکل ۲-۱۳) برای سیستم‌های روانکاری در جریان و مدار بسته به کار می‌روند. یک پمپ، که به‌صورت تناوبی توسط یک واحد کنترل روشن می‌شود، روغن یا گریس شبه سیال را به شیرهای تقسیم انتقال می‌دهد. این شیرها حجم‌های

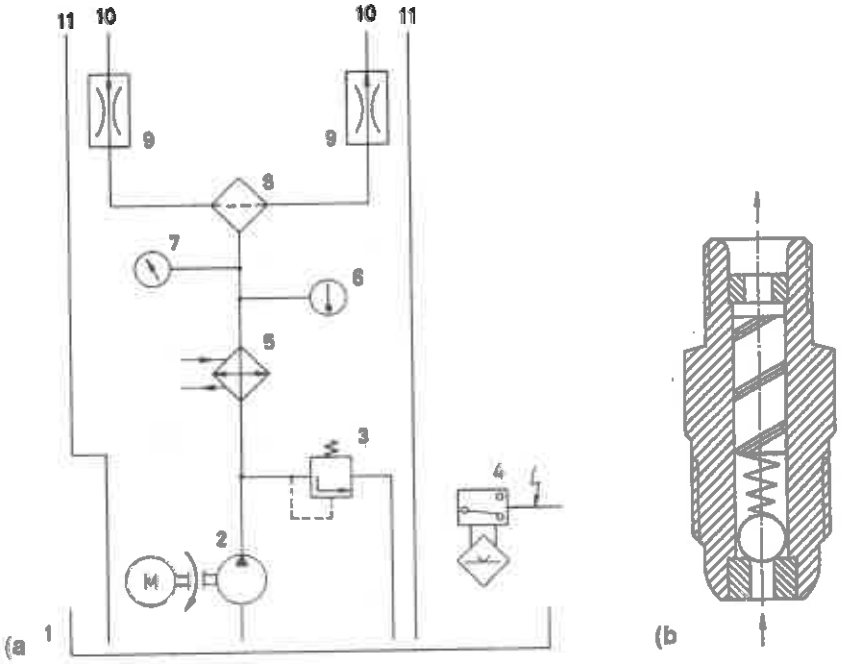


شکل ۲-۱۳ a) طرح شماتیک یک مجموعه روانکاری مرکزی (یک خطه) : 1 پمپ، 2 لوله اصلی، 3 شیر تقسیم، 4 لوله‌های ثانویه مرتبط به مناطقی که نیازمند روانکاری هستند، 5 خروجی‌های روانکار، 6 تجهیزات کنترل. b) نمونه‌ای از یک شیر تقسیم

mm^3 500 - 5 بر هر کروس را انتقال می‌دهند. یک پمپ واحد نیازهای متفاوت چند بیرینگ موجود را به حجم‌های مشخصی از روغن یا گریس شبه سیال تأمین می‌نماید. این کار با تنظیم سیکل‌های تغذیه و حجم‌های انتقالی توسط شیرها امکانپذیر است. برای گریس‌های در کلاس نفوذپذیری 2 یا 3، سیستم‌های پمپاژ دو خطه مناسب‌اند. در سیستم‌های چند خطه، هر واحد پمپاژ، روغن یا گریس یک بیرینگ را تأمین می‌نماید.

سیستم مدار بسته جریان روغن

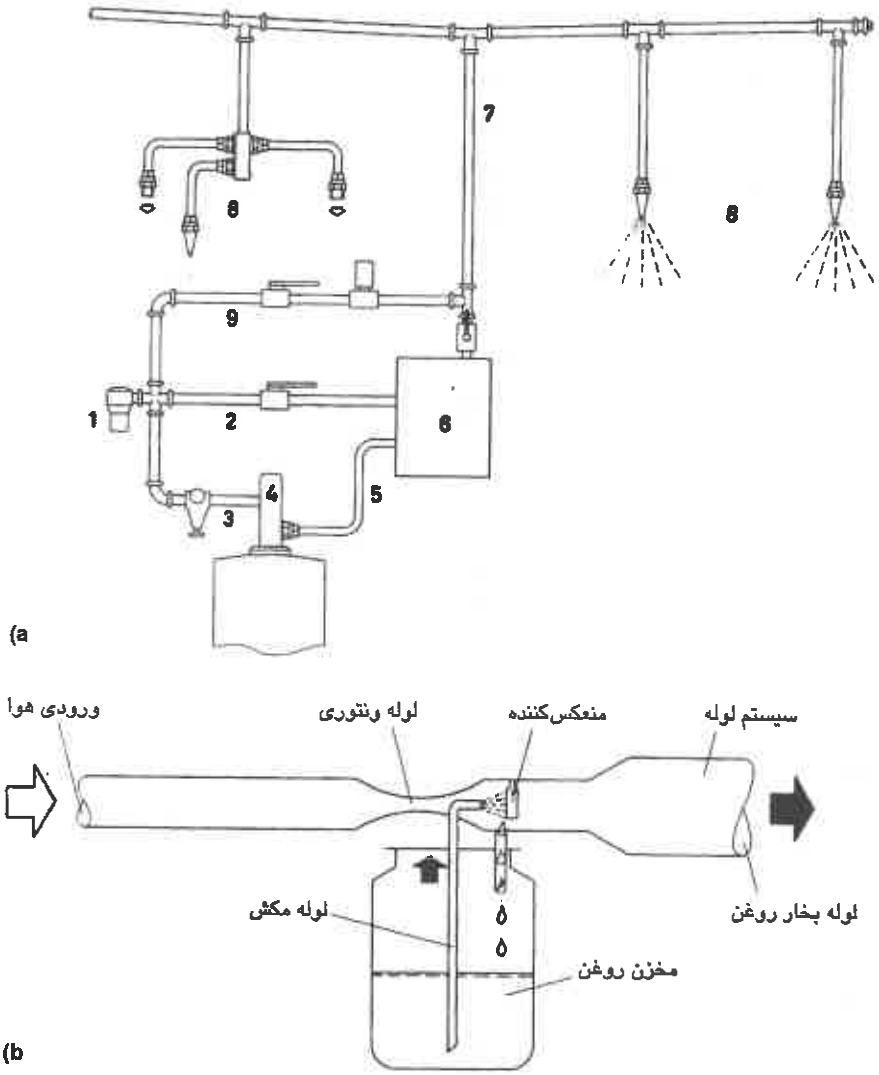
اگر نرخ دبی روغن بیشتری را برای روانکاری مدار بسته نیاز داشته باشیم، می‌توان روغن را به چند قسمت تقسیم کرد و با چند محدودکنندهٔ جریان انتقال داد، زیرا اگر از یک مسیر استفاده کنیم امکان دارد حجم روغن تغذیه شده به بیرینگ‌ها، اندکی تغییر کند. از محدودکننده‌های حجم می‌توان چندین لیتر روغن عبور داد (برای روانکاری همراه با خنک‌کاری). با توجه به مقدار روغن موردنیاز و نیاز به قابلیت اطمینان کاری، سیستم مدار بسته (شکل ۲-۱۴) به یک شیر اطمینان (محدود کننده فشار)، رادیاتور خنک‌کننده، گیج فشار، دماسنج، درجه ارتفاع روغن و گرم‌کن مخزن مجهز شده است. نرخ جریان روغن در بیرینگ، به لزجت روغن و درنتیجه به دمای روغن بستگی دارد.



شکل ۲-۱۴ a) طرح‌شماتیک از سیستم روانکاری مدار بسته: 1 مخزن، 2 پمپ روغن، 3 شیر اطمینان، 4 کنترل الکتریکی سطح روغن در مخزن، 5 خنک‌کننده، 6 دماسنج، 7 گیج فشار، 8 فیلتر، 9 محدودکنندهٔ جریان قابل تنظیم، 10 خروجی روانکار، 11 لوله برگشت روغن. b) محدود کننده جریان به همراه شیر یک‌طرفه

سیستم روانکاری با اسپری روغن

هوای فشرده که در یک فیلتر هوا پاک شده است، از میان یک تیوپ ونتوری گذشته و باعث مکش روغن از طریق لوله مکش که به مخزن روغن متصل است می‌شود. بخشی از روغن به‌صورت گرد درآمده و به شکل بخار و ذرات ریز خارج می‌شود (**شکل ۲-۱۵**).



شکل ۲-۱۵ a) طرح شماتیک یک سیستم روانکاری با بخار روغن: 1 فیلتر هوا، 2 لوله تأمین هوا، 3 کنترل فشار، 4 پمپ، 5 لوله اصلی، 6 واحد پودرکننده روغن، 7 لوله بخار روغن، 8 نازل‌های متصل به نقاط موردنظر برای روانکاری، 9 لوله هوا. b) طرح شماتیک از واحد پودرکننده روغن (لوله ونتوری)

قطرات بزرگتر برمی‌گردند. اندازهٔ ذرات بخار روغن بین 2 – 0.5 µm است. بخار روغن را می‌توان به‌راحتی از داخل لوله گذراند ولی این بخار خصوصیات چسبندگی ضعیفی دارد. از این رو، لوله انتقال بخار در انتها به یک نازل ختم می‌شود، که در آنجا ذرات میکرونی روغن تشکیل قطرات بزرگتر را می‌دهد و این قطرات توسط جریان هوا به داخل بیرینگ فرستاده می‌شوند.

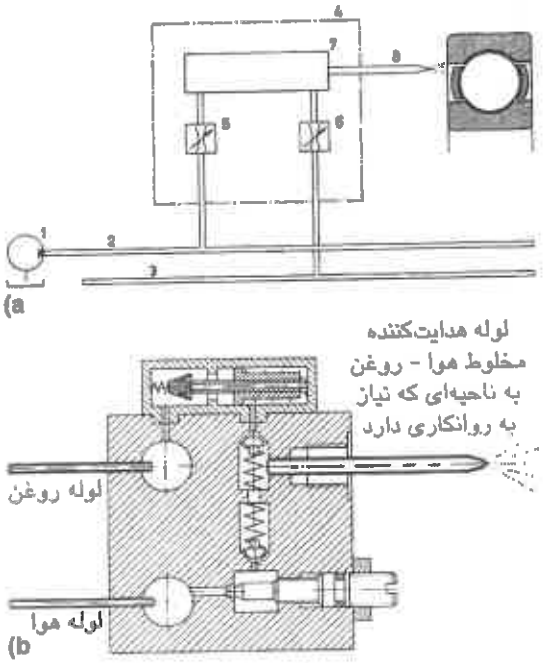
در بعضی موارد، بخار روغن، کاملاً به قطرات درشت تبدیل نشده و توسط هوا به خارج از بیرینگ و به محیط اطراف منتقل می‌شود. بخار روغن یک آلوده‌کننده هوا محسوب می‌شود.

در روانکاری با بخار روغن از روغن‌هایی با درجه لزجت ISO VG 460 به بالا استفاده می‌شود. روغن‌های غلیظ را باید قبل از پودرکردن حرارت داد، که در این‌صورت لزجت آنها به مقادیر پایین‌تر از 300 mm²/s خواهد رسید.

سیستم روانکاری مخلوط هوا – روغن

در یک واحد مخلوط‌کننده هوا- روغن (شکل ۲-۱۶)، روغن به‌صورت مقطعی و دوره‌ای، توسط یک شیر تنظیم‌کننده، وارد جریان هوای بدون وقفه‌ای می‌شود. یک واحد نشانگر و کنترل، پمپ روغن را به صورت تناوبی روشن می‌کند. روغن تزریق شده به‌راحتی توسط جریان هوا در داخل لوله به محل قرارگیری بیرینگ منتقل می‌شود. توصیه می‌شود که لوله انتقال مخلوط هوا- روغن، از جنس لاستیکی شفاف باشد تا بتوان جریان روغن را مشاهده کرد. لوله لاستیکی باید قطر داخلی 4-2 mm و حداقل طول 400 mm داشته باشد تا تأمین دائمی روغن تضمین شود.

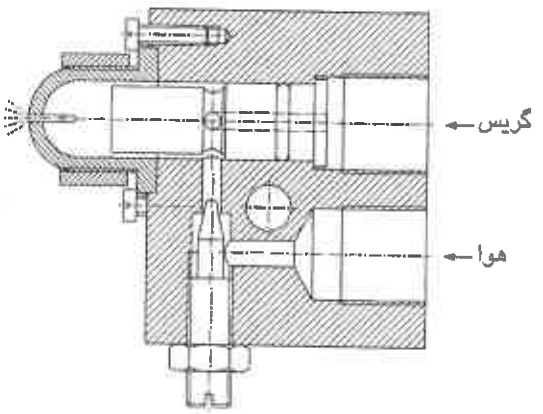
باید از تشکیل بخار روغن شدیداً دوری جست. از روغن‌هایی با درجه لزجت ISO VG 1500 به‌بالا (لزجت در دمای محیط تقریباً در دمای محیط تقریباً برابر با 7000 mm²/s می‌توان استفاده کرد. در مقایسه با روانکاری با بخار روغن، روانکاری با مخلوط هوا- روغن مزایای بهتری ازجمله چسبندگی بهتر قسمت اعظمی از ذرات روغن به بیرینگ و باقی ماندن بخش عمده‌ای از آن در بیرینگ، را دارد. درنتیجه فقط مقادیر بسیار کمی از روغن به همراه هوای خروجی از بیرینگ خارج می‌شوند.



شکل ۲-۱۶ a) طرح شماتیک از یک سیستم روانکاری مخلوط هوا- روغن (مطابق طرح Woemer) : 1 پمپ روغن اتوماتیک، 2 لوله روغن، 3 لوله هوا، 4 واحد مخلوط‌کننده هوا- روغن، 5 اجزاء کنترل دبی روغن، 6 اجزاء کنترل دبی هوا، 7 محفظه اختلاط، 8 لوله عبور مخلوط هوا- روغن. b) واحد مخلوط‌کننده هوا- روغن

روانکاری با اسپری روغن و گریس

لوازم موردنیاز روانکاری به صورت اسپری کاملاً مشابه تجهیزات روانکاری با مخلوط هوا- روغن است. یک واحد کنترل، یک شیر سولنوئیدی را برای جریان یافتن هوا باز می‌کند. فشار هوا یک شیر یک طرفه پنوماتیکی مربوط به روانکار را برای مدت زمان پالس اسپری، باز می‌کند. به وسیله یک فشار روانکاری مرکزی، روانکار به داخل مخلوط‌کنندهٔ هوا - روغن تغذیه می‌شود (شکل ۲-۱۷) و از آنجا توسط جریان هوا خارج می‌شود. شکل اسپری تولید شده به شکل و ابعاد سوراخ خروجی بستگی دارد. برای این کار به فشار هوای 1-2 bar (100 – 200 kPa) نیاز است. بهترین شکل اسپری تولیدی در فشار 1-5 bar (100 – 500 kPa) به وجود می‌آید. گریس‌هایی با کلاس غلظت 000 تا 3 و روغن‌هایی با کلاس لزجت بیش از ISO VG 1500 (لزجت در دمای محیط تقریباً 7000 mm^2/s) را می‌توان اسپری نمود.



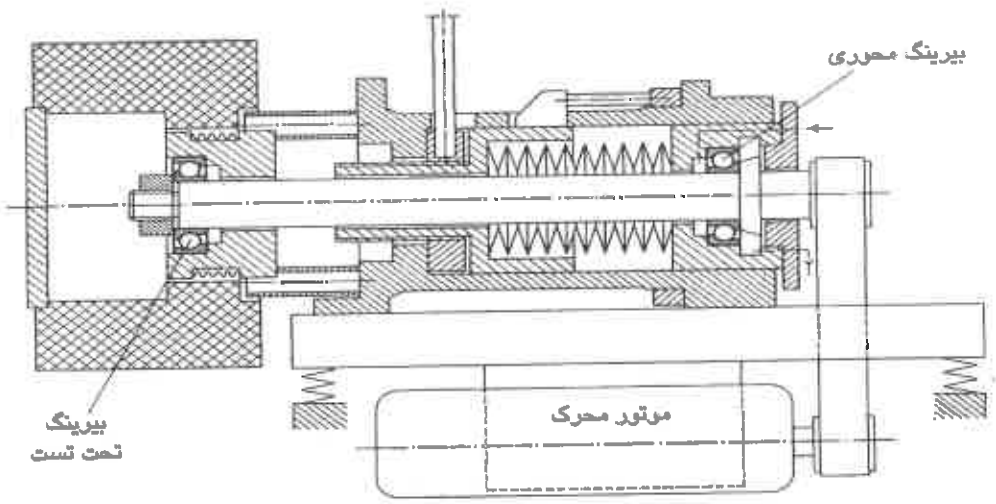
شکل ۲-۱۷ واحد مخلوط‌کنندهٔ هوا- روانکار

۲-۵ انتخاب روانکار

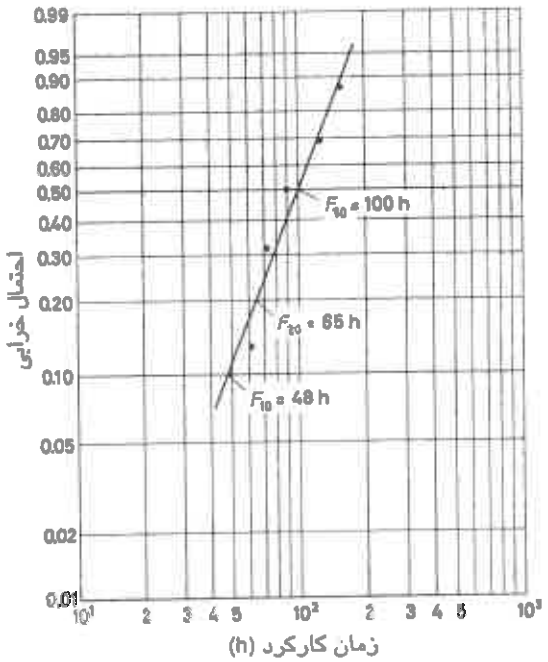
تحت اکثر شرایط کاری و عملی در حوزهٔ کاربرد بیرینگ‌های غلتشی، آنها برای روانکاری، نیازهای ویژه‌ای ندارند. تعداد بسیاری از بیرینگ‌ها در محدودهٔ اصطکاک مرکب و در شرایطی که فیلم روانکار، مناطق تماس را کاملاً از هم جدا نکرده، کار می‌کنند. هرچند، اگر از کل ظرفیت بیرینگ‌های غلتشی استفاده شود، باید از گریس، روغن مخصوص یا روانکارهای خشک برای روانکاری آن استفاده شود. سازندگان بیرینگ‌های غلتشی، توصیه می‌کنند که فقط باید از روانکارهایی استفاده کرد که مطابق مشخصات فنی تعیین شده در کاتالوگ باشد. انتخاب روانکار اختصاصی، ارائه دهندهٔ قابلیت اطمینان بیرینگ در محدودهٔ وسیعی از سرعت‌ها و بارها خواهد بود.

گریس‌های‌بیرینگ‌های‌غلتشی‌طبق DIN 51825، استاندارد شده‌اند. مطابق این استاندارد در دستگاه آزمون گریس (SKF) DIN 51806، باید گریس به شرایط تعیین شده تست بیرینگ و گزارش خصوصیات گریس موردنظر برسد و یا در دستگاه آزمون DIN 51 821 (FAG), FE 9 باید در بالاترین درجهٔ کاری تعیین شده، گریس به عمر مفید تعیین شدهٔ F_{50} برسد.

دستگاه آزمون گریس FE9، مطابق شکل ۲-۱۸، مجهز به پنج کلگی است. این وسیله پنج بیرینگ را به صورت همزمان تا زمانی که گریس خراب شود تست می‌کند (عمرمفید گریس). مقادیر زمان‌های دوران به‌دست آمده در چارت ویبول (Weibull) وارد شده‌اند (شکل ۲-۱۹)، همچنین خطوط خراب شدن گریس نیز آورده شده‌اند،



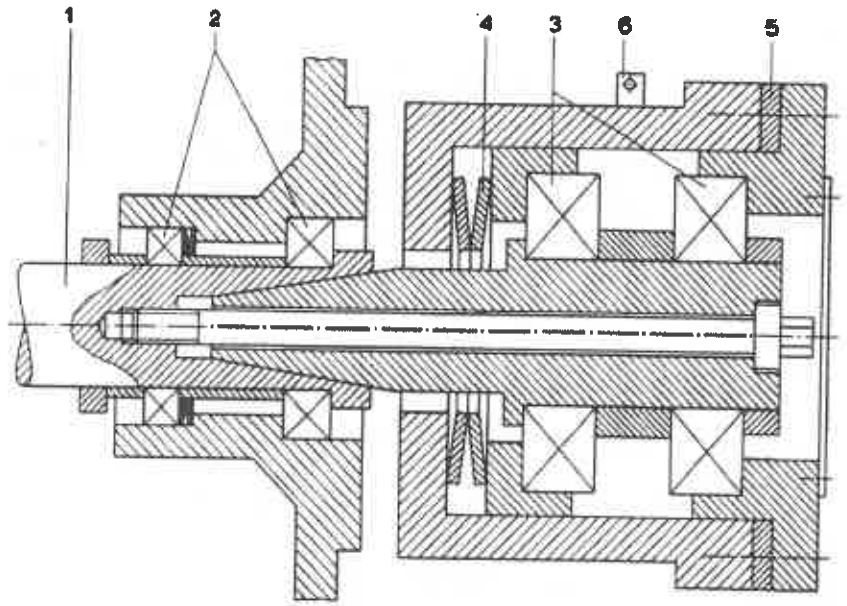
شکل ۲–۱۸ دستگاه تست گریس FE9 مجهز به بیرینگ‌های غلتشی به عنوان اجزاء دستگاه تست برای ایجاد یک شرایط کاری خاص: بار کم، سرعت بالا



شکل ۲–۱۹ دیاگرام احتمال خرابی در تست عمر مفید گریس مطابق استاندارد DIN 51821 Part 2

البته امکان دارد خطا در خارج از محل تعیین شده اتفاق بیافتد. عمر مفید F_{50} گریس، در شرایط 50% احتمال بروز خرابی بیرینگ به‌دست آمده است. فشار جریان گریس برگشتی که بتواند بر اصطکاک غلبه کرده و حرکت کند، برای تعیین حد پایینی دمایی به کار می‌رود.

روانکارهای مخصوص کار در محدودهٔ اصطکاک مرکب، تحت بارهای شدید و یا با لزجت کاری پایین در دماهای بالا، بر پایهٔ اصطکاک و خاصیت سایشی‌شان ارزیابی می‌شوند. در این حالت فقط وقتی می‌توان از سایش اجتناب کرد که لایه‌های مرزی جداکننده در ناحیه تماس ایجاد شده باشند، مثل عکس‌العمل مواد افزودنی در ناحیه تماس غلتشی. این روانکارها در دستگاه تست FAG FE8 تست شده‌اند (شکل ۲–۲۰). در کاربرد روغن‌های معدنی بسیار غنی شده، مثل روغن‌های دیفرانسیل (واسکازین‌ها) و روغن‌هایی سنتزی (ترکیبی) باید سازگاری آنها با حلقه‌های آب‌بند و جنس بیرینگ و در مواردی جنس مواد قفسه کنترل شود (شکل ۱–۷۵).



شکل ۲-۲۰ دستگاه تست روانکار FE8 به همراه بیرینگ‌های غلتشی به کار رفته برای ایجاد محدودهٔ اصطکاک مرکب، بار شدید، سرعت پایین: 1 شفت محرک، 2 بیرینگ‌های محوری، 3 بیرینگ‌های مخصوص تست، 4 فنرهای بشقابی، 5 فاصله‌انداز، 6 نشیمنگاه

۲-۵-۱ گریس‌های روانکاری

عموماً گریس‌های روانکاری از طریق دو جزء تشکیل‌دهنده اصلیشان تشخیص داده می‌شوند: روغن پایه و مواد غلیظ‌کننده. عموماً از صابون‌های فلزی معمولی به عنوان مواد غلیظ‌کننده استفاده می‌شود، مثل صابون‌های لیتیم، سدیم، آلومینیم، باریم و کلسیم. صابون‌های معمولی با صابون‌های پیچیده برای محدودهٔ دماهای بالاتر مناسب‌ترند. گذشته از این، ژل سیلیکا، آلومینا، اوره، PTFE و FEP نیز به‌عنوان ماده غلیظ‌کننده به کار می‌روند. روغن‌های پایه می‌توانند معدنی یا مصنوعی باشند. لزجت روغن پایه و مقدار مواد غلیظ‌کنندهٔ اضافه شده تعیین‌کنندهٔ غلظت گریس روانکاری و میزان گسترش فیلم روانکاری است. مشابه روغن‌های روانکاری، گریس‌های روانکاری محتوی مواد افزودنی هستند که این مواد باعث بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی از قبیل : پایداری در مقابل اکسیدشدن سطوح بیرینگ، محافظت در مقابل خوردگی یا محافظت در مقابل سایش سطوح تحت بارهای شدید (مواد افزودنی EP) می‌شوند. خصوصیات ویژهٔ گریس‌های بیرینگ‌های غلتشی به‌طور گسترده‌ای متفاوت است. جدول ۲-۷، لیستی از انواع گریس‌های اصلی بیرینگ های غلتشی را به‌همراه خصوصیات آنها ارائه کرده است. تمامی ارقام ارائه شده، مقادیر میانگین هستند.

جدول ۲-۷ خواص گریس‌ها

ملاحظات	نسبت قیمت[b]	ظرفیت انتقال بار[a]	مقاومت آب[a]	نقطه قطران (°C)	محدوده دما (°C)	روغن پایه	نوع صابون، غلیظ کننده
معمولی							
گریس چندکاره	1	+	+++	170–200	130+ تا 35–	روغن‌معدنی	لیتیم
با آب تشکیل امولسیون می‌دهد	0.9	++	–	150–190	100+ تا 30–	روغن معدنی	سدیم
برای دماهای پایین و بالا، سرعت‌های بالا	4–10	++	+++	170–200	150+ تا 60–	PAO	لیتیم
دمای پایین سرعت‌های پایین	5–6	+	++	190	130+ تا 60–	استر	سدیم
مرکب							
گریس چندکاره	2.5–4.0	+	+++	260	160+ تا 30–	روغن معدنی	آلومینیم
گریس چندکاره، مقاوم به تبخیر	4–5	++	++	230	140+ تا 30–	روغن معدنی	باریم
گریس چندکاره، قابل انجماد	0.9–1.2	++	++	240	140+ تا 30–	روغن معدنی	کلسیم
	2	++	++	240	150+ تا 30–	روغن معدنی	لیتیم
گریس چندکاره، برای دمای بالا	3.5	+	+	220	130+ تا 30–	روغن معدنی	سدیم
دماهای پایین و بالا، سرعت‌های بالا	15–20	+++	+++	220	160+ تا 60–	PAO	باریم
دماهای پایین و بالا، سرعت‌های بالا	15–20	+++	+++	240	160+ تا 60–	PAO	کلسیم
برای محدوده گسترده‌ای از دما	15	+++	++	240	180+ تا 40–	PAO	لیتیم
برای دمای پایین و سرعت‌های بالاف بارهای ملایم	7	++	++	200	130+ تا 60–	استر	باریم
برای محدوده وسیع ویژه‌ای از دما	10	+	++	240	180+ تا 40–	PAO	لیتیم
برای محدوده وسیع ویژه‌ای از دما، P/C<0.03	20	–	++	>240	180+ تا 40–	روغن سیلیکون	لیتیم
بنتونیت							
برای دماهای بالا و سرعت‌های پایین	2–6	+	+++	ندارد	150+ تا 20–	روغن معدنی	
برای محدوده وسیعی از دما	12–15	+	+++	ندارد	180+ تا 50–	PAO	
پولی‌اوره							
برای دماهای بالا در سرعت دورانی متوسط	3	++	+++	250	160+ تا 50	روغن معدنی	
گریس مخصوص دماهای بالا، با ماندگای خوب	12–15	+++	+++	250	200 تا 30–	PAO	
برای دماهای پایین و بالا، بارهای کم	35–40	–	+++	250	200 تا 40–	روغن سیلکون	
برای دماهای پایین و بالا، بارهای متوسط	100	+	+++	250	200 تا 40–	روغن فلئورسیلیکون	
PTFE یا FEP							
هردو گریس مناسب برای دماهای بسیار بالا و پایین	100–400	++	+++	ندارد	250 تا 50–	روغن آلکوکسی فلئوردار	
مقاومت بسیار بالا در مقابل مواد شیمیایی و حلال‌ها	80–100	++	+++	ندارد	230 تا 40–	روغن فلئورسیلیکون	

a : +++ بسیار خوب، ++ خوب، + متوسط، – ضعیف،

b گریس مرجع: گریس محتوی صابون غلیظ‌کننده بر پایه لیتیم/با روغن پایه معدنی (1=)

اکثر گریس‌ها در چند کلاس نفوذپذیری مختلف قابل دسترس هستند. لیست گریس‌های سازندگان مختلف، محتوی اطلاعات دقیق‌تری است. ستون توضیحات نشان‌دهندهٔ مناسب بودن گریس برای کاربردهای ویژه است. همچنین غالباً انتخاب روانکار با توجه به فاکتورهای بیشتری از قبیل تنش‌های اعمالی به بیرینگ (بار و سرعت)، خصوصیات و شرایط محیطی (رطوبت، منابع حرارتی خارجی) انجام می‌شود.

انتخاب گریس مناسب

جدول ۲-۷ ارایه‌دهنده برخی اطلاعات پایه برای راهنمایی اولیه در انتخاب گریس می باشد. در جدول ۲-۸ جزئیات بیشتری در رابطه با انتخاب گریس آورده شده است.

تنش اعمالی بر گریس توسط سرعت و بار

تأثیرات سرعت دورانی و بار در انتخاب گریس، در شکل ۲-۲۱ نشان داده شده است. پارامترهای موجود در این شکل عبارتند از :

P بار دینامیکی معادل (kN) اعمالی بر بیرینگ،

C نرخ بار دینامیکی اعمالی بر بیرینگ (kN)،

n سرعت دورانی (min^{-1})،

d_m قطر میانگین بیرینگ (mm) (D + d)/2 و

K_a فاکتور توجه به میزان حرکت لغزشی وابسته به نوع بیرینگ.

دیاگرام شکل ۲-۲۱ به سه محدوده تنش تقسیم شده است. برای بارهای شعاعی، اعداد سمت چپ و برای بارهای محوری، اعداد سمت راست به کار می‌روند. در بیرینگ‌های غلتشی که تحت شرایط بار در محدودهٔ I کار می‌کنند، تقریباً تمام گریس‌هایی که مطابق شرایط تعیین شده برای گریس‌های گروه K طبق استاندارد DIN 51825 (در مورد خصوصیات: درجه پاکی، مقاومت در مقابل کهنه شدن، محافظت قطعات در مقابل خوردگی و خصوصیات روانکاری و قابلیت انتقال) باشند را می‌توان به کار برد.

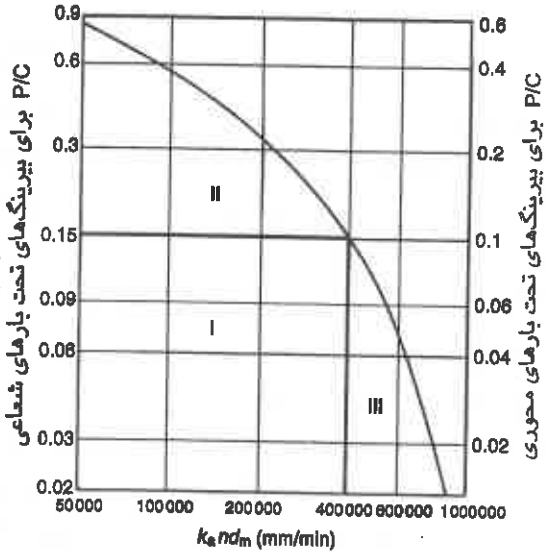
در محدوده‌های سرعت و بار بالا، مثل گوشه بالا و سمت راست محدودهٔ I و وجود دماهای کاری بالاتر، استفاده از گریس‌های مقاوم به حرارت را ایجاب می‌کند. گریس مورد نظر باید به دماهایی که به میزان قابل توجهی بالاتر از دمای کاری پیش بینی شده بیرینگ است، مقاوم باشد.

بارهای در محدودهٔ II مقادیر بالایی هستند. برای این بیرینگ‌ها باید گریسی با روغن پایه با لزجت بالاتر، محتوی مواد افزودنی EP و در صورت امکان محتوی مواد افزودنی از جنس روانکارهای جامد، انتخاب شود. در مواردی که بار اعمالی شدید و سرعت دورانی پایین باشد، این مواد افزودنی باعث بروز روانکاری شیمیایی و روانکاری خشک می‌شوند که باعث اجتناب بسیار زیاد از تماس فلز با فلز ناشی از اصطکاک مرکب می‌شود.

تنش‌های در محدودهٔ III، توسط سرعت‌های بالا و بارهای پایین، مشخص می‌شوند. در سرعت‌های دورانی بالا، اصطکاک ناشی از خود گریس، باید پایین باشد و گریس باید خواص چسبندگی خوبی داشته باشد. این نیازها را می‌توان با گریس‌های محتوی روغن‌های استری (روغن نمک آلی)، به عنوان روغن پایه که لزجت پایینی دارند، برطرف کرد. عموماً هر چه لزجت روغن پایهٔ یک گریس پایین‌تر باشد، سرعت مجاز دورانی توصیه شده توسط سازندگان بالاتر می‌رود.

جدول ۲-۸ معیارهای انتخاب گریس

معیارهای انتخاب گریس	خصوصیات گریس
شرایط کاری	
اندیس سرعت nd_m	انتخاب گریس مطابق شکل ۲-۲۱، در شرایط اندیس سرعت nd_m بالا،
نسبت بار P/C	کلاس غلظت 2 تا 3 در شرایط بار P/C بالا، کلاس غلظت 1 تا 2
خصوصیات دورانی	
اصطکاک کم، حتی هنگام آغاز حرکت	گریس با کلاس غلظت 1 تا 2 با روغن پایه سنتزی با لزجت پایین
اصطکاک ثابت کم در شرایط ثابت، اصطکاک بیشتر هنگام آغاز حرکت	گریس با کلاس غلظت 3 تا 4 گریس 30% از فضای آزاد بیرینگ را پر کند. گریس با کلاس غلظت 2 تا 3، گریس کمتر از 20% فضای آزاد بیرینگ را پر کند.
سطح آلودگی صوتی کم	روغنی که خوب فیلتر شده باشد (درجه پاکی بالا) با کلاس غلظت 2
شرایط نصب	
محور بیرینگ شیب‌دار یا عمودی است	گریس با چسبندگی با کلاس غلظت 2 تا 3
رینگ خارجی در حال دوران و رینگ داخلی ثابت است با نوعی نیروی گریز از مرکز در بیرینگ وجود دارد	گریس سفت با کلاس غلظت 3 تا 4 گریس باید بیش از 20% از فضای آزاد بیرینگ را پر کند، رک: به بخش ۲-۶-۱
نگهداری	
روانکاری مکرر	گریس نرم با کلاس غلظت 1 تا 2
روانکاری در یک مرحله برای کل عمر مفید بیرینگ، بدون نیاز به روانکاری مکرر	گریس مقاوم به کارکرد طولانی با کلاس غلظت 2 تا 3، برای مشاهده توضیحات مربوط به محدودیت‌های دمایی به شکل ۲-۲۳b\ مراجعه شود
شرایط محیطی	
دمای بالا، روانکاری یک مرحله برای کل عمر	گریس مقاوم به حرارت باروغن پایه سنتزی و مواد غلیظکننده مقاوم به حرارت (مثل انواع سنتزی)
دمای بالا، با روانکاری مجدد	گریسی که در دمای بالا تشکیل رسوب ندهد و در دمای بالا عمر مفید داشته باشد
دمای پایین	گریس با روغن پایه سنتزی رقیق و غلیظکننده مناسب آن، با کلاس غلظت 1 تا 2 [147b]
محیط آلوده به گرد و خاک	گریس سفت با کلاس غلظت 3
گریس تقطیر شده	گریس امولسیونه (معلق)، مثل گریس محتوی صابون با پایه سدیم
پاشش آب بر محل گریسکاری شده	گریس دافع آب، صابون با پایه کلسیم با کلاس غلظت 3
تنش‌های لرزشی	گریس محتوی با پایه لیتیم EP با کلاس غلظت 2، روانکاری مکرر. در تنش‌های لرزشی ملایم، گریس‌کاری لیتیمی و گریس‌های لیتیمی
	گریس‌های مرکب لیتیمی با کلاس غلظت 3
خلاء	برای خلاء حداقل 10^{-3} mbar (mPa)، انتخاب گریس مطابق DIN 51825. برای مقادیر کمتر، از سازنده روانکار مشاوره بگیرید



شکل ۲-۲۱ انتخاب گریس از طریق نسبت بار P/C و اندیس سرعت $k_s nd_m$ مربوطه. محدودهٔ I: شرایط کاری عادی؛ گریس بیرینگ‌های غلتشی از نوع K مطابق استاندارد DIN 51825. محدودهٔ II: محدودهٔ بارهای سنگین؛ گریس بیرینگ‌های غلتشی از نوع KP مطابق استاندارد DIN 51825 و یا دیگر گریس‌های مناسب. محدوده III: محدودهٔ سرعت دورانی بالا، گریس مخصوص سرعت‌های بالا؛ برای بیرینگ‌هایی که $k_s > 1$ باشد، باید گریس KP مطابق استاندارد DIN 51825 و یا گریس‌های مناسب دیگر استفاده شود. $k_s = 1$ را برای بلبیرینگ‌های شیار عمیق، بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای، بیرینگ‌های با چهار نقطه تماس، بلبیرینگ‌های خود تنظیم، رولربیرینگ‌های استوانه‌ای که تحت بار شعاعی می‌باشند و بلبیرینگ‌های کف‌گرد، استفاده کنید. $k_s = 2$ را برای رولربیرینگ‌های کروی، رولربیرینگ‌های مخروطی، رولربیرینگ‌های سوزنی به کار ببرید. $k_s = 3$ را نیز برای رولربیرینگ‌های استوانه‌ای تحت بار محوری و رولربیرینگ‌های استوانه‌ای کامل استفاده کنید.

احتیاجات گریس ملاسب

برای بیرینگ‌هایی مثل بیرینگ تلسکوپ، که باید حرکتی بدون نقص و روان داشته باشند، یک اصطکاک ثابت با مقدار کم نیازی حیاتی است. برای اینگونه کاربردها، از گریس لیتیم EP با روغن پایه غلیظ با ماده افزودنی MoS_2 استفاده می‌شود. در بیرینگ‌های ماشین‌آلاتی که نیروی محرکه آنها در ابتدا برحسب غلبه بر اصطکاک بیرینگ محاسبه شده است نیز باید بیرینگ، اصطکاک پایینی داشته باشد، مثل موتورهای قدرت اصطکاکی. برای بیرینگ‌هایی که بخواهیم آنها را در حالت سرد، بسرعت راه بیاندازیم، بهترین گریس، گریسی با کلاس غلظت 2 با روغن پایه سنتزی و لزجت پایین است. در دماهای معمولی، به جز در مواردی که مدت زمان کمی برای انتشار گریس داشته باشیم، با انتخاب گریس‌های سفت‌تر با کلاس 3 تا 4 می‌توان به اصطکاک کم دست یافت. اگر گریس اضافی در داخل محفظه نشیمنگاه ته‌نشین شود، گریس‌های تازه *نمی‌تواند* داخل بیرینگ و در بین قطعات بیرینگ جریان داشته باشند. گریس‌های روانکاری مخصوص بیرینگ‌های با آلودگی صوتی کم، *نباید* هیچگونه ذرات جامدی داشته باشند. از این رو، باید گریس‌ها از فیلتر گذشته و هموژنیزه شوند. روغن پایه با لزجت بالاتر می‌تواند آلودگی صوتی، خصوصاً محدوده‌های فرکانسی بالاتر را کاهش دهد. گریس استاندارد مخصوص بلبرینگ‌های شیار عمیق با آلودگی صوتی کم در دمای معمولی، معمولاً یک گریس محتوی صابون با پایه لیتیم فیلتر شده است که کلاس غلظتش 2 بوده و لزجت روغن پایه‌اش تقریباً $60\ mm^2/s$ در دمای $40\ °C$ می‌باشد.

دماهای بالا

دماهای بالا زمانی ایجاد می‌شوند که یا بیرینگ تحت تنش‌های بالا، تحت سرعت‌های محیطی بالا و یا تحت اثر منابع حرارتی خارجی قرار گرفته باشد. برای اینگونه کاربردها، گریس‌های مخصوص دماهای بالا باید انتخاب شوند. به خاطر داشته باشید که اگردما از محدودهٔ دمایی بالای گریس فراتر رود، مدت زمان عمر مفید آن بشدت تحت تأثیر قرار خواهد گرفت. برای گریس با صابون لیتیم، محدوده دمای بحرانی تقریباً 70 °C و برای گریس‌های مخصوص دماهای بالا که محتوی روغن پایه معدنی و غلظت دهنده‌های مقاوم به حرارت هستند، این دما بین 80 °C تا 110 °C است. گریس‌های مخصوص دمای بالا با روغن‌های پایه سنتزی را نسبت به نمونه‌های محتوی روغن پایه معدنی می‌توان در دماهای بالاتری مصرف کرد، زیرا روغن‌های سنتزی کمتر بخار شده و بسرعت فاسد نمی‌شوند. گریس‌های با روغن پایه آلکوکسی فلئوردار که لزجت بالایی دارند، برای بلبیرینگ‌های شیار عمیق که اندیس سرعتشان تا nd_m = 14000 mm/min بوده و در دماهای تا 250 °C کار می‌کنند، مناسب است. در دماهای ملایم، گریس‌های مخصوص دماهای بالا، نسبت به گریس‌های استاندارد، کمتر مفید هستند. در دماهای کاری بالا، یک راه‌حل این است که از گریس‌هایی با مقاومت کمتر به حرارت (و درنتیجه ارزان‌تر) استفاده شود. ولی در آن صورت، ما نیازمند روانکاری مکرر هستیم. باید گریسی انتخاب شود که در بیرینگ منجمد نشود، زیرا در آن صورت باعث بروز اشکال در تعویض گریس شده و ممکن است باعث گیر کردن بیرینگ شود.

دماهای پایین

در دماهای پایین، توسط گریس‌های مخصوص دماهای کم نسبت به گریس‌های استاندارد، می‌توان به اصطکاک‌های شروع به کار پایینتری دست یافت. گریس‌های دماهای پایین، محتوی روغن پایه با لزجت پایین به همراه صابون یا ژل لیتیم به عنوان غلیظ‌کننده هستند. گریس‌های چند کاره، اگر در دماهای پایین به کار روند، بسیار غلیظ و سفت شده و درنتیجه باعث ایجاد اصطکاک شروع به کار بسیار بالایی می‌شوند. اگر بار اعمالی پایین باشد امکان بروز لغزش نیز وجود دارد که این مسئله باعث ایجاد سایش در اجزاء غلتنده و سطوح تماس رینگ‌ها می‌شود. کیفیت جدا شدن روغن و درنتیجه تأثیر روانکاری گریس‌های استاندارد، گریس‌های مخصوص بارهای شدید و گریس‌های دماهای بالا، در دماهای پایین به میزان قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند. برپایه قابلیت انتقال و جابه‌جایی گریس، محدودهٔ پایین دمای کاری گریس‌های مخصوص دماهای پایین مطابق استاندارد DIN 51825 تعیین شده است. این محدوده به آن معنی نیست که بیرینگ در این دما به شکل مناسبی روانکاری می‌شود. هرچند، اگر حداقل سرعت دورانی معینی به همراه بار مناسبی بر بیرینگ اعمال شود، محدوده دمای پایین معمولاً تأثیر مخربی بر عملکرد بیرینگ نمی‌گذارد. بعد از یک دورهٔ کارکرد کوتاه، دمای گریس چندکاره بین 50 °C تا 80 °C افزایش می‌یابد. بعد از انتشار گریس، اصطکاک به مقادیر نرمال کاهش می‌یابد. اما بیرینگ‌هایی که تحت دماهای بسیار پایین کار می‌کنند، عموماً شرایط بحرانی دارند، خصوصاً اگر فقط در فواصل کوتاهی دوران کنند و یا با سرعت پایین بچرخند.

تقطیر

تقطیر می‌تواند در بیرینگ‌ها اتفاق بیفتد و در ماشین‌آلاتی که در محیط مرطوب کار می‌کنند باعث خوردگی شود، مثل شرایطی که در فضای باز بیرینگ در مدت زمان طولانی خلاص کار کردن ماشین، سرد شود. تقطیر خصوصاً در فضاهای آزاد در بیرینگ و نشیمنگاه تشکیل می‌شود. در این موارد، گریس‌هایی با غلیظ کننده از صابون سدیمی و لیتیمی توصیه می‌شود. گریس سدیمی مقادیر زیادی از آب را جذب می‌کند، این گریس با آب تشکیل امولسیون داده اما امکان دارد رقیق شده و از بیرینگ خارج شود. گریس‌های محتوی صابون لیتیمی، با آب تشکیل امولسیون نمی‌دهد و درنتیجه با مواد افزودنی مناسب باعث محافظت مناسب قطعات در مقابل خوردگی می‌شود. اگر بیرینگ‌ها در معرض پاشش آب باشند، مطابق جدول ۲-۸، باید از گریس دافع آب مثل یک گریس محتوی صابون کلسیمی با کلاس غلظت 3 استفاده شود. از آنجا که گریس‌های کلسیمی هیچ آبی را جذب نمی‌کند، در آنها از مواد افزودنی ضدخوردگی استفاده می‌شود.

تنش‌های لرزشی

در اثر تنش‌های لرزشی، گریس حرکت کرده و در پیرامون بیرینگ قرار می‌گیرد. این مسئله باعث گریسکاری مکرر بی‌قاعده در سطوح تماس شده که به شکسته شدن گریس به روغن و غلیظ کننده منجر خواهد شد. بهتر است که گریس را از جدول ۲-۸ انتخاب کرده و برای بیرینگ دوره‌های کوتاه روانکاری مجدد در نظر بگیریم، مثلاً هفته‌ای یک بار. گریس‌های روانکاری محتوی مواد افزودنی از جنس روانکار خشک نیز برای موتورهای لرزاننده مناسب هستند.

خلاء

روغن پایه گریس در خلاء به تدریج تبخیر می‌شود، مقدار تبخیر به دما و فشار منفی خلاء بستگی دارد. حلقه‌های آب‌بندی، گریس را در بیرینگ نگه داشته و باعث کاهش از دست دادن گریس در اثر تبخیر می‌شود. گریس باید مطابق جدول ۲-۸ انتخاب شود.

شفت‌های شیب‌دار یا عمودی

جاذبه زمین در شفت‌های شیب‌دار یا عمودی می‌تواند باعث خروج گریس از بیرینگ شود. از این رو، باید گریسی با خصوصیات چسبندگی خوب با کلاس غلظت 3-2 مطابق جدول ۲-۸ انتخاب شود، این گریس نیازمند صفحات منحرف‌کننده برای باقی ماندن در بیرینگ می‌باشند.

بارهای ضربه‌ای

در جاهایی که بارهای ضربه‌ای مکرر و یا بارهای بسیار سنگین به بیرینگ اعمال می‌شود، بهترین گریس، گریسی با کلاس غلظت 2-1 به همراه روغن پایه با لزجت ($\nu_{40} \geq 1000\ mm^2/s$) است. این گریس‌ها یک لایه ضخیم هیدرودینامیکی از فیلم روانکار تشکیل می‌دهند که می‌تواند شوک‌ها را بخوبی جذب کنند و بهتر از روانکاری شیمیایی ناشی از مواد افزودنی EP، از بروز سایش جلوگیری کنند. اشکال گریس‌های محتوی روغن پایه با لزجت بالا این است که به خاطر جداسازی

کم روغن در آنها، حضور بهینه روانکار فقط در صورتی که مقادیر زیادی از گریس را در بیرینگ پر نمائیم و یا در دوره‌های کوتاه روانکاری مجدد نمائیم، تضمین می‌شود.

روانکاری برای کل طول عمر مفید بیرینگ

گریس‌های مخصوص روانکاری برای کل عمر یا روانکاری مجدد باید به کمک جدول ۲-۸ انتخاب شوند. جداول ۲-۷ و ۲-۸ به ما در تعیین خصوصیات موردنظر گریس‌های روانکاری بر پایه فشارهای اعمالی به آنها که فهرست شده است کمک می‌کنند، بنابراین می‌توان از طریق لیست‌های ارائه شده توسط سازندگان بیرینگ‌های غلتشی یا گریس، گریس مناسب را انتخاب کرد.

۲-۵-۲ روغن‌های روانکاری

هر دو نوع معدنی و سنتزی روغن‌ها، عموماً برای روانکاری بیرینگ‌های غلتشی مناسب‌اند. روغن‌های روانکاری معدنی، امروزه بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. این روغن‌های معدنی باید حداقل مطابق نیازهای تعیین شده در استاندارد DIN 51501 باشند. روغن‌های ویژه، غالباً روغن‌های سنتزی، در شرایط کاری شدید و در جایی که نیازهای ویژه‌ای به پایداری روغن در مقابل انبوهی از شرایط محیطی (دما، تشعشع و غیره) است، به‌کار می‌روند. تولیدکنندگان معتبر روغن توانسته اند در آزمون‌های FE8 موفق شوند (شکل ۲-۲۰). خواص اصلی شیمیایی و فیزیکی روغن‌ها و اطلاعات مربوط به کاربرد آنها در بخش‌های بعدی شرح داده خواهد شد. تأثیر مواد افزودنی در جدول ۲-۹ آمده است.

جدول ۲-۹ تأثیرات مواد افزودنی در روانکار

مواد افزودنی	تأثیرات
کندکننده‌های اکسیداسیون	باعث جلوگیری از تشکیل زود هنگام مواد اکسیدی می‌شود
کندکننده‌های خوراکی	باعث جلوگیری از خوردگی سطوح می‌شود
پاک‌کننده‌ها	مواد اکسید شده را از بین می‌برند
انتشاردهنده‌ها	فرم لجن‌گونه گریس را حفظ می‌کند، مواد ترکیبی *نامحلول* را در حالت معلق قرارداده و از رسوب آنها روی سطوح فلزی جلوگیری می‌کند آب را نیز به شکل معلق به شکل یک امولسیون پایدار در می‌آورد
بهبوددهنده قطبی روانی روانکار	باعث کاهش اصطکاک و سایش در بروز اصطکاک مرکب می‌شود
مواد افزودنی EP و ضد سایش	باعث کاهش اصطکاک و سایش هنگام کار می‌شود و همچنین باعث کاهش تمایل به فرسایش و ناصاف شدن ناشی از اصطکاک می‌شود
بازدارنده زنگ زدگی	باعث جلوگیری از تشکیل زنگ روی سطوح فلزی در مدت زمان توقف ماشین می‌شود
خنثی‌کننده فلز	باعث جلوگیری از فعالیت ذرات فلزی به‌عنوان کاتالیزور در پروسه اکسیداسیون می‌شود
کاهش‌دهنده نقطه ریزش	نقطه ریزش را پایین می‌آورد
بهبوددهنده شاخص لزجت	باعث کاهش شیب منحنی لزجت نسبت به افزایش دما می‌شود
مواد ضدکف (کف‌زدا)	باعث کاهش تشکیل کف می‌شود

روغن‌های معدنی

روغن‌های معدنی فقط تا دمای تقریبی 150 °C پایدار می‌ماند. بسته به دما و مدت زمان قرار گرفتن در ناحیه گرم، فاسد شده که باعث اختلال در بازده روانکاری روغن می‌شود و به شکل مواد رسوبی جامد (کربن روغن) در داخل یا کنار بیرینگ رسوب می‌کند.

روغن‌های معدنی اگر با آب فاسد شوند، فقط برای محدودهٔ کاربردی کمی مناسب هستند، البته اگر حاوی پاک‌کننده‌ها باشند باعث بهبود سازگاری این روغن‌ها با آب می‌شود. اگرچه از صدمات خوردگی اجتناب می‌شود، ولی آب موجود در امولسیون تشکیل شده با روغن باعث کاهش عمر مفید می‌شود. مقدار آب مجاز می‌تواند بین چند جزء در هزار تا چند درصد تغییر نماید، این مقدار به ساختار روغن و مواد افزودنی بستگی دارد.

استرها

دی استرها و استرهایی که بسته به طرز استقرار اجزاء اتم در فضا درپشت‌هم قرارگرفته باشند، از لحاظ حرارتی پایدار هستند (200 °C – 60 °C)، همچنین خاصیت V – T مثبت و قابلیت تبخیر پایینی دارند. به همین دلیل، این مواد برای سرعت بالا و دماهای بالا توصیه می‌شود. در اکثر موارد، استرها در روغن‌های معدنی قابل حل بوده و می‌توانند با مواد افزودنی در ارتباط باشند. انواع مختلف استرها، در تماس با آب عکس‌العمل‌های مختلفی نشان می‌دهند. بعضی از آنها در تماس با آب، به صابون تبدیل می‌شوند و به اجزاء تشکیل‌دهنده‌شان تقسیم‌می‌شوند، خصوصاً اگر محتوی موادافزودنی قلیایی باشند.

پلی‌آلکلین گلیکول‌ها

پلی‌آلکلین گلیکول‌ها خصوصیات V – T خوب و نقطه انجماد پایینی دارند. از این جهت، آنها برای دماهای بالا و پایین (°C 50- تا °C 200+) مناسب هستند. به‌واسطه پایداری بالای آنها در مقابل اکسیداسیون، طول دوره‌های تعویض روغن در دماهای کاری بالا می‌تواند دو تا پنج برابر مدت زمان دوره‌های تعویض در روغن‌های معدنی باشد. اکثر پلی‌آلکلین گلیکول‌ها که به صورت روانکار به‌کار می‌روند، قابل حل در روغن‌های معدنی یا آب نیستند و توانایی جداسازی آب در آنها ضعیف است. پلی‌آلکلین گلیکول‌ها، عموماً، به این خاطر قابل انحلال با روغن‌های معدنی *نیستند* که این روغن‌ها در قابلیت روانکاری آنها تأثیر می‌گذارد.

ضریب فشار – لزجت پلی‌آلکلین گلیکول‌ها پایین‌تر از دیگر روغن‌ها است. پلی‌آلکلین گلیکول‌ها امکان دارد بر حلقه‌های آب‌بندی و سطوح لاک خورده در نشیمنگاه و قفسه‌ها تأثیر سوء بگذارد، مثلاً در قفسه‌هایی که از آلومینیم ساخته شده باشند.

پلی‌آلفا اولفین‌ها

پلی‌آلفا اولفین‌ها هیدروکربن‌های مصنوعی هستند که می‌توان در محدودهٔ دمایی بسیار گسترده‌ای (°C 40- تا °C 200+) از آنها استفاده کرد. به‌خاطر مقاومت بالای آنها در برابر اکسیداسیون، در شرایط مساوی، طول عمر کارکردشان چندین برابر عمر کارکرد روغن‌های معدنی با لزجت مشابه است. پلی آلفا اولفین‌ها با روغن‌های معدنی با هر نسبت حجمی قابل انحلال هستند. آنها دارای خواص مثبت V - T هستند.

روغن‌های سیلیکون

متیل فنیل سیلوکزان‌ها در دماهای بسیار پایین و بسیار بالا قابل استفاده هستند (°C 60- تا °C 250+) زیرا خواص V – T مثبت، قابلیت تبخیر پایین و پایداری حرارتی بالایی دارند. با این همه، ظرفیت انتقال بار آنها پایین (P/C ≤ 0.03) و خصوصیات ضد سایش آنها نیز ضعیف است.

روغن‌های آلکوکسی فلئوردار

روغن‌های آلکوکسی فلئوردار مقاوم به اکسیداسیون و آب ولی گرانقیمت هستند. ضریب فشار- لزجت آنها و چگالیشان بالاتر از روغن‌های معدنی با لزجت مشابه است. آنها را در محدودهٔ دمایی °C 30- تا 240+ می‌توان به کار برد.

سیال‌های هیدرولیکی مخلوط با آب، مقاوم به آتش

این مواد نقش ویژه‌ای را بازی می‌کنند. قابلیت روانکاری آنها به خاطر اینکه ضریب فشار- لزجت آب پایین است، معمولی است. وقتی با این مواد روانکاری انجام شود، عمر مفید بیرینگ‌های غلتشی مربوطه به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. حتی در بیرینگ‌هایی با خصوصیات حرکتی مناسب اگر از این مواد برای روانکاری استفاده شود، بسته به نوع سیال، عمر مفید بیرینگ نسبت به مصرف روغن‌های معدنی به 5% - 30% کاهش خواهد یافت.

لزجت توصیه شدهٔ برای روغن

هرچه سطوح در تماس را بهتر بتوانیم با فیلم روانکار از هم جدا کنیم، به مدت زمان خرابی طولانی‌تر و ایمنی بالاتری در مقابل سایش دست خواهیم یافت.

از آنجا که ضخامت فیلم روغن با افزایش لزجت، افزایش می‌یابد، باید روغنی با لزجت کاری ν بالا انتخاب شود. اگر نسبت لزجت‌کاری $\kappa = \nu_1/\nu_2 = 3 - 4$ باشد، می‌توان به عمر مفید بالایی دست یافت. روغن‌های غلیظ هم، البته، دارای اشکالاتی هستند. لزجت بالاتر یعنی اصطکاک بیشتر روانکار و در دماهای پایین و معمولی، تغذیه و تخلیه روغن نیز می‌تواند مشکلاتی را ایجاد نماید. همچنین، موقعیت‌های ذکر شده در زیر، بعضی اوقات دستیابی به لزجت کاری بالای ایده‌آل را غیرممکن می‌کنند:

- انتخاب روغن به اجزاء دیگری از ماشین که به روغن مایع نیاز دارند نیز بستگی دارد،
- روانکاری روغن به‌صورت مدار بسته نیازمند روغن رقیق است که بتواند حرارت را منتقل و پخش کرده و بتواند آلودگی‌های داخل بیرینگ را از بیرینگ بیرون بکشد و
- در بعضی اوقات وجود دماهای بالا و یا سرعت‌های محیطی بسیار پایین باعث می‌شوند روغنی با بالاترین لزجت ممکن، کارآیی نداشته باشد.

در این موارد، باید روغنی انتخاب شود که لزجت آن کمتر از مقادیر توصیه شده برای آن کاربرد باشد. این روغن باید محتوی مواد افزودنی EP مؤثر باشد و مناسب بودن آن توسط دستگاه تست FE8 شرکت FAG (شکل ۲-۲۰) تضمین شده باشد. از طرف دیگر، بسته به میزان انحراف از مقادیر تعیین شده، باید مقادیر کاهش یافته عمر مفید و سایش در سطوح تماس نسبت به مقادیر به دست آمده در محاسبات عمر در نظر گرفته شود.

انتخاب روغن مطابق شرایط کاری

شرایط کاری عادی

تحت شرایط عادی (فشار اتمسفریک)، حداکثر دمای 100 °C برای روانکاری غوطه‌ور در روغن و 150 °C برای روانکاری با روغن به‌صورت مدار بسته، نسبت بار P/C < 0.1، در سرعت حداکثر تا محدودهٔ مجاز تعیین شده (مطابق بخش ۳-۳)، از روغن‌های خالص و ترجیحاً روغن‌هایی که محتوی مواد کاهنده هستند (مواد کاهندهٔ خوردگی و سایش، که مطابق استاندارد DIN 51502 با حرف L مشخص می‌شوند) می‌توان استفاده کرد. اگر مقادیر توصیه شدهٔ لزجت *نتواند* نیاز را برآورده کند، باید از روغن‌هایی که محتوی مواد افزودنی EP مناسب و مواد افزودنی ضد سایش هستند استفاده کرد.

شاخص‌های سرعت بالا

برای سرعت‌های محیطی بالا ($k_a n d_m$>500000 mm/min؛ شکل ۲-۲۱ را نگاه کنید)، روغنی با پایداری در مقابل اکسیداسیون، با خصوصیات کف‌زدایی خوب و با خصوصیات مثبت V-T که لزجتش با افزایش دما، به‌آرامی کاهش یابد، مناسب است. استرها، پلی‌اولفین‌ها و پلی‌گلیکول‌ها، روغن‌های سنتزی مناسب و با خصوصیات مثبت V-T هستند. در شروع به کار بیرینگ، هنگامی که عموماً درجه حرارت پایین است، از اصطکاک شدید ضربه‌ای و از ایجاد دماهای بالا اجتناب شود. لزجت در شرایط دمای ثابت کاری، برای تضمین روانکاری مناسب و کافی است.

بارهای شدید

اگر به بیرینگ‌ها بارهای شدیدی اعمال شود (P/C>0.1) و یا اگر لزجت کاری ν کوچکتر از لزجت نسبی ν_1 باشد، باید از روغن‌های محتوی مواد افزودنی ضدسایش استفاده شود (روغن‌های EP، که مطابق DIN 51502 با حرف P مشخص می‌شوند). مواد افزودنی EP تأثیرات مضر تماس فلز با فلز که در بعضی نقاط رخ می‌دهد را کاهش می‌دهند. میزان مناسب بودن مواد افزودنی EP متغیر است و معمولاً، بیشتر به دما بستگی دارد. از این رو باید کارآیی این مواد توسط آزمون FE8 (شکل ۲-۲۰) تأیید شود.

دماهای بالا

انتخاب روغن‌های مناسب برای کار در دماهای کاری بالا اصولاً به محدودهٔ مجاز دمای کاری و خصوصیات V-T روغن‌ها بستگی دارد. انتخاب روغن‌ها برپایه خصوصیات آنها می‌باشد. در ادامه این بخش به جزئیات بیشتری خواهیم پرداخت.

۲-۵-۳ روانکاری خشک

روانکارهای خشک فقط در موارد ویژه مورد توجه قرار می‌گیرند، مثلاً در جایی که از بیرینگ‌های سرامیکی نتوان استفاده کرد و یا در مواقعی که روغن‌ها و گریس‌ها مناسب *نباشند*، مانند:

- خلاء که در آن روغن بشدت بخار می‌شود،
- تحت دماهای بسیار بالا، مثل گاری‌های کوره‌ها در صنایع سرامیک،
- در جاهایی که روغن یا گریس فقط برای مدت کوتاهی در بیرینگ باقی بمانند، مثل بیرینگ‌های پروانه در دمنده‌های پروانه‌ای با زاویه قابل کنترل که به واسطه

نیروهای گریز از مرکز بالا، روغن یا گریس نمی‌توانند برای مدت طولانی در بیرینگ باقی بماند و

- در تکنولوژی اتمی و هوافضا که روانکار در معرض تشعشع قرار دارد.

عمومی‌ترین روانکارهای خشک مورد استفاده گرافیت و دی سولفید مولیبدن (MoS_2) هستند. این مواد به صورت پودر یا خمیری از پودرهای چسبیده به هم توسط روغن یا مواد پلاستیکی به‌عنوان لایهٔ لغزشی به کار می‌روند. دیگر روانکارهای جامد عبارتند از: پلی‌تترافلئوروواتیلن (PTFE) و لایه فلزات نرم از قبیل مس و طلا که البته بندرت از این مواد استفاده می‌شوند.

معمولاً برای تضمین چسبندگی بهتر فیلم پودر، سطح را باندرایز (bonderized) می‌کنند. با پوشش لایه لغزشی (لاک لغزشی) روی سطح باندرایز شده می‌توان به فیلم‌های روانکار پایدارتری دست یافت. هرچند، از این لایه‌های لغزشی فقط در بارهای سبک می‌توان استفاده کرد. فیلم‌های فلزی که مقاومت ویژه‌ای دارند با روش الکترولیز و یا با بخار کاتدی در یک محیط با خلاء فوق شدید، روی سطوح تماس پوشش داده می‌شوند. این روش برای پوشش سطوح با دی‌سولفید مولیبدن نیز مفید است. لقی بیرینگ با پوشش فلزی به میزان چهار برابر ضخامت فیلم روانکار خشک، کاهش می‌یابد، زیرا برای هر سطح تماس، دو لایه فیلم خواهیم داشت. از این جهت، در مواردی که بخواهیم از روانکار خشک استفاده کنیم، باید از بیرینگ‌هایی با لقی بیش از حد عادی استفاده کنیم. پایداری حرارتی و شیمیایی روانکارهای خشک، محدود است. برای بیرینگ‌هایی که در سرعت پایین کار می‌کنند (nd_m < 1500 mm/min)، می‌توان از دی سولفیدمولیبدن یا خمیر گرافیت استفاده کرد. روغن موجود در خمیر در دمایی حدود 200 °C بخار می‌شود و تنها در یک لحظه کل روغن موجود در خمیر روانکار از بین رفته و محتویات رسوب می‌کند. در اکثر مواردی که سرعت دورانی بیرینگ‌های غلتشی بالاتر از nd_m = 1500 mm/min باشد، روانکاری با پودر یا لایه لغزشی به خمیر ترجیح داده می‌شود. با مالیدن روانکار جامد داخل تخلخل‌های میکروسکوپی سطح، یک فیلم پودر نرم تشکیل می‌شود.

گرافیت را برای دماهای کاری تا 450 °C می‌توان استفاده کرد زیرا گرافیت در محدوده دمایی وسیعی درمقابل اکسیداسیون مقاوم است. گرافیت در مقابل تشعشع آنچنان مقاوم نیست. دی‌سولفید مولیبدن را نیز می‌توان تا دماهای 400 °C به کار برد. این ماده در دماهای پایین نیز خصوصیات خوب لغزشی خود را حفظ می‌کند. در صورت حضور آب می‌تواند باعث خوردگی الکترولیتی شود. دی سولفید مولیبدن تنها به میزان کمی در مقابل اسیدها و بازها مقاومت نشان می‌دهد.

باید سازگاری لایه لغزشی (لاک لغزشی) با شرایط محیطی بررسی شود. چسب‌های آلی لاک‌های لغزشی، در دماهای بالا نرم می‌شوند و این حرارت بالا بر خصوصیات چسبندگی آنها تأثیر می‌گذارد. لاک‌های لغزشی غیرآلی، محتوی نمک‌ها و چسب‌های غیرآلی می‌باشد. این لاک‌ها پایداری حرارتی داشته و در خلاء شدید بخار نمی‌شوند. حفاظت از خوردگی که در تمام لاک‌های لغزشی محدود است، در لاک‌های غیرآلی کمتر از لاک‌های آلی است. اگر گرد و خاک وارد بیرینگ شود، خمیرهای روانکاری غلیظ شده و جامد و

سفت می‌شوند در محیط پر گرد و خاک، لاک‌های لغزشی بهتر هستند. روانکار مخصوص تجهیزات جابه‌جایی مولیکوت SLC (SLC = ترکیب خود روانکار) مزایای ویژه‌ای دارد. این ماده برای دماهای بالا و پایین که در مواردی مثل نقاله‌های زنجیری، گاری‌های کوره‌ها، یا دستگاه‌های لعاب‌زنی و لاک‌زنی وجود دارد، مناسب است. از آنجا که مولیکوت SLC به شکل قطعات جامد به همراه مجموعهٔ اجزاء غلتنده می‌چرخد (شکل ۲-۵۱)، اصطکاک روانکار M_0 پایین است. مولیکوت SLC به‌سادگی جابه‌جا می‌شود و مقاوم به آتش و محیط خورنده است. از این رو برای کاربرد در تجهیزات معدن مناسب است. دو نوع بیرینگ روانکاری شده و آب‌بندی شده با مولیکوت SLC وجود دارد: در موارد ویژه، می‌توان در بیرینگ‌های غلتشی از قفسه‌های خود روانکار استفاده کرد، مثل قفسه‌هایی که داخلشان روانکارهای خشک کار گذاشته شده باشد و یا با مخلوطی از روانکار خشک و چسب پر شده باشند. روانکار، در این حالت، توسط اجزاء غلتنده به سطح تماس رینگ‌ها منتقل می‌شود.

۲-۶ تأمین روانکار

بیرینگ‌های غلتشی نیاز شدیدی به مقادیر کمی از روانکار دارند. در یک آزمایش برای یک بلبیرینگ شیار عمیق 6309 که با دور $n = 3000 - 6000\ min^{-1}$ در حال کار دائم بود، $0.005\ cm^3/h$ روغن برای هر ساعت کار مناسب بود حتی $0.0005\ cm^3/h$ برای یک رولربیرینگ استوانه‌ای دو ردیفه که در دور $n = 2000\ min^{-1}$ و تحت بار شعاعی $F_r = 5\ kN$ در حال آزمایش بود، کافی تشخیص داده شد. در آزمایش بیرینگ‌های گریسکاری شده نیز نتایج مشابهی به دست آمد.

طرح	دمای کاری (°C)	اندیس‌های سرعت (mm/min)[a]	لقی شعاعی
SLC-2	−180 to +300[b]	100 000	C4 or C5
SLC-6	−180 to +190	4000	C5

a) nd_m در $P/C \leq 0.15$

b) برای دوره‌های کوتاه، حداکثر تا 500 °C

هر چند در کاربردهای عملی، به منظور قابلیت اطمینان کاربردی مقادیر بیشتری از روانکار در اختیار بیرینگ قرار می‌گیرد. البته، وجود مقادیر خیلی زیاد روانکار در بیرینگ، می‌تواند تأثیرات منفی داشته باشد. اگر روانکار اضافی نتواند از بیرینگ بیرون بزند، تلاطم روانکار و کارکرد بیرینگ تا حدی باعث افزایش دما می‌شود که قابلیت روانکاری بیرینگ کاهش یافته و باعث اختلال در روانکاری بیرینگ شود.

مقادیر کم روانکار، عموماً برای روانکاری دوباره و رسیدن روانکار به تمام سطوح در تماس غلتشی و لغزشی بیرینگ کافی است. این شرایط همیشه به‌راحتی قابل دسترس نیست. درنتیجه، در طراحی یک مجموعه بیرینگ، یک سیستم مطمئن تأمین روانکار نقش حیاتی را بازی می‌کند.

۲-۶-۱ تأمین گریس

به جز گریسکاری داخل بیرینگ‌ها توسط سازنده، بیرینگ‌ها معمولاً توسط دست در محل نصبشان گریسکاری می‌شوند. در بعضی موارد، از سرنگ‌ها و تفنگ‌های گریسکاری استفاده می‌شود.

مقدار گریس لازم برای شارژ اولیه و گریسکاری دوباره

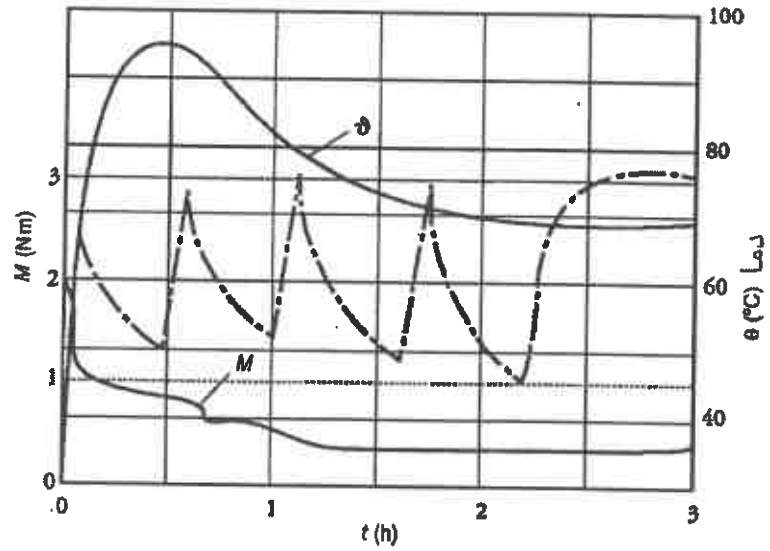
هنگام گریسکاری بیرینگ‌ها، باید به دستورالعمل‌های زیر توجه شود:

- بیرینگ‌ها را به آن اندازه از گریس پر کنید که تمام سطوح در تماس با گریس تأمین شوند،
- فضای نشیمنگاه را در دو طرف بیرینگ به اندازه‌ای از گریس پر کنید که این فضا بتواند گریس‌های بیرون زده از بیرینگ را در خود جا دهد. توصیه می‌شود تا 35% از فضای آزاد بیرینگ از گریس پر شود،
- در بیرینگ‌های سرعت بالا، مثل بیرینگ‌های محور ماشین ابزار، فقط قسمتی از بیرینگ را از گریس پر کنید (تقریباً 30% – 20 از فضای آزاد) تا هنگام شروع به کار بیرینگ، امکان انتشار سریع گریس وجود داشته باشد و
- در بیرینگ‌های سرعت پایین (nd_m < 50000 mm/min) کل فضای بیرینگ و نشیمنگاه را با گریس پر نمائید. اصطکاک روانکار در مقابل اصطکاک کاری قابل صرف نظر کردن است.

پر کردن مناسب به این معنی است که هیچ مقدار اضافی از گریس داخل بیرینگ در جریان نباشد. اگر فضای بزرگ خالی نشیمنگاه کنار بیرینگ موجود باشد، گریس‌های خارج شده از بیرینگ ممکن است در مجاورت بیرینگ باقی نماند و دیگر تأثیر روانکاری نخواهد داشت. در این صورت باید از محافظها یا حلقه‌های آب‌بندی و یا از صفحات منحرف کننده برای تضمین باقی ماندن مقادیر کافی گریس کنار بیرینگ، استفاده کرد.

بلبیرینگ‌های شیار عمیق که از دو طرف آب‌بندی می‌شوند (2RSR) و یا مجهز به غلاف محافظ هستند (2ZR) و هنگام تحویل گریسکاری شده‌اند (به توضیحات شکل ۲-۲۴ توجه کنید). حدود 35% از فضای آزاد این بیرینگ با گریس پر می‌شود. این مقدار حتی در اندیس‌های سرعت بالا (nd_m > 400 000 mm/min) نیز بخوبی در داخل بیرینگ نگه داشته می‌شود. برای بیرینگ‌هایی که در سرعت‌های بالاتر کار می‌کنند، حدود 20% فضای خالی بیرینگ با گریس پر می‌شود. اگر در بیرینگ‌های مجهز به حلقه آب‌بندی گریس بیش از حد تعیین شده پرشود، گریس اضافی، تا زمانی که داخل بیرینگ مقدار گریس مناسب باقی بماند، به‌طور دائم از بیرینگ بیرون خواهد زد. در سرعت‌های محیطی بالا، در بیرینگ‌هایی که رینگ خارجی در حال گردش است، بیرینگ‌ها فقط به اندازه حدود 15% از فضای خالی بیرینگ را می‌توانند در خود گریس نگه دارند. گریس‌هایی که حدوداً به مقدار مناسب از گریس پر شده باشند خصوصیات اصطکاکی مناسبی از خود نشان می‌دهند و مقادیر بسیار کمی از گریس را از دست خواهند داد. در اندیس‌های سرعت بالاتر، معمولاً دمای بیرینگ‌ها در دورهٔ آب‌بندی، خصوصاً بعد از چند ساعت کارکرد افزایش می‌یابد (شکل ۲-۲۲).

گاهی این تأثیرات بسیار شدیدتر می‌شود، وجود مقادیر بیشتر گریس در داخل و کنار بیرینگ و انسداد بیشتر حرکت گریس به خارج از بیرینگ از نتایج این تأثیرات هستند. این تأثیرات را می‌توان با در نظرگرفتن سیستم تأمین دوره‌ای روانکار و با توجه به مدت زمان ایست بیرینگ برای خنک‌شدن خنثی کرد، مشابه حالتی که در بیرینگ‌های محور در ماشین‌های ابزار در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۲-۲۲ ممان اصطکاکی M و دمای θ یک بلبیرینگ شیار عمیق تازه گریسکاری شده. منحنی دمای نشانداده شده با خط و نقطه با تأمین دوره‌ای گریس به دست آمده است.

اگر روانکاری در دوره‌های طولانی لازم است، باید به کمک حلقه‌های آب‌بندی و صفحات منحرف کننده، گریس را در داخل یا کنار بیرینگ نگه داشت. گریس ذخیره شده در نزدیکی و مجاورت بیرینگ می‌تواند باعث افزایش دوره‌های روانکاری شود زیرا در دماهای بالا، گریس بیرون از بیرینگ، از خود روغن خارج می‌کند که حداقل بخشی از آن در روانکاری بیرینگ شرکت می‌کند و در حالی که لرزش داشته باشیم، گریس تازه به داخل بیرینگ وارد خواهد شد. اگر در کنار بیرینگ دماهای بالا وجود داشته باشد، توصیه می‌شود مقدار بیشتری گریس کنار بیرینگ قرار دهید و تا حد امکان سطح جداسازی روغن بیشتری در مقابل بیرینگ ایجاد کنید. شاید بتوان به کمک صفحه منحرف کنندهٔ زاویه‌دار به این هدف دست یافت (شکل ۲-۲۵).

مقدار گریس اضافی در حالت ایده‌آل باید حدود 3 تا 5 برابر مقدار گریس عادی باشد و باید یا در یک طرف بیرینگ قرار گیرد و یا بهتر آن است که به مقدار مساوی بین دو طرف بیرینگ تقسیم شود. اگر فشار در یک طرف بیرینگ با طرف دیگر متفاوت باشد، گریس و روغن پایه جدا شده از آن تمایل به خروج از بیرینگ خواهند داشت. همچنین آلودگی می‌تواند وارد بیرینگ شود. در این موارد، برای میزان کردن فشار، باید در ساختمان پیرامون بیرینگ، سوراخ‌ها و دریچه‌هایی ایجاد کرد.

عمر مفید گریس

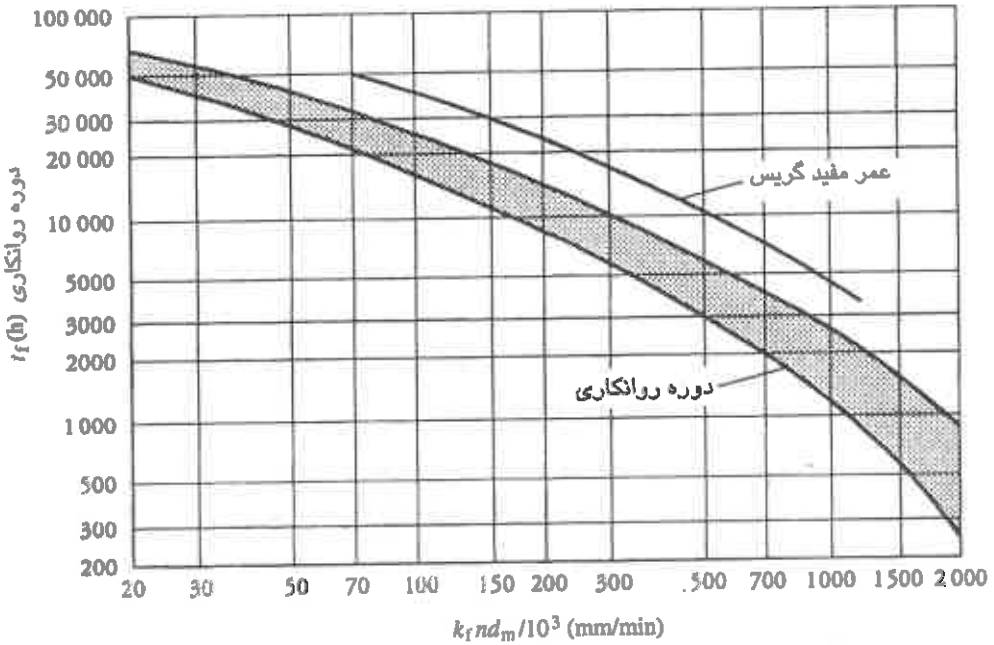
عمر مفید گریس به دوره‌ای گفته می‌شود که از آغاز کار بیرینگ شروع شده و تا خراب شدن بیرینگ که

نشاندهندهٔ قطع روانکاری است، ادامه می‌یابد. این مدت به مقدار گریس و نوع گریس (ماده غلیظ کننده، روغن پایه و مواد افزودنی)، نوع و اندازهٔ بیرینگ، بزرگی و نوع بار اعمالی، اندیس سرعت، دمای بیرینگ و شرایط نصب بستگی دارد.

عمر مفید گریس‌ها با آزمایش‌های آزمایشگاهی، مثلاً توسط دستگاه تست گریس بیرینگ‌های غلتشی FE9 (شکل ۲-۱۸ و شکل ۲-۲۳a) اندازه‌گیری می‌شود. این آزمایش‌ها باید بر پایه آماری انجام شوند، زیرا حتی در شرایط آزمون قابل مقایسه (پارامترهای کاری یکسان، بیرینگ‌هایی با کیفیت‌های مشابه و کیفیت گریس یکسان) بسته به نوع گریس به کار رفته، باید خطایی حدود 0.1 در مقادیر اندازه‌گیری شده عمر مفید گریس در نظر گرفته شود. از این رو، محاسبات مقادیر عمر مفید گریس مشابه محاسبات عمر مفید بیرینگ بر پایه یک مقدار معین احتمال خرابی انجام می‌شود. احتمال عمر مفید F_{10} یک گریس معین، نشاندهندهٔ احتمال خرابی با 10% است.

دوره‌های روانکاری

دوره‌های روانکاری بر پایه حداقل عمر مفید گریس F_{10} مربوط به گریس‌های استاندارد که مطابق با حداقل نیازهای استاندارد DIN 51825 part 2 هستند، تعیین می‌شود.



شکل ۲-۲۳ دوره روانکاری t_f برای گریس صابون لیتیمی استاندارد مطابق استاندارد DIN 51825، تحت شرایط محیطی مناسب و در دمای کاری پایین‌تر یا مساوی با محدودهٔ دمایی گریس. دوره‌های روانکاری مجدد درواقع کوتاه‌تر از دوره‌های روانکاری هستند. جدول ضمیمه، ارائه‌دهنده فاکتور k_f برای محاسبهٔ دوره روانکاری است.

به مجرد اتمام مدت زمان دورهٔ روانکاری، باید بیرینگ دوباره روانکاری شود یا با گریس تازه پر شود. برای اطلاعات بیشتر در زمینه روانکاری به بخش بعدی مراجعه کنید.

شکل ۲-۲۳\a نشان‌دهندهٔ دوره‌های روانکاری t_f برای گریس‌های صابون لیتیمی که در حوزه‌های کاری معمول و تحت شرایط محیطی مناسب کار می‌کنند، است. این مقادیر برای گریس‌های صابون لیتیمی با کلاس غلظت 2 تا 3 و دمای کاری تا 70 °C (اندازه‌گیری شده در رینگ خارجی) که کمتر از محدوده دمای گریس باشد و به بیرینگ بار متوسط حدوداً تا $P/C < 0.1$ وارد شود، صدق می‌کنند.

در بارها یا دماهای بالاتر، دوره روانکاری کوتاه‌تر بوده و مطابق معادلهٔ ۲-۲۳ کاهش می‌یابد. در دماهای کاری بالاتر از 70 °C، دوره‌های روانکاری گریس‌های صابون لیتیمی با یک روغن پایه معدنی به مقدار $f_3 t_f$ کاهش خواهد یافت. محدودهٔ دمایی گریس‌های صابون سدیمی و کلسیمی بین 40 °C تا 60 °C است، البته برای گریس‌های مخصوص دماهای‌بالا، بین 80 °C تا 110 °C یا بالاتر است.

شکل ۲-۲۳\a همچنین نشاندهندهٔ دوره‌های روانکاری به شکل تابعی از $k_f n d_m$ است. مقادیر متفاوت k_f برای انواع مختلف بیرینگ‌ها، در شکل ۲-۲۳\b داده شده است. در جاهایی که محدودهٔ مقادیر k_f تعیین شده باشد، مقادیر بیشتر برای بیرینگ‌های سری‌های سنگین‌تر و مقادیر کمتر برای بیرینگ‌های سری‌های سبک‌تر به کار می‌رود.

در مقایسه با عمر مفید به دست آمده برای گریس در شرایط ایده‌آل، شکل ۲-۲۳\a نشاندهندهٔ حاشیه‌های ایمن برای دوره‌های روانکاری تحت شرایط کاری مناسب است. اگر عمر مفید F_{10} گریس انتخاب شده مشخص نباشد کاربران بیرینگ غلتشی، با توجه به شکل ۲-۲۳\a می‌توانند طول مدت روانکاری را تخمین بزنند. اگر بخواهیم از حداکثر ظرفیت کاری گریس استفاده کنیم، می‌توان از مقدار عمر مفید F_{10} گریس، که در آزمون‌های مربوطه محاسبه شده است، استفاده کرد و یا می‌توان با مقادیر تجربی کار کرد.

ضعف کاربرد و شرایط محیطی طول دوره روانکاری را کاهش می‌دهند. دوره روانکاری کاهش یافته t_{fq} از معادله زیر به دست می‌آید :

$$t_{fq} = t_f f_1 f_2 f_3 f_4 f_5 f_6 \qquad (۲-۲۳)$$

در مورد فاکتورهای کاهندهٔ f_1 تا f_6 در جدول ۲-۱۰ توضیح داده شده است. در حلقه‌های آب‌بندی از نوع فاصله‌دار، جریان هوای گذرا از داخل بیرینگ به میزان قابل توجهی دوره روانکاری را کاهش می‌دهد. جریان هوا باعث خراب شدن روانکار شده و روغن یا گریس را از بیرینگ بیرون آورده و آلودگی را وارد بیرینگ می‌کند. گریس‌هایی که روغن پایه آنها لزجت بالایی داشته باشند ($\nu_{40} \geq 400\ mm^2/s$) خصوصاً دردمای پایین، مقادیر کمی روغن از خود خارج می‌کنند. کاربرد آنها نیازمند دوره‌های روانکاری کوتاه مدت است (در ادامهٔ بخش گفته خواهد شد). آلودگی‌ها و آبی که از حلقه‌های آب‌بندی نفوذ می‌کنند نیز بر عمر مفید گریس تأثیر می‌گذارند.

نوع بیرینگ		k_t
بلبیرینگ‌های شیار عمیق	یک ردیفه	0.9–1.1
	دو ردیفه	1.5
بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای	یک ردیفه	1.6
	دو ردیفه	2
بیرینگ‌های محور ماشین ابزار	$\alpha = 15°$	0.75
بیرینگ‌های با چهار نقطه تماس	$\alpha = 25°$	0.9
بلبیرینگ‌های خود تنظیم		1.6
بلبیرینگ‌های کف گرد		1.3–1.6
بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای کف گرد	دو ردیفه	5–6
رولربیرینگ‌های استوانه‌ای	یک ردیفه	1.4
رولربیرینگ‌های استوانه‌ای کف گرد	دو ردیفه	3.0–3.5[a]
رولربیرینگ‌های سوزنی	با کل ضمائم	2
رولربیرینگ‌های مخروطی		25
رولربیرینگ‌های بشکه‌ای		90
رولربیرینگ‌های کروی بدون لبه (طرح E)		3.5
رولربیرینگ کروی با لبه مرکزی		4
		10
		7–9
		9–12

a برای بارهای شعاعی و بارهای محوری ثابت $k_t=2$ برای بارهای متغیر

می‌توان در کاربردهای معین و در مرحله تخمین از یک فاکتور کاهندهٔ کلی q که شامل تمام فاکتورهای کاهندهٔ شامل ضعف کاربردی و شرایط محیطی می‌شود، استفاده کرد (**جدول ۲-۱۱**). دوره روانکاری کاهش یافتهٔ t_{tq} از رابطه زیر به دست می‌آید :

$$t_{tq} = q\, t_t \qquad (۲۴-۲)$$

گریس‌های ویژه که مخصوص شرایط کاری و محیطی غیرعادی هستند، مثل دماهای بالا یا پایین، بارهای سنگین یا سرعت محیطی بالا، معمولاً نیازمند دوره‌های روانکاری نشان داده شده در شکل ۲-۲۳ هستند. فاکتورهای کاهنده دورهٔ روانکاری f_1، f_2، f_3 و f_8 عموماً برای گریس‌های ویژه به کار می‌روند. فاکتورهای کاهندهٔ f_3 و f_4 که مربوط به دما و بار می‌باشند، متناسب با محدوده دماهایی هستند که باید توسط سازندهٔ روانکار مشخص شوند.

روانکاری مجدد و دوره‌های روانکاری مجدد

پر کردن مجدد و یا تعویض گریس در مواردی که عمر مفید گریس یا دوره روانکاری، کوتاه‌تر از عمر مفید بیرینگ باشد، لازم است.

بیرینگ‌ها به کمک پمپ‌های دستی گریسکاری و از طریق گریس‌خور، روانکاری مجدد می‌شوند. اگر نیاز به روانکاری مجدد به صورت مکرر باشد، باید از پمپ‌های اتوماتیک گریس و واحدهای کنترل حجمی استفاده شود (سیستم مرکزی روانکاری یا روانکاری با اسپری گریس).

جدول ۲-۱۰ فاکتورهای کاهنده‌ی f_1 تا f_6 برای شرایط کاری و شرایط محیطی ضعیف

تأثیر گرد و خاک و رطوبت روی سطوح تماس بیرینگ	
محدود	$f_1 = 0.9–0.7$
قوی	$f_1 = 0.7–0.4$
بسیار قوی	$f_1 = 0.4–0.1$
تاثیر شوک و لرزش	
محدود	$f_2 = 0.9–0.7$
قوی	$f_2 = 0.7–0.4$
بسیار قوی	$f_2 = 0.4–0.1$
تأثیر دماهای بالا روی گریس‌های صابون لیتیمی استاندارد	
محدود (تا 75 °C)	$f_3 = 0.9–0.6$
قوی (75-85 °C)	$f_3 = 0.6–0.3$
بسیار قوی (85-120 °C)	$f_3 = 0.3–0.1$
تأثیر بارهای سنگین	
$P/C = 0.10–0.15$	$f_4 = 1.0–0.7$
$P/C = 0.15–0.25$	$f_4 = 0.7–0.4$
$P/C = 0.25–0.35$	$f_4 = 0.4–0.1$
تأثیر جریان هوای عبوری از داخل بیرینگ	
جریان آرام	$f_5 = 0.7–0.5$
جریان قوی	$f_5 = 0.5–0.1$
تأثیر نیروی گریز از مرکز روی شفت‌های عمودی	
بسته به نوع حلقه آب‌بند	$f_6 = 0.7–0.5$

به شکل ۲-۱۷ رجوع کنید. این بسیار مهم است که گریس تازه جایگزین گریس کهنه شود، در این حالت است که گریس به اندازه کافی وارد شده و از پر شدن بیش از حد گریس نیز جلوگیری خواهد شد.

اگر به میزان قابل توجهی، دوره روانکاری از دوره‌های روانکاری محاسبه شده با توجه به شکل ۲-۲۳ و جداول ۲-۱۰ و ۲-۱۱ فراتر رود، باید ضریب بالاتری از خرابی زود هنگام بیرینگ ناشی از روانکاری ضعیف در نظر گرفته شود، البته میزان این ضریب به کیفیت گریس نیز بستگی دارد. از این رو، باید تعویض یا پر کردن گریس مطابق یک جدول زمان‌بندی شده و به موقع انجام پذیرد. دوره‌های تعویض گریس باید کوتاه‌تر از دوره روانکاری کاهش یافتهٔ t_{fq} باشد. در اکثر موارد، هنگام روانکاری مجدد بیرینگ خارج کردن گریس‌های کهنه به‌طور کامل مشکل است. در نتیجه، دوره‌های روانکاری مجدد باید کوتاه‌تر باشند (معمولاً دوره‌های روانکاری

جدول ۲-۱۱ فاکتورهای کلی کاهنده q برای کاربردهای مختلف

	q	جریان هوا	بارهای شدید	دمای چرخشی افزایش یافته	شوک لرزش	گرد و خاک
موتورهای الکتریکی ثابت	1	–	–	–	–	–
محور مجموعه مرغک	1	–	–	–	–	–
محور دستگاه سنگ	1	–	–	–	–	–
دستگاه سنگ تخت	1	–	–	–	–	–
شفت اره دیسکی	0.8	–	–	–	–	•
فلایویل دستگاه پرس بدنه خودرو	0.8	–	–	–	–	•
سنگ‌شکن چکشی	0.8	–	–	–	–	•
دینامومتر	0.7	–	–	•	–	–
بیرینگ‌های جعبه محور برای لوکوموتیو	0.7	–	–	–	•	•
موتورهای الکتریکی، با تهویه	0.6	•	–	–	–	–
قرقره‌های برگشت طناب در نمونه‌های سبک	0.6	–	–	–	–	••
چرخ جلوی خودرو	0.6	–	–	–	•	•
محور دستگاه نساجی	0.3	–	–	–	•••	–
دستگاه سنگ شکن فکی	0.2	–	•	–	••	••
موتورهای لرزاننده	0.2	–	–	•	•••	•
غلتک مکش	0.2	–	–	–	–	•••
غلتک پرس در بخش مرطوب	0.2	–	–	–	–	•••
غلتک اصلی (در دستگاه نورد)	0.2	–	–	•	–	•••
دستگاه گریز از مرکز	0.2	–	••		–	•
باکت دستگاه بازیافت	0.1	–	•	–	–	•••
چهار چوب اره	< 0.1	–	–	–	•••	•
غلتک لرزاننده	< 0.1	–	–	•••	•••	•
صفحه لرزاننده	< 0.1	–	–	–	•••	•
چرخدنده چرخشی یک دستگاه حفاری	< 0.1	–	•••	–	–	••
ماشین ساچمه سازی	< 0.1	–	•••	•	–	•
پولی تسمه نقاله	< 0.1	–	•	–	–	•••

• تأثیر محدود •• تأثیر قوی ••• تأثیر بسیار قوی

مجدد بین t_{fq} 0.5 تا t_{fq} 0.7 می‌باشند). مقادیر مناسب گریس برای دوباره پر کردن در جدول ۲-۱۲ آورده شده است. در مواردی که هنگام روانکاری مجدد *نتوانیم* گریس مصرف شده را خارج کنیم (هیچ فضای خالی در نشیمنگاه *نباشد*، هیچ سوراخ خروج گریس یا شیر گریس وجود *نداشته* باشد)، نیاز به دوباره پرکردن خواهیم داشت. مقدار گریس تأمین شده باید محدود باشد تا از پر شدن بیش از حد گریس جلوگیری شود.

در صورت وجود فضاهای آزاد بزرگ در نشیمنگاه، وجود شیرهای گریس و سوراخ های خروج گریس یا وجود سرعت محیطی پایین حدود nd_m < 100 000 mm/min، توصیه می‌شود دفعات روانکاری مجدد بیشتری اتخاذ شود.

جدول ۲-۱۲ مقادیر گریس در روانکاری مجدد

مقدار m_1 برای روانکاری مجدد هفتگی تا سالیانه

$m_1 = DBx$ (m_1 in grams)

هفتگی	$x = 0.002$
ماهیانه	$x = 0.003$
سالیانه	$x = 0.004$

مقادیر m_2 برای دوره‌های روانکاری مجدد فوق‌العاده کوتاه

$m_2 = (0.5\text{–}20)V$ (m_2 in kg/h)

مقدار m_3 از راه‌اندازی مجدد بیرینگ بعد از چند سال کارنکردن آن

$m_3 = 0.01DB$ (m_3 in grams)

V فضای خالی در بیرینگ (m3)

$\approx 1/4\pi B(D^2 - d^2)\times 10^{-9} - G/7800$

d قطر سوراخ داخل بیرینگ (mm)

D قطر خارجی بیرینگ (mm)

B پهنای بیرینگ (mm)

G جرم بیرینگ (kg)

در این موارد، ریسک افزایش دما ناشی از کارکرد گریس کاهش خواهد یافت. وجود مقادیر فراون گریس، باعث بهبود در امر تعویض گریس کهنه با گریس تازه شده و با حلقه‌های آب‌بندی در جلوگیری از وارد شدن گرد و خاک و رطوبت به داخل بیرینگ همکاری می‌کند. بسیار مناسب است که روانکاری مجدد هنگام دوران بیرینگ در دمای کاری خود، انجام پذیرد. برای دوره‌های روانکاری طولانی، توصیه می‌شود که حتماً گریس تازه با گریس کهنه تعویض شوند. اگر مقادیر گریس بیشتر از گریس موجود در بیرینگ را با فشار وارد بیرینگ کنیم می‌توان گریس‌های کهنه را از بیرینگ خارج کرد و به میزان زیادی به این هدف دست یافت. در شرایطی که به خاطر دماهای بالا، بخشی از گریس کهنه خراب شده باشد، به مقادیر زیادی از گریس تازه نیاز است. برای بیرون آوردن هر چه بیشتر گریس کار کرده، امکان دارد در روانکاری مجدد تا سه برابر مقدار گریس تعیین شده در جدول ۲-۱۲ استفاده شود. تمام انواع گریس‌ها مناسب برای تخلیه کردن نیستند. گریس‌های مناسب توسط سازندگان توصیه شده‌اند. تعویض گریس با سیستم تغذیه و جریان گریس سهل‌تر می‌شود. این روش باعث تضمین تعویض گریس به صورت یک دست در محیط خواهد شد. طرح‌های نمونه در شکل‌های ۲-۲۷، ۲-۳۰ نشانداده شده‌اند. هنگام تعویض گریس، گریس باید بتواند براحتی از بیرینگ خارج شود یا بتواند به فضایی با حجم مناسب برای ذخیره گریس کهنه وارد شود. دوره‌های روانکاری مجدد خیلی کوتاه مدت، در مواردی نیاز است که بیرینگ تحت تنش بسیار بالایی باشد ($nd_m > 500\,000$ mm/min، $P/C > 0.3$، $t < 140°C$، یا ترکیبی از مقادیر پایین‌تر). تحت این شرایط، کاربرد پمپ گریس قابل توجیه است. باید مراقب بود گریس داخل بیرینگ، نشیمنگاه و لوله تغذیه بتواند غلظت خود را به میزانی که قابل پمپ باشند، حفظ کنند. در دماهای فوق‌العاده زیاد، امکان دارد گریس خشک شود و مسیر گریس تازه را مسدود سازد و باعث بسته شدن شیرهای تنظیم شود.

گریس خارج شده می‌تواند به عنوان یک ماده آب‌بندی عمل کند (حلقه‌های آب‌بندی مناسب در بخش ۴-۴-۱ توضیح داده شده‌اند) البته اگر مقادیر کمی، همواره در دوره‌های روانکاری کوتاه مدت تأمین شود. مقادیر گریس تأمین شده در روانکاری در هر ساعت می‌تواند

بین نصف تا چند برابر حجم فضای خالی داخل بیرینگ باشد. با اعمال مقادیر m_2 توصیه شده در جدول ۲-۱۲ در دوره‌های روانکاری کوتاه مدت، گریس به میزان 2 cm^3 یا بیشتر در روز بسته به پهنای فاصله خالی حلقه آب‌بندی، از بیرینگ خارج می‌شود. اگر دما بالا باشد، از گریس‌های ارزان قیمت که فقط برای دوره‌های کوتاه پایدار هستند و یا از گریس گرانتر که پایداری حرارتی بهتری دارند استفاده کنید. وقتی از گریس‌های ارزان قیمت استفاده می‌کنید، باید در هر ساعت به میزان یک تا دو درصد حجم فضای خالی بیرینگ، برای روانکاری گریس مصرف کنید. برای گریس‌هایی با پایداری حرارتی و گریس‌های ویژهٔ خیلی گران قیمت، مقدار گریس در روانکاری مجدد به میزان 0.2% حجم فضای خالی بیرینگ در ساعت کافی است. هرچند، با این مقادیر کم، اطمینان از ورود مستقیم گریس به داخل بیرینگ، قطعاً ضروری است. روانکاری مجدد با مقادیر کم در سرعت‌های محیطی بالا نیز امکانپذیر است. با این مقادیر کم روانکار، گشتاور اصطکاکی و حرارت، فقط به میزان ناچیزی افزایش می‌یابند. همچنین، ضرر کمتری بر محیط زیست وارد می‌شود. هرچند، این روش به معنای تعمیر و نگهداری بیشتر و تجهیزات روانکاری پیچیده‌تر است. مقادیر خیلی کم گریس را می‌توان به کمک روش اسپری گریس، در نقاط تعیین شده تأمین کرد (شکل ۲-۱۷).

در بعضی موارد *نمی‌توان* از مخلوط شدن چند نوع گریس متفاوت اجتناب کرد. ثابت کرده‌اند مخلوط کردن گریس‌هایی با صابون‌هایی با پایه یکسان تقریباً مطمئن است. اصول قابلیت اختلاط روغن‌ها و گریس‌ها در جدول‌های ۲-۱۳ و ۲-۱۴ آورده شده‌اند. اگر گریس‌هایی که با هم سازگار نیستند، با هم مخلوط شوند،

جدول ۲-۱۳ قابلیت اختلاط روغن‌ها

روغن پایه	روغن معدنی	روغن استری	روغن پلی‌گلیکول	روغن سیلیکون (متیل)	روغن سیلیکون (فنیل)	روغن پلی‌فنیل اتر	روغن آلکوکسی فلئوردار
روغن معدنی	+	+	−	−	+	+	−
روغن استری	+	+	+	−	+	+	−
روغن پلی‌گلیکول	−	+	+	−	−	−	−
روغن سیلیکون (متیل)	−	−	−	+	+	−	−
روغن سیلیکون (فنیل)	+	+	−	+	+	+	−
روغن پلی‌فنیل‌اتر	+	+	−	−	+	+	−
روغن آلکوکسی فلوئوردار	−	−	−	−	−	−	+

+ می‌تواند مخلوط شود − نباید مخلوط شود

جدول ۲-۱۴ قابلیت اختلاط گریس‌های روانکاری

صابون‌های موجود در گریس	صابون لیتیم	صابون مرکب لیتیم	صابون سدیم	صابون مرکب سدیم	صابون مرکب کلسیم	صابون مرکب باریم	صابون مرکب آلومینیوم	بنتونیت/ هکتوریت	پلی اوره
صابون لیتیم	+	+	–	0	0	0	–	–	0
صابون مرکب لیتیم	–	+	–	0	0	0	0	–	0
صابون سدیم	–	–	+	+	0	0	–	–	+
صابون مرکب سدیم	–	0	–	+	0	0	0	–	0
صابون مرکب کلسیم	–	0	–	0	+	+	0	–	0
صابون مرکب باریم	–	0	–	0	+	+	0	–	0
صابون مرکب آلومینیوم	–	0	–	0	0	0	+	–	0
بنتونیت/ هکتوریت	–	0	–	0	0	0	–	+	0
پلی اوره	–	0	–	0	0	0	–	–	+

+ عموماً سازگاری خوبی دارند 0 معمولاً سازگار هستند. برای مصارف ویژه باید کنترل شود ـ عموماً سازگار نیستند

ساختارشان می‌تواند به شکل مؤثری تغییر یابد، و امکان دارد گریس‌ها به میزان قابل توجهی رقیق شوند. اگر نوع متفاوتی از گریس به شکل تعمدی انتخاب شود، باید توسط مقادیر بسیار زیادی از گریس جدید، گریس قدیمی را از بیرینگ خارج کرد، این هدف را می‌توان با طرح روانکاری موجود در بیرینگ انجام داد. شارژ بعدی گریس جدید باید در دورهٔ نسبتاً کوتاهی به بیرینگ اعمال شود.

مثال‌های طراحی سیستم‌های روانکاری با گریس

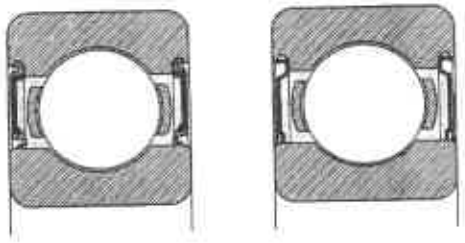
ساختارماشین‌آلات را می‌توان با استفاده از بیرینگ‌های غلتشی‌ای که مجهز به حلقه آب‌بندی بوده و از پیش توسط سازنده، گریسکاری شده باشند، ساده کرد.

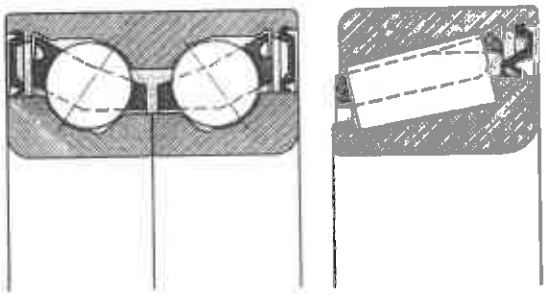
بسته به کاربرد، می‌توان از غلاف‌های محافظ یا حلقه‌های آب‌بندی بتن‌هایی استفاده کرد و یا به همراه حلقه آب‌بندی اولیه به کار برد. حلقه‌های آب‌بندی لاستیکی (طرح RSR)، به خاطر اصطکاک حلقه، باعث افزایش دمای بیرینگ می‌شوند. غلاف‌ها (ZR) و حلقه‌های آب‌بندی غیرلاستیکی (RSD) با رینگ داخلی فاصله کمی دارند و باعث افزایش اصطکاک بیرینگ نمی‌شوند. گریس استاندارد به کار رفته در بلبیرینگ‌های شیار عمیق آب‌بندی شده از دو طرف، یک گریس با صابون لیتیمی با کلاس غلظت 2 یا 3 است.

برای بیرینگ‌های کوچکتر از گریس‌های رقیقتری استفاده می‌شود. در این بیرینگ‌ها، حدوداً 35% از

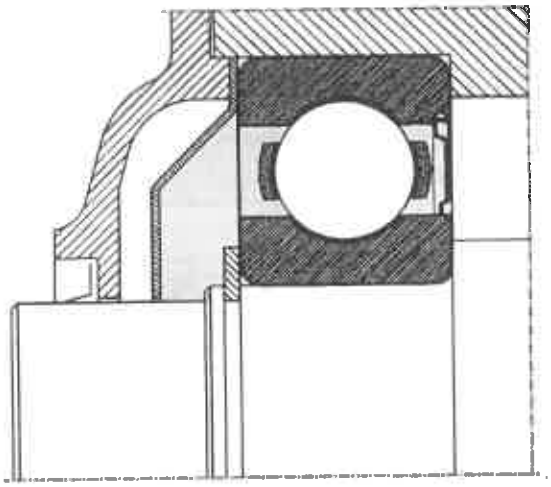
فضای خالی بیرینگ با گریس پر می‌شود. تحت شرایط کاری و محیطی عادی، این مقدار از گریس برای مدت کارکرد طولانی کافی است.

طی یک دوره کوتاه آب‌بندی، گریس پخش شده و بخش عمده‌ای از آن روی سطوح داخلی حلقه‌های آب‌بندی و غلاف‌ها چسبیده و تشکیل یک ناحیه غیر متخلخل را می‌دهد. بعد از قرار گرفتن گریس در سطوح ذکر شده، جریان گریس به داخل تقریباً قطع شده و بیرینگ با اصطکاک پایین کار خواهد کرد. بعد از تکمیل دورهٔ آب‌بندی، اصطکاک فقط حدود 50% – 30 اصطکاک در لحظه شروع حرکت خواهد بود. بلبیرینگ شیار عمیق نشان داده شده در شکل ۲–۲۵ فقط از یک طرف مجهز به حلقه آب‌بندی است.



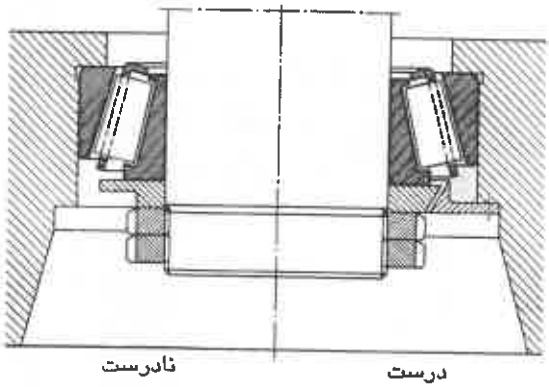


شکل ۲–۲۴ بیرینگ‌های غلتشی مجهز به حلقه‌های آب‌بندی و گریسکاری شده توسط سازندهٔ بیرینگ



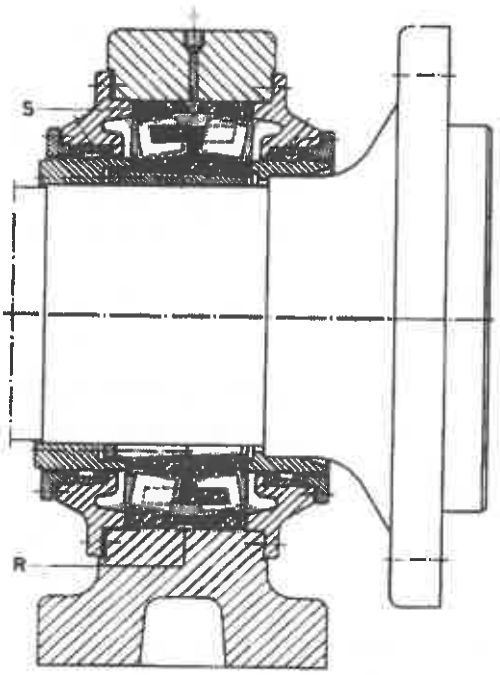
شکل ۲–۲۵ بین یک صفحه زاویه‌دار موجگیر و بیرینگ از گریس ذخیره شود

در طرف‌دیگر، به کمک یک صفحهٔ موج‌گیر ذخیره‌ای از گریس تشکیل شده است. در دماهای بالا، گریس ذخیره شده از خود روغن پس می‌دهد که این روغن، به‌مدت طولانی بلبیرینگ شیار عمیق را به شکل مناسبی روانکاری می‌کند. این امر باعث عمر طولانی‌تربدون تولیداصطکاک روانکاراضافی، می‌شود. یک صفحه موج‌گیر، هنگام پمپاژ یا جابه‌جا نمودن گریس، یا در بلبیرینگ‌هایی که روی محور عمودی نصب شده باشند (شکل ۲–۲۶)، جلوی خروج گریس از بیرینگ را می‌گیرد. به خصوص برای انواعی از بیرینگ‌ها که اصطکاک لغزشی بالایی دارند و پمپاژ شدید یا تأثیرات جابه‌جایی شدیدی برآنها اعمال می‌شود (مثل رولربیرینگ‌های مخروطی)، در سرعت‌های بالا، یک صفحه موجگیر بسیار مفید است، هرچند این صفحه همیشه مفید نیست. در واقع تأمین گریس با دوره‌های روانکاری کوتاه، بیشتر مفید است.



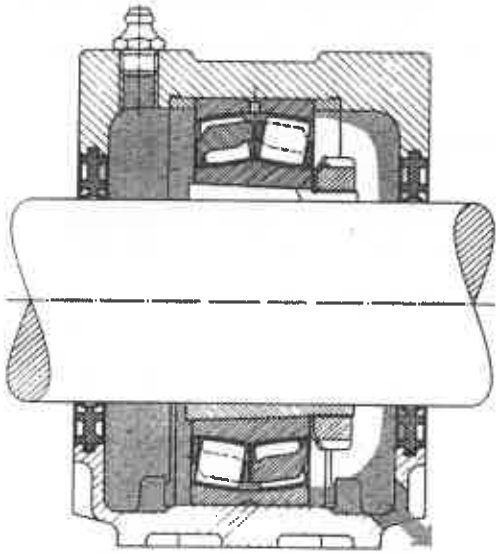
شکل ۲-۲۶ یک صفحه موجگیر، گریس را داخل و نزدیک بیرینگ نگه می‌دارد

شکل ۲-۲۷ نحوه تغذیه گریس به داخل بیرینگ از طریق شیار روانکاری و چندین سوراخ روانکاری موجود در رینگ خارجی را نشان می‌دهد. تغذیه مستقیم و متقارن گریس، باعث تضمین در تأمین یکنواخت گریس در هر دو ردیف رولرها می‌شود. باید برای خروج گریس کهنه از طرف دیگر بیرینگ فضاها یا سوراخ‌های خروجی با اندازهٔ مناسبی در نظر گرفته شود.



شکل ۲-۲۷ گریس از طریق رینگ خارجی تغذیه می‌شود

رولربیرینگ کروی نشان داده شده در شکل ۲-۲۸ از یک طرف روانکاری مجدد می‌شود. هنگام روانکاری مجدد، گریس کهنه از طرف مخالف خارج می‌شود. **سوراخ‌های خروج گریس یا شیرهای موجود در سیستم گریسکاری مانع از نگهداشتن گریس هنگامی که تغذیهٔ** دوباره مقادیر زیادی از گریس موردنیاز باشد، خواهد شد. در دوره آب‌بندی بیرینگ، دما برای یک تا چند ساعت به حدود 20 °C تا 30 °C بیشتر از دمای کاری می‌رسد. نوع گریس و میزان غلظت آن در تعیین الگوی منحنی دما نقش اصلی را بازی می‌کنند.

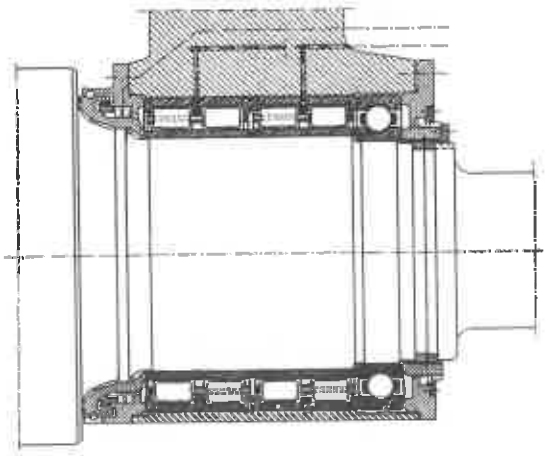


شکل ۲-۲۸ گریسکاری مجدد : وجود سوراخ گریس، از پر شدن بیش از حد گریس جلوگیری می‌کند

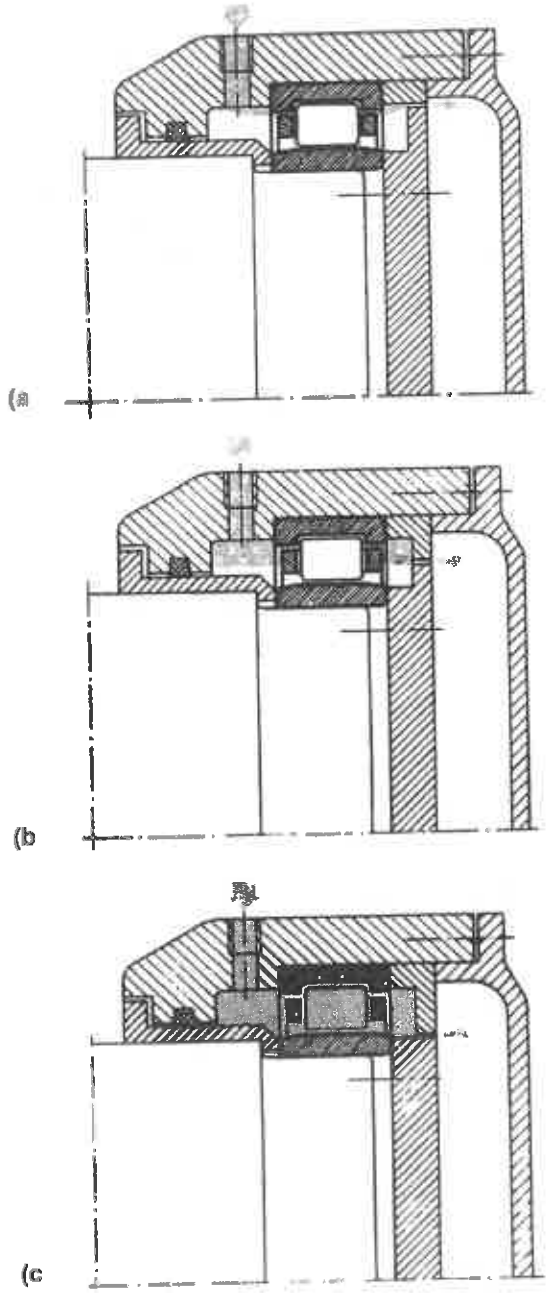
دربیرینگ‌های چندردیفه، مثل بیرینگ‌های شکل ۲-۲۹، گریس از سوراخ‌های شعاعی موجود در لبه‌ها یا از طریق لبه‌های باز به سطوح تماس تغذیه می‌شود. بعد از عبور از رولرها، گریس باید بتواند از میان فاصله باز حلقه آب‌بندی، یک سوراخ یا چیزی مشابه آنها، خارج شود.

اگر یک شیر در مسیر گریسکاری نصب شود (شکل ۲-۳۰)، یک ریسک به وجود می‌آید و آن اینکه با دوره‌های نسبتاً طولانی روانکاری مجدد، سرعت‌های محیطی بالا و یک گریس قابل پمپاژ - فقط مقدار کمی از گریس در سطوح بیرینگ در سمت شیر گریسکاری باقی می‌ماند.

با جابه‌جا کردن فاصله بین شیر گریسکاری چرخان و پایه ثابت آن به جایی نزدیکتر به شفت، می‌توان از این اتفاق اجتناب کرد. از یک شیر گریسکاری معمولی درحالیکه فاصله هوایی هم سطح رینگ خارجی قرار بگیرد، می‌توان به تأثیر قوی دست یافت (شکل ۲-۳۰a).



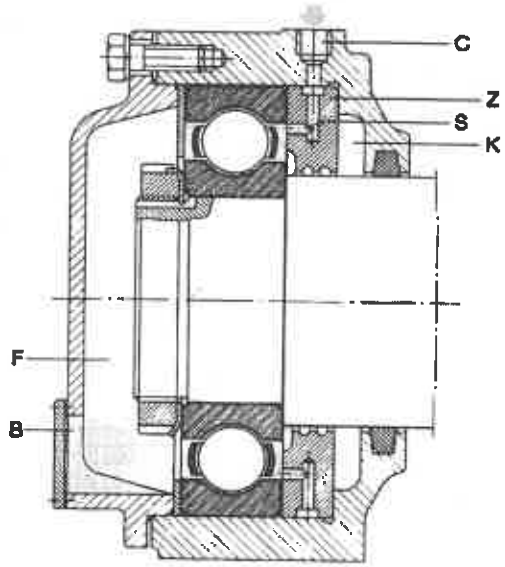
شکل ۲-۲۹ گریس از داخل سوراخ‌های موجود در لبه‌های رولربیرینگ استوانه‌ای چند ردیفه مربوط به گلویی غلتک، به داخل بیرینگ تغذیه می‌شود



شکل ۲-۳۰ اثر پمپاژ شیر گریسکاری، به قطر آن و سرعت دوران بستگی دارد.

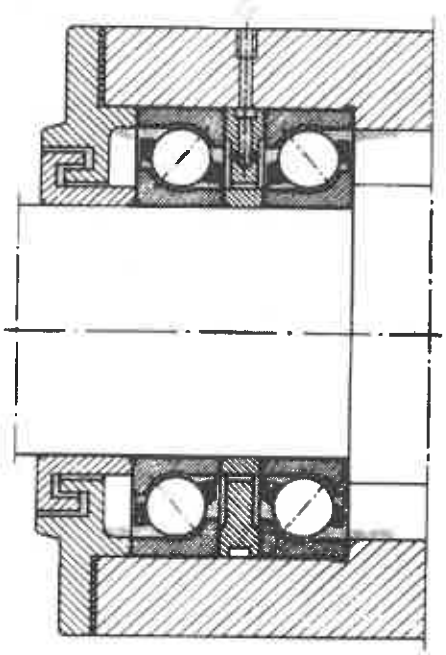
اگر فاصله هوایی در سطح دایره گام قرار بگیرد، تأثیر پمپاژ محدود است (شکل ۲-۳۰b)، و اگر فاصله هوایی در سطح‌رینگ داخلی باشد، تأثیر پمپاژ تقریباً منفی خواهد بود (شکل ۲-۳۰c). در آن صورت شیر گریسکاری مشابه یک صفحه موج‌گیر عمل کرده و گریس را داخل بیرینگ نگه خواهد داشت.

روانکاری مجدد بیرینگ در حال چرخش : مطابق شکل ۲-۳۱، گریس مربوط به روانکاری مجدد، از طریق سوراخ S، که داخل دیسک Z است مستقیماً به فضای بین قفسه و رینگ خارجی فشرده می‌شود تا کار آب‌بندی را بهبود دهد. گریس کهنه، توسط گریس تازه به فضای F بین بیرینگ و درپوش هل داده می‌شود، این گریس باید به‌صورت دوره‌ای، از طریق دریچه B خالی شود. بعد از نصب، محفظه K که در طرف راست بیرینگ است برای بهبود آب‌بندی با گریس پر می‌شود.



شکل ۲-۳۱ تأمین مستقیم گریس از پهلو و از میان سوراخ‌های دیسک تغذیه

روانکاری مجدد بیرینگ ثابت: سوراخ‌های S باید طوری روی دیسک Z طراحی شود که گریس به شکل یکنواخت به داخل بیرینگ تغذیه شود، تا در جابه‌جاکردن گریس کهنه مؤثر باشند. سوراخ‌های S روی دیسک Z که نزدیک سوراخ تغذیهٔ C قرار دارند باید برای ایجاد انتشار یکنواخت گریس در محیط بیرینگ، در فاصله دورتری نسبت به سوراخ‌های مقابل C در راستای قطر قرار بگیرند. این امر مقاومت یکنواخت سیال را تضمین می‌نماید. در نتیجه، گریس تازه، گریس کهنه را از بیرینگ خارج می‌کند. مقادیر زیاد گریس تازه، در جابه‌جا کردن گریس کهنه کمک می‌کند. جفت بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای در شکل ۲-۳۲، با گریس تازه و از طریق سوراخ‌های روانکاری موجود در فاصله‌انداز بین دو بیرینگ تأمین می‌شود.



شکل ۲-۳۲ تأمین گریس از میان یک جفت بیرینگ

با شروع گریسکاری از قطر کوچک رینگ داخلی، جایی که نیروی گریز از مرکز گریس را تا رینگ خارجی انتقال می‌دهد، از تله افتادن و ثابت ماندن گریس اجتناب می‌شود. فقط بیرینگ‌هایی با مقطع نامتقارن، این چنین تأثیر انتقال دهندهٔ گریس خواهند داشت، مثل بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای و رولربیرینگ‌های مخروطی. اگر یک جفت بیرینگ با سطح مقطع متقارن را بخواهیم از بین دو بیرینگ روانکاری مجدد نماییم، باید از شیرهای گریسکاری یا سوراخ‌های خروج گریس در هر دو طرف جفت بیرینگ استفاده شود. این مسئله بسیار مهم است که مقاومت خروج گریس از هر دو طرف تقریباً یکسان باشد. در غیر این صورت، بخش عمده‌ای از گریس از طرفی که مقاومت کمتری در مقابل خروج گریس از خود نشان می‌دهد خارج شده و باعث اختلال در روانکاری طرف دیگر خواهد شد.

این مثال‌ها نشان می‌دهند که هدایت درست گریس داخل بیرینگ، معمولاً هزینه بالایی دارد، بنابراین، ترجیحاً این روش‌ها در ماشین‌آلات مهم یا در جایی که شرایط کاری سختی از قبیل: سرعت‌ها، بارها یا دماهای بالا موجود باشد به کار می‌روند. در آن صورت باید تعویض گریس کهنه تضمین شده و از پر شدن بیش از حد گریس جلوگیری شود. در شرایط عادی، نیازی به اینگونه روش‌های گرانقیمت نیست. برای این شرایط، قرار دادن مقادیری گریس در کنار مجموعه بیرینگ در هر دو طرف بیرینگ، گریسکاری قابل اعتمادی ایجاد می‌کند.

گریس‌های کنار هر دو طرف بیرینگ، بتدریج از خود روغن پس داده و سطوح تماس را روانکاری و باعث محافظت فوق‌العاده از بیرینگ در مقابل نفوذ آلودگی می‌شود که اگر این گریس‌ها *نبودند* می‌توانست به داخل بیرینگ راه یابد.

هر چند، هنگام روانکاری مجدد بیرینگ، *نمی‌توان* مطمئن بود که گریس تازه بتواند به تمام سطوح برسد. از آنجا که موقع روانکاری مجدد امکان دارد آلودگی‌ها وارد بیرینگ شوند، بهتر است دوره‌های روانکاری مجدد طولانی مدت در نظر گرفته شود. در عوض می‌توان در مواقع تعمیرات اساسی ماشین، بیرینگ‌ها را دمونتاژ و شستشو کرد و با گریس تازه پر نمود.

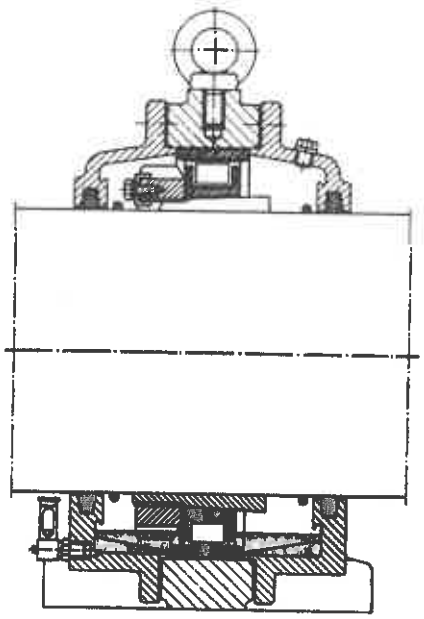
۲-۶-۲ تأمین روغن

در مقایسه با روانکاری به وسیله گریس، روانکاری با روغن این مزیت را دارد که روغن را می‌توان با روش‌های مختلف به بیرینگ وارد کرد، از قبیل غوطه‌وری در استخر روغن، روانکاری مدار بسته و روانکاری به شکل گذر روغن از داخل بیرینگ. بهترین روش، به موارد مختلفی از قبیل شرایط کاری و جنبه‌های طراحی بستگی دارد.

روانکاری با حمام روغن

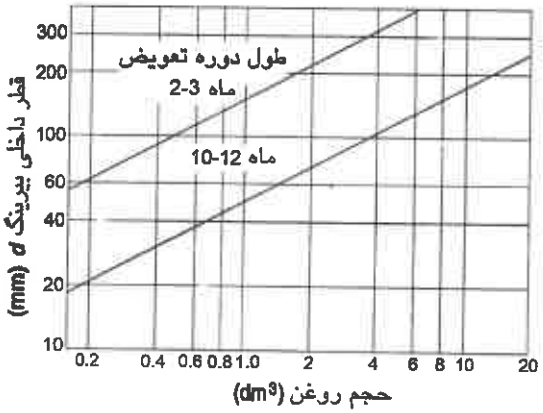
در یک حمام روغن بخشی از بیرینگ داخل روغن است. در حالتی که شفت در موقعیت افقی باشد، باید نیمی از جزء غلتنده‌ای که در پایین‌ترین نقطه قرار گرفته است، هنگام توقف بیرینگ، داخل روغن قرار گیرد (**شکل ۲-۳۳**).

هنگام دوران بیرینگ، روغن توسط اجزاء غلتنده و قفسه جابه‌جا شده و در محیط بیرینگ پخش می‌شود.



شکل ۲-۳۳ سطح روغن در حمام پایین محفظه یک بیرینگ

برای تضمین جریان روغن، در بیرینگ‌های با سطح مقطع غیرمتقارن و یا در شکل‌های هندسی‌ای که خاصیت پمپاژ روغن دارند، باید سوراخ‌ها یا حفره‌های برگشت روغن در نظر گرفته شود. اگر سطح روغن به بالای جزء غلتنده پایینی برسد، خصوصاً در صورتی که سرعت محیطی بالا باشد، اصطکاک ناشی از تلاطم روغن، دمای بیرینگ را بالا برده و امکان دارد در روغن کف ایجاد شود. در اندیس‌های سرعت nd_m < 150 000 mm/min امکان دارد سطح روغن بالاتر در نظر گرفته شود. اگر غوطه‌وری کامل بیرینگ غیرقابل‌اجتناب باشد، مثل حالتی که شفت بیرینگ در وضعیت عمودی قرار گرفته باشد، بسته به لزجت روغن، ممان اصطکاک به دو یا سه برابر حالت عادی خواهد رسید. عموماً از روش روانکاری با حمام روغن، تا اندیس سرعت nd_m = 300 000 mm/min می‌توان استفاده کرد. اگر روغن دائماً تازه شود، تا اندیس‌سرعت nd_m = 500 000 mm/min نیز می‌توان استفاده کرد. در اندیس سرعت nd_m = 300 000 mm/min به بالا دمای بیرینگ گاهی تا 70 °C بالا می‌رود. باید سطح روغن در استخر به طور مرتب کنترل شود. زمان‌بندی تعویض روغن به آلودگی و عمر مفید روغن بستگی دارد. کهنه شدن روغن با حضور اکسیژن، تراشه‌های فلزی (کاتالیزور) و دمای بالای روغن، شتاب می‌گیرد. مراحل و فازهای کهنه شدن روغن را می‌توان آنالیز کرد. میزان مقادیر آلودگی، لزجت، درجه خنثی سازی، درجه صابونی شدن و وجود طیف فرو سرخ بر این پدیده مؤثر هستند. با توجه به این مقادیر، سازندگان روغن و مهندسین می‌تواند بگویند که روغن چه مدت عمر خواهد کرد. تحت شرایط‌عادی، دوره‌های‌تعویض روغن تعیین‌شده در شکل ۲-۳۴ را باید به کار برد. این مسئله مهم است که دمای بیرینگ از 80 °C فراتر نرود و



شکل ۲-۳۴ حجم روغن و دوره‌های تعویض آن نسبت به قطر داخلی بیرینگ

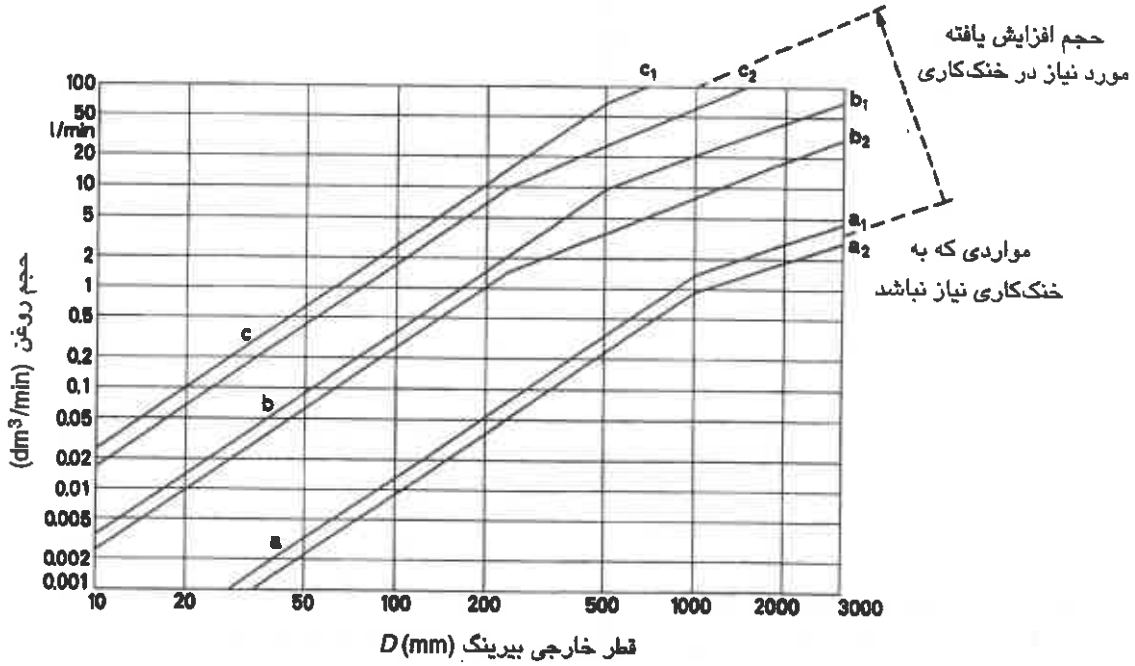
آلودگی ناشی از ذرات خارجی و سایش پایین باشد. همانگونه که در دیاگرام مشاهده می‌شود، اگر حجم روغن کم باشد تعویض دائم روغن ضروری است. در دورهٔ آب‌بندی، شاید به تعویض روغن زودهنگام نیاز باشد زیرا در این مدت دمای کاری بالا است و آلودگی ذرات ناشی از سایش نیز بیشتر است. این کار به ویژه برای بیرینگ‌های غلتشی که به‌همراه چرخدنده‌ها روانکاری می‌شوند، باید انجام شود. افزایش محتویات جامد و مایع خارجی گاهی نیازمند تعویض روغن پیش از موعد خواهد شد. مقادیر مجاز ذرات جامد و مایع به ابعاد و سختی این ذرات بستگی دارد.

مقادیر مجاز آب داخل روغن، به نوع روغن بستگی داشته و در صورت نیاز توسط سازنده روغن تعیین می‌شود. آب داخل روغن، باعث خوردگی شده، فاسد شدن از طریق هیدرولیز را شتاب داده، به همراه مواد افزودنی EP تشکیل مواد خورنده و ساینده می‌دهد و بر تشکیل فیلم روانکار انتقال‌دهندهٔ بار تأثیر می‌گذارد. آبی که از طریق حلقه‌های آب‌بندی وارد بیرینگ شده یا اینکه از قطران بخار آب داخل بیرینگ حاصل شده باشد، در هر دو صورت باید به سرعت از روغن جدا شود. روغنی با قابلیت مثبت جداسازی آب، بسیار مفید است، کار جداسازی نیز در دستگاه جداساز انجام می‌شود. در روغن‌های پلی گلیکول، جداسازی آب از روغن مشکل است، زیرا چگالی روغن، مشابه چگالی آب است. آب در مخزن روغن ته نشین نمی‌شود و در دماهای بالاتر از 90 °C به بخار آب تبدیل خواهد شد. برای کاربردهای بحرانی، توصیه می‌شود طول مدت دوره‌های تعویض روغن را به شکل انحصاری و بر پایه آنالیزهای روغن که تکرارپذیر باشند محاسبه کنید، به خصوص اگر استاندارد ایمنی کاری بالایی مورد نظر باشد. این آزمایش خوبی است که روغن را بعد از یک یا دو ماه آنالیز کرد و بر پایه نتایج آنالیز اول که شامل درجه خنثی‌سازی NZ، درجه صابونی شدن VZ، میزان محتویات مواد جامد خارجی و آب و لزجت روغن است دوره مناسب را بدست آورد. هر چند وقتی مدار روانکاری شامل حجم‌ای بالای روغن باشد، این بازرسی بسیار گران‌قیمت خواهد بود. درجهٔ خرابی و آلودگی روغن را با مقایسه یک قطره روغن تازه و یک قطره از روغن استفاده شده روی کاغذ خشک کن، می‌توان با دقت پایین تخمین زد. اختلاف عمده روغن‌ها از لحاظ میزان فساد یا آلودگی از رنگ آنها مشخص می‌شود.

روانکاری به‌صورت مدار بسته

در سیستم مدار بسته، روغن پس از گذشتن از داخل بیرینگ، در یک مخزن روغن جمع‌آوری شده و دوباره در مدار جریان پیدا می‌کند. اگر از سیستم روانکاری مدار بسته روغن استفاده شود، برای جمع‌آوری و جداسازی ذرات ناشی از سایش و آلودگی‌ها به یک فیلتر نیاز است. هر چه بیرینگ کوچکتر باشد باید فیلترهایی با دانه‌بندی ریزتر استفاده کرد. در دماهای کاری بالا، مثلاً برای موتورهای احتراق داخلی، که فیلم روانکار بسیار نازکی ایجاد می‌شود، وجود ذرات ناشی از سایش بین دو سطح در تماس، بسیار مضر خواهد بود.

حجم موردنیاز روغن در جریان، به شرایط‌کاری بستگی دارد. شکل ۲-۳۵ مقادیری که نسبت لزجتشان $K = \nu / \nu_1$ بین 1 تا 2.5 است را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳۵ مقادیرحجمی روغن برای روانکاری مدار بسته : a حجم روغن مناسب روانکاری، b حد بالا برای بیرینگ‌هایی با سطح مقطع متقارن، c حد بالا برای بیرینگ‌هایی با سطح مقطع نامتقارن. $D/d > 1.5$ برای a_1، b_1 و c_1. $D/d \leq 1.5$ برای a_2، b_2 و c_2.

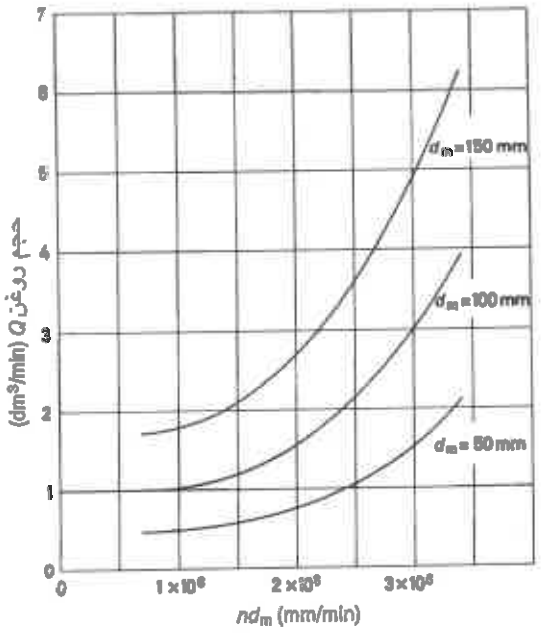
که یک جریان محدود در بیرینگ تولید می‌کند. در مقایسه، مقادیر تعیین شده در شکل ۲-۳۵ (منحنی a_1 و a_2)، مقادیر بزرگی هستند. حجم‌های روغن تعیین شده برای تضمین روانکاری کافی تمام سطوح تماس حتی در شرایط تأمین *ناکافی* روغن به بیرینگ در نظر گرفته شده‌اند، مثل حالتی که روغن به صورت مستقیم به داخل بیرینگ تغذیه *نشود*. مقادیر حداقل حجم روغن تعیین شده، در مواردی که بخواهیم اصطکاک ناشی از روانکار کم باشد، به کار می‌رود. دمای تولیدی در این روش، مشابه روش روانکاری با حمام روغن می‌باشد.

اگر نیاز به پخش حرارت و خنک‌کاری داشته باشیم، باید از حجم بیشتری از روغن استفاده کنیم. از آنجا که هر بیرینگ مقاومت مشخصی در مقابل عبور روغن دارد، در نتیجه برای مقادیر حجم روغن عبوری از بیرینگ، حد ماکزیمم وجود دارد (شکل ۲-۳۵). برای بیرینگ‌هایی با سطح مقطع *نامتقارن* (بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای، رولربیرینگ‌های مخروطی، رولربیرینگ‌های کروی کف گرد) نسبت به بیرینگ‌هایی با سطح مقطع متقارن، می‌توان از جریانهایی با نرخ بیشتر استفاده کرد، زیرا مقاومت آنها به خاطر داشتن

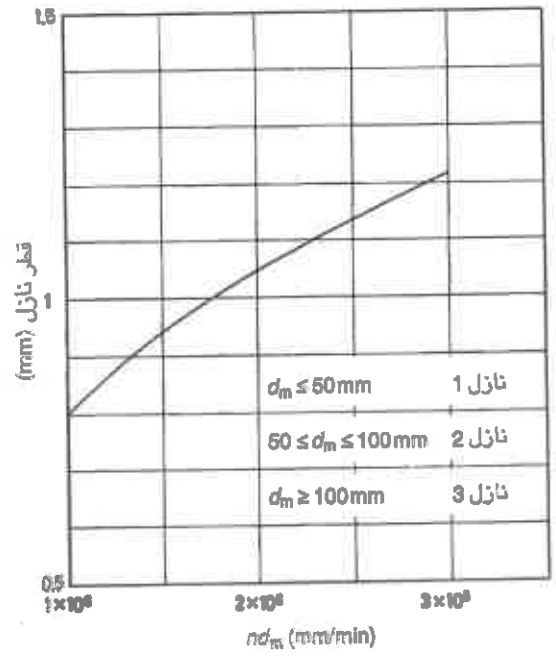
خاصیت پمپاژ پایین است. برای حجم‌های روغن تعیین شده در شکل ۲-۳۵، تأمین روغن و حفظ آن به میزانی است که روغن بدون فشار جابه‌جا شده و حداقل تا زیر شفت بالا بیاید. مقدار حجم روغن مورد نیاز برای تضمین پایین نگه داشتن دمای بیرینگ، برحسب شرایط تولید و انتشار حرارت تعیین می‌شود. حجم مناسب روغن را می‌توان با ثبت دمای بیرینگ در زمان شروع به کار ماشین و تنظیم حجم روغن برحسب دماهای خوانده‌شده محاسبه کرد. مقاومت بیرینگ‌های با سطح مقطع متقارن با افزایش سرعت محیطی‌شان افزایش می‌یابد. اگر به حجم بیشتری از روغن نیاز باشد، باید روغن را مستقیماً بین قفسه و رینگ بیرینگ تزریق کرد. روانکاری توسط جت روغن، تلفات انرژی ناشی از تلاطم و هم‌زدن روغن را کاهش می‌دهد.

شکل ۲-۳۶ حجم روغن توصیه شده در روانکاری با جت روغن نسبت به اندیس سرعت و ابعاد بیرینگ را نشان می‌دهد.

در شکل ۲-۳۷ نیز قطر و تعداد نازل‌ها تعیین شده است. با تزریق روغن به نقاطی که مسیر آزاد عبور وجود داشته باشد، از تله افتادن روغن در جلوی بیرینگ جلوگیری می‌شود. محفظه‌های تخلیه روغن با قطر مناسب باعث می‌شود که روغن در بیرینگ ساکن نمانده و بتواند براحتی داخل بیرینگ و کانال‌ها جریان پیدا کند (شکل ۲-۴۸ و ۲-۴۹).



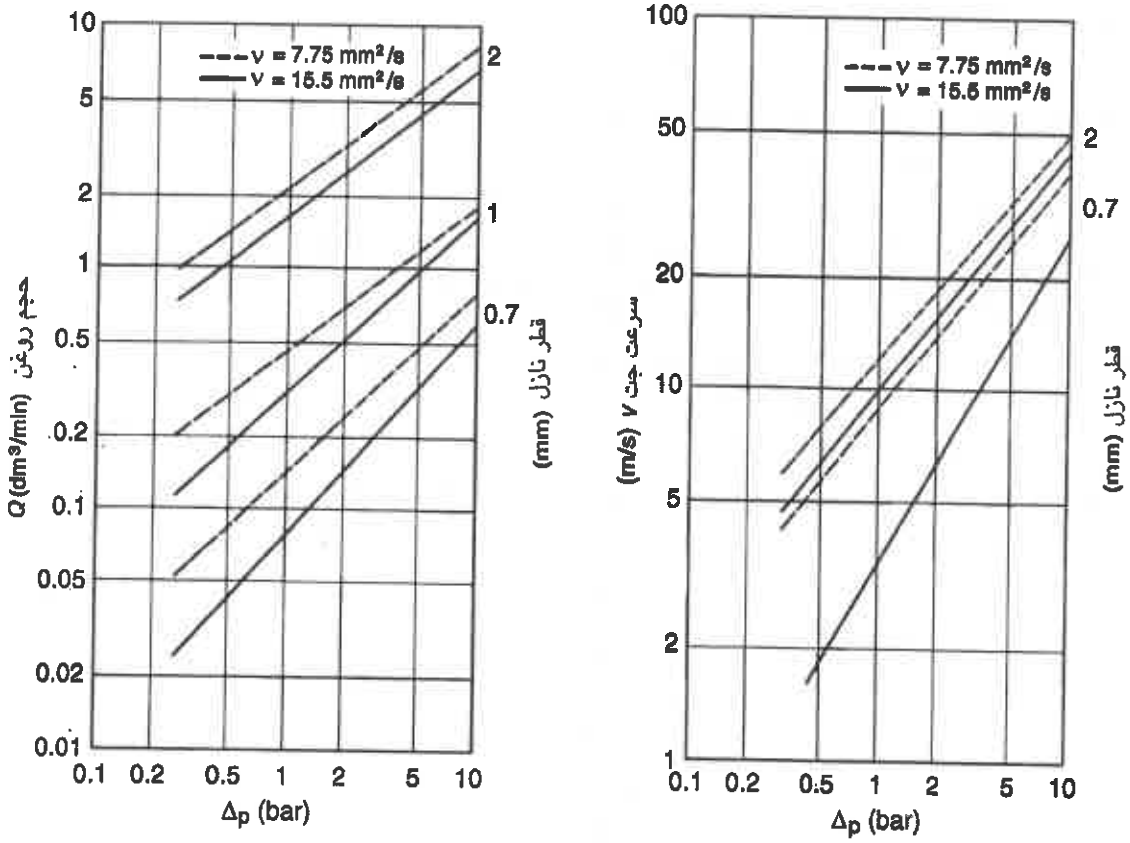
شکل ۲-۳۶ حجم روغن توصیه شده برای روانکاری با جت روغن



شکل ۲-۳۷ قطر و تعداد نازل‌های موردنیاز برای روانکاری با جت روغن ◄

برای سرعت‌های محیطی بالا که معمولاً با جت روغن روانکاری می‌شود، روغن‌هایی با لزجت‌کاری $\nu = 5–10\ mm^2/s$ ($\kappa = 1–4$) کارایی مناسب خود را نشان داده‌اند. شکل ۲-۳۸ نشاندهنده حجم روغن Q و سرعت جت υ برای نازلی با طول $L = 8.3\ mm$، لزجت‌های کاری 7.75 و $15.5\ mm^2/s$، و قطرهای مختلف نازل که تابعی از افت فشار Δp هستند، می باشد. این منحنی‌ها از طریق آزمایش‌های مختلف به‌دست آمده‌اند.

نرخ جریان عبوری از بیرینگ‌هایی که با سرعت بالا دوران می‌کنند، با افزایش سرعت، کاهش پیدا می‌کند. با افزایش سرعت تزریق روغن، می‌توان جریان عبوری را افزایش داد. البته حد بالای معقول برای سرعت تزریق روغن، 30 m/s است. بیرینگ‌های غلتشی باید قبل از شروع به کار، روانکاری شده باشند. با روانکاری مدار بسته، می‌توان با روشن کردن پمپ روغن قبل از شروع به کار ماشین، به این هدف دست یافت.



شکل ۲-۳۸ حجم روغن Q و سرعت جت V برحسب افت فشار Δp برای لزجت‌های کاری و قطرهای مختلف نازل‌ها با طول نازل 8.3 mm

البته اگر در طراحی تمهیداتی اتخاذ شود که کل روغن داخل بیرینگ خارج نشده و هنگام خاموش بودن پمپ روغن مقدار معینی از روغن در بیرینگ موجود باشد، این کار ضروری نیست.

ترکیبی از یک حمام روغن با سیستم مدار بسته، قابلیت اطمینان کاری را بالا می‌برد زیرا در مواردی که پمپ خراب شود، تا مدت‌ها روغن مورد نیاز بیرینگ از حمام روغن تأمین خواهد شد. در دماهای پایین تا زمانی که روغن در مخزن گرم شود، می‌توان نرخ جریان عبوری روغن را تا مقدار مورد نیاز روانکاری (منحنی‌های a_1 و a_2 در شکل ۲-۳۵) کاهش داد. این مسئله سیستم مدار بسته روغن را ساده می‌کند (سیستم پمپاژ، لوله برگشت‌روغن). اگر بخش اصلی روغن صرف روانکاری می‌شود، باید به کمک لوله‌های برگشت از باقی ماندن روغن در بیرینگ جلوگیری شود (شکل‌های ۲-۴۸ و ۲-۴۹) زیرا باقی ماندن روغن خصوصاً در سرعت‌های محیطی بالا باعث اتلاف انرژی ناشی از تلاطم و اصطکاک تولیدی در روغن می‌شود. قطر کانال تخلیه به لزجت روغن و زاویه شیب لوله‌ها بستگی دارد. برای روغن‌هایی با لزجت کاری تا $500\ mm^2/s$، قطر کانال تخلیه توسط معادله زیر محاسبه می‌شود :

$$d_a = (15 - 25)\sqrt{m} \qquad (mm)$$

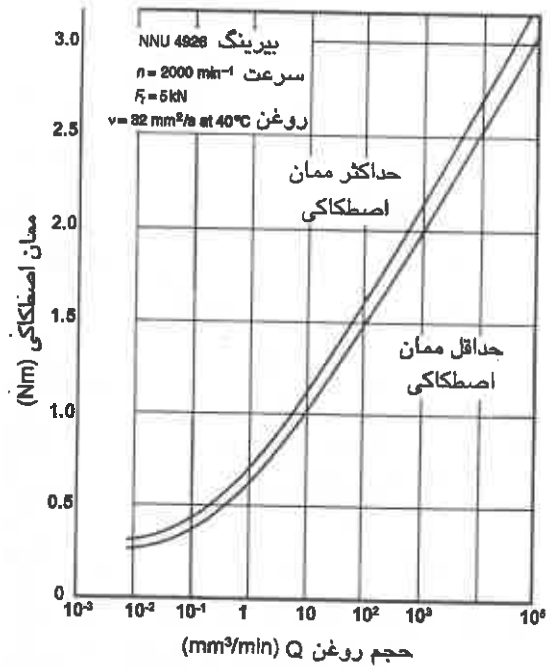
d_a قطر داخلی کانال تخلیه و m نرخ جریان روغن برحسب dm^3/min است. نرخ جریان m تعیین کننده مقدار روغن M موجود در مخزن روغن می‌باشد. معمولاً، باید حجم روغن موجود در مخزن به میزان $z = 3 - 8$ دفعه در ساعت در مدار دوران کند.

$$M = m\ (60 / z) \quad (dm^3) \qquad (۲-۲۵)$$

اگر مقدار z کم باشد، ذرات خارجی در مخزن ته نشین شده، روغن فرصت خنک شدن خواهد داشت و بسرعت فاسد نمی‌شود.

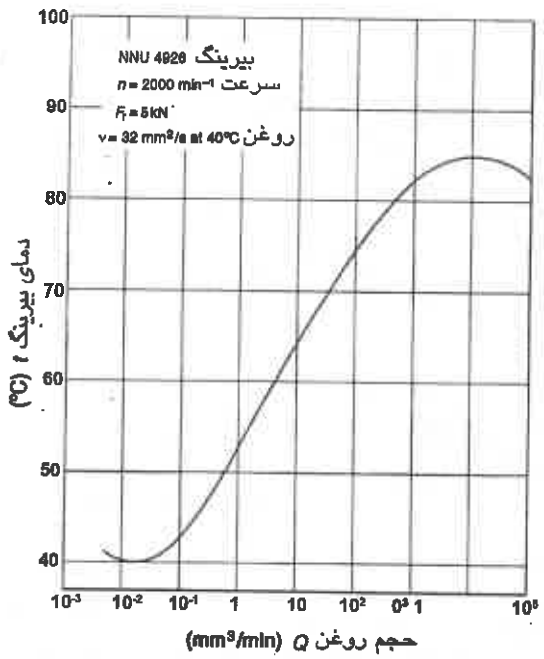
روانکاری با جریان بدون برگشت

اگر حرارت کم بیرینگ به خنک شدن بدون هزینه‌های روغن ترجیح داده شود، می‌توان حجم روغن تغذیه شده به بیرینگ را به حداقل میزان تعیین شده در شکل ۲-۳۵ کاهش داد. اما این کار فقط زمانی ممکن است که اصطکاک بیرینگ و انتشار حرارت در بیرینگ دروضعیت مناسبی باشند. در شکل‌های ۲-۳۹ و ۲-۴۰ رابطه تغییرات ممان اصطکاکی و دمای بیرینگ برحسب حجم روغن به کار رفته در روانکاری با جریان بدون برگشت نشان داده شده است. در آنها از یک رولربیرینگ استوانه‌ای دو ردیفه به‌عنوان مثال استفاده شده است. این مثال حساسیت رولربیرینگ‌های استوانه‌ای دو ردیفه با لبه در رینگ خارجی را در مقابل روانکاری بیش از حد نشان می‌دهد. نمونه‌های مناسب‌تر بیرینگ‌های استوانه‌ای دو ردیفه با لبه رینگ داخلی (NN 30) یا رولربیرینگ استوانه‌ای یک ردیفه از سری‌های N10 و N19 هستند. وضعیت حداقل اصطکاک و حداقل دما در حالتی اتفاق می‌افتد که فیلم روانکار در تمام سطوح به شکل مناسبی تشکیل شده باشد. این وضعیت با حجم روغن $0.01 - 0.1\ mm^3/min$ قابل دسترسی است. با حجم روغن $10^4\ mm^3/min$ دمای بیرینگ به حداکثر می‌رسد. با حجم بیشتر از این، حرارت بیرینگ پخش شده و کاهش می‌یابد.



شکل ۲-۳۹ ممان اصطکاکی برحسب حجم روغن به کار رفته در روانکاری با جریان بدون برگشت. منحنی مربوط به یک رولربیرینگ استوانه‌ای با کد NNU 4926

مقدار روغن موردنیاز برای تضمین تأمین مناسب روغن، عمدتاً به نوع بیرینگ بستگی دارد. در بیرینگ‌هایی که جهت جریان روغن با جهت پمپاژ منطبق باشد، باید نسبتاً مقادیر بیشتری از روغن تأمین شود. اگر در بیرینگ‌های دو ردیفه که قابلیت پمپاژ *ندارند*، روغن به میان دو ردیف اجزاء غلتنده تغذیه شود، مقدار فوق‌العاده کمی از روغن کافی است. چرخش اجزاء غلتنده از بیرون زدن روغن جلوگیری می‌کند. در روانکاری با مقادیر خیلی کم روغن، از پوشیده شدن تمام سطوح تماس با روغن اطمینان حاصل کنید، خصوصاً سطوح تماس لغزشی (مثل لبه‌ها و سطوح راهنمای قفسه).

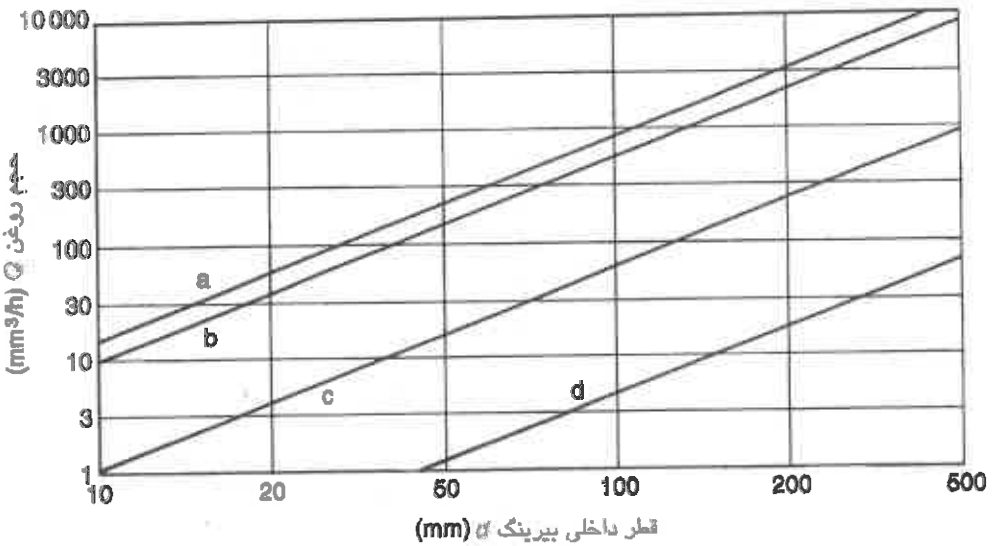


شکل ۲-۴۰ دمای بیرینگ برحسب حجم روغن به‌کار رفته در روانکاری با جریان بدون برگشت

در بلبیرینگ‌ها و رولربیرینگ‌های استوانه‌ای مورد استفاده در ماشین‌های ابزار، ثابت شده است که تغذیه مستقیم روغن به داخل بیرینگ، مفید است و در بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای باید روغن در جهت انتقال تغذیه شود.

شکل ۲-۴۱ حداقل روغن مورد نیاز در روش روانکاری با جریان بدون برگشت را برای چند نوع بیرینگ برحسب ابعاد بیرینگ، زاویه تماس (خاصیت انتقال روغن) و اندیس سرعت نشان داده شده است.

برای بیرینگ‌هایی که خاصیت انتقال روغن دارند، چون حداقل مقدار روغن ضروری و خاصیت انتقال روغن با افزایش سرعت، بالا می‌روند، باید حجم روغن به شکل تابعی از سرعت افزایش یابد.



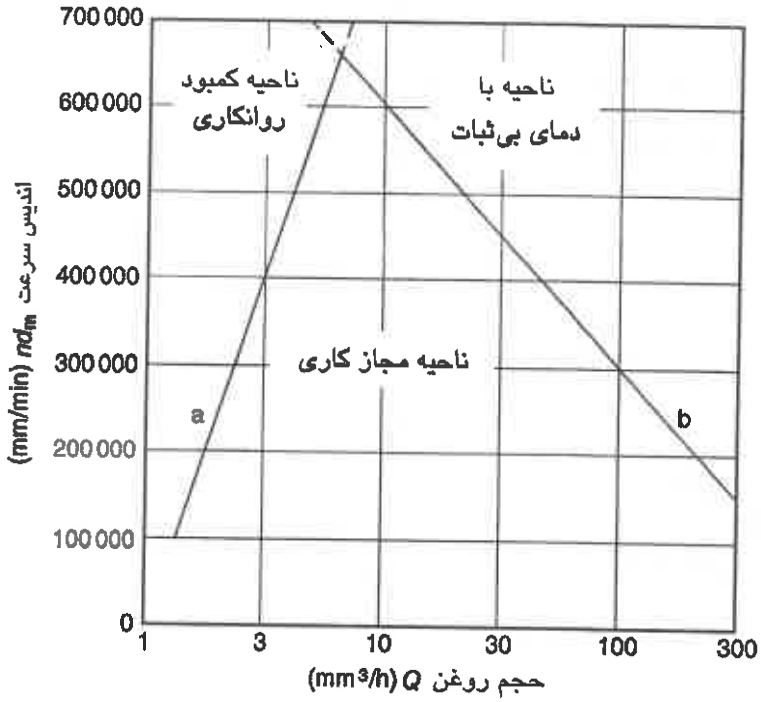
شکل ۲-۴۱ حجم‌روغن موردنیاز در روانکاری‌با جریان بدون‌برگشت. ناحیه a-b : بلبیرینگ با تماس زاویه‌ای α = 40 °C، بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای کف‌گرد با زاویه تماس α = 60 – 75 °C و بلبیرینگ‌های کف‌گرد با اندیس سرعت تا nd_m = 800 000 mm/min. خط c : بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای با زاویهٔ تماس α = 15 – 25 ° (بیرینگ‌های محور ماشین ابزار)، با اندیس‌های سرعت تا ndm = 1.8 × 106 mm/min. منطقه c – d : رولربیرینگ‌های استوانه‌ای یک ردیفه و دو ردیفه؛ خط c برای لبه‌های رینگ داخلی تا اندیس سرعت تا nd_m = 600 000 mm/min.

برای بیرینگ‌هایی که در آنها رولر با لبه در تماس است (مثل رولربیرینگ‌های مخروطی)، تأمین مستقیم روغن به سطوح پیشانی رولرها در جهت مخالف قابلیت انتقال روغن، بسیار مناسب است. مقادیر بسیار کم روغن نیازمند یک سیستم تأمین روغن به‌صورت مخلوط روغن- هوا با قابلیت اطمینان است که مخلوط را به میان قفسه و رینگ داخلی تغذیه کند، البته دقت بالای ابعادی قطعات در تماس نیز لازم است. لزجت نسبی κ = ۷ / ۷ باید 10–8 باشد و باید روغن محتوی مواد افزودنی EP مناسب باشد.

تأمین دائم مقادیر زیاد روغن یا تأمین دوره‌ای مقادیر کم روغن در سرعت‌های محیطی بالا، در رولربیرینگ‌های استوانه‌ای شعاعی، باعث افزایش بسیار شدید اصطکاک روانکار شده و بین رینگ‌های داخلی و خارجی، اختلاف دما ایجاد می‌کند.

در بیرینگ‌هایی که لقی شعاعی کمی دارند، همانگونه که در ماشین‌های ابزار رایج است، این اختلاف دما و افزایش اصطکاک، باعث ایجاد بار اولیهٔ بیش از حد و خرابی بیرینگ می‌شود.

در شکل ۲-۴۲ مثالی از منحنی حجم روغن در روش



شکل ۲-۴۲ انتخاب حجم روغن در روش روانکاری با جریان بدون برگشت برای رولربیرینگ استوانه‌ای با کد NNU4926 (d = 130 mm: لقی شعاعی کم)

روانکاری با جریان بدون برگشت برای رولربیرینگ استوانه‌ای دو ردیفه با کد NNU 4926 آورده شده است. حداقل حجم روغن را می‌توان از خط a به‌عنوان تابعی از اندیس سرعت به‌دست آورد. خط b نشاندهندهٔ حداکثر حجم روغن است. دیاگرام بر پایه تأمین دائم روغن (روانکاری مخلوط روغن- هوا) و توانایی پخش حرارت متوسط، رسم شده است. نقطه تقاطع خطوط a, b نشاندهندهٔ حداکثر اندیس سرعتی است که در روش روانکاری با جریان بدون برگشت می‌توان به آن دست یافت.

مقدار روغن مناسب برای روانکاری رولربیرینگ‌های استوانه‌ای دو ردیفه، به وسیله خط d در شکل ۲-۴۱ مشخص شده است. از آنجا که حداقل و حداکثر حجم روغن، به غیر از بیرینگ، به نوع روغن، تأمین روغن و پخش حرارت بستگی دارد، لذا نمی‌توان برای محاسبه اندیس سرعت و کمترین مقدار بهینهٔ روغن یک قاعده عمومی در نظر گرفت. باید لزجت روغن برابر با لزجت نسبی $\kappa = 2 - 3$ انتخاب شود.

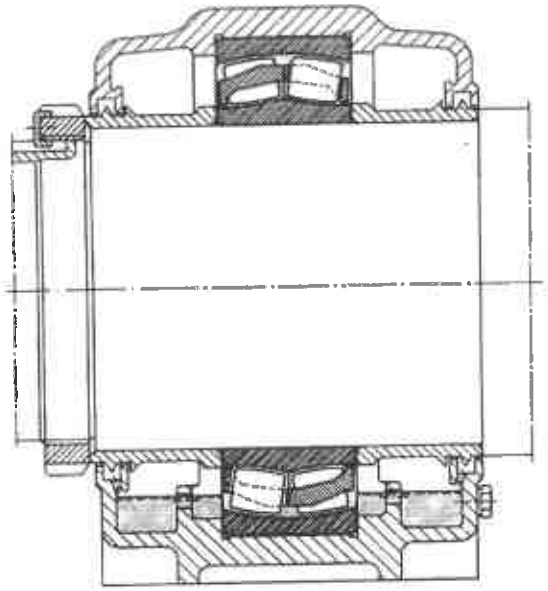
روانکاری مخلوط روغن- هوا به‌کار رفته در بیرینگ‌های غلتک‌های نورد، عموماً با یک حمام روغن همراه است و

از این رو مثال مناسبی برای روانکاری با جریان بدون برگشت نیست، روغن تأمین شده با سیستم روغن- هوا به حمام روغن اضافه شده و باید بیش از 1000 mm^3/h باشد. جدول ۲-۱۵ حجم‌های روغن و تجهیزات کنترل مناسب را نشان داده است.

طرح‌های نمونه برای روانکاری با روغن

نشیمنگاه‌های بزرگ که در نتیجه حجم روغن بیشتری را در خود جای می‌دهند (شکل ۲-۴۳) باید مجهز به صفحات موجگیر شوند تا تشکیل اتاقک‌هایی را بدهند که توسط سوراخ‌هایی به هم متصل هستند. این کار از به هم خوردن و تلاطم مضر کل حمام روغن به ویژه در سرعت‌های محیطی بالاتر، جلوگیری می‌کند. همچنین این امر باعث می‌شود آلودگی‌های خارجی در اتاقک‌های جانبی رسوب کرده و دائماً به هم *نخورد*.

رولرهای پایین رولربیرینگ کروی نشان داده‌شده در شکل ۲-۴۴، داخل یک حمام روغن کوچک فرو رفته‌اند. روغن‌های از دست رفته با تأمین روغن از حمام بزرگتر که زیر رولربیرینگ کروی قرار دارد، جبران می‌شود.

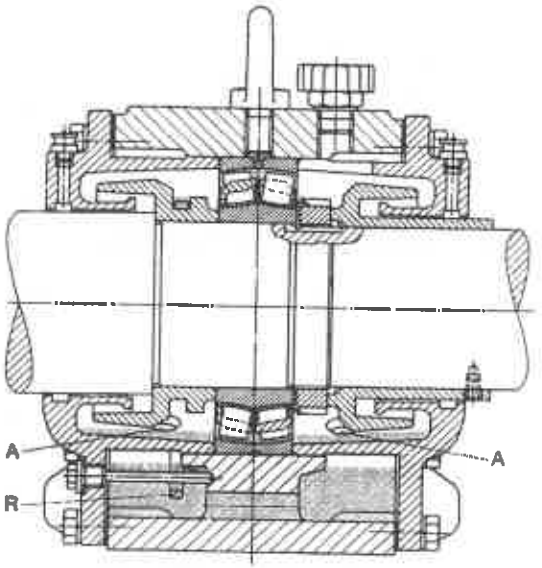


شکل ۲-۴۳ نشیمنگاه بیرینگ مجهز به صفحات موج گیر

در سیستم روغنکاری رینگی R، رینگ قطری به مراتب بزرگتر از قطر شفت دارد. این رینگ داخل حمام روغن پایینی که با بیرینگ تماس *ندارد*، فرومی‌رود. هنگام کار، رینگ روغنکاری R به کار افتاده و روغن را به بیرینگ تغذیه می‌کند. روغن اضافی از طریق سوراخ‌های A به حمام روغن پایینی برمی‌گردند.

جدول ۲-۱۵ حجم روغن برای روانکاری با جریان بدون برگشت و تجهیزات کنترل مناسب

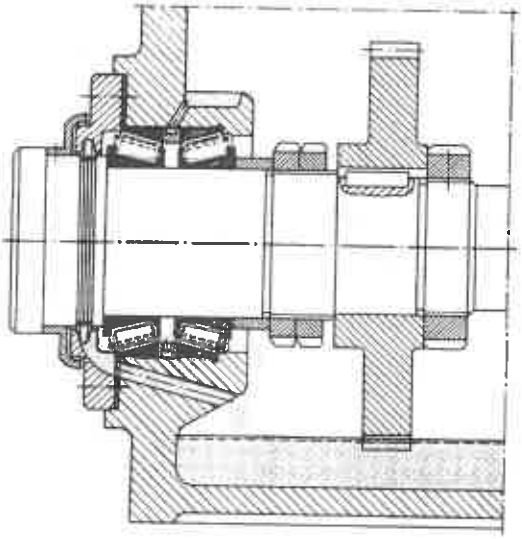
توضیحات	موقعیت بیرینگ / حجم روغن m (cm³/min)	توضیحات
جریان مدار بسته روغن	بزرگتر از 1	پمپ
تأمین دوره‌ای	کمتر از 7	میکرو پمپ پیمانه‌ای
تأمین دوره‌ای	0.006 – 0.01	تغذیه روغن قطره‌ای
تأمین دوره‌ای	بیش از 0.0001	سیستم مرکزی
مداوم	0.005 cm^3/h – 0.002 cm^3/min	
	0.00008 – 0.0015	



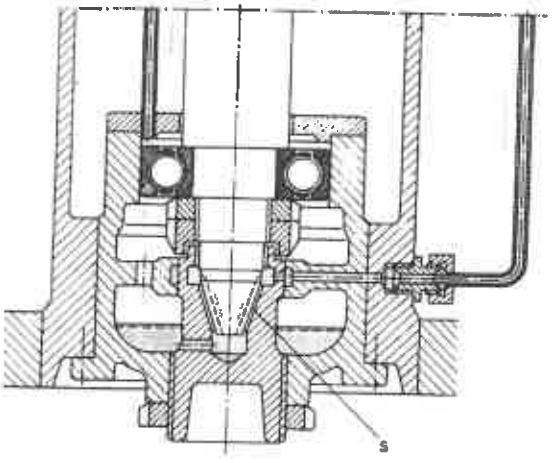
شکل ۲-۴۴ روانکاری با روغن به وسیله سیستم روغنکاری رینگی

سیستم روغنکاری رینگی را می‌توان تا اندیس‌های سرعت nd_m = 400 000 mm/min به کار برد. در سرعت‌های بالاتر، سیستم روغنکاری رینگی در معرض سایش شدیدی قرار می‌گیرد.

مشابه تمامی انواع بیرینگ‌های با سطح مقطع *نامتقارن*، رولربیرینگ‌های مخروطی نیز قابلیت پمپاژ دارند. این قابلیت شدیداً تحت تأثیر سرعت محیطی بیرینگ است و می‌توان از این خاصیت در روانکاری مدار بسته استفاده کرد. البته قطر سوراخ‌های برگشت باید به میزانی بزرگ باشند که از ماندن روغن در اطراف بیرینگ جلوگیری شود (شکل ۲-۴۵). محورهای ماشین‌های ابزار که عمودی قرار گرفته و با سرعت بالا دوران می‌کنند را بعضی اوقات با انتهای مخروطی یا با یک مخروط جداگانه که به همراه محور دوران می‌کند، طراحی می‌کنند، انتهای کوچکتر این مخروط را داخل مخزن روغن غوطه‌ور می‌سازند (شکل ۲-۴۶). روغن از فاصله بین قطعات S وارد شیار مارپیچ می‌شود، از آنجا به داخل یک مخزن پخش‌کن هوایی می‌رود.



شکل ۲-۴۵ جریان روغن در بیرینگ‌هایی که قابلیت پمپاژ دارند

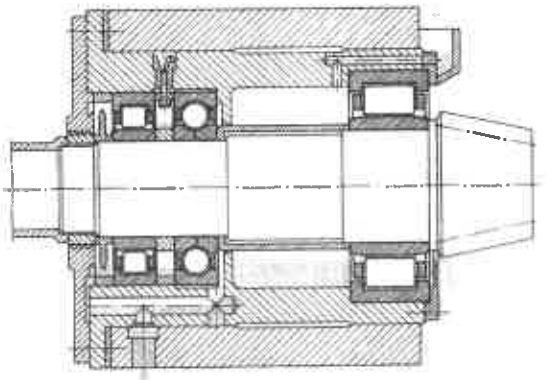


شکل ۲-۴۶ جریان روغن به‌وسیله مخروط انتقال‌دهنده روغن

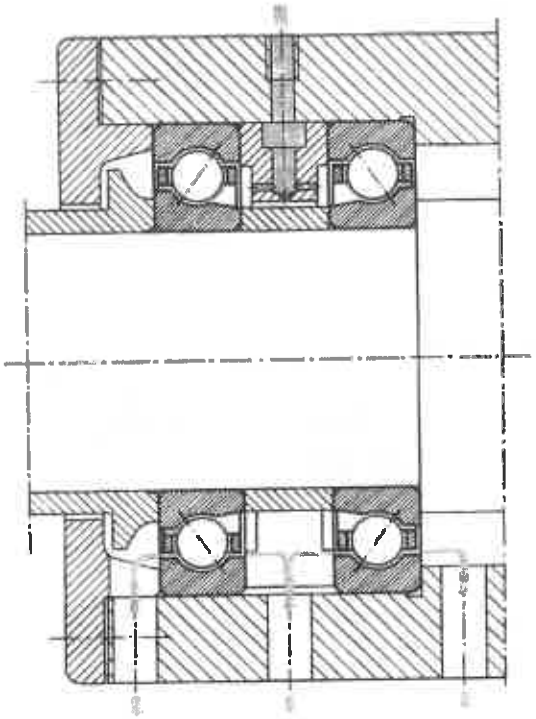
با این چیدمان، اگر ارتفاع تغذیه کوتاه و لزجت روغن پایین باشد، می‌توان مقادیر روغن نسبتاً زیادی را تأمین کرد.

در جعبه‌دنده‌ها، گاهی روغن خارج شده از بین چرخدنده‌ها، بیرینگ را به میزان کافی روانکاری می‌کند (شکل ۲-۴۷). هرچند، روغن باید تحت تمامی شرایط کاری، به شکل مؤثری داخل بیرینگ شود.

در مثال نشان داده شده، روغن خارج شده از بین چرخدنده‌ها در یک گودال بالای رولربیرینگ استوانه‌ای جمع‌آوری و از داخل شیارهایی به بیرینگ تغذیه می‌شود. یک صفحه موجگیر نیز در کنار رولربیرینگ استوانه‌ای قرار گرفته است. این صفحه باعث می‌شود که همیشه مقدار قابل توجهی از روغن در بیرینگ باقی بماند تا بیرینگ هنگام شروع به کار روانکاری شده باشد. در روانکاری‌با جت روغن، روغن به فاصله بین قفسه و رینگ داخلی تزریق می‌شود (شکل‌های ۲-۴۸ و ۲-۴۹).



شکل ۲-۴۷ روغن پاشیده شده در یک محفظه، جمع‌آوری شده و از طریق سوراخ‌هایی به داخل بیرینگ استوانه‌ای تغذیه می‌شود.



شکل ۲-۴۸ روانکاری با جت روغن به وسیله نازل

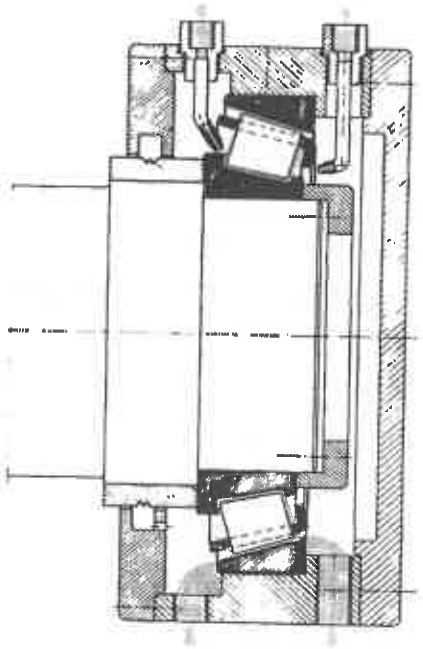
کانال‌های برگشت روغن از تله افتادن روغن در دوطرف بیرینگ، جلوگیری می‌کنند. اگر بیرینگ قابلیت پمپاژ داشته باشد، روغن از طرف سطح تماس کوچکتر تغذیه می‌شود. در رولربیرینگ‌های مخروطی (شکل ۲-۴۹)، روغن بین سطح پیشانی رولرها و لبه در قطر بزرگ سطح تماس تزریق می‌شود. این کار در مقابل روانکاری ضعیف بین سطوح لبه و پیشانی رولرها، عکس‌العمل نشان می‌دهد. یک مثال ویژه از روانکاری مدار بسته، انتقال روغن برای بیرینگ‌های گژن پین است (شکل ۲-۵۰).

در دیاگرام دست راست، روغن‌گژن پین، از فیلتر متصل به میل‌لنگ جریان می‌یابد. این به آن خاطر است

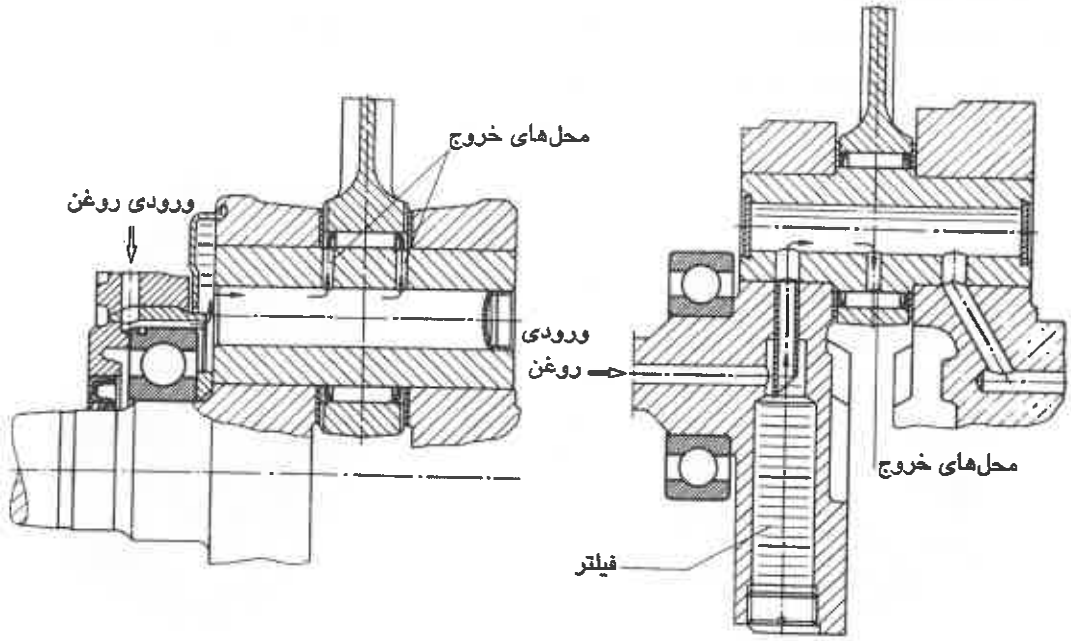
که در یک موتور احتراق داخلی، در دماهای کاری بالا، ضخامت فیلم روانکار کم است و ذرات ناشی از سایش قطعات تأثیر بسیار شدیدی در ایجاد سایش دارند.

۲-۶-۳ کاربرد روانکار خشک

بااستفاده از فیلم‌های پودری یا لاک‌های لغزشی گرافیتی یا دی‌سولفیدمولیبدن بر روی سطوح تماس و همچنین خمیرها، روانکاری بهبود می‌یابد. یک پوشش پودری را می‌توان به وسیله جاروبک، چرم یا پارچه در سطوح ایجاد کرد. لاک‌های لغزشی نیز به وسیله تفنگ‌های اسپری روی سطوح در تماس اسپری می‌شوند.



شکل ۲-۴۹ روانکاری باجت روغن: روغن به هردوطرف یک رولربیرینگ مخروطی سرعت بالا تزریق می‌شود.

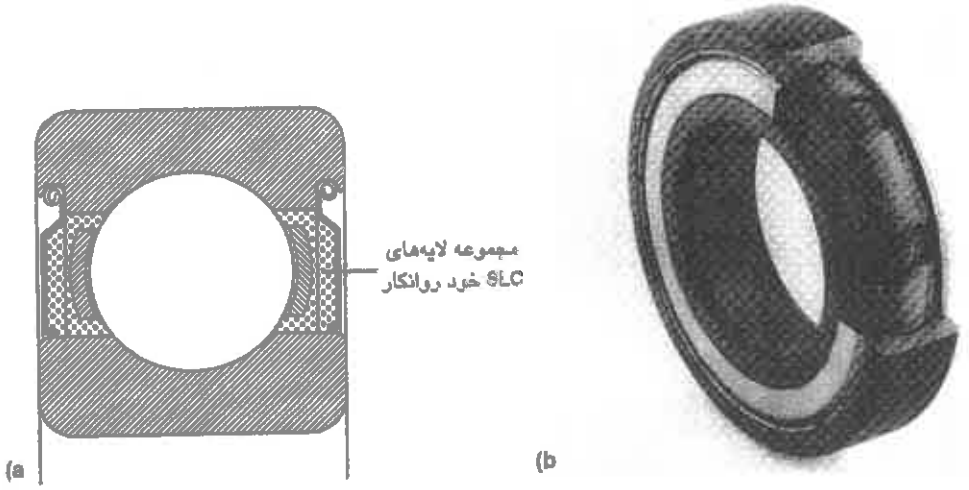


شکل ۲-۵۰ تأمین روغن برای بیرینگ‌های گژن پین در موتورهای چهار زمانه

عمر مفید خیلی از لاک‌های لغزشی را می‌توان با پختن آنها بر روی سطوح، افزایش داد. خمیرها را با قلم مو روی سطوح می‌زنند. عموماً، بیرینگ‌ها را قبل از به کار بردن روانکار خشک با پوشش‌دهی (توسط روش فسفاته‌کردن با فسفات منگنز یا فسفاته کردن معمولی) در مقابل زنگ‌زدگی مقاوم می‌کنند.

پوشش فسفاته به روانکارهای خشک امکان چسبیدن می‌دهد و بیرینگ را از خوردگی محافظت می‌کند و تا حدودی خصوصیات آمادگی بیرینگ را در آغاز به کارهای ناگهانی بهبود می‌بخشد. اگر به استانداردهای بالای محافظت در مقابل خوردگی نیاز باشد، بیرینگ را با کادمیم پوشش می‌دهند. پودرها و لاک‌ها فقط به بیرینگ‌هایی که به شکل جزئی به گریس آلوده باشند، می‌چسبند. کاربرد درست و بی‌عیب و یکنواخت فقط زمانی ممکن است که در کارخانجات تولید بیرینگ، این کار قبل از مونتاژ قطعات مختلف صورت گیرد. خمیرها را می‌توان قبل از نصب بیرینگ به کار برد. لایه‌های خمیر را می‌توان اصلاح و یا با لایه‌های تازه تعویض کرد. باید از گریسکاری بیش از حد به همراه خمیرها اجتناب شود. یکی از روش‌های مؤثر تأمین روانکار، روانکاری انتقالی است. در این روش، بیرینگ با مخلوط روانکار جامد پر می‌شود، بعد از انجماد این روانکار، روانکار در راستای طولی قفسه، به همراه آن می‌چرخد، در این حالت، به‌طور منظم و مرتب روانکار مورد نیاز اجزاء غلتنده تأمین خواهد شد.

این‌گونه روانکاری مجدد ثابت، عمر مفید خیلی طولانی‌تری از لاک‌های لغزشی یا خمیرها دارد. روانکار خشک به شکل پودر از فاصله بین حلقه‌های آب‌بندی و رینگ، به‌وسیله اجزاء غلتنده خارج می‌شوند. اگر این وضعیت مورد دلخواه *نباشد*، می‌توان بین حلقه آب‌بندی و کاسه نمد محفظه‌ای تدارک دید تا مواد بیرون‌زده شده آنجا جمع‌آوری شوند. شکل ۲-۵۱ یک بلبیرینگ شیار عمیق را نشان می‌دهد که برای شرایط کاری دشوار، با مولیکوت SLC روانکاری شده است (SLC = مخلوط خود روانکار).



شکل ۲-۵۱ بلبیرینگ شیار عمیق مجهز به حلقه آب‌بندی و روانکاری شده با مولیکوت SLC

فصل ۳

اصول طراحی بیرینگ

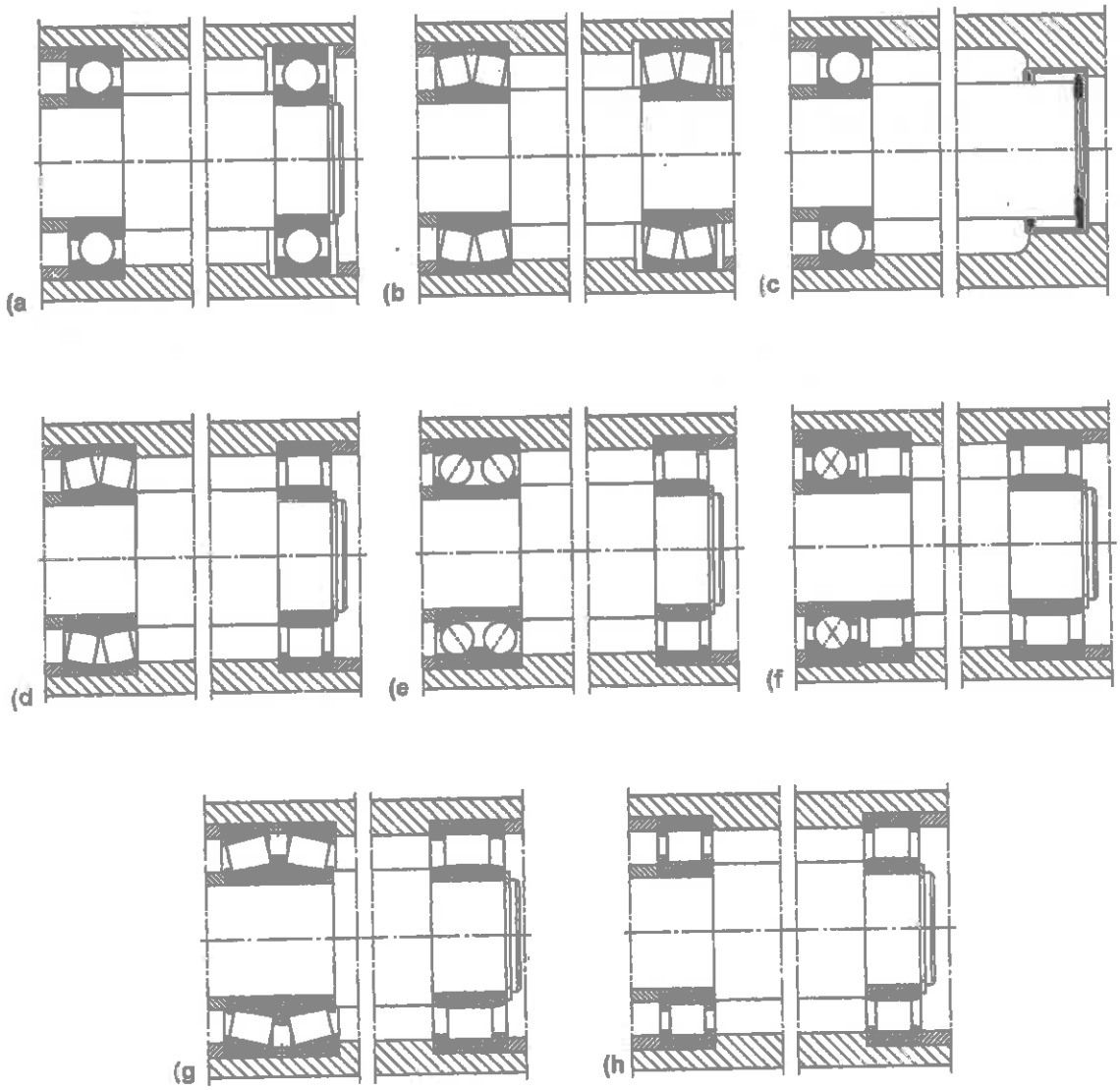
هنگام انتخاب نوع بیرینگ و طراحی محل مونتاژ آن، باید به چیدمان بیرینگ‌ها، جهت اعمال نیروهای خارجی، قابلیت کاربرد بیرینگ‌ها در سرعت، دقت موردنیاز، شرایط محیطی و تعداد زیادی از فاکتورهای دیگر توجه نموده و این موارد را در نظر گرفت.

۳-۱ چیدمان بیرینگ‌ها

عموماً برای نگهداشتن و راهنمایی اجزاء چرخنده در ماشین‌ها دو بیرینگ که در فاصله مشخصی از هم قرار گرفته‌اند نیاز است. به روش‌های بیشماری می‌توان بیرینگ‌ها را چید که مهمترین روش‌ها به تفصیل توضیح داده خواهد شد.

۳-۱-۱ بیرینگ‌های ثابت و شناور

در حالتی که یک شفت با دو بیرینگ شعاعی مهار شده باشد، فاصله بین محل‌های نشیمن بیرینگ‌ها روی شفت، در محدودهٔ تلرانس تعیین شده ماشین، با فاصله محل‌های نشیمن آنها در بدنه برابر است. علاوه بر این، عموماً، دمای شفت بالاتر از دمای بدنه است و این مسئله باعث بروز اختلاف فاصله محل‌های نشیمن در شفت و بدنه خواهد شد. این اختلاف‌ها را باید در نظر داشت، بنابراین باید شفت در راستای محوری فقط با یک بیرینگ به‌صورت ثابت مهار شود، این روش یک روش بسیار متداول است. اختلاف فاصله را باید در بیرینگ دیگر جبران کرد، به این بیرینگ اصطلاحاً بیرینگ شناور گفته می‌شود، شناوری می‌تواند در محل نشیمن رینگ داخلی یا خارجی و یا در خود بیرینگ وجود داشته باشد. شفت‌هایی که با بیش از دو بیرینگ مهار شده باشند نیز فقط یک بیرینگ ثابت دارند. ترکیب بیرینگ‌های ثابت و شناور (**شکل ۳-۱**) این فایده را دارد که فواصل بین تکیه‌گاه‌های عرضی به تلرانس موقعیتی خیلی بسته‌ای نیاز *ندارند* زیرا دیگر بیرینگ‌ها تحت بارهای اولیه محوری زیان‌آور قرار *نخواهند* گرفت.



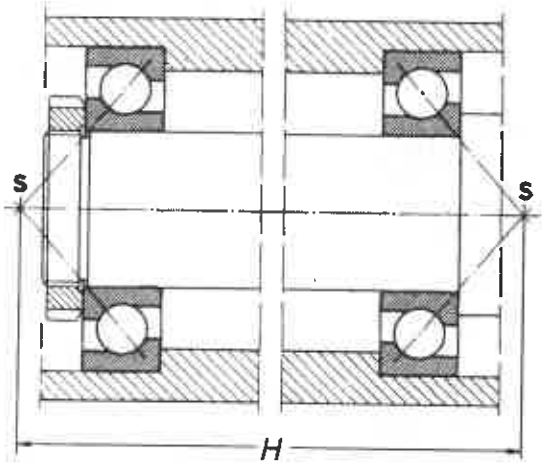
شکل ۳-۱ چیدمان‌های مختلف با یک بیرینگ ثابت *(چپ)* و یک بیرینگ شناور *(راست)*. a) بلبیرینگ شیار عمیق و بلبیرینگ شیار عمیق. b) رولربیرینگ کروی و رولربیرینگ کروی. c) بلبیرینگ شیار عمیق و رولربیرینگ سوزنی با پوسته‌ای از ورق کشیده شده و ته بسته. d) رولربیرینگ کروی و رولربیرینگ استوانه‌ای طرح NU. e) بلبیرینگ با تماس زاویه‌ای دو ردیفه و رولربیرینگ استوانه‌ای طرح NU. f) مجموعه بیرینگ با چهار نقطه تماس به همراه رولربیرینگ استوانه‌ای طرح NU و رولربیرینگ استوانه‌ای Nu. g) دو رولربیرینگ مخروطی و رولربیرینگ استوانه‌ای NU. h) رولربیرینگ استوانه‌ای طرح NUP و رولربیرینگ استوانه‌ای طرح NU

با این چیدمان، مهار محوری به لقی محوری بیرینگ ثابت بستگی دارد. یک بلبیرینگ با تماس زاویه‌ای دو ردیفه، با لقی کمتری نسبت به یک بلبیرینگ شیار عمیق، شفت را در راستای محوری مهار می‌کند.

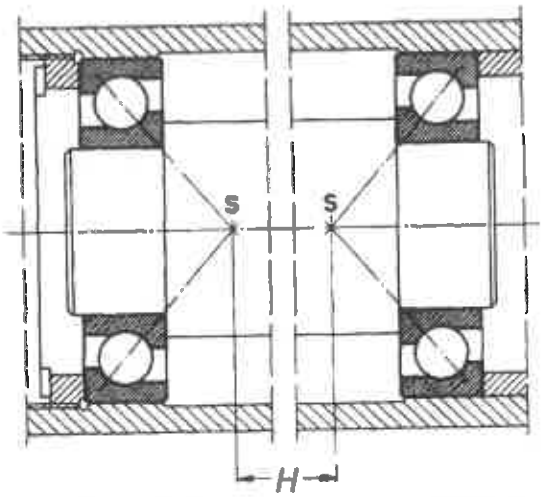
می‌توان با مونتاژ یک جفت از بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای یا رولربیرینگ‌های مخروطی به این میزان لقی پایین دست یافت، البته به شرطی که رودررو یا پشت به پشت مونتاژ شوند تا مجموعهٔ دو بیرینگ به جای یک بیرینگ ثابت عمل کنند. جبران تغییرات طولی در بیرینگ شناور، معمولاً با به کار بردن بیرینگ استوانه‌ای طرح NU یا N یا رولربیرینگ سوزنی براحتی و سادگی قابل دسترس است، زیرا در این بیرینگ‌ها، مجموعه رولرها می‌توانند روی سطح تماس رینگ‌های بدون لبه یا روی شفت جابه‌جا شوند (شکل ۳-۱). در تمامی طرحهای دیگر بیرینگ، فقط به شرطی می‌توان بیرینگ را شناور ساخت که بیرینگ روی شفت یا بدنه بصورت جذب و روان جا زده شود تا بتواند حرکت لغزشی داشته باشد (شکل ۳-۱۱a و b). با توجه به نوع بارگذاری و شرایط دورانی امکان دارد حتی رینگ داخلی یا خارجی را شل جا زد (ر.ک. به بخش ۳-۸). در شکل ۳-۱ که یک نمونه از روش‌ها و ترکیب‌ها در چیدمان بیرینگ‌های ثابت و شناور است انواع مختلف ترکیب‌های قابل دسترسی را نشان داده است.

۳-۱-۲ چیدمان قابل تنظیم بیرینگ

معمولاً یک چیدمان قابل تنظیم بیرینگ از دو بلبیرینگ با تماس زاویه‌ای یا دو رولربیرینگ مخروطی که خلاف همدیگر قرار دارند تشکیل می‌شود. هنگام مونتاژ، یک رینگ در بدنه خود در جهتی جابه‌جا می‌شود که مجموعهٔ بیرینگ‌ها به لقی یا بار اولیه موردنظر برسد. چیدمان قابل تنظیم بیرینگ، به ویژه برای مواردی مناسب است که به مهار بسته‌ای نیاز باشد، زیرا در این مجموعه می‌توان لقی یا بار اولیه را بدقت کنترل کرد. در مواردی امکان دارد از بلبیرینگ‌های شیار عمیق نیز در چیدمان قابل تنظیم بیرینگ استفاده کرد. این بیرینگ‌ها در این چیدمان، مشابه بلبیرینگ‌های با تماس زاویه با زاویه تماس کم عمل می‌کنند. اجرای چیدمان قابل تنظیم بیرینگ به دو شکل امکانپذیراست: چیدمان O و چیدمان X (شکل‌های ۳-۲ و ۳-۳). با چیدمان O، رأس مخروط فرضی فشار تشکیل شده از خطوط تماس در بیرون مجموعه قرار می‌گیرد، ولی در چیدمان X در داخل مجموعه تشکیل می‌شود. در بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای و رولربیرینگ‌های مخروطی، خطوط تماس اجزاء غلتنده در رأس مخروط فشار S همدیگررا قطع‌می‌کنند (شکل‌های ۳-۲ و ۳-۳). فاصله بیرینگ در



شکل ۳-۲ بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای با چیدمان O



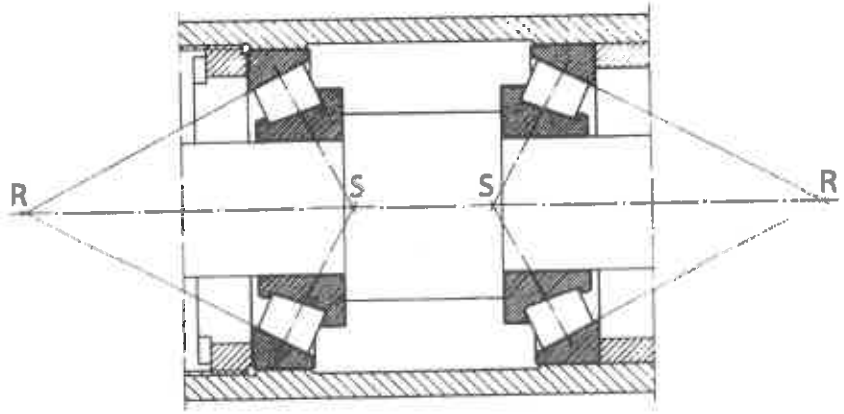
شکل ۳-۳ بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای با چیدمان X

چیدمان‌های قابل تنظیم بیرینگ را باید برابر با فاصله بین رأس‌های مخروط‌های فشار در نظر گرفت. فاصله H، در چیدمان O بزرگتر از چیدمان X است. از این رو چیدمان O در مواردی که باید قطعه در حال گردش در کوتاهترین فاصله بین بیرینگ‌ها با حداقل زاویه خمش باشد و یا در جایی که بخواهیم بارهای خمشی را منتقل کنیم، به چیدمان X ترجیح داده می‌شود. هنگام تصمیم‌گیری در انتخاب چیدمان O یا X باید انبساط حرارتی را نیز در نظر گرفت. نقطه مرجع، موقعیت رأس R مخروط رولر می‌باشد، این نقطه، جایی است که خط مرکز بیرینگ تصویر سطح تماس شیبدار رینگ خارجی را قطع کند (شکل ۳-۴). وقتی که دمای شفت بالاتر از دمای بدنه شود ($\theta_{ha} > \theta_{hi}$)، شفت در راستای محوری و شعاعی بیش از بدنه منبسط خواهد شد. در چیدمان X، این مسئله لقی تنظیم شده را کاهش خواهد داد (شکل ۳-۴).

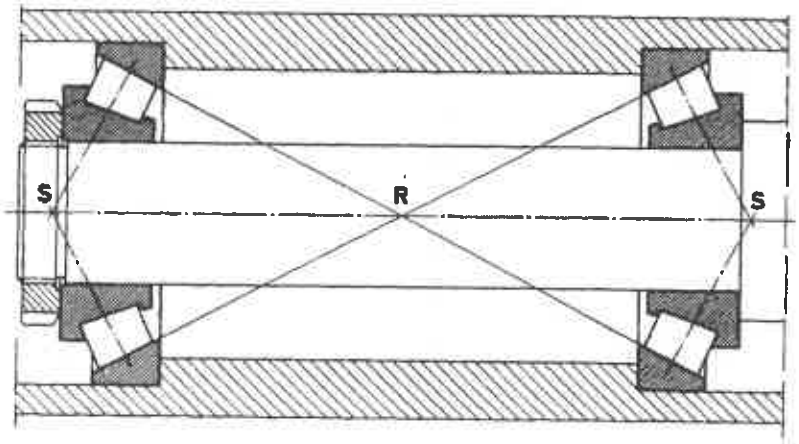
در چیدمان O، سه مورد را باید در نظر گرفت :

I) اگر رأس‌های R در یک نقطه بر هم منطبق شوند، انبساط‌های حرارتی شعاعی و محوری بالانس شده و میزان لقی ثابت خواهد ماند (شکل ۳-۵).

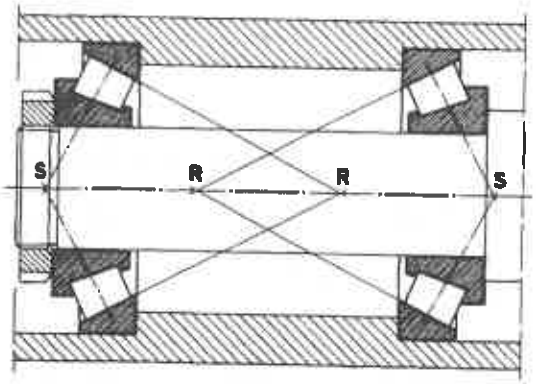
II) اگر رأس‌های مخروط رولر به خاطر فاصله کم بیرینگ‌ها، همدیگر را قطع کنند (شکل ۳-۶)، انبساط شعاعی بیش از انبساط محوری در لقی تأثیر می‌گذارد. در نتیجه لقی شعاعی کاهش خواهد یافت. این مسئله هنگام تنظیم بیرینگ‌ها باید در نظر گرفته شود.



شکل ۳-۴ رأس R مخروط رولر برای چیدمان X



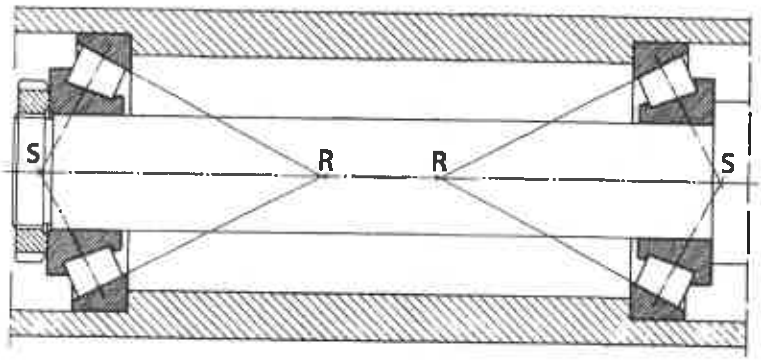
شکل ۳-۵ چیدمان O: رئوس مخروط‌های رولر بر هم منطبق هستند



شکل ۳-۶ چیدمان O: رئوس مخروط‌های رولر همدیگر را قطع کرده‌اند

III) فاصله بیرینگ‌ها زیاد است و رأس مخروط‌های رولر همدیگر را قطع *نمی‌کنند* (شکل ۳-۷). در این حالت انبساط شعاعی کمتر از انبساط محوری روی لقی بیرینگ تأثیر می‌گذارد. از این رو لقی افزایش خواهد یافت و می‌توان بیرینگ‌ها را بدون لقی مونتاژ کرد، حتی گاهی می‌توان بار اولیه اندکی نیز ایجاد کرد.

هنگام تصمیم‌گیری درباره اینکه رینگ داخلی قابل تنظیم باشد یا رینگ خارجی، باید به لوازم و قطعات تنظیم در دسترس مانند مهره‌ها، درپوش‌ها و از این



شکل ۳-۷ چیدمان O: رئوس مخروط‌های رولر همدیگر را قطع *نکرده‌اند*

قبیل توجه نمود. از آنجا که رینگ متحرک باید بسادگی جابه‌جا شود، باید به تلرانس مونتاژ آن توجه کرد. این موضوع در بخش ۳-۸ توضیح داده خواهد شد. فقط رینگی که تحت بار نقطه‌ای است را می‌توان با تلرانس قابل جابه‌جایی در بدنه مونتاژ نمود.

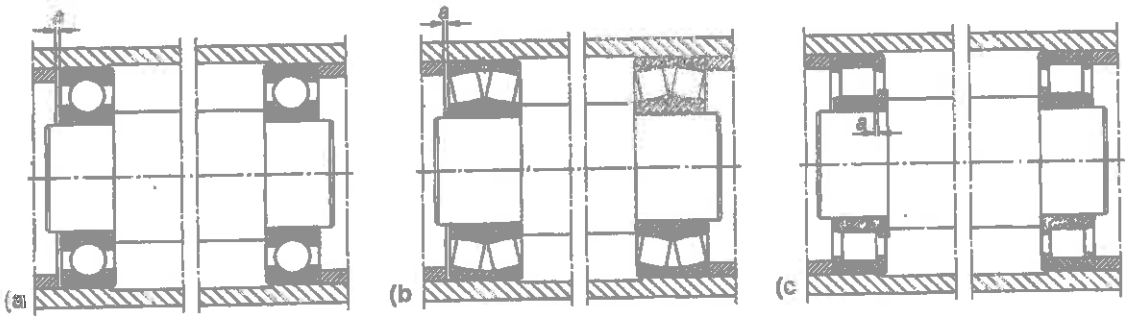
۳-۱-۳ چیدمان بیرینگ شناور

چیدمان‌های بیرینگ شناور نشان داده شده در شکل ۳-۸ اساساً مشابه چیدمان بیرینگ قابل تنظیم است. تفاوت این دو چیدمان، وجود لقی صفر یا گاهی وجود بار اولیه تحت شرایط کاری در چیدمان بیرینگ قابل تنظیم و وجود یک لقی محوری مشخص a در چیدمان بیرینگ شناور است که این لقی بسته به ابعاد بیرینگ، به میزان چنددهم میلی‌متر می‌باشد. در این نوع چیدمان بیرینگ، نیازی به مهار شدید محوری نیست. لقی محوری مثل فاصلهٔ a باید به حد کافی بزرگ باشد تا بتواند از بارهای اولیه محوری مضر ناشی از شرایط حرارتی نامناسب جلوگیری نماید. از طرف دیگر، این لقی نباید آنقدر زیاد باشد که هنگام تغییر جهت بارهای محوری، شفت جابه‌جا شود (تقه بخورد). تقریباً کل انواع بیرینگ‌هایی که نیازی به تنظیم ندارند را می‌توان در چیدمان بیرینگ شناور بکار برد. برای مثال، بلبیرینگ‌های شیار عمیق (شکل ۳-۸a) و رولربیرینگ‌های کروی (شکل ۳-۸b) را می‌توان در چیدمان‌های شناور به کار برد و در هردو مورد یک رینگ با تلرانس آزاد با امکان حرکت لغزشی نصب می‌شود. در یک چیدمان شناور متشکل از رولربیرینگ‌های استوانه‌ای طرح NJ (شکل ۳-۸c)، تغییرات طول در داخل بیرینگ‌جبران می‌شود. رولربیرینگ‌های مخروطی و بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای برای چیدمان بیرینگ شناور مناسب نیستند زیرا نیاز به تنظیم دارند.

۳-۲ جهت و جریان نیرو

نیروهای خارجی به سه طریق به بیرینگ وار می‌شوند: بار شعاعی با زاویه بار $\beta = 0°$، بار محوری با زاویه $\beta = 90°$ و باری که با زاویهٔ $0° < \beta > 90°$ اعمال شود که به این نوع بار، بار مرکب نیز گفته می‌شود.

بار خالص شعاعی در رولربیرینگ استوانه‌ای طرح NU یافت می‌شود. از آنجا که، به عنوان بیرینگ شناور،

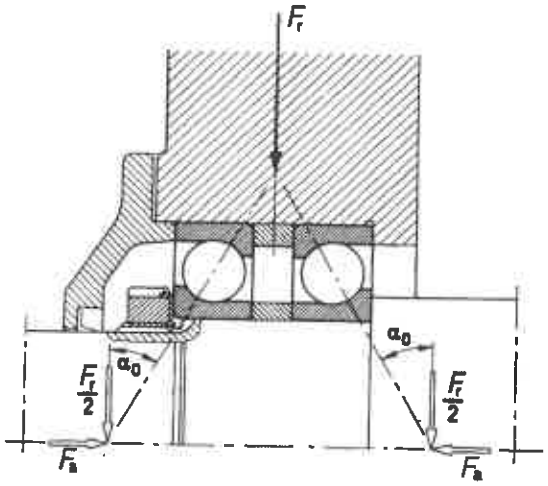


شکل ۳-۸ چیدمان‌های بیرینگ شناور

می‌توانند در جهت محوری جابه‌جا شود، تمامی مؤلفه‌های محوری نیروهای خارج با جابه‌جایی بیرینگ از بین می‌رود. مثلاً هردو بیرینگی که محور یک چرخدنده که به وسیله یک چرخدنده مارپیچ دوبل در راستای محوری مهار شده است نیز فقط تحت بارهای شعاعی قرار دارد. در این موارد، بیرینگ‌هایی که فقط برای تحمل بارهای شعاعی طراحی شده‌اند، مثل رولربیرینگ‌های استوانه‌ای طرح N و NU (شکل‌های ۱-۱۲۱a و b)، بسیار مناسب هستند. انطباق زاویه بار $\beta = 0°$ و زاویه تماس $\alpha_0 = 0°$ باعث اجتناب از نیروهای اضافی در بیرینگ شده و از این رو باعث عبور و انتقال نیرو به‌صورت مناسبی خواهد شد. بیرینگ‌های شعاعی که توانایی تحمل بارهای محوری را نیز دارند، مثل بلبیرینگ‌های شیار عمیق و رولربیرینگ‌های کروی را نیز می‌توان به عنوان بیرینگ شناور به کار برد به شرطی که آنها را با تلرانس قابل جابه‌جا شدن در بدنه یا محور جا زد تا بتواند آزادانه تغییرات طولی شفت را با جابه‌جایی جبران کنند.

در رولربیرینگ‌های استوانه‌ای که تحت بار شعاعی قرار گرفته‌اند، نیرو بهتر از رولربیرینگ‌های کروی، یک جفت رولربیرینگ مخروطی یا بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای، جریان پیدا کرده و انتقال می‌یابند. این مسئله به دلیل نیروهای محوری ناشی از زاویهٔ تماس $\alpha > 0°$ است (شکل ۳-۹). یک نیروی خالص محوری را می‌توان با یک رولربیرینگ استوانه‌ای کف‌گرد مهار کرد (شکل ۱-۵۴). به خاطر سطح تماس تخت، این بیرینگ توانایی تحمل بارهای شعاعی را *ندارد*. هرچند شیارهای موجود در بلبیرینگ‌های کف‌گرد مثل شکل ۱-۴۷ توانایی تحمل بارهای شعاعی کوچک را دارند، ولی باید فقط توانایی تحمل بارهای محوری آنها را در نظر گرفت. زیرا این بیرینگ‌ها ممکن است در راستای شعاعی جابه‌جا شوند و واشر نشیمنگاه آنها معمولاً به‌صورت لق در ماشین مونتاژ می‌شود. در این بیرینگ‌ها نیز، به خاطر انطباق زاویه اعمال بار $\beta = 90°$ و زاویه تماس $\alpha = 90°$، نیرو به شکل مناسبی جریان می‌یابد.

بعضی اوقات بیرینگ‌های شعاعی به جای بیرینگ‌های کف‌گرد، برای تحمل بارهای خالص محوری به کار برده می‌شوند. برای مثال، در مواردی که سرعت دوران بالا است، بیرینگ‌های کف‌گرد به خاطر سرعت دورانی بالا و نیروی گریز از مرکز ساچمه‌ها قابل استفاده *نیستند* (بخش ۳-۴). لقی بین رینگ خارجی و بدنه این بیرینگ‌های شعاعی به حدی است که تحت فشار در راستای شعاعی قرار *نمی‌گیرند*. معمولاً در این نوع



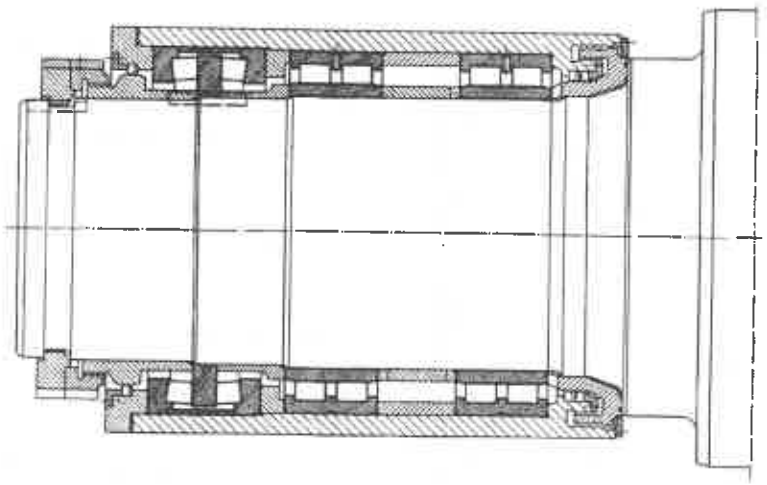
شکل ۳-۹ نیروهای محوری داخلی در بیرینگ‌هایی که تحت بارهای شعاعی بوده و زاویهٔ تماسشان $\alpha_0 > 0°$ است.

کاربرد، $\beta = 90°$ و $\alpha = 5 - 30°$ است. این به آن معنی است که این بیرینگ‌ها هرچند توانایی تحمل سرعت‌های بالا را نیز دارند، ولی جریان نیرو به‌خوبی حالتی که $\alpha = \beta = 90°$ باشد نیست. معمولاً در بیرینگ‌ثابت شفت، ترکیبی از بارهای شعاعی و محوری یافت می‌شود. بسته به شرایط‌کاری، بار محوری F_a اضافه شده به بار شعاعی F_r می‌تواند کوچک یا بزرگ باشد. زاویه اعمال بار نیروی برآیند از معادلهٔ $\tan \beta = F_a/F_r$ به دست می‌آید.

بزرگی زاویه بار β یا نسبت F_a/F_r را می‌توان به‌عنوان یک مقدار مرجع برای انتخاب مناسبترین طرح بیرینگ به کار گرفت. در مواردی که یک بیرینگ ثابت که تحت بار شعاعی قرار گرفته و تحمل بارهای محوری قابل توجه *نباشد* و فقط این بیرینگ شفت را در راستای محوری مهار کرده باشد، نسبت F_a/F_r بسیار کوچک است، مثلاً در بیرینگ‌های شفت واسطه انتقال نیرو در جعبه دنده که روی آن چرخدندهٔ ساده با دنده‌های مستقیم نصب شده باشد، این مسئله صدق می‌کند. در اره‌های آتشی (دیسکی) و پولی‌های قرقره‌های طناب نیز شرایط مشابهی اتفاق می‌افتد. به جز رولربیرینگ‌های استوانه‌ای طرح NU و N و رولربیرینگ‌های سوزنی که *نمی‌توانند* بارهای محوری را مهار کنند، از تمامی طرحهای بیرینگ‌های شعاعی می‌توان در اینگونه کاربردها استفاده کرد. در شرایط عادی، بیرینگ‌هایی با زاویه تماس α_0 کوچک ترجیح داده می‌شوند، زیرا در آنها، نیرو به شکل مناسبی جریان می‌یابد. ولی در شرایط ویژه امکان دارد بعضی چیزها تغییر نماید.

در بعضی از کوپلینگ‌ها، چرخدنده‌های مارپیچ، چرخدنده‌های مخروطی و حلزونی، پمپ‌های گریز از مرکز، رولربیرینگ‌های جعبه محور وسایل نقلیه ریلی با شفت‌های عمودی و غیره، بارهای محوری بزرگ پدیدار می‌شوند. در این موارد و کاربردهای مشابه، می‌توان از بلبیرینگ‌های شیار عمیق، رولربیرینگ‌های استوانه‌ای طرح‌های NJ و NUP، بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای، رولربیرینگ‌های کروی و مخروطی استفاده کرد. برای دستیابی به جریان نیروی مناسب، طرحی را انتخاب کنید که زاویه تماس α_0 آن قدری بزرگتر از زاویه اعمال بار باشد. اصول متناسب کردن زوایای تماس و اعمال بار، زمانی که بارهای اعمالی شدید بوده و نیاز اکیدی به دقت بالای صلبیت و مهار در بیرینگ باشد، بسیار مهم خواهد بود. هنگامی که یک بار محوری شدید به صورت دائمی به همراه بار شعاعی اعمال شود، گاهی در موقعیت بیرینگ ثابت، از یک بیرینگ شعاعی و یک بیرینگ محوری استفاده می‌شود. از این نوع مجموعه، در بیرینگ کف ستون اصلی جرثقیل‌ها، بلوک‌های تحمل‌کنندهٔ بار محوری پروانه کشتی‌ها، نقاله‌های پیچی سنگین، سنگ شکن‌های دورانی و غیره استفاده می‌شود. تحمل جداگانه مؤلفه‌های شعاعی و محوری به وسیله یک بیرینگ شعاعی و یک بیرینگ کف‌گرد، باعث به وجود آمدن جریان نیروی مناسب و صلبیت بالا خواهد بود (شکل ۳-۱۰).

انواع بیرینگ‌های مخروطی کف‌گرد به کار رفته در اینگونه مجموعه‌ها عبارتند از : بلبیرینگ‌های کف‌گرد، رولربیرینگ‌های استوانه‌ای کف‌گرد، رولربیرینگ‌های مخروطی کف‌گرد و رولربیرینگ‌های کروی کف‌گرد. از آنجا که رولربیرینگ‌های کروی کف‌گرد به خاطر زاویه



شکل ۳-۱۰ تحمل جداگانه مؤلفه‌های شعاعی و محوری بار در مجموعه بیرینگ‌های انتهای یک غلتک نورد

تماس $\alpha_0 = 50°$ $(F_r < 0.55\ F_a)$ ظرفیت تحمل بارهای شدید شعاعی را دارند تحت شرایط معینی، شاید نیازی به اضافه کردن یک بیرینگ شعاعی *نباشد*.

۳-۳ سرعت‌های مجاز

حداکثر سرعت کاری بیرینگ‌های غلتشی با معیارهای مختلفی محدود می‌شود. یکی از پارامترهای مؤثر، در اکثر موارد، دمای کاری می‌باشد که با افزایش سرعت، افزایش می‌یابد. یکی دیگر از پارامترهای محدودکنندهٔ سرعت مجاز، تأمین غیریکنواخت روانکار در سطوح در تماس غلتشی و لغزشی است که به خاطر افزایش شدید نیروهای گریز از مرکز یا تغییرات شدید سینماتیک غلتشی اجزاء غلتنده می‌باشد. دوران بدون ثبات، توسعه و افزایش لرزش و آلودگی صوتی نیز می‌توانند در موارد مختلف باعث محدودکردن سرعت شوند.

استحکام قفسه یا سرعت مجاز لغزشی و حرارت تولید شده به‌وسیله حلقه‌های آب‌بندی لاستیکی نیز شاید باعث محدودکردن سرعت دورانی کاری شوند.

سرعت مجاز به کل پارامترهای مجموعه بیرینگ از جمله به طرح، ابعاد و دقت بیرینگ و قفسه آن بستگی دارد. همچنین به شرایط کاری، مثل بزرگی و جهت اعمال بار، نوع روانکار، نحوه روانکاری، اجزاء دربرگیرنده، ساختار آنها، دقت و قابلیت انتشار حرارت نیز بستگی دارد. کاتالوگ بیرینگ‌های غلتشی حاوی سرعت‌های مجاز تحت عنوان محدوده‌های سرعت است. این مقادیر، مقادیر تخمینی هستندکه شامل محدودهٔ وسیعی از پارامترهای مؤثر می‌باشند. اما این محدوده‌های سرعت، ارائه دهندهٔ محدوده‌های مطلق *نیستند*، بلکه فقط مقادیر مقایسه‌ای برای طرح‌ها و ابعاد مختلف بیرینگ‌ها هستند. برای شرایط کاری مختلف *نمی‌توان* مقادیر قطعی تعیین کرد، به جز در شرایط بسیار عمومی. برای

این منظور، انجمن FVA (انجمن آلمانی تحقیقات انتقال نیرو) رهبری طیف گسترده‌ای از تحقیقات راجع به تخمین سرعت‌های مجاز بیرینگ‌های غلتشی را به عهده گرفت. نتایج این بررسی‌ها وارد استاندارد DIN 732 قسمت‌های اول و دوم (پیش نویس) شده است. پرکاربردترین استاندارد به‌عنوان استاندارد پایه در نظر گرفته شده است: حداکثر سرعت مجاز بیرینگ‌های غلتشی با دمای کاری مجاز تعیین می‌شود. این دما به حرارت اصطکاکی تولید شده به‌وسیله بیرینگ بستگی دارد، امکان دارد حرارت از محیط اطراف بیرینگ به آن اعمال شود یا از بیرینگ به محیط اطراف منتشر شود. دقت دوراني، لقی بیرینگ، طراحی قفسه، روانکاری و بار اعمالی نیز در این امر نقش دارند.

سرعت مرجع حرارتی

استاندارد DIN 732 قسمت اول، یک سرعت مرجع حرارتی را تعیین کرده است که تحت شرایط مرجع یکنواخت می‌توان از آن استفاده کرد. محاسبات سرعت مرجع حرارتی برپایهٔ توازن انرژی تحت شرایط مرجع در سیستم بیرینگ غلتشی مطابق بخش‌های ۲-۲-۱ و ۲-۱-۵ این کتاب، است. برای تکرار محاسبات سرعت‌های مرجع حرارتی، استاندارد محتوی معادلات و ضرایبی برای طرح‌ها و سری‌های مختلف بیرینگ‌های غلتشی است. این معادلات و ضرایب در اینجا تکرار نمی‌شوند زیرا می‌توان مستقیماً از استاندارد به دست آورد. بعضی سرعت‌های مرجع حرارتی به میزان وسیعی با محدوده‌های سرعتی که در این کتاب تعیین شده‌اند، اختلاف دارند. در کاتالوگ‌های بیرینگ‌های غلتشی سرعت‌های مرجع حرارتی برای طرح‌های مختلف بیرینگ‌ها آورده شده است.

سرعت مرجع حرارتی $n_{\theta r}$ در استاندارد DIN 732 قسمت اول به عنوان سرعتی که در دمای مرجع 70 °C ایجاد شده باشد تعیین شده است. در شرایط گفته شده بین انرژی اصطکاکی ایجاد شده در بیرینگ و انتشار حرارتی بیرینگ به وسیلهٔ نشیمنگاه‌های بیرینگ یا توسط روانکار در بیرینگ‌های کف‌گرد، تعادل ایجاد می‌شود. شرایط مرجع، مشابه شرایط عادی بیرینگ‌های غلتشی امروزی است. این شرایط به صورت یکسان در تمام انواع بیرینگ‌ها و اندازه‌های مختلف اعمال می‌شود. اما استاندارد DIN 732 شامل بیرینگ‌های دقیق و بلبیرینگ‌های کف‌گرد نمی‌شود. شرایط مرجع، به شرح زیر، بسته به لزجت و روانکاری، به نوعی انتخاب می‌شود که سرعت‌های مشابهی در شرایط روانکاری با روغن و روانکاری با گریس به دست آید :

- یک دمای مرجع 70 °C، که روی رینگ خارجی اندازه‌گیری می‌شود و دمای محیط که باید 20 °C باشد،
- اعمال بار مرجع 5% بار استاتیک C_0؛ بار خالص شعاعی برای بیرینگ‌های شعاعی؛ بار محوری اعمالی به مرکز برای بیرینگ‌های کف‌گرد،
- روانکاری بیرینگ‌های شعاعی با گریس با پایه صابون لیتیمی با روغن پایهٔ معدنی بدون افزودنی EP (لزجت روغن پایه در دمای 70 °C باید 22 mm^2/s باشد)؛ 30% از فضای خالی داخل بیرینگ باید با گریس پر شود،
- روانکاری با روغن در بیرینگ‌های شعاعی با روغن‌های

معدنی متداول بدون مواد افزودنی EP، لزجت سینماتیک باید 12 mm^2/s (دردمای 70 °C) باشد؛ در روانکاری با حمام روغن باید سطح روغن تا بالاتر از وسط جزء غلتنده زیرین باشد،

- روانکاری با روغن در بیرینگ‌های کف‌گرد با روغن‌های معدنی متداول بدون مواد افزودنی EP، لزجت سینماتیک باید (در دمای 70 °C) برای رولربیرینگ‌های استوانه‌ای کف‌گرد 48 mm^2/s و برای رولربیرینگ‌های کروی کف‌گرد 24 mm^2/s باشد؛ در این بیرینگ‌ها فقط باید از روش روانکاری مدار بسته استفاده کرد،
- آلودگی داخل روانکار نیز باید در محدودهٔ مجاز باشد،
- باید از بیرینگ‌های غلتشی با طرح معمولی از قبیل دقت معمولی، لقی عادی و بدون حلقه‌های آب‌بندی لاستیکی استفاده شود،
- باید بیرینگ به‌صورت حلقه بیرونی ثابت، با شفت افقی و با تلرانس‌های انطباقی متداول مونتاژ شود تا لقی کاری بیرینگ معمولی باشد،
- توزیع تنش قابل قبول، مثلاً حداقل شرایط *نامناسب* عدم هم‌محوری و شیب یا تغییر شکل قسمت‌های در تماس با بلبیرینگ، نیروهای گریز از مرکز اجزاء غلتنده، بار اولیه یا لقی کاری بزرگ که باعث آسیب رسیدن به بیرینگ می‌شود و
- دفع گرمای بیرینگ بسته به نوع آن بر پایهٔ سطوح انتشاردهنده استاندارد باشد، این مسئله باعث می‌شود بتوان چگالی مرجع جریان حرارت ویژه بیرینگ (شکل ۲-۷) را برای جریان حرارت منتشر شده از نشیمنگاه‌های بیرینگ یا از طریق روغن در جریان در مدار روانکاری محاسبه کرد.

سرعت کاری مجاز حرارتی

استاندارد DIN 723 قسمت دوم محتوی یک روش برای محاسبه سرعت کاری مجاز حرارتی برای مواردی است که سرعت کاری از شرایط مرجع انحراف داشته باشد، مثلاً به خاطر بار، لزجت روغن یا دمای مجاز. سرعت کاری مجاز حرارتی n_{perm} عبارت است از سرعتی که در دمای میانگین بیرینگ و تحت شرایط کاری واقعی به مقدار مجاز خود برسد. این مقدار با ضرب کردن سرعت مرجع حرارتی $n_{\theta r}$ در فاکتور نسبت سرعت حرارتی f_N به دست می‌آید. این فاکتور باعث توجه به شرایط کاری واقعی می‌شود. نحوهٔ محاسبهٔ این فاکتور در استاندارد DIN 723 قسمت دوم (پیش نویس) ذکر شده است.

معادله ذکر شده در بالا به قرار زیر است :

$$n_{Perm} = f_N \, n_{\theta r} \qquad (۱-۳)$$

که در آن :

n_{perm} سرعت کاری مجاز حرارتی (min^{-1})،

f_N نسبت سرعت و

$n_{\theta r}$ سرعت مرجع حرارتی (min^{-1}).

پروسه محاسبه سرعت مجاز حرارتی n_{perm} (که در زیر توضیح داده شده است) بر پایه نقشه موجود در استاندارد است. از دیاگرام‌ها می‌توان در محاسبه سرعت برای انواع مختلف بیرینگ‌های غلتشی از قبیل بلبیرینگ‌های غلتشی شعاعی، رولربیرینگ‌های شعاعی و رولربیرینگ‌های کف‌گرد استفاده نمود. استفاده از دیاگرام‌ها راه بسیار ساده‌تری نسبت به محاسبه با فرمول است. نسبت سرعت f_N، نتیجه و حاصل ضرب پارامتر

بار f_p، پارامتر دما f_t و پارامتر روانکاری $f_{v\,40}$ است :

$$f_N = f_p\, f_t\, f_{v\,40} \qquad (۳-۲)$$

نسبت سرعت f_N برای بلبیرینگ‌های شعاعی را می‌توان به کمک شکل‌های ۳-۱۱ و ۳-۱۲ برآورد کرد. دیاگرام‌هایی معادل این دیاگرام‌ها، برای رولربیرینگ‌های شعاعی و رولربیرینگ‌های کف‌گرد در کاتالوگ FAG آورده شده است. از شکل ۳-۱۱ می‌توان پارامتر بار f_p برای بلبیرینگ‌های شعاعی را به‌عنوان تابعی از قطر متوسط بیرینگ $d_m = (D+d)/2$ در نظر گرفت و بار ویژه را $P/C_0 = 0.01 - 0.20$ فرض کرد. با به دست آوردن پارامتر بار f_p، ما آن را وارد شکل ۳-۱۲ می‌کنیم و خط پیکان‌ها را برای محاسبه نسبت سرعت f_N در دمای کاری عملی (دمای رینگ خارجی) در محدوده $\vartheta = 110\ °C - 30$ و با لزجت نامی $\nu_{40} = 10 - 1500\ mm^2/s$ دنبال می‌کنیم. با نسبت‌سرعت، می‌توان سرعت کاری مجاز حرارتی $n_{perm} = f_N\, n_{\vartheta r}$ را محاسبه کرد (معادله ۳-۱).

نحوه کاربرد شکل‌های ۳-۱۱ و ۳-۱۲

- برای بلبیرینگ شیار عمیق با کد 6216 با قطر متوسط $d_m = 110\ mm$، $P/C0 = 0.1$،
- با فرض: دمای رینگ خارجی $\vartheta = 90\ °C$،
- f_p به‌دست آمده از شکل ۳-۱۱ برابر با 0.94 خواهد بود،
- در شکل ۳-۱۲ (قسمت بالا): محل تقاطع $f_p = 0.94$ با منحنی دمای معادل را به دست آورید،
- محل تقاطع نتیجه می‌دهد که: $f_p f_t = 1.4$ و
- در شکل ۳-۱۲ (قسمت پایین): با داشتن $f_p f_t = 1.4$ و لزجت $\nu_{40} = 36\ mm2/s$ خواهیم داشت: $f_N = 1.4$.

تحت شرایط کاری فرض شده، سرعت کاری مجاز حرارتی، 1.4 برابر سرعت مرجع حرارتی است، در نتیجه:

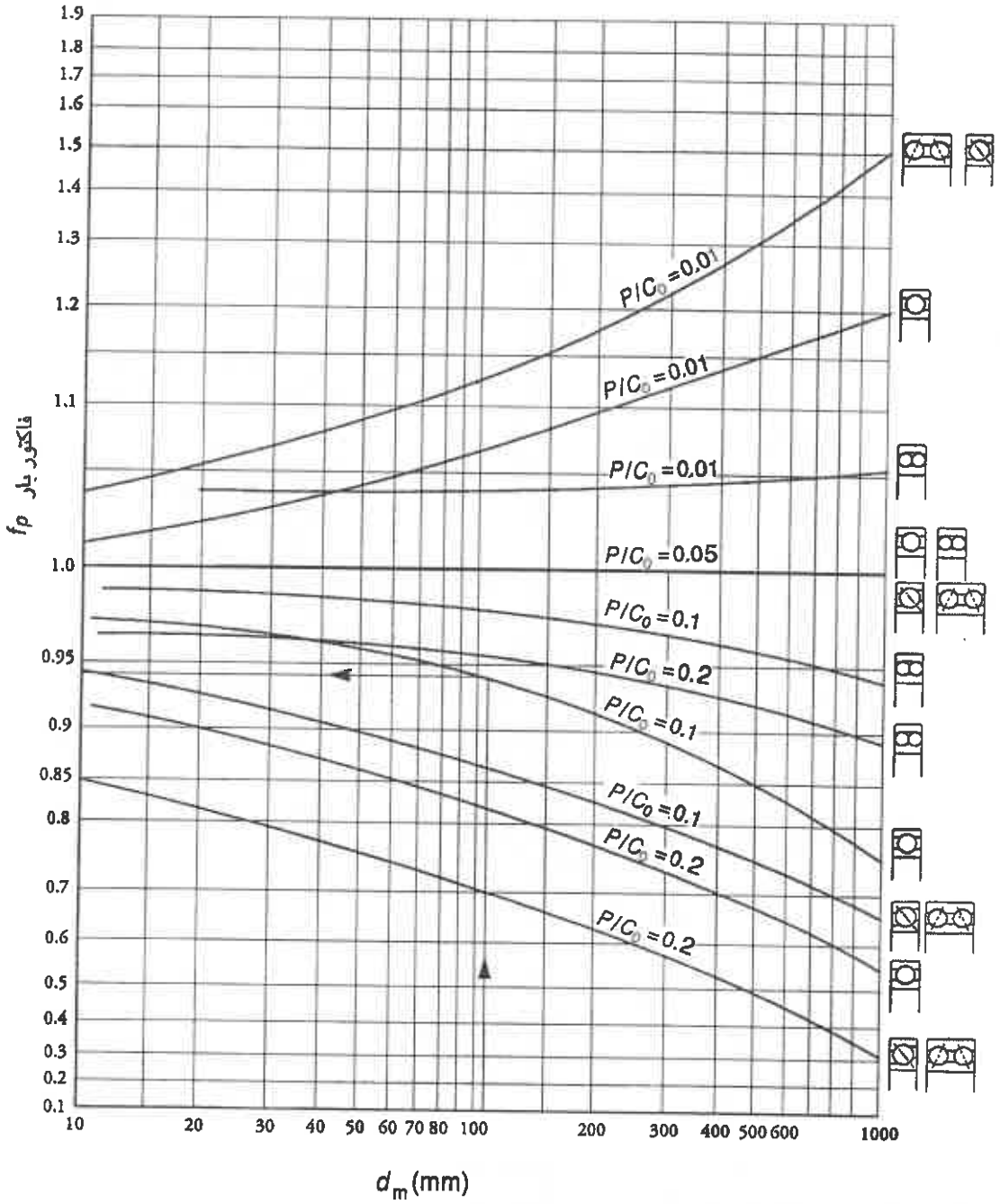
$$n_{perm} = f_N\, n_{\vartheta r} = 1.4 \times 6300\ min^{-1} \approx 8800 min^{-1}$$

گاهی سرعت کاری مجاز حرارتی که مطابق روش توضیح داده شده در استاندارد DIN 732 قسمت دوم محاسبه شده باشد، امکان دارد که مطابق نیازهای طراحی *نباشد*، اما این سرعت با اصلاح و توسعه انتشار حرارت و روانکاری به میزان قابل توجهی قابل افزایش است. اصطکاک روانکار باید در سرعت‌های بالا، پایین باشد. از طرف دیگر، باید حرارت به شکل مناسبی دفع گردد (فصل ۲).

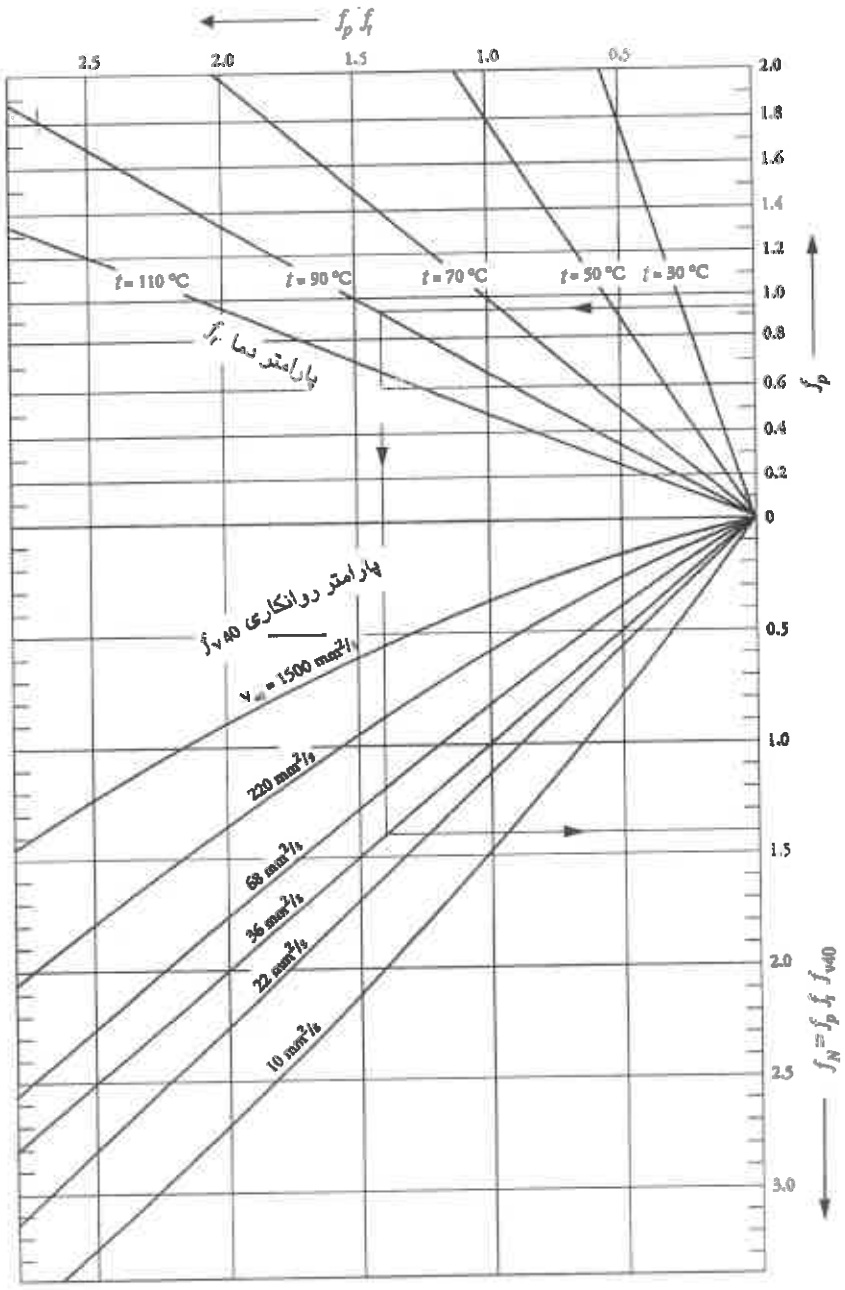
سرعت مجاز سیلماتیک

یکی دیگر از پارامترهای محدودکننده، سرعت مجاز سینماتیک است، مقدار این سرعت امکان دارد بیشتر یا کمتر از سرعت مرجع باشد.

مقادیر سرعت مجاز سینماتیک حتی برای بیرینگ‌هایی که در استاندارد برای آنها سرعت مرجع حرارتی تعیین نشده است (مثل بیرینگ‌های مجهز به حلقه‌های آب‌بندی لاستیکی) در کاتالوگ بیرینگ‌های غلتشی آورده شده است. نباید حتی در شرایط مناسب مونتاژ و روانکاری، بدون مشورت با سازنده بیرینگ غلتشی سرعت را از سرعت مجاز سینماتیک بالاتر برد.



شکل ۳-۱۱ فاکتور بار f_p برای بلبیرینگ‌های شعاعی مورد استفاده در محاسبه سرعت کار مجاز حرارتی



شکل ۳-۱۲ پارامتر دما f_t، پارامتر روانکاری f_{v40} و نسبت سرعت f_N برای بلبرینگ‌های شعاعی مورد استفاده در محاسبه سرعت مجاز حرارتی n_{perm}

فاکتورهایی که تأثیر قاطع بر سرعت مجاز سینماتیک می‌گذارند عبارتند از: محدودهٔ استحکام قطعات بیرینگ خصوصاً استحکام قفسه، توسعه آلودگی صوتی (نویز) یا سرعت لغزشی حلقه‌های آب‌بند لاستیکی. سرعت مجاز سینماتیک برای بیرینگ‌هایی که مجهز به حلقه‌های آب‌بند هستند (طرح‌های RSR و 2RSR) بسیار کمتر از سرعت مرجع حرارتی بیرینگ‌هایی بدون حلقه آب‌بندی با ابعاد مشابه است. سرعت مجاز سینماتیک بیرینگ‌هایی با حفاظ‌های غیرلاستیکی (طرح‌های ZR و 2ZR) نیز پایین‌تر از بیرینگ‌های بدون حفاظ است. این پدیده به خاطر محدودیت در انتشار گریس می‌باشد.

در سرعت‌های بالا، نوع قفسه نیز نقش مهمی را بازی می‌کند، وزن کم قفسه، نیروهای نابالانسی پایینی را ایجاد می‌کند و درنتیجه امکان کار در سرعت‌های بالاتر نیز هست. قفسه‌های ساخته شده از آلیاژهای سبک، مثل رزین تقویت شده با فیبر و مواد پلاستیکی مقاوم به حرارت، برای اینگونه کاربردها مناسب هستند. این قفسه‌ها، حتی در سرعت‌های بالا، لرزش و آلودگی صوتی کمی تولید می‌کنند (بخش ۱-۱-۲). معمولاً، برای سرعت‌های بالا از قفسه‌های مهار شونده با لبه رینگ استفاده می‌شود. مهار قفسه در مرکز از نابالانسی جلوگیری می‌کند. سطوح لغزش در لبه و قفسه، باید به‌خوبی روانکاری شود.

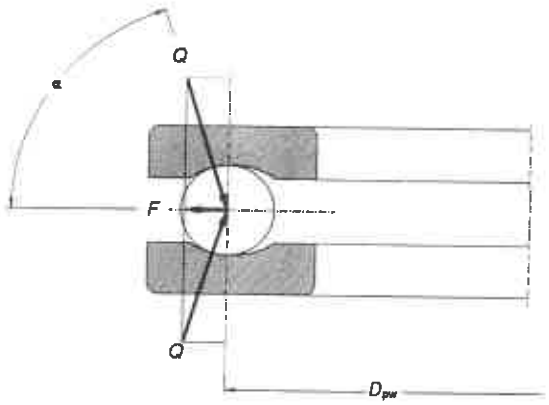
اگر شرایط زیر تأمین شود، می‌توان سرعت‌های مجاز سینماتیک ارائه شده در کاتالوگ‌ها را به‌عنوان سرعت کاری فرض کرد :

- روانکاری با طرح ویژه،
- لقی بیرینگ سازگار با شرایط کاری،
- ماشینکاری دقیق نشیمنگاه‌های بیرینگ و
- توجه ویژه به انتشار حرارت.

مقادیر سرعت مجاز سینماتیک تعیین شده در کاتالوگ FAG برای شرایط بار متوسط $P/C \approx 0.1$، دمای کاری 70 °C، روانکاری با حمام روغن و شرایط متداول مونتاژ، صدق می‌کنند. برای روانکاری با گریس، باید مقادیر را 20% کاهش داد.

۳-۴ حداقل بار لازم برای بیرینگ‌های کف گرد و شعاعی

ساچمه‌های یک بلبیرینگ کف‌گرد در سرعت‌های بالا، به علت نیروی گریز از مرکز (شکل ۳-۱۳)، تحت نیرویی به طرف بیرون واقع می‌شوند. نیروهای Q ساچمه، که در حالت عادی زاویه تماس $a_0 = 90°$ تشکیل می‌دهند، تحت اثر این نیرو جابه‌جا شده و $\alpha > 90°$ خواهد شد و بخشی از ساچمه به خاطر شرایط *نامناسب* غلتشی،



شکل ۳-۱۳ نیروی گریز از مرکز F و نیروی ساچمه Q در بلبیرینگ‌های کف‌گرد

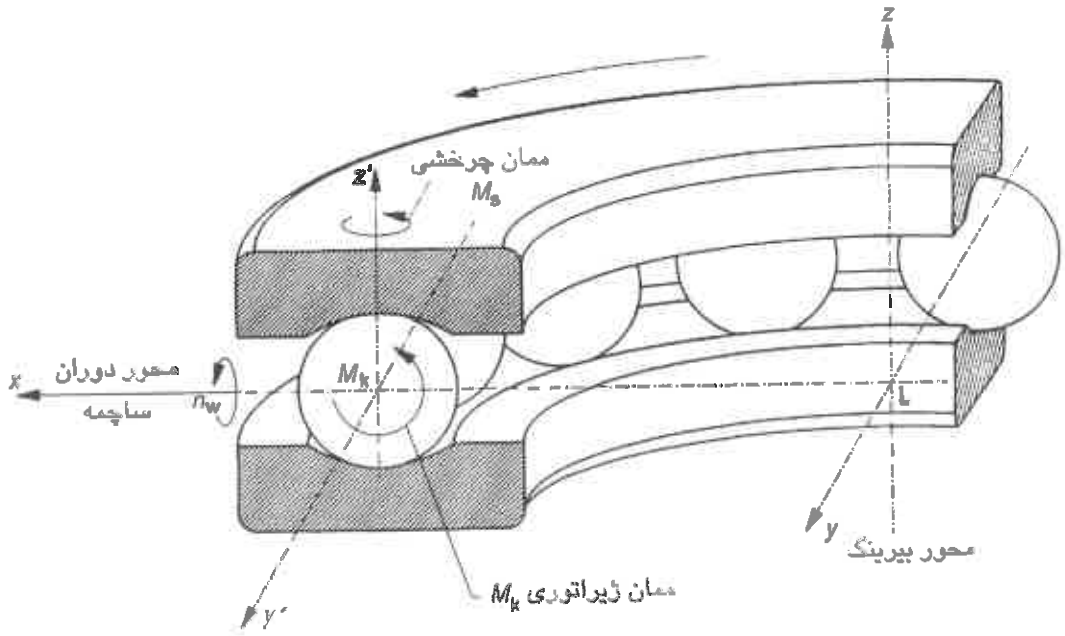
روی سطح تماس خواهد لغزید. اثر دیگر تغییرات مداوم جهت دوران محور ساچمه در بلبیرینگ‌های کف‌گرد، ممان ژیراتوری M_k حول محور 'y مماس بر دایرهٔ گام ساچمه است (شکل ۳-۱۴). هنگام دوران بیرینگ، ساچمه‌ها حول محور x دوران می‌کنند. هرچند، از آنجا که محور x همواره به مرکز بیرینگ، L اشاره می‌کند، ساچمه در هر بار دوران قفسه به‌طور همزمان یک دور حول محور zها نیز دوران می‌کنند. این مسئله باعث بروز ممان چرخشی M_s خواهد شد (شکل ۳-۱۴). وجود این موارد، باعث لغزش ساچمه‌ها روی سطح تماس در سرعت‌های بالا خواهد شد.

لغزش را می‌توان با جلوگیری کردن از کم شدن فشار به کمتر از مقادیر ویژه‌ای در نقاط تماس، کاهش داد. حداقل بار F_a مناسب بیرینگ از فرمول زیر محاسبه می‌شود :

$$F_a \geq M(n/1000)^2 \qquad (۳-۳)$$

که در آن $n(min^{-1})$ سرعت بیرینگ و M اصطلاحاً حداقل بار ثابت است. بار ثابت M در کاتالوگ‌های بیرینگ‌های کف‌گرد مختلف آورده شده است.

در بلبیرینگ‌های کف‌گرد با تماس زاویه‌ای که در محور ماشین‌های ابزار استفاده می‌شود، شرایط مشابه بلبیرینگ‌های کف‌گرد بروز می‌کند. اما، از آنجا که بلبیرینگ‌های کف‌گرد با تماس زاویه‌ای عموماً تحت بار اولیه هستند، از لغزش ساچمه‌ها جلوگیری می‌شود. پدیده‌های ممان چرخشی و ژیروستاتیک در رولربیرینگ‌های کف‌گرد نیز ایجاد می‌شوند.



شکل ۳-۱۴ ممان چرخشی M_s و ممان ژیراتوری M_k ساچمه‌ها در بلبیرینگ‌های کف‌گرد

رولرها هنگام دوران، تمایل به واژگون شدن حول محور دورانشان دارند، در نتیجه بر واشرها فشار آورده و آنها را از هم جدا می‌کنند. می‌توان با یک بار محوری حداقل مشخص، از بروز این پدیده جلوگیری کرد. می‌توان این نیرو را به وسیلهٔ چند فنر اعمال کرد.

حداقل بار محوری

رولربیرینگ‌های کروی کف‌گرد

$$F_a \geq 1.25\, C_0/1000 \quad (kN) \qquad (a\text{۱۴-۳})$$

رولربیرینگ‌های استوانه‌ای کف‌گرد

$$F_a \geq C_0/22000 \quad (kN) \qquad (b\text{۱۴-۳})$$

رولربیرینگ‌های سوزنی کف‌گرد

$$F_a \geq C_0/2200 \quad (kN) \qquad (c\text{۱۴-۳})$$

که در آن C_0 میزان بار استاتیک بیرینگ است.

در تمام بیرینگ‌های غلتشی که زاویه تماس نامی آنها $\alpha_0 > 0°$ است نیز اثرات مشابهی پدیدار می‌شود. اثر این عوامل در طرح‌هایی که در اینجا به آنها اشاره نشده است، خیلی کم است.

حداقل بار شعاعی بیرینگ‌ها

به خاطر داشته باشید که، برای اجتناب از لغزش، بار *نباید* در سرعت‌های بالا و شتاب‌گیری‌ها، بیش از اندازه باشد. درنتیجه، در کنار وجود حداقل بار برای بیرینگ‌های کف‌گرد، نسبت بار بیرینگ‌های شعاعی نیز نباید کمتر از مقادیر راهنمای زیر باشد :

بلبیرینگ‌های مجهز به قفسه	$P/C \geq 0.01$
رولربیرینگ‌های مجهز به قفسه	$P/C \geq 0.02$
بیرینگ‌هایی با تجهیزات کامل	$P/C \geq 0.04$

P بار معادل دینامیکی و C میزان بار دینامیکی بیرینگ است.

۳-۵ جبران نابه‌جایی

برای انتخاب یک طرح بیرینگ، عدم دقت در موقعیت محل‌های نصب بیرینگ را باید در نظر گرفت. نابه‌جایی زمانی بروز می‌کند که محفظه‌های پایه‌دار بیرینگ‌ها به صورت جدا جدا مونتاژ شده باشند و یا وقتی محل نشیمن بیرینگ روی شفت و سوراخ بدنه با یک میزان ماشینکاری *نشده* باشند. نابه‌جایی زاویه‌ای نشیمنگاه شعاعی و سطوح پهلویی یک رینگ بیرینگ به گروه مشابهی تعلق دارد. نابه‌جایی زاویه‌ای محورهای رینگ‌های داخلی و خارجی، ناشی از خیز شدید شفت و تغییر شکل بدنه است. تمامی انواع *نابه‌جایی‌ها* که در محدوده دقت معمولی قرار دارند را می‌توان با استفاده از بیرینگ‌های غلتشی که توانایی جابه‌جایی زاویه‌ای دارند، اصلاح کرد، یعنی با استفاده از بیرینگ‌های خود تنظیم که شامل بلبیرینگ‌های خود تنظیم، رولربیرینگ‌های بشکه‌ای، رولربیرینگ‌های کروی و رولربیرینگ‌های کروی کف گرد هستند. هر چند با این بیرینگ‌ها نیز، نابه‌جایی خطی و زاویه‌ای هنگام مونتاژ باید به میزانی باشد که سطوح تماس اجزاء غلتنده از پشت پهنای سطح تماس در رینگ فراتر نروند. رینگ‌ها *نباید* تحت بار قرار گیرند، مگر اینکه در حال دوران باشند، در غیر این صورت سطوح تماس می‌توانند صدمه ببینند. مقادیر

تعیین شده برای جابه‌جایی زاویه‌ای این بیرینگ‌ها در جدول ۳-۱ آورده شده است.

زاویه حرکت گردابی (لنگی) مجاز رینگ‌های چرخان داخلی یا خارجی بیرینگ‌های خود تنظیم در *نابه‌جایی* زاویه‌ای دینامیکی، بسیار کوچکتر از مقادیری است که در جدول ۳-۱ آورده شده است. زاویه لنگی به وسیله محور هندسی رینگ در حال دوران و محور دوران واقعی آن تشکیل می‌شود. مجموعه‌های بیرینگ نوع S نیز می‌توانند برای جبران *نابه‌جایی‌های* خطی و زاویه‌ای به‌کار بروند (شکل‌های ۱-۷ و ۱-۸). سطح کروی رینگ خارجی می‌تواند در سوراخ نشیمنگاه بچرخد و خود را با نابه‌جاییها تطبیق دهد. *نابه‌جایی‌های* زاویه‌ای نیز با بدنه‌هایی با شکل مناسب قابل جبران هستند. در دستگاه‌های نورد، این خواسته با استفاده از گوه‌های غلتک با تنظیم‌کننده‌های اهرمی و صفحه فشاری پیچی تاج‌دار برآورده می‌شود.

بلبیرینگ‌های‌شیارعمیق، رولربیرینگ‌های استوانه‌ای و رولربیرینگ‌های مخروطی به میزان بسیار کمی،

جدول ۳-۱ جابه‌جایی زاویه‌ای مجاز بیرینگ‌های خود تنظیم

نوع بیرینگ	جابه‌جایی زاویه‌ای
بلبیرینگ‌های خود تنظیم	4°
رولربیرینگ‌های بشکه‌ای	4°
رولربیرینگ‌های استوانه‌ای	
بار کم	2°
بار زیاد	0.5°
رولربیرینگ‌های استوانه‌ای کف گرد	
بار کم	2°
بار زیاد	0.5°

می‌توانند به‌صورت زاویه‌ای جابه‌جا شوند (جدول ۳-۲). در بلبیرینگ‌های شیار عمیق، نابه‌جایی زاویه باعث افزایش نیروهای اعمالی به ساچمه‌ها می‌شود، اما اگر نابه‌جایی از مقادیر زوایای آورده شده بالاتر نرود بار اضافی در محدوده قابل قبولی باقی می‌ماند. رولربیرینگ‌های سوزنی، مخروطی و استوانه‌ای توانایی تحمل *نابه‌جایی‌های* کمتری را نسبت به بلبیرینگ‌های شیار عمیق دارند. شکل مقطع رولرها و سطوح تماس رولربیرینگ‌های موجود در جدول ۳-۲، به این معنی است که فشارهای اعمالی بر مواد در سطوح تماس غلتشی حتی با جابه‌جایی در محدوده تعیین شده، هنوز حالت یکنواختی دارند و عمر نامی بیرینگ تحت تاثیر قرار *نخواهند* گرفت. ایجاد *نابه‌جایی‌های* زاویه‌ای بزرگتر از مقادیر تعیین شده در جدول ۳-۲ باعث می‌شود که بار به تمام طول رولرها و رولرهای سوزنی اعمال *نشود*.

جدول ۳-۲ زاویه جابه‌جایی مجاز بلبیرینگ‌های شیار عمیق، رولربیرینگ‌های مخروطی و رولربیرینگ‌های استوانه‌ای

نوع بیرینگ	زاویه جابه‌جایی	
	بار متوسط $P/C < 0.2$	بار زیاد $P/C \geq 0.2$
بلبیرینگ‌های شیار عمیق[a]	5–12′	8–16′
سری‌های 60, 62, 63, 64	3–8′	5–10′
سری‌های 160	4′	
رولربیرینگ‌های مخروطی و رولربیرینگ‌های استوانه ای	1–2′	2–4′
رولربیرینگ‌های سوزنی[b]		

[a] برای بیرینگ‌های کوچکتر از مقادیر بزرگتر استفاده شود

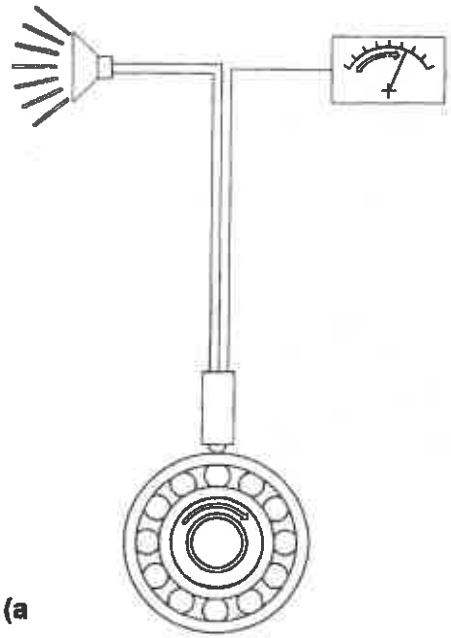
[b] برای سری‌های پهن از مقادیر کوچکتر استفاده شود

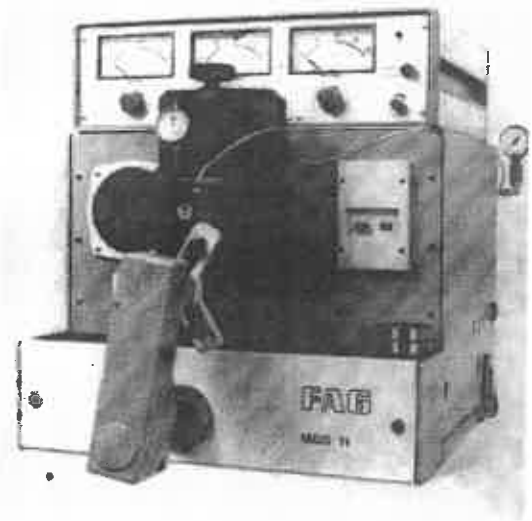
بلبیرینگ‌های کف‌گرد به *نابه‌جایی‌های* زاویه‌ای حساس هستند. در مواردی که سطح نگهدارنده در بدنه عمود بر محور دوران بیرینگ *نباشد*، می‌توان با استفاده از بلبیرینگ‌های کف‌گرد مجهز به واشر کروی در بدنه و نشیمنگاه مربوطه، *نابه‌جایی‌های* زاویه‌ای را اصلاح کرد.

هر چند، این بیرینگ‌ها *نمی‌توانند* حرکات چرخشی لنگ شفت را تحمل کنند زیرا اصطکاک لغزشی بین سطوح کروی این واشرها بسیار زیاد است.

۳-۶ آلودگی صوتی در دوران

یکی از اصلی‌ترین نیازها بیرینگ‌های غلتشی، ایجاد آلودگی صوتی (نویز) پایین در دوران و خصوصیات ارتعاشی مناسب است. برای به‌دست آوردن سطح آلودگی مجاز در موتورهای الکتریکی، بیرینگ‌های با آلودگی صوتی پایین به‌صورت استاندارد به‌کار می‌روند. امروزه روش‌های اندازه‌گیری مختلفی برای آزمایش آلودگی صوتی بیرینگ‌های غلتشی وجود دارد. شرایط و روش تعیین شده با DIN ترجیح داده می‌شود. در **شکل ۳-۱۵** یک دستگاه اندازه‌گیری امروزی و اصول اندازه‌گیری به‌کار رفته در آن نشانداده شده است. قواعد سینماتیکی و روش‌های آزمون آلودگی صوتی به‌کار رفته توسط سازندگان بیرینگ‌های غلتشی در مستندات توضیح داده شده است. در بیرینگ‌های غلتشی صدا از دو مسیر: هوا و سازه منتقل می‌شود. مقدار صوتی که دقیقاً از هوا منتقل می‌شود بسیار کم است. همچنین این مقدار به‌وسیله قطعات در برگیرنده بیرینگ کاهش نیز می‌یابد. بخش بزرگتر و مهمتر صدای درحال انتقال،





شکل ۳-۱۵ اصول اندازه‌گیری و دستگاه آزمون آلودگی صوتی (آندرومتری)

صدای منتقل شده به‌وسیله سازه است. طیف فرکانس‌های تولیدی از حدوداً نصف سرعت شفت متصل به بیرینگ‌ها شروع و تا محدوده مافوق صوت ادامه می‌یابد. شکل ۳-۱۶ نحوه انتقال و عبور صدا از یک بیرینگ غلتشی به شفت و بدنه یک موتور الکتریکی و سپس خروج صدا و انتقال به وسیله هوا را نشان می‌دهد. به این خاطر که منابع دیگر آلودگی‌صوتی مجاور بیرینگ‌های غلتشی، به کل سیستم آلودگی صوتی منتشر می‌کنند، تفکیک آلودگی صوتی ناشی از بیرینگ غلتشی به هیچ وجه کار ساده‌ای نیست. این کار اگر نوع ارتعاشات و محدوده فرکانس معلوم باشد ساده‌تر خواهد بود.

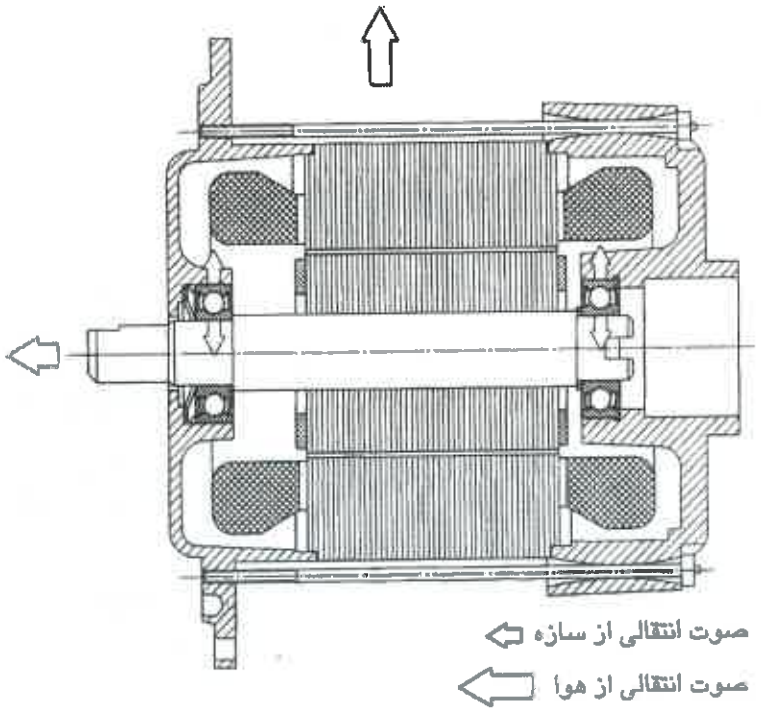
آلودگی صوتی تولید شده در بیرینگ‌های غلتشی

تغییر شکل‌های الاستیک

نیروهای اعمالی به بیرینگ می‌توانند روی سطوح تماس تغییر شکل‌های پلاستیک ایجاد کنند.

با یک بار شعاعی ثابت، ثابت فنر بیرینگ مطابق موقعیت مجموعه اجزاء غلتنده نسبت به جهت اعمال نیروهای خارجی تغییر می‌کند.

این حالت باعث می‌شود حین دوران بیرینگ و عبور اجزاء غلتنده یک حرکت ارتعاشی در واحد زمان تولید شود. این تغییرات *نابه‌جایی* شفت از موقعیت حرکت



شکل ۳-۱۶ نحوه انتقال صوت از سازه و هوا در یک موتور الکتریکی

اجزاء غلتنده نسبت به جهت اعمال بار خارجی ثابت بسیار *ناچیز* است. آن را می‌توان بعدها با اعمال بار اولیه محوری کاهش داد.

تأثیرات سطح تماس

کیفیت سطوح در تماس غلتشی بر آلودگی صوتی در دوران تأثیر می‌گذارد. هندسه ماکروسکوپی از قبیل قطر و هندسه میکروسکوپی از قبیل درجه زبری و موج‌دار بودن، هر دو باعث تولید ارتعاش می‌شوند اما میزان سهم آنها متفاوت است. کیفیت سطح اجزاء غلتنده شدیدترین تأثیر را بر آلودگی صوتی بیرینگ می‌گذارد. از این‌رو، بر کیفیت سطح اجزاء غلتنده، در مقایسه با سطح تماس رینگ‌ها، حساسیت بیشتری اعمال می‌شود. سطوح در تماس لغزشی نیز آلودگی صوتی ایجاد می‌کند، خصوصاً بین قفسه و سطوح مهارکننده و همچنین بین حلقه‌های آب‌بندی و سطوح در تماس با آنها. سطوح با موج‌های منظم نیز تأثیر قابل توجهی روی آلودگی صوتی بیرینگ دارند. لنگی شعاعی رینگ دوران‌کننده به خاطر فرکانس پایین تولیدی، در آلودگی صوتی قابل شنیدن شدیداً نقش دارد.

تأثیر اصطکاک و روانکاری

آلودگی صوتی بیرینگ با روانکاری بین سطوح در تماس غلتشی تعدیل می‌شود. ضخامت بیشتر فیلم روانکار باعث تماس بسیار کم فلز با فلز بین قطعات در تماس غلتشی می‌شود، تا حدی که حتی می‌توان با یک فیلم الاستوهیدرودینامیک سطوح را به‌طور کامل از هم جدا کرد. در این حالت این فیلم حتی به خاطر وجود ذرات آلوده‌کننده نیز منقطع *نخواهد* شد. گردش مواد آلاینده داخل روانکار به صورت مداوم، امکان دارد سرانجام سطح محیطی قطعات در حال دوران را خشن نموده و به همراه این اتفاق، آلودگی صوتی نیز افزایش یابد (بخش‌های ۵-۲-۲ و ۵-۳-۳). هر چه ذرات آلاینده بزرگتر و سخت‌تر باشند، صدای عبوری از سازه قوی‌تر می‌شود. ذرات با ابعاد مشخص، تأثیر قوی‌تری بر تولید آلودگی صوتی در بیرینگ‌های کوچکتر نسبت به بیرینگ‌های بزرگتر می‌گذارند. حتی مقدار کمی از ذرات بزرگتر از 10 µm می‌تواند به میزان قابل توجهی آلودگی صوتی یک بلبیرینگ شیار عمیق 6005 را افزایش دهد.

بیشترین گروه بلبیرینگ‌های کوچک و متوسط شیار عمیق که کیفیت تولید آلودگی صوتی کمی دارند، با گریس روانکاری می‌شوند. در اینجا همگن بودن گریس در آلودگی صوتی بسیار تعیین‌کننده است. در روانکاری با گریس، آلودگی صوتی بیرینگ، نه تنها تحت تأثیر لزجت روغن پایه است، و در محاسبات فیلم روانکار به‌کار می‌رود، بلکه به ماده غلیظ‌کننده نیز بستگی دارد. ثابت شده است که گریس از نوع صابون لیتیمی با روغن پایه معدنی برای بیرینگ‌های با آلودگی صوتی کم مناسب است. انتخاب روانکار امکان دارد به علت برتری آن در ایجاد آلودگی صوتی پایین یا پارامترهای دیگر انجام شود. گروه ارتعاشات ناشی از اصطکاک، شامل آلودگی صوتی هستند که به خاطر لغزش به‌وجود می‌آید. این نوع آلودگی صوتی غالباً در موتورهای الکتریکی که روتورشان با رولربیرینگ‌های استوانه‌ای مهار شده باشند ایجاد می‌شود. یکی از دلایل می‌تواند بار اعمالی بسیار کم باشد، بنابراین مجموعه رولرها در

این حالت با لغزش ثابت یا متغیری دوران خواهند کرد. نتیجه، آلودگی صوتی بلند و آزاردهنده است. چاره کار روانکاری کافی و حفظ حداقل بار بین یک تا دو درصد از کل بار است.

علل غیرمستقیم آلودگی صوتی

آلودگی‌های صوتی که در بخش قبلی توضیح داده شد، همگی مستقیماً از اجزاء بیرینگ ناشی می‌شوند. ولی ممکن است به دو علت دیگر نیز آلودگی صوتی به‌طور غیرمستقیم از طریق بیرینگ انتشار یابد : اولاً بیرینگ‌ها ارتعاش حاصل از دیگر اجزاء ماشین را انتقال می‌دهند و ثانیاً بیرینگ‌ها به‌عنوان راهنما و تکیه‌گاه گردشی بعضی از اجزاء ماشین عمل می‌کنند.

بیرینگ‌ها به علت وجود ضخامت لایه روانکار در آنها و سطوح تماس کوچک آنها، اثر ضعیفی در جذب ارتعاش دارند. ولی می‌توان با نصب قطعات اضافی در کنار مجموعه بیرینگ‌ها، اثر جذب ارتعاشات را در آنها بهبود بخشید. میزان دقت هدایت یک بیرینگ می‌تواند در ایجاد آلودگی صوتی در قسمت‌های دیگر ماشین تاثیر داشته باشد. مثلاً صدای چرخدنده‌ها به دقت درگیری دندانه‌های آنها و به تبع آن به دقت مهار آنها در بیرینگ‌ها بستگی دارد.

ارتعاشات می‌توانند ناشی از تسمه‌های لاستیکی انتقال نیرو، *نابالانسی* و نیروهای الکتریکی یا مغناطیسی متناوب و گاهی ناشی از تغییر مداوم شکل هندسی فاصله هوایی در موتورهای الکتریکی باشد.

بعضی از شرایط مونتاژ نیز باعث تولید ارتعاشات اضافی می‌شوند. لقی شعاعی اهمیت بالایی در این موضوع دارد. لقی بسیار زیاد باعث تولید آلودگی صوتی گنگی می‌شود. بار اولیه بسیار زیاد نیز باعث تولید آلودگی صوتی با صدای بسیار بلندی می‌شود. اگر بیرینگ تقریباً بدون لقی و در دمای کاری عادی دوران نماید، اکثر شرایط مناسب کاری مورد انتظار فراهم می‌شوند. ولی در عمل به خاطر تلرانس‌های جازنی شفت و بدنه و شرایط دمایی که تخمینشان مشکل است، دست‌یابی به این شرایط بسیار مشکل است.

مونتاژ بدون لقی به‌راحتی با تنظیم محوری جزئی یکی از دو رینگ خارجی به وسیله واشر فنری قابل دستیابی است. عملکرد مناسب این روش در موتورهای الکتریکی کوچک به اثبات رسیده است. قطعات در تماس با بیرینگ نیز بر آلودگی صوتی دورانی تأثیر دارند. از یک طرف، جذب در یک اتصال پرسی، دو تاسه برابر بیشتر از جذب به وسیله فیلم روغن بین سطوح در تماس غلتشی است. از طرف دیگر عدم دقت ابعادی محل‌های نشیمن بیرینگ باعث می‌شود رینگ‌های بیرینگ که سطح مقطع کوچکی دارند تغییر شکل دهند. *نابه‌جایی* قطعات در تماس و عدم توازی شانه‌های مهارکننده عرضی اجزاء غلتنده نیز به خاطر اینکه در حرکت اجزاء غلتنده اشکال ایجاد می‌کنند، باعث افزایش آلودگی صوتی می‌شوند. در این حالت واژگون شدن در بیرینگ رخ می‌دهد، سینماتیک و تنش بیرینگ تغییر می‌کند. عموماً، برای کاربرد با آلودگی صوتی پایین بهتر است که به اطلاعات نابه‌جایی مجاز محل نشیمن در شفت و بدنه که در جدول ۳-۲ و ۳-۳ آورده شده است رجوع شود.

در صورتی که فرکانس صوتی بیرینگ بر فرکانس طبیعی منطبق شود، شرایط *نامناسب* ویژه‌ای رخ

می‌دهد. خصوصیات الاستیک بیرینگ‌ها و قطعات در تماس وقتی بر هم منطبق شود، یک ساختار جدید تولید خواهد کرد که توانایی ارتعاش خواهد داشت. هنگام تلاش برای کاهش آلودگی صوتی دورانی یک ماشین، باید به این واقعیت توجه کرد که حتی آلودگی صوتی پایین انتقالی از سازه امکان دارد قطعاتی از قبیل درپوش‌ها و غلاف‌های محافظ را وادار به ارتعاشات طبیعی کند. سازه‌های سبک وزن تأثیر *نامناسبی* دارند، خصوصاً وقتی اجزاء پایداری فرم (هندسی) *نامناسبی* داشته باشند. البته می‌توان با ضخیم‌تر کردن دیواره، تیغه‌های قوی‌تر و یا با به‌کار بردن مواد مرکب جاذب نیرو بر این وضعیت غلبه‌کرد. می‌توان با مونتاژ با قابلیت جذب ارتعاش ماشین (VDI)، انتقال صدا از طریق سازه را محدود کرد. صفحه ۴ از دستورالعمل راهنمای VDI 7320، در مورد عوامل مؤثر در سازه با ارتعاش پایین توضیح داده است.

۳-۷ دقت دورانی

دقت دورانی شعاعی و محوری یک شفت که در بیرینگ غلتشی مهار شده باشد، به دقت و تغییر شکل‌های الاستیکی بیرینگ‌های غلتشی یا قطعات مختلف آنها و دقت و تغییر شکل‌های الاستیکی قطعات دربرگیرنده آنها بستگی دارد. پارامترهای مربوط به بیرینگ، لنگی شعاعی و محوری رینگ در حال دوران بیرینگ (بخش ۱-۴) و لقی آن است. الاستیسته بیرینگ نیز باید در نظر گرفته شده شود.

قطعات دربرگیرنده بیرینگ در صورتی که رینگ‌ها به صورت پرسی بر محل نشیمنشان جازده شوند یا محل‌های نشیمن، گردی مناسبی *نداشته* باشند یا عدم توازی شانه‌ها با محل نشیمن و یا تغییر شکل الاستیک بدنه بر دقت دورانی تأثیر دارد. در ماشین‌های ابزار، دقت دورانی، اکثراً به وسیله اندازه‌گیری میزان لنگی شعاعی نوک محور ماشین ابزار تعیین می‌شود، از این رو خیز شفت بسیار مهم خواهد بود، و خیز شفت بستگی به چیدمان و الاستیسیته بیرینگ‌ها دارد.

تأثیر لنگی شعاعی

در رینگ داخلی دوران‌کننده یک بیرینگ شعاعی، امکان دارد شکل سطح تماس انحراف‌های مختلفی از شکل ایده‌آل داشته باشند. تأثیرات این انحراف‌ها در مثال‌های زیر مورد توجه قرار گرفته است.

مورد ۱ (شکل ۳-۱۷)

سطح تماس گرد رینگ داخلی، با گردی سوراخ داخلیش خارج از مرکز است (شکل‌های ۱-۹۲ تا ۱-۹۴). با دوران محور و ثابتبودن رینگ خارجی، محور ماشین‌ابزار حول محور تقارن سوراخ داخل رینگ داخلی دوران می‌کند.

شکل ۳-۱۷ سوراخ داخلی خارج از مرکز با گردی سطح تماس

چون محور دوران محور ماشین ابزار با محور دوران رینگ خارج از مرکز قرار گرفته، با لنگی شعاعی دوران خواهد کرد، که موقعیت آن نسبت به رینگ خارجی تغییر *نمی‌کند*. قطعه‌کاری که با محور ماشین ابزار دوران می‌کند و ماشینکاری شود، به این خاطر که لبه‌برنده ابزار موقعیت خود را نسبت به رینگ بیرونی بیرینگ حفظ می‌کند، سطح کاملاً گردی خواهد داشت از این رو، لنگی شعاعی رینگ داخلی بیرینگ محور کارگیر، باعث تولید قطعه‌کار غیر گرد *نخواهد* شد (شکل ۳-۱۷)، اما *باید* هنگام ماشینکاری قطعه را باز و بسته کرد. از طرف دیگر، اگر شرایط یک ابزار چرخنده را در نظر بگیریم، مثل محور یک دستگاه فرز، به این نتیجه خواهیم رسید که لنگی شعاعی رینگ داخلی تأثیر خواهند داشت.

در نظر بگیرید که بخواهیم به وسیله یک ابزار استوانه‌ای یک سطح مسطح را ماشینکاری کنیم، در این صورت به سطح صافی دست *نخواهیم* یافت بلکه سطح ماشینکاری شده موج‌دار خواهد شد.

ارتفاع موج‌ها به میزان لنگی محور ماشین ابزار که متشکل از لنگی شعاعی رینگ داخلی دوران‌کننده، همچنین قطر ابزار فرز و از همه مهمتر به سرعت پیشروی بستگی دارد. وقتی سرعت پیشروی خیلی زیاد و قطر ابزار فرز خیلی کوچک باشد، ارتفاع موج دقیقاً برابر با لنگی شعاعی رینگ داخلی خواهد بود. فاصله بین برآمدگی‌های موج فقط به سرعت پیشروی بستگی دارد.

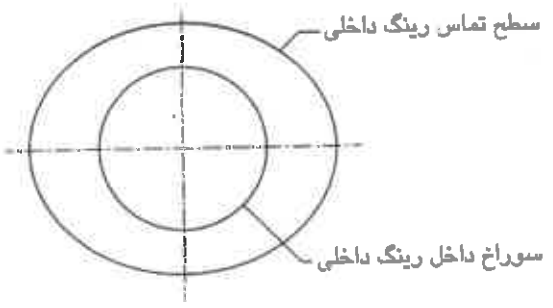
اما اگر تحت شرایط کاری تعیین شده (رینگ خارجی ثابت و رینگ داخلی دورانی)، سطح تماس رینگ خارجی با قطر خارجی بیرینگ خارج از مرکز باشد (وجود لنگی شعاعی در رینگ خارجی) تأثیری بر دوران صحیح محور *نخواهد* گذاشت.

مورد ۲ (شکل ۳-۱۸)

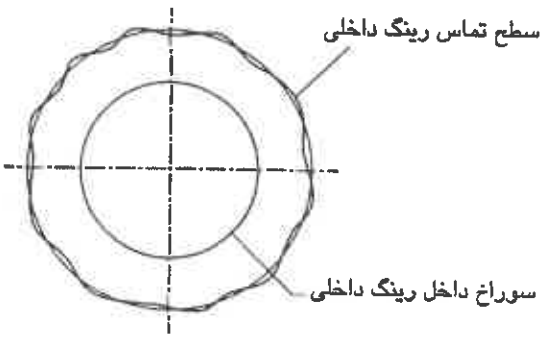
سطح تماس رینگ داخلی با سوراخ داخل هم مرکز بوده ولی شکل بیضی‌گون دارد. در اینجا موقعیت محور دوران یک محور ماشین ابزار تحت بار ثابت *نیست*. محور ماشین تراش لنگی شعاعی سطح تماس را به قطعه‌کار انتقال خواهد داد.

مورد ۳ (شکل ۳-۱۹)

لنگی شعاعی از سطح تماس با موج‌های نامرتب هم مرکز با سوراخ داخلی حاصل شده است. در یک بیرینگ که تحت بار دوران می‌کند این اشکال تأثیر کاملی روی قطعه‌کار *نخواهد* داشت زیرا تغییر شکل الاستیک در ناحیه‌های تماس اجزاء غلتنده به میزان قابل توجهی این مشکل را جبران می‌کند. در عمل انحرافات به‌صورت جداگانه در شکل ایده‌آل‌شان در شکل‌های ۳-۱۷ تا ۳-۱۹ نشانداده شده‌اند.



شکل ۳-۱۸ سطح تماس بیضی‌گون هم محور با سوراخ داخل



شکل ۳-۱۹ فرم موجی شکل *نامرتب* سطح تماس هم محور با سوراخ داخل

تأثیر لنگی محوری

تأثیر لنگی محوری (شکل‌های ۱-۹۸ و ۱-۹۹) روی دوران بیرینگ و مهار شفت را می‌توان به‌خوبی با یک بیرینگ کف‌گرد شرح داد. فرض کنیم، ضخامت واشر در مرکز سطح تماس در نقاط مختلف متفاوت باشد، می‌توان مساله را به صورت پنج مورد نشانداده شده در **جدول ۳-۳** بررسی نمود. توجه داشته باشید که فقط مقدار لنگی کوچکتر دو واشر، در جابه‌جایی محور شفت تاثیر می‌گذارد، به خاطر بسپارید که به خاطر تغییر شکل الاستیک، لنگی محوری اندازه‌گیری شده قبل از مونتاژ، کاملاً در حالت مونتاژ شده و تحت بار، موثر نیست.

در تمام بیرینگ‌های شعاعی با قابلیت تحمل بار محوری، لنگی محوری در کنار لنگی شعاعی اندازه‌گیری می‌شود و در بیرینگ مونتاژ شده هر کدام بر دیگری تأثیر دارد. هنگام ثابت کردن رینگ داخلی در راستای محوری،

جدول ۳-۳ تأثیر لنگی محوری در بیرینگ‌های کف‌گرد

جابه‌جایی محوری شفت[a] (μm)	علامت	لنگی محوری سطح تماس (μm)	
		واشر در حال دوران u	واشر ثابت s
0	s u	5	0
0		0	5
2		5	2
2		2	5
5		5	5

[a] بدون تغییر شکل الاستیک

لنگی رینگ داخلی دوران‌کننده نسبت به سوراخ داخل و لنگی محوری پله شفت باعث می‌شوند موقعیت سطح تماس مایل شود. این مسئله بر لنگی شعاعی و محوری نیز تأثیر می‌گذارد. مقادیر لنگی مجاز برای بیرینگ‌های غلتشی با کلاس‌های دقت مختلف در بخش ۱-۴ آورده شده است. جدول‌های تلرانس در کاتالوگ‌های بیرینگ‌های غلتشی یافت می‌شوند.

تأثیر تلرانس‌های جزء غلتنده

در عمل، اشکالات‌ناشی از اجزاء غلتنده در بیرینگ‌های استاندارد سازندگان معروف به‌سختی یافت می‌شود زیرا تفاوت قطر جزء غلتنده آنقدر کوچک است که عموماً با تغییر شکل‌های الاستیک سطح تماس قابل جبران هستند. برای مثال، در رولرهای استوانه‌ای میزان تلرانس تا قطر $D_w = 26$ mm به میزان $2 < \mu m$ و تا قطر $D_w = 75$ mm به میزان $3 < \mu m$ است. برای ساچمه‌ها میزان تلرانس کمتر است. اجزاء غلتنده مختلف با کلاس تلرانسی یکسان به‌صورت تصادفی در محیط بیرینگ توزیع می‌شوند، که همچنین تأثیر جبران‌کننده دارد.

تأثیر لقی بیرینگ

مهار کامل و دقیق شفت در مرکز نیازمند عدم وجود هر گونه لقی بین اجزاء غلتنده و سطوح تماس تحت هرگونه شرایط کاری است. عموماً، این نیاز را به دلایل زیر *نمی‌توان* برآورده کرد. اختلاف دما بین رینگ داخلی و رینگ خارجی و تاثیر انبساط حرارتی رینگ‌ها در هر کاربردی متفاوت است (بخش ۲-۲-۲ و شکل ۳-۲ تا ۳-۷). همچنین، به دلایل مربوط به ساخت، لقی شعاعی بیرینگ‌های غلتشی تلرانس معینی دارد. محدوده تلرانس لقی شعاعی برای بیرینگ‌های استاندارد و برای جلوگیری از گیرکردن تحت شرایط کاری عادی محاسبه شده است.

در کنار این اطلاعات تلرانس‌های جازنی توصیه شده نیز ارائه شده است. اما در شرایط ویژه، مثلاً در بعضی از ماشین‌های ابزار، لقی شعاعی امکان دارد باعث جابه‌جایی خط مرکز شود که در نتیجه مقدار لقی از میزان مجاز بالاتر می‌رود. به این دلیل، یک سری از بیرینگ‌های غلتشی با لقی شعاعی کم ساخته می‌شوند. مقدار لقی شعاعی آنها معادل لقی شعاعی گروه‌های C2 و C1 است (جدول ۱-۱۱، برای به‌دست آوردن مقادیر به کاتالوگ‌های بیرینگ‌های غلتشی مراجعه کنید). با روش‌های طراحی نیز می‌توان به مقادیر لقی کم ویژه‌ای دست یافت، مثلاً با استفاده از سوراخ داخل مخروطی (بخش ۴-۴-۲). معمولاً بلبیرینگ‌های با تماس‌زاویه‌ای با چیدمان O یا X تنظیم شده (شکل‌های ۳-۲ و ۳-۳) و یا به وسیله فنرهای مخصوص ایجاد بار اولیه بدون لقی تنظیم می‌شوند (شکل ۴-۱۲).

تأثیر لقی جازنی

لقی بین سوراخ داخل و شفت و لقی بین قطر خارجی و بدنه نیز باعث خیز مرکز شفت می‌شود. وقتی دقت دورانی بالایی نیاز باشد، باید از جازنی پرسی استفاده شود، برای این منظور معمولاً از رولربیرینگ‌های استوانه‌ای به‌عنوان بیرینگ شناور شفت استفاده می‌شود، زیرا هر دو رینگ باید پرسی جازده شود.

تأثیر کاملاً گرد نبودن قطعات در تماس

ضخامت رینگ‌های بیرینگ غلتشی نسبت به قطرشان کوچک است، به ویژه در سری‌های سبک‌تر. از این رو، آنها باید در حالت مونتاژ شده در محل خود به وسیله قطعات در تماس (شفت و بدنه) به‌خوبی تقویت شوند. بیرینگ‌ها به‌شدت خود را با شکل قطعات در تماس تطبیق می‌دهند. از این رو، دقت فرم باید از این جهت مطابق تلرانس‌های کلاس دقت مربوط به بیرینگ‌ها باشد (جدول ۳-۳).

تأثیر بار

بار بر دقت هم محوری نیز تأثیر می‌گذارد زیرا اجزاء غلتنده و سطوح تماس تحت بار تغییر شکل داده و محور دوران شفت را جابه‌جا می‌کنند. تغییر شکل الاستیک با افزایش بار افزایش می‌یابد. مقدار افزایش برای تماس نقطه‌ای بیشتر از تماس خطی است. در نتیجه الاستیسته رولربیرینگ‌ها کمتر از الاستیسته بلبیرینگ‌ها است، بنابراین با رولربیرینگ‌ها شفت را می‌توان دقیق‌تر مهار کرد. بعضی اوقات مهندسین به موقعیت اجزاء غلتنده نسبت به ماکزیمم بار و اینکه این پارامتر چگونه بر دوران هم محور تأثیر می‌گذارد نیاز پیدا می‌کنند. این مشکل به‌صورت ریاضی بررسی شده و تحقیقات نشانداده است که محور شفت در منحنی‌هایی حرکت می‌کند که بسته به شرایط کاری، تشکیل طرح یک بیضی یا شکل هشت لاتین را می‌دهد. هر چند، خیزها آنقدر کوچک هستند که در کاربردهای عملی این جابه‌جایی‌ها *ناچیز* است (بخش ۳-۶).

۳-۸ انطباق

بیرینگ‌های غلتشی باید روی شفت و بدنه در سه جهت شعاعی، محوری و محیطی ثابت شوند. مهار شعاعی و محیطی با ایجاد انطباق پرسی رینگ‌ها قابل دسترسی است. اما مهار محوری فقط در بعضی موارد جازنی با انطباق پرسی قابل دسترسی است. عموماً می‌توان با تماس مثبت اجزاء هم جوار با بیرینگ به این هدف دست یافت (بخش ۴-۱).

در انتخاب نوع انطباق، چهار نیاز اساسی وجود دارد :

- رینگ‌های بیرینگ باید از محیطشان به‌خوبی مهار شود در آن صورت می‌توان از کل ظرفیت انتقال بار آن استفاده کرد،
- رینگ‌ها *نباید* در راستای محیطی روی قطعات در تماس لغزش داشته باشند، این مسئله از خرابی سطوح نشیمن جلوگیری می‌کند،
- بیرینگ شناور باید در راستای محوری آزاد باشد تا بتواند تغییرات طولی شفت و نشیمنگاه را جبران کند و
- باید مونتاژ و دمونتاژ بیرینگ بسادگی انجام شود.

جازنی با انطباق پرسی باعث انبساط سطح تماس رینگ داخلی و انقباض سطح تماس رینگ خارجی می‌شود. باید به تنش‌های ناشی از این اتفاقات و کاهش لقی شعاعی توجه شود (بخش ۳-۹).

۳-۸-۱ محل نشیمن بیرینگ‌های شعاعی

با توجه به دو نیاز اول، رینگ‌های داخلی و خارجی بیرینگ‌های شعاعی را باید پرسی جا زد. از آنجا که رینگ‌ها تحت بار تغییر شکل می‌دهند و در نتیجه

رینگ‌ها در جای خود کمی شل می‌شوند، برای بیرینگ‌هایی که تحت بارهای شدید باشند ($P/C \geq 0.15$) باید رینگ‌ها را سفت‌تر جا زد، از طرفی برای بیرینگ‌های تحت بارهای کمتر به انطباق روان‌تری نیاز است. برای بارهای ضربه‌ای و شوک در بعضی موارد ویژه برای اطمینان از اینکه رینگ‌ها تحت این بارها حتی به‌صورت لحظه‌ای شل *نشوند*، باید آنها را به سفتی جا زد. در انتخاب تلرانس ماشینکاری محل نشیمن بیرینگ در قطعات در تماس، به اختلاف دمایی که امکان دارد در دمای کاری عادی بین رینگ و قطعات در تماس بروز کند توجه داشته باشید.

به خاطر ضخامت کم رینگ‌های بیرینگ‌های غلتشی، انحرافات فرم سطوح محل نشیمن به سطح تماس انتقال خواهد یافت. از این رو، قطعات در برگیرنده بیرینگ باید تحت بار، کمترین میزان تغییر شکل ممکن را داشته باشند.

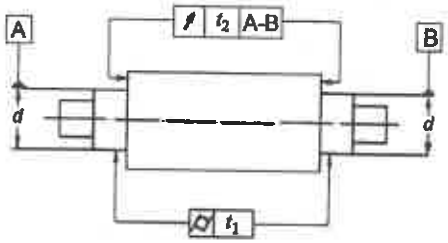
دیگر پارامترهایی که باید در محدوده بسته‌ای نگه داشته شوند، میزان انحراف از گردی و انحراف از شکل نامی استوانه‌ای یا مخروطی محل نشیمن بیرینگ حاصل از ماشینکاری است. استانداردهای کیفی ISO که در جدول ۳-۴ آورده شده‌اند را باید در شفت‌ها و بدنه‌ها اعمال کرد. در جدول ۳-۵ میزان مقادیر توصیه شده برای کیفیت سطح محل نشیمن بیرینگ‌های غلتشی آورده شده است. غالباً در مواردی که به‌دقت دورانی عادی بیرینگ نیاز باشد، از بوش‌های واسطه و غلاف‌های بیرون‌کش استفاده می‌شود. استانداردهای کیفی 7 تا 9 برای تلرانس‌های قطر محل نشیمن بوش‌های واسطه و غلاف‌های بیرون‌کش قابل قبول هستند، اما فقط 50% از این مقادیر برای انحراف‌های فرم قابل قبول هستند.

در مونتاژ بیرینگ‌های غیرقابل انفصال، یک رینگ را باید برای ایجاد توانایی حرکت آزاد در مواردی که تغییرات طولی اتفاق بیفتد، در محل خود شل جا زد. جبران طول مورد نیاز را می‌توان با بدنه‌های با قابلیت جابه‌جایی در راستای محوری نیز به‌دست آورد. بیرینگ‌های‌غلتشی قابل انفصال مثل رولربیرینگ‌های استوانه‌ای یا رولربیرینگ‌های مخروطی را می‌توان به‌سادگی در محل خود نصب کرد زیرا هر رینگ را می‌توان به‌صورت جداگانه جا زد. مونتاژ و دمونتاژ بیرینگ‌های غیرقابل انفصال را می‌توان فقط با شل جازدن یکی از رینگ‌ها آسان کرد، البته به این قیمت که دیگر این رینگ از کل محیطش در محل خود مهار *نخواهد* شد.

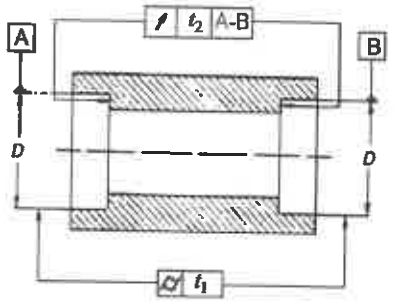
در بسیاری از موارد کاربرد هر کدام این قوانین پایه، امکان دارد یکی مانع به کار بردن دیگری شود. در این حالت باید دید که کدام یک از قوانین، که اهمیت بیشتری در حل بهینه مسئله داشته و با طرح مورد نظر هماهنگی بیشتری داشته باشد، را به‌کار ببریم.

گاهی مسائل جازنی فقط با آزمون و خطا حل می‌شود. امکان دارد در مواردی امکان پرسی جازدن هر دو رینگ وجود *نداشته* باشد، در این حالت باید هر دو حالت جازنی پرسی رینگ داخلی و رینگ خارجی تحلیل شود تا دریابیم که شل بودن کدام رینگ تأثیر منفی کمتری خواهد داشت.

جدول ۳-۴ تلرانس‌های فرم و موقعیت توصیه شده برای محل‌های نشیمن بیرینگ‌ها[a]



t_1 کلاس تلرانس بیرینگ



t_2 تلرانس لنگی

کلاس تلرانس بیرینگ	محل نشیمن بیرینگ	تلرانس ماشینکاری	تلرانس دقت در فرم استوانه‌ای		تلرانس لنگی
			بار محیطی t_1	بار نقطه‌ای t_1	t_2
PN	شفت	IT 6 (IT 5)	$\frac{IT4}{2}$ $(\frac{IT3}{2})$	$\frac{IT5}{2}$ $(\frac{IT4}{2})$	IT 4 (IT 3)
(تلرانس معمولی)	قطر سوراخ بدنه $\varnothing \leq 150\,mm$	IT 6 (IT 7)	$\frac{IT4}{2}$ $(\frac{IT5}{2})$	$\frac{IT5}{2}$ $(\frac{IT6}{2})$	IT 4 (IT 5)
	قطر سوراخ بدنه $\varnothing > 150\,mm$	IT 7 (IT 6)	$\frac{IT5}{2}$ $(\frac{IT4}{2})$	$\frac{IT6}{2}$ $(\frac{IT5}{2})$	IT 5 (IT 4)
P6	شفت	IT 5	$\frac{IT3}{2}$ $(\frac{IT2}{2})$	$\frac{IT4}{2}$ $(\frac{IT3}{2})$	IT 3 (IT 2)
P5	بدنه	IT 6	$\frac{IT4}{2}$ $(\frac{IT3}{2})$	$\frac{IT5}{2}$ $(\frac{IT4}{2})$	IT 4 (IT 3)
P4, SP	شفت	IT 5	$\frac{IT2}{2}$	$\frac{IT3}{2}$	IT 2
	بدنه	IT 6	$\frac{IT3}{2}$	$\frac{IT4}{2}$	IT 2
P2	شفت	IT 4	$\frac{IT1}{2}$	$\frac{IT2}{2}$	IT 1
UP	بدنه	IT 5	$\frac{IT2}{2}$	$\frac{IT3}{2}$	IT 2
HG	شفت	IT 3	$\frac{IT0}{2}$	$\frac{IT1}{2}$	IT 0
	بدنه	IT 4	$\frac{IT1}{2}$	$\frac{IT2}{2}$	IT 1

تلرانس دقت در فرم استوانه‌ای t1 به شعاع بستگی دارد. با اندازه‌گیری دو نقطه‌ای قطر شفت یا سوراخ بدنه، باید مقدار تلرانس دقت در فرم استوانه‌ای دوبرابر شود (2t1).
قاعده زیر اعمال می‌شود : تلرانس فرم مثل انحراف مجاز از گردی و مخروط بودن شفت و بدنه نباید از نصف تلرانس ابعادی فراتر رود. بخاطر ضخامت کم دیواره رینگ‌های بیرینگ‌های غلتشی، انحراف‌های از فرم در محل‌های نشیمن به سطوح تماس انتقال می‌یابد.

جدول ۳-۵ کیفیت سطح توصیه شده برای محل‌های نشیمن بیرینگ‌های غلتشی

کلاس تلرانس بیرینگ‌ها	صافی سطح (μm)	قطر شفت (mm)				
		تا 50 از	50 120	120 250	250 500	500
PN (تلرانس معمولی)	مقدار صافی سطح میانگین R_a	0.4	0.89	1.6	1.6	1.6
	عمق متوسط ناصافی سطح $R_z \approx R_t$	2.5 to 4	4 to 6.3	6.3	6.3	6.3
	کلاس صافی سطح (DIN ISO 1302)	N5	N6	N7	N7	N7
P6, P5	مقدار صافی سطح میانگین R_a	0.2	0.4	0.4	0.8	0.8
	عمق متوسط ناصافی سطح $R_z \approx R_t$	1.6	2.5	2.5 to 4	4 to 6.3	6.3
	کلاس صافی سطح (DIN ISO 1302)	N4	N5	N5	N6	N6
P2, P2, HG, SP, UP	مقدار صافی سطح میانگین R_a	0.2	0.2	0.4	0.4	0.4
	عمق متوسط ناسطح صافی $R_z \approx R_t$	1.6	1.6	2.5	4	4
	کلاس صافی سطح (DIN ISO 1302)	N4	N4	N5	N5	N5

کلاس تلرانس بیرینگ‌ها	صافی سطح (μm)	سوراخ بدنه (mm)				
		تا 50 از	50 120	120 250	250 500	500
PN (تلرانس معمولی)	صافی سطح میانگین R_a	0.8	1.6	1.6	3.2	3.2
	عمق متوسط ناصافی سطح $R_z \approx R_t$	4 to 6.3	6.3 to 8	6.3 to 10	10 to 16	10 to 16
	کلاس صافی سطح (DIN ISO 1302)	N6	N7	N7	N8	N8
P6, P5	مقدار صافی سطح میانگین R_a	0.4	0.4	0.8	1.6	1.6
	عمق متوسط ناصافی سطح $R_z \approx R_t$	2.5	2.5 to 4	4 to 6.3	6.3	6.3
	کلاس صافی سطح (DIN ISO 1302)	N5	N5	N6	N7	N7
P2, P2, HG, SP, UP	مقدار صافی سطح میانگین R_a	0.2	0.2	0.4	0.8	0.8
	عمق متوسط ناصافی $R_z \approx R_t$	1.6	1.6 to 2.5	2.5 to 4	4 to 6.3	6.3
	کلاس صافی سطح (DIN ISO 1302)	N4	N4	N5	N6	N6

یک رینگ بیرینگ که نسبت به جهت اعمال بار (بار محیطی) دوران می‌کند، اگر سفت جا زده *نشده* باشد، **روی محل نشیمن خود حرکت خواهد کرد، یا به نوعی،** در جهت محیطی می‌خزد. بارهای ضربه‌ای نیز امکان دارد باعث سر خوردن رینگ در محل نشیمن شود. در هر دو مورد خطر خرابی محل‌های نشیمن رینگ‌ها و **قطعات در تماس ناشی از فرسایش و خورده شدن وجود** دارد. فقط یک جازنی با انطباق پرسی می‌تواند به‌طور موثری از حرکات لغزشی و سرشی رینگ جلوگیری کند. البته جازنی پرسی برای نگه داشتن رینگ روی شفت یا **شانه بدنه کافی نیست. از طرف دیگر اگر، رینگ نسبت** به بار (بار نقطه ای) حرکت *نداشته* باشد، هیچگونه نیروی تحریک‌کننده رینگ برای لغزش ایجاد *نخواهد* شد. هر چند در این مورد هم یک جازنی سفت ارائه‌دهنده مهار مناسبتری است، **ولی چون هیچگونه خطر خرابی در** محل‌های نشیمن وجود *ندارد*، انطباق روان‌تر مجاز است. **جدول ۳-۶** لیستی از موارد مختلف بارهای محیطی و نقطه‌ای را به‌وسیله چند مثال عملی آورده است.

در مورد بعدی، رینگ بیرینگ تحت حرکات نوسانی نسبت به جهت اعمال بار (بار نوسانی) می‌باشد. این حالت مشابه حالتی است که بار محیطی اعمال شود، زیرا باعث شل شدن رینگ می‌شود. تحت شرایط کاری **متغیر، امکان دارد یک رینگ بیرینگ به‌صورت مقطعی** تحت بار محیطی قرار گیرد و مدت زمان بیشتری تحت بار نقطه‌ای یا بار نوسانی قرار گیرد. به این حالت بارگذاری *نامعین* گفته می‌شود و از آنجا که *نمی‌توان* از **صدمه به محل نشیمن جلوگیری کرد، باید رینگ را به** سفتی حالت اعمال بار محیطی جا زد.

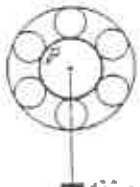
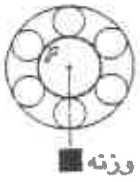
۳-۸-۲ محل‌های نشیمن بیرینگ کف گرد

واشرهای بیرینگ‌های کف‌گرد نیز با جازنی پرسی به‌خوبی در محل خود قرار می‌گیرند. وقتی یک بیرینگ کف‌گرد فقط برای انتقال بارهای محوری طراحی شده باشد، نیازی به مهار آن در راستای شعاعی *نیست*، این حالت، انتقال بارهای شعاعی را منتفی می‌سازد.

رولربیرینگ‌های استوانه‌ای کف‌گرد (شکل ۱-۵۴) در راستای شعاعی به خاطر سطح تماس تخت خود دارای آزادی حرکت می‌باشند. در بیرینگ‌های کف‌گرد با سطح تماس شیاردار، مثل بیرینگ‌های کف‌گرد در شکل ۱-۴۷، این آزادی حرکت وجود *ندارد* و باید یکی از واشرها را روان جا زد. برای اجتناب از لغزش، باید واشر ثابت را روان و واشر چرخان را پرسی جا زد.

در بیرینگ‌های کف‌گردی که برای انتقال بارهای شعاعی به همان خوبی بارهای محوری طراحی شده‌اند، مثل رولربیرینگ‌های کف‌گرد کروی (شکل ۱-۵۳) و بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای کف‌گرد (شکل‌های ۱-۵۰ و ۱-۵۱)، قوانین مشابه بیرینگ‌های شعاعی در مورد محل نشیمن صادق است. سطوح کف محل‌های نشیمن در قطعات دربرگیرنده باید عمود بر محور دوران باشند تا بار در کل اجزاء غلتنده انتشار یابد. طرح‌های مختلف بیرینگ‌های کف‌گرد قابل انفصال هستند، به جز طرح‌های ویژه با غلاف از ورق فولاد پرسکاری شده (شکل ۱-۵b). این ویژگی باعث سادگی در مونتاژ آنها می‌شود.

جدول ۳-۶ تفاوت‌های بین بار محیطی و بار نقطه‌ای

نوع انطباق	نوع بار	شماتیک	مثال	سیلماتیک بیرینگ
رینگ داخلی : انطباق پرسی اجباری	بار محیطی روی رینگ داخلی و بار نقطه ای روی رینگ		شفت نگهدارنده وزنه	رینگ داخلی چرخان رینگ خارجی ثابت راستای ثابت بار
رینگ خارجی : انطباق روان مجاز			نابالانسی زیاد در حال دوران با رینگ خارجی	رینگ داخلی ثابت رینگ خارجی چرخان راستای اعمال بار با رینگ داخلی دوران می‌کند
رینگ داخلی : انطباق روان مجاز	بار نقطه‌ای روی رینگ داخلی و بار نقطه‌ای روی رینگ خارجی		چرخ جلوی خودرو چرخ هرزگرد نقاله (بیرینگ‌های توپی)	رینگ داخلی ثابت رینگ خارجی چرخان راستای ثابت بار
رینگ خارجی : انطباق پرسی اجباری			صفحه گریز از مرکز و لرزان	رینگ داخلی چرخان رینگ خارجی ثابت راستای اعمال بار با رینگ داخلی دوران می‌کند

۳-۸-۳ جداول انطباق

جداول ۳-۷ و ۳-۸ راهنمای انتخاب تلرانس‌های ماشینکاری بر پایهٔ نوع بار، نوع بیرینگ، ابعاد بین دارد به خاطر شرایط خاص مونتاژ یا مسائل اقتصادی مجبور شویم از مقادیر توصیه شده عدول کنیم. در **جدول‌های ۳-۹ و ۳-۱۰** لیست تلرانس‌های ماشینکاری برای شفت‌ها و بدنه‌ها آورده شده است. در ردیف بالای جدول ۳-۹ ابعاد نامی شفت و تلرانس‌های سوراخ داخل بیرینگ نشان داده شده است.

در ردیف بالای جدول ۳-۱۰ قطر نامی داخلی بدنه و تلرانس‌های قطر خارجی بیرینگ آورده شده است. شکل‌ها مربوط به بیرینگ‌های با دقت استاندارد (تلرانس کلاس PN) هستند. پراکندگی قطرهای محل نشیمن بیرینگ را می‌توان با کمک این مقادیر محاسبه کرد.

احتمال بسیار کمی وجود دارد که مقادیر ماکزیمم و مینیمم بیرینگ و قطعات در برگیرنده بر هم منطبق شوند. اکثراً مقادیر لقی عملی نزدیکتر به طرف برو محدودهٔ تلرانس است، زیرا در ماشینکاری، طرف برو در نظر گرفته می‌شود تا از مردود شدن قطعه از لحاظ کیفی اجتناب شود. در بررسی کاراکترهای مربوط به محل نشیمن بیرینگ، محدوده‌های تلرانس اصلی قطعاتی که بیرینگ در آنها جا زده می‌شود به میزان یک سوم طرف برو در نظر گرفته می‌شوند و محاسبات با مقادیر طرف بروی محدودهٔ جدید انجام می‌گیرد. در اینجا مثالی آورده شده است.

قطر سوراخ داخل بیرینگ 40 تلرانس -12/0 µm

تلرانس شفت 40 k5 تلرانس +13/ +2 µm

حال طرف – بروی محدودهٔ تلرانس را به اندازه یک سوم کاهش می‌دهیم :

سوراخ بیرینگ -8 µm

شفت +9 µm

انطباق تداخلی به دست آمده 17 µm

میزان تداخل یا لقی که به این صورت محاسبه شده‌اند در طرف‌چپ جداول ۳-۹ و ۳-۱۰ در چندستون بعد از تلرانس‌های شفت‌ها و بدنه‌ها آورده شده‌اند.

میزان تداخل یا لقی احتمالی به دست آمده، مقادیر میانی هستند. مقادیر حداکثر و حداقل ممکن در بالا و پایین آن قرار می‌گیرند. جازنی با تداخل با علامت + و جازنی با لقی با علامت – مشخص می‌شوند.

۳-۸-۴ تنش‌ها و کرنش‌های ناشی از جازنی پرسی

جازنی پرسی باعث انبساط رینگ داخلی و انقباض رینگ خارجی می‌شود.

این امر باعث تغییر قطرهای سطوح تماس شده و در رینگ‌ها، شفت و بدنه تنش‌های شعاعی و محیطی تولید می‌کند. بزرگی تنش‌ها بستگی به مقدار تداخل (u) قطعات در هم جا زده شده و قطر و ضخامت دیوارهٔ آنها دارد.

در تنش‌های کمتر از $250\ N/mm^2$ هیچ گونه خطر شکست رینگ وجود *ندارد*. در سرعت‌های بسیار بالا، نیروهای گریز از مرکز باعث انبساط بیشتر رینگ داخلی می‌شود، از این رو باعث این کاهش تداخل مؤثر خواهد شد. البته این تأثیر فقط در سرعت‌های بیش از حد مجاز، قابل توجه است.

جدول ۳-۱۷a تلرانس‌های توصیه شده برای ماشینکاری محل‌های نشیمن استوانه‌ای روی شفت: بیرینگ‌های شعاعی

محدوده تلرانس محل نشیمن	شرایط کاری		قطر شفت	نوع بیرینگ	نوع بار
g6 (g5)	بیرینگ‌های شناور با رینگ داخلی قابل جابه‌جایی		تمام ابعاد	بلبیرینگ‌ها و رولربیرینگ‌ها	بار نقطه‌ای روی رینگ داخلی
h6 (h5)					
h6 (j6)	بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای و رولربیرینگ‌های مخروطی با رینگ داخلی قابل تنظیم			بلبیرینگ‌ها	بار محیطی روی رینگ داخلی یا بار نامشخص
j6 (j5)	بار عادی				
j6 (j5)	بار کم	$(P/C < 0.1)$	40 mm تا	بلبیرینگ‌ها	بار محیطی روی رینگ داخلی یا بار نامشخص
k6 (k5)	بار عادی و شدید	$(P/C < 0.08)$	100 mm تا		
k6 (k5)	بار کم	$(P/C > 0.08)$			
m6 (m5)	بار عادی و شدید	$(P/C < 0.1)$	200 mm تا	رولربیرینگ‌ها و رولربیرینگ‌های سوزنی	
m6 (m5)	بار عادی	$(P/C > 0.1)$			
n6 (n5)	بار شدید، بار ضربه‌ای	$(P/C < 0.1)$	200 mm بیش از		
j6 (j5)	بار کم	$(P/C > 0.1)$			
k6 (k5)	بار عادی و شدید	$(P/C < 0.08)$	60 mm تا		
k6 (k5)	بار کم	$(P/C > 0.08)$			
m6 (m5)	بار عادی	$(P/C < 0.1)$	200 mm تا		
n6 (n5)	بارشدید	$(P/C = 0.10–0.15)$			
m6 (n6)	بار عادی	$(P/C > 0.15)$			
p6	بار شدید، بار ضربه‌ای	$(P/C < 0.15)$	500 mm تا		
n6 (p6)	بار عادی	$(P/C > 0.15)$			
p6	بار شدید	$(P/C < 0.2)$	500 mm بیش از		
		$(P/C > 0.2)$			

جدول ۳-b۱۷ تلرانس‌های توصیه شده برای ماشینکاری محل‌های نشیمن استوانه‌ای روی شفت: بوش‌های واسطه، غلاف‌های بیرون کش

محدوده تلرانس محل نشیمن روی شفت	قطر شفت
h7, h8, h9	تمام ابعاد

جدول ۳-c۱۷ تلرانس‌های توصیه شده برای ماشینکاری محل‌های نشیمن استوانه‌ای روی شفت: بیرینگ‌های کف گرد

محدوده تلرانس محل نشیمن روی شفت	شرایط کاری	قطر شفت	نوع بیرینگ
j6		تمام ابعاد	بار محوری
k6		تمام ابعاد	بلبیرینگ‌های کف گرد
h6 (j6)		تمام ابعاد	بلبیرینگ‌های کف گرد ودو طرفه
			رولربیرینگ‌های کف‌گرد استوانه‌ای یا مجموعه کف گرد رولر سوزنی و قفسه با واشر شفت
h10		تمام ابعاد	مجموعه کف گرد رولر استوانه‌ای و قفسه یا مجموعه رولر سوزنی کف گرد و قفسه با واشر کف گرد
h8		تمام ابعاد	مجموعه کف گرد رولر استوانه‌ای و قفسه یا مجموعه کف گرد رولر سوزنی و قفسه
j6		تمام ابعاد	بار ترکیبی رولربیرینگ کف گرد
j6 (k6)	بار نقطه ای روی واشر شفت	تا 200 mm	
k6 (m6)	بار محیطی روی واشر شفت	بیش از 200 mm	

جدول ۳-۱۸a تلرانس‌های توصیه شده برای ماشینکاری محل‌های نشیمن در بدنه: بیرینگ‌های شعاعی

تلرانس‌های سوراخ نشیمنگاه	شرایط کاری	قابلیت جابه‌جایی محوری و میزان بار
H7 (H6)	کیفیت تلرانس بستگی به دقت دورانی دارد	بار نقطه‌ای روی رینگ خارجی بیرینگ شناور، جابه‌جایی روان
H (J6)	دقت دورانی بالا	رینگ خارجی قابل جابه‌جایی، بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای و رولربیرینگ‌های مخروطی با رینگ خارجی تنظیم شده
H7 (J7)	دقت دورانی معمولی	
G7	شفت با گرم شدن خارجی سراسری	بار محیطی روی رینگ خارجی [a] یا بار نامعین
K7 (K6)		بار کم
M7 (M6)		بار عادی، بار ضربه‌ای
N7 (N6)		بار شدید، بار ضربه‌ای
P7 (P6)		بار شدید، ضربه‌های شدید
		بدنه‌های با دیواره نازک

[a] تلرانس‌های داخل پرانتز برای دقت دورانی بالا است

جدول ۳-۱۸b تلرانس‌های توصیه شده برای ماشینکاری محل‌های نشیمن در نشیمنگاه: بیرینگ‌های کف‌گرد

تلرانس سوراخ بدنه	شرایط کاری	نوع بیرینگ
E8 H6	دقت دورانی عادی	بار محوری بلبیرینگ‌های کف گرد
H7 (K7)	دقت دورانی بالا	رولربیرینگ‌های استوانه‌ای کف گرد یا مجموعه رولرهای سوزنی کف گرد و قفسه یا واشر بدنه
H11		مجموعه رولرهای استوانه‌ای کف گرد و قفسه یا مجموعه رولرهای سوزنی کف گرد و قفسه یا واشر کف گرد
H10		مجموعه رولرهای استوانه‌ای کف گرد و قفسه یا مجموعه رولرهای سوزنی و قفسه
E8 G7	بار عادی	رولربیرینگ‌های کروی کف گرد
H7		بار مرکب : بار نقطه‌ای روی واشر بدنه رولربیرینگ‌های کروی کف گرد
K7		بار مرکب : بار محیطی روی واشر بدنه رولربیرینگ‌های کروی کف گرد

جدول ۳-۹ تلرانس‌های شفت و تداخل یا لقی احتمالی

120 180		180 250		250 315		315 400		400 500		500 630		630 800		800 1000	
0		0		0		0		0		0		0		0	
−25		−30		−35		−40		−45		−50		−75		−100	
−43	−18	−50	−20	−56	−21	−62	−22	−68	−23	−76	−26	−80	−5	−86	+14
	−34		−40		−44		−47		−51		−58		−47		−39
−68	−68	−79	−79	−88	−88	−98	−98	−108	−108	−120	−120	−130	−130	−146	−146
−14	+11	−15	+15	−17	+18	−18	+22	−20	+25	−22	+28	−24	+51	−26	+74
	−3		−2		−1		0		+1		+1		+15		+29
−32	−32	−35	−35	−40	−40	−43	−43	−47	−47	−51	−51	−56	−56	−62	−62
−14	+11	−15	+15	−17	+18	−18	+22	−20	+25	−22	+28	−24	+51	−26	+74
	−6		−5		−4		−3		−3		−4		+9		+24
−39	−39	−44	−44	−49	−49	−54	−54	−60	−60	−66	−66	74	−74	−82	−82
0	+25	0	+30	0	+35	0	+40	0	+45	0	+50	0	+75	0	+100
	+11		+13		+16		+18		+21		+23		+39		+55
−18	−18	−20	−20	−23	−23	−25	−25	−27	−27	−29	−29	−32	−32	−36	−36
0	+25	0	+30	0	+35	0	+40	0	+45	0	+50	0	+75	0	+100
	+8		+10		+13		+15		+17		+18		+33		+48
−25	−25	−29	−29	−32	−32	−36	−36	−40	−40	−44	−44	−50	−50	−56	−56
+7	+32	+7	+37	+7	+42	+7	+47	+7	+52						
	+18		+20		+23		+25		+28						
−11	−11	−13	−13	−16	−16	−18	−18	−20	−20						
+14	+39	+16	+46	+16	+51	+18	+58	+20	+65	+22	+72	+25	+100	+28	+128
	+22		+26		+29		+33		+37		+40		+58		+76
−11	−11	−13	−13	−16	−16	−18	−18	−20	−20	−22	−22	−25	−25	−28	−28
+9	+34	+10	+40	+11.5	+47	+12.5	+53	+13.5	+59	+14.5	+65	+16	+91	+18	+118
	+20		+23		+27		+32		+35		+38		+55		+73
−9	−9	−10	−10	−11.5	−12	−12.5	−13	−13.5	−14	−14.5	−15	−16	−16	−18	−18
+12.5	+38	+14.5	+45	+16	+51	+18	+58	+20	+65	+22	+72	+25	+100	+28	+128
	+21		+25		+29		+33		+37		+40		+58		+76
−12.5	−13	−14.5	−15	−16	−16	−18	−18	−20	−20	−22	−22	−25	−25	−28	−28
+21	+46	+24	+54	+27	+62	+29	+69	+32	+77	+29	+79	+32	+107	+36	+136
	+32		+37		+43		+47		+53		+53		+71		+91
+3	+3	+4	+4	+4	+4	+4	+4	+5	+5	0	0	0	0	0	0
+28	+53	+33	+63	+36	+71	+40	+80	+45	+90	+44	+94	+50	+125	+56	+156
	+36		+43		+49		+55		+62		+62		+83		+104
+3	+3	+4	+4	+4	+4	+4	+4	+5	+5	0	0	0	0	0	0
+33	+58	+37	+67	+43	+78	+46	+86	+50	+95	+55	+105	+62	+137	+70	+170
	+44		+50		+59		+64		+71		+78		+101		+125
+15	+15	+17	+17	+20	+20	+21	+21	+23	+23	+26	+26	+30	+30	+34	+34
+40	+65	+46	+76	+52	+87	+57	+97	+63	+108	+70	+120	+80	+155	+90	+190
	+48		+56		+65		+72		+80		+88		+113		+138
+15	+15	+17	+17	+20	+20	+21	+21	+23	+23	+26	+26	+30	+30	+34	+34

جدول ۳-۹ تلرانس‌های شفت و تداخل یا لقی احتمالی *(ادامه)*

ابعاد نامی شفت (mm)	بالاتر از	6	10	18	30	50	80
	تا	10	18	30	50	80	120
تلرانس سوراخ بیرینگ (تلرانس عادی PN) Δ_{dmp}(μm)		0	0	0	0	0	0
		−8	−8	−10	−12	−15	−20

کلاس تلرانسی	شفت	سوراخ بیرینگ	تلرانس شفت (μm) تداخل لقی (μm)											
f6			−13	−5	−16	−8	−20	−10	−25	−13	−30	−15	−36	−16
			−22	−11 −22	−27	−15 −27	−33	−17 −33	−41	−22 −41	−49	−26 −49	−58	−30 −58
g5			−5	+3 −2	−6	+2 −3	−7	+3 −3	−9	+3 −5	−10	+5 −4	−12	+8 −4
			−11	−11	−14	−14	−16	−16	−20	−20	−23	−23	−27	−27
g6			−5	+3 −3	−6	+2 −4	−7	+3 −5	−9	+3 −6	−10	+5 −6	−12	+8 −6
			−14	−14	−17	−17	−20	−20	−25	−25	−29	−29	−34	−34
h5			0	+8 +3	0	+8 +3	0	+10 +4	0	+12 +4	0	+15 +6	0	+20 +8
			−6	−6	−8	−8	−9	−9	−11	−11	−13	−13	−15	−15
h6			0	+8 +2	0	+8 +2	0	+10 +2	0	+12 +3	0	+15 +4	0	+20 +6
			−9	−9	−11	−11	−13	−13	−16	−16	−19	−19	−22	−22
j5			+4	+12 +7	+5	+13 +8	+5	+15 +9	+6	+18 +10	+6	+21 +12	+6	+26 +14
			−2	−2	−3	−3	−4	−4	−5	−5	−7	−7	−9	−9
j6			+7	+15 +9	+8	+16 +10	+9	+19 +11	+11	+23 +14	+12	+27 +16	+13	+33 +19
			−2	−2	−3	−3	−4	−4	−5	−5	−7	−7	−9	−9
js5			+3	+11 +6	+4	+12 +6	+4.5	15 +9	+5.5	+18 +10	−6.5	+22 +13	+7.5	+28 +16
			−3	−3	−4	−4	−4.5	−5	−5.5	−6	−6.5	−7	−7.5	−8
js6			+4.5	+13 +7	+5.5	+14 +8	+6.5	+17 +9	+8	+20 +11	+9.5	+25 +13	+11	+31 +17
			−4.5	−5	−5.5	−6	−6.5	−7	−8	−8	−9.5	−10	−11	−11
k5			+7	+15 +10	+9	+17 +12	+11	+21 +15	+13	+25 +17	+15	+30 +21	+18	+38 +26
			+1	+1	+1	+1	+2	+2	+2	+2	+2	+2	+3	+3
k6			+10	+18 +12	+12	+20 +14	+15	+25 +17	+18	+30 +21	+21	+36 +25	+25	+45 +31
			+1	+1	+1	+1	+2	+2	+2	+2	+2	+2	+3	+3
m5			+12	+20 +15	+15	+23 18	+17	+27 +21	+20	+32 +24	+24	+39 +30	+28	+48 +36
			+6	+6	+7	+7	+8	+8	+9	+9	+11	+11	+13	+13
m6			+15	+23 +17	+18	+26 +20	+21	+31 +23	+25	+37 +27	+30	+45 +34	+35	+55 +42
			+6	+6	+7	+7	+8	+8	+9	+9	+11	+11	+13	+13

جدول ۳-۱۰ تلرانس‌های نشیمنگاه و تداخل یا لقی احتمالی

180 250		250 315		315 400		400 500		500 630		630 800		800 1000		1000 1250	
0 −30		0 −35		0 −40		0 −45		0 −50		0 −75		0 −100		0 −125	
+172	−100 −134	+191	−110 −149	+214	−125 −168	+232	−135 −182	+255	−145 −199	+285	−160 −227	+310	−170 −250	+360	−195 −292
+100	−202	+110	−226	+125	−254	+135	−277	−145	−305	+160	−360	+170	−410	+195	−485
+96	−50 −75	+108	−56 −85	+119	−62 −94	+131	−68 −104	+146	−76 −116	+160	−80 −132	+176	−86 −149	+203	−98 −175
+50	−126	+56	−143	+62	−159	+68	−176	+76	−196	+80	−235	+86	−276	+98	−328
+44	−15 −35	+49	−17 −39	+54	−18 −43	+60	−20 −48	+66	−22 −54	+74	−24 −66	+82	−26 −78	+94	−28 −93
+15	−74	+17	−84	+18	−94	+20	−105	+22	−116	+24	−149	+26	−182	+28	−219
+61	−15 −40	+69	−17 −46	+75	−18 −50	+83	−20 −56	+92	−22 −62	+104	−24 −76	−116	−26 −89	+133	−28 −105
+15	−91	+17	−104	+18	−115	+20	−128	+22	−142	+24	−179	+26	−216	+28	−258
+29	0 −20	+32	0 −22	+36	0 −25	+40	0 −28	+44	0 −32	+50	0 −42	+56	0 −52	+66	0 −64
0	−59	0	−67	0	−76	0	−85	0	−94	0	−125	0	−156	0	−191
+46	0 −25	+52	0 −29	+57	0 −32	+63	0 −36	+70	0 −40	+80	0 −52	+90	0 −63	+105	0 −77
0	−76	0	−87	0	−97	0	−108	0	−120	0	−155	0	−190	0	−230
+72	0 −34	+81	0 −39	+89	0 −43	+97	0 −47	+110	0 −54	+125	0 −67	+140	0 −80	+165	0 −97
0	−102	0	−116	0	−129	0	−142	0	−160	0	−200	0	−240	0	−290
+22	+7 −13	+25	+7 −15	+29	+7 −18	+33	+7 −21								
−7	−52	−7	−60	−7	−69	−7	−78								
+30	+16 −9	+36	+16 −13	+39	+18 −14	+43	+20 −16								
−16	−60	−16	−71	−18	−79	−20	−88								
+14.5	+14.5 −5	+16	+16 −7	+18	+18 −6	+20	+20 −8	+22	+22 −10	+25	+25 −17	+28	+28 −24	+33	+33 −31
−14.5	−44.5	−16	−51	−18	−58	−20	−65	−22	−72	−25	−100	−28	−128	−33	−158
+23	+23 −2	+26	+26 −3	+28.5	+28.5 −3	+31.5	+31.5 −4	+35	+35 −5	+40	+40 −12	+45	+45 −18	+52	+52 −24
−23	−53	−26	−61	−28.5	−68.5	−31.5	−76.5	−35	−85	−40	−115	−45	−145	−52	−177
+5	+24 +4	+5	+27 +5	+7	+29 +4	+8	+32 +4	0	+44 +12	0	+50 +8	0	+56 +4	0	+66 +2
−24	−35	−27	−40	−29	−47	−32	−53	−44	−50	−50	−75	−56	−100	−66	−125
+13	+33 +8	+16	+36 +7	+17	+40 +8	+18	+45 +9	0	+70 +30	0	+80 +28	0	+90 +27	0	+105 +28
−33	−43	−36	−51	−40	−57	−45	−63	−70	−50	−80	−75	−90	−100	−105	−125

برای مشاهده محدوده‌های تلرانس بیشتر به کاتالوگ بیرینگ غلتشی مراجعه شود.

a برای نمونه سوراخ نشیمنگاه به ابعاد Ø100 M7

حداکثر ماده 0 +35 تداخل یا لقی وقتی اندازه قطر خارجی بیرینگ در محدوده بالایی و اندازه سوراخ نشیمنگاه در محدوده پایینی قرار گرفته باشد.

تلرانس نشیمنگاه +18 تداخل یا لقی احتمالی

حداقل ماده -35 -15 تداخل یا لقی وقتی اندازه قطر خارجی بیرینگ در محدوده پایینی و اندازه سوراخ نشیمنگاه در محدوده بالایی قرار گرفته باشد.

علامت مثبت در کنار اعداد به معنی تداخل است. علامت منفی در کنار اعداد به معنی لقی است.

جدول ۳-۱۰ تلرانس‌های نشیمنگاه و تداخل یا لقی احتمالی *(ادامه)*

اندازه نامی سوراخ نشیمنگاه (mm)	10 بالاتر از	18	30	50	80	120	150
	18 تا	30	50	80	120	150	180
تلرانسهای قطر خارجی بیرینگ (تلرانس عادی PN)	0	0	0	0	0	0	0
Δ_{Dmp}(μm)	−8	−9	−11	−13	−15	−18	−25

کلاس تلرانسی		تلرانس نشیمنگاه (μm)												
		تداخل یا لقی (μm)												
E8		+59	−32	+73	−40	+89	−50	+106	−60	+126	−72	+148	−85	+148	−85
			−44		+54		−67		−79		−85		−112		−114
		+32	−67	+40	−82	+50	−100	+60	−119	+72	−141	+85	−166	+85	−173
F7		+34	−16	+41	−20	+50	−25	+60	−30	+71	−36	+83	−43	+83	−43
			−25		−30		−37		−44		−53		−62		−64
		+16	−42	+20	−50	+25	−61	+30	−73	+36	−86	+43	−101	+43	−108
G6		+17	−6	+20	−7	+25	−9	+29	−10	+34	−12	+39	−14	+39	−14
			−12		−14		−18		−21		−24		−28		−31
		+6	−25	+7	−29	+9	−36	+10	−42	+12	−49	+14	−57	+14	−64
G7		+24	−6	+28	−7	+34	−9	+40	−10	+42	−12	+54	−14	+54	−14
			−15		−17		−21		−24		−29		−33		−36
		+6	−32	+7	−37	+9	−45	+10	−53	+12	−62	+14	−72	+14	−79
H6		+11	0	+13	0	+16	0	+19	0	+22	0	+25	0	+25	0
			−6		−7		−9		−11		−12		−14		−17
		0	−19	0	−22	0	−27	0	−32	0	−37	0	−43	0	−50
H7		+18	0	+21	0	+25	0	+30	0	+35	0	+40	0	+40	0
			−9		−10		−12		−14		−17		−19		−22
		0	−26	0	−30	0	−36	0	−43	0	−50	0	−58	0	−65
H8		+27	0	+33	0	+39	0	+46	0	+54	0	+63	0	+63	0
			−12		−14		−17		−20		−23		−27		−29
		0	−35	0	−42	0	−50	0	−59	0	−69	0	−81	0	−88
J6		+6	+5	+8	+5	+10	+6	+13	+6	+16	+6	+18	+7	+18	+7
			−1		−2		−3		−5		−6		−7		−10
		−5	−14	−5	−17	−6	−21	−6	−26	−6	−31	−7	−36	−7	−43
J7		+10	+8	+12	+9	+14	+11	+18	+12	+22	+13	+26	+14	+26	+14
			−1		−1		−1		−2		−4		−5		−8
		−8	−18	−9	−21	−11	−25	−12	−31	−13	−37	−14	−44	−14	−51
JS6		+5.5	+5.5	+6.5	+6.5	+8	+8	+9.5	+9.5	+11	+11	+12.5	+12.5	+12.5	+12.5
			−1		0		−1		0		−1		−1		−3
		−5.5	−13.5	−6.5	−15.5	−8	−19	−9.5	−22.5	−11	−26	−12.5	−30.5	−12.5	−37.5
JS7		+9	+9	+10.5	+10.5	+12.5	+12.5	+15	+15	+17.5	+17.5	+20	+20	+20	+20
			0		+1		+1		+1		+1		−1		−1
		−9	−17	−10.5	−19.5	−12.5	−23.5	−15	−28	−17.5	−32.5	−20	−38	−20	−45
K6		+2	+9	+2	+11	+3	+13	+4	+15	+4	+18	+4	+21	+4	+21
			+3		+4		+4		+4		+6		+7		+4
		−9	−10	−11	−11	−13	−14	−15	−17	−18	−19	−21	−22	−21	−29
K7		+6	+12	+6	+15	+7	+18	+9	+21	+10	+25	+12	+28	+12	+28
			+3		+5		+6		+7		+8		+9		+6
		−12	−14	−15	−15	−18	−18	−21	−22	−25	−25	−28	−30	−28	−37

تأثیر صافی سطح

وقتی یک استوانه با تلرانس مثبت u در قطر خود، داخل یک سوراخ استوانه‌ای جا زده می‌شود، سطح داخل سوراخ صاف‌تر می‌گردد. هر چه سطح خشن‌تر باشد، میزان صاف شدن بیشتر خواهد شد. صاف شدن سطح باعث کاهش تداخل می‌شود. میزان صاف شدن R_G به میزان 75% – 70 عمق میانگین زبری R_z شفت یا سوراخ بدنه است. میزان صاف شدن سطوح سخت و با دقت سنگ خورده آنقدر کم است که قابل صرف‌نظر است. صاف‌شدن سطح R_G قطر قطعات دربرگیرندهٔ بیرینگ، ارائه‌دهندهٔ تداخل مؤثر است :

$$R_G \approx 2\times 0.7 R_Z \qquad (۳-۵)$$

در جایی که عمق ناصافی سطوح قابل اندازه‌گیری نیست، می‌توان از مقادیر تعیین شده در جدول ۳-۱۱ استفاده کرد.

تأثیر دمای کاری

در صورتیکه قطعات در هم جا زده شده از موادی با ضریب انبساط حرارتی مشابهی ساخته شده باشند، تغییر دما، میزان تداخل اصلی را تغییر نمی‌دهد. اما وقتی رینگ خارجی از فولاد و بدنه از مواد سبک ساخته شده باشند، تداخل کاهش می‌یابد، در نتیجه :

$$\Delta_u = (\alpha_{AL} - \alpha_{Fe}) t_u D \times 1000 = 0.012 t_u D \quad (\mu m) \qquad (۳-۶)$$

که در آن :

Δ_u کاهش تداخل (µm)،

α_{Al} ضریب انبساط مواد سبک = 0.024×10^{-3} (k^{-1})،

α_{Fe} ضریب انبساط فولاد بیرینگ غلتشی 0.012×10^{-3} (k^{-1})،

t_u تفاوت بین دمای کاری و دمای محیط (k) و

D قطر خارجی بیرینگ (mm)،

با در نظر گرفتن کاهش تداخل ناشی از صاف شدن R_G و در بعضی موارد کاهش تداخل Δ_u با یک نشیمنگاه از جنس فلزات سبک به خاطر اختلاف انبساط حرارتی، تداخل مؤثر عملی برابر خواهد بود با :

$$u = \text{تداخل تئوری} - RG - \Delta_u \quad (\mu m) \qquad (۳-۷)$$

جدول ۳-۱۱ صافی سطح R_G برای جازنی سفت (پرسی)

تغییرات قطر قطعه در تماس R_z (µm)	مقدار ناصافی میانگین R_a (µm)	عمق ناصافی متوسط R_z (µm)	سطح نشیمن قطعه در تماس
1	0.1	0.63	بسیار ظریف سنگ خورده
2.5	0.2	1.6	ظریف سنگ خورده
5	0.4	2.5 – 4	بسیار ظریف تراش خورده
7	0.8	4 – 6.3	ظریف تراش خورده

محاسبه تنش‌های ناشی از تداخل

فشار در محل جفت شدن قطعات و تنش‌های محیطی در رینگ‌های بیرینگ را می‌توان به وسیلهٔ مقدار تداخل u محاسبه کرد. برای محاسبات، سطح مقطع رینگ‌های بیرینگ به‌صورت مستطیلی با سطح مقطع معادل فرض می‌شود (شکل‌های ۳-۲۰ و ۳-۲۱).

در شکل ۳-۲۲ نسبت d/h و در شکل ۳-۲۳ نسبت H/D برای اکثر بیرینگ‌های غلتشی که امروزه به کار می‌روند آورده شده است. فشار σ_r در محل اتصال به وسیلهٔ تداخل u و نسبت‌های d/h و H/D، به‌صورت زیر محاسبه می‌شود :

(۳-۸) رینگ داخلی روی محور توپر

$$\sigma_r = u \frac{E}{2000\, d}\left[1-\left(\frac{d}{h}\right)^2\right] \quad (N/mm^2)$$

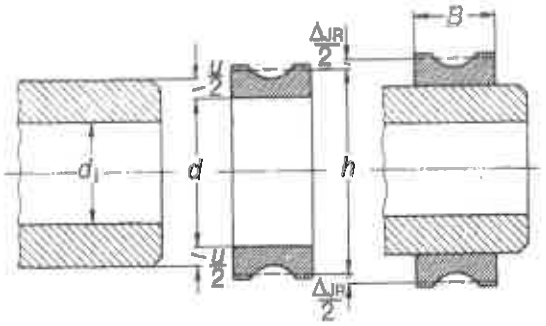
(۳-۹) رینگ خارجی در نشیمنگاه فولادی یکپارچه

$$\sigma_r = u \frac{E}{2000\, D}\left[1-\left(\frac{H}{D}\right)^2\right] \quad (N/mm^2)$$

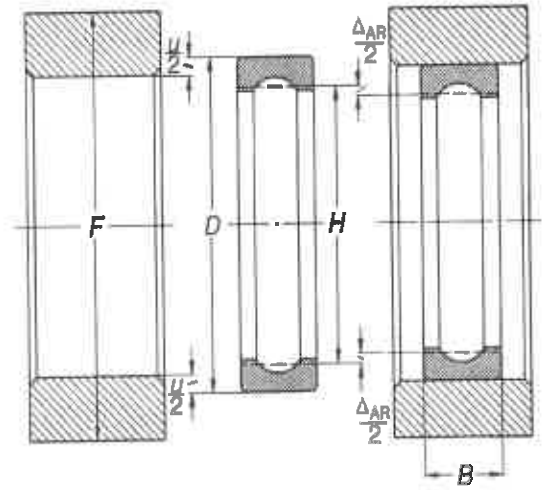
مدول الاستیسیته فولاد E برابر با $208\ 000\ N/mm^2$ در نظر گرفته می‌شود. نیروی F_H که با جابه‌جایی محور در رینگی که پرسی جا زده شده باشد مخالفت می‌کند، به شکل زیر محاسبه می‌شود :

(۳-۱۰) رینگ داخلی $F_H = \sigma_r\, d\pi B \mu_H$

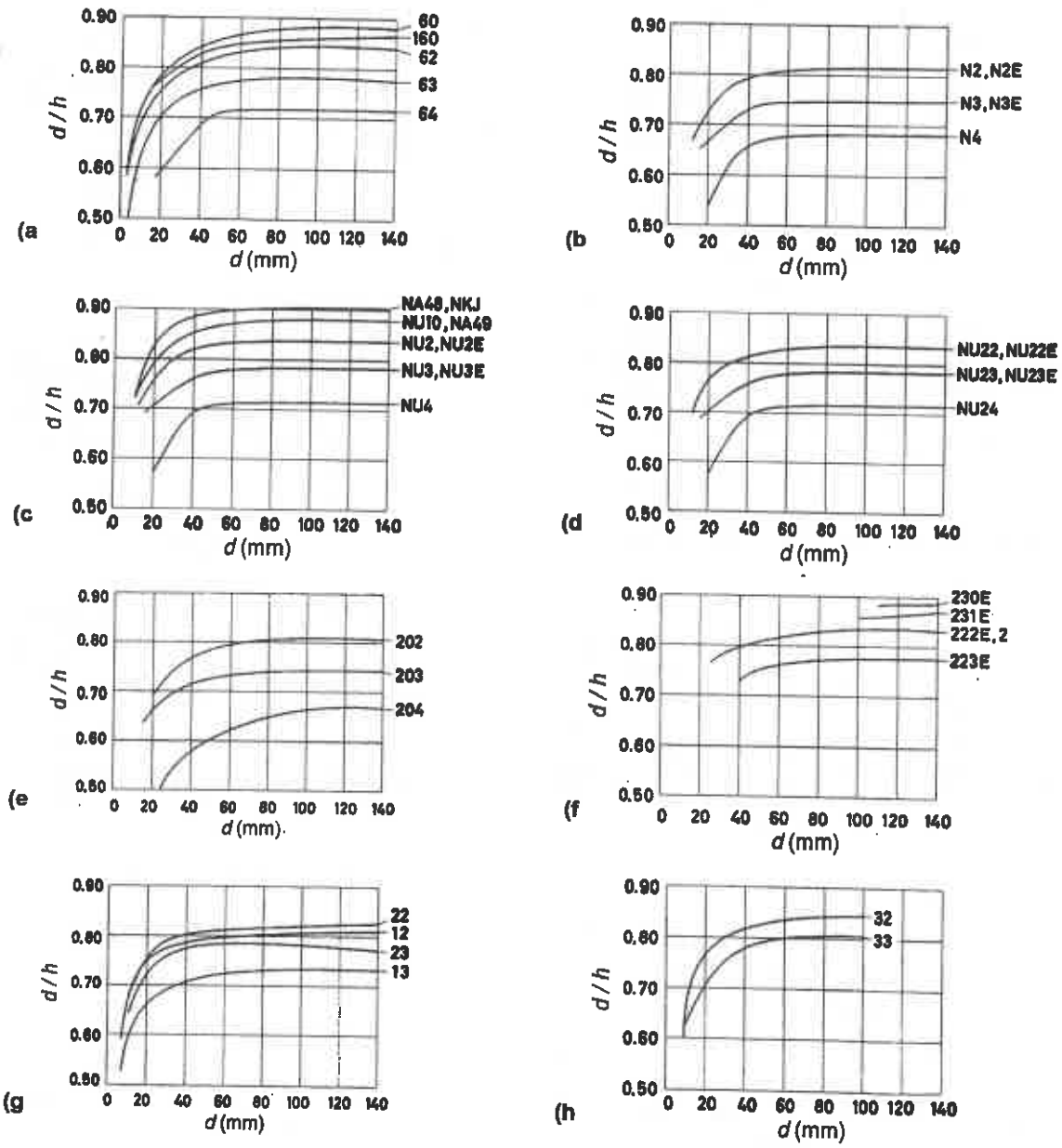
(۳-۱۱) رینگ خارجی $F_H = \sigma_r\, D\pi B \mu_H$



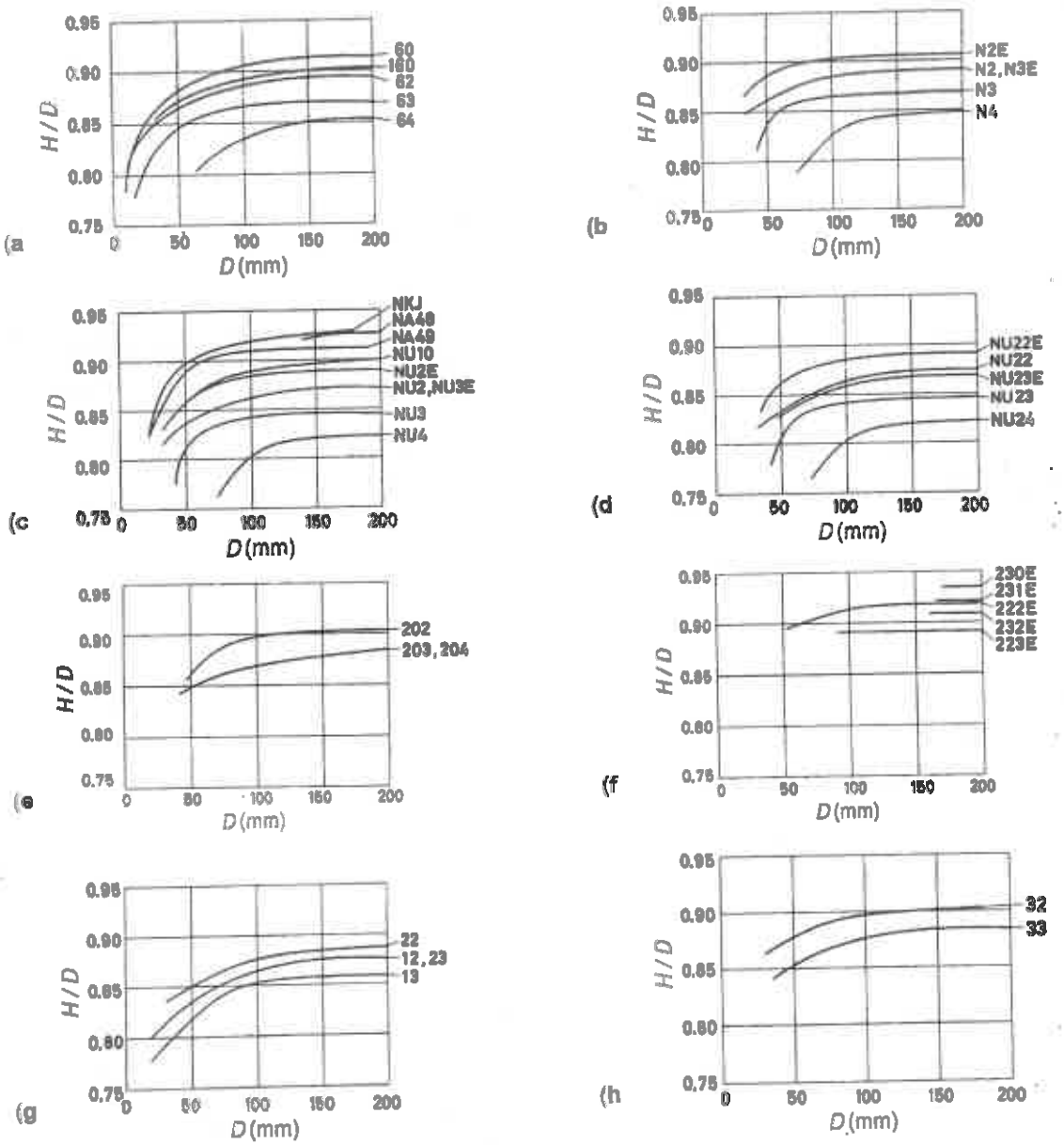
شکل ۳-۲۰ قطر متوسط شانه رینگ داخلی: u = تداخل مؤثر نسبت به قطر (µm)، d_1 = قطر داخلی شفت توخالی (mm)، d = قطر نامی شفت و سوراخ رینگ داخلی (mm)، B = پهنای رینگ داخلی (mm)، Δ_{IR} = انبساط قطر شانه رینگ داخلی (µm)



شکل ۳-۲۱ قطرمتوسط شانه قطر خارجی : u = تداخل مؤثر نسبت به قطر (µm)، F = قطرخارجی نشیمنگاه (mm)، H = قطر کاهش‌یافتهٔ شانهٔ رینگ خارجی (mm)، B = پهنای رینگ خارجی (mm)، Δ_{AR} = انقباض قطر کاهش یافتهٔ شانهٔ رینگ خارجی (µm)



شکل ۳-۲۲ نسبت d/h رینگ داخلی: a) بلبیرینگ‌های شیار عمیق، b) رولربیرینگ‌های استوانه‌ای، رینگ داخلی با دو لبه؛ c) رولربیرینگ‌های استوانه‌ای، رینگ خارجی با دو لبه، رولربیرینگ‌های سوزنی، d) رولربیرینگ‌های استوانه‌ای، رینگ خارجی با دو لبه، e) رولربیرینگ‌های بشکه‌ای، f) رولربیرینگ‌های کروی از نوع E، g) بلبیرینگ‌های خود تنظیم، h) بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای، دو ردیفه



شکل ۳-۲۳ نسبت H/D رینگ‌خارجی : a) بلبرینگ‌های شیار عمیق، b) رولربیرینگ‌های استوانه‌ای، رینگ داخلی با دو لبه، c) رولربیرینگ‌های استوانه‌ای، رینگ خارجی با دو لبه، رولربیرینگ‌های سوزنی، d) رولربیرینگ‌های استوانه‌ای، رینگ خارجی‌با دو لبه، e) رولربیرینگ‌های شبکه‌ای، f) رولربیرینگ‌های کروی از نوع E، g) بلبیرینگ‌های خود تنظیم، h) بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای، دو ردیفه

ضریب اصطکاک μ_H به کیفیت سطح بستگی دارد. مقادیر اندازه‌گیری شده، ضریب اصطکاک را $\mu_H = 0.15 - 0.25$ نشان می‌دهد. در محاسبات انطباق پرسی، پیشنهاد می‌شود برای جلوگیری از جابه‌جایی محوری، مقدار μ_H، 0.1 در نظر گرفته شود. اگر درجهٔ بالاتری از ایمنی مورد نیاز باشد، می‌توان μ_H را 0.05 در نظر گرفت. بالاترین میزان تنش‌های مماسی در سوراخ رینگ داخلی که پرسی جا زده باشد ایجاد می‌شود (تنش‌های کششی). برای رینگ داخلی نصب شده روی شفت توپر فولادی داریم :

$$\sigma_t = u\frac{E}{2000\,d}\left[1+\left(\frac{d}{h}\right)^2\right] \quad (N/mm^2) \qquad (۱۲-۳)$$

حتی برای انطباقات نسبتاً پرسی لیست شده در جدول ۳-۹، تنش‌های مماسی در رینگ‌ها آنقدر کوچک هستند که اگر رینگ‌ها درست نصب شوند *نخواهند* شکست.

کاهش لقی شعاعی ناشی از جازنی پرسی بیرینگ

لقی یک بیرینگ غلتشی نصب *نشده*، هنگام جازنی پرسی به خاطر انبساط سطح تماس رینگ داخلی و انقباض سطح تماس رینگ خارجی کاهش می‌یابد. انبساط رینگ داخلی را شاید بتوان با Δ_{JR} (شکل ۳-۲۰) و انقباض سطح تماس رینگ خارجی را با (شکل ۳-۲۱) تخمین زد. روابط زیر در اکثر موارد کاربردی مهم صادق هستند :

(۱۳-۳) رینگ داخلی نصب شده روی شفت فولادی- توپر

$$\Delta_{JR} = u\left(\frac{d}{h}\right) \quad (\mu m)$$

(۱۴-۳) رینگ داخلی نصب شده روی شفت فولادی- توخالی

$$\Delta_{JR} = u\left(\frac{d}{h}\right)\left[\frac{(d/d_i)^2-1}{(d/d_i)^2-(d/h)^2}\right] \quad (\mu m)$$

(۱۵-۳) رینگ خارجی نصب شده داخل نشیمنگاه فولادی یکپارچه

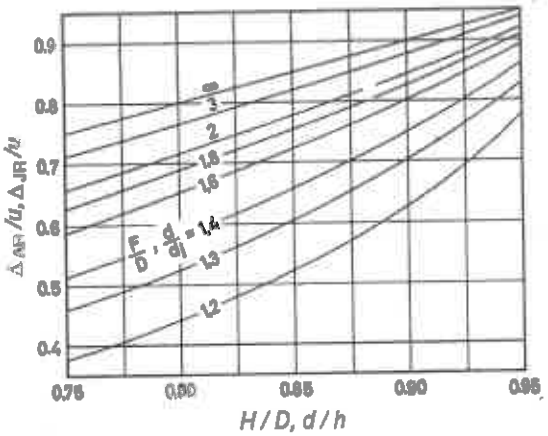
$$\Delta_{AR} = u\left(\frac{H}{D}\right) \quad (\mu m)$$

(۱۶-۳) رینگ خارجی نصب شده داخل نشیمنگاه با دیواره نازک

$$\Delta_{AR} = u\left(\frac{H}{D}\right)\left[\frac{(F/D)^2-1}{(F/D)^2-(H/D)^2}\right] \quad (\mu m)$$

برای محاسبه Δ_{JR} و Δ_{AR} به وسیله معادلات ۳-۱۳ تا ۳-۱۶، نسبت‌های d/h و D/H را می‌توان از شکل‌های ۳-۲۲ و ۳-۲۳ به‌دست آورد. مقدار Δ_{JR} و Δ_{AR} را با یک روش ساده و با استفاده از نوموگرام موجود در شکل ۳-۲۴ که بر پایه معادلات ۳-۱۳ تا ۳-۱۶ رسم شده است، می‌توان به دست آورد: برای محاسبه انبساط سطح تماس در رینگ داخلی Δ_{gR}، نسبت d/di (شکل ۳-۲۰) محاسبه‌شده‌است و نسبت d/h نیز از شکل ۳-۲۴ بدست می‌آید.

شکل ۳-۲۴ نمودار نسبت Δ_{JR}/u به مقدار نسبت d/h برای مقدار محاسبه شده‌ی d/d_i است. با ضرب Δ_{JR}/u در u مقدار Δ_{JR} به دست می‌آید. انقباض سطح تماس رینگ خارجی Δ_{AR} نیز از شکل ۳-۲۴ با وارد کردن نسبت H/D که از شکل ۳-۲۳ بدست آمده و محاسبه نسبت Δ_{AR}/u برای مقدار معادل F/D بدست‌می‌آید. با ضرب Δ_{AR}/u در u مقدار Δ_{AR} به دست می‌آید.



شکل ۳-۲۴ انبساط سطح تماس رینگ داخلی مطابق معادله ۳-۱۴ و انقباض سطح تماس رینگ خارجی مطابق معادله ۳-۱۶

برای محاسبه Δ_{AR} مربوط به رینگ خارجی جا زده شده در یک نشیمنگاه چدنی یا از فلزات سبک، Δ_{AR}/u مربوط به نشیمنگاه فولادی را به‌دست آورده و سپس برای چدن 0.15 و برای فلزات سبک 0.25 از مقدار به دست آمده به دلیل اختلاف مدول الاستیسیته کم می‌کنیم. Δ_{AR} با ضرب $(\Delta_{AR}/u - 0.15)$ یا $(\Delta_{AR}/u - 0.25)$ بر u به دست خواهد آمد.

کاهش لقی شعاعی برای چندمان بیرینگ در یک چرخ جرثقیل

رولربیرینگ کروی از نوع

100 mm × 180 mm × 46 mm NU2220E

شفت فولادی سنگ خورده ظریف d = 100 mm, k6

نشیمنگاه فولادی تراش خورده ظریف D = 180 mm, N7

قطر خارجی نشیمنگاه	F = 250 mm
رینگ داخلی	رینگ خارجی
تداخل احتمالی	
جدول (۹-۳) +31 µm	(کاتالوگ‌ها) +30 µm
کاهش تداخل RG (جدول ۱۱-۳)	
2.5 µm	7 µm
تداخل مؤثر u (معادله ۷-۳)	بنابراین
+28.5 µm	+23 µm
نسبت ضخامت دیواره	
(شکل ۳-۲۲) $d/h = 0.84$	(شکل ۳-۲۲) $H/D = 0.875$
	$F/D = 250/180 \approx 1.4$
کاهش لقی شعاعی (شکل ۳-۲۴)	
$\Delta_{JR}/u = 0.84$	$\Delta_{AR}/u = 0.70$
	کاهش برای چدن = 0.15
$\Delta_{JR} = u\Delta_{JR}/u$	$\Delta_{AR} = u(\Delta_{AR}/u - 0.15)$
$\Delta_{JR} = 28.5 \times 0.84 \approx 24$ µm	$\Delta_{AR} = 23(0.70 - 0.15) \approx 13$ µm

در نتیجه کاهش لقی برابر است با 24 + 13 = 37 µm

بنابراین باید لقی شعاعی معمولی CN = 50 – 85 µm برای رولربیرینگ استوانه‌ای NU2220E انتخاب شود (به کاتالوگ بیرینگ غلتشی مراجعه شود).

۳-۹ لقی شعاعی قبل از جازنی و هنگام کارکرد

در بیرینگ‌های غلتشی باید بین لقی شعاعی بیرینگ مونتاژ نشده و لقی شعاعی بیرینگ جازده شده (در دمای کاری) یک فرق پایه‌ای قایل شد. لقی شعاعی مورد نیاز هنگام کار ما را وادار به محاسبه لقی صحیح می‌کند. لقی شعاعی یک بیرینگ مونتاژ نشده (مقادیر

لقی در جداول و کاتالوگ‌های بیرینگ‌های غلتشی آورده شده است)، با جازنی و اعمال شرایط کاری، تغییر می‌کند همانطور که در بخش ۲-۲-۲ توضیح داده شد، قطعات مختلف بیرینگ غلتشی هنگام کار دماهای مختلفی پیدا می‌کنند. در شرایط ثابت، معمولاً درجه حرارت رینگ داخلی بیشتر از رینگ خارجی است. از این رو، رینگ داخلی بیشتر از رینگ خارجی منبسط می‌شود و باعث کاهش لقی شعاعی می‌شود. این کاهش لقی شعاعی Δ_{GrT} را می‌توان با معادله زیر تخمین زد :

$$\Delta_{GrT} = \Delta_T \alpha (d+D)/2 \quad (mm) \qquad (۳-۱۷)$$

که در آن Δ_T اختلاف دما و $\alpha = 0.000\ 011\ K^{-1}$ ضریب انبساط خطی فولاد است. در شرایط عادی کاری، اختلاف دما بین دو رینگ تقریباً 10 K – 5 است و به استثنای موارد ویژه، امکان دارد در دماهای کاری بالاتر و شرایط دفع حرارت *نامناسب* تا 20 K – 15 افزایش یابد. یک جریان حرارتی خارجی بسته به اینکه از شفت یا از نشیمنگاه منتقل شود امکان دارد تأثیرات شدیدتری بر لقی شعاعی بگذارد. تحت شرایط ناسازگار، امکان دارد بیرینگ‌ها در شتابگیری‌های سریع و رسیدن به سرعت‌های بالا گیر کنند. اما وقتی بیرینگ‌ها شتاب گرفته و به سرعت‌های بالا برسند، به شکل مناسبی کار خواهند کرد. این به آن خاطر است که قطعات در تماس و رینگ‌های بیرینگ در شتاب‌گیری تدریجی، به یک میزان مساوی گرم می‌شوند و درنتیجه مقدار Δ_{GrT} پایین باقی می‌ماند. شتاب‌گیری سریع دمای بالاتری ایجاد کرده و اختلاف انبساط بیشتری بین رینگ داخلی و خارجی تولید می‌کند. اینگونه تغییرات دما را باید در محاسبه لقی شعاعی بیرینگ مونتاژ *نشده* در نظر گرفت. در نتیجه، لقی شعاعی در دمای کاری امکان دارد از حداقل مقدار از پیش محاسبه شده که به عنوان مقدار ایده‌آل بود فراتر رود.

در بخش ۳-۸-۴ خواهیم دید که جازنی پرسی نیز باعث کاهش لقی شعاعی می‌شود. برای تضمین به دست آوردن لقی شعاعی مناسب در شرایط کاری، لقی شعاعی بیرینگ مونتاژ *نشده* باید مناسب باشد. لقی شعاعی معمولی CN بیرینگ‌های غلتشی برای تأثیرگذاری دما و جازنی بیرینگ مناسب است. در گروه لقی شعاعی معمولی CN، تغییرات لقی شعاعی ناشی از جازنی‌های معمولی باید در نظر گرفته شود. محل‌های نشیمن بیرینگ که تحت تأثیر حرارت خارجی زیاد قرار نگرفته باشند می‌توانند تلرانس‌های زیر را داشته باشند :

محل نشیمن	شفت	بدنه
بلبیرینگ‌ها	j5 تا k5	J6
رولربیرینگ‌ها	K5 تا m5	K6
رولربیرینگ‌های سوزنی	h6 تا p6	H7 تا P7

اگر تلرانس‌های جازنی سفت‌تری انتخاب شود یا انتظار تأثیر حرارت خارجی را داشته باشیم، تغییرات لقی شعاعی باید مطابق بخش ۳-۸-۴ محاسبه شود. این امکان دارد ما را به لقی شعاعی بزرگتر از حد عادی راهنمایی کند، یا برعکس در مواردی که حرارت خارجی بر رینگ داخلی اعمال می‌شود، به مقادیر کوچکتر از حد معمول.

وقتی تمام این تأثیرات را در نظر بگیریم، به لقی کاری دست خواهیم یافت که معادل مقداری است که برای

جازنی و کاربرد عادی مناسب است. گروه‌های لقی شعاعی بزرگ C3، C4 و C5 فقط برای بعضی چیدمان‌های بیرینگ به کار می‌رود و نیازی به آنها نیست زیرا بیرینگ غلتشی باید لقی شعاعی بزرگتری در شرایط کاری داشته باشد، اما به این خاطر که لقی اصلی با در نظر گرفتن تأثیر دما و جازنی کاهش یافته است، عموماً لقی شعاعی رولربیرینگ‌های شعاعی بزرگتر از لقی شعاعی بلبیرینگ‌های شعاعی است زیرا الاستیسیته رولربیرینگ‌ها کمتر است، بنابراین، هنگام وجود اختلاف دما بین رینگ‌ها خطر ایجاد بارهای اولیه شعاعی مضر بیشتر است. مواردی وجود دارد که به خاطر نیاز به مهار دقیق، باید از لقی شعاعی بزرگ اجتناب کرد. در این صورت باید بیرینگ‌هایی با گروه لقی C2 (لقی شعاعی کوچکتر از معمول) را انتخاب کرد و یا از یک چیدمان بیرینگ قابل تنظیم استفاده کرد.

لقی شعاعی را اگر سوراخ رینگ داخلی بیرینگ مخروطی باشد، می‌توان تنظیم کرد. اگر رینگ داخلی اینگونه بیرینگ‌ها روی یک شفت مخروطی یا یک بوش مخروطی جا زده شود، رینگ داخلی منبسط می‌شود. در نتیجه، لقی شعاعی بیرینگ می‌تواند در محدوده مشخصی تغییر کند (جدول‌های ۴-۲ و ۴-۳).

بلبیرینگ‌های شیار عمیق، بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای، رولربیرینگ‌های کروی کف‌گرد (بخش ۳-۱-۲) را می‌توان در جهت محوری تنظیم کرد. هنگام تنظیم لقی محوری، لقی شعاعی را هم می‌توان روی میزان موردنیاز تنظیم کرد. در اکثر موارد، بیرینگ‌ها به شکلی چیده می‌شوند که تغییرات طولی وابسته به دما در شفت، لقی بیرینگ را افزایش دهند تا از گیرکردن جلوگیری شود. معمولاً واشرهای فنری برای تنظیم بیرینگ به کار می‌رود (شکل ۴-۱۲). بیرینگ‌هایی که در معرض ارتعاش در سرعت‌های خیلی پایین یا در حرکات نوسانی هستند را معمولاً بدون لقی یا با بار اولیه سبکی مونتاژ می‌کنند. این کار باعث جلوگیری از گود شدن محل تماس‌ساچمه‌ها با رولرها با رینگ‌ها می‌شود (شکل ۵-۱۸).

فصل ٤

طراحی محل نصب بیرینگ

۴-۱ ثابت کردن رینگ‌های بیرینگ

همانگونه که در بخش ۳-۸ توضیح داده شد، با پرسی جا زدن، از حرکت در جهت شعاعی و محیطی رینگ‌های بیرینگ‌های غلتشی جلوگیری می‌شود. برای اجتناب از حرکات عرضی، باید رینگ‌ها در راستای محوری از هر دو جهت ثابت شوند و فقط در بعضی موارد با پرسی جا زدن به این خواسته می‌توان رسید.

۴-۱-۱ جهت‌های ثابت کردن

قبلاً در مورد بیرینگ‌های ثابت، بیرینگ‌های شناور و مجموعه بیرینگ‌های قابل تنظیم و شناور توضیح داده شد (بخش ۳-۱). عموماً بیرینگ‌های ثابت باید بارهای محوری را تحمل کنند. ثابت کردن با ایجاد لبه‌هایی روی شفت و نشیمنگاه، استفاده از رینگ یا خار فنری، درپوش‌ها و صفحات انتهایی، مهره‌ها و غیره بسته به بزرگی نیروهای محوری انجام می‌شود. یک بیرینگ شناور باید فقط نیروهای محوری کوچکی که ناشی از تغییرات طولی شفت است را تحمل کند، بنابراین نشیمنگاه بیرینگ، فقط باید از جابه‌جایی عرضی رینگ جلوگیری کند. براحتی با پرسی جا زدن می‌توان به این هدف دست یافت. در بیرینگ‌های خود نگهدار غیرقابل دمونتاژ بهتر است که رینگ گردان را با پرسی جازدن در محل‌خود نصب‌کرد (جدول‌های ۳-۷ تا ۳-۱۰)، در این حالت رینگ خارجی به وسیله اجزاء غلتنده ثابت نگه داشته می‌شود.

مجموعه بیرینگ‌های قابل تنظیم و شناور فقط در یک جهت می‌توانند بارهای محوری را تحمل کنند و این مسئله در بیرینگ‌های کف‌گرد یک طرفه نیز صادق است. نیروهای محوری با ایجاد شانه‌های برجسته روی شفت یا نشیمنگاه، رینگ‌های فنری، درپوش‌ها و غیره قابل جذب می‌باشند.

علامت ■ و □ به کار رفته در شکل‌های ۴-۱ تا ۴-۳ تعیین‌کننده عملکرد ثابت کردن در جهت محوری در کاربردهای مختلف و انواع مختلف بیرینگ‌ها است. علامت ■ تعیین‌کننده ثابت کردن برای تحمل نیروهای قابل توجه است.

علامت □ تعیین‌کننده نیاز به ثابت‌کردن تنها برای جلوگیری از جابه‌جایی محوری رینگ است.

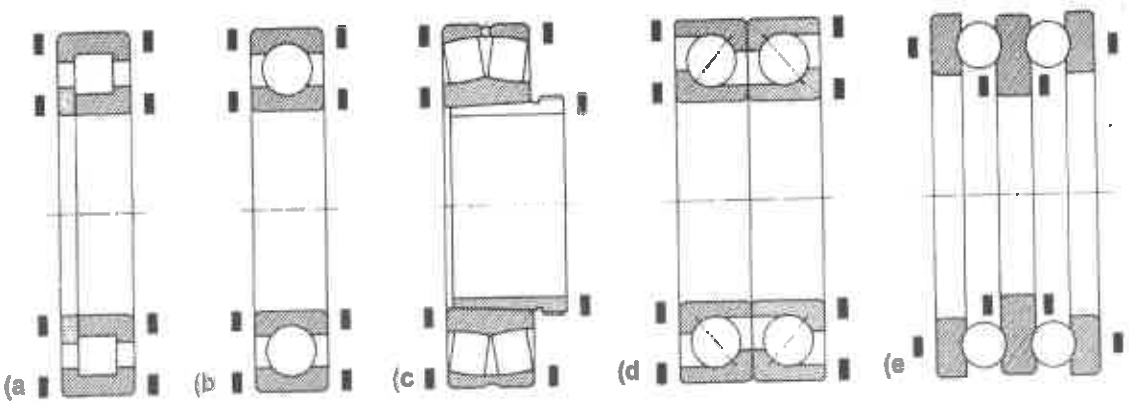
بیرینگ‌های ثابت

شکل ۴-۱ نشاندهنده تعدادی از انواع بیرینگ‌هایی است که به‌عنوان بیرینگ‌های ثابت و تحت نیروهای محوری اعمالی از دو جهت به‌کار می‌روند. در این موارد هر دو رینگ باید از هر دو جهت مهار شده باشد.

رولربیرینگ استوانه‌ای طرح NUP (شکل ۴-۱۱a) و بلبیرینگ‌های شیار عمیق (شکل ۴-۱۱b) باید نیروهای محوری را در هر دو جهت انتقال دهند، از این رو باید رینگ‌های داخلی و رینگ‌های خارجی در هر دو جهت محوری ثابت شوند. همچنین، رولربیرینگ کروی نشان داده شده در شکل ۴-۱۱c به عنوان بیرینگ ثابت، بارهای محوری با جهات متغیر را نیز انتقال می‌دهد. در این حالت رینگ داخلی به وسیله غلاف بیرون‌کش در جای خود ثابت می‌شود.

یک جفت از بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای نشانداده شده در شکل ۴-۱۱d تشکیل یک مجموعه بیرینگ ثابت را می‌دهند. دو بیرینگ یک ردیفه باید هنگام مونتاژ نسبت به هم تنظیم شوند (بخش ۳-۱-۳ و شکل ۱-۱۳). اجزاء قابل تنظیم مثل مهره‌ها، برای ثابت کردن بیرینگ‌ها روی شفت به کار می‌روند. بلبیرینگ کف‌گرد دو ردیفه نیز به‌عنوان یک مجموعه بیرینگ فشرده قابل توجه است (شکل ۴-۱۱e).

واشر شفت از هر دو جهت محوری در کنار بیرینگ نصب شده و دو واشر نشیمنگاه هر کدام از یک طرف ثابت می‌شوند. مهار رضایت‌بخش مجموعه ساچمه‌ها در شیارها، نیازمند مونتاژ بدون لقی بیرینگ است که با تنظیم واشرهای بدنه می‌توان به این هدف دست یافت.



شکل ۴-۱ مهار محوری بیرینگ‌های ثابت

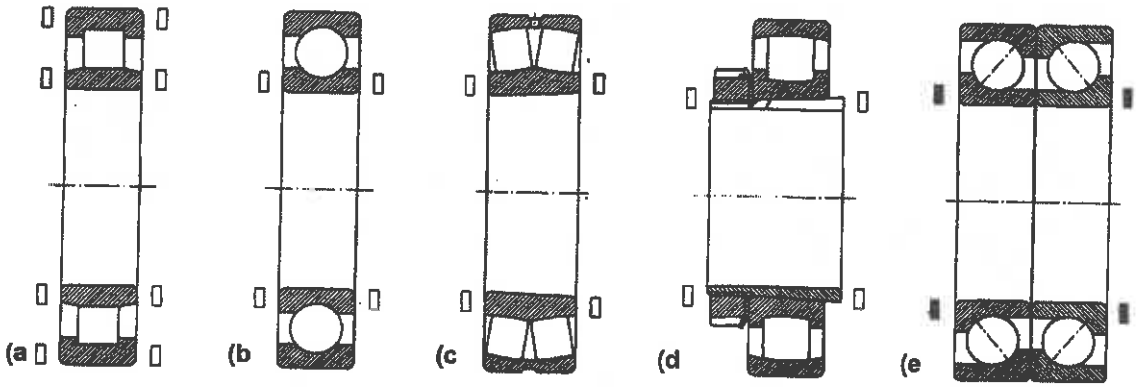
بیرینگ‌های شناور

در رولربیرینگ‌های استوانه‌ای طرح NU (شکل ۴-۱۲a) رینگ داخلی می‌تواند نسبت به مجموعه رولرها جابه‌جا شود.

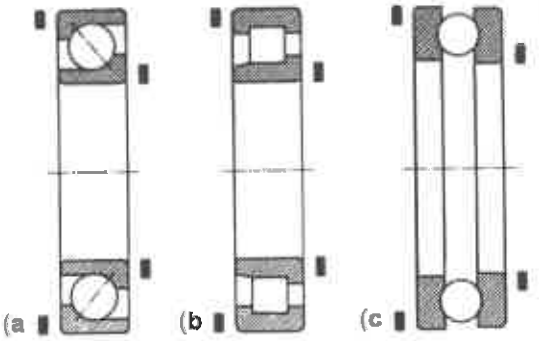
از این رو باید رینگ‌های داخلی و خارجی را از هر دو جهت محوری مهار کرد. فقط رینگ داخلی بلبیرینگ‌های شیار عمیق (شکل ۴-۱۲b) ثابت می‌شود، رینگ خارجی خود به خود روی ساچمه‌ها در جهت محوری مهار می‌شود. این شرایط برای رینگ خارجی رولربیرینگ کروی نشان داده شده در شکل ۴-۱۲c و رینگ خارجی رولربیرینگ بشکه‌ای (شکل ۴-۱۲d) نیز صادق است. رینگ داخلی نصب شده روی شفت، با یا بدون بوش واسطه‌ای برای مهارکردن بیرینگ در برابر جابه‌جایی عرضی استفاده می‌شود. شکل ۴-۱۲e نشاندهنده یک جفت تنظیم شده از بلبیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای یک ردیفه است. مطابق شکل‌های ۴-۱۲b تا d اجزا غلتنده رینگ‌های خارجی را مهار می‌کنند. رینگ‌های داخلی به همدیگر متصل شده‌اند بنابراین *نمی‌توان* آنها را به صورت جداگانه تحت اعمال مولفه محوری نیروهای شعاعی قرار دهیم.

چیدمان‌های بیرینگ قابل تنظیم و شناور

بلبیرینگ با تماس زاویه‌ای در شکل ۴-۱۳a نیروهای محوری را فقط در یک جهت انتقال می‌دهد، از این رو، رینگ‌های بیرینگ فقط در یک جهت نیاز به مهار دارند که این جهت به راستای اعمال نیرو بستگی دارد. دیگر بیرینگی که در جهت عکس اولی قرار می‌گیرد برای تحمل نیروهای در جهت عکس موردنیاز است. در رولربیرینگ استوانه‌ای طرح NJ (شکل ۴-۱۳b) شرایط مشابهی وجود دارد. غلتش رضایت‌بخش ساچمه‌ها در بلبیرینگ کف‌گرد نشانداده شده در شکل ۴-۱۳c فقط در یک بیرینگ بدون لقی به‌دست می‌آید. در نتیجه، اگر شفت افقی باشد، باید برای مهار این بیرینگ از یک بیرینگ قابل تنظیم دیگر استفاده شود. این مسئله برای سرعت‌های بالا اهمیت ویژه‌ای دارد. اگر شفت عمودی باشد و بار به نحوی باشد که بیرینگ را در تمامی شرایط بدون لقی حفظ کند، نیازی به بیرینگ مهارکننده *نیست*.



شکل ۴-۲ مهار محوری بیرینگ‌های شناور

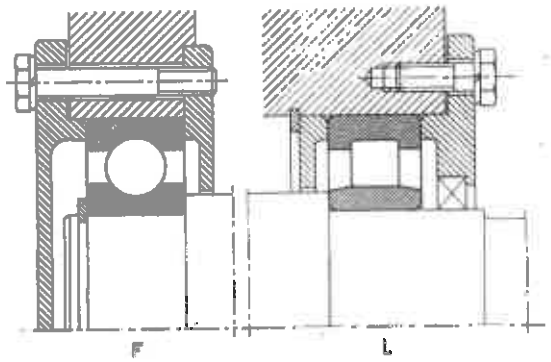


شکل ۴-۳ مهار محوری بیرینگ‌های قابل تنظیم و شناور

۴-۱-۲ روش‌های ثابت کردن بیرینگ

شکل‌های ۴-۴ تا ۴-۳۶ روش‌های مختلف ثابت نمودن در راستای محوری رینگ‌های بیرینگ را نشان می‌دهند. شکل ۴-۴ چیدمان بیرینگ‌های یک موتور الکتریکی با توان متوسط را نشان می‌دهد.

بیرینگ ثابت F تحت نیروهای شعاعی و همچنین نیروهای محوری با جهت متغیر که نه شدید و نه ضربه‌ای هستند قرار دارد. بنابراین استفاده از شفت پله‌دار، درپوش‌ها، خارهای فنری و غیره، امکان دارد

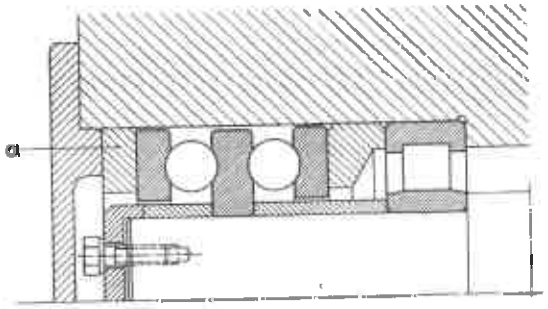


شکل ۴-۴ مهار محوری یک بلبیرینگ شیار عمیق و یک رولربیرینگ استوانه‌ای

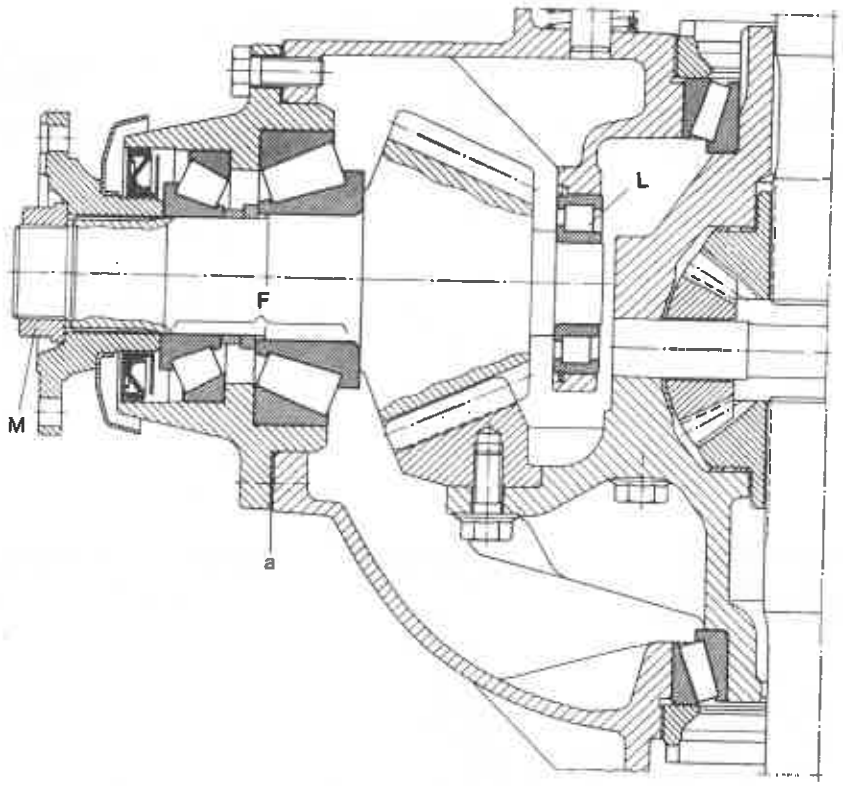
به‌عنوان روش‌های ثابت کردن بلبیرینگ شیار عمیق مورد توجه قرار گیرند، اما این وسائل *نباید* گران باشند و مونتاژ و دمونتاژ آنها باید آسان باشد. بیرینگ شناور L فقط تحت بارهای شعاعی است. خارخارجی بین درپوش و رینگ فنری مهار شده و رینگ داخلی به‌صورت پرسی روی شفت جا زده می‌شود.

شفت باید به‌صورت بدون لقی در بیرینگ ثابت مهار شود، که به آن نیروهای محوری شدیدی در هر دو جهت اعمال می‌شود. واشر شفت در بلبیرینگ کف‌گرد دوطرفه و رینگ داخلی رولربیرینگ استوانه‌ای با یک صفحه انتهایی در راستای محوری ثابت و بلبیرینگ کف‌گرد نیز با واشر فاصله‌انداز a به‌صورت بدون لقی تنظیم می‌شود (شکل ۴-۵).

چیدمان‌بیرینگ شفت یک پینیون نشانداده شده در شکل ۴-۶ تحت بارهای شدید و گاهی ضربه‌ای شعاعی و محوری است. سیستم دنده هیپوئیدی نیاز به دقت تنظیم محوری بالا و مهار بدون لقی شعاعی بین پینیون و چرخدنده مخروطی دارد. بیرینگ ثابت F از یک جفت رولربیرینگ مخروطی که از رینگ داخلی ثابت شده‌اند



شکل ۴-۵ مهار محوری یک بلبیرینگ کف گرد و یک رولربیرینگ استوانه‌ای

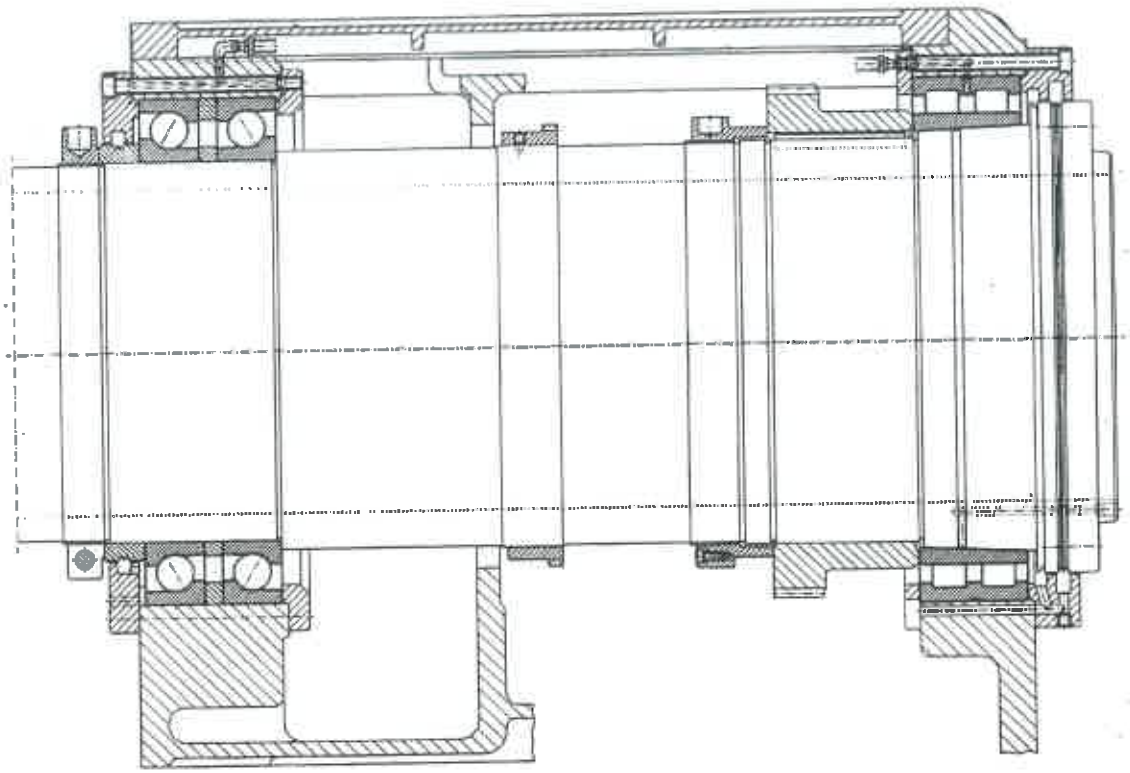


شکل ۴-۶ مهار محوری یک جفت رولربیرینگ مخروطی و یک رولربیرینگ استوانه‌ای

تشکیل شده است. از آنجا که بین رینگ‌های داخلی فاصله اندازه‌هایی قرار گرفته، می‌توان بدون ایجاد بار اولیه در بیرینگ‌ها، مهره را با گشتاور معینی سفت کرد. موقعیت محوری پینیون نسبت به چرخدنده مخروطی هنگام مونتاژ به وسیله واشر a، تنظیم می‌شود. بیرینگ شناور L فقط نیروهای شعاعی را تحمل می‌کند. اگر نیروهای شدیدی وجود داشته باشد، باید هر دو رینگ این بیرینگ با انطباق پرسی جا زده شود.

یک خار فنری داخل یک شیار محیطی در رینگ خارجی از جابه‌جایی بیرینگ به سمت چپ جلوگیری می‌کند. لبه‌ها نیز از جابه‌جایی به سمت راست جلوگیری می‌کند. برای اجتناب از گیرکردن بیرینگ، به یک لقی کوچک محوری c بین لبه رینگ داخلی و رولرها نیاز است.

در شکل ۴-۷ چیدمان بیرینگ محور کارگیر اصلی یک ماشین ابزار نشانداده شده است. نیروهای شعاعی و محوری اعمالی بر بیرینگ‌ها کم است. به خاطر نیاز به مهار دقیق و بسته‌ی محوری محور کارگیر، بیرینگ ثابت از دو بلبیرینگ با تماس زاویه‌ای با چیدمان عمومی O تشکیل شده است. رینگ‌های خارجی بوسیله



شکل ۴-۷ مهار محوری یک جفت بلبیرینگ با تماس زاویه‌ای و رولربیرینگ استوانه‌ای با سوراخ مخروطی

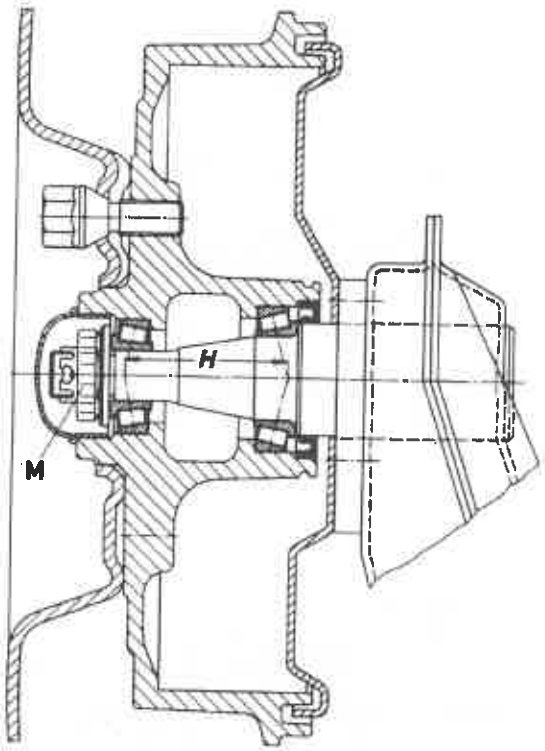
درپوش ثابت شده‌اند و رینگ‌های داخلی با مهره شیاردار درجای خود محکم می‌شوند. بیرینگ شناور در کلگی محور فقط تحت بارهای شعاعی است. مهار شعاعی بدون لقی مورد نیاز با انبساط رینگ داخلی از طریق جازدن آن در محل نشیمن مخروطی آن روی شفت به‌دست می‌آید. عدم دقت در ماشینکاری رزوه‌ها هیچ خطری در رابطه با تحت فشار قرار دادن رینگ داخلی به‌صورت *نامتقارن* ایجاد *نمی‌کند*. این به آن دلیل است که غلاف‌های بلند با دقت دورانی بسیار بالا بدون لقی روی شفت جازده شده‌اند.

مجموعه توپی چرخ با رینگ خارجی چرخان (شکل ۴-۸)

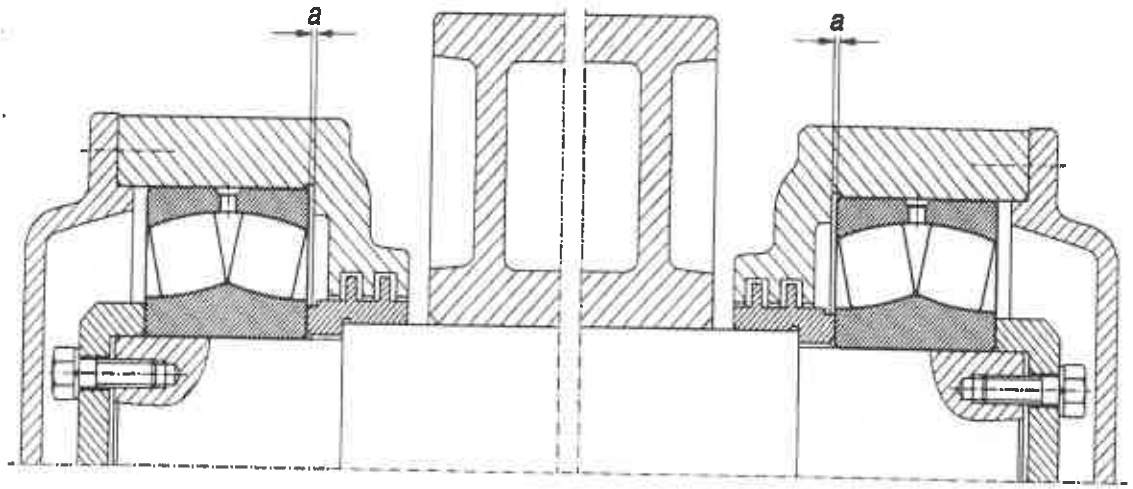
بارهای شدید شعاعی و محوری را در کنار گشتاورهای خمشی تحمل می‌کنند. چیدمان O بیرینگ‌ها، ارائه‌دهنده گستره پهن عملکرد بیرینگ H خواهد بود. با این چیدمان رینگ‌های خارجی پرسی جازده می‌شوند. این امر در اینگونه مجموعه توپی‌ها که رینگ‌های خارجی تحت بارهای محیطی هستند، مهم است. لقی محوری مجموعه بیرینگ به‌وسیله مهره M و جابه‌جا کردن رینگ داخلی بیرینگ بیرونی که شل روی محور جازده شده است، تنظیم می‌شود. شکل ۴-۹ چیدمان بیرینگ یک غلطک پشت‌بند سنگین را نشان می‌دهد.

این بیرینگ‌ها بارهای شعاعی شدیدی را تحمل می‌کنند. یک نیروی اصطکاکی نیز روی سطح رولر پشت‌بند در راستای محوری ایجاد می‌شود. مهار محوری بسته‌ای نیاز نیست بنابراین می‌توان چیدمان بیرینگ شناور (شکل ۳-۸) را نیز انتخاب کرد. جابه‌جایی محوری رینگ‌های خارجی با دیواره‌های نشیمنگاه محدود می‌شود. هر دو نشیمنگاه دو تکه هستند. لقی a را وقتی درپوش فوقانی بدنه را باز کنیم، می‌توانیم اندازه‌گیری کنیم. بیرینگ شناور یک شفت انتقال نیروی سنگین (گاردان) (**شکل ۴-۱۰**) بارهای شعاعی شدیدی را انتقال می‌دهد.

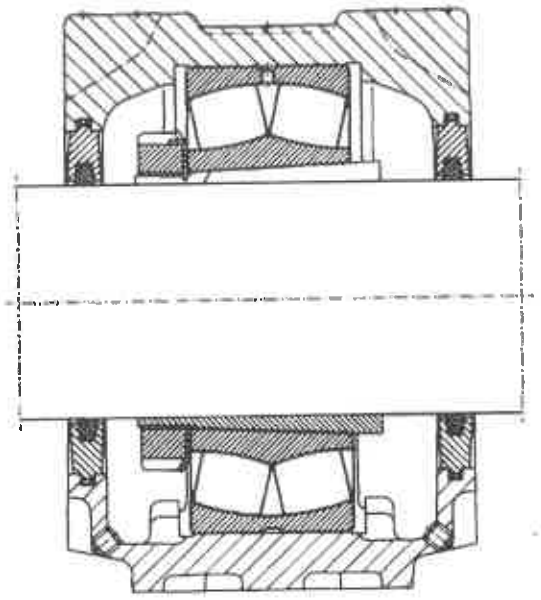
جازنی پرسی بیرینگ به همراه مهار محوری با سفت‌کردن بوش واسطه به دست می‌آید. **شکل ۴-۱۱** بیرینگ تابت یک قرقره‌کابل را نشان می‌دهد. برای سادگی مونتاژ و دمونتاژ بیرینگ، رینگ‌داخلی روی یک غلاف بیرون‌کش که به‌وسیله یک سیستم هیدرولیکی جازده شده است،



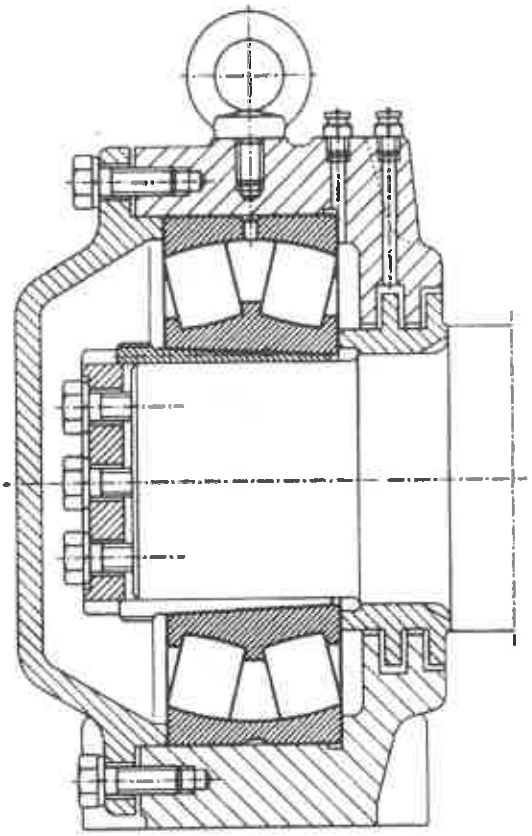
شکل ۴-۸ مهار محوری یک جفت رولربیرینگ مخروطی



شکل ۴-۹ مهار محوری دو زولربیرینگ کروی با چیدمان شناور

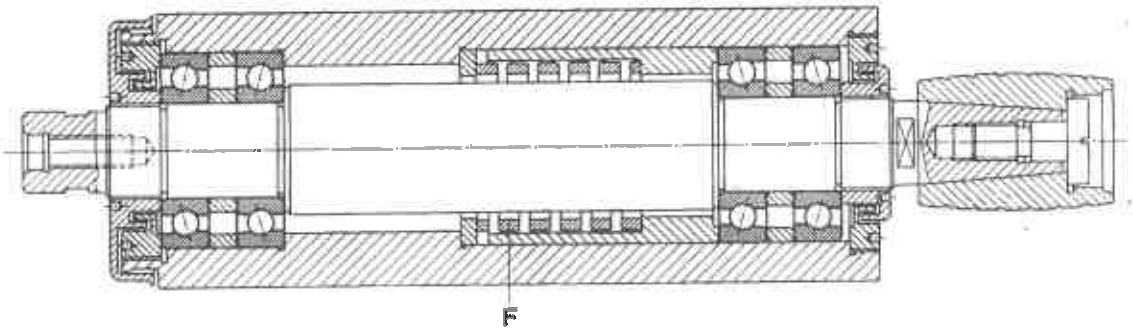


شکل ۴-۱۰ مهارمحوری یک رولربیرینگ کروی با یک بوش واسطه (بیرینگ شناور)



شکل ۴-۱۱ مهارمحوری یک رولربیرینگ کروی با یک غلاف بیرون‌کش (بیرینگ ثابت)

نصب شده است (شکل ۴-۸۵). غلاف بیرون‌کش به خاطر فرم مخروطی‌اش، خود قفل است. صفحه انتهایی محور به‌عنوان یک وسیله قفل‌کننده به کار می‌رود. شرایط کاری یک محور ماشین سنگ‌زنی (شکل ۴-۱۲)



شکل ۴-۱۲ مهارمحوری دو جفت بلبیرینگ با تماس زاویه‌ای

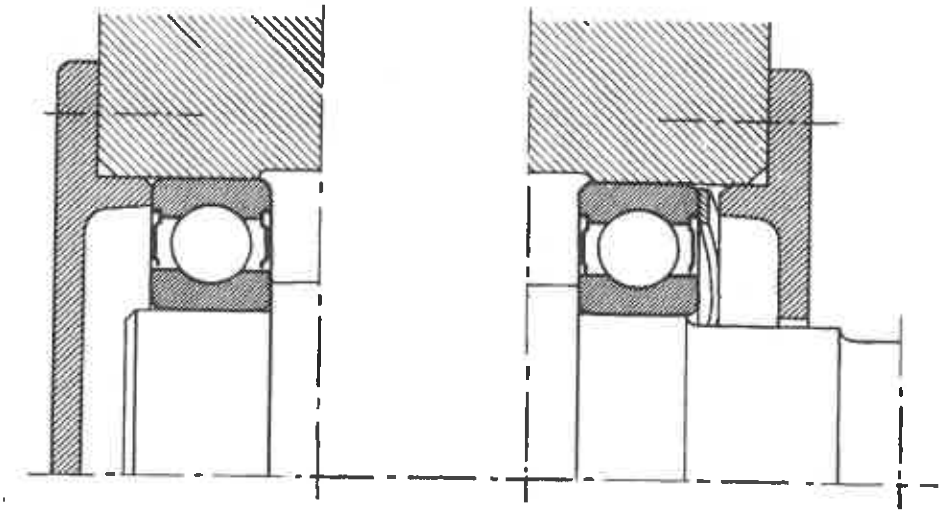
سرعت بالا، نیروهای شعاعی و محوری کوچک و مهار فوق‌العاده دقیق است. دو بلبیرینگ با تماس زاویه‌ای با چیدمان پشت سرهم در هر دو انتهای محورماشین نصب می‌شود. مجموعه بیرینگ‌های جلویی و عقبی تشکیل یک چیدمان O را می‌دهد که می‌توان در شکل ۴-۱۲ از روی خطوط تماس مشاهده کرد. بیرینگ‌های محور ماشین ابزار با طرح عمومی با فاصله اندازهای مسطح با پهنای مساوی، که بین رینگ داخلی و رینگ خارجی قرار می‌گیرد، از هم جدا می‌شوند رینگ‌های داخلی و خارجی مجموعه بیرینگ‌های انتهای کار (چپ) در راستای محوری روی محور و در نشیمنگاه قابل جابه‌جا شدن هستند.

شکل ۴-۱۳ چیدمان بیرینگ به‌کاررفته در موتورهای الکتریکی کوچک را نشان می‌دهد (به شکل ۳-۳۶ ر.ک.). بیرینگ‌ها تحت بارهای شدید قرار *ندارند*، سرعت دورانی در محدوده متوسط قرار دارد، بارشعاعی کم است و فقط نیروهای‌مهارکننده درجهت محوری اعمال می‌شود.

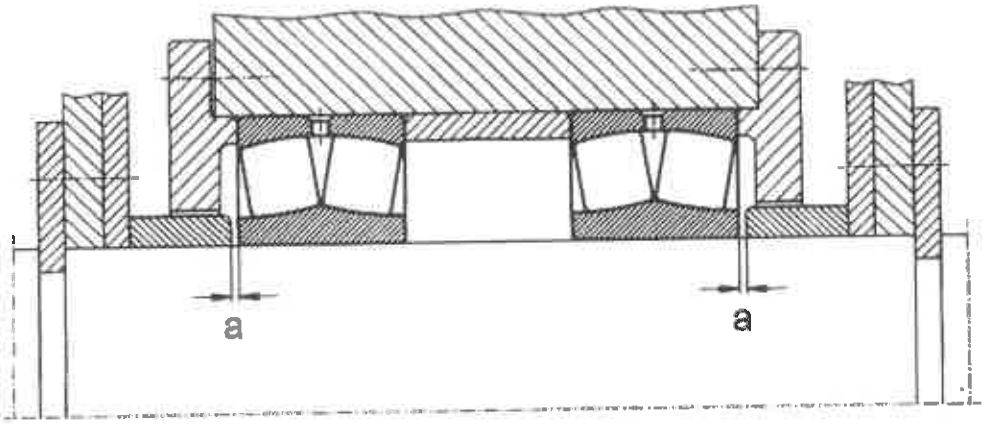
رینگ‌های‌داخلی‌بلبیرینگ‌های شیار عمیق روی محور پرسی جازده شده و با شانه‌های شفت در راستای محوری ثابت می‌شود. رینگ‌های‌خارجی با امکان لغزش جازده می‌شوند.

یک واشر فنری بین رینگ خارجی بیرینگ دست راست و لبه درپوش جازده می‌شود. بیرپنگ‌ها به وسیله این فنر فشرده، در راستای محوری نسبت به هم تنظیم می‌شوند این امر باعث دوران کم سر و صدای ویژه‌ای می‌شود.

بیرینگ‌های یک چرخ طیار سنگین شکل ۴-۱۴، تحت تنش‌های سنگین در راستای شعاعی هستند اما در راستای محوری فقط تنش‌های کمی به آنها وارد می‌شود. سرعت دورانی نیز کم است. با توجه به بخش ۳-۸-۱، رینگ‌های خارجی مانند چیدمان مربوط به توپی، باید پرسی جازده شوند، رینگ‌های داخلی می‌توانند با انطباق لغزشی در جای خود جازده شوند.



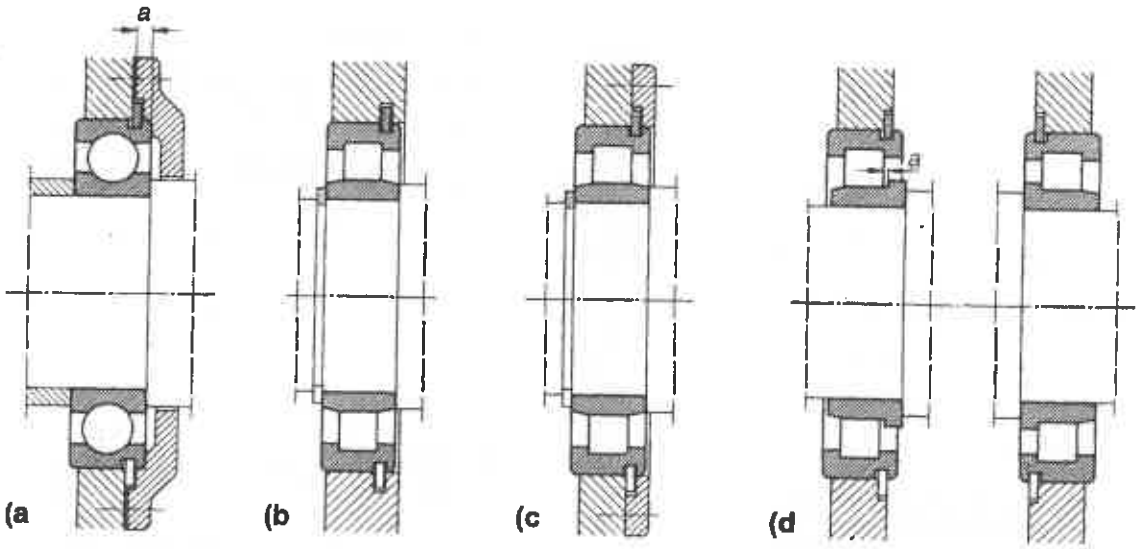
شکل ۴-۱۳ تنظیم الاستیک بلبیرینگ‌های شیار عمیق



شکل ۴-۱۴ چیدمان شناور یک توپی و نحوه مونتاژ بیرینگ‌ها

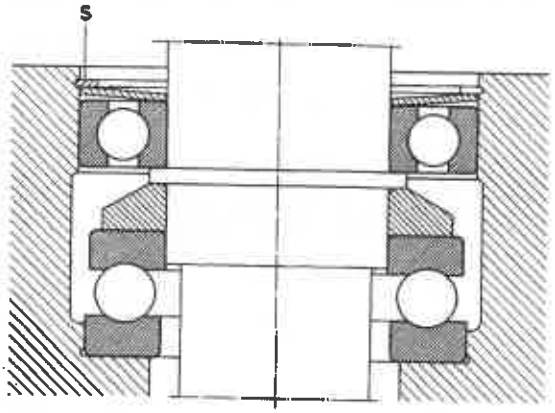
با انتخاب چیدمان بیرینگ شناور برای این مورد (شکل ۴-۱۴)، رینگ‌های خارجی و فاصله‌اندازها را باید با درپوش‌های نشیمنگاه در جای خود سفت کرد. در این حالت رینگ‌های داخلی در راستای محوری قابلیت جابه‌جایی خواهند داشت، بسته به ابعاد بیرینگ، یک لقی به میزان چند دهم میلیمتر بین رینگ داخلی و محل‌های مهارعرضی آنها درنظرگرفته می‌شود. بیرینگ‌های‌با شیار محیطی و خارفنری را می‌توان به‌راحتی در راستای محوری در نشیمنگاه مهار کرد. اینگونه بیرینگ‌ها عموماً در جعبه‌دنده خودروها به کار می‌رود، در جعبه دنده خودرو، به‌خاطر طراحی فشرده رینگ خارجی باید داخل یک نشیمنگاه با دیواره نازک نصب شود (شکل ۴-۶). برای هزینه‌های کم در ساخت قطعات دربرگیرنده بیرینگ، خصوصاً در تولید انبوه، این روش مهار توصیه می‌شود. هنگام مونتاژ این بیرینگ‌ها، باید تلرانس فاصله بین شیار محیطی و پیشانی بیرینگ و تلرانس پهنای خار فنری مورد توجه قرار گیرد (شکل ۴-۳۰)، این مقادیر در کاتالوگ‌های بیرینگ‌های غلتشی داده شده است. روش‌های مختلفی در مونتاژ وجود دارد. شکل ۴-۱۵a یک بیرینگ ثابت را با رینگ خارجی مهار شده در راستای محوری نشان می‌دهد. با تلرانس تعیین شده برای اندازه a، درپوش با رینگ خارجی تحت بار اولیه در تماس قرار می‌گیرد. گاهی درپوش بوسیله قطر خارجی رینگ خارجی در مرکز قرار می‌گیرد. در بیرینگ‌های شناور نشانداده شده در شکل ۴-۱۵b ,c رینگ فنری می‌تواند با شیار داخل بدنه مقدار لقی داشته باشد، زیرا فقط از جابه‌جایی عرضی رینگ خارجی جلوگیری می‌کند. مهار محوری لزومی ندارد.

در چیدمان بیرینگ شکل ۴-۱۵d لقی a باید به اندازه‌ای باشد که، با در نظر گرفتن کل تلرانس‌های پهنا و انبساط‌های حرارتی، بیرینگ تحت بار اولیه مخرب قرار نگیرد (به شکل ۴-۶ ر.ک.).



شکل ۴-۱۵ مهار محوری بیرینگ‌های با شیار محیطی و خار فنری: d,b) نشیمنگاه دو تکه، a,c) نشیمنگاه یک تکه

شفت عمودی در شکل ۴-۱۶ به وسیله یک بلبیرینگ شیار عمیق در راستای شعاعی و یک بلبیرینگ کف‌گرد در راستای محوری مهار شده است. خار فنری و فنر بشقابی در بیرینگ‌ها یک بار اولیه تولید می‌کنند

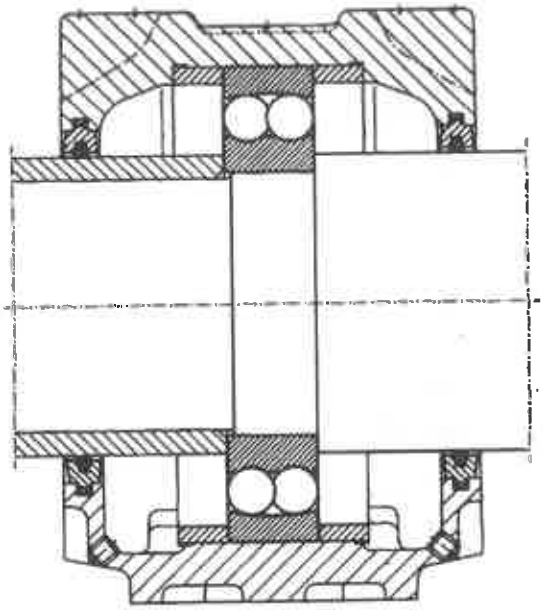


شکل ۴-۱۶ مهار محوری یک بلبیرینگ کف گرد و یک بلبیرینگ شیار عمیق شعاعی برای یک شفت عمودی

و از حرکت رو به بالای شفت در زمانیکه هیچگونه فشارکاری به جهت‌پایین بر آن وارد نمی‌شود جلوگیری می‌کند. وقتی فنر بشقابی فشرده شده است، یک لقی بسیار کم شعاعی بین آن و خار فنری وجود دارد، این حالت به خار فنری اجازه می‌دهد که به‌راحتی جازده شود.

نشیمنگاه‌های بیرینگ‌های سری‌های SNV (شکل ۴-۱۷) به نوعی طراحی شده‌اند که به‌راحتی نگهداری شوند، از این نشیمنگاه‌ها می‌توان هم برای بیرینگ‌های ثابت و هم برای بیرینگ‌های شناور استفاده کرد. محل نشیمن رینگ خارجی آنقدر پهن است که می‌تواند یک بیرینگ شناور از بهترین نوع در قطر مربوطه را در خود جای دهد.

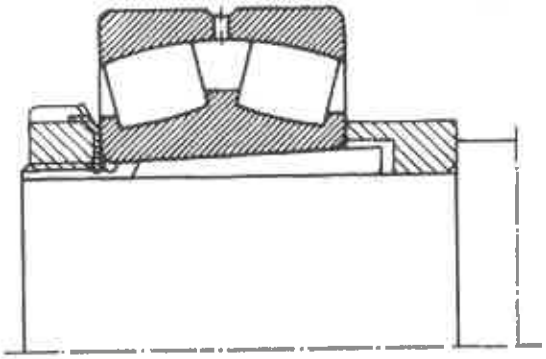
با وارد کردن رینگ‌های ثابت کننده، رینگ خارجی می‌تواند ثابت شود و یک بیرینگ ثابت به‌دست آید.



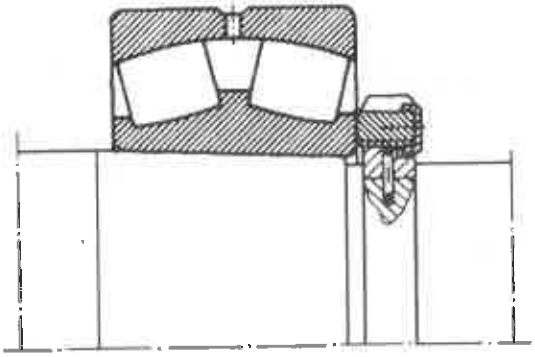
شکل ۴-۱۷ مهارمحوری رینگ‌خارجی با رینگ‌های ثابت‌کننده

رینگ‌های ثابت‌کننده با سری‌های مختلف پهنا با قطر موردنظر در بازار موجود است. در این نوع ثابت کردن، باید به خاطر وجود تلرانس پهنا، یک لقی محوری کوچک داشته باشیم.

در جایی که نیروهای قفل اصطکاکی یک بوش واسطه، برای انتقال مطمئن نیروهای شدید محوری کافی *نباشد*، باید رینگ داخلی را روی پله شفت به وسیله یک فاصله‌انداز ثابت کرد (شکل ۴-۱۸). نیروهای مهار محوری که در جهت مخالف قرار دارند با قفل اصطکاکی بوش واسطه تحمل می‌شوند. اندازه تورفتگی در رینگ فاصله‌انداز در استاندارد DIN 5418 تعیین شده است. برای شفت‌هایی که گشتاورهای نسبتاً بالایی را انتقال می‌دهند، بعضی اوقات امکان ماشینکاری رزوه روی شفت برای مهره قفل بیرینگ وجود *ندارد*، این به خاطر تنش‌های ناشی از ایجاد شیار است که استحکام شفت را کاهش می‌دهد. به جای این کار، می‌توان یک شیار کاملاً گرد در شفت ایجاد کرد و یک رینگ رزوه شده دو تکه را داخل شیار قرار داد و با خار پایین در جای خود ثابت کرد. مهره قفل بدون بروز هیچگونه ضعف عمده‌ای در شفت روی رینگ پیچیده می‌شود (شکل ۴-۱۹). این نوع ثابت کردن به ویژه برای بیرینگ‌های بزرگ، مثلاً در ماشین‌های نورد و شفت‌های سکان کشتی مناسب است.

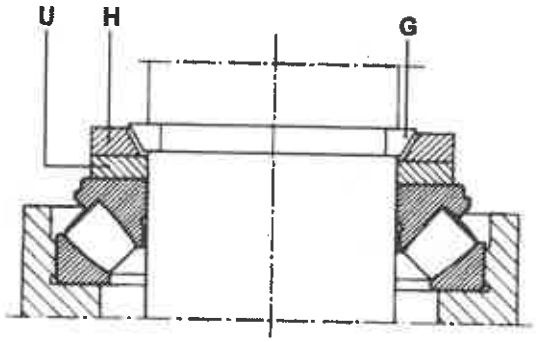


شکل ۴-۱۸ مهار محوری یک رولربیرینگ کروی با بوش واسطه و رینگ فاصله‌انداز

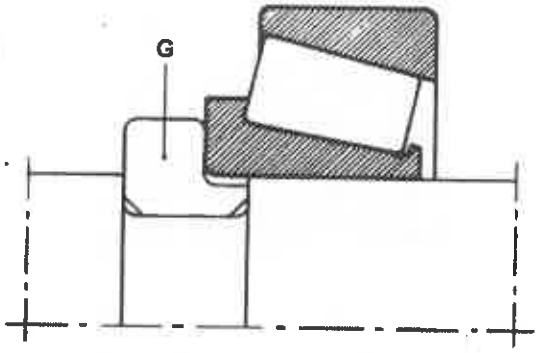


شکل ۴-۱۹ مهار محوری یک رولربیرینگ کروی روی یک شفت مخروطی

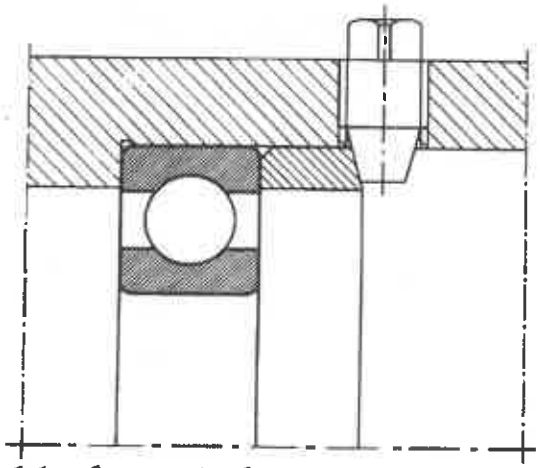
ایجاد یک لبه برآمده برای مهار یک بیرینگ روی یک شفت بلند بسیار پرهزینه است. در بعضی موارد وجود لبه برآمده روی شفت مانع مونتاژ آن می‌شود. در شفت‌های عمودی، می‌توان به جای لبه از رینگ دو تکه نصب شده در شیار شفت استفاده کرد (**شکل ۴-۲۰**). هنگام مونتاژ، واشر نشیمن U و رینگ نگهدارنده H به وسیله واشر شفت بر روی هم فشرده می‌شوند. سپس رینگ دو تکه‌ای G وارد شیار شفت شده و شفت پایین آورده می‌شود. در طرح دیگر (**شکل ۴-۲۱**)، رینگ نگهدارنده دو تکه G گوشه‌دار است. رینگ داخلی در راستای افقی جابه‌جا شده و دو تکه رینگ را در شیار قفل می‌کند و از افتادن آنها جلوگیری می‌کند. با روش ثابت‌کردن نشانداده شده در **شکل ۴-۲۲**، رینگ‌خارجی به وسیله برآمدگی‌درنشیمنگاه، فاصله‌انداز و سه عدد پیچ با فواصل منظم در بدنه ثابت می‌شود. از این روش فقط درجایی باید استفاده کرد که محل‌های نصب بیرینگ *غیرقابل* دسترس باشند و *نتوان* از روش‌های دیگر استفاده کرد.



شکل ۴-۲۰ مهار محوری یک رولربیرینگ کروی کف‌گرد با رینگ دو تکه

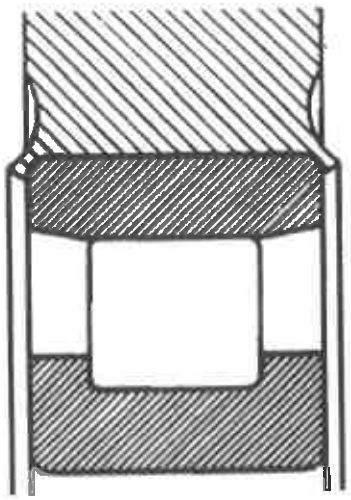


شکل ۴-۲۱ مهار محوری یک رولربیرینگ مخروطی با رینگ دو تکه



شکل ۴-۲۲ مهار محوری رینگ خارجی بیرینگ به کمک پیچ‌های مغزی

اگر قرار باشد رینگ خارجی بیرینگ در یک نشیمنگاه با دیواره نازک جازده شود، یکی از راه‌های مناسب سجاف‌کردن دیواره نشیمنگاه است (**شکل ۴-۲۳**). از این روش فقط در جازنی بیرینگ‌های شناوری می‌توان بکاربرد که مجاز جابه‌جایی محوری اندکی باشند. یک ابزار لب برگردان برای تغییر شکل دیواره‌های کناری نشیمنگاه بر روی لبه رینگ خارجی به‌کار می‌رود.



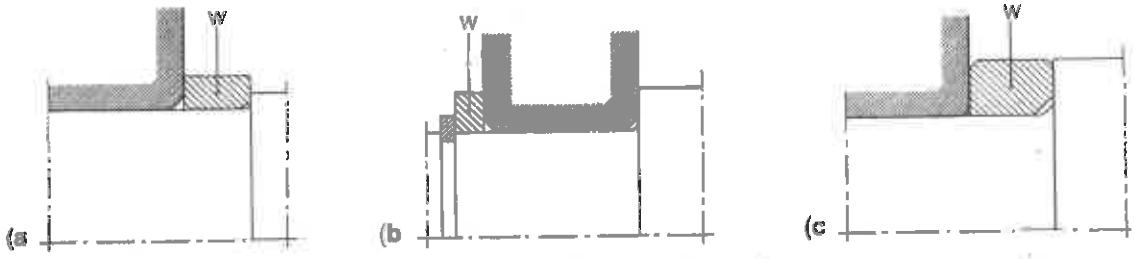
شکل ۴-۲۳ مهار محوری رینگ خارجی بیرینگ با سجاف دیواره نشیمنگاه

به‌دلایل طراحی یا تولید امکان دارد قطر برآمدگی شفت به‌میزان کافی بزرگ *نباشد* تا رینگ داخلی با اطمینان مهار شود.(جدول ۴-۱) و درنتیجه باید یک رینگ تکیه‌گاه W بین رینگ داخلی و برآمدگی جازده شود (شکل ۴-۲۴a). همچنین باید بین رینگ‌های داخلی بیرینگ‌های کوچک از سری‌های قطری 4 و 3 و خارفنری نیز یک رینگ‌تکیه‌گاه قرار داد، این به‌خاطر شعاع بزرگ گوشه r رینگ است (شکل ۴-۲۴b).

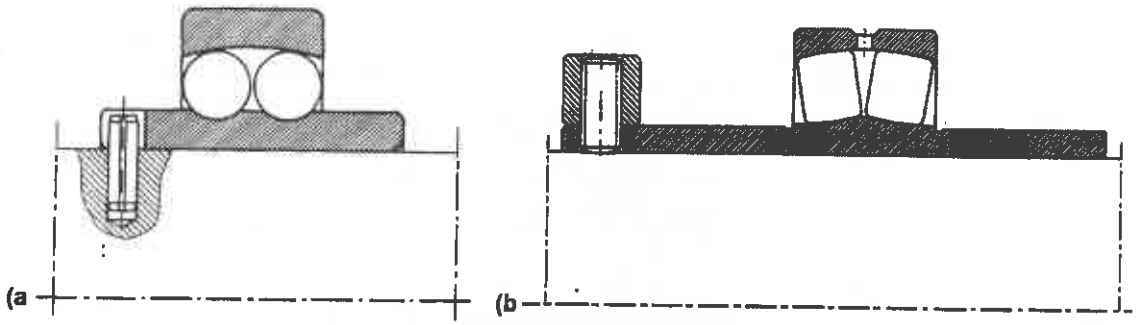
همچنین در مواردی که به دلایل طراحی یا جهت حفظ استحکام شفت، مجبور باشیم شعاع گردی گوشه پله شفت را بیش از حد عادی در نظر بگیریم، باید حتماً از رینگ تکیه‌گاه استفاده کرد (شکل ۴-۲۴c).

جهت سادگی در مونتاژ، عموماً در ماشین‌آلات کشاورزی از بلبیرینگ‌های خودتنظیم با رینگ داخلی بیرون زده (شکل ۲-۲۵a) استفاده می‌شود. یک پین شکاف‌دار (استاندارد DIN 1481)، برای مثال، داخل فرورفتگی انتهای رینگ داخلی درگیر می‌شود.

پین جازده شده در سوراخ روی شفت و بیرینگ باعث مهار بیرینگ در راستای محیطی و از یک جهت در راستای محوری می‌شود. رولربیرینگ‌های کروی با رینگ داخلی بیرون زده (شکل ۴-۲۵b)، به خاطر ظرفیت انتقال بار بالایشان، در جعبه‌دنده‌ها و تجهیزات انتقال مواد به‌کار می‌روند. آنها به وسیله دو عدد پین در رینگ مهار واقع بر رینگ داخلی بیرون زده، بر روی شفت ثابت می‌شوند. تلرانس سوراخ تعیین شده برای این بیرینگ‌ها باعث می شود بیرینگ با توانایی لغزش روی شفت با صافی سطح مناسب جازده شود. در مجموعه بیرینگ‌های نوع S، از بوش‌های خارج از مرکز خود قفل و پیچ تنظیم برای ثابت کردنشان استفاده می‌شود (شکل ۱-۷).

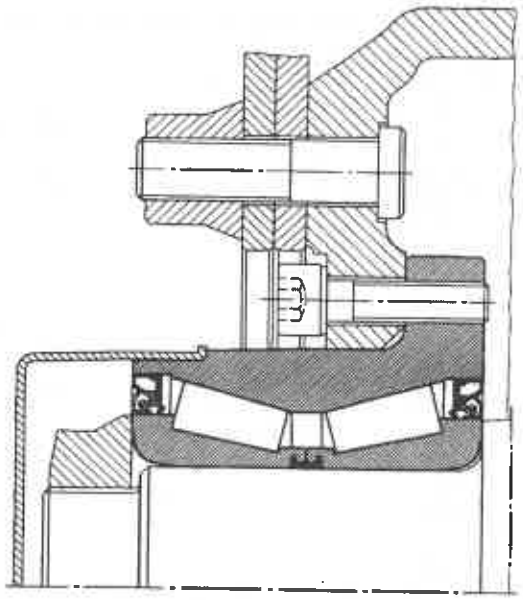


شکل ۴-۲۴ رینگ‌های تکیه‌گاه برای افزایش سطح تکیه‌گاهی



شکل ۴-۲۵ مهار بیرینگ‌های خودتنظیم با رینگ‌های داخلی بیرون زده

در موارد ویژه مثل مجموعه توپی وسایل نقلیه و یا بیرینگ‌های واحدهای تولید انرژی در صنایع هوافضا، یکی از رینگ‌های بیرینگ امکان دارد مجهز به فلنج باشد. شکل ۴-۲۶ یک رولربیرینگ مخروطی را نشان می‌دهد که فلنج روی رینگ داخلی به‌وسیله چند پیچ به نشیمنگاه بسته شده است.



شکل ۴-۲۶ مهار یک مجموعه توپی کامیون به وسیله فلنج رینگ خارجی بیرینگ

۴-۲ ابعاد تکیه‌گاه (استاندارد DIN 5418)

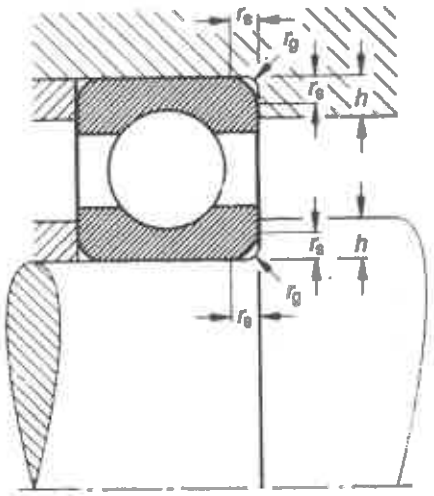
۴-۲-۱ پهنای لبه‌ها در شفت و نشیمنگاه

برای اطمینان از اتصال رینگ‌های بیرینگ به پله‌های شفت و نشیمنگاه و نه در محل گردی گوشه‌ها، شعاع پخ r_g *نباید* بزرگتر از حداقل شعاع لبه r_{smin} رینگ بیرینگ (جدول ۴-۱) باشد. در جدول لیست مقادیر حداکثر r_{gmax} برای شعاع پخ لبه‌های شفت‌ها و نشیمنگاه آمده است.

۴-۲-۲ ارتفاع پله در شفت و نشیمنگاه

ارتفاع اجزاء مهارکننده و نگهدارنده عرضی پله‌های شفت و نشیمنگاه، فاصله‌اندازها، مهره‌ها و غیره، با در نظر گرفتن شعاع گوشه r_a رینگ‌های بیرینگ باید محاسبه شود تا سطح مهار به میزان مناسبی ارائه شود. حداقل ارتفاع پله h موردنیاز بیرینگ‌های شعاعی در جدول ۴-۱ برای سری‌های مختلف بسته به شعاع گوشه r_{smin} آورده شده است. حداکثر مقدار h *نباید* بیش از 1.5 برابر تعیین شده در جدول باشد.

جدول ۴-۱ شعاع r_{gmax} و ارتفاع پله h_{min} شفت و نشیمنگاه (mm) مطابق استاندارد DIN 5418



شعاع بیرینگ r_{smin}	شعاع r_{gmax} شفت و نشیمنگاه	ارتفاع پله h_{min} [a]		
		8,9,10	1,2,3	4
0.1	0.1	0.3	0.6	
0.15	0.15	0.4	0.7	
0.2	0.2	0.7	0.9	
0.3	0.3	1	1.2	
0.6	0.6	1.6	2.1	
1	1	2.3	2.8	
1.1	1	3	3.5	4.5
1.5	1.5	3.5	4.5	5.5
2	2	4.4	5.5	6.5
2.1	2.1	5.1	6	7
3	2.5	6.2	7	8
4	3	7.3	8.5	10
5	4	9	10	12
6	5	11.5	13	15
7.5	6	14	16	19
9.5	8	17	20	23
12	10	21	24	28
15	12	25	29	33

[a] برای سری های قطری مطابق استاندارد DIN 616

۴-۲-۳ رولربیرینگ‌های استوانه‌ای

رولربیرینگ‌های استوانه‌ای قابل تفکیک هستند، بنابراین رینگ‌های داخلی و خارجی را می‌توان به‌صورت جداگانه روی شفت یا در نشیمنگاه جازد.

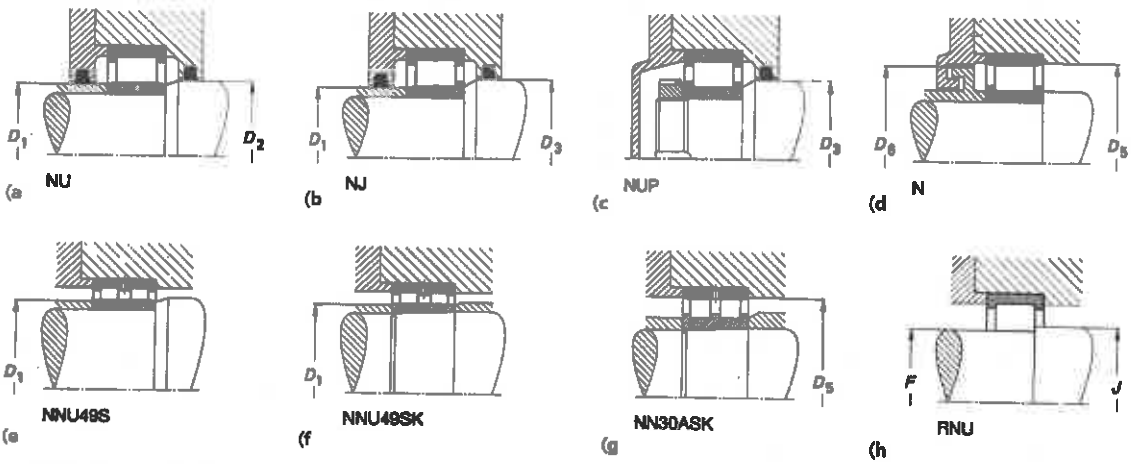
با فشردن و جازدن شفت، که مجهز به رینگ داخلی شده است، داخل نشیمنگاه، که مجهز به رینگ خارجی شده است، مونتاژ کامل می‌شود. البته این روش زمانی مزیت خواهد داشت که ابعاد اجزاء مخصوص آب‌بندی جا زده شده در پشت رینگ به شکلی باشد که مزاحم مجموعه بیرینگ *نباشد*. شکل ۴-۲۷ ابعاد مورد توجه در تکیه‌گاه رولربیرینگ‌های‌استوانه‌ای را نشان‌می‌دهد.

۴-۲-۴ رولربیرینگ‌های مخروطی و رولربیرینگ‌های کروی کف‌گرد

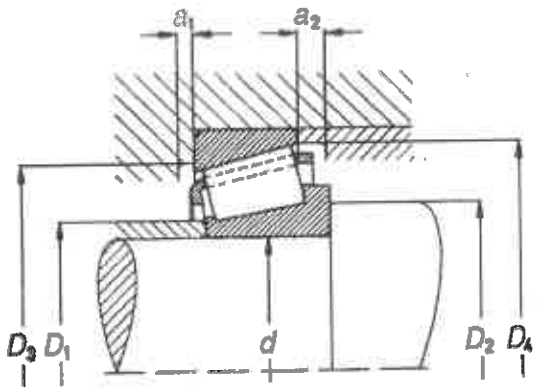
قفسه رولربیرینگ‌های مخروطی از پشت پیشانی رینگ خارجی بیرون می‌زند، قفسه پرسکاری شده در رولربیرینگ‌های کروی کف‌گرد نیز از پیشانی واشر شفت کوچک خود بیرون می‌زند. برای جلوگیری از تماس قفسه با نشیمنگاه یا غلاف، باید به مقادیر داده شده در **شکل‌های ۴-۲۸ و ۴-۲۹** توجه کرد.

قطرهای تعیین شده برای پله شفت در لبه بزرگ رینگ داخلی به‌طور عادی باعث مهار مناسب و جلوگیری از اعمال بارهای نامناسب به لبه می‌شود. انتخاب یک مهار مناسب برای واشرهای رولربیرینگ‌های کف‌گرد، بستگی به میزان تنش دارد :

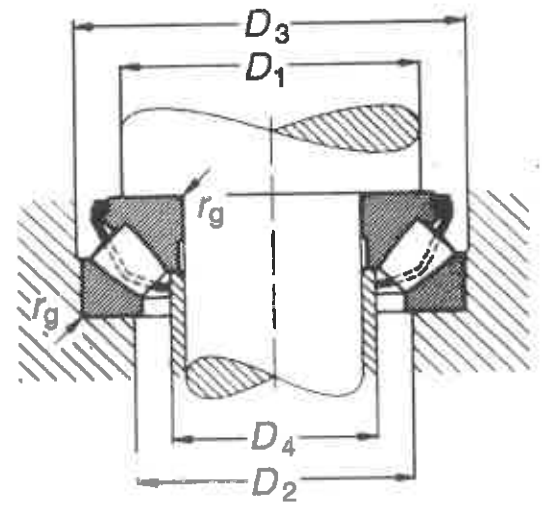
- $f_s \geq 8$ نشان‌دهنده مهار محوری واشرها با پله‌های تکیه‌گاه مربوط به اندازه D_1 و D_2 در شکل ۴-۲۹ است،
- $f_s \geq 6$ نشان‌دهنده مهار محوری تمامی سطوح در راستای محوری واشر نشیمنگاه و واشر شفت است و
- $f_s \geq 4$ نشان‌دهنده مهار محوری کامل سطح تکیه‌گاه واشر بدنه و واشر شفت، به همراه مهار شعاعی کافی و مناسب واشر تکیه‌گاه در سوراخ نشیمنگاه K7 است.



شکل ۴-۲۷ ابعادقطعات دربرگیرنده رولربیرینگ‌های‌استوانه‌ای : برای به دست آوردن مقادیر، به کاتالوگ‌های بیرینگ‌های غلتشی مراجعه کنید.



شکل ۴-۲۸ ابعاد قطعات دربرگیرنده رولربیرینگ‌های مخروطی: برای به‌دست آوردن مقادیر به کاتالوگ‌های بیرینگ‌های غلتشی مراجعه کنید.



شکل ۴-۲۹ ابعاد قطعات دربرگیرنده رولربیرینگ‌های کروی کف‌گرد: برای به‌دست آوردن مقادیر به کاتالوگ‌های بیرینگ‌های غلتشی مراجعه کنید.

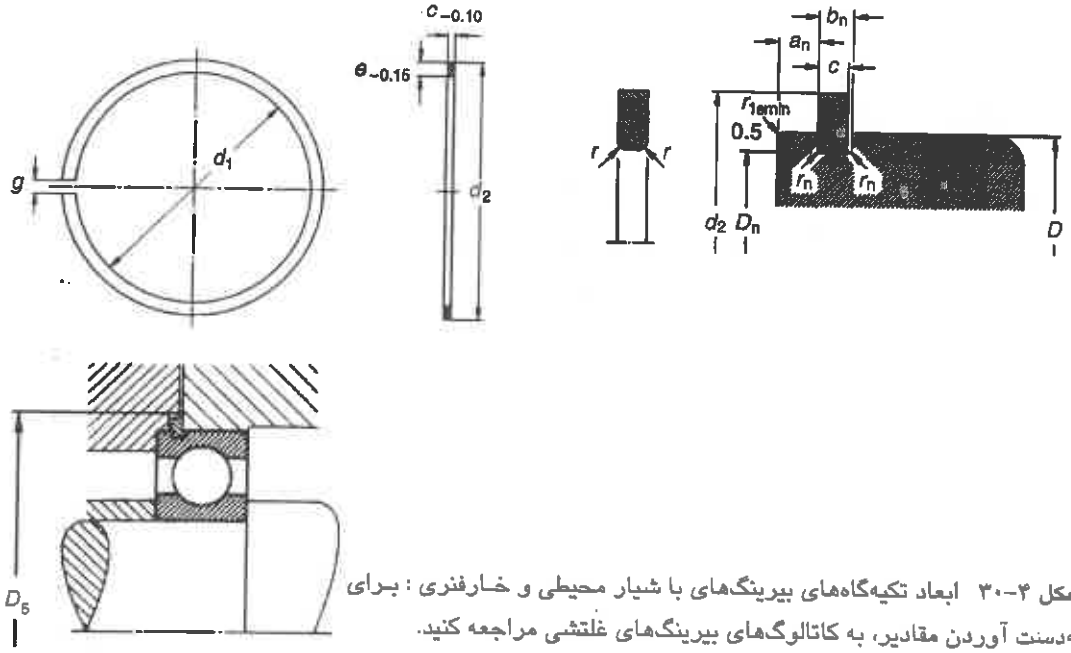
۴-۲-۵ بیرینگ‌های باشیار محیطی و خار فنری

درنشیمنگاه‌های یک تکه، بیرینگ‌های با شیارمحیطی، به‌وسیله خار فنری در راستای محوری ثابت می‌شوند. شکل ۴-۳۰ ابعاد مورد نیاز تکیه‌گاه را نشان می‌دهد. در کاتالوگ‌های بیرینگ‌های غلتشی، مقادیر ابعاد خار فنری و شیار محل نشیمن و ابعاد مهم در مونتاژ، مقادیر فواصل و پهنای مربوطه و تلرانس‌هایشان آورده شده است.

۴-۳ طراحی قطعات دربرگیرنده بیرینگ‌ها و بدنه‌ها

رینگ‌های داخلی و خارجی بیرینگ‌های غلتشی عموماً سطح مقطع نسبتاً باریکی دارند. از این رو ظرفیت انتقال بار آنها به میزان کیفیت مناسب مهار آنها به وسیله قطعات دربرگیرنده بستگی دارد. درنتیجه، جهت پایین نگه داشتن میزان تغییر شکل‌های الاستیک نشیمنگاه نسبت به تغییر شکل‌های هرتزین در محل‌های تماس اجزا غلتنده با سطح تماس رینگ‌ها، از مستحکم‌ترین طرح برای نشیمنگاه استفاده می‌شود.

این طرح‌های صلب، به واسطه حفظ فرم گرد رینگ‌ها حتی تحت بار، طول عمر استاندارد شده بیرینگ را توجیه می‌کنند. اما در طرح‌های سبک وزن، همیشه دستیابی به بدنه‌های صلب برآورده *نمی‌شود* و با افزایش ابعاد کلی سازه در مواردی که از بیرینگ‌های بزرگ استفاده می‌شود، طراحی سازه بدنه، با استحکام کافی به حدی که بتوان هنگام محاسبه تنش‌های بیرینگ روی استحکام آن حساب کرد، مشکل و پیچیده می‌شود. در سازه‌های فولادی بزرگ، ضخامت دیواره یا ضخامت ورق فولادی سازه مهارکننده را *نمی‌توان* به حدی افزایش داد



شکل ۴-۳۰ ابعاد تکیه‌گاه‌های بیرینگ‌های با شیار محیطی و خارفنری : برای به‌دست آوردن مقادیر، به کاتالوگ‌های بیرینگ‌های غلتشی مراجعه کنید.

که صلبیتی مشابه نشیمنگاه‌های بیرینگ‌های کوچک داشته باشند. این به آن معنی است که برای بسیاری از بیرینگ‌های غلتشی که در سازه‌های سبک وزن نصب می‌شوند، خصوصاً با ابعاد بزرگ، الاستیسیته سازه دربرگیرنده را *نمی‌توان* در برآورد توزیع بار در بیرینگ قابل صرف نظر کردن دانست. مثال‌های بعدی نشان خواهند داد که الاستیسیته سازه در برگیرنده می‌تواند تأثیر بسیار شدیدی روی توزیع بار بگذارد. این مسئله خصوصاً در محل‌هایی که اصطلاحاً نقاط سخت سازه دربرگیرنده نامیده می‌شوند، صدق می‌کند. حداکثر بار اعمالی به جزء غلتنده در این حالت، بسیار بیشتر از حالتی است که بیرینگ در بدنه با صلبیت ایده‌آل جازده شده باشد. از طرف دیگر، *نمی‌توان* با انتخاب ضخامت دیواره کافی و بیشتر در ساختار بیرینگ‌های غلتشی برای دست‌یابی به شرایط مهار مناسب، تنش در بیرینگ را پایین نگه داشت. در سازه‌های الاستیک، اجزاء دربرگیرنده که بیرینگ‌ها را مهار می‌کنند، تأثیر قاطعی در دست‌یابی به چیدمان بیرینگ بهینه خواهند داشت.

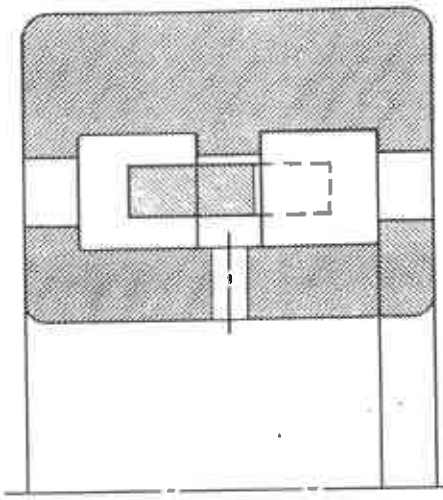
۴-۳-۱ تأثیر نشیمنگاه‌های الاستیک روی تنش‌های بیرینگ

در کنار روش‌های پیچیده اجزاء محدود (FEM)، روش‌های محاسبه ساده‌تری برای ارزیابی نشیمنگاه‌های الاستیک بیرینگ‌های غلتشی وجود دارد، محاسباتی که صحت آنها در کاربردهای عملی بسیاری به اثبات رسیده است. یک روش برای محاسبه تأثیر الاستیسیته نشیمنگاه‌های تحت بارهای شعاعی روی توزیع فشار در

بیرینگ‌های غلتشی استفاده از تحلیل اطلاعات الکترونیکی است، که نسبتاً بسادگی قابل بررسی هستند. در مدل محاسباتی، بیرینگ غلتشی در نشیمنگاه، به وسیله یک شفت یا یک محور افقی، تحت بار خالص شعاعی قرار می‌گیرد. بار وارده به بیرینگ، از طریق رینگ خارجی و نشیمنگاه به سازه مهارکننده انتقال می‌یابد. علاوه بر تغییر شکل‌های هرتزین بین جزء غلتنده و سطح تماس در رینگ، تأثیر تغییر شکل‌های بدنه نیز در محاسبات مورد توجه قرار می‌گیرد.

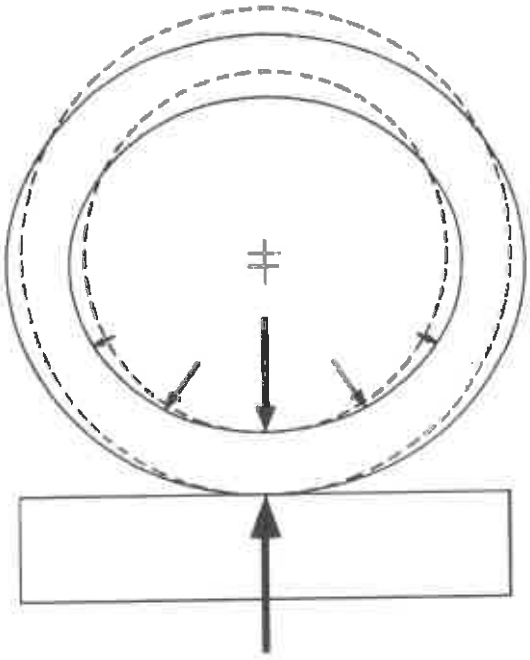
رولر مهارکننده

در ابتدا، تأثیر الاستیسیته روی توزیع‌فشار دربیرینگ، به وسیله مثال ساده رینگ خارجی یک رولر مهارکننده (شکل ۴-۱۳۱a) که به‌صورت الاستیک تغییر شکل داده

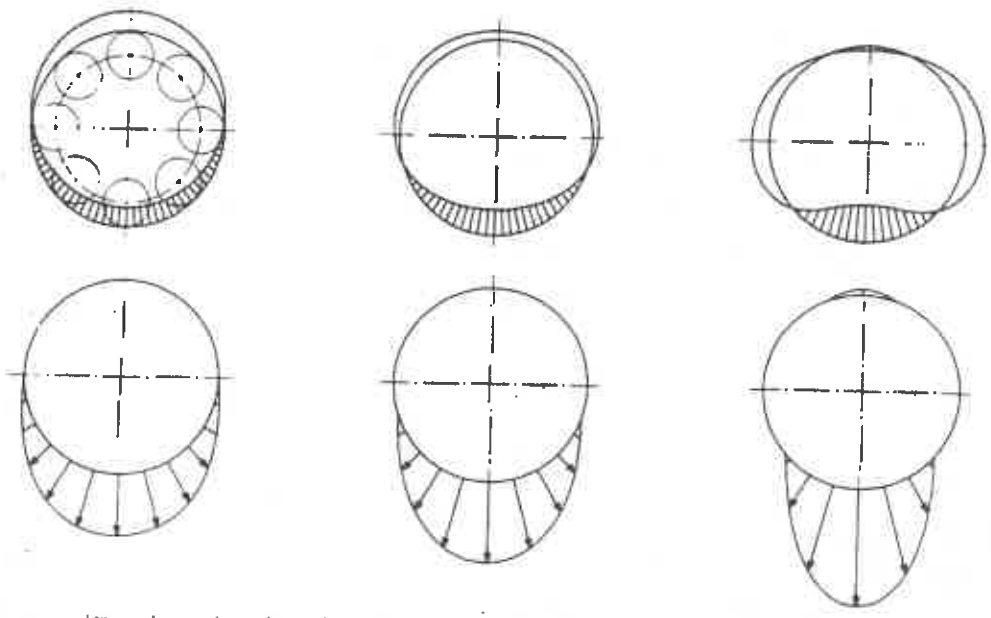


شکل ۴-۱۳۱a طرح رولر مهارکننده مشابه یک رولربیرینگ استوانه‌ای‌با رینگ خارجی دیواره ضخیم. نیروی مهار مستقیماً به رینگ خارجی که روی سطح مهارکننده می‌غلتد، منتقل می‌شود.

است، ارائه می‌شود. رینگ خارجی مستقیماً روی یک سطح مهارکننده می‌غلتد. در نتیجه نیروی مهار مستقیماً بر رینگ خارجی رولر مهارکننده اعمال می‌شود. به‌خاطر الاستیسیته، رینگ خارجی تحت تأثیر این نیروها تغییر شکل داده و بیضوی می‌شود (شکل ۴-۱۳۱b). برای جلوگیری از تغییر شکل‌های ناخواسته و مضر، باید ضخامت دیواره رینگ خارجی نسبت به رینگ خارجی یک بیرینگ غلتشی معمولی، به شکل اساسی افزایش یابد. نتایج محاسباتی مربوط به تغییر شکل و توزیع بار رینگ‌های خارجی با ضخامت‌های متفاوت در شکل ۴-۱۳۱c رسم شده است. ردیف بالا تأثیر الاستیسیته رینگ خارجی روی تغییر



شکل ۴-۱۳۱b رینگ خارجی رولر مهارکننده، تحت تأثیر نیروی مهار به شکل بیضی تغییر شکل می‌دهد.



شکل ۴-۱۳۱c تغییر شکل و توزیع فشار در رینگ خارجی رولر مهارکننده با ضخامت‌های دیواره متفاوت. ردیف *بالا* : تغییر شکل در بیرینگ و تغییر شکل رینگ خارجی. ردیف *پایین*: توزیع فشار در رولر مهارکننده. سمت چپ: رینگ خارجی با دیواره ضخیم. مرکز : رینگ خارجی با ضخامت دیواره متوسط. سمت *راست* : رینگ خارجی با دیواره نازک

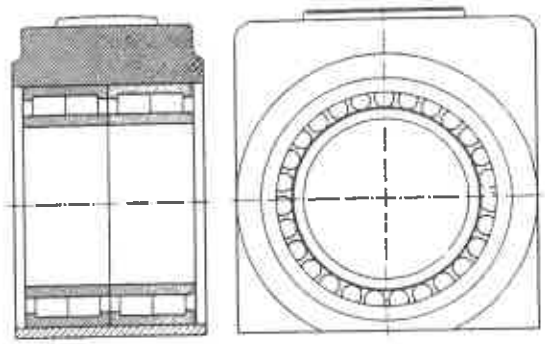
شکل اجزاء غلتنده و ردیف پایین توزیع فشار یعنی توزیع بار روی اجزاء غلتنده را نشان می‌دهد. یک رینگ خارجی بسیار ضخیم، تقریباً عاری از تغییر شکل بوده و می‌توان آن را صلب فرض کرد. اجزاء غلتنده رولر مهارکننده، بار را دقیقاً روی نصف محیط سطح تماس رینگ انتقال می‌دهند (دیاگرام طرف چپ شکل ۴-۱۳۱c). یک رینگ خارجی با ضخامت دیواره متوسط (دیاگرام مرکزی) به میزان قابل توجهی تغییر شکل داده و منطقه تحت باربیرینگ کوچکتر از منطقه تحت بار در بیرینگ‌های با رینگ خارجی صلب است. کاهش بیشتر ضخامت دیواره رینگ باعث تغییر شکل‌های بزرگتر و منطقه‌های تحت بار کوچکتر (دیاگرام طرف راست) می‌شود. همچنین حداکثر بار ایجاد شده در اجزاء غلتنده به‌شدت افزایش می‌یابد. قسمت بالایی رینگ خارجی تا حدی که به اجزاء غلتنده تماس پیدا کند، منقبض می‌شود. همچنین در این منطقه یک ناحیه تحت بار کوچک به وجود می‌آید.

در نتیجه، الاستیسیته بیشتر رینگ خارجی در رولر مهارکننده، باعث کوچکتر شدن منطقه تحت بار در بیرینگ می‌شود. در نتیجه، تعداد کمتری از اجزاء غلتنده بار را انتقال خواهند داد و بنابراین راس قسمت پایین رولر تحت بارهای سنگین‌تری قرار خواهد گرفت. این مسئله باعث‌کاهش عمر مفید بیرینگ می‌شود.

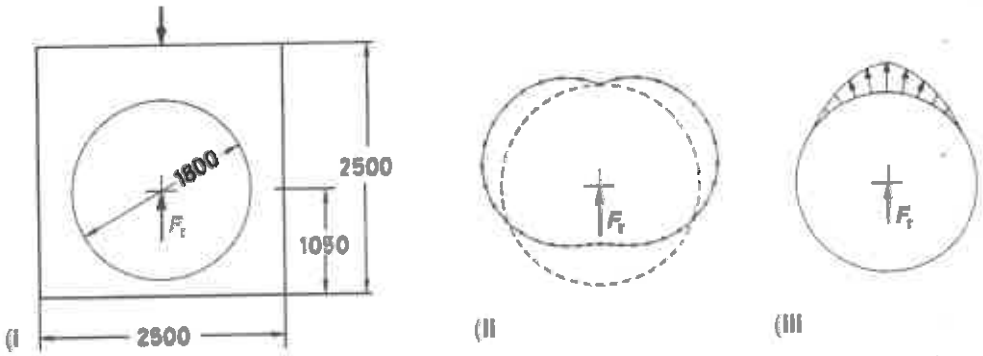
نشیمنگاه یا خرک بیرینگ‌های غلتک پشت‌بند نورد

تأثیر تغییرشکل‌نشیمنگاه، به ویژه در نشیمنگاه‌های بیرینگ‌های غلتک پشت‌بند دستگاه نورد که اصطلاحاً خرک (chock) نامیده می‌شوند، بروز می‌کند. در شکل ۴-۳۲\a یک خرک غلتک پشت‌بند نشانداده شده است. بار اعمالی از غلتک‌ها به وسیله بیرینگ‌های غلتشی مونتاژ شده در خرک، به محور مجهز به پیچ تنظیم در یک منطقه از سطح کروی بالای خذک منتقل می‌شود. در این نوع از مهار، لازم است خرک در محل تکیه‌گاه غلتک، آزادانه بتواند تنظیم شود.

دیاگرام (i) شکل ۴-۳۲\b طرح ایده‌آل نشیمنگاه خرک را نشان می‌دهد که به عنوان مدل محاسباتی پایه در محاسبه تغییر شکل نشیمنگاه و توزیع بار در بیرینگ به کار می‌رود. تغییر شکل ناشی از بار شعاعی F_R، که به شکل ریاضی محاسبه شده است، به شکل اغراق‌آمیز به میزان 900 برابر مقدار واقعی و به شکل دیاگرام قطبی روی سطح تماس بدون تغییر شکل رسم شده است (دیاگرام ii). سطح تماس به شکل قابل توجهی تغییر شکل دارد. در بالای خرک، مهار یک نقطه‌ای داریم، درنتیجه بغل‌های آن به بیرون تغییر شکل داده و قسمت پایین به داخل انحنا پیدا می‌کند. در دیاگرام (iii) توزیع بار روی اجزاء غلتنده معادل به این تغییر شکل الاستیک نشان‌داده شده است. به خاطر تغییر شکل جانبی نشیمنگاه، بارهای اعمالی به اجزاء غلتنده از نقطه حداکثر بار در جزء غلتنده در راس، بسرعت کاهش می‌یابد.



شکل ۴-۳۲\a خرک بیرینگ‌های غلتک پشت‌بند: تأثیر تغییر شکل نشیمنگاه در خرک غلتک‌های پشت‌بند در ماشین‌های نورد به شکل ویژه‌ای مشهود است



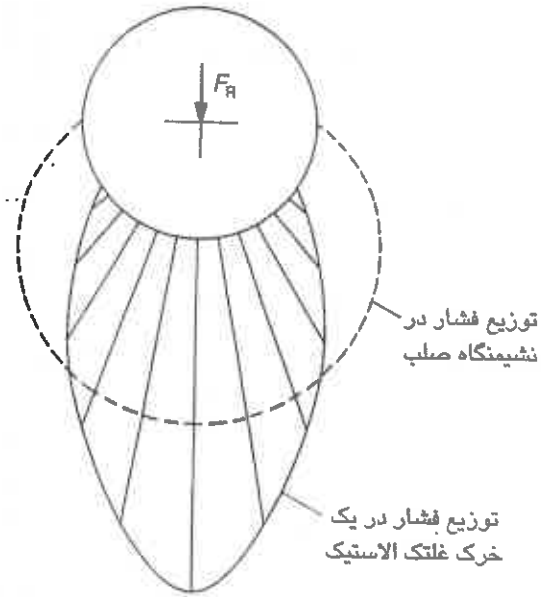
شکل ۴-۳۲\b تغییر شکل و توزیع فشار در یک خرک غلتک پشت‌بند: بار F_r از طریق یک نقطه در سطح کروی بالای خرک به پیچ تنظیم غلتک وارد می‌شود. i) مدل محاسباتی ایده‌آل. ii) تغییر شکل نشیمنگاه بزرگنمایی 900 برابر. iii) توزیع بار در بیرینگ

تنش‌های بیرینگ

هنگام مقایسه توزیع فشار در بیرینگ مونتاژ شده در یک خرک الاستیک با توزیع‌بار دربیرینگ مونتاژ شده در یک‌نشیمنگاه صلب، تأثیر تغییر شکل نشیمنگاه کاملاً مشهود است (شکل ۴-۳۲/c).

به دلیل مهار شبه نقطه‌ای، نشیمنگاه الاستیک، منطقه تحت بار کوچکتری از نشیمنگاه صلب خواهد داشت. هر چند، حداکثر بار اعمالی به اجزاء غلتنده، به دلیل بار خارجی مشابه، بسیار بالاتر خواهد بود. این مسئله تأثیر شدیدی بر تنش‌های دینامیک و عمر مفید بیرینگ دارد.

میزان‌تنش دینامیکی‌اعمالی بر یک بیرینگ‌غلتشی با باردینامیکی معادل آن مشخص می‌شود. میزان تنش با مقدار میانگین کل بارهای اعمالی به اجزاء غلتنده



شکل ۴-۳۲/c توزیع فشار در یک خرک صلب و یک خرک الاستیک

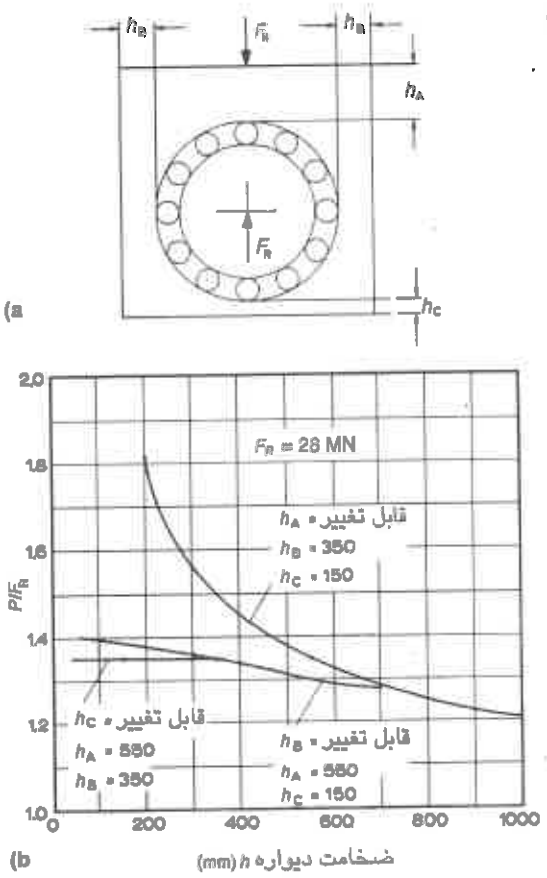
متناسب است. در بیرینگ‌های غلتشی هنگام محاسبات مقدار میانگین بارهای اجزاء غلتنده، با عمر به توان 10/3 محاسبه می‌شود. بنابراین، بارهای شدید اعمالی به اجزاء غلتنده، در مقایسه، بیش از بارهای کم اعمالی به اجزاء غلتنده بر بارهای دینامیکی معادل و درنتیجه بر تنش‌های اعمالی به بیرینگ تأثیر دارند.

هرگونه افزایش بار اعمالی به اجزاء غلتنده ناشی از تغییر شکل نشیمنگاه باعث افزایش بار دینامیکی معادل بیرینگ و کاهش عمر مفید خواهد شد. در نمونه نشانداده شده در شکل ۴-۳۲/c، بار دینامیکی معادل برای نشیمنگاه الاستیک، 35% بیشتر از نشیمنگاه صلب است.

تأثیر ضخامت دیواره

صلبیت خرک دستگاه نورد می‌تواند با افزایش ضخامت دیواره‌های آن افزایش یابد. برای ارزیابی تأثیر ضخامت دیواره در تنش‌های اعمالی به بیرینگ، محاسبات متعددی با ضخامت‌های دیواره مختلف انجام شده است. شکل ۴-۳۳/a ضخامت دیواره‌های h_A، h_B و h_C خرک را نشان می‌دهد. حال، ما تغییرات تنش‌های بیرینگ ناشی از تغییر مقدار یکی از پارامترهای h_A، h_B و h_C و حفظ مقادیر دو تای دیگر را بررسی می‌کنیم.

منحنی تغییرات تنش P/F_r نسبت به ضخامت دیواره h رسم شده است که در آن مقدار P/F_r خارج قسمت بار دینامیکی معادل P و بار شعاعی F_r است. همانگونه که مشاهده می‌شود مقدار بار دینامیکی معادل P، 1.8 برابر مقدار بار شعاعی F_r یک خرک با ضخامت دیواره $h_A = 200$ mm است. با افزایش ضخامت دیواره h_A،



شکل ۴-۳۳ a) طراحی ضخامت‌های دیواره‌ها. b) تنش اعمالی به بیرینگ با مقادیر مختلف ضخامت دیواره h_A، h_B و h_C

خارج قسمت P/F_r بسرعت کاهش یافته و در خرک‌هایی با ضخامت دیواره بسیار زیاد به عدد 1 می‌رسد. افزایش ضخامت دیواره h_B برای مثال، افزایش پهنای خرک نیز تأثیر قابل توجهی بر تنش‌های بیرینگ دارد، اما به میزان تأثیر h_A نیست. تغییر ضخامت دیواره h_C عموماً تأثیری بر تنش‌های بیرینگ ندارد.

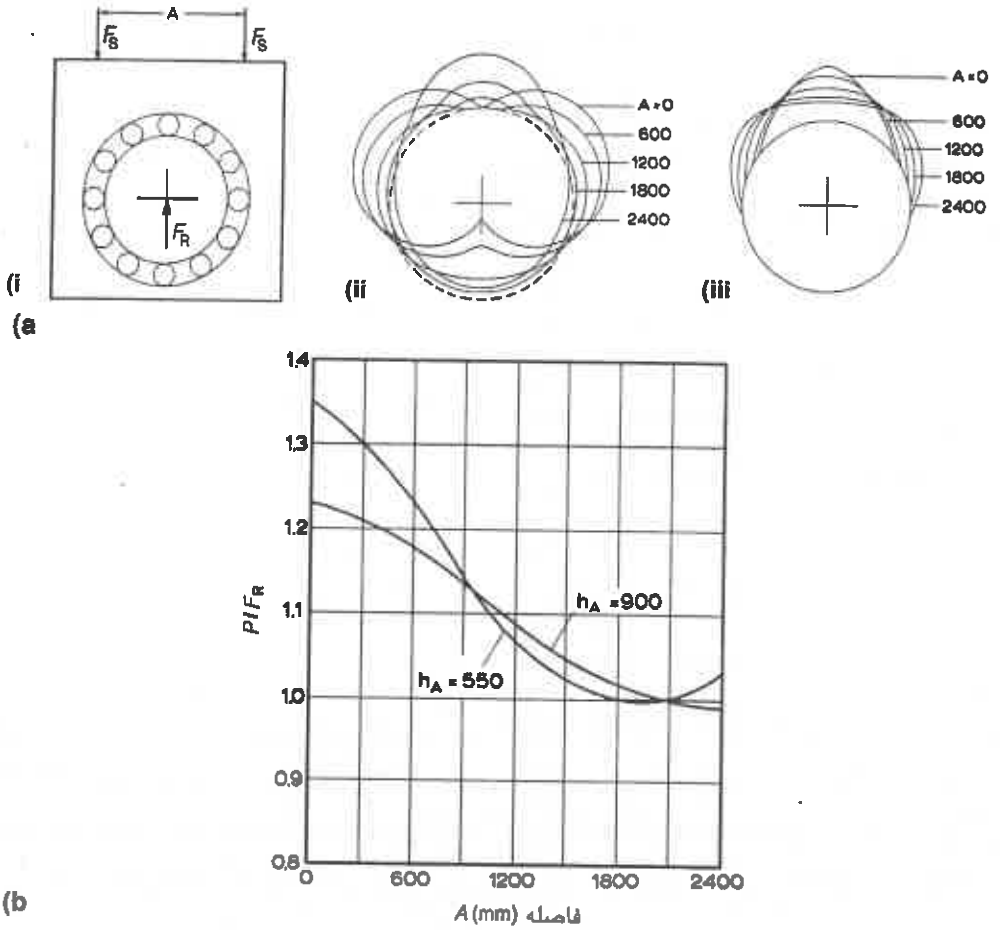
مقادیر توصیه شده برای مقادیر ضخامت دیواره‌ها

مقادیردر نظرگرفته شده برای h_A، h_B و h_C برای تمام ضخامت‌های خرک و بیرینگ قابل استفاده است. درصورتیکه فقط ضخامت دیواره‌های خرک را بتن‌هایی در نظر گرفته باشیم، طراحی را می‌توان بر پایه مقادیر توصیه شده زیر انجام داد. این مقادیر در خرک‌هایی از جنس فولاد ریختگی با استحکام کششی حداقل 450 N/mm^2 قابل استفاده هستند. که در آنها، D قطر خارجی بیرینگ و d قطر سوراخ داخل آن است. در نتیجه (D-d)/2 پهنای سطح مقطع بیرینگ است. این نوع طراحی تأثیر تغییر شکل خرک روی تنش‌های بیرینگ را به حداقل می‌رساند.

۴-۳-۲ موقعیت نقاط مهار نشیمنگاه

تمام موارد ذکر شده در قبل در مورد خرکی صدق می‌کند که از مرکز مهار شده باشد. اما در خرکی که توسط دو نقطه متقارن مهار شود (دیاگرام (i) در شکل ۴-۳۳a) شرایط اعمال بار و تنش‌های اعمالی به بیرینگ چه تغییراتی خواهد داشت؟ ما بررسی را با یک مثال ادامه می‌دهیم، دلایل‌خوبی برای اینکه خرک‌های غلتک‌های پشت‌بند بندرت بصورت عرضی مهار می‌شوند وجود دارد. در این مثال ضخامت دیواره‌ها مشابه قبل ثابت می‌مانند : h_A = 550 mm، h_B = 350 mm و h_C = 150 mm A را فاصله بین نقاط مهارکننده خرک در نظر می‌گیریم.

تغییر شکل خرک برای پنج مقدار A محاسبه شده است. برای A = 0 (حداقل) نقاط مهار بر هم منطبق‌اند.



شکل ۴-۳۴ a) خرک با مهار دو نقطه‌ای: i) موقعیت نقاط مهارکننده. ii) تغییر شکل خرک (با بزرگنمایی 1800 برابر). iii) توزیع فشار در بیرینگ. **b)** تأثیر موقعیت نقاط مهارکننده روی تنش تولید شده در بیرینگ

برای A = 2400 mm (حداکثر) نقاط مهار فقط 50 mm از لبه‌های خرک فاصله دارند. در دیاگرام (ii) در شکل ۴-۳۴a تغییر شکل نشیمنگاه مربوطه، بر روی سطح تماس شکل 1800 برابر است. توجه داشته باشید که در A = 0 و A = 600 mm بالا و پایین نشیمنگاه به داخل خم می‌شود و طرفین به بیرون باد می‌کنند.

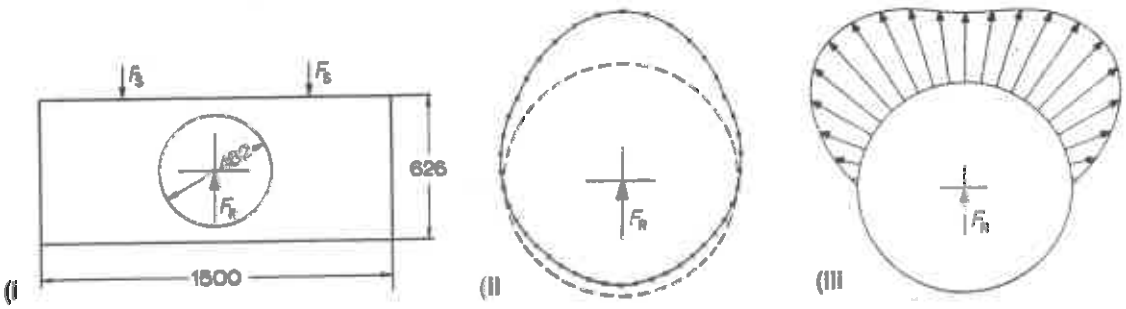
به این شکل بیضی افقی گفته می‌شود. بزرگنمایی 1800 برابر در راستای شعاعی آن را به شکل کلیه درآورده است. وقتی A افزایش می‌یابد، تغییر شکل‌های جانبی کاهش می‌یابد و تغییر شکل رأس بالا به‌میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد و این موارد باعث می‌شود فرم بیضی افقی تغییر شکل، به بیضی عمودی تغییر یابد.

این تغییر بر توزیع بار تأثیر می‌گذارد (دیاگرام (iii) در شکل ۴-a\۳۴).

با افزایش فاصله A، بار اعمالی به اجزاء غلتنده مرکز ناحیه اعمال بار به شکل تصاعدی کاهش می‌یابد، در حالی که بار اعمالی به اجزاء غلتنده جانبی افزایش یافته و ناحیه اعمال بار گسترده‌تر می‌شود. همانگونه که در شکل ۴-b\۳۴ نشان داده شده است با افزایش فاصله A، تنش در بیرینگ کاهش می‌یابد. مشابه شکل ۴-b\۳۴ از منحنی، مقدار خارج قسمت P/F_r به‌دست می‌آید. منحنی برای ضخامت دیواره h_A = 550 mm و h_A = 900 mm رسم شده است. در هر دو مورد تنش اعمالی به بیرینگ با افزایش فاصله A کاهش یافته و به میزان حداقل می‌رسد. برای نشیمنگاه‌های ضعیف‌تر (h_A = 550 mm) این میزان حداقل در فاصله A = 2000 mm به‌دست می‌آید و برای نشیمنگاه‌های قوی‌تر (h_A = 900 mm) این‌فاصله A = 2400 mm است. اگر A میزان حداقل باشد، با یک خرک الاستیک می توان به شرایط قابل دستیابی با نشیمنگاه صلب دست یافت.

خرک غلتک اصلی

عموماً بار وارده به خرک‌های غلتک اصلی به نیروهای پایینی که به دلیل تماس بین غلطک اصلی پشت بند تولید می‌شود محدود می‌شود. اما اگر غلطک‌های اصلی مجهز به سیستم ضدخمش باشند، خرک‌ها تحت فشار بسیار زیادی قرار خواهند گرفت. مثال زیر تأثیر مهار دو نقطه‌ای را روی تغییر شکل و تنش‌های خمشی نشان می‌دهد. شکل هندسی ایده‌آل خرک در شکل ۴-I\۳۵ نشان داده شده است. خرک مربوطه با پهنای 362 mm یک رولربیرینگ مخروطی چهار ردیفه پهن که در هر ردیف 42 رولر دارد را دربر گرفته است. بار شعاعی F_r سطح تماس رینگ خارجی را به شکل بیضی عمودی تغییر شکل می‌دهد (شکل ۴-II\۳۵). این تغییر، توزیع فشاری مطابق شکل ۴-III\۳۵ را ایجاد می‌کند. در این حالت بار دینامیک معادل $P = 0.994\ F_r$ خواهد بود که مقدار بسیار خوبی است.



شکل ۴-۳۵ خرک غلتک اصلی: i) ابعاد نشیمنگاه، ii) تغییر شکل نشیمنگاه (با بزرگ‌نمایی 2400 برابر)، iii) توزیع فشار در بیرینگ غلتشی

جعبه محور رولربیرینگ

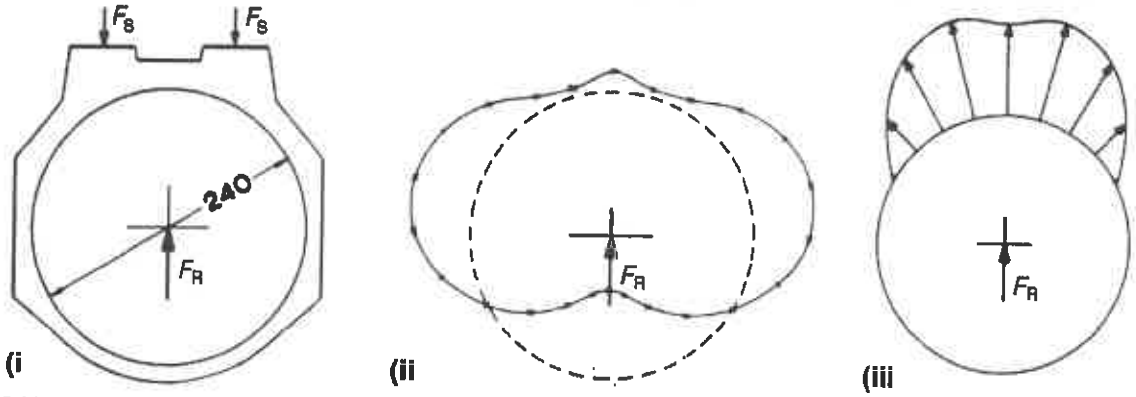
جعبه محورهای وسایل نقلیه ریلی، عموماً سطح مقطع بسیار باریکی دارند (شکل ۴-۳۶i). در این نوع کاربرد، مهار در دو نقطه جانبی بسیار قابل توجه است. در محاسبات، پهنای جعبه محور 210 mm فرض شده است. در جعبه محور موردنظر، دو رولربیرینگ کروی با کد فنی 23130 جا گرفته است. بار کل اعمالی روی دو بیرینگ F_R = 350 kN است. طرح شکل ۴-۳۶ii تغییر شکل جعبه محور را نشان می‌دهد. منحنی تغییر شکل در بالاترین نقطه، 31 µm از دایره اصلی سطح تماس (با خط‌چین نشان داده شده است) انحراف دارد. از آنجا که ضخامت سطح مقطع کم است، مطابق شکل ۴-۳۶iii، ناحیه اعمال بار به °180 نمی‌رسد. اما رولرهای انتقال‌دهنده بار هنوز به شکل مناسبی تحت بار قرار می‌گیرند. با توجه به دیواره نازک جعبه محور، این نوع توزیع بار را می‌توان خوب توصیف کرد. بار دینامیکی معادل $P = 1.134\ F_R$ خواهد بود که نشان می‌دهد تنش تولیدی در بیرینگ در محدوده قابل قبولی است.

۴-۳-۳ مهار مماسی بدنه نشیمنگاه

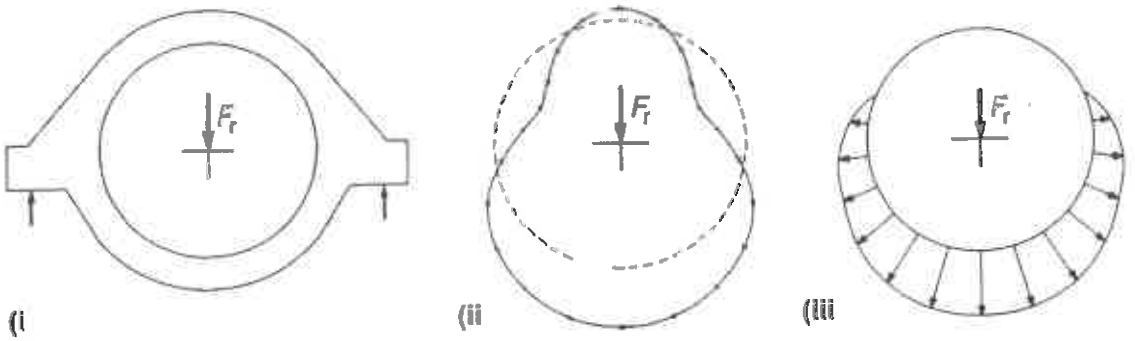
در تحت تنش قرار گرفتن بیرینگ و نشیمنگاه آن، نه تنها موقعیت و فاصله نقاط مهارکننده اهمیت بسیاری دارد، انتقال نیروها به داخل بدنه نشیمنگاه نیز مهم است. با انتقال مماسی نیروهای مهار به داخل بدنه نشیمنگاه می‌توان به شرایط مثبتی دست یافت. این مطلب در دو مثال زیر تصویر شده است.

شکل بهینه نشیمنگاه با پایه‌های برآمده

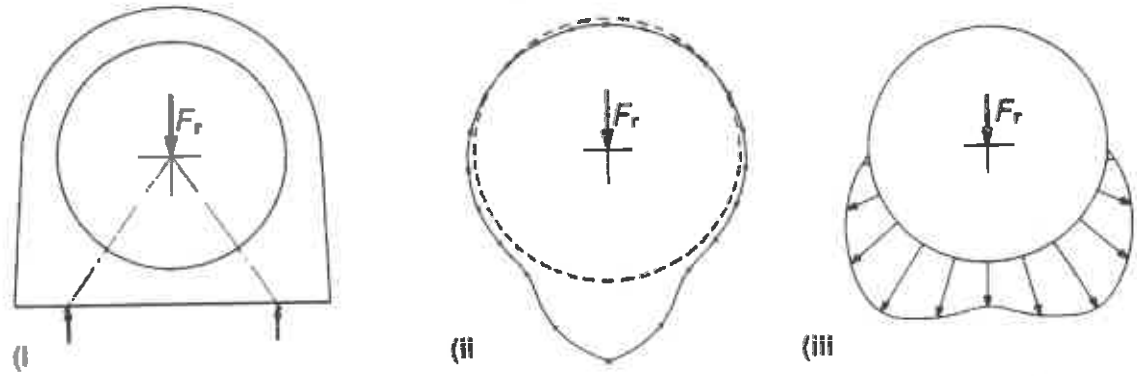
در شکل ۴-۳۷a مدل محاسباتی نشیمنگاه پایه‌دار یک تکه نشان داده شده است که در آن، معمولاً محل‌های مهار، دو سطح پایه‌های آن می‌باشند. تغییر شکل الاستیک نشیمنگاه تحت بار شعاعی F_R تعیین شده است: تغییر شکل با 50 برابر بزرگنمایی، در شکل ۴-۳۷b بر روی سطح تماس بدون تغییر شکل رینگ خارجی رسم شده است. دو نقطه مهار به‌عنوان نقاط سخت بر روی بیرینگ فشار وارد می‌کنند، اجزاء غلتنده هنگام عبور از این نقاط سخت، بالاترین بار را تحمل می‌کنند.



شکل ۴-۳۶ جعبه محور مجهز به رولربیرینگ: i) ابعاد جعبه محور، ii) تغییر شکل جعبه محور (با بزرگنمایی 2400 برابر)، iii) توزیع فشار در بیرینگ غلتشی



شکل ۴-a۱۳۷ نشیمنگاه پایه‌دار یک تکه با دو نقطه مهار از سطح‌پایه‌ها: i) مدل محاسباتی ایده‌آل، ii) تغییرشکل نشیمنگاه (با بزرگنمایی 50 برابر)، iii) توزیع فشار در بیرینگ



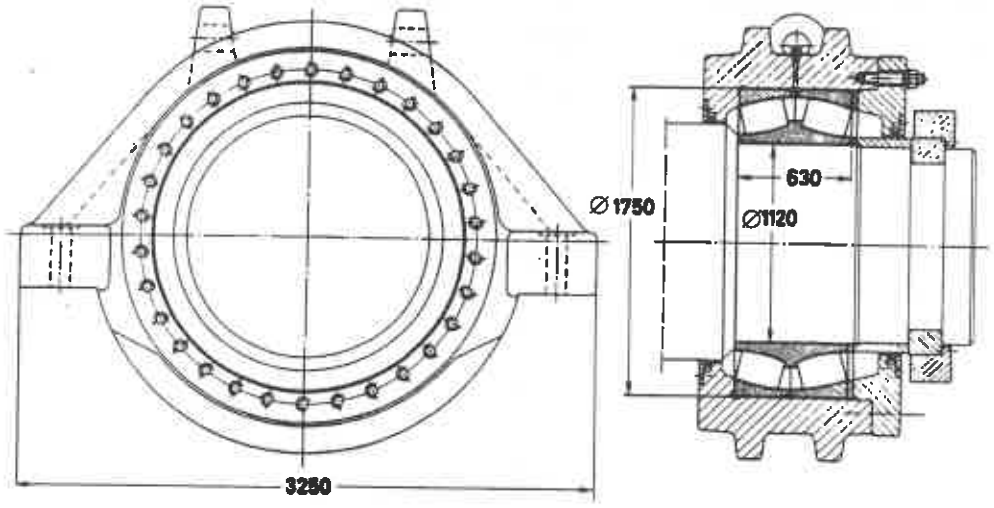
شکل ۴-b۱۳۷ نشیمنگاه با پایه‌های در راستای خط مرکز افقی: i) مدل محاسباتی ایده‌آل، ii) تغییر شکل نشیمنگاه (با بزرگنمایی 50 برابر)، iii) توزیع فشار در بیرینگ

توزیع *نامناسب‌تر* بار که ناشی از تغییر شکل نشیمنگاه است، در دیاگرام (iii) شکل ۴-a۱۳۷ نشانداده شده است. توزیع بار در نشیمنگاه‌های با دیواره ضخیم‌تر، مناسب‌تر است. اما دیواره‌های ضخیم‌تر، وزن را افزایش داده و هزینه ساخت را بالا می‌برد. برای دست‌یابی به تغییر شکل یکنواخت و توزیع بار بهتر در بیرینگ، می‌توان از نشیمنگاهی استفاده کرد که نیمه پایین آن مثل یک تسمه الاستیک رینگ خارجی بیرینگ را احاطه نماید. با قرار دادن نقاط مهار در راستای خط مرکز افقی نشیمنگاه و اعمال نیروهای مهار در راستای مماس بر بدنه نشیمنگاه می‌توان به این هدف‌دست پیدا کرد. پس از بررسی و محاسبه تعدادی از انواع طرح‌های نشیمنگاه، در نهایت یک ساختار بهینه نشیمنگاه، تغییر شکل و توزیع بار ناشی از آن در شکل ۴-b۱۳۷ نشان داده شده است.

در مقایسه با نشیمنگاه پایه‌دار نشان داده شده در شکل ۴-۱۳۷a، در طرح با پایه‌های هم‌راستا با خط مرکزی افقی، به میزان قابل‌توجهی در وزن فولادریخته‌گری بدنه نشیمنگاه صرفه‌جویی می‌شود. از طرفی این نوع نشیمنگاه را بر روی تکیه‌گاهی می‌توان نصب کرد که یک سازه جوشکاری شده بوده و نسبتاً هزینه ساخت پایینی داشته باشد. این به آن معنی است که ساختار نهایی نشیمنگاه به ما اجازه کاهش در هزینه تمام شده کل را می‌دهد. به علاوه، این طرح نیاز به توزیع بار مناسب در بیرینگ (دیاگرام (iii) شکل ۴-۱۳۷b) را نیز برآورده می‌کند. حتی حداکثر بار اعمالی به جزء غلتنده قدری کمتر از نشیمنگاه صلب است.

در طرح با پایه هم‌راستا با خط مرکزی افقی به این دلیل توزیع بار مناسب است که نیروی مهار در راستای مماسی اعمال می‌شود و این به آن معنی است که نیمه زیرین نشیمنگاه مشابه یک تسمه الاستیک رینگ خارجی بیرینگ را در خود جای داده است. قسمت بالای نشیمنگاه لازم نیست کاملاً صلب باشد.

شکل ۴-۱۳۷c ساختار نهایی نشیمنگاه را که رولربیرینگ کروی با ابعاد 630 mm × 1750 mm × 1120 mm را در خود جای داده، نشان می‌دهد. بارهای شدید محوری که باید به وسیله نشیمنگاه منتقل شود، حتماً باید در طراحی درنظرگرفته شود. برای دستیابی به صلبیت بالا در حداقل وزن نشیمنگاه، دو پره پشت‌بند در محیط نشیمنگاه و نزدیک خط اعمال بار به اجزاء غلتنده در نظر گرفته شده است. این پره‌ها تا پایه‌ها کشیده می‌شوند و در آن قسمت پهن‌تر می‌شوند، زیرا این ناحیه وظیفه انتقال بارهای شعاعی و محوری از بدنه گرد نشیمنگاه به پایه‌ها را برعهده دارد. برای انتقال بارهای محوری، یک فلنج به‌عنوان یک قسمت تقویت‌کننده ساختمان‌نشیمنگاه عمل می‌کند. در طرف مقابل یک کادر محکم به نشیمنگاه پیچ می‌شود.

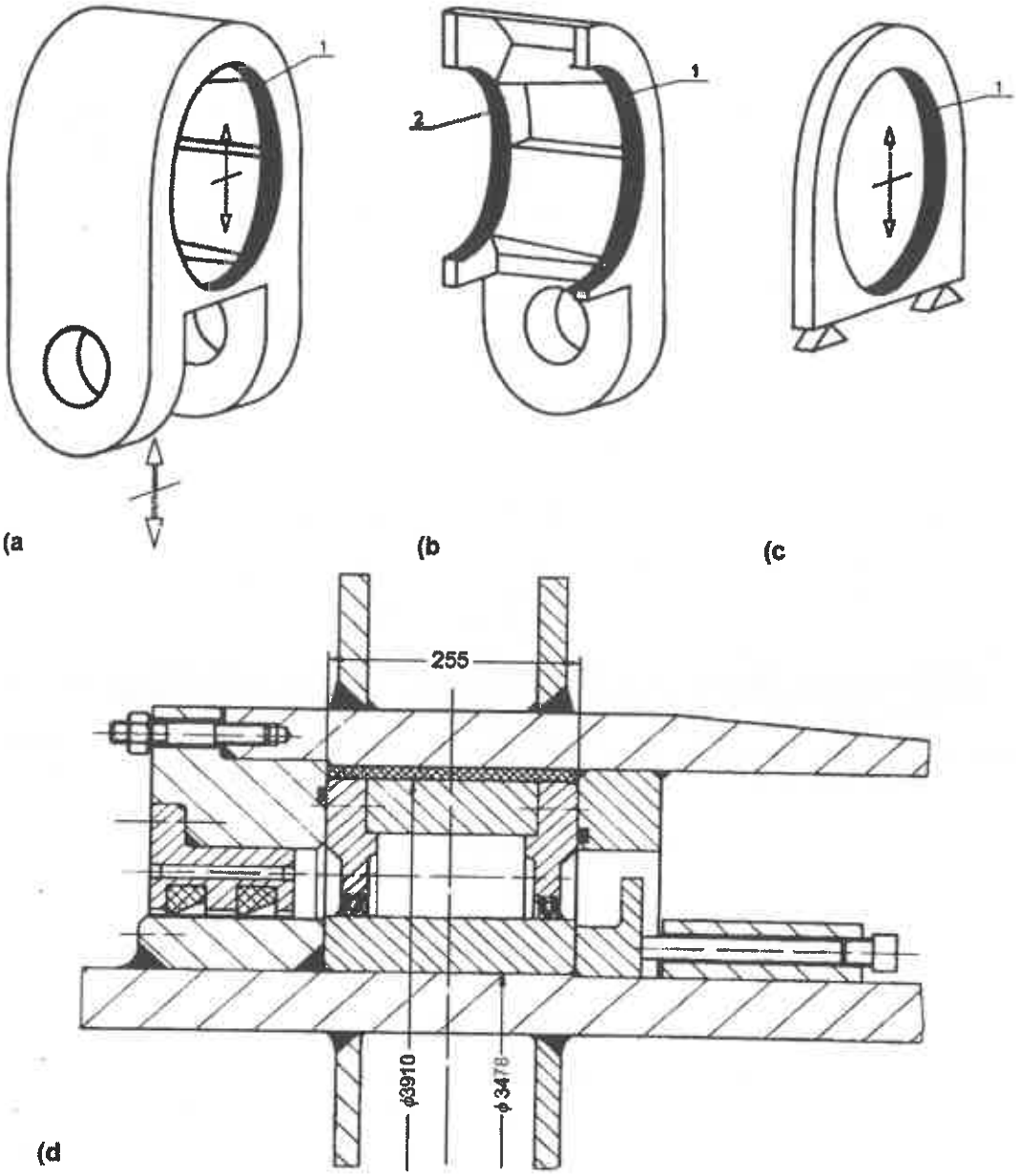


شکل ۴-۱۳۷c تصویرروبه‌رو و سطح مقطع نشیمنگاه نهایی با رولربیرینگ کروی با ابعاد (630 mm × 1750 mm × 1120 mm)

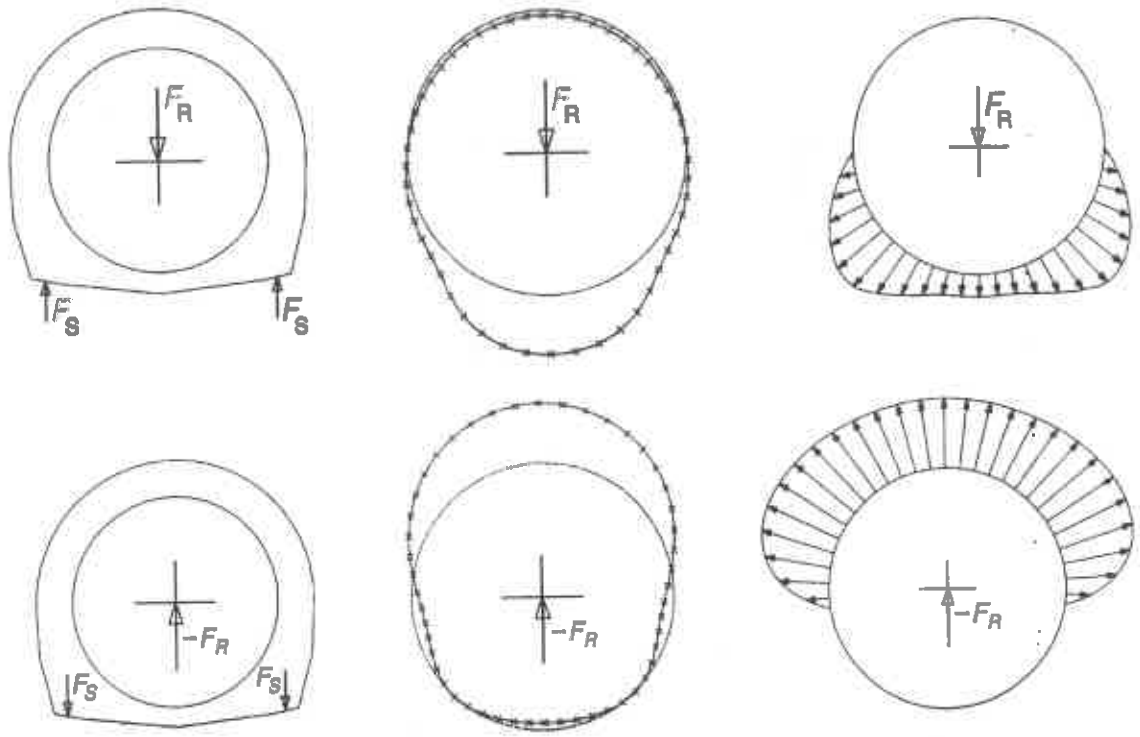
تأثیر بکارگیری نیروهای مماسی مناسب بر توزیع بار در بیرینگ‌های غلتشی، با یک بیرینگ مونتاژ شده در یک سازه فولادی بزرگ و فوق‌العاده الاستیک مشخص می‌شود. شکل ۴-۱۳۸a یک تصویر دیاگرامی از یک نشیمنگاه (بدون بیرینگ) است که از جوشکاری ورق‌های نسبتاً نازک ساخته شده که برای پایه گردان لنگر یک سکوی نفت خام استفاده می‌شود و دیاگرام B شکل ۴-۱۳۸a موقعیت دوبیرینگ غلتشی 1 و 2 را نشان می‌دهد. یک رولربیرینگ استوانه‌ای یک ردیفه با ابعاد 225 mm × 3910 mm × 3478 mm (دیاگرام D) در موقعیت 1 نصب شده و یک رولربیرینگ مخروطی دو ردیفه با ابعاد مشابه در موقعیت 2 نصب شده است. در اینجا فقط بیرینگ موقعیت 1 مورد نظر است. بار به دو دیواره امتداد یافته نشیمنگاه اعمال می‌شود. این بار از طریق یک پیچ لولایی بزرگ که داخل سوراخهای نشان داده شده قرار دارد، منتقل می‌شود. سپس بار از طریق سازه نشیمنگاه به بیرینگ‌های 1 و 2 منتقل می‌شود و از آنجا به شفت توخالی مفصل افقی انتقال می‌یابد. در موارد اعمال بار که مورد بررسی قرار گرفته است، بار امکان دارد هم به بالا و هم به پایین وارد شود. نشیمنگاه ایده‌آل با سطح مقطع جعبه‌ای برای بیرینگ 1 (دیاگرام C) از دو نقطه مهار می‌شود که بسته به نوع بار، کشش یا فشار را انتقال می‌دهد. با این حالت ایده‌آل می‌توان به مقادیر و شرایط مربوط به بار واقعی بسیار نزدیک شد.

شکل ۴-۱۳۸b نتایج اعمال بار 10 MN در جهت پایین به بیرینگ را نشان می‌دهد. تحت این بار، سطح تماس به میزان قابل توجهی که در حداکثر اندازه به 0.4 mm می‌رسد تغییر شکل می‌دهد (مرکز دیاگرام). بار مطابق دیاگرام دست راست توزیع می‌شود که حداکثر بار اعمالی به رولرها در جهت نقاط مهار نشیمنگاه به آنها اعمال می‌شود. بارهای حداکثر اعمالی به رولرها قدری بالاتر از بارهای حداکثر در یک نشیمنگاه کاملاً صلب است. بنابراین، تحت یک بار فشاری، باید تنش کمی بیشتر را برای یک نشیمنگاه الاستیک نسبت به یک نشیمنگاه صلب در نظر گرفت.

تحت این توزیع بار، مطابق شکل ۴-۱۳۸b، برای نشیمنگاه مشابه نتایج به دست آمده تحت بار کششی ولی با بار شعاعی بالاتر حدود 22 MN نشان داده شده است. با تغییر شکل شعاعی 1.1 mm تحت بار کششی، می‌بینیم که تغییر شکل بسیار بالاتر از حالت بار فشاری است، درنتیجه این تغییر شکل با 800 برابر بزرگنمایی بر روی سطح تماس بدون تغییر شکل رسم شده است. به خاطر الاستیسیته نشیمنگاه، توزیع فشار در بیرینگ، به بیش از نصف محیط بیرینگ گسترده می‌شود. تمام رولرها در این ناحیه همواره تحت بار هستند زیرا نیمه بالای تحت بار نشیمنگاه، رینگ خارجی را مثل یک کمربند دربر گرفته است. با این توزیع فشار و تقریباً بارهای یکنواخت به اجزاء غلتنده، به یک تنش بسیار خوب در بیرینگ دست خواهیم یافت. حداکثر بار اعمالی به رولرها حتی کمتر از بار رولرها در یک بیرینگ مهار شده با یک نشیمنگاه کاملاً صلب است. برای بارهای کششی، توجه داشته باشید که حتی در نشیمنگاه‌هایی با الاستیسیته بالا می‌توان به شرایط ایجاد تنش بسیار مناسبی دست یافت، به ویژه اگر نیروهای مهار به شکل



شکل ۴-a۱۳۸ نشیمنگاه پایه لنگر سکوی شناور: **a)** تصویر شماتیک کلی، **b)** تصویر مقطع نشیمنگاه، **c)** نشیمنگاه ایده‌آل برای بیرینگ 1 به‌عنوان مدل محاسباتی، **d)** موقعیت بیرینگ 1 که رولربیرینگ استوانه‌ای است. (1) محل نشیمن برای بیرینگ 1، (2) محل نشیمن برای بیرینگ 2



شکل ۴-b۱۳۸ تغییرشکل نشیمنگاه و توزیع فشار در بیرینگ موقعیت 1. ردیف *بالا*: حالت بار فشاری. ردیف *پایین*: حالت بار کششی. چپ: طرح ایده‌آل نشیمنگاه. مرکز: تغییر شکل نشیمنگاه (مورد بالا تقریباً با 2000 برابر بزرگنمایی شعاعی، مورد پایین تقریباً با 800 برابر بزرگنمایی شعاعی). *راست*: توزیع فشار در رولربیرینگ استوانه‌ای. FR نیروی شعاعی. Fs نیروی مهار

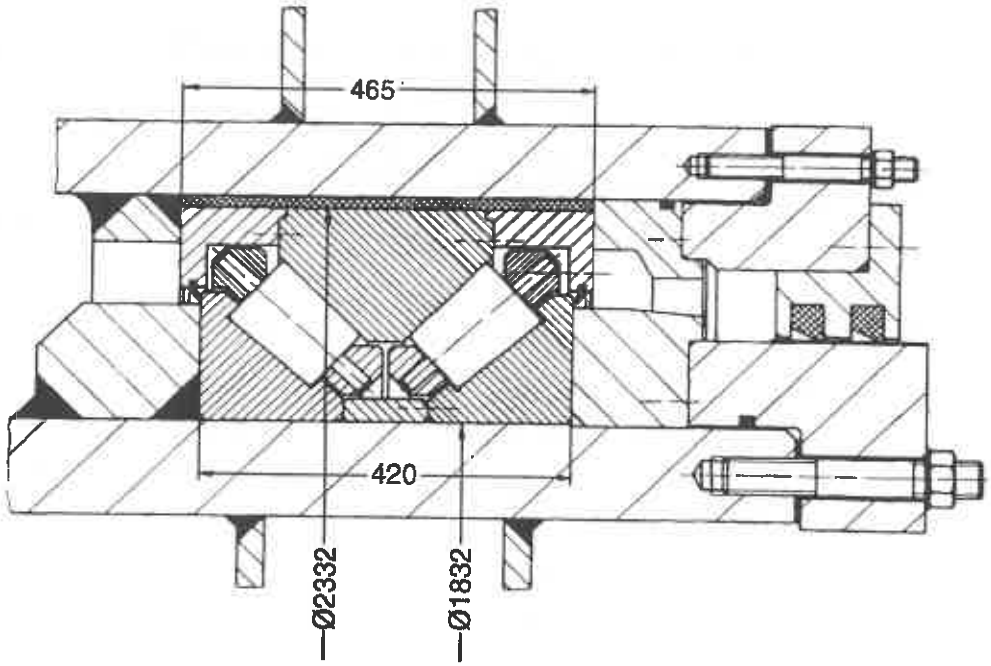
مناسبی به بدنه نشیمنگاه انتقال یابند. با کاربرد نیروهای مهار در راستای مماسی در دیواره‌های امتداد یافته نشیمنگاه (دیاگرام A در شکل ۴-a۱۳۸)، می‌توان از به وجود آمدن نقاط سخت که به بیرینگ فشار وارد می‌کنند، اجتناب کرد. این اصل در مورد بارهای فشاری نیز صدق می‌کند و کارآیی خود را نشانداده شده است، البته بارهای اعمالی به رولرها کمی بیشتر است، با این حال قابل قبول هستند.

۴-۳-۴ بدنه نشیمنگاه‌هایی که در راستای شعاعی مهار شده‌اند

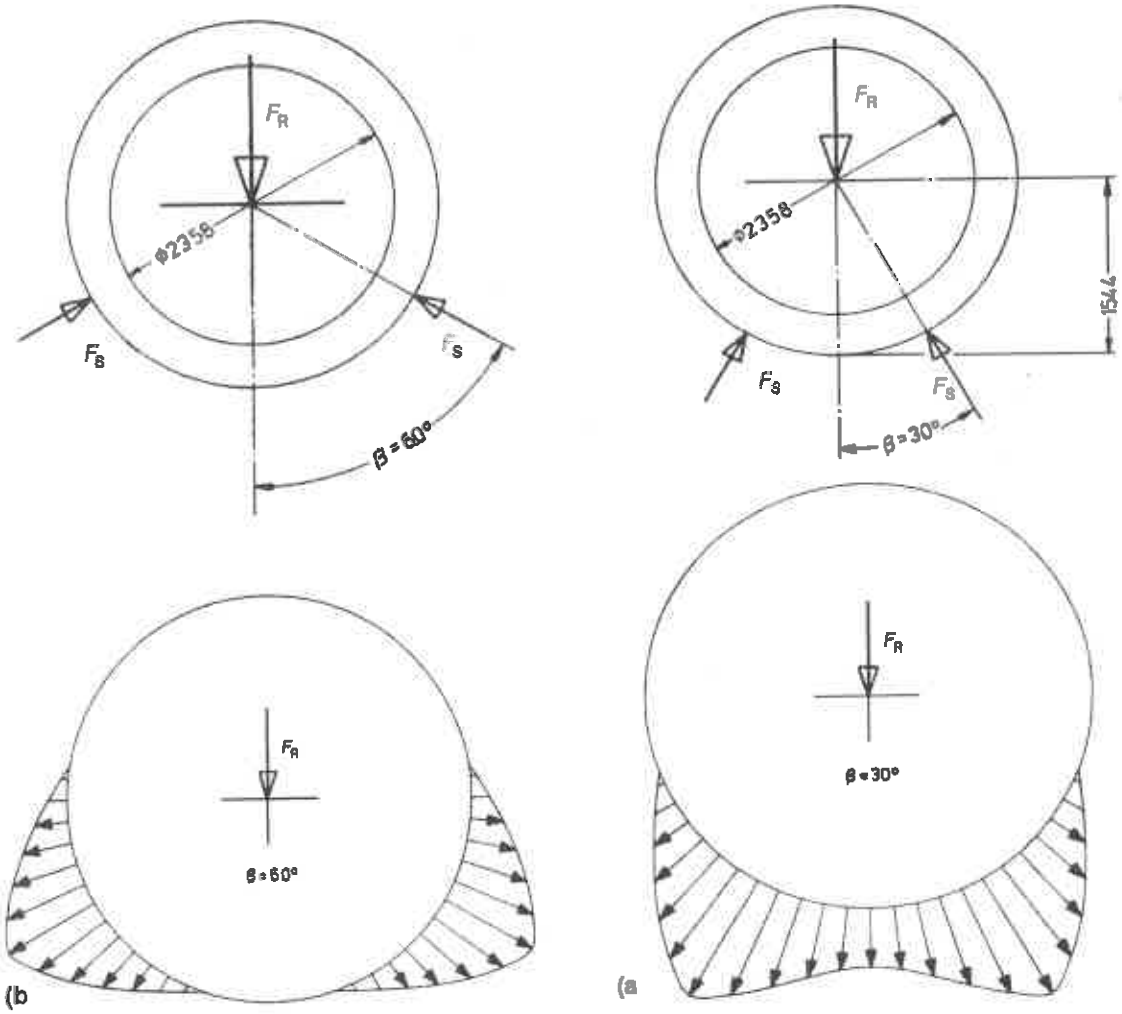
در سکوی لنگراندازی مشابه سکویی که بیرینگ نشانداده شده درشکل ۴-۳۸ در آن نصب شده است، یک محل نصب بیرینگ وجود دارد که در آن قسمت سازه نشیمنگاه در راستای شعاعی مهار شده است.

شکل ۴-a۱۳۹ یک مجموعه بیرینگ را نشان می‌دهد که در آن یک رولربیرینگ مخروطی دو ردیفه با ابعاد

420 mm × 2332 mm × 1832 mm وجود دارد. بیرینگ، داخل نشیمنگاه که نسبت به محور، متقارن بوده و سطح مقطع جعبه‌ای شکل دارد جازده می‌شود. این رینگ نشیمنگاه با چهار لوله که به رینگ جوش شده‌اند و به‌عنوان نقاط مهار شعاعی عمل می‌کنند در محل خود نگه‌داشته می‌شود. بار مهار اولیه در شکل ۴-۱۳۹b (دیاگرام A) و رینگ نشیمنگاه که رولربیرینگ مخروطی را در خود جای داده، به‌عنوان شکل ایده‌آل این نوع نشیمنگاه نشان داده شده است. یک بار شعاعی به میزان 8500 kN از طریق شفت، که صلب فرض شده است، به‌وسیله بیرینگ و رینگ نشیمنگاه به دو نقطه از چهار نقطه مهار که با خط عمود زاویه 30° تشکیل می‌دهند، منتقل می‌شود. قسمت پایین شکل، توزیع بار بیرینگ را نشان می‌دهد. در دو نقطه مهار که در راستای شعاعی بیرینگ قرار دارند، افزایش بار اعمالی به رولر دیده می‌شود. این مقدار 1.4 برابر بیشتر از حداکثر بار اعمالی به رولر نصب شده در نشیمنگاه صلب است. از این رو، مهار با نشیمنگاه شعاعی، تنش‌های اعمالی به بیرینگ را افزایش می‌دهد. اگر نیروهای مهار روی رینگ نشیمنگاه مشابه اعمال شود و در نقاط مهار، زاویه 60° با خط عمود بسازد و بار شعاعی فقط 3700 kN باشد، در نزدیکی نقاط مهار دو ناحیه اعمال بار جداگانه تشکیل خواهد شد. همچنین حتی اگر بار خارجی F_R بیرینگ به میزان قابل توجهی پایین باشد، باز بار رولر به اندازه مورد اول، بالا خواهد بود. با زاویه مهار 60°، تنش‌های بیرینگ برای این نشیمنگاه بسیار

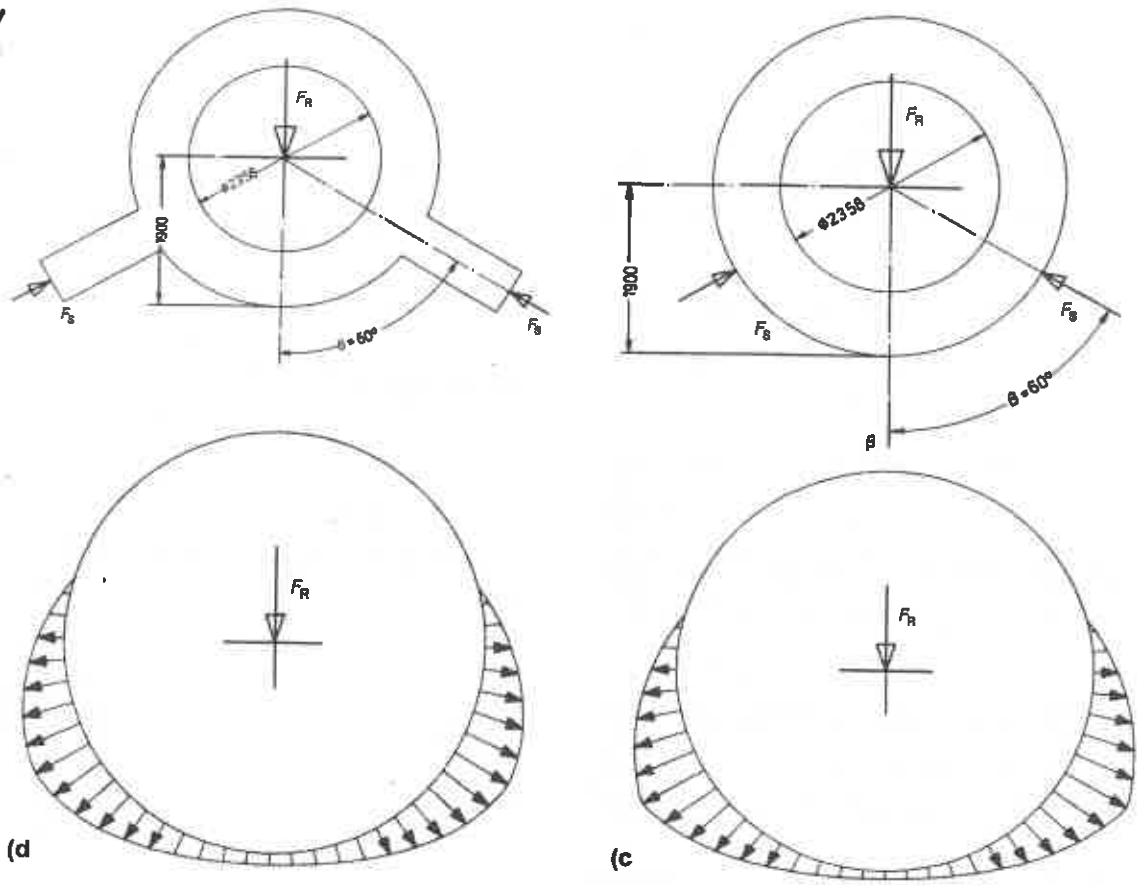


شکل ۴-۱۳۹a موقعیت بیرینگ با رولربیرینگ مخروطی دو ردیفه



شکل ۴-b۱۳۹ طرح ایده‌آل بدنه نشیمنگاه‌های رینگی شکل با مهار شعاعی با توزیع بار بیرینگ نشانداده شده: a) زاویه مهار °30، b) زاویه مهار °60، d) مهار بدنه نشیمنگاه رینگی با لوله‌ها، زاویه مهار °60، e) بار از نوع کششی برای نشیمنگاه برای نشیمنگاه رینگی شکل با مهار شعاعی، زاویه مهار °60

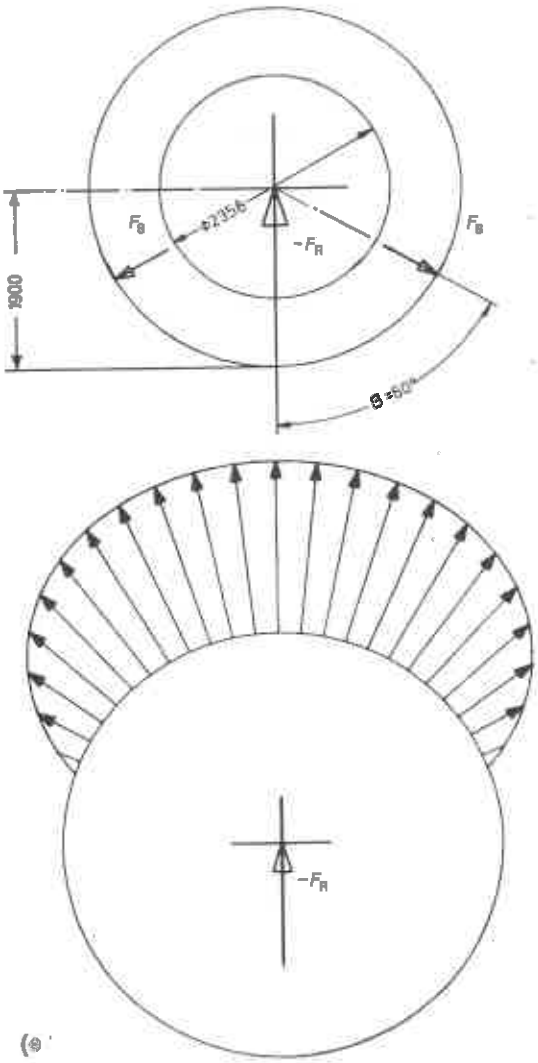
بالاتر از مقدار مشابه برای یک نشیمنگاه صلب است. بار رولر تا 2.5 برابر مقدار ماکزیمم برای نشیمنگاه صلب افزایش می‌یابد. در مقایسه با مواردی عادی، این مقادیر به میزان غیرمنطقی بالا است، درنتیجه نشیمنگاه باید تقویت شود. ارتفاع جعبه نشیمنگاه رینگی شکل، در مراحل اولیه محاسبات دو برابر می‌شود. این به آن معنی است که در ممان اینرسی افزایش 8 برابری خواهیم داشت.



شکل ۴-۳۹b (ادامه)

با زاویه مهار 30°، تقویت نشیمنگاه باعث می‌شود که حداکثر بار اعمالی به رولر تقریباً فقط 8% بیشتر از بار حداکثر در نشیمنگاه صلب باشد. این مقدار یک مقدار خوب برای بیرینگ در یک نشیمنگاه الاستیک است. دیاگرام C نتایج تقویت بدنه نشیمنگاه رینگی شکل با زاویه مهار 60° را نشان می‌دهد. تقویت نشیمنگاه رینگی شکل به میزان قابل توجهی توزیع بار در بیرینگ را اصلاح می‌کند اما حداکثر بار رولر در نقاط مهار هنوز بیشتر از مقدارحداکثر بارِرولر در نشیمنگاه صلب خواهد بود.

از آنجا که در واقعیت، نشیمنگاه رینگی شکل، از دو نقطه مهار نمی‌شود بلکه از سطح لوله‌ها مهار می‌شود، این نوع مهار در محاسبات دیگری نیز مورد بررسی قرار گرفته است. برای این مورد، قسمتی از لوله‌ها به مدل محاسباتی نشیمنگاه (دیاگرام D) اضافه می‌شود. توزیع بار مربوطه نشان می‌دهد که بارهای رولرها در ناحیه



شکل ۴-۱۳۹b (ادامه)

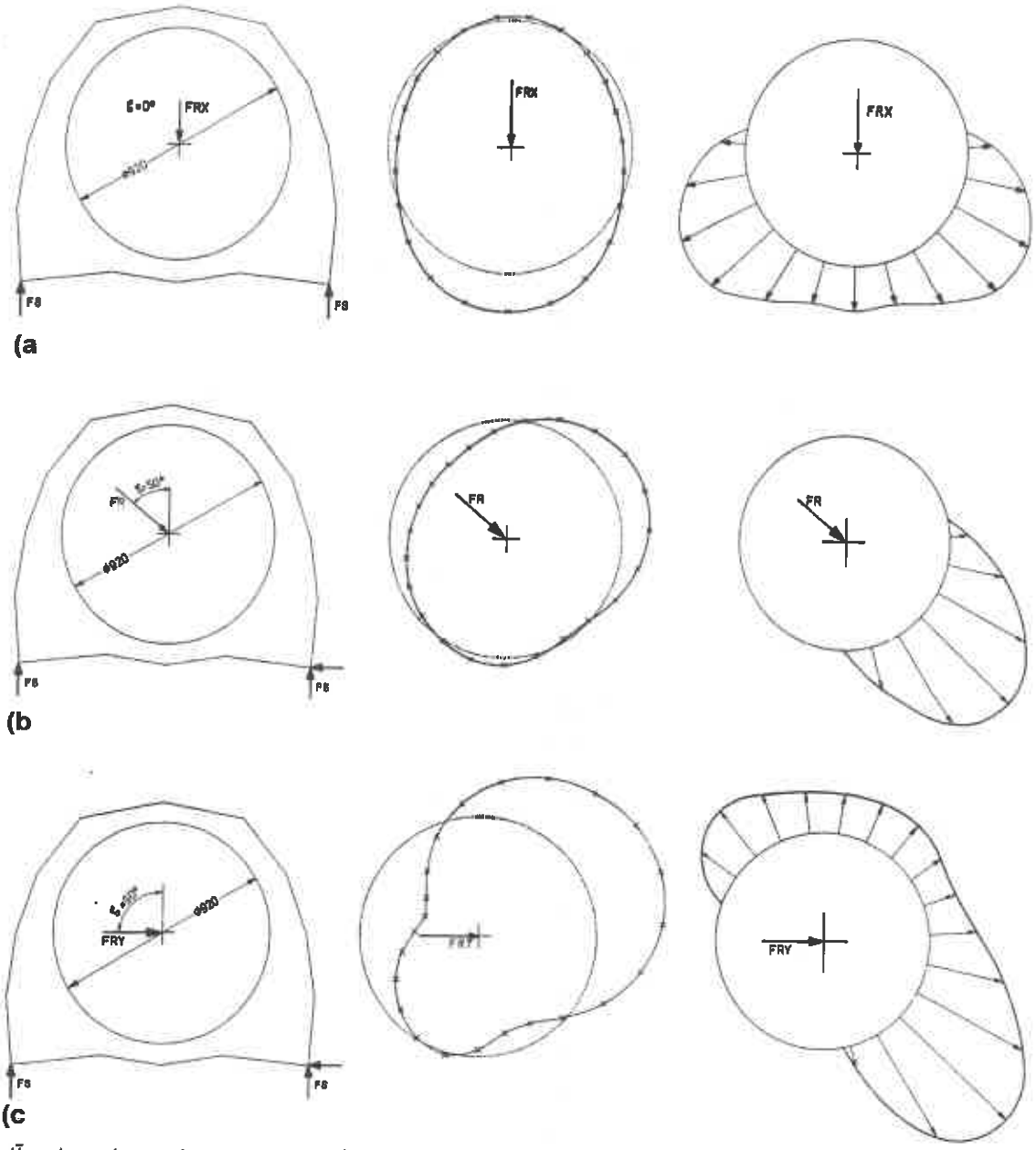
مهار لوله‌ها اندکی کمتر هستند. هر چند، این مقادیر هنوز بالاتر از مقادیر نشیمنگاه‌های صلب هستند.

مواردی که تا اینجا توضیح داده شد تحت بار فشاری بودند. اما دیاگرام E نتایج مربوط به بار کششی با زاویه مهار 60° را نشان می‌دهد. مشابه نتایج موجود در شکل ۴-۱۳۸b (ردیف پایین)، توزیع بار در بیرینگ، مطلوب است. هر چند، بار اعمالی به رولرها در ناحیه اعمال کم و زیاد می‌شود زیرا تیمه بالایی نشیمنگاه، رولرهای تحت بار را مشابه یک تسمه الاستیک دربر گرفته است. حداکثر بار رولر تقریباً منطبق با حداکثر بار رولر در نشیمنگاه صلب است.

۴-۳-۵ اعمال بار تحت زاویه به یک بدنه نشیمنگاه

معمولاً، نشیمنگاه‌های پایه‌دار را برای تحمل بارهایی که در راستای عمودبرسطح مهارشده و به سمت پایین هستند طراحی کرده‌اند. اما در بعضی موارد این نشیمنگاه‌های بیرینگ‌های غلتشی باید بارهای شعاعی را نیز تحمل کنند که به خاطر زاویه‌دار بودن راستای اعمال آنها، دیگر بر روی سطح مهار نشیمنگاه اعمال نشده و حتی گاهی در راستای موازی با سطح مهار اعمال می‌شوند. تأثیر اعمال بار تحت زاویه بر توزیع بار بیرینگ‌های غلتشی در مثال پایین نشان داده شده است.

شکل ۴-۴۰ (چپ) مدل محاسباتی ایده‌آل نشیمنگاه پایه‌دار مخصوص پولی‌های تسمه نقاله در نقاله‌ها را نشان می‌دهد. نشیمنگاهی که قطر سوراخ داخل آن 920 mm و پهنای آن 400 mm بوده و یک رولربیرینگ کروی 241/560 را در خود جای داده است. نشیمنگاه از دو نقطه که نسبتاً فاصله زیادی از هم دارند مهار شده است. نشیمنگاه پایه‌دار در این دو نقطه بر روی پایه سازه فولادی نگهدارنده نشیمنگاه قرار گرفته است.



شکل ۴-۴۰ تغییر شکل و توزیع فشار در بیرینگ غلتشی مونتاژ شده در نشیمنگاه پایه‌دار. چپ : طرح خارجی ایده‌آل نشیمنگاه. مرکز : تغییر شکل نشیمنگاه (با بزرگنمایی شعاعی 920 برابر). *راست* : توزیع فشار در رولربیرینگ کروی. ردیف a) : بار عمودی. ردیف b) بار با راستای اعمال زاویه‌دار. ردیف c) بار افقی

پایه‌ها به‌عنوان نقاط سخت عمل می‌کنند زیرا آنها نقاط انتقال بار هستند. تحت بار شعاعی رو به پایین به میزان 1716 kN، سوراخ داخل به شکل یک بیضی عمودی که در ردیف A نشانداده شده است درخواهد آمد. در راس پایین نشیمنگاه، میزان تغییر شکل به 0.175 mm می‌رسد. توزیع بار تولید شده در رولربیرینگ کروی به وسیله الاستیسیته نشیمنگاه در نقاط مهار، افزایش بار اعمالی به رولرها را نشان می‌دهد. از توزیع بار در بیرینگ، بار دینامیکی معادل P را می‌توان به‌عنوان میزان تنش دینامیکی اعمالی به بیرینگ محاسبه نمود. این بار دینامیکی در نشیمنگاه الاستیک با تنش ایجاد شده در نشیمنگاه صلب مقایسه شده است، که در آنجا با بار شعاعی F_R برابر است. خارج قسمت P/F_R افزایش در تنش دینامیکی بیرینگ را تعیین می‌کند. برای بار در ردیف A، $P/F_R = 1.19$ است، درنتیجه تنش بیرینگ داخل محدوده تلرانس قرار دارد.

ردیف B نتایج کاربرد بار متفاوت ولی در نشیمنگاه پولی تسمه نقاله مشابه را نشان می‌دهد. بار شعاعی اعمالی بر بیرینگ، به صورت زاویه‌دار نسبت به سطح مهار نشیمنگاه اعمال می‌شود. بار برآیند $F_R = 1716$ kN با 50° زاویه نسبت به خط عمود به دو مولفه تقسیم می‌شود. بار به نقطه مهار جلویی سمت راست نشیمنگاه اعمال می‌شود. در کاربرد عملی، نشیمنگاه در جهت عرضی توسط یک مانع ثابت می‌شود. در این حالت، بار حاصل از رولرها باعث ایجاد یک تغییر شکل *نامتقارن* خواهد شد. در این وضعیت، نشیمنگاه حول نقطه اتکای سمت راست خم می‌شود و بدین صورت طرف راست نشیمنگاه تقریباً به اندازه 0.135 mm به طرف بیرون منحرف می‌گردد. با توجه به این که بار خارجی وارد بر بیرینگ به طرف راست است، توزیع فشار نیز در ناحیه نقطه اتکای سمت راست بیرینگ خواهد بود. در زاویه 90°، مقدار بار وارده بر رولربیرینگ کم است، بدین ترتیب تنش زیاد در حالت $P/F_R = 1.37$ اتفاق می‌افتد. ردیف C در شکل فوق، حالتی‌را نشان می‌دهد که بار 1716 kN به‌صورت موازی با سطح تکیه‌گاه زیرین بیرینگ، به آن وارد می‌شود. وضعیت تکیه‌گاهی در این وضعیت، مشابه وضعیت قبلی است.

نیروی خارجی شعاعی به طرف راست بیرینگ، یعنی قسمت بالایی آن که حالت الاستیکی زیادی دارد، هدایت می‌شود. بنابراین در این قسمت از بیرینگ تغییر شکل الاستیک بزرگی به‌وجود می‌آید. قسمت پایینی نشیمنگاه توسط تکیه‌گاه، محکم مهار شده و تنها اندکی تغییر شکل در آن ایجاد می‌گردد. در نتیجه یک تغییر شکل شدیداً *نامتقارن* در نشیمنگاه به‌وجود می‌آید، به طوری که قسمت بالایی حدود 0.32 mm تغییر شکل پیدا می‌کند. تکیه‌گاه طرف راست نشیمنگاه نیز همانند یک جسم سخت به بیرینگ فشار وارد کرده و بدین ترتیب بار اعمالی به رولرها افزایش می‌یابد. قسمت بالایی نشیمنگاه به دلیل الاستیسیته بالا، خود را با بیرینگ هماهنگ و تنظیم کرده و بنابراین بار اعمالی به رولرها در این ناحیه کم می‌باشد.

ناحیه تحت بار در این شرایط، طول 240° از محیط بیرینگ را دربرمی‌گیرد. با توجه به باری که به صورت موازی با روبند و به‌طرف پایین نشیمنگاه اعمال می‌شود، یک پیش تنش داخلی در بیرینگ ایجاد می‌گردد. اگر $P = 1.68\ F_R$ باشد، تنش دینامیکی بیرینگ زیاد و طبعاً *نامطلوب* خواهد بود.

این موضوع نشان می‌دهد که در صورت امکان، بار وارده بر بیرینگ بهتر است بر روی روبند نگهدارنده نشیمنگاه اعمال گردد. مخصوصاً در مورد نشیمنگاه‌های بزرگ الاستیک ایستاده، انتقال یک گشتاور که مانند ردیف C، به‌صورت یک بار افقی در بیرینگ پدید می آید، همیشه با تنش‌های بزرگی در بیرینگ برابر خواهد بود. برای اجتناب از این پدیده می‌توان نشیمنگاه را به اندازه 90° نسبت به راستای اعمال نیرو جابه‌جا کرده و بدین ترتیب نیرو را به سطح تکیه‌گاهی نشیمنگاه هدایت نمود. این قاعده که انتقال مستقیم نیرو باعث ایجاد تنش‌های مطلوب می‌شود، در مورد نشیمنگاه بیرینگ‌ها نیز صادق است.

۴-۳-۶ نشیمنگاه‌های رولربیرینگ‌های اعوجاج یافته

در مثال قبلی، تأثیر الاستیسیته نشیمنگاه، روی توزیع بار در بیرینگ، براساس بار شعاعی بیرینگ مورد بررسی قرار گرفت. گاهی اوقات نیروهای دیگری که از میان بیرینگ منتقل نمی‌شوند، ممکن است سبب ایجاد تغییر شکل الاستیک در محل بیرینگ شود. در نتیجه، سوراخ نشیمنگاه و رینگ خارجی قبل از اینکه بار کاری به آنها وارد شود، از حالت دایره‌ای خارج شده و بدین ترتیب بیرینگ دچار اعوجاج می‌گردد. این تغییر شکل الاستیکی بسته به موقعیت و اندازه بیرینگ، کم و بیش در توزیع فشار و تنش‌های بیرینگ تأثیر خواهد داشت. بنابراین درصورت استفاده از نشیمنگاه الاستیک برای بیرینگ‌ها، لازم است هر از چند گاهی بررسی شود که آیا بیرینگ در اثر نیروهای غیرکاری وارده، دچار اعوجاج شده است یا خیر. اعوجاج در یک بیرینگ همچنین ممکن است در اثر اختلاف حرارت و توزیع دما در سازه دربرگیرنده بیرینگ نیز به‌وجود آید و این پدیده باید حتماً هنگام طراحی سازه مدنظر قرار گیرد.

همچنین باید به این نکته توجه کرد که در استفاده از نشیمنگاه‌های الاستیک، لقی بیرینگ کم و زیاد نشود، زیرا الاستیسیته زیاد نشیمنگاه‌ها ممکن است لقی موجود در بیرینگ را به صفر برساند. در نشیمنگاه‌های الاستیک، بار وارده به اجزاء غلتنده در بیرینگ‌های لقی‌دار، با بیرینگ‌های بدون لقی تفاوت بسیاری دارد.

۴-۳-۷ نتیجه‌گیری

هنگامی که یک بیرینگ در یک سازه با الاستیسیته بالا به‌کار می‌رود، باید توجه کرد که نیروهای انتقالی از نشیمنگاه به سازه بدرستی انجام گیرد. دراین رابطه باید از اعمال فشار نقاط سخت سازه به ناحیه توزیع بار در بیرینگ جلوگیری به عمل آورد، زیرا در غیر این صورت بارهای وارد به اجزاء غلتنده و تنش‌های اعمالی به بیرینگ افزایش خواهد یافت. تنش‌های مطلوب در بیرینگ درحالتی به‌وجود می‌آید که نیروهای تکیه‌گاهی به‌صورت مماسی به نشیمنگاه انتقال یابند یعنی با مهار کردن بیرینگ به‌صورت کمربندی؛ دراین صورت می‌توان با نشیمنگاه‌های خیلی الاستیک نیز تنش‌های مطلوب ایجاد کرد.

هنگامی که در قسمتی از سازه که بیرینگ در آن قرار دارد، احتمال تغییر شکل به دلیل اعمال فشارهای خارجی یا تغییرات حرارتی وجود دارد، باید حتماً از اعوجاج بیرینگ در اثر این تنش‌ها جلوگیری نمود.

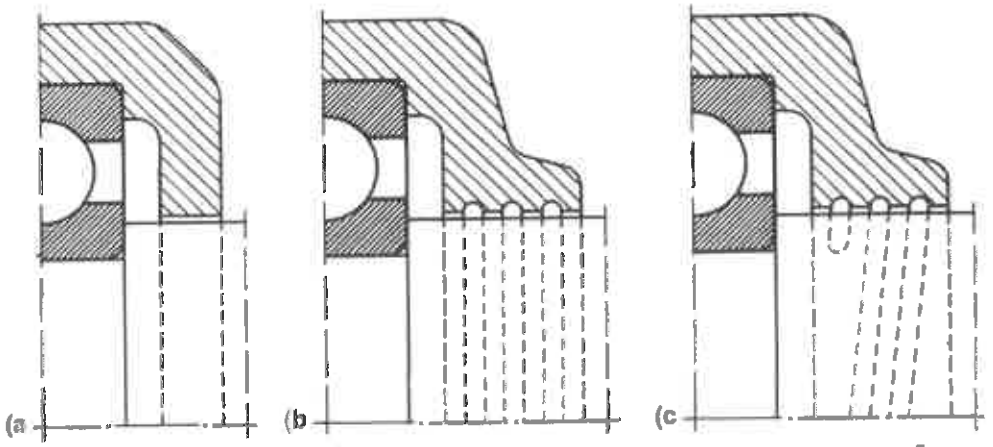
۴-۴ آب‌بندی بیرینگ

اجزاء آب‌بندی در یک بیرینگ دو وظیفه دارند، اول اینکه مواد روانکاری داخل بیرینگ را حفظ کنند و دوم این که از ورود آلودگی‌های خارجی به درون بیرینگ جلوگیری نمایند. اگر ذرات خارجی به درون بیرینگ نفوذ کرده و به هنگام گردش بیرینگ از میان اجزاء غلتنده و رینگ‌ها عبور نمایند، باعث ایجاد فرورفتگی‌هایی در سطوح آنها و در نتیجه ایجاد نویز در بیرینگ شده و از عمر مفید آن کاسته می گردد. چنانچه این ذرات خارجی ساینده باشند، سبب سایش در اجزاء و به دنبال آن افزایش لقی آنها می‌شوند که در نهایت به کاهش دقت بیرینگ خواهد انجامید. ورود آب و دیگر مایعات و گازهای خورنده به درون بیرینگ نیز اثر مخرب داشته و باید از ورود آنها جلوگیری شود (ر.ک. قسمت ۱-۲-۳ و جدول ۱-۸). دو نوع حلقه آب‌بندی در بیرینگ‌ها استفاده می‌شوند :

– حلقه‌های آب‌بندی بدون تماس
– حلقه‌های آب‌بندی تماسی

۴-۴-۱ حلقه‌های آب‌بندی بدون تماس

با توجه به اینکه در استفاده از حلقه‌های آب‌بندی بدون تماس، اندکی فاصله بین این حلقه‌ها و شفت در حال دوران وجود دارد، تنها اصطکاک موجود، اصطکاک مواد روانکار است. بنابراین دوام این نوع حلقه‌های آب‌بندی زیاد است و تا مدت‌های زیادی به‌خوبی کار می‌کنند. همچنین از آنجایی که حرارت ایجاد شده حین دوران نیز *ناچیز* است، می‌توان این گونه حلقه‌های آب‌بندی را در سرعت‌های دورانی زیاد، به‌خوبی استفاده کرد. فاصله اندکی بین نشیمنگاه نگهدارنده بیرینگ (که در اینجا وظیفه حلقه آب‌بندی غیرتماسی را انجام می‌دهد) و شفت وجود دارد (**شکل ۴-۴۱a**) به آسانی مانند یک حلقه آب‌بندی عمل کرده و اجازه عبور روغن و مواد خارجی را *نمی‌دهد*. تحت شرایط مطلوب کاری، سایش بیرینگ آنقدر اندک است که به مرور زمان هیچگونه جابه‌جایی شفت نسبت به نشیمنگاه به‌وجود *نمی‌آید* و بنابراین می توان فاصله آن دو را خیلی کوچک در نظر گرفت.



شکل ۴-۴۱ آب‌بندی کردن غیر تماسی، **a)** فاصله اندک بین شفت و نشیمنگاه به‌صورت ساده، **b)** فاصله شفت با نشیمنگاه شیاردار، **c)** فاصله شفت با نشیمنگاه شیاردار مارپیچ

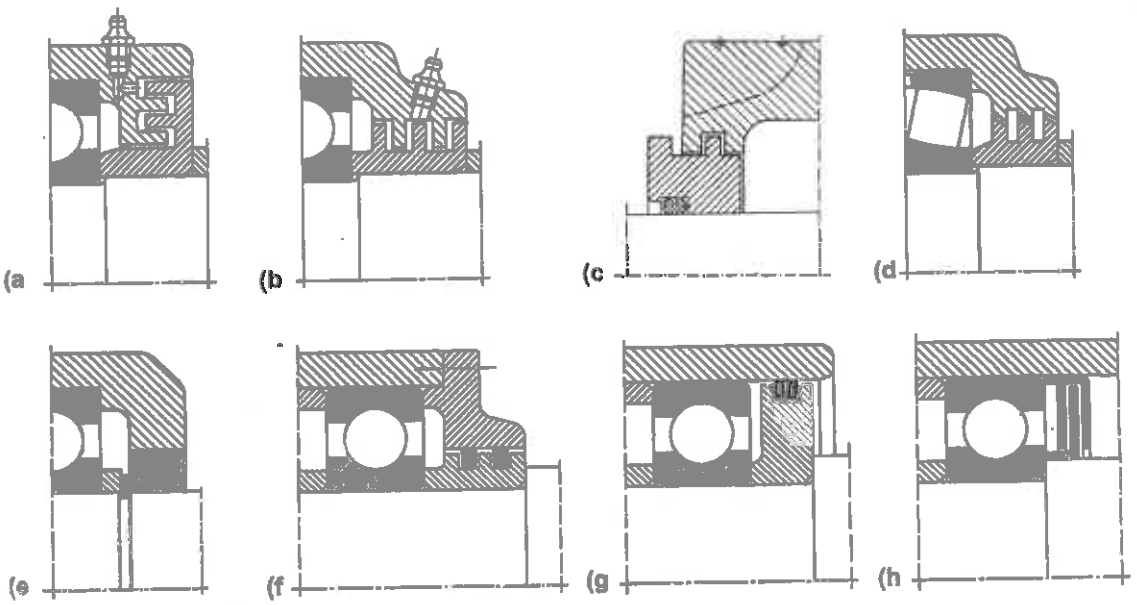
این فاصله آب‌بندی کننده، با توجه به لنگی شفت و میزان عدم هم محوری و انحراف شفت نسبت به نشیمنگاه تعیین می‌گردد. در بیرینگ‌های کوچک، میزان فاصله بین شفت و نشیمنگاه را 0.1 – 0.3 mm در نظر می‌گیرند.

عمل آب‌بندی کردن غیرتماسی را می‌توان با تراشیدن چند شیار (**شکل ۴-۱۴۱b**) در داخل سوراخ نشیمنگاه که به فاصله اندکی نسبت به شفت قرار دارد، بهبود بخشید. هنگامی که از گریس برای روانکاری استفاده می‌شود، گریس درون این شیارها پر شده و از عبور گریس داخل بیرینگ به بیرون و ذرات خارجی به درون جلوگیری می‌کند. هنگامی که از روغن برای روانکاری استفاده شود، معمولاً این شیارها را به صورت مارپیچ می‌تراشند، به طوری که جهت گردش شفت خلاف جهت این شیارهای مارپیچ باشد (**شکل۴-۱۴۱c**) و بدین ترتیب روغن نفوذ کرده به میان فضای خالی بین شفت و نشیمنگاه، در اثر گردش شفت مجدداً به داخل هدایت شده و متقابلاً ذرات خارجی به بیرون رانده می‌شوند. این شیارهای مارپیچ را می‌توان برروی شفت نیز تراشکاری کرد. به این نوع آب‌بندی، آب‌بندی توسط شفت رزوه شده نیز گفته می‌شود.

آب‌بندی غیرتماسی با شیار مخصوصاً وقتی این شیارها با گریس سفت پر شده باشند، خیلی مؤثر خواهد بود (**شکل‌های ۴-۴۲ و ۴-۵۵**). وقتی که بیرینگ در یک محیط آلوده کار می‌کند، لازم است این گریس هر از چندگاهی تعویض شود.

تعداد شیارها به میزان آلودگی محیط کار دستگاه بستگی دارد. چنانچه شیارها به‌صورت محیطی و شعاعی باشند، برای نصب و بازکردن آن لازم است از نشیمنگاه دوتکه استفاده گردد (**شکل‌های ۴-۱۴۲c, b**). ویژگی شیارهای محیطی این است که در اثر دوران شفت، گریس به طرف بیرون پرتاب شده و در انتهای شیارهای U- شکل باقی می‌ماند و بدین ترتیب گریس عمل روانکاری را نیز انجام خواهد داد.

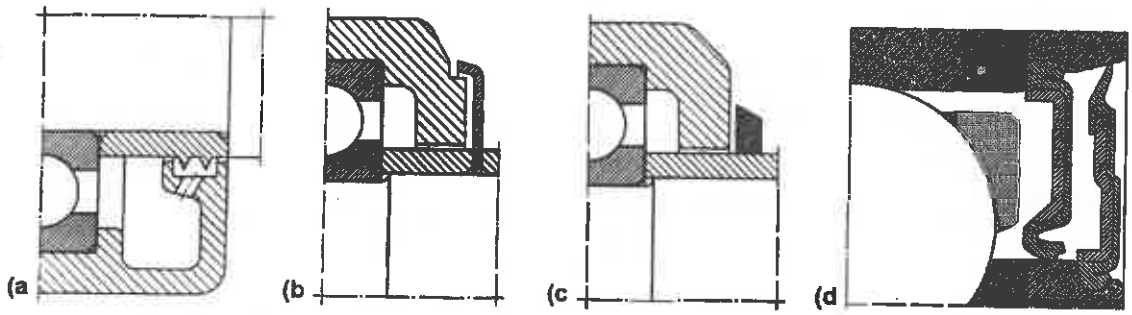
هنگامیکه بیرینگ از نوع خود تنظیم باشد، استفاده از شیارهای آب‌بندی به ترتیبی که در **شکل ۴-۱۴۲a, b, c** نشانداده شده، مشکل آفرین خواهد بود. در این موارد باید از شیارهای آب‌بندی با لبه‌های شیبدار استفاده نمود (**شکل ۴-۱۴۲d**). این شیب به گونه‌ای طراحی شده که با انحرافات جزئی شفت هماهنگ باشد. شیارهای آب‌بندی با فرم دندانه اره‌ای در حلقه‌های آب‌بندی آماده به‌کار می‌روند (**شکل ۴-۱۴۲e**). فاصله شعاعی شیارها در این نوع حلقه آب‌بندی براساس حداکثر لقی محوری بیرینگ انتخاب می‌شود. یک روش ساده در ایجاد شیارهای آب‌بندی که حجم کمی را نیز اشغال می‌کند، استفاده از رینگ‌های پیستون است (**شکل ۴-۱۴۲f**). این رینگ‌ها تحت فشار به داخل سوراخ نشیمنگاه بیرینگ رانده می‌شوند و شیارهای روبه‌روی آنها در بوش مونتاژ شده روی شفت، با لقی مناسبی نسبت به ابعاد رینگ‌ها تراشیده می‌شود. رینگ‌های پیستون باید طوری در نشیمنگاه بیرینگ جاسازی شوند که چاک‌های آنها در کنار هم *نباشند*. به جای رینگ پیستون گاهی اوقات می‌توان از فنرهای بشقابی گرد نیز استفاده نمود (**شکل ۴-۱۴۲g**). این فنرها را می‌توان هم در نشیمنگاه و هم بر روی شفت جاسازی نمود. با این روش‌ها می‌توان با صرف هزینه اندک، شیارهای آب‌بندی ایجاد کرد.



شکل ۴-۴۲ انواع حلقه‌های آب‌بندی غیرتماسی شیاردار (Labyrinth) : a) حلقه با شیارهای محوری، b, c) حلقه با شیارهای محیطی، d) حلقه شیاردار با لبه‌های شیب‌دار، e) حلقه شیاردار آماده مصرف، f) ایجاد حلقه آب‌بندی شیاردار با رینگ‌های پیستون، g) ایجاد حلقه‌های آب‌بندی شیاردار با فنرهای بشقابی، h) ایجاد حلقه‌های آب‌بندی با واشرهای لبه‌دار پرسکاری شده.

در تولید انبوه، حلقه‌های آب‌بندی غیرتماسی شیاردار را معمولاً از ورق‌های فلزی پرسکاری شده و به‌صورت واشرهای لبه‌دار می‌سازند که لبه‌های آنها تحت فشار بر روی شفت یا داخل نشیمنگاه مونتاژ می‌شوند (شکل ۴-۴۲h). در مواردی که بیرینگ با روغن روانکاری شود و شفت بصورت افقی قرار گرفته باشد، استفاده از شیارهای روغن‌گیر (شکل ۴-۴۳a) بسیار مؤثر است. روغنی که از داخل نشیمنگاه به طرف خارج می‌خزد، بر اثر دوران شفت از انتهای لبه‌های شیار پرتاب شده و مجدداً به داخل نشیمنگاه باز می‌گردد و بدین ترتیب جلوی خروج روغن از فاصله میان شفت و نشیمنگاه گرفته می‌شود.

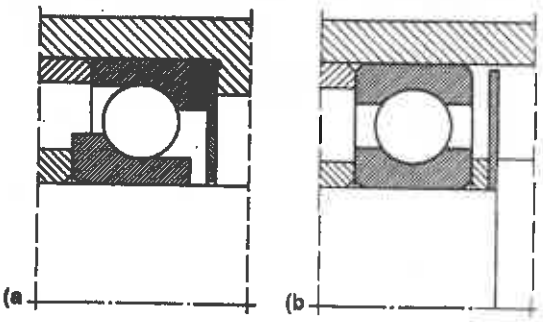
اگر میزان آلودگی خارج از بیرینگ زیاد باشد، بهتر است از یک حلقه محافظ در خارج نشیمنگاه استفاده شود (شکل ۴-۴۳b). برای این کار می‌توان به‌سادگی از یک واشر لاستیکی که بر روی شفت قرار می‌گیرد استفاده کرد (شکل ۴-۴۳c)، هر چند این واشر لاستیکی در سرعت‌های زیاد و بر اثر نیروی گریز از مرکز، ممکن است لق شود. برای جلوگیری‌از لق‌شدن واشر لاستیکی آن را در یک قاب فلزی قالب‌گیری می‌کنند (شکل ۴-۴۳d). از این واشرها لاستیکی با قاب فلزی در ساختمان توپی‌های مختلف خودروها، بسیار استفاده می‌کنند (شکل ۴-۵۵، جزء ۱۳ و مثال ۸-۱۹). در بیرینگ‌هایی



شکل ۴-۴۳ شیارهای آب‌بندی برای بیرینگ‌هایی که با روغن روانکاری می‌شوند: **a)** حلقه روغن‌گیر، **b)** واشر آب‌بندی لبه‌دار، **c)** واشرلاستیکی ساده، **d)** واشر لاستیکی قالب‌گیری شده در قاب فلزی (سمت راست) که بر روی یک بیرینگ آب‌بندی شده حفاظدار نصب شده است.

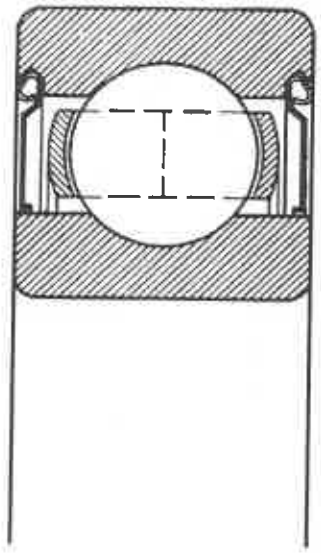
که با گریس روانکاری می‌شوند، از نوعی واشرهای تخت ساده برای جلوگیری از خروج گریس از مجموعه استفاده می‌شود. با توجه به طراحی دستگاه این واشرها را می‌توان بر روی شفت (**شکل ۴-۴۴b**) و یا داخل سوراخ نشیمنگاه (**شکل ۴-۴۴a**) جاسازی نمود. مقداری گریس که در فاصله جدایش بین شفت (یا محور) با واشر آب‌بندی جمع می‌شود، از ورود آلودگی‌ها به درون مجموعه بیرینگ جلوگیری می‌کند.

هنگامی که *نتوان* به دلیل محدودیت جا از حلقه‌های آب‌بندی استفاده نمود لازم است بیرینگ‌های با حفاظ



شکل ۴-۴۴ واشرهای حفاظ ساده

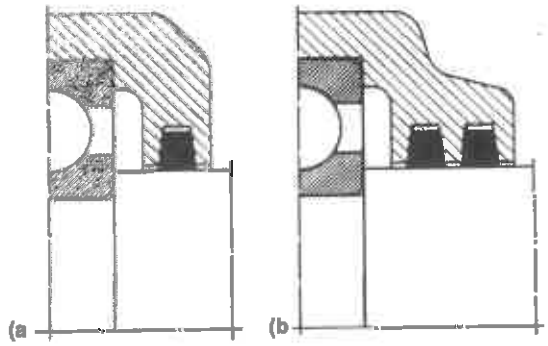
فلزی (**شکل ۴-۴۵**) را به‌کار گرفت. این بیرینگ‌ها در کارخانه سازنده با گریس پر شده‌اند. بعضی از بلبیرینگ‌های شیار عمیق فقط یک حفاظ فلزی دارند. این‌گونه بیرینگ‌ها نیزطبق استاندارد DIN 625/ISO 15 ساخته و عرضه می‌گردد.



شکل ۴-۴۵ بلبیرینگ شیار عمیق با حلقه‌های آب‌بندی

۴-۴-۲ حلقه‌های آب‌بندی تماسی

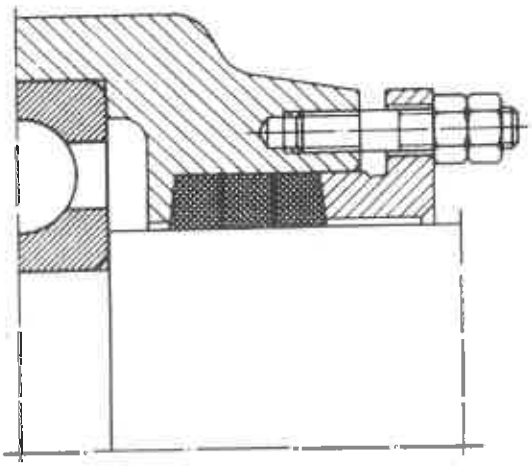
حلقه‌های آب‌بندی تماسی با سطح قطعه‌کار تماس دارند و برای آب‌بندی مطلوب باید یک فشار معین در خط تماس به آن اعمال نمود. البته این میزان فشار باید در حداقل ممکن نگه داشته شود، زیرا با افزایش فشار، اصطکاک و در نتیجه حرارت بیرینگ افزایش خواهد یافت. میزان افزایش اصطکاک، علاوه بر فشار اعمالی به حلقه آب‌بندی به عوامل دیگری نظیر نوع روانکار، صافی سطوح لغزنده و سرعت دوران نیز دارد. تمام انواع حلقه‌های آب‌بندی تماسی مورد سایش واقع می‌شوند و عمر مفید کاری آنها تحت تأثیر فشار تماس، روانکاری، جنس حلقه آب‌بندی، سرعت دوران، درجه حرارت و آلودگی می‌باشد. حلقه‌های آب‌بندی نمدی (**شکل ۴-۴۶**) ساده‌ترین نوع این حلقه‌های آب‌بندی هستند. حلقه‌های نمدی مخصوصاً برای آب‌بندی گریس مناسبند. سطح حلقه‌های نمدی پس از مدتی کار کردن، صاف شده و یک سطح آب‌بندی بدون فشار و خیلی خوب به‌وجود می‌آورد که مخصوصاً در برابر نفوذ آلودگی‌ها بسیار موثر عمل می‌کند.



شکل ۴-۴۶ حلقه‌های آب‌بندی نمدی

این حلقه‌ها را قبل از مونتاژ در روغن خیس می‌کنند. در صورتی که میزان آلودگی زیاد *نباشد*، یک حلقه نمدی کافی است ولی ممکن است لازم باشد از دو حلقه نمدی در کنار هم استفاده نمود. حلقه‌های نمدی را می‌توان تا دمای حداکثر 100 °C به‌کار برد. برای دمای بیش از 100 °C از الیاف PTFE، گرافیت و یا پلاستیک و الیاف شیشه مخلوط با PTFE یا گرافیت، در ساخت حلقه‌های نمدی استفاده می‌گردد. ابعاد حلقه‌های نمدی و شیارهای نصب آنها براساس DIN 5419 استاندارد شده‌اند.

بهترین آب‌بندی را می‌توان با استفاده از حلقه‌های آب‌بندی چندتایی تحت فشار به‌دست آورد (**شکل ۴-۴۷**). با سفت کردن پیچ‌های اعمال فشار، حلقه‌های آب‌بندی برروی شفت قرار گرفته و لقی ایجاد شده در اثر سایش از بین می‌رود. با استفاده از حلقه‌های آب‌بندی چند تایی اصطکاک زیادی ایجاد می‌شود و به همین علت از آنها تنها در بیرینگ‌های مفصلی که سرعت دوران آنها پایین است استفاده می‌گردد.

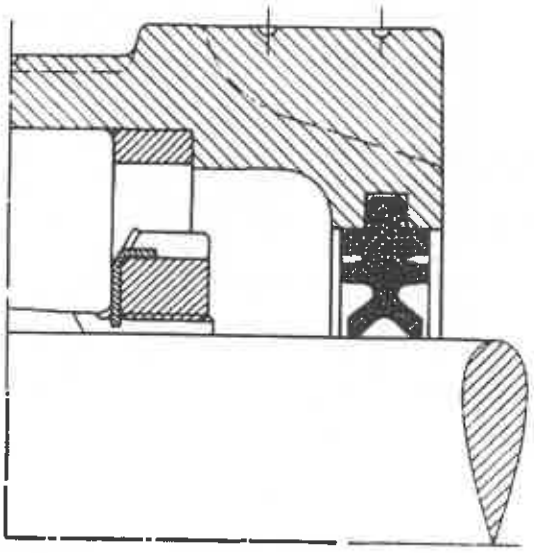


شکل ۴-۴۷ حلقه‌های آب‌بندی چندتایی

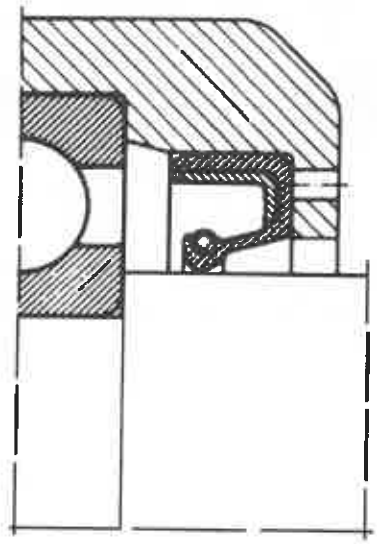
در **شکل ۴-۴۸** یک حلقه آب‌بندی دو لبه از جنس لاستیک نیتریل (NBR) نشانداده شده است. این حلقه **دو تکه است و براحتی می‌توان آن را در نشیمنگاه** نگهدارنده بیرینگ جاسازی نمود. لبه خارجی این حلقه از نفوذ آلودگی به داخل نشیمنگاه جلوگیری کرده و لبه داخلی از خروج ماده روانکار جلوگیری می‌کند. پس از مدتی کار کردن، گریس با نفوذ به فضای میان دو لبه به عمل آب‌بندی کمک می‌کند. با استفاده از این حلقه‌های دو لبه، شفت می‌تواند بدون ایجاد اشکال به اندازه ° 0.5 ± منحرف شود. حداکثر سرعت خطی یا محیطی شفت برای این حلقه‌ها m/s 13 می‌باشد. برای بررسی تنش‌های حرارتی به بخش ۱-۲-۳ رجوع کنید.

کاسه نمدها، گونه دیگری از حلقه‌های آب‌بندی تماسی هستند که در طرح‌های متنوع برای کاربردهای گوناگون طراحی و ساخته شده‌اند. شکل‌های اساسی کاسه نمدها در **شکل‌های ۴-۴۹** تا ۴-۵۱ نشانداده شده‌اند. قسمت اصلی یک کاسه نمد لبه داخلی آن است که پشت آن **یک فنرحلقوی قرار دارد که لبه را برروی شفت در حال** دوران می‌چسباند. قسمت لاستیکی کاسه نمد در یک حلقه لبه‌دار فلزی قالب گیری شده که کاسه نمد را به صورت یک قطعه صلب درمی‌آورد.

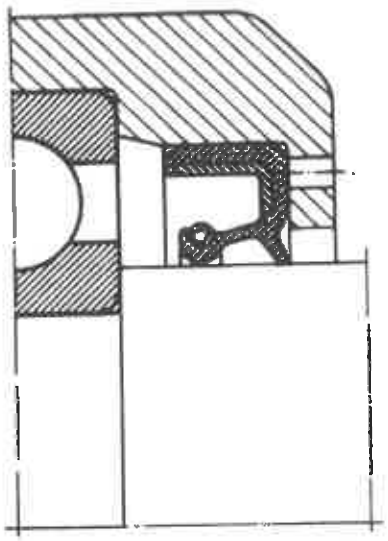
در طرح A (**شکل ۴-۴۹**) تنها یک لبه آب‌بندی وجود دارد. دو سطح زاویه‌دار در دو طرف لبه آب‌بندی اثر جابه‌جایی کمی در انتقال روغن از طرف زاویه کوچک به زاویه بزرگ‌تر دارد، یعنی روغن از زیر لبه آب‌بندی **جابه‌جا می‌شود (شکل ۴-۵۱). هنگامی که هدف** استفاده از یک کاسه نمد جلوگیری از خروج روغن از بیرینگ باشد، لبه آب‌بندی باید به طرف داخل (به سمت بیرینگ) باشد. اگر لازم باشد از نفوذ آلودگی نیز جلوگیری شود، بهتر است از کاسه نمدهای طرح AS استفاده شود که یک لبه گردگیر اضافی دارد (**شکل ۴-۵۰**).



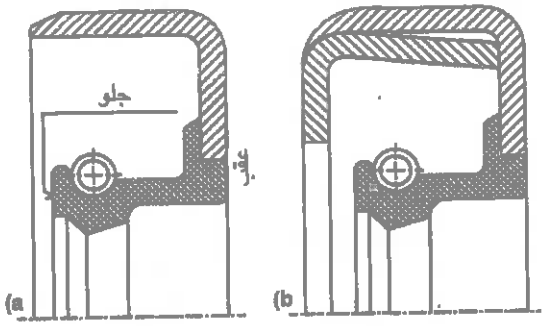
شکل ۴-۴۸ حلقه آب‌بندی دو تکه از جنس NBR جاسازی شده در نشیمنگاه ریخته‌گری شده.



شکل ۴-۴۹ کاسه نمد فرم A (DIN 3760)



شکل ۴-۵۰ کاسه نمد فرم AS با لبه گردگیر اضافی (DIN 3760)

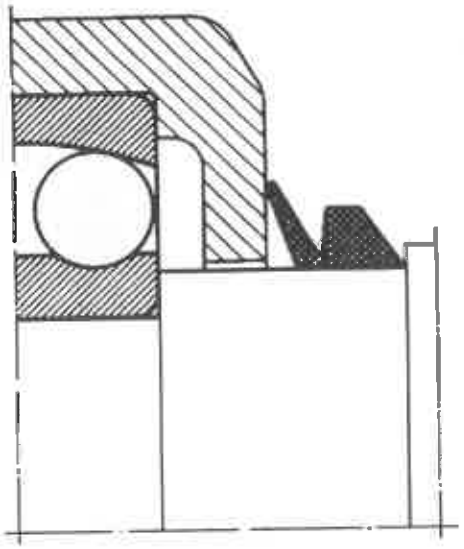


شکل ۴-۵۱ کاسه نمدهای فرم B و C (فرم‌های BS و CS مشابه فرم AS به‌صورت دو لبه هستند) مطابق DIN 3761

اگر هدف اصلی در استفاده از کاسه نمد جلوگیری از نفوذ رطوبت باشد، لبه آب‌بندی باید به طرف خارج قرار گیرد (شکل ۴-۵۵، جزء ۲۴).

قسمت‌لاستیکی کاسه نمدها معمولاً از لاستیک نیتریل (NBR) مقاوم در برابر روغن ساخته‌می‌شوند که قادر هستند محدوده دمایی 40 °C - تا 100 °C + را تحمل کنند (ر.ک. بخش ۱-۲-۳). حداکثر سرعت محیطی مجاز شفت به نحوه روانکاری، حرارت و جنس لاستیک وابسته است. اگر سطح خارجی شفت سختکاری شده و سنگ خورده باشد، لاستیک نیتریل می‌تواند تا حداکثر سرعت محیطی 12 m/s را تحمل کند. مقادیر کاری دقیق‌تر را می‌توان در مستندات DIN 3760 و DIN 3761 جستجو کرد.

حلقه آب‌بندی V- شکل که در شکل ۴-۵۲ نشانداده شده است، یک حلقه لبه‌دار با عملکرد آب‌بندی شعاعی و جانبی است. این حلقه‌ها از لاستیک ارتجاعی NBR ساخته می‌شوند و به دلیل خاصیت الاستیک می‌توان

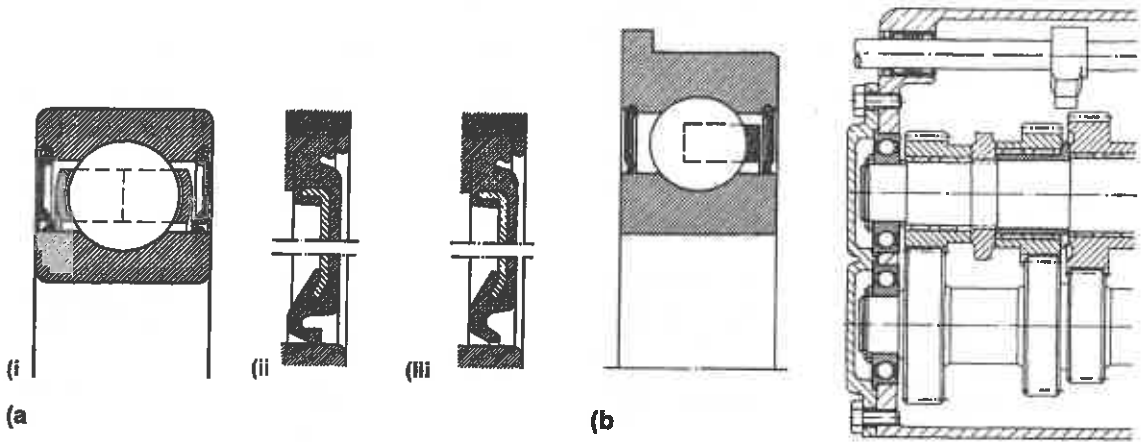


شکل ۴-۵۲ عملکرد لبه جانبی در یک حلقه آب‌بندی V-شکل

آنها را با فشار برروی محور لغزاند تا جایی که لبه جانبی آن به دیواره نشیمنگاه برخورد نماید. فرم این لبه به گونه‌ای است که می‌تواند حتی در وضعیتی که شفت با دیواره نشیمنگاه کاملاً عمود *نباشد*، نیز عمل آب‌بندی جانبی را انجام دهد. چنانچه این حلقه در داخل نشیمنگاه نصب شود می‌تواند عمل روغن پاشی و برگشت روغن به داخل مجموعه را نیز برعهده گیرد. در سرعت‌های محیطی بیشتر از 12 m/s این حلقه‌ها را باید به روشی برروی شفت ثابت کرد، وگرنه در اثر نیروی گریز از مرکز لق خواهد شد. با توجه به خاصیت ارتجاعی این حلقه‌ها، یک حلقه با اندازه خاص می‌تواند برروی شفتهای با قطرهای متفاوت (در یک محدوده خاص) نصب گردد. در صورتی که فضا برای نصب رینگ‌های آب‌بندی کافی *نباشد* می‌توان از بیرینگ‌های شیار عمیق با حلقه آب‌بندی یک طرفه یا دو طرفه استفاده نمود (**شکل ۴-۵۳**). بلبیرینگ‌های شیار عمیق با دو حلقه آب‌بندی (2RSR, 2RSD) در کارخانه سازنده با گریس‌پرشده‌اند و نیاز به گریسکاری *ندارند*.

حلقه‌های آب‌بندی نصب شده روی بلبیرینگ‌های شیار عمیق از جنس لاستیک مقاوم به روغن NBR ساخته می‌شوند (جدول ۱-۸)، که در یک حلقه فلزی قالب‌گیری شده‌اند. حلقه‌های الاستیکی استاندارد که در بلبیرینگ‌های معمولی RSR به‌کار رفته با کمی فشار برروی حلقه داخلی بیرینگ قرار می‌گیرند. طرح RSR در اغلب بلبیرینگ‌های شیار عمیق آب‌بندی شده به کار گرفته شده است. در این طرح، اصطکاک کم و آب‌بندی به‌خوبی با هم تلفیق شده‌اند.

در طرح RSD، لبه آب‌بندی حلقه لاستیکی، تماس اندکی با حلقه داخلی بیرینگ دارد (بدون فشار) و یا حتی ممکن است فاصله کمی از آن داشته باشد



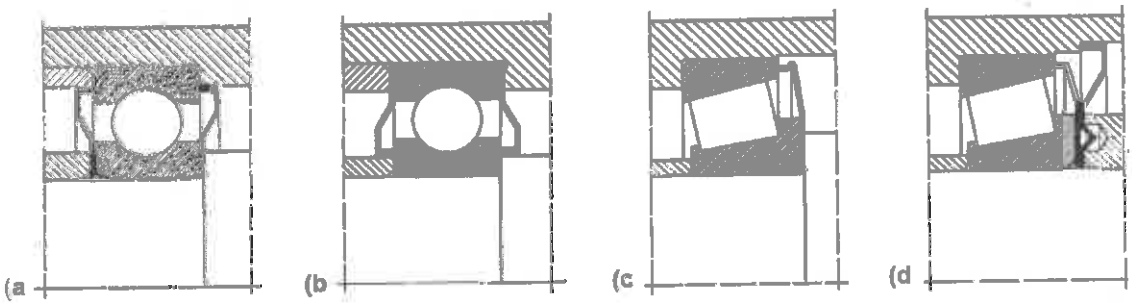
شکل ۴-۵۳ a) بلبیرینگ‌های شیار عمیق آب‌بندی شده : i) نمای برش خورده، ii) تماس لبه آب‌بندی با حلقه داخلی بیرینگ در طرح RSR، iii) فاصله کم لبه آب‌بندی با حلقه داخلی بیرینگ در طرح RSD؛ **b)** بلبیرینگ شیار عمیق آب‌بندی شده و مقاوم در برابر نفوذ آلودگی‌ها که در گیربکس خودروها به‌کار می‌رود.

و بنابراین در این روش اصطکاک به حداقل خواهد رسید، همانطور که در بلبیرینگ‌های شیار عمیق باحفاظ فلزی چنین است (شکل ۴-۴۵). حلقه‌های لاستیکی آب‌بندی در این دو نوع بلبیرینگ، یک لبه برجسته در محیط خارجی خود دارند که درون شیار ماشینکاری شده رینگ خارجی بیرینگ محکم جا می‌گیرد.

بدین ترتیب هنگام چرخش رینگ خارجی بیرینگ، که نیروی گریز از مرکز باعث جدا شدن روغن پایه از گریس و پرتاب آن به طرف رینگ خارجی می‌شود، این حلقه لاستیکی به خوبی از خروج روغن جلوگیری خواهد کرد. بلبیرینگ‌های طرح RSD را می‌توان با اطمینان تا حداکثر سرعت به گردش درآورد.

گونه دیگری از بیرینگ‌های آب‌بندی شده، به نام بیرینگ‌های پاک نیز وجود دارند که لازم است به آنها نیز اشاره شود. این بیرینگ‌ها در برابر نفوذ آلودگی‌ها از خارج کاملاً مقاوم هستند و توسط سازنده از گریس پرشده‌اند. این بیرینگ‌ها از هر دو طرف به دو حلقه آب‌بندی مجهز شده‌اند و برای استفاده در گیربکس‌های خودروها که با روغن روانکاری می‌شوند، مناسب هستند (شکل ۴-۵۳b).

حلقه‌های آب‌بندی این بیرینگ‌ها نیز همانند طرح RSD فاصله اندکی با رینگ داخلی دارند و بنابراین اصطکاک این بیرینگ‌ها کم و روانکاری آنها مطلوب است و از نفوذ آلودگی و براده‌های فلزی به درون آنها نیز جلوگیری شده است. به واسطه فاصله اندک بین حلقه آب‌بندی و رینگ داخلی بیرینگ، روغن موجود در گیربکس می‌تواند به قدر کافی به فضای داخلی بیرینگ نفوذ نماید. حلقه‌های آب‌بندی فنری (شکل ۴-۵۴)، از ورق فلزی‌نازک ساخته‌می‌شوند و برای آب‌بندی گریس خیلی خوب عمل می‌کنند. این حلقه‌ها محکم بر روی رینگ داخلی بیرینگ (شکل ۴-۵۴a) و یا بر روی رینگ خارجی بیرینگ (شکل ۴-۵۴b) قرار گرفته و لبه خم شده آنها رینگ دیگر بیرینگ را با فشار کمی لمس می‌کند. این حلقه‌های فنری را می‌توان در یک طرف یا دو طرف بیرینگ نصب کرد (شکل ۴-۵۴d) و فضای بین دو حلقه را از گریس پرنمود. از آنجایی که این حلقه‌ها خیلی باریک‌هستند، فضای کمی اشغال کرده و بدون اعمال تغییر در طراحی نشیمنگاه بیرینگ می‌توان آنها را درکنار بیرینگ‌های معمولی نصب کرد.



شکل ۴-۵۴ حلقه‌های آب‌بندی فنری

۴-۴-۳ مشکلات مربوط به حلقه‌های آب‌بندی و چاره آنها

هریک از اجزای آب‌بندی ذکر شده، برای کار و شرایط محیطی خاصی مناسب است. معمولاً جنبه‌های آب‌بندی مختلفی در کاربرد یک بیرینگ مورد نیاز است و بنابراین برای آب‌بندی ممکن است که چند جزء آب‌بندی استفاده گردد. به هنگام طراحی ترکیبی عناصر آب‌بندی باید توجه داشت که هزینه‌های مربوط به آب‌بندی با هزینه‌های مربوط به بیرینگ متناسب باشد.

در نظر گرفتن دوام، ایمنی عملکرد، وزن و حجم اشغال شده مربوط به‌عناصر آب‌بندی، بسیار اهمیت دارد. در **شکل ۴-۵۵** مثال‌هایی از نحوه نصب بیرینگ‌ها و عناصر آب‌بندی مختلف متناسب با شرایط محیطی و کاری مختلف نشانداده شده است. این مثال‌ها عرضه کننده روش‌های نمونه برای حل مشکلات رایج در نصب بیرینگ‌ها هستند و نه تنها در موارد خاص ارائه شده، بلکه در موارد کاری مشابه نیز قابل استفاده می‌باشند.

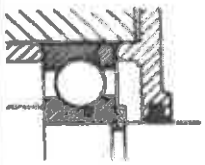
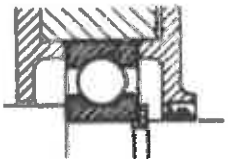
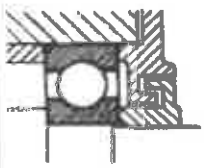
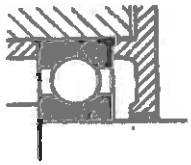
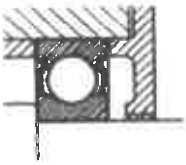
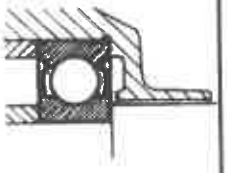
۴-۵ نصب کردن و بیرون آوردن

نصب کردن و بیرون آوردن بیرینگ‌ها، دقت و مراقبت زیادی را طلب می‌کند. نصب کردن رینگ‌های داخلی یا خارجی بیرینگ‌ها معمولاً نیاز به اعمال فشار دارد و از طرف دیگر، اجزاء غلتنده بیرینگ‌ها قطعات دقیقی بوده و بنابراین نسبت به اعمال نیروهای *نامناسب* حساس هستند. مثلاً به هنگام اعمال نیرو به بیرینگ برای نصب آن، این نیرو *نباید* از طریق اجزای غلتنده منتقل شود، زیرا این نیرو ممکن است به تغییر شکل این اجزاء و نتیجتاً کاهش عمرمفید بیرینگ منجرگردد. نکات لازم درباره جابه‌جایی، نگهداری، نصب و دمونتاژ بیرینگ‌ها معمولاً در کتابچه‌هایی که توسط سازندگان مختلف منتشر شده، درج می‌شود. گاهی اوقات شرایط ویژه نصب، استفاده از بیرینگ خاصی را دیکته می‌کند. با توجه به این موارد، طراح یک سازه که در آن از بیرینگ‌ها استفاده می‌شود، لازم است درباره نصب کردن و بیرون آوردن بیرینگ‌های غلتشی نیز آگاهی کافی داشته باشد.

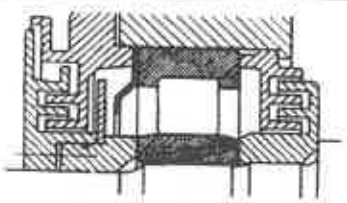
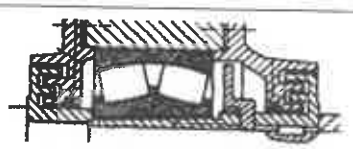
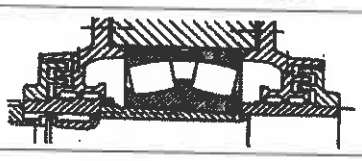
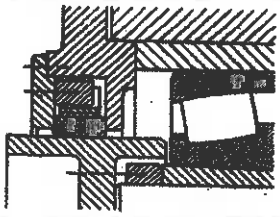
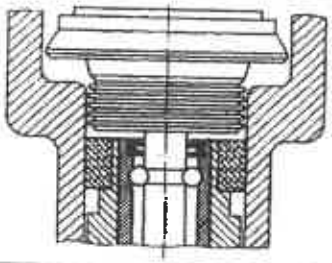
۴-۵-۱ ابزارها و تجهیزات مورد نیاز نصب

بیرینگ‌های کوچک که باید انطباق پرسی با دیگر قطعات سازه داشته باشند (به شرطی که این میزان انطباق متوسط باشد) را بر روی شفت یا در داخل نشیمنگاه، با فشار جا می‌زنند. برای این کار توصیه می‌شود در صورت امکان از پرس‌های مکانیکی یا هیدورلیکی استفاده شود (**شکل ۴-۵۶**). در بسیاری موارد برای نصب بیرینگ‌های کوچک بر روی یک شفت، یک لوله از جنس فولاد نرم با اندازه مناسب استفاده می‌کنند (**شکل ۴-۵۷**). برای این کارهرگز *نباید* ضربات چکش را مستقیماً به رینگ داخلی بیرینگ وارد کرد.

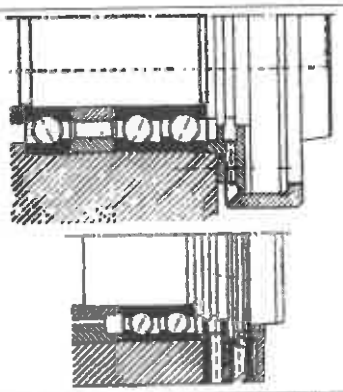
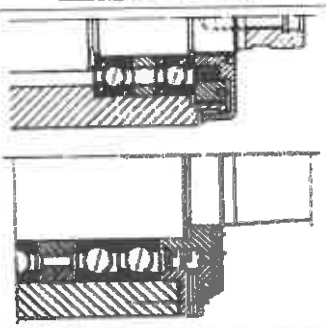
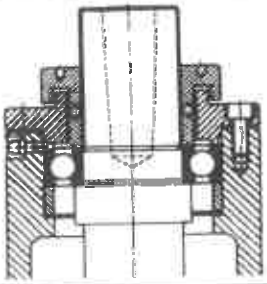
گرم کردن بیرینگ قبل از نصب سبب می‌شود فشار کمتری برای نصب احتیاج باشد. برای نصب یک بیرینگ با انطباق پرسی، کافی است بیرینگ‌را تا دمای 80–100 °C گرم نمود. بیرینگ‌های مخصوص محور ماشین‌های ابزار را برای نصب تا دمای 60 – 70 °C گرم می‌کنند.

نمونه طرح‌ها	نمونه کاربردها	حرارت بالا	علت استفاده از آب‌بندی									
			نگهداری روانکار		جلوگیری از نفوذ							
				روغن	آب			ذرات آلودگی				
			گریس	سیستم گردشی	حمام روغن	تحت فشار	پاششی	قطره‌ای	خیلی زیاد	زیاد	متوسط	اندک
     	① موتورهای الکتریکی		•									•

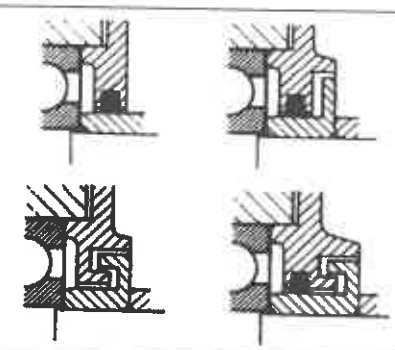
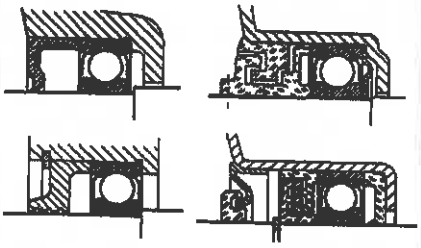
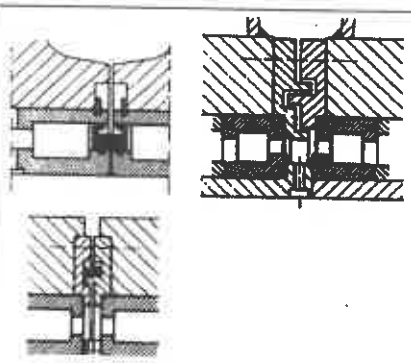
شکل ۴-۵۵ مشکلات مربوط به آب‌بندی و چاره آنها

نمونه طرح‌ها	نمونه کاربردها	حرارت بالا	علت استفاده از آب‌بلدی										
			نگهداری روانکار			جلوگیری از نفوذ							
				روغن		آب			ذرات آلودگی				
			گریس	سیستم گردشی	حمام روغن	تحت فشار	پاششی	قطره‌ای	خیلی زیاد	زیاد	متوسط	اندک
	② موتورهای الکتریکی کشنده‌های ریلی		•									
	③ خرد کننده‌ها آسیاب‌ها		•						•			
	④ سنگ شکن‌ها خرد کننده‌ها				•				•			
	⑤ کنورترها		•						•			
	⑥ محورهای ریسندگی		•								•	

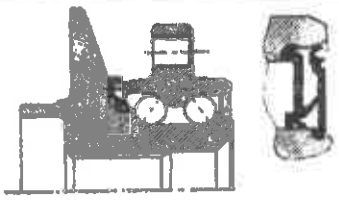
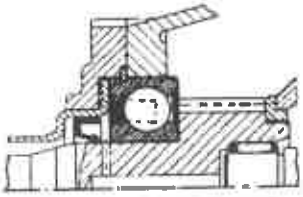
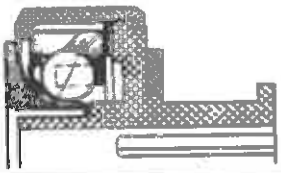
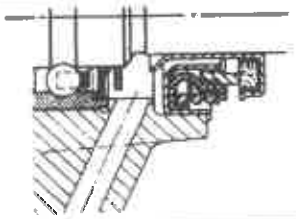
شکل ۴-۵۵ *(ادامه)*

نمونه طرح‌ها	نمونه کاربردها	حرارت بالا	علت استفاده از آب‌بندی									
			نگهداری روانکار		جلوگیری از نفوذ							
			روغن		آب			ذرات آلودگی				
			گریس	سیستم گردشی	حمام روغن	تحت فشار	پاششی	قطره‌ای	خیلی زیاد	زیاد	متوسط	اندک
	⑦ محور اصلی ماشین تراش		•									•
	⑧ محور ماشین سنگ		•							•		
	⑨ محور ماشین فرز عمودی		•							•		

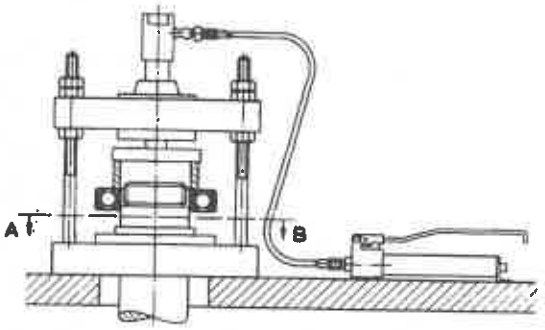
شکل ۴-۵۵ (ادامه)

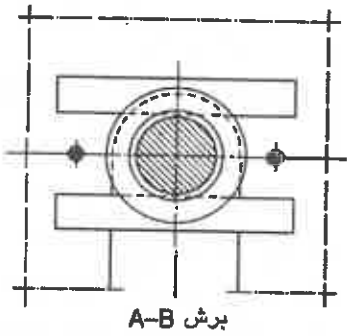
نمونه طرح‌ها	نمونه کاربردها	حرارت بالا	علت استفاده از آب‌بندی									
			نگهداری روانکار		جلوگیری از نفوذ							
			روغن		آب			ذرات آلودگی				
			گریس	سیستم گردشی	تحت فشار	پاششی	قطره‌ای	خیلی زیاد	زیاد	متوسط	اندک
	⑩ ماشین اره مدور و سنگ رومیزی		•								•
	⑪ غلتک هرزگرد نقاله‌ها		•				•	•			
	⑫ قرقره‌ها		•			•					•

شکل ۴-۵۵ (ادامه)

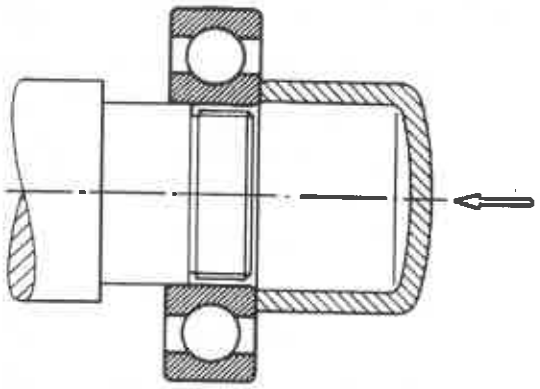
نمونه طرح‌ها	نمونه کاربردها	حرارت بالا	علت استفاده از آب‌بندی									
			نگهداری روانکار			جلوگیری از نفوذ						
				روغن		آب			ذرات آلودگی			
			گریس	سیلم گردشی	حمام روغن	تحت فشار	پاششی	قطره‌ای	خیلی زیاد	زیاد	متوسط	اندک
	(13) توپی‌ها		•				•			•		
	(14) توپی موتورسیکلت		•				•			•		
	(15) گیربکس خودروها				•		•			•		
	(16) بیرینگ آزادکننده کلاچ		•								•	
	(17) واترپمپ خودروها		•			•						•

شکل ۳-۵۵ (ادامه)





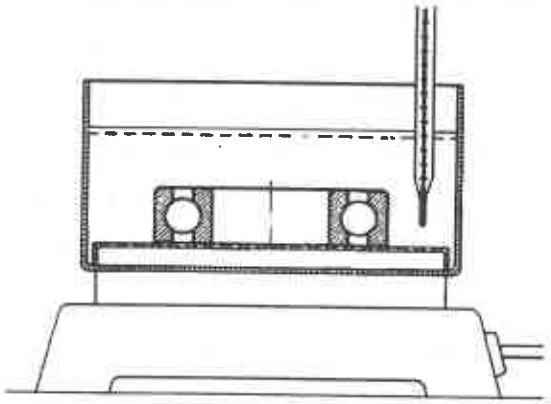
شکل ۴-۵۶ استفاده از پرس هیدرولیک برای نصب بیرینگ



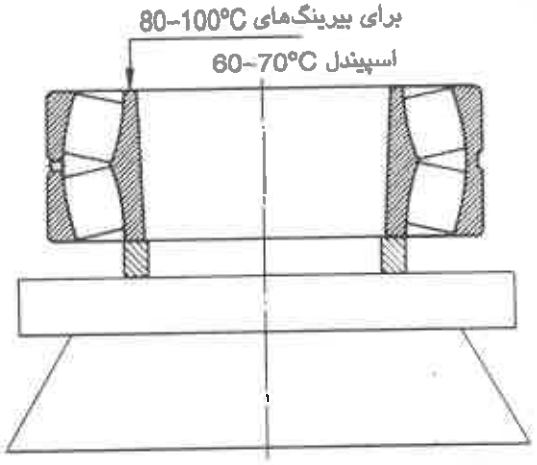
شکل ۴-۵۷ استفاده از بوش فلزی نرم برای نصب بیرینگ‌های کوچک

این کار با استفاده از تجهیزات گرم‌کن القایی (شکل ۴-۸۹)، کوره الکتریکی، حمام روغن گرم (شکل ۴-۵۸) یا یک صفحه گرم‌کن با تنظیم ترموستاتیکی انجام می‌شود.

اگر بیرینگ قفسه پلاستیکی داشته باشد، برای جلوگیری از گرم شدن بیش از حد قفسه باید از آن حفاظت مناسب به عمل آید (شکل ۴-۵۹). درجه حرارت کوره‌های القایی و کوره‌های الکتریکی را بدقت می‌توان با ترموستات کنترل نمود. کنترل درجه حرارت مخصوصاً برای پیشگیری از افت سختی رینگ‌های بیرینگ ضروری است. ویژگی گرم‌کن‌های القایی، همان‌طور در بخش ۴-۵-۴ گفته خواهد شد، این است که عمل گرم‌کردن به سرعت، ایمن و از همه مهم‌تر خیلی تمیز صورت می‌گیرد. درجه حرارت اعمالی مستقیماً از روی رینگ داخلی بیرینگ اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به اینکه رینگ داخلی سریع‌تر از رینگ خارجی گرم می‌شود، می‌توان پس از گرم کردن، عمل نصب بیرینگ را بر روی شفت و داخل نشیمنگاه به‌طور همزمان انجام داد.



شکل ۴-۵۸ گرم‌کردن یک بیرینگ در حمام روغن گرم، در این روش احتمال نفوذ آلودگی به داخل بیرینگ وجود دارد.



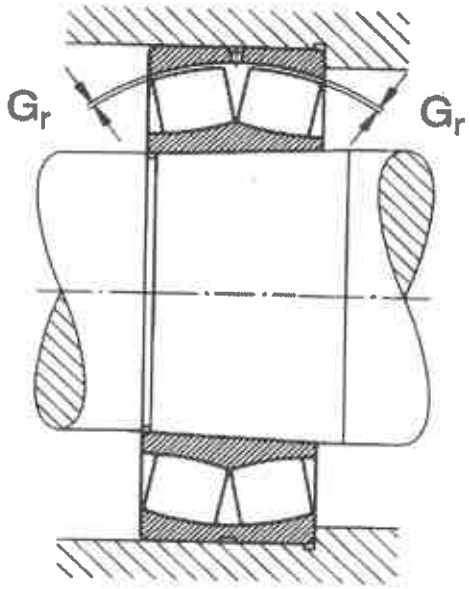
شکل ۴–۵۹ گرم کردن بیرینگ بر روی یک صفحه گرم کن الکتریکی. در این روش لازم است که یک حلقه فلزی بین صفحه گرم کن و رینگ داخلی بیرینگ قرار گیرد تا از گرم شدن قفسه پلاستیکی جلوگیری شود.

برای نصب کردن بیرینگ درون یک نشیمنگاه با انطباق نسبتاً تنگ، قبل از نصب، بیرینگ را در مخلوطی از یخ خشک و الکل سرد می‌کنند. البته در این مورد باید برای جلوگیری از خوردگی، هرگونه آب تقطیر شده بر روی بیرینگ سرد را پاک نمود. روش سرد کردن بیرینگ به دلیل دشواری عمل و هزینه بالای آن کمتر به‌کار می‌رود.

هنگامیکه شفت و رینگ داخلی بیرینگ هر دو شیب‌دار باشند با قراردادن رینگ‌بیرونی شفت و اعمال فشار محوری می‌توان یک انطباق پرسی بین آنها ایجاد نمود. بدین ترتیب با تغییر محل بیرینگ به‌صورت محوری می‌توان انطباق مطلوب را به دست آورد (ر.ک. جدول‌های ۴–۲ و ۴–۳ یا کاتالوگ بیرینگ‌های غلتشی).

لقی شعاعی موجود در بیرینگ‌ها قبل و بعد از نصب آن با انطباق پرسی، متفاوت می‌باشد. گاهی اوقات میزان لقی مناسب مهم است، در این موارد لازم است لقی شعاعی بیرینگ قبل از نصب به دقت اندازه‌گیری شده و حین نصب نیز این مقدار کنترل شود تا پس از نصب، لقی دلخواه به‌دست آید. لقی شعاعی بیرینگ‌های بزرگ را می‌توان با تیغه‌های فیلر کنترل کرد. در رولربیرینگ‌های کروی دو ردیفه لازم است میزان لقی دوردیف رولرها به‌طور همزمان سنجیده شود (شکل ۴–۶۰)، زیرا بدین‌ترتیب معلوم می‌شود که میزان لنگی رینگ داخلی نسبت به رینگ خارجی در حد مطلوب است یا خیر.

همانطور که گفته شد در بیرینگ‌هایی که رینگ داخلی آنها شیب‌دار است، لقی شعاعی را می‌توان با جابه‌جا کردن آن به‌صورت طولی تغییر داد (جدول ۴–۲ و ۴–۳). وجود شیب استاندارد 1:12 سبب می‌شود که میزان تغییر محل در جهت طولی پانزده برابر تغییر لقی شعاعی باشد. استفاده از عدد پانزده به جای دوازده نشاندهنده این واقعیت است که هنگام جازدن بیرینگ بر روی شفت توپر، میزان انبساط رینگ داخلی، حداکثر 85% – 75 میزان تداخل موجود بین اجزای قرار گرفته روی هم می‌باشد. هنگام نصب کردن بیرینگ‌های کوچک با سوراخ شیب‌دار باید مراقبت بیشتری انجام داد. در اینگونه بیرینگ‌ها با توجه به اینکه لقی شعاعی اغلب کمتر از ضخامت تیغه‌های فیلر است، نمی‌توان از این ابزار برای کنترل لقی استفاده کرد. بهتراست ابتدا این بیرینگ را بر روی شفت شیب‌دار نصب کرد. فشار اعمالی در جهت طولی باید آنقدر باشد که هنوز رینگ خارجی غلتنده روان بچرخد.



شکل ۴-۶۰ کنترل لقی شعاعی G_r در رولربیرینگ‌های کروی

در مورد بیرینگ‌های خود تنظیم با سوراخ شیب‌دار، میزان تداخل شفت با رینگ داخلی باید آنقدر باشد که بتوان با دست، رینگ خارجی را به‌صورت مفصلی روی اجزاء غلتنده با کمی نیرو به‌حرکت درآورد.

مقدار لقی شعاعی بلبیرینگ‌های خود تنظیم با رینگ داخلی شیب‌دار (با شیب 12 : 1) با کد C3 نشانداده می‌شود. برای رسیدن به انطباق پرسی مطلوب اینگونه بیرینگ‌ها به هنگام نصب، باید رینگ داخلی به اندازه 70% – 60 حداقل لقی شعاعی بیرینگ، منبسط شود. مثلاً در بلبیرینگ خود تنظیم 2316K.C3 با بوش تنظیم H2316 :

لقی شعاعی قبل از نصب 50 – 75 µm

کاهش لقی شعاعی حین نصب (60 – 70 %)
30 – 40 µm

لقی شعاعی پس از نصب 20 – 35 µm

جابه‌جایی محوری برای رسیدن به کاهش لقی مطلوب
0.5 – 0.6 mm

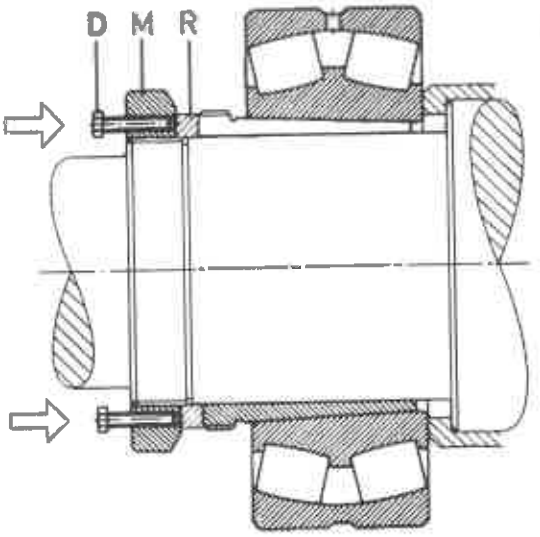
برای نصب بیرینگ‌های کروی بزرگ به صورت پرسی بر روی شفت از بوش‌های شیب‌دار که بین رینگ داخلی بیرینگ و شفت قرار می‌گیرند استفاده می‌شود. این بوش برای بیرون آوردن بیرینگ از روی شفت نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه با اینکه برای ایجاد انطباق پرسی در بیرینگ‌های بزرگ احتیاج به نیروی زیادی است، بر روی مهره مونتاژ چند پیچ برای اعمال فشار به بوش تنظیم نیز تعبیه شده است (شکل ۴-۶۱). برای جلوگیری از آسیب رساندن به مهره مونتاژ، باید آن را تا حدی بر روی شفت پیچاند که مجموعه مهره مونتاژ، حلقه میانی R و بوش تنظیم شیب‌دار به هم بچسبند.

جدول ۲-۲ کاهش لقی شعاعی و جابه‌جایی محوری هنگام نصب رولربیرینگ‌های استوانه‌ای با رینگ داخلی شیب‌دار

اندازه قطر داخلی بیرینگ (mm)		میزان کاهش لقی شعاعی (mm)	میزان جابه‌جایی محوری برای شیب 1:12	
بیشتر از	تا		بر روی شفت	بر روی بوش تنظیم
40	50	0.025–0.030	0.40–0.50	0.55–0.60
50	65	0.030–0.035	0.50–0.55	0.60–0.70
65	80	0.030–0.040	0.50–0.65	0.60–0.75
80	100	0.035–0.045	0.55–0.70	0.70–0.85
100	120	0.050–0.050	0.65–0.80	0.75–0.90
120	140	0.045–0.055	0.70–0.85	0.85–1.00
140	160	0.045–0.060	0.70–0.95	0.85–1.05
160	180	0.050–0.065	0.80–1.00	0.90–1.15
180	200	0.055–0.070	0.85–1.10	1.00–1.20
200	225	0.065–0.080	1.00–1.25	1.15–1.35
225	250	0.070–0.085	1.10–1.30	1.20–1.45
250	280	0.075–0.095	1.15–1.45	1.30–1.60
280	215	0.080–0.100	1.25–1.55	1.35–1.65
315	355	0.095–0.115	1.45–1.75	1.60–1.90
355	400	0.100–0.125	1.55–1.90	1.65–2.05
400	450	0.115–0.140	1.80–2.20	1.90–2.30
450	500	0.130–0.160	2.00–2.50	2.10–2.60
500	560	0.140–0.180	2.20–2.80	2.30–2.90
560	630	0.150–0.200	2.40–3.10	2.50–3.20
630	710	0.180–0.230	2.80–3.50	2.90–3.60
710	800	0.210–0.270	3.20–4.10	3.30–4.20
800	900	0.230–0.300	3.60–4.60	3.70–4.70
900	1000	0.260–0.340	4.00–5.20	4.10–5.30
1000	1200	0.280–0.370	4.30–5.60	4.40–5.70
1120	1250	0.300–0.400	4.60–6.10	4.70–6.20

جدول ۴-۳ کاهش لقی شعاعی و جابه‌جایی محوری هنگام نصب رولربیرینگ‌های کروی با رینگ داخلی مخروطی

اندازه قطر داخلی بیرینگ (mm)		میزان کاهش لقی شعاعی	میزان جابه‌جایی محوری برای شیب 1:12 (mm)		میزان جابه‌جایی محوری برای شیب 1:30 (mm)	
بیشتر از	تا	(mm)	روی شفت	روی بوش تنظیم	روی شفت	روی بوش تنظیم
40	50	0.025–0.030	0.40–0.45	0.45–0.50		
50	65	0.030–0.040	0.45–0.60	0.50–0.70		
65	80	0.040–0.050	0.60–0.75	0.70–0.85		
80	100	0.045–0.060	0.70–0.90	0.75–1.00	1.75–2.25	1.80–2.40
100	120	0.050–0.070	0.70–1.10	0.80–1.20	1.90–2.70	2.00–2.80
120	140	0.065–0.090	1.10–1.40	1.20–1.50	2.70–3.50	2.80–3.60
140	160	0.075–0.100	1.20–1.60	1.30–1.70	3.00–4.00	3.10–4.20
160	180	0.080–0.110	1.30–1.70	1.40–1.90	3.20–4.20	3.30–4.60
180	200	0.090–0.130	1.40–2.00	1.50–2.20	3.50–4.50	3.60–5.00
200	225	0.100–0.140	1.60–2.20	1.70–2.40	4.00–5.50	4.20–5.70
225	250	0.110–0.150	1.70–2.40	1.80–2.60	4.20–6.00	4.60–6.20
250	280	0.120–0.170	1.90–2.60	2.00–2.90	4.70–6.70	4.80–6.90
280	315	0.130–0.190	2.00–3.00	2.20–3.20	5.00–7.50	5.20–7.70
315	355	0.150–0.210	2.40–3.40	2.60–3.60	6.00–8.20	6.20–8.40
355	400	0.170–0.230	2.60–3.60	2.90–3.90	6.50–9.00	6.80–9.20
400	450	0.200–0.260	3.10–4.10	3.40–4.40	7.70–10.00	8.00–10.40
450	500	0.210–0.380	3.30–4.40	3.60–4.80	8.20–11.00	8.40–11.20
500	560	0.240–0.320	3.70–5.00	4.10–5.40	9.20–12.50	9.60–12.80
560	630	0.260–0.350	4.00–5.40	4.40–5.90	10.00–13.50	10.40–14.00
630	710	0.300–0.400	4.60–6.20	5.10–6.80	11.50–15.50	12.00–16.00
710	800	0.340–0.450	5.30–7.00	5.80–7.60	13.30–17.50	13.60–18.00
800	900	0.370–0.500	5.70–7.80	6.30–8.50	14.30–19.50	14.80–20.00
900	1000	0.410–0.550	6.30–8.50	7.00–9.40	15.80–21.00	16.40–22.00
1000	1120	0.450–0.600	6.80–9.00	7.60–10.2	17.00–23.00	18.00–24.00
1120	1250	0.490–0.650	7.40–9.80	8.30–11.0	18.50–25.00	19.60–26.00



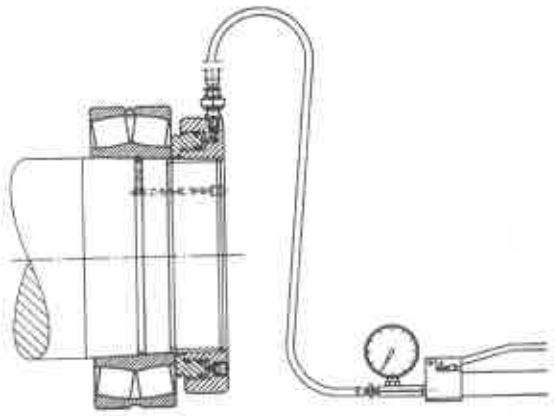
شکل ۴-۶۱ استفاده از مهره مونتاژ و حلقه میانی R برای ایجاد انطباق پرسی بین بوش تنظیم شیب‌دار و یک رولربیرینگ بزرگ

سپس باید پیچ‌های K را که در فواصل مساوی نسبت به هم قرار گرفته‌اند، به‌صورت ضربدری سفت کرد تا با اعمال فشار یکنواخت بر بوش تنظیم، انطباق پرسی ایجاد گردد. با توجه به اینکه شیب بوش تنظیم، خود قفل‌کن است می‌توان پس از نصب مهره مونتاژ را بازکرده و به جای آن یک مهره ضامن معمولی بست.

به هنگام مونتاژ بیرینگ‌های با سوراخ شیب‌دار باید به این نکته توجه کرد که سطوح شیب‌دار را تنها با یک لایه نازک روغن روانکاری نمود. هر چند روغن بیشتر باعث کاهش اصطکاک می‌شود و عملیات نصب بیرینگ را تسهیل می‌کند، ولی ممکن است پس از نصب و به محض بازکردن مهره مونتاژ، بوش تنظیم به عقب برگردد. همچنین ممکن است روغن موجود بین قطعات، حین چرخش مجموعه بتدریج خارج شده و لق شدن بیرینگ روی شفت را به دنبال داشته باشد.

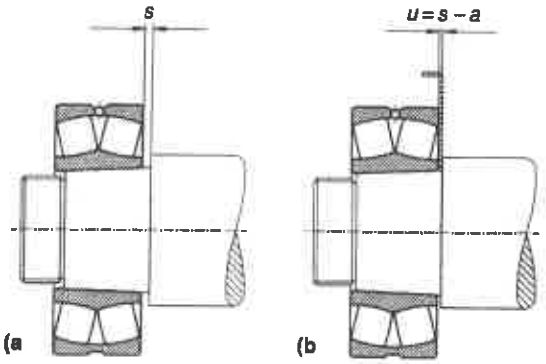
اگر یک بیرینگ بزرگ به روشی که گفته شد نصب شده و پس از مدتی بیرون آورده شد، به هنگام نصب مجدد کافی نیست مهره ضامن را به اندازه قبل سفت کرده و تصور کرد که بیرینگ به اندازه کافی محکم شده است، زیرا حین مونتاژ اولیه سطوح شیب‌دار و رزوه‌های مهره دچار تغییر شکل اندکی می‌شوند. بنابراین لازم است هر بار موقع نصب با انطباق پرسی، میزان کاهش لقی شعاعی، جابه‌جایی محوری روی بوش شیب‌دار و در رولربیرینگ‌های استوانه‌ای، میزان انبساط رینگ اندازه‌گیری شود.

برای نصب بیرینگ‌های بزرگ بهتر است از یک مهره هیدرولیکی استفاده کرد (شکل ۴-۶۲). این مهره‌های استاندارد برای ابعاد مختلف وجود دارند. روش هیدرولیکی ذکر شده در بخش ۴-۵-۴ نیز یک روش خوب دیگر برای نصب کردن یا بیرون آوردن بیرینگ‌های بزرگ می‌باشد.



شکل ۴-۶۲ استفاده از مهره هیدرولیکی

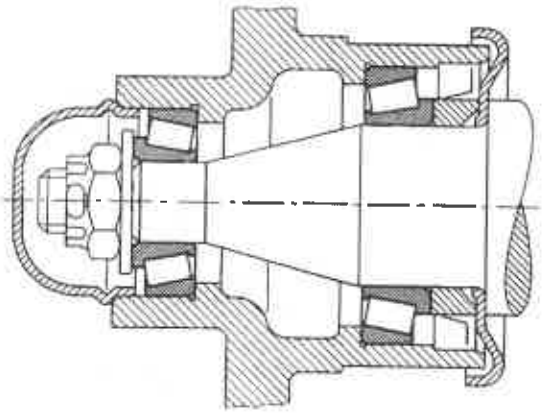
بیرینگ‌های با سوراخ مخروطی را با گرم‌کردن نیز می توان نصب کرد (شکل ۴-۶۳). در این روش ابتدا باید بیرینگ سرد را روی شفت مخروطی قرار داده و اندازه s را به‌دست آورد. سپس با محاسبه مقدار a برای ایجاد یک انطباق پرسی مطلوب می‌توان اندازه نهایی u را از تفاضل a – s حساب کرد. حال با استفاده از یک حلقه یا واشر به ضخامت u می‌توان موقعیت درست بیرینگ گرم شده و انبساط یافته را بر روی شفت کنترل نمود.



شکل ۴-۶۳ روش نصب بیرینگ گرم شده با سوراخ مخروطی: **a)** اندازه‌گیری s در حالتی که بیرینگ سرد است، **b)** قرارگیری بیرینگ گرم‌شده در موقعیت درست به کمک یک واشر با ضخامت خاص

۴-۵-۲ تنظیم لقی بیرینگ حین نصب

گاهی اوقات لازم است به هنگام نصب، مقداری لقی محوری یا شعاعی در بیرینگ ایجاد نمود تا نیازهای طراحی را در دمای کاری خاصی برآورده نماید. بعضی اوقات نیز مقدار لقی صفر و یا حتی کمی بار اولیه مورد نیاز است. در بعضی موارد نیز بیرینگ‌ها به‌صورت مجموعه های مونتاژ شده و به‌صورت آماده عرضه می‌شوند که لقی یا بار اولیه آنها توسط سازنده ایجاد شده است و پس از نصب این مجموعه بر روی سازه نیازی به تنظیم *نخواهد* بود (شکل‌های ۱-۱۴، ۱-۴۱، ۱-۴۲، ۱-۵۱، ۱-۵۸ و همچنین شکل‌های ۴-۶۸ و ۴-۷۰.



شکل ۴-۶۴ تنظیم لقی رولربیرینگ‌های مخروطی به‌کار رفته در محور چرخ خودروها با استفاده از مهره تنظیم

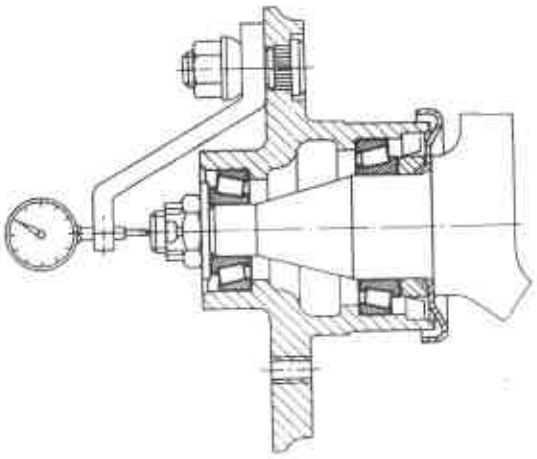
رینگ‌های مخروطی مربوط به رولربیرینگ‌های مخروطی به‌کار رفته در یاتاقان‌بندی چرخ‌های جلوی خودروها (شکل ۴-۶۴) با استفاده از یک مهره تنظیم، در جهت محوری تنظیم می‌شود. برای تنظیم محوری این بیرینگ‌ها، در حالی که چرخ را می‌چرخانند به تدریج مهره را سفت می‌کنند. این کار را آنقدر ادامه می‌دهند که چرخ پس از چرخش به اندازه نیم تا یک دور کامل متوقف شود. با توجه به این که در این وضعیت به بیرینگ‌ها کمی بار اولیه وارد شده است، مهره تنظیم را کمی شل می‌کنند تا به اولین موقعیت قفل برسد. این مهره یک مهره چاک‌دار است که به کمک یک اشپیل می‌توان آن را قفل کرده و از چرخش آن جلوگیری

گردد. پس از تنظیم انطباق بیرینگ‌ها، با دست چرخ خودرو را به طرفین و بالا - پایین تکان می‌دهند، تا روشن شود که بیرینگ‌ها هیچگونه لقی *ندارند*.

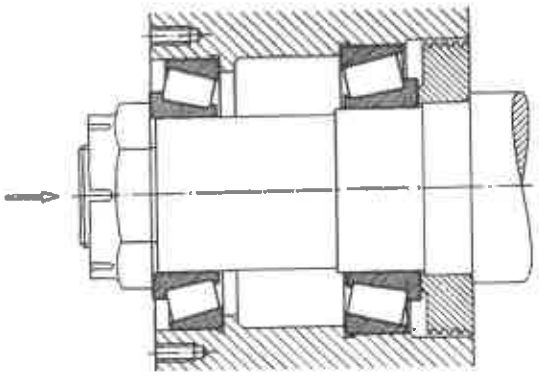
برای اندازه‌گیری لقی محوری در مونتاژ مجموعه بیرینگ‌های کوچک (شکل ۴-۶۵) از یک ساعت اندیکاتور استفاده می‌شود، ولی برای کنترل این لقی در مجموعه بیرینگ‌های بزرگ از یک دستگاه خاص که بر همین اساس کار می‌کند، استفاده می‌گردد.

رینگ‌های مخروطی رولربیرینگ‌های مخروطی چرخ

ارابه‌های بدون موتور، نظیر ارابه‌های حمل بار در معادن (شکل ۴-۶۶) را نیز با استفاده از یک مهره چاک‌دار تنظیم می‌کنند، همان‌طور که در محور چرخ خودروهای موتوری (شکل ۴-۶۴) انجام می‌شود. ولی در این مورد انطباق بیرینگ‌ها را سفت‌تر در نظر می‌گیرند، زیرا سرعت گردش این بیرینگ‌ها کمتر و بارهای ضربه‌ای وارد به آنها بیشتر است. مهره تنظیم را آنقدر سفت



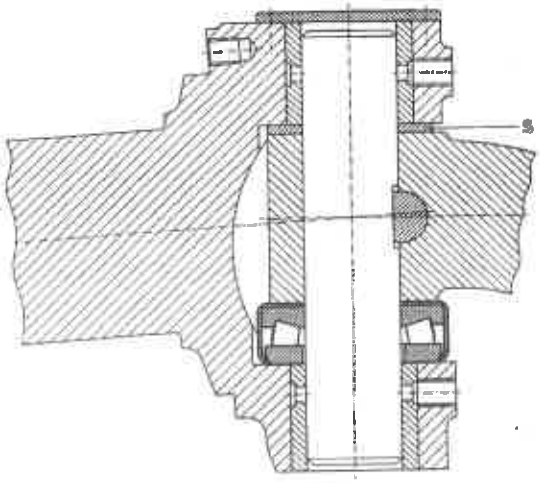
شکل ۴-۶۵ اندازه‌گیری لقی محوری توسط ساعت اندیکاتور



شکل ۴-۶۶ تنظیم رولربیرینگ‌های مخروطی به‌کار رفته در چرخ ارابه‌های بی‌موتور با استفاده از مهره تنظیم

می‌کنند که بتوان چرخ را با دست و نیروی اندکی چرخاند. سپس مهره را تا رسیدن به اولین محل قفل شل می‌کنند و توسط پین اشپیل قفل می‌نمایند.

در بیرینگ‌های به‌کار رفته در مفصل زانویی سیستم فرمان خودروها (شکل ۴-۶۷)، وجود لقی مضر است.

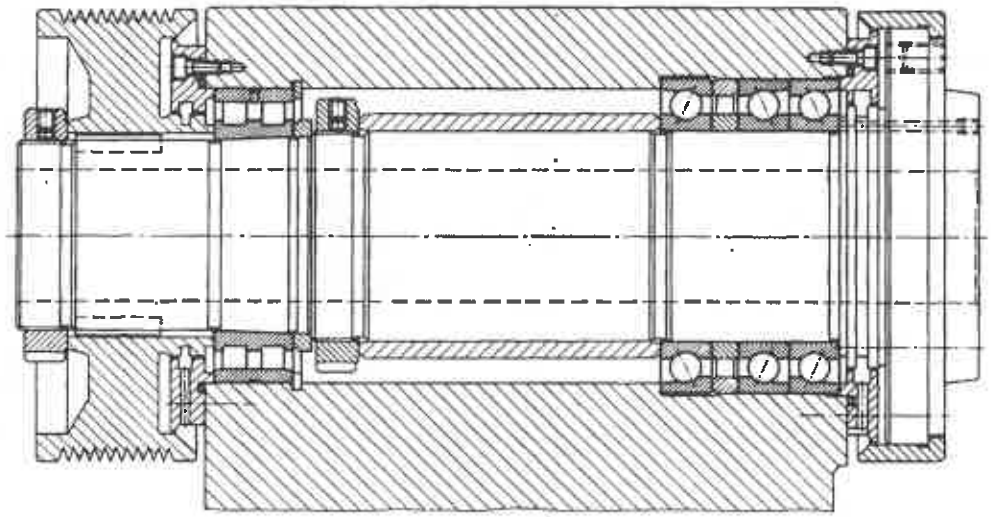


شکل ۴-۶۷ تنظیم بیرینگ مفصل زانویی سیستم فرمان خودروها با استفاده از واشر لقی‌گیر موجدار

ی ارتفاعی موجود بین دو شاخه، قطعه میانی مفصل و بیرینگ کف‌گرد با قرار دادن یک واشر موجدار کاملاً گرفته می‌شود. این واشرهای لقی‌گیر در ضخامت‌های مختلف موجود هستند.

در یاتاقان‌بندی اسپیندل ماشین‌های تراش نشانداده شده در شکل ۴-۶۸، لقی بیرینگ‌های محور و رولربیرینگ‌های استوانه‌ای دوردیفه باید تنظیم شود. بیرینگ‌های محور توسط کارخانه سازنده با کمی بار محوری اولیه ساخته می‌شوند (با پسوند UL). هنگامی که این مجموعه بیرینگ حین مونتاژ در جهت محوری نیز تنظیم شود، بار اولیه محوری لازم خودبه‌خود تامین خواهد شد. همانطور که در شکل ۴-۶۸ ملاحظه می‌شود رینگ‌های خارجی بیرینگ‌ها در جهت طولی توسط فلنجهای درپوش دو طرف اسپیندل مهار شده و رینگ‌های داخلی نیز با استفاده از یک بوش طویل و یک مهره، نسبت به هم بر روی شفت قرار گرفته‌اند.

این بوش سنگ خورده که از نظر گرد بودن خیلی دقیق است، از کج قرار گرفتن رینگ‌های داخلی بیرینگ بر روی شفت جلوگیری می‌کند (شکل ۴-۷). بار اولیه محوری و گشتاور مورد نیاز برای ایجاد این بار روی بیرینگ‌ها در کتابچه‌های دستورالعمل بیرینگ‌ها توسط کارخانجات سازنده ارائه می‌شود. بار اولیه را می‌توان با استفاده از واشرهای فاصله‌انداز با ضخامت‌های مختلف، تغییر داد. لقی یا بار شعاعی اولیه در رولربیرینگ استوانه‌ای دوردیفه با سوراخ مخروطی را می‌توان با جابه‌جا کردن بیرینگ بر روی قسمت شیب‌دار شفت تنظیم نمود. جابه‌جاکردن این بیرینگ و تنظیم لقی شعاعی آن به کمک یک مهره که در منتهی الیه سمت چپ اسپیندل قرار دارد، امکانپذیر می‌شود. مقدار لقی یا بار اولیه اعمالی به بیرینگ‌های محور به حداکثر سرعت دورانی اسپیندل بستگی دارد. مثلاً اگر این بیرینگ‌ها قرار باشد یک اسپیندل دور بالا

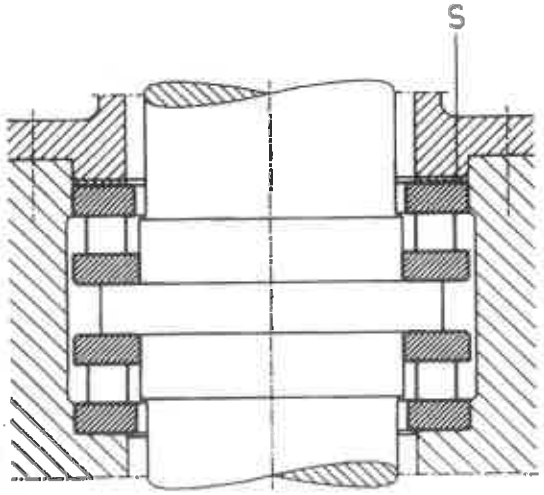


شکل ۴-۶۸ تنظیم لقی بیرینگ‌های محور و رولربیرینگ استوانه‌ای در اسپیندل ماشین‌تراش

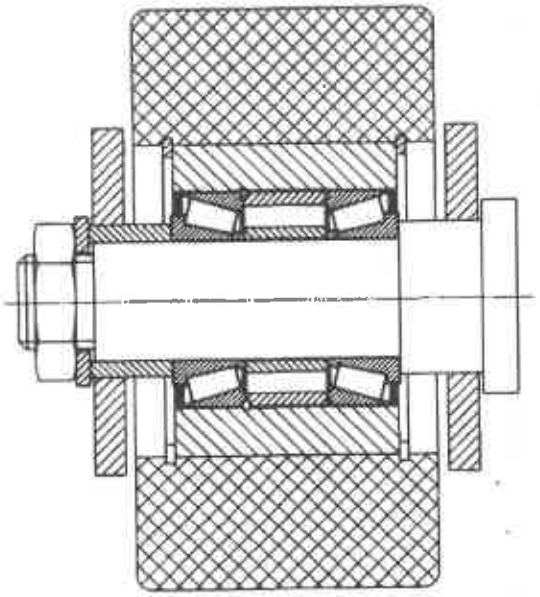
(مثلاً $5000\ min^{-1}$ و قطر سوراخ بیرینگ برابر با 85 mm) را مهار کند که در کارخانجات سازنده پر از گریس شده‌اند و حفاظهای آب‌بندی دارند، لقی شعاعی 5 µm – 2 مطلوب است.

اگر بیرینگ‌های محور با روغن روانکاری شوند، مقدار لقی شعاعی باید حدود 0.01% قطر سوراخ بیرینگ‌ها در نظر گرفته شود. لقی بیرینگ‌ها را می‌توان با دستگاه اندازه‌گیری دایره حدی دقیقاً کنترل کرد (شکل‌های ۴-۹۱ و ۴-۹۲).

رولربیرینگ‌های استوانه‌ای کف‌گرد را اگر در معرض بارهای ضربه‌ای استاتیک قرار داشته باشند، باید با مقداری بار اولیه نصب نمود. این بار اولیه با قراردادن واشرهای کالیبره شده دقیق، طبق شکل ۴-۶۹ ایجاد می‌گردد. برای نصب یک جفت رولربیرینگ مخروطی در لولای سیستم فرمان لیفتراک‌ها (شکل ۴-۷۰) از حلقه‌های فاصله‌انداز استفاده می‌شود.



شکل ۴-۶۹ تنظیم لقی محوری با استفاده از واشر

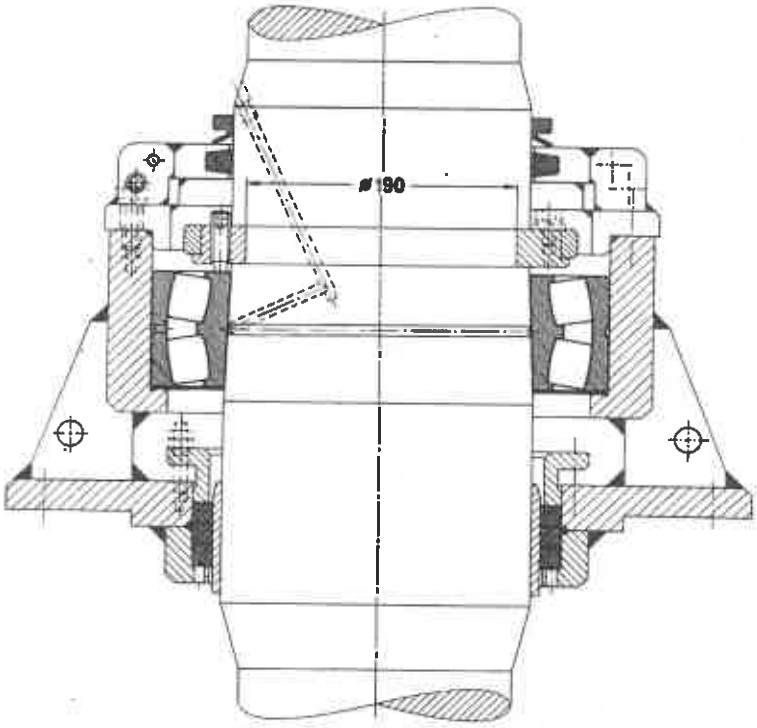


شکل ۴-۷۰ نصب یک جفت رولربیرینگ مخروطی کالیبره شده دقیق در لولای سیستم فرمان یک لیفت تراک

در چیدمان این بیرینگ‌ها به‌صورت O، به واسطه استفاده از این حلقه‌ها، فاصله زیادی بین دو بیرینگ ایجاد خواهد شد. در این گونه موارد برای ایجاد لقی محوری مناسب باید از دو حلقه فاصله‌انداز با پهنای دقیقاً مساوی استفاده کرد تا این اطمینان حاصل شود که رینگ‌های داخلی و خارجی بیرینگ‌ها کاملاً مهار شده‌اند.

بیرینگ به‌کار رفته در شفت سکان کشتی (شکل ۴-۷۱)، چه در حالت سکون و یا به هنگام گردش سکان در معرض ضربه‌های خیلی سنگین قرار دارد.

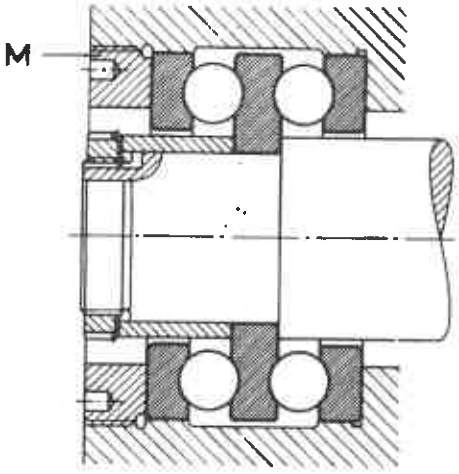
در این بیرینگ وجود لقی مضر است، زیرا این لقی سبب می‌شود اجزاء غلتنده بر روی بیرینگ‌ها فرورفتگی‌هایی ایجاد کنند. لقی شعاعی این بیرینگ‌ها در حالت آزاد



شکل ۴-۷۱ رولربیرینگ کروی نصب شده با بار اولیه بر روی شفت سکان

کمتر از حد نرمال در نظر گرفته می‌شود. پس از نصب بیرینگ به صورت دستی روی قسمت مخروطی شفت سکان، با استفاده از تعدادی پیچ محکم‌کننده می‌توان بار اولیه شعاعی لازم را در بیرینگ به‌وجود آورد. تعداد دفعات گردش این پیچ‌ها را می‌توان با محاسبه مقدار انقباض شعاعی مورد نیاز، زاویه شفت مخروطی و گام این پیچ به‌دست آورد.

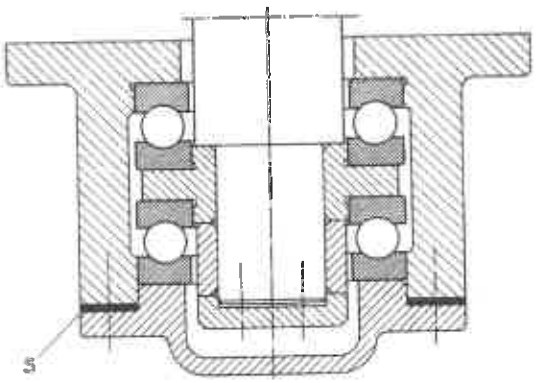
بلبیرینگ کف‌گرد دو طرفه نشانداده شده در شکل ۴-۷۲ را می‌توان با استفاده از مهره M تنظیم نمود. در این بیرینگ، بار اولیه باید به‌گونه‌ای ایجاد شود که مجموعه ساچمه‌ها در حالتی که بار کاری به آنها وارد نشده است،



شکل ۴-۷۲ تنظیم بلبیرینگ کف‌گرد دو طرفه با استفاده از مهره تنظیم

کاملاً با واشرهای شیاردار بیرینگ در تماس باشند (ر.ک. قسمت ۳-۴).

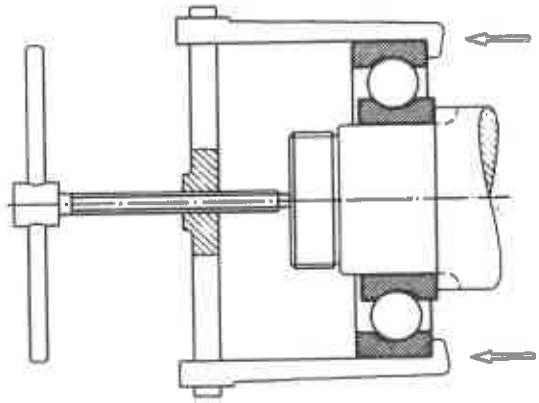
گاهی اوقات نیز برای ایجاد بار اولیه مناسب در بلبیرینگ‌های کف‌گرد دو طرفه، از یک درپوش ضخیم و واشر لقی‌گیر موجدار استفاده می‌شود (شکل ۴-۷۳). بهتر است بلبیرینگ‌های کف‌گرد در حالی که محور آن به صورت عمودی قرار گرفته مونتاژ و نصب شوند، زیرا در وضعیت عمودی می‌توان مطمئن بود که مجموعه ساچمه‌ها و قفسه نگهدارنده آنها با واشرهای شیاردار بیرینگ هم محور قرار گرفته‌اند.



شکل ۴-۷۳ تنظیم بار اولیه در بلبیرینگ کف‌گرد دوطرفه با استفاده از واشر لقی‌گیر موجدار

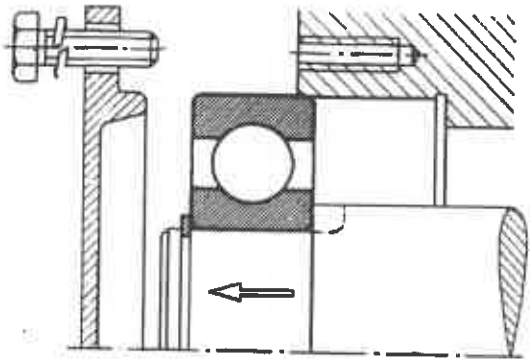
۴-۵-۳ ابزارها و تجهیزات بیرون آوردن بیرینگ‌ها

بیرون آوردن بیرینگ‌هایی که با انطباق پرسی در یک سازه نصب شده باشند معمولاً کار دشواری است، مخصوصاً اگر در سطوح خارجی بیرینگ، خوردگی‌هایی ناشی از تکان‌ها و جابه‌جایی‌های کوچک به‌وجود آمده باشد. این نوع خوردگی معمولاً در بیرینگ‌هایی که مدت زیادی کارکرده باشند، اتفاق می‌افتد. گاهی اوقات هیچ چاره‌ای جز خردکردن یک بیرینگ آسیب دیده برای بیرون آوردن آن وجود *ندارد*. اگر قرار باشد بیرینگی را پس از بازکردن مجدداً در جای خود نصب کنند، برای خارج کردن آن باید حتماً، نیرو را به رینگ داخلی یا خارجی آن که با انطباق پرسی درجای خود قرار گرفته است، وارد کرد. هیچگاه *نباید به اجزاء* غلتنده بیرینگ نیرو وارد شود، زیرا ممکن است این اجزاء فرورفتگی‌هایی برروی رینگ‌ها ایجاد کنند (شکل ۴-۷۴).

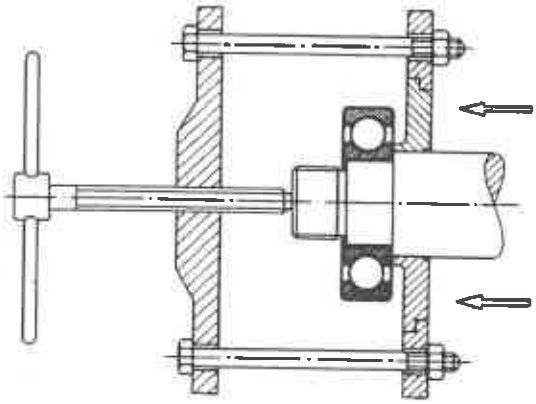


شکل ۴-۷۴ روش *نادرست* : نیروی بیرون آوردن بیرینگ را هرگز نباید به اجزا غلتنده انتقال داده

برای بیرون آوردن بیرینگ‌های غیرقابل انفصال، ابتدا باید رینگ خارجی با انطباق روان را از سازه جدا کرده و سپس با اعمال فشار به رینگ داخلی با انطباق پرسی توسط یک ابزار خاص، بیرینگ را کاملاً آزاد نمود (شکل ۴-۷۵). ابزار مورد استفاده برای این کار یک پولی‌کش است (شکل ۴-۷۶) که در پشت رینگ داخلی قرارگرفته و با چرخاندن پیچ آن، بیرینگ خارج خواهد شد.



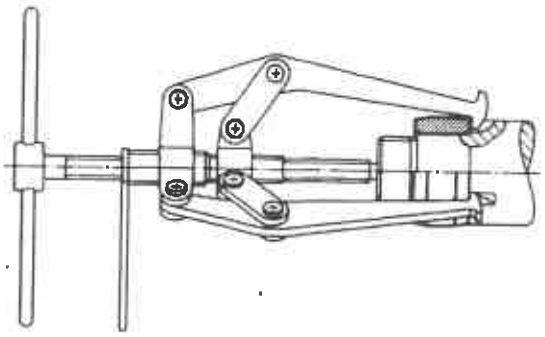
شکل ۴-۷۵ بیرون آوردن بیرینگ‌های غیرقابل انفصال



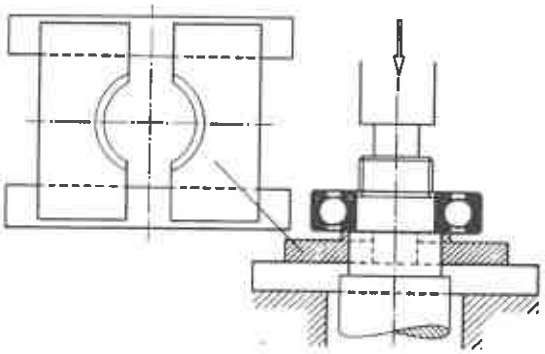
شکل ۴-۷۶ پولی‌کش صفحه‌ای با پیچ‌های بلند

استفاده از یک پرس هیدرولیک کوچک، بیرون آوردن بیرینگ‌ها را خیلی آسان می‌کند (شکل ۴-۷۸).

گاهی اوقات در استفاده از پولی‌کش لازم است یک حلقه واسطه در پشت رینگ داخلی بیرینگ قرار داده و پولی‌کش را در پشت این حلقه مهار نمود. گاهی نیز در پشت بیرینگ بر روی شفت شیارهای طولی خاصی ماشینکاری شده است، به‌طوری که شاخک‌های پولی‌کش به‌خوبی درون آنها قرار می‌گیرد. در پولی‌کش نشان‌داده شده در شکل ۴-۷۹ شاخک‌های باریک و چنگک مانند از میان ساچمه‌ها عبور کرده و لبه رینگ داخلی را می‌گیرند، سپس با جلو بردن حلقه ضامن که مانند یک گیره فنری (کولت) عمل می‌کند، این حلقه در مقابل رینگ داخلی بیرینگ قفل می‌شود.



شکل ۴-۷۷ پولی‌کش با شاخک‌های قابل تنظیم



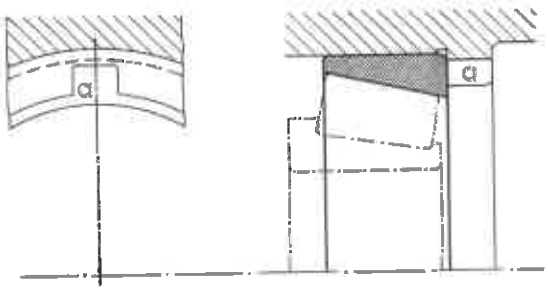
شکل ۴-۷۸ بیرون‌آوردن بلبیرینگ با پرس هیدرولیکی

شکل ۴-۷۹ پولی‌کش با حلقه گیرنده و شاخک‌های چنگکی

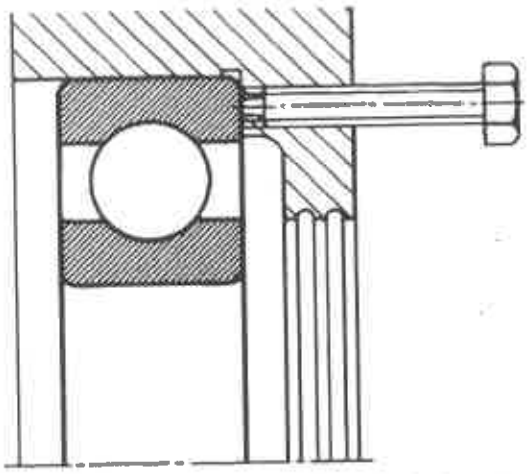
در این وضعیت می‌توان با پیچاندن پولی‌کش، بیرینگ را (حتی اگر هنوز علاوه بر شفت، با بدنه سازه نیز درگیر باشد) از روی شفت بیرون کشید. این مثال‌ها نشان می‌دهند که طراحی اجزای مجاور بیرینگ‌ها بر روی شفت باید به گونه‌ای باشد که امکان استفاده از ابزارهای بیرون آوردن بیرینگ‌ها فراهم شود.

مثلاً اگر رینگ داخلی بیرینگ با انطباق پرسی بر روی شفت جای گرفته باشد، قطر شفت در پشت بیرینگ باید کمتر از قطر بیرونی رینگ باشد (شکل ۴-۷۶) و یا شیارهایی برای قرارگیری شاخک‌های پولی‌کش بر روی آن ماشینکاری شده باشد (شکل ۴-۷۷). وجود حلقه‌های آب‌بندی نیز نباید مانع یا مزاحم بیرون آوردن بیرینگ‌ها باشد.

در طراحی نشیمنگاه که بیرینگ داخل آن جای می‌گیرد، نیز نکات مشابه فوق باید مدنظر قرار گیرد. اگر نشیمنگاه دارای یک دیواره جانبی باشد به طوری که پشت بیرینگ بسته باشد، بیرون آوردن بیرینگ با مشکل مواجه خواهد شد. در این گونه موارد از شیار (شکل ۴-۸۰) یا سوراخ‌های رزوه شده (شکل ۴-۸۱) برای بیرون آوردن بیرینگ استفاده می‌شود. در بعضی موارد،



شکل ۴-۸۰ ماشینکاری شیار در نشیمنگاه برای بیرون آوردن بیرینگ از نشیمنگاه توسط پولی‌کش



شکل ۴-۸۱ استفاده از پیچ‌ها برای بیرون آوردن بیرینگ از نشیمنگاه

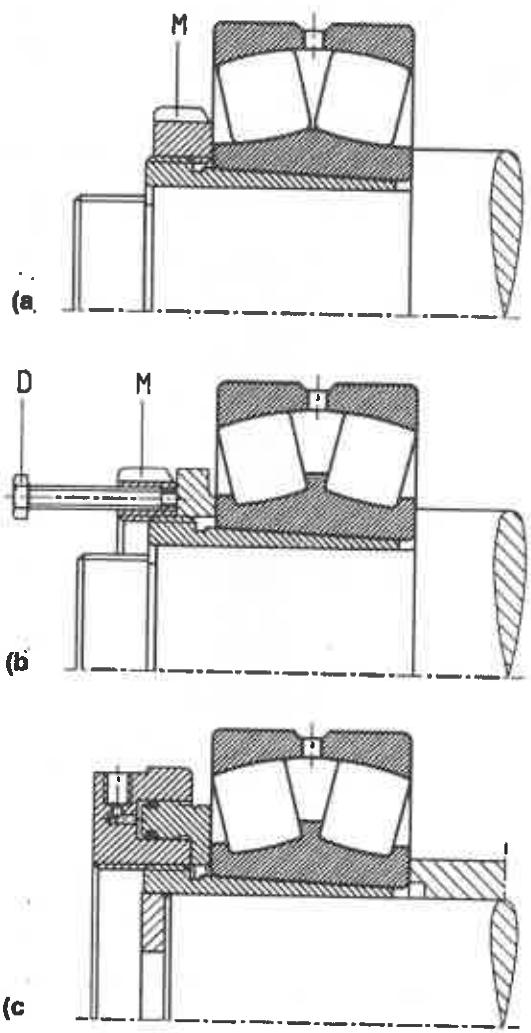
آسانی بیرون آوردن عامل اصلی در انتخاب بیرینگ به شمار می‌رود و از این نقطه نظر، استفاده از بیرینگ‌های مخصوص دینام و ژنراتورها (ماگنتو بیرینگ)، رولربیرینگ‌های مخروطی، رولربیرینگ‌های استوانه‌ای و بیرینگ‌های سوزنی ترجیح داده می‌شوند.

این گونه بیرینگ‌ها را به کمک یک بوش مخصوص می‌توان به‌راحتی بیرون کشید. بیرینگ‌های قابل انفصال بزرگ را به دلیل انطباق پرسی زیاد آنها، به کمک مهره بیرون آورنده M (شکل ۴-۸۲a)، استفاده از پیچ‌های سختکاری شده (شکل ۴-۸۲b) و یا توسط یک مهره هیدرولیکی (شکل ۴-۸۲c) می‌توان بیرون کشید.

۴-۵-۴ روش‌های خاص در نصب و بیرون آوردن بیرینگ‌ها

تجربه نشان داده است که مشکل اصلی در بیرون آوردن

بیرینگ‌هایی که با انطباق پرسی نصب شده‌اند، وجود اصطکاک استاتیک در سطوح درگیر است. اگر در این سطوح خوردگی مکانیکی نیز به وجود آمده باشد، بیرون آوردن بیرینگ حتی دشوارتر خواهد شد. اولین راه حلی



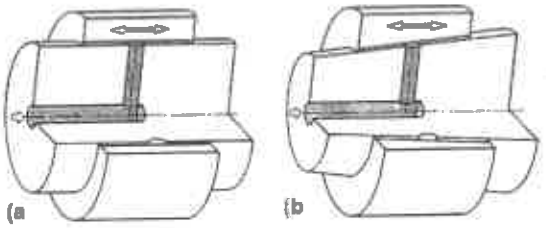
شکل ۴-۸۲ بیرون آوردن بوش تنظیم : a) توسط مهره بیرون آورنده، b) توسط مهره و پیچ‌های بیرون آورنده، c) توسط مهره هیدرولیکی

که برای این مسأله به نظر می‌رسد روانکاری این سطوح برای کاهش اصطکاک است. به‌سادگی می‌توان سطوح خارجی بیرینگ را به روغن یا گریس آغشته کرده و سپس آن را نصب نمود، ولی عیب این روش همانطور که در بخش ۴-۵-۱ اشاره شد این است که پس از گذشت زمان لایه نازک روانکار موجود بین سطوح به خارج رانده شده و انطباق پرسی بین سطوح لق خواهد شد. برای اجتناب از روانکاری می‌توان از روش‌هایی نظیر نصب با نیروی هیدرولیک یا گرم کردن رینگ به صورت القایی استفاده کرد.

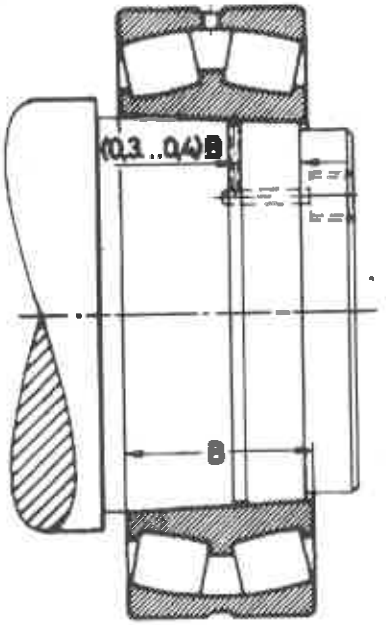
روش‌های هیدرولیکی

روش هیدرولیکی برای بیرون آوردن بیرینگ بدین صورت است که روغن با فشار بین سطوحی که بر روی هم پرس شده‌اند، رانده می‌شود. این کار باعث می‌شود رینگ کمی باز شده (شکل ۴-۸۳) و این سطوح کمی از هم فاصله بگیرند. بدین ترتیب اصطکاک بین سطوح از بین رفته و می‌توان به‌راحتی آنها را نسبت به هم جابه‌جا کرد، بدون اینکه سطوح دچار صدمه‌ای شوند. این روش برای بیرون آوردن بیرینگ‌های با سوراخ استوانه‌ای (شکل ۴-۸۳a) و نصب یا بیرون آوردن بیرینگ‌های با سوراخ مخروطی مناسب است (شکل ۴-۸۳b).

برای تزریق روغن با این روش لازم است کانال‌ها و شیارهایی برای عبور روغن در داخل شفت یا بوش مخروطی ایجاد شده باشد (شکل ۴-۸۴). ابعاد و موقعیت این کانال‌ها و شیارها را می‌توان در کاتالوگ سازندگان بیرینگ‌ها پیدا کرد. همچنین بوش‌های تنظیم مخروطی شیاردار آماده مصرف نیز عرضه می‌شوند (شکل ۴-۸۵).

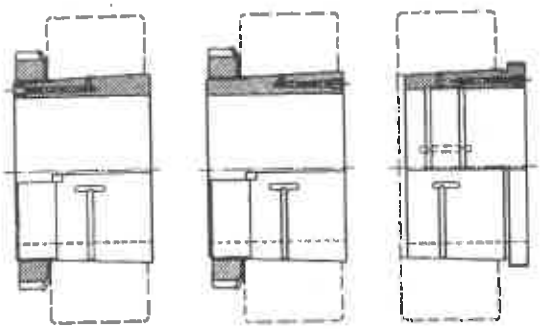


شکل ۴-۸۳ اصول عملکرد فشار هیدرولیکی برای جداکردن سطوح: a) سطوح تماس استوانه‌ای، b) سطوح تماس مخروطی

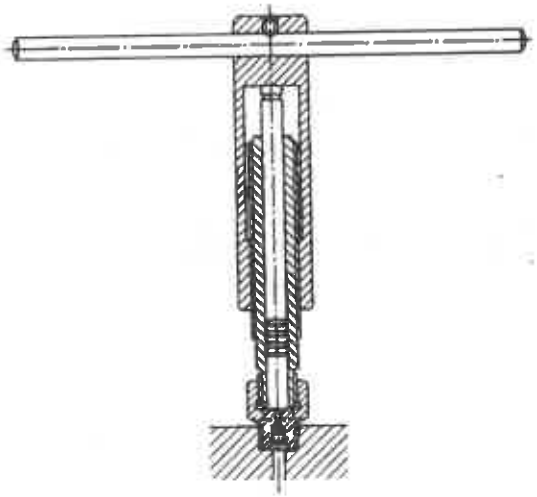


شکل ۴-۸۴ کانال و شیارهای عبور روغن در یک شفت مخروطی

با توجه به اینکه برای بیرون آوردن بیرینگ‌های با سوراخ مخروطی به روش هیدرولیکی، تنها به مقدار اندکی روغن نیاز است، یک تزریق‌کننده کوچک روغن برای این کار کفایت خواهد کرد (شکل ۴-۸۶).

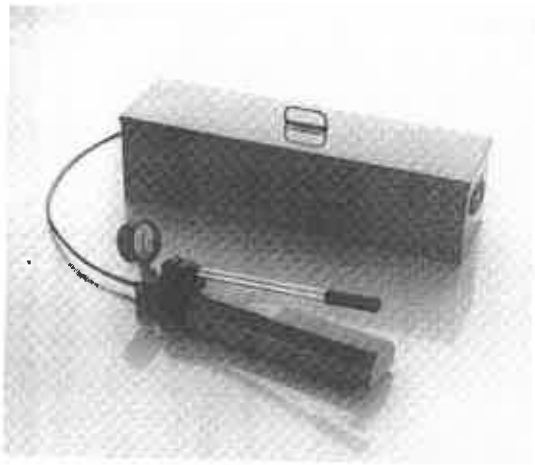


شکل ۴-۸۵ بوش‌های تنظیم مخروطی آماده که شیارها و کانال‌های روغن دارند



شکل ۴-۸۶ تزریق‌کننده روغن با شیر اتصال

ریزش روغن که در طرفین سطوح تماس یک بیرینگ سوراخ استوانه‌ای حین بیرون آوردن به روش هیدرولیکی اتفاق می‌افتد در مقایسه با بیرینگ‌های سوراخ مخروطی بیشتر است و در این مورد نیاز به مقدار روغن بیشتری خواهد بود. در مورد اخیر، یک پمپ پیستونی دو مرحله‌ای (شکل ۴-۸۷) با فشار روغن 800 – 1500 bar (80 – 150 Mpa) لازم است.

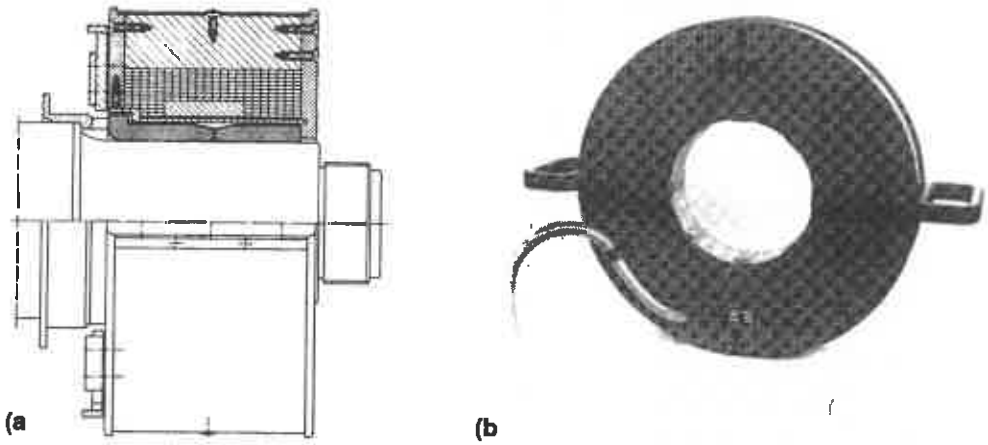


شکل ۴-۸۷ پمپ پیستونی دو مرحله‌ای

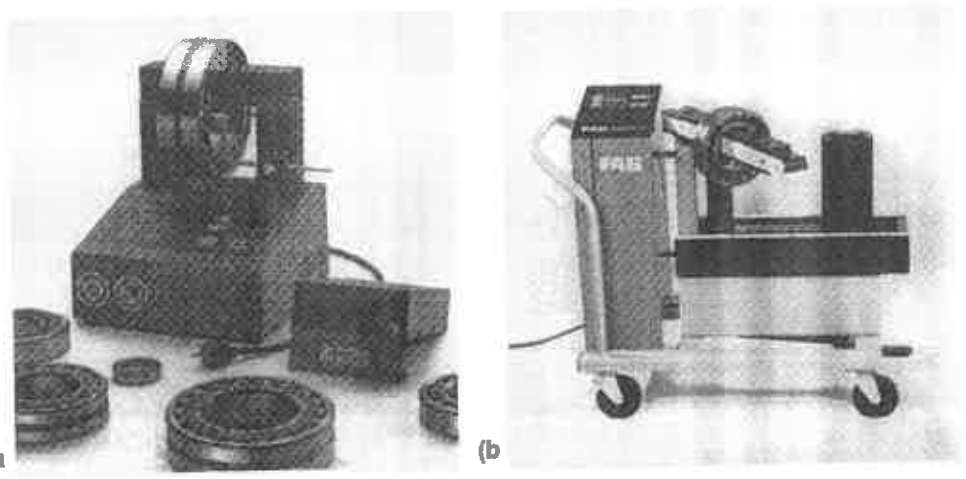
گرم‌کردن القایی

در کنار روش هیدرولیکی، منبسط‌کردن رینگ بیرینگ‌ها به روش گرم‌کردن القایی نیز در نصب بیرینگ‌ها اهمیت یافته‌اند. در شکل ۴-۸۸ تجهیزات گرم‌کردن القایی ساده‌ای برای نصب یا بیرون آوردن رینگ داخلی بیرینگ‌ها نشانداده شده است.

برای سایزهای مختلف بیرینگ‌ها، تجهیزات القایی مختلفی مورد نیاز است. کویل گرم‌کننده القایی را می‌توان به جریان الکتریکی سه فاز معمولی یا از طریق یک ترانسفورمر به یک منبع برق ولتاژ پایین متصل کرد. سرعت گرم شدن به روش القایی آنقدر سریع است که حین بیرون آوردن رینگ یک بیرینگ که محکم بر روی شفت پرس شده است، قبل از اینکه گرمای ایجاد شده در رینگ به شفت انتقال یابد، رینگ منبسط شده و از شفت جدا خواهد شد. روش القایی یک روش اقتصادی در نصب انبوه رولربیرینگ‌های استوانه‌ای و نصب یا بیرون آوردن بیرینگ‌های بزرگ، مثلاً بیرینگ‌های غلتک‌های نورد می‌باشد. در شکل ۴-۸۹ دو دستگاه گرم‌کن القایی نشانداده شده است که می‌توان با آنها انواع بیرینگ‌ها با طرح‌های مختلف، حتی بیرینگ‌های حفاظدار پر شده از گریس را نیز گرم کرد. گرم‌کن این سیستم‌ها براساس ترانسفورمرها کار می‌کند، که در آن بیرینگ به‌عنوان مدار ثانویه (اتصال کوتاه شده) ترانسفورمر عمل می‌کند.



شکل ۴-۸۸ گرم‌کردن القایی برای گرم‌کردن رینگ‌های داخلی رولربیرینگ‌های استوانه‌ای



شکل ۴-۸۹ گرم‌کننده‌های القایی که برای گرم‌کردن بیرینگ‌های کامل به کار می‌روند : a) برای گرم‌کردن بیرینگ‌هایی با قطر سوراخ بزرگتر از 20 mm، b) برای گرم‌کردن بیرینگ‌هایی با وزن حداکثر 250 kg

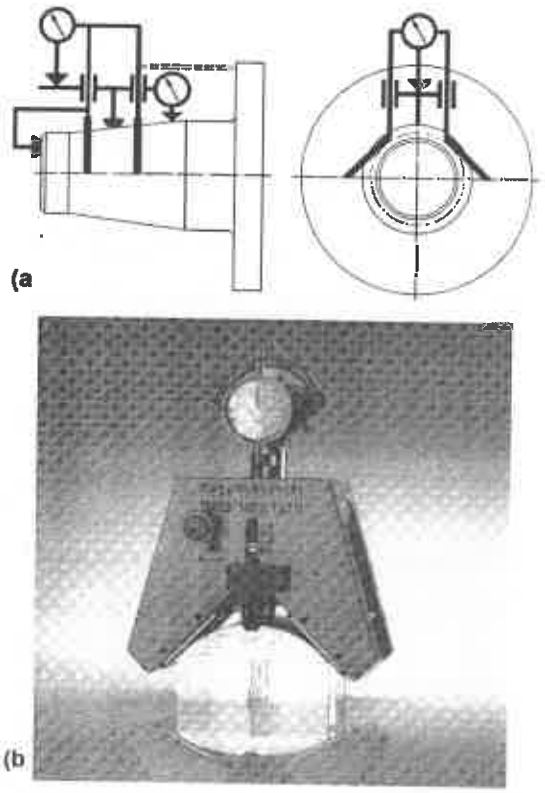
هنگامی که جریان الکتریکی در مدار اولیه برقرار شود، یک جریان الکتریکی در بیرینگ القا می‌شود که کافی است تا حرارت بیرینگ را تا 80 °C و یا تا حرارت موردنظر دیگر گرم کند. با توجه به اندازه بیرینگ، این عمل از چند ثانیه تا حدود 5 دقیقه طول خواهد کشید. گرم‌کننده‌های القایی معمولاً با برق معمولی کار می‌کنند و علاوه بر بیرینگ‌ها می‌توان از آن در گرم‌کردن انواع حلقه‌های فولادی برای مصارف مختلف استفاده کرد.

۴-۵-۵ تجهیزات اندازه‌گیری موردنیاز برای نصب بیرینگ‌ها

دوام و دقت عملکرد یک بیرینگ نه تنها به کیفیت بیرینگ بستگی دارد، بلکه دقت ابعادی شفت یا محل نشیمن بیرینگ در بدنه نیز تأثیر مهمی دارد. اندازه قطر، شیب، میزان عدم گرد بودن، انحراف از مستقیم بودن، لقی شعاعی و یا میزان بار اولیه را قبل از نصب یک بیرینگ باید توسط تجهیزات اندازه‌گیری مناسب کنترل کرد. در این قسمت به‌طور خلاصه در این زمینه توضیح داده می‌شود.

تجهیزات اندازه‌گیری

شیب شفت‌های محل نشیمن بیرینگ‌ها را به روشی که در شکل ۴-۹۰ نشانداده شده، اندازه می‌گیرند. این تجهیزات، چهار فک سختکاری و صیقل شده دارد که با زاویه 90° روی قطعه کار تکیه می‌کنند. یک پایه مبنا که در جلو یا عقب قطعه‌کار قرار می‌گیرد، موقعیت دقیق طولی ابزار را تعیین می‌کند. این ابزار یک قطعه لغزنده دارد که در رولربیرینگ‌های بدون لقی، مهارشده و بین فک‌های تکیه‌گاهی حرکت می‌کند. یک میله حس‌کننده با نوک تیغه‌ای که از پشت به قطعه لغزنده وصل شده، روی سطح شیب‌دار شفت حرکت می‌کند.



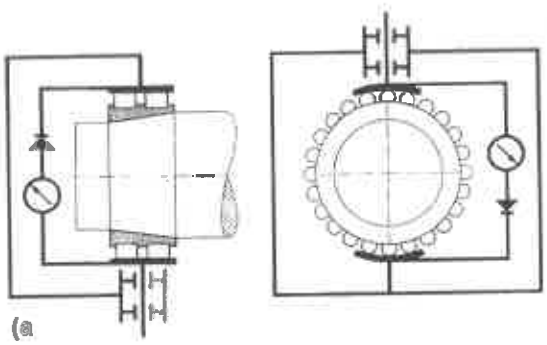
شکل ۴-۹۰ تجهیزات کنترل شیب مخروطی: a) اصول عملکرد، b) تصویر

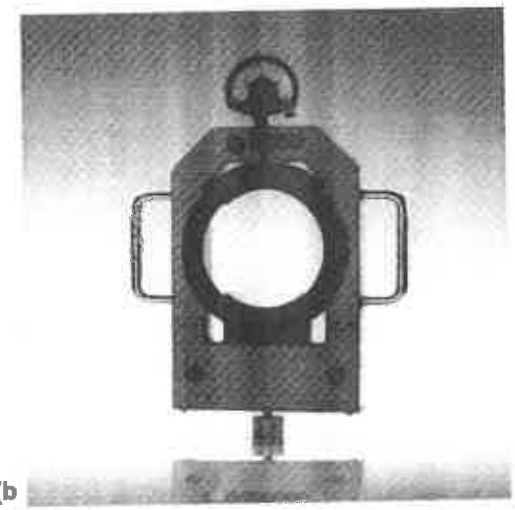
یک ساعت اندیکاتور به بدنه ابزار محکم شده و میله متحرک آن به قطعه لغزنده متصل است. با حرکت قطعه لغزنده و عبور میله حس‌کننده بر روی شفت مخروطی مشخص می‌شود که قطر شفت در مقاطع مختلف چگونه تغییر می‌کند و چقدر نسبت به مقدار اسمی اختلاف دارد. یک ساعت اندیکاتور دیگر در این ابزار نصب شده که قطر محل خاصی از شفت مخروطی را اندازه گرفته و مشخص می‌کند قطر شفت چقدر از مقدار اسمی انحراف دارد. تنظیم اولیه این ابزار با یک قطعه مخروطی نمونه انجام می‌شود. دقت اندازه‌گیری با این در حد 1 μm است.

تجهیزات اندازه‌گیری دایره مرزی

در بسیاری از موارد لازم است لقی شعاعی یا بار اولیه یک رولربیرینگ استوانه‌ای حین نصب تنظیم شود. این عمل توسط تجهیزات اندازه‌گیری دایره مرزی یا دایره محیط بر رولرها امکانپذیر می‌شود. در شکل ۴-۹۱ تجهیزات اندازه‌گیری قطر دایره مرزی، برای تنظیم لقی یا بار اولیه در یک رولربیرینگ استوانه‌ای با رینگ خارجی قابل انفصال (طرح N) نشان داده شده است. در این ابزار دو فک فولادی سختکاری شده و سنگ خورده دقیق وجود دارد که در مقابل یکدیگر قرار گرفته‌اند. فک بالایی با پیچ محکم به بدنه وصل شده و فک پایینی که در یک بوش راهنمای ساچمه‌ای دقیق حرکت می‌کند، به صورت شعاعی قابل تنظیم است و یک ساعت اندیکاتور نیز به آن وصل است.

قطر داخل رینگ خارجی یک رولربیرینگ استوانه‌ای، به‌راحتی با یک داخل‌سنج ساعتی به‌دقت قابل اندازه‌گیری است. این اندازه به‌عنوان یک اندازه مبنا بر روی ابزار سنجش د ایره مرزی تنظیم شده و سپس این ابزار بر روی مجموعه رولرها و رینگ داخلی قرار داده می‌شود. در این وضعیت، رینگ داخلی را بر روی شفت مخروطی آنقدر جابه‌جا می‌کنند تا لقی مطلوب (یا بار اولیه) بین رولرها و رینگ خارجی به دست آید. توسط این ابزار می‌توان میزان لقی یا بار اولیه یک بیرینگ را با دقت 1 μm تنظیم کرد. بدین ترتیب دقت عملکرد بیرینگ تضمین خواهد شد. تجهیزات اندازه‌گیری قطر

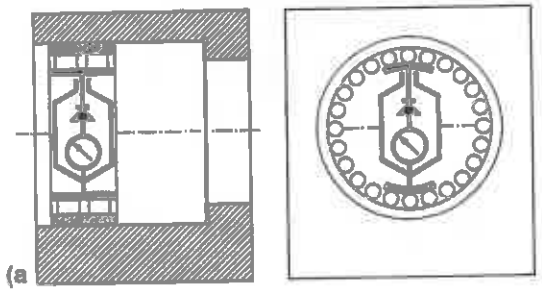

(a

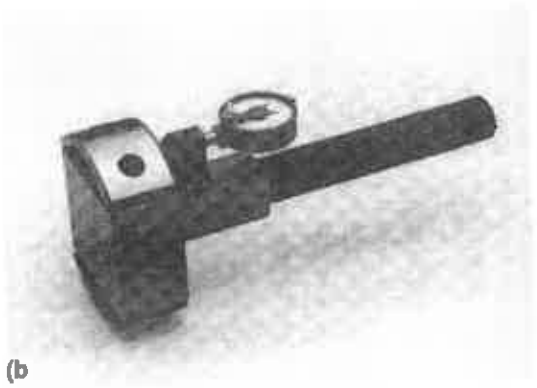

(b

شکل ۴-۹۱ ابزار اندازه‌گیری قطر دایره مرزی برای تنظیم لقی شعاعی یا بار اولیه در یک رولربیرینگ استوانه‌ای با رینگ خارجی قابل انفصال: a) اصول عملکرد، b) تصویر

دایره مرزی نشانداده شده در شکل ۴-۹۲ برای تنظیم لقی رولربیرینگ‌های استوانه‌ای طرح NU به کار گرفته می‌شود.

با این ابزار می‌توان به کمک دو فک سختکاری شده و سنگ خورده دقیق، قطر دایره مرزی داخل رولرها را اندازه گرفت. فکهای این ابزار روبه‌روی هم قرار دارند و یکی از آنها قابل تنظیم است. این ابزار داخل مجموعه مونتاژ شده رینگ خارجی و رولرها قرارگرفته و روی صفر تنظیم می‌شود. سپس یک سنجه نعلی ساعت‌دار به اندازه دایره مرزی داخل رولرها تنظیم شده و با اندازه روی رینگ داخلی بیرینگ مقایسه می‌شود. اگر رینگ داخلی بیرینگ به‌صورت خشن سنگ‌زنی شده باشد، می‌توان با سنگ زدن و پرداخت نهایی، اندازه قطر روی این رینگ را براساس لقی یا بار اولیه موردنیاز در بیرینگ تمام کرد. اگر رینگ داخلی بیرینگ کاملاً پرداخت شده باشد، با جابه‌جا کردن آن روی شفت


(a


(b

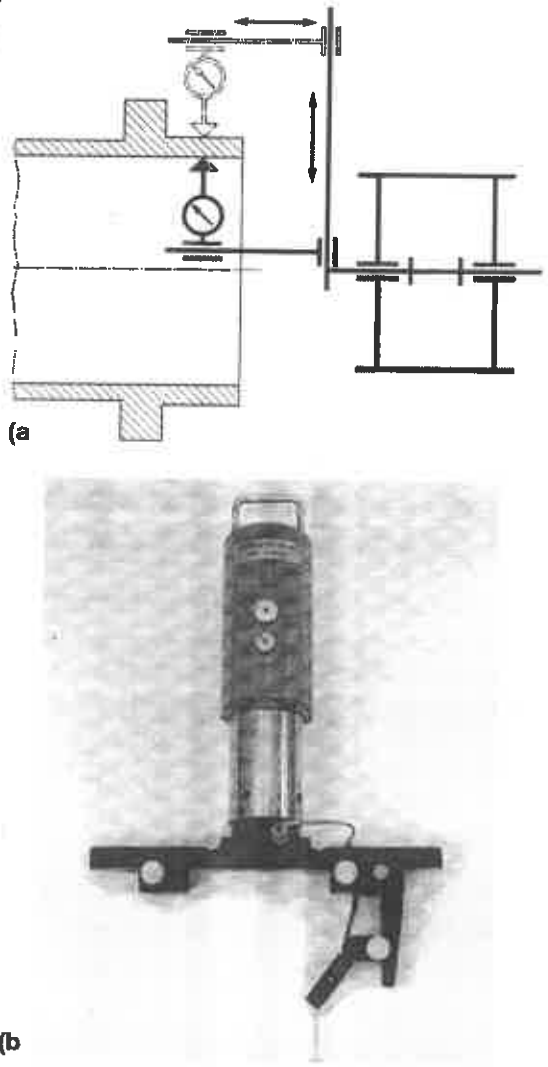
شکل ۴-۹۲ تجهیزات اندازه‌گیری و تنظیم لقی شعاعی یا بار اولیه رولربیرینگ‌های استوانه‌ای با رینگ داخلی قابل انفصال، جهت سنجش قطر داخلی مخاط در داخل رولرها: a) اصول عملکرد، b) تصویر

مخروطی می‌توان به لقی دلخواه رسید. دو نوع از این ابزارها که به‌صورت استاندارد عرضه شده‌اند عبارتند از : MGI 21 برای سنجش قطر دایره مرزی داخل رولرها در محدوده F_w = 113 – 360 mm و MGA 31 برای سنجش قطر دایره مرزی روی رولرها در محدوده E_w = 192 – 330 mm.

ابزار سنجش گردبودن

این ابزار که در شکل ۴-۹۳ نشانداده شده است، قادر است دقت گرد بودن سطوح استوانه‌ای داخلی و خارجی را اندازه‌گیری کند و محدوده عملکرد آن 3 – 300 mm می‌باشد (بخش ۱-۴-۳). این ابزار، هم در وضعیت افقی و هم در وضعیت عمودی بخوبی عمل کرده و دقت اندازه‌گیری آن کمتر از 2 µm است. یک موتور سنکرون کوچک، محور گردان ابزار را با سرعت دورانی حدود $6\ min^{-1}$ می‌چرخاند.

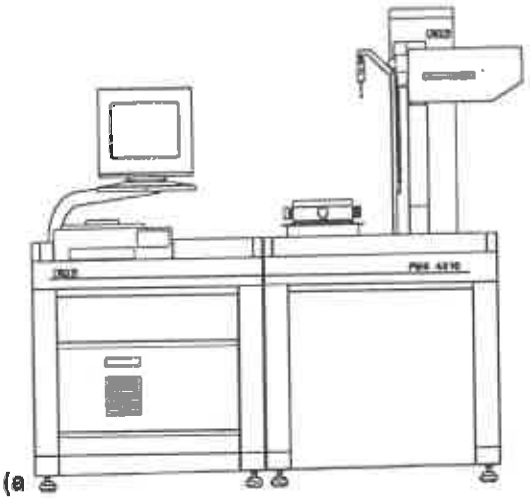
ابزارهای استاندارد سنجش گرد بودن دارای طرح مدولار هستند. این ابزارها یک بازوی نگهدارنده و تجهیزات سنجش مخصوص دارند. بعضی از مدل‌های این ابزار به تجهیزات اندازه‌گیری الکترونیکی مجهز هستند. در طرح دیگری از ابزارهای سنجش گرد بودن، ستون نگهدارنده عمودی بر روی پایه‌ای تخت نصب شده که برای حرکت راحت‌تر آن روی میز اندازه‌گیری، از نازل‌های ریز که در سطح زیرین پایه تعبیه شده، برای خروج هوای فشرده استفاده شده است. (بدین ترتیب وزن پایه و ستون روی بالشتکی از هوا معلق شده و جابه‌جایی آن خیلی آسان می‌شود). تجهیزات سنجش روی ستون دستگاه نصب می‌گردد.

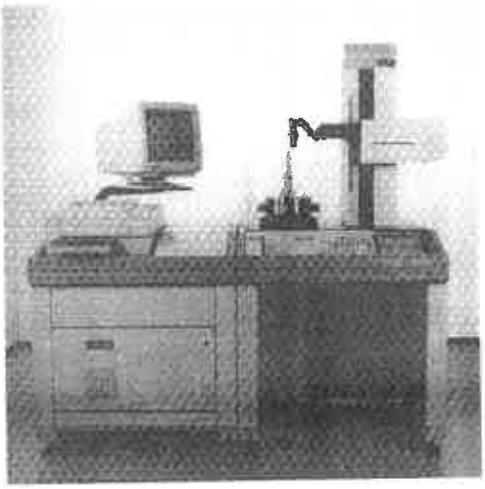


شکل ۴-۹۳ ابزار سنجش گرد بودن یک استوانه مجهز به بازوی نگهدارنده و ساعت اندیکاتور: a) اصول عملکرد، b) تصویر

از این ابزار پایه‌دار به‌عنوان یک ابزار ثابت برای سنجش گرد بودن قطعات استفاده می‌شود. نتایج حاصل از

سنجش گردبودن توسط این ابزارها را می‌توان بر روی صفحه مونیتور یا به‌صورت گزارش چاپ شده روی کاغذ انتقال داد. یک سوئیچ مغناطیسی که در محور مرکزی این ابزار قرار گرفته، مشخص می‌کند که اندازه‌گیری در چه مقطعی از قطعه‌کار انجام شده است. همچنین محور مرکزی را می‌توان در چهار وضعیت گردشی با فواصل 90° نسبت به هم قفل‌کرده و اندازه‌گیری را در این وضعیت‌ها انجام داد. این ابزار را می‌توان برای سنجش مستقیم بودن استوانه در جهت طولی نیز به کار برد. بعضی از این ابزارها به‌صورت صلب و محکم طراحی و ساخته می‌شوند و می‌توان براحتی از آنها در کارگاه استفاده نمود. این ابزارها قادر هستند گردبودن محل نشیمن بیرینگ‌ها و همچنین محورهای مخروطی را در مقاطع مختلف و طول‌های متفاوت اندازه‌گیری نمایند. در کارخانجات سازنده ماشین‌های ابزار، برای سنجش گرد بودن از تجهیزات ثابت (شکل ۳-۹۳) استفاده می‌کنند، که هم در کارگاه و هم در قسمت کنترل کیفیت کاربرد دارند. این ابزارها با توجه به دقت‌حرکت در کشویی عمودی می‌توانند برای اندازه‌گیری دقت مستقیم بودن نیز به کار روند. امروزه استفاده از الکترونیک، دقت و سهولت اندازه‌گیری را بهبود بخشیده است و تجهیزات اندازه‌گیری با پردازش اطلاعات ورودی، صرف نظر از دقت اپراتور می‌تواند سنجش و ارزیابی دقیقی انجام دهند.


(a


(b

شکل ۳-۹۳ تجهیزات کنترل فرم مجهز به پردازشگر و چاپگر: a) اصول عملکرد، b) تصویر

فصل ۵

آسیب دیدگی بیرینگ های غلتشی

عمر کاری یک بیرینگ غلتشی که تحت بار می‌چرخد به دلایل خستگی ماده، سایش داخل رینگ‌ها و اجزاء غلتنده یا عدم روانکاری مناسب پایان می‌یابد. بیرینگ‌هایی که تحت تنش‌های استاتیکی قرار دارند، به علت تغییر شکل پلاستیک سطوح تحت تنش از رده خارج می‌شوند.

۵-۱ کلیات

صدمات وارده بر بیرینگ‌ها، عموماً از رفتار غیرمعمولی بیرینگ درمجموعه آشکار می‌شود. گردش غیریکنواخت یا صدای غیرعادی معمولاً نشان‌دهنده سطوح غلتش پوسته پوسته شده در اثر خستگی و یا تغییر لقی بیرینگ در اثر سایش می‌باشد. وجود اصطکاک زیاد در یک بیرینگ که مانع از گردش روان آن می‌شود، می‌تواند نشاندهنده زیاد بودن بار اولیه، روانکاری ضعیف یا سطوح غلتش آسیب‌دیده باشد. ایجاد حرارت بیش از حد در بیرینگ نشانه‌ای از وجود اصطکاک زیاد در آن است. اگر افزایش حرارت یک بیرینگ دفعتاً اتفاق بیفتد، ممکن است ناشی از قطع جریان روانکاری باشد، به شرطی که در بقیه شرایط تغییری حاصل نشده باشد. در ماشین‌های ابزار سایش یا دیگر صدمات وارد بر بیرینگ‌های اسپیندل، از افت دقت قطعه کار ماشینکاری شده با آن معلوم می‌گردد.

پدیده‌های گفته شده در زمینه علل و نشانه‌های صدمات وارد شده به یک بیرینگ را می‌توان به کار گرفت تا بر کیفیت عملکرد بیرینگ بتوان نظارت کرد. این کار مثلاً با استفاده از ادوات سنجش حرارت و ارتعاش قابل انجام است (بخش ۵-۳). هنگامی که اولین نشانه‌ها در ایجاد صدمات زودرس یک بیرینگ ظاهر گردید، با بررسی علل می‌توان از بروز صدمات مشابه در آینده پیشگیری نمود. گاهی اوقات لازم است برای بررسی عیوب احتمالی در یک بیرینگ آن را بیرون آورده و آزمایش کرد. همیشه تشخیص دلیل اولیه آسان نیست و این علت ممکن است به علت بروز صدمات بعدی و به مرور زمان در پشت علل دیگر پنهان بماند. مثلاً با بررسی

بیرینگی که کاملاً خراب شده و به سختی آسیب دیده باشد، تنها می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که بیرینگ به‌شدت گرم شده و اجزاء آن در هم گیر کرده است. علل اولیه و اصلی بروز چنین صدمه‌ای، مثلاً ایجاد بار اولیه بیش از حد هنگام مونتاژ، کمبود روانکاری یا عیوب ناشی از خستگی قابل تشخیص *نخواهد* بود.

اگر بیرینگ خیلی صدمه ندیده باشد، با بررسی مسیر غلتش اجزاء غلتنده و انجام آزمایشات لازم می‌توان نتایجی قطعی به‌دست آورد. ولی ارائه روشی که با اتخاذ آن از بروز چنین صدمه‌ای در آینده جلوگیری شود، مستلزم مطالعات کافی درباره شرایط کار بیرینگ (بار و سرعت)، نحوه روانکاری و طرح کلی محل استقرار بیرینگ (نحوه قرارگیری بیرینگ در مجموعه، انطباق و غیره) می‌باشد. همچنین باید درباره نشانه‌های موجود و پدیده‌های ثانویه ناشی از آن نیز اطلاعات لازم را گردآوری کرد. بدین ترتیب لازم است قبل از بیرون آوردن بیرینگ از مجموعه، تمام مشخصه‌های عملکردی یا رفتار بیرینگ حین کار را یادداشت نمود. در مواردی که موقعیت بیرینگ در یک دستگاه بحرانی باشد، توصیه می‌شود از یک نفر متخصص شرکت سازنده بیرینگ برای مشاوره یا بیرون آوردن بیرینگ کمک گرفت. نکات قابل توجه برای بیرون آوردن یک بیرینگ را می‌توان در مدارک منتشر شده از سوی شرکت سازنده پیدا کرد.

قبل از بیرون آوردن یک بیرینگ، باید شرایط کلی ماشین را بررسی کرده و مشخص نمود که آیا مثلاً ذرات خارجی، آب، محلول‌های خورنده و از این قبیل ممکن است وارد بیرینگ شده باشد؟ سیستم روانکاری را نیز از نظر نشتی و میزان روغن باید کنترل کرد. کار بعدی، بررسی صدای بیرینگ حین گردش است. نوع صدا، یکنواختی آن، قطع و وصل شدن آن و از این قبیل، مواردی هستند که باید مورد دقت قرار گیرد.

پیچ‌های ضامن و مهره‌های نگهدارنده پشت بیرینگ را از نظر میزان محکم بودن کنترل کنید، زیرا این قطعات از اهمیت خاصی در تنظیم لقی یا بار اولیه بیرینگ برخوردار هستند. قبل از بیرون آوردن رینگ‌های بیرینگ، موقعیت آنها را نسبت به نشیمنگاه و جهت اعمال نیرو را علامت‌گذاری کنید، زیرا این اندازه‌گیری اطلاعات مهمی را درباره مونتاژ اولیه بیرینگ دربر دارند.

به هنگام بیرون آوردن بیرینگ‌ها باید هر مورد خاصی در مورد دشواری یا آسانی بیرون آوردن را یادداشت کرد. پس از بیرون آوردن باید قطر و گرد بودن شفت و نشیمنگاه بیرینگ در بدنه را اندازه گرفت، چون این نیز یکی از علل آسیب رسیدن به بیرینگ‌ها می‌باشد.

اگر لازم است بیرینگ بیرون آورده شده و از نظر آسیب بررسی شود، *نباید* ماده روانکار داخل بیرینگ را تمیز کرد، زیرا با تمیز شدن بیرینگ به‌سختی می‌توان به عیب اصلی پی برد. همچنین باید دقت کرد که آلودگی‌های خارجی داخل بیرینگ *نشود*. بیرینگ را باید در پوشش پلاستیکی بست و برای بررسی ارسال کرد. استفاده از کاغذ باعث جذب روغن یا گریس شده و ممکن است به نتیجه‌گیری غلط منجر شود.

از روانکار نیز باید نمونه‌برداری کرد، زیرا کیفیت آن ممکن است تأثیر جدی در آسیب رسیدن به بیرینگ داشته باشد. روغن داخل بیرینگ را برای بررسی باید درون یک ظرف تمیز خالی کرد و آن را از نظر وجود ذرات خارجی و براده‌های فلزی بازدید نمود. اگر از گریس برای روانکاری استفاده شده باشد، باید یک نمونه

گریس از بیرینگ و یک نمونه از نشیمنگاه مجاور بیرینگ برداشته شود. غلاف‌های محافظ و واشرهای آب‌بندی را *نباید* فوراً پاک کرد، بلکه باید تا روشن شدن علت آسیب آن را دست *نخورده* نگاه داشت.

البته در بسیاری موارد، نیازی به این بررسی‌ها و مطالعات دقیق *نخواهد* بود. مثلاً هیچ کس برای بررسی علت آسیب رسیدن به یک بیرینگ کوچک، بررسی‌های دقیق و پرهزینه را انجام *نمی‌دهد*. ولی چنانچه صدمه‌ای به بیرینگ یک ماشین سنگین که سفارشی ساخته شده و طبعاً بسیار گران قیمت نیز هست، وارد شود، انجام بررسی‌های سیستماتیک در مورد آن بسیار با ارزش خواهد بود.

۵-۲ علل ایجاد صدمات در بیرینگ‌ها

برشمردن تمام انواع علل ایجاد صدمات در بیرینگ‌ها خارج از حدود این کتاب است و بنابراین تنها مهمترین آنها در این قسمت شرح داده می‌شود. اصولاً میان صدمات ناشی از خستگی، سایش و تغییر شکل پلاستیکی در بیرینگ‌ها و صدمات ناشی از *نامناسب* بودن شرایط کاری و ایرادات مونتاژ، تفاوت‌هایی وجود دارد ولی *نمی‌توان* حد و مرز مشخصی میان این دو گروه ترسیم کرد.

بیرینگی که تحت شرایط بار معمولی قرار داشته باشد، پس از گذشت مدت زمان خاصی بر اثر خستگی، جنس بیرینگ خراب خواهد شد. بیرینگی که بیش از حد مجاز، تحت تنش یا بار اولیه قرار داشته باشد نیز در اثر خستگی ولی در مدت زمانی کوتاه‌تر از معمول خراب می‌شود. این موضوع درباره سایش بیرینگ نیز صادق است. هر چند که اندکی سایش در بیرینگ‌ها طبیعی و *اجتناب‌ناپذیر* است، معذلک سایش زودرس در اثر آب‌بندی *نامناسب*، ورود آلودگی به داخل بیرینگ و عدم روانکاری کافی قابل پیشگیری بوده و باید با انجام بررسی‌های لازم برطرف گردد.

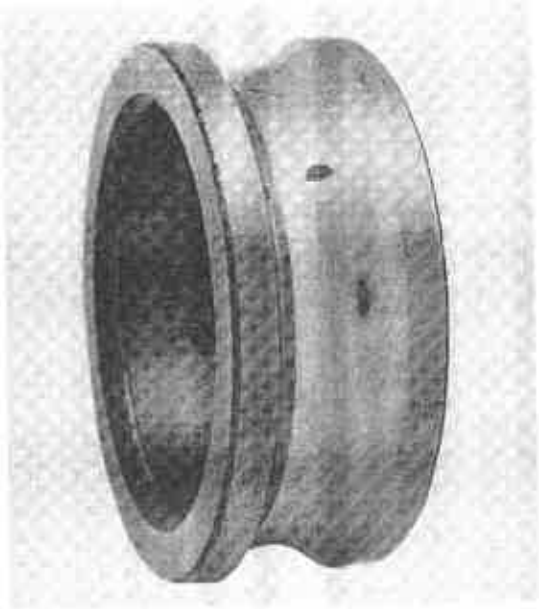
۵-۲-۱ خستگی

هر نوع بیرینگ غلتشی که تحت بار بیش از حد استحکام دوام قرار داشته باشد، با توجه به میزان بار و دفعات گردش، عمر خستگی مشخصی خواهد داشت یک بیرینگ هنگامی که سطوح غلتش در رینگ‌ها و اجزاء غلتنده‌اش در اثر خستگی ماده سازنده دچار آسیب شود، به پایان عمر کاری‌اش نزدیک شده است. معمولاً ترک‌های ریزی که در رینگ‌ها ایجاد می‌شود، به علت وجود یک فرورفتگی یا آسیب نقطه‌ای بوده است که در اثر فشار یک ذره خارجی پدید آمده است. اگر روانکاری یک بیرینگ مناسب بوده و از روغن تمیز در آن استفاده گردد، این عیب در لایه‌های زیر سطح آغاز می‌گردد. ویژگی‌های انواع عیوب ناشی از خستگی در قسمت‌های بعدی شرح داده می‌شود.

خستگی معمول

آسیب ناشی از خستگی معمول با ایجاد ترک‌های بسیار ریز در زیر سطح ماده آغاز می‌شود. پس از پیدایش این ترک‌های ریز، با ادامه اعمال بار به بیرینگ، ترک به طرف سطح گسترش می‌یابد (شکل ۵-۱) و سبب می‌شود تکه‌های کوچکی از سطح کنده شده و چاله‌های کوچکی در سطوح غلتش ایجاد گردد (شکل ۵-۲).

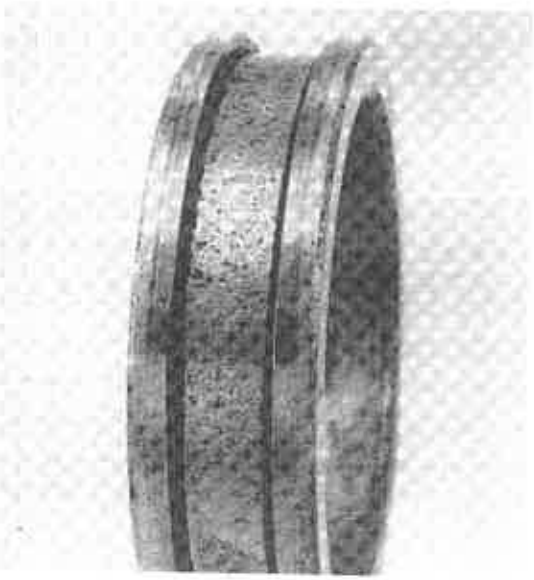
شکل ۵-۱ اولین ترک‌های ناشی از خستگی بر روی رینگ داخلی یک بلبیرینگ شیار عمیق



شکل ۵-۲ حفره‌دار شدن سطح رینگ داخلی یک بلبیرینگ شیار عمیق

پیدایش و گسترش این عیب به روانکاری بیرینگ نیز بستگی دارد. اگر لایه نازک روانکار *نتواند* سطوح غلتش اجزاء را به‌خوبی از هم جدا کند، لغزش این اجزا بر روی هم سبب می‌شود ترک‌ها هر چه نزدیک‌تر به سطح ایجاد شوند. اگر بیرینگ با همین وضعیت به کار ادامه دهد، عیب به‌سرعت گسترش می‌یابد زیرا ذرات کنده شده از سطح در بین سطوح غلتش جابه‌جا شده و باعث ایجاد بار اضافی نقطه‌ای خواهند شد. در شکل ۵-۳ پوسته‌شدن سطح غلتش را در رینگ داخلی یک بلبیرینگ شیار عمیق نشان می‌دهد. در شکل ۵-۴ نیز همین عیب در رینگ داخلی یک رولربیرینگ استوانه‌ای مشاهده می‌شود. وجود چنین صدمه پیشرفته‌ای در یک بیرینگ، شرایط عادی عملکرد آنها را بشدت مختل کرده و باعث عدم روانی در گردش و ایجاد صدا در بیرینگ

شکل ۵-۳ ایجاد حفره‌های ریز بسیار زیاد (پوسته شدن) در رینگ داخلی یک بلبیرینگ شیار عمیق



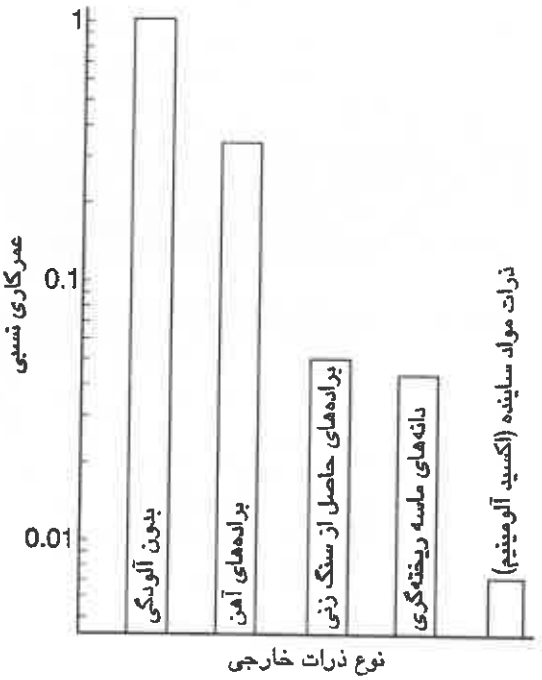
شکل ۵-۴ پوسته شدن پیشرفته در رینگ داخلی یک رولربیرینگ استوانه‌ای

خواهد شد. ادامه کار بیرینگ در این شرایط ممکن است به شکستن آن منجر شود، زیرا غلتش اجزاء بیرینگ روی تکه‌های بزرگتر کنده شده از سطح رینگ صورت می‌گیرد. شکستن قفسه بیرینگ نیز یکی دیگر از پیامدهای صدمات پیشرفته ناشی از خستگی می‌باشد.

خستگی ناشی ازگردش ذرات خارجی درون بیرینگ

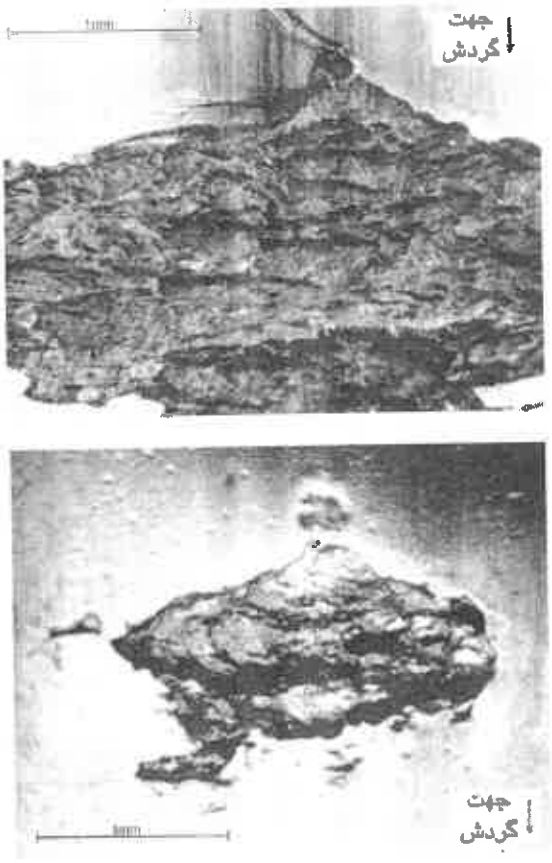
مطالعات عمیق در بررسی رفتار خستگی بیرینگ‌ها تحت شرایط آزمایشگاهی و تجربیات کارگاهی نشانداده است که تمیز بودن ماده روانکار یک پیش شرط اساسی در افزایش طول عمر بیرینگ به شمار می‌رود. اگر ذرات خارجی همراه با روانکار درون بیرینگ گردش کند، عمر مفید بیرینگ به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. اثر وجود ذرات خارجی مختلف درون بیرینگ در کاهش عمر مفید آن، در شکل ۵-۵ نشانداده شده است.

همانطور که در شکل ۵-۵ مشاهده می‌شود، وجود ذرات سخت حاصل از مواد ساینده داخل بیرینگ بشدت مخرب است. هنگامی که این ذرات درون بیرینگ گردش می‌کنند، براحتی سطوح اجزاء رینگ‌ها را کنده و این تکه‌های کوچک در بین اجزای غلتنده باعث ایجاد تنش‌های نقطه‌ای و با گذشت زمان تخریب سطوح غلتش می‌شوند. به دنبال آن ترک‌هایی در سطح ایجاد شده و به منطقه پرتنش زیر سطح انتشار می‌یابند



شکل ۵-۵ کاهش عمر کاری یک بلبیرینگ با تماس زاویه‌ای B 7205 دراثر وجود ذرات خارجی مختلف درون آن

و پس از آن به صورت خستگی کلاسیک در بیرینگ بروز می‌کند. در شکل ۵-۶ یک حفره V- شکل که دقیقاً در پشت اثر فرورفتگی ناشی از لغزیدن یک ذره خارجی به وجود آمده، نشانداده شده است. این مکانیزم یکی از علل عمده صدمه ناشی از خستگی به شمار می‌رود. البته این عیب بندرت مانند شکل ۵-۶ واضح است، زیرا در عمل صدمه ایجاد شده در یک بیرینگ، در مراحل پیشرفته کشف می‌گردد.



شکل ۵-۶ صدمه ناشی از خستگی که در اثر وجود ذرات خارجی سخت درون بیرینگ به وجود آمده است. این آسیب در جهت دوران گسترش یافته و به شکل V در می‌آید.

خستگی ناشی از سایش

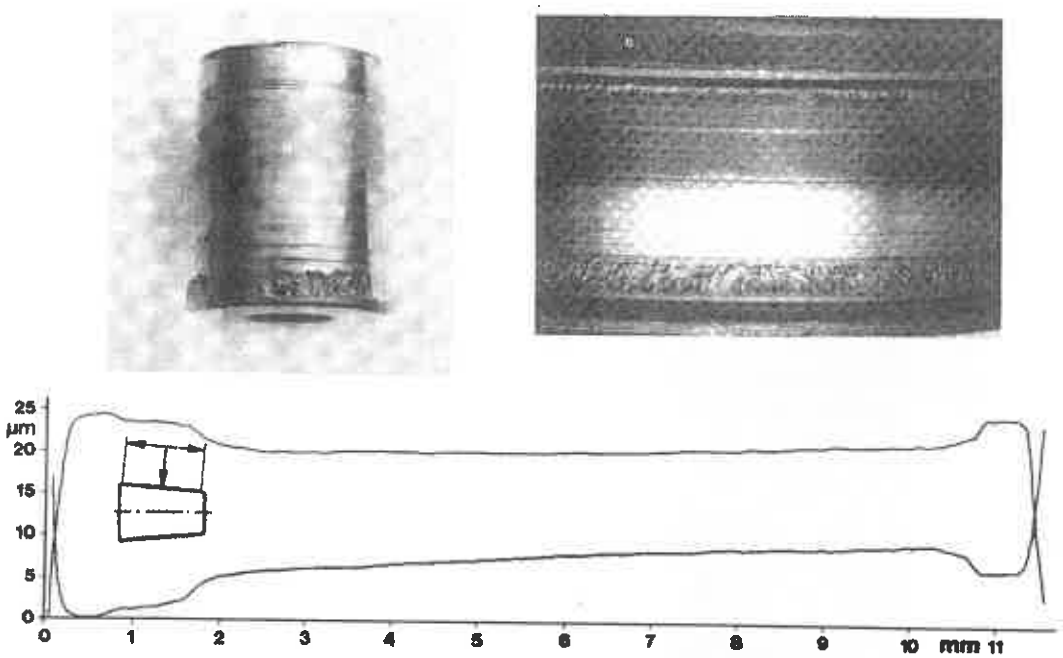
در بیرینگ‌هایی که محل تماس اجزاء غلتنده با رینگ‌ها به‌صورت خطی است (رولربیرینگ‌ها)، در اثر سایش، شکل ناحیه تماس رفته رفته تغییر می‌کند (شکل ۵-۷). با تغییر شکل اجزاء غلتنده، رینگ‌ها تنها در نقاطی از رولر که ساییده نشده، با رولرها در تماس خواهد بود و این پدیده باعث افزایش *ناخواسته* تنش موضعی شده و به خستگی زودرس ماده می‌انجامد (شکل ۵-۸). این عیب به‌صورت خطوط و نوارهای حلقه‌ای در قطعات ظهور می‌کند. شکل ظاهری رولرها در این وضعیت به‌صورت یک استخوان در می‌آید. برای جلوگیری یا کاهش صدمات در اثر این پدیده می‌توان از روغن تمیزتر استفاده کرد، لقی را در صورت امکان کاهش داد و یا عملیات حرارتی خاصی بر روی اجزاء انجام داد.

خستگی به علت روانکاری ضعیف

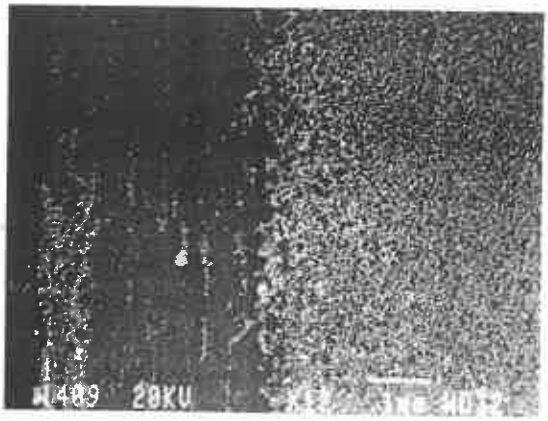
نوع خاصی از خستگی هنگامی اتفاق می‌افتد که مقدار لایه روانکار *نتواند* اجزاء غلتنده را کاملاً از سطح رینگ‌ها جدا کند.

این اشکال احتمالاً به‌دلیل کمبود روغن، عدم وجود ماده افزودنی EP مناسب در روغن و یا نسبت لزجت پایین ($\kappa = v/v_1 < 0.4$) اتفاق می‌افتد و این به معنای کافی *نبودن* فیلم روانکار است.

براساس تئوری هرتز، حداکثر تنش در یک ماده، حین اعمال بارهای کاملاً عمودی، در عمق خاصی زیر سطح ایجاد می‌شود و این پدیده مستقل از فرضیه استحکام به کار رفته می‌باشد. بنابراین منشا ایجاد خستگی معمول در سطوح غلتش، ترک‌های کوچک زیر سطحی است.



شکل ۵-۷ سطح مقطع یک رولر با سطوح ساییده شده : این سایش ممکن است آنقدر شدید باشد که باعث تمرکز تنش به صورت موضعی و درنهایت خستگی ماده شود.



شکل ۵-۸ ایجاد حفره‌های ریز بی‌شمار روی رینگ یک رولربیرینگ استوانه‌ای به دلیل اعمال تنش‌های سنگین سطحی

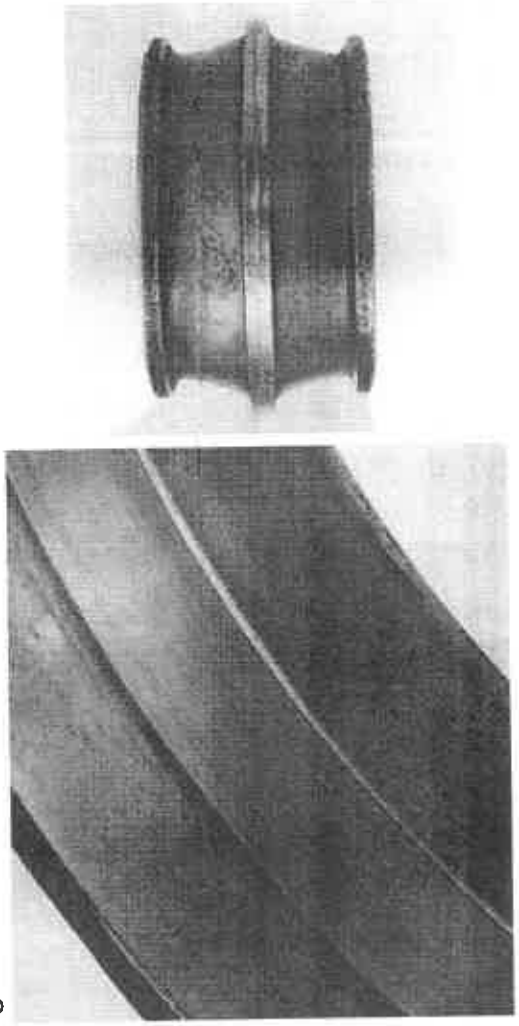
هنگامی که یک لایه ضعیف روغن در سطوح غلتش حضور داشته باشد، شرایط تفاوت می‌کند. این لایه روغن باعث ایجاد تنش‌های لغزشی در سطوح تماس می‌شود. وجود این تنش‌های مماسی سبب می‌شود که حداکثر تنش به طرف سطح جابه‌جا شود. هنگامی که این تنش مماسی زیاد شود، آسیب ناشی از خستگی در سطح آغاز خواهد شد. با اعمال تنش‌های سطحی سنگین حفره‌های ریزی در سطح ایجاد می‌گردد که بتدریج تمام سطح را دربر گرفته و درواقع لایه نازکی از سرتاسر ماده جدا می‌گردد (شکل ۵-۸). این عیب به افزایش صدای یک بیرینگ و عدم گردش روان آن منجر می‌شود.

اگر شرایط حداکثر استحکام دوام در یک بلبیرینگ ارضاء نشود، ایجاد خستگی در ماده سازنده اجزاء غلتنده، امری عادی و اجتناب‌ناپذیر است. اگر یک بیرینگ زودتر از زمان پیش‌بینی شده از نظر عمر خستگی خراب شود، می‌توان نتیجه گرفت که بار واقعی اعمالی به بیرینگ بیش از مقدار محاسبه شده است. اگر بار وارده به بیرینگ در حد مجاز باشد، علت تخریب می‌تواند روانکاری ضعیف، وجود ذرات خارجی در روغن یا اشکال در نصب اولیه باشد. وجود عیب در ساخت بیرینگ در کارخانه سازنده بندرت اتفاق افتاده است.

۵-۲-۲ سایش

همانطور که در توضیحات شکل ۵-۷ ارائه شد، سایش یکی از علل عمده خرابی بیرینگ‌ها به شمار می‌رود. سایش اصولاً به دلیل وجود آلودگی، ذرات خارجی، آب و مواد خنک‌کننده در داخل بیرینگ‌هایی که به‌خوبی آب‌بندی نشده باشند به وجود می‌آید. اغلب خرابی‌های بیرینگ در اثر سایش ناشی از روانکاری با روغن آلوده است. با توجه به اینکه در اغلب ماشین‌های صنعتی، بیرینگ‌ها، چرخدنده‌ها و دیگر اجزاء ماشین با یک روغن روانکاری می‌شوند، ممکن است براده‌های ریز حاصل از سایش قطعات به داخل بیرینگ نیز نفوذ کند.

ذرات ساینده نظیر غبار خاک و ذرات سنگ، سطوح غلتش یک بیرینگ را خشن کرده و ظاهر آن را مات می‌کند. سطح مقطع یا شکل اولیه اجزاء غلتنده و رینگ‌ها ممکن است به تدریج دچار تغییر شود (شکل ۵-۷). سایش زیاد باعث افزایش قابل توجه لقی در بیرینگ می‌گردد. در شکل ۵-۹a رینگ داخلی یک رولربیرینگ کروی که بشدت ساییده شده نشانداده شده است. در شکل ۵-۹b نیز رینگ خارجی همان رولربیرینگ نشانداده شده است. توجه کنید که مسیر حرکت رولرها تا چه اندازه ساییده و گود شده است.

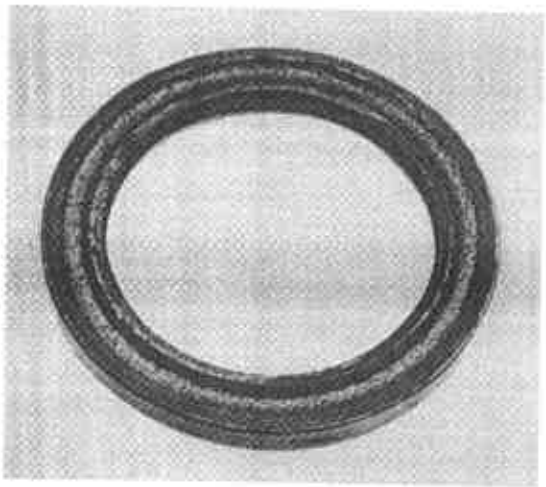


شکل ۵-۹ رینگ‌های ساییده شده یک رولربیرینگ کروی: a) رینگ داخلی، b) رینگ خارجی

۵-۲-۳ صدمه ناشی از خوردگی

واشر شفت یک بلبیرینگ کف‌گرد که به‌شدت خورده شده، در شکل ۵-۱۰ نشانداده شده است. تصویر رولربیرینگ مخروطی نشانداده شده در شکل ۵-۱۱ نیز از توپی چرخ جلوی یک تراکتور که در اثر خرابی واشر آب‌بندی، آب به داخل آن نفوذ کرده، گرفته شده است. وجود زنگ آهن بر روی سطوح غلتش یک بیرینگ باعث ایجاد صدا و گردش غیرروان می‌شود. ذرات زنگ آهن که در اثر غلتش اجزا از سطح جدا می‌شوند، اثر سایشی داشته و سطح غلتش را می‌سایند.

حفره‌های سطوح زنگ زده، نقاط تمرکز تنش هستند و آغاز پیدایش پوسته در سطح می‌باشد. زنگ آهن به دلیل نفوذ آب، اسید و یا استفاده از روانکارهای اسیدی در داخل بیرینگ ایجاد می‌گردد. هنگامی که دمای بیرینگ از دمای محیط کمتر باشد زنگ‌زدگی به علت



شکل ۵-۱۰ واشر شفت یک بلبیرینگ کف‌گرد که ساییده شده است.

شکل ۵-۱۱ صدمه ناشی از خوردگی در رینگ شیب‌دار یک رولربیرینگ مخروطی

میعان بخار آب موجود در هوای مرطوب بر روی بیرینگ نیز به وجود می‌آید، صدمات ناشی از خوردگی در بیرینگ‌های موتورهای احتراق داخلی نیز رایج است. مخصوصاً در موتورهای دو زمانه که هوای تازه مستقیماً داخل محفظه میل لنگ می‌شود.

خوردگی ممکن است حتی قبل از استفاده یا نصب نیز به بیرینگ صدمه برساند. بنابراین به‌عنوان یک اصل اگر دمای محل انبار کردن بیرینگ‌ها 20 °C – 18 باشد، رطوبت محیط *نباید* از 55% فراتر رود. صدمات ناشی از خوردگی بیرینگ حین انبارداری بیشتر از حد انتظار است و هزینه زیادی از این بابت تلف می‌شود.

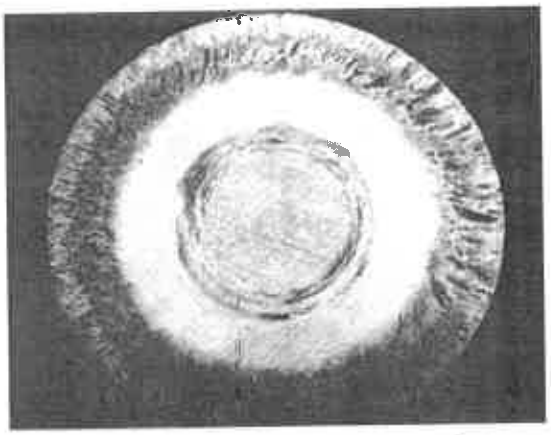
علامت‌های ایجاد شده از خوردگی بر روی رینگ خارجی یک بلبیرینگ خود تنظیم (شکل ۵-۱۲) ممکن است به‌علت استفاده از گریس نامناسب ایجاد شده باشد.

شکل ۵-۱۲ علامت‌های خوردگی در رینگ خارجی یک بلبیرینگ خود تنظیم

خوردگی شدیدی در نقاط تماس ساچمه‌ها با رینگ به وجود آمده که نشاندهنده توقف دستگاه برای یک مدت طولانی بوده است. این نقاط آغازگر صدمات بعدی در بیرینگ هستند.

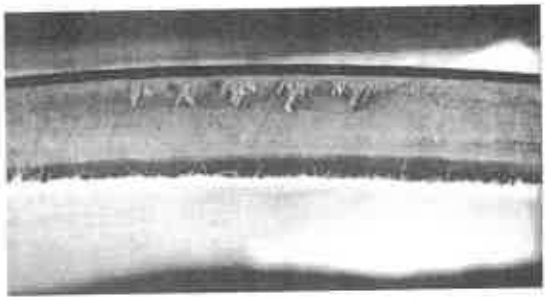
۵-۲-۴ صدمات ناشی از لغزش

این صدمه ناشی از پاره شدن لایه روغن در سطوح تماس قاعده رولرها با لبه رینگ است که معمولاً در سرعت و بار زیاد بیرینگ اتفاق می‌افتد، همانطورکه در شکل ۵-۱۳ ملاحظه می‌شود. این عیب به‌صورت لبه‌های به‌شدت تخریب شده رولرها و کناره‌های رینگ‌ها ظاهر می‌شود. برای جلوگیری از بروز مجدد این صدمه بایداز روغن مرغوب‌تر و یا روغن‌های حاوی مواد EP استفاده کرد.



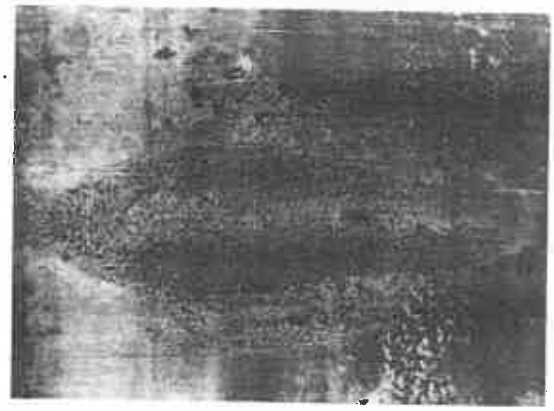
شکل ۵-۱۳ خراش‌های ناشی از لغزش در قاعده یک رولر مخروطی

هنگامی که رولرها بر روی رینگ ساییده شده می‌غلتند، تمایل به کج شدن دارند. وقتی رولرها در وضعیت منحرف شده با لبه رینگ‌ها تماس پیدا می‌کند، خطوط و خراش‌های عمیقی روی لبه‌ها به‌وجود می‌آید. اعمال ضربات محوری سنگین به انحراف بیشتر رولرها کمک کرده و همانطور که در شکل ۵-۱۴ دیده می‌شود، ایجاد خراش‌ها را در لبه‌های رینگ مخروطی تشدید خواهد کرد. علاوه بر تغییر نوع روانکار، شاید لازم باشد لقی بیرینگ را نیز کاهش داد تا صدمه ناشی از لغزش کمتر شود.



شکل ۵-۱۴ انحراف رولرها سبب ایجاد خراش در لبه رینگ‌ها شده است.

صدمه و خراش‌های ناشی از لغزش، گاهی اوقات در بارهای خیلی کم نیز اتفاق می‌افتد. وقتی بار اعمالی به یک رولربیرینگ استوانه‌ای خیلی اندک باشد، تنها تعدادی از رولرها تحت بار قرار می‌گیرند. یا به‌عبارت دیگر بیرینگ به‌صورت موضعی تحت بار واقع می‌گردد. بنابراین طبعاً به تعدادی از رولرها اصلاً باری وارد نمی‌شود و سرعت این رولرها به علت اصطکاک موجود در قفسه کم می‌شود. سپس این رولرها با ورود به ناحیه تحت بار، به این دلیل که دارای سرعت متناسبی با رینگ‌ها نیستند، شتاب می‌گیرند. بدین ترتیب بین رولر و رینگ لغزش به وجود می‌آید که رفته رفته به صدمه ناشی از لغزش می‌انجامد (شکل ۵-۱۵). ممکن است مجموعه رولرها به همراه قفسه با هم بلغزند که درنتیجه آن، عیب مشابهی به وجود می‌آید. برای جلوگیری از این وضعیت باید بار وارد به بیرینگ را افزایش داد یا در صورت امکان از یک بیرینگ با ضریب بار کمتر و لقی مجاز کمتر استفاده نمود.



شکل ۵-۱۵ علامت‌های لغزش ناشی از بار خیلی کم روی یک رولربیرینگ استوانه‌ای

۵-۲-۵ فرورفتگی‌های موضعی در سطوح غلتش رینگ‌ها

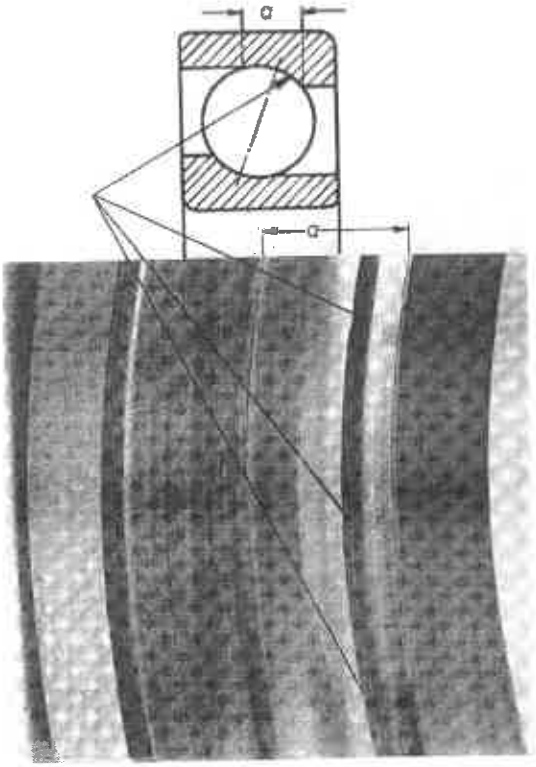
بعضی اوقات در سطوح غلتش رینگ‌ها (حتی در بیرینگ‌هایی که بدرستی سختکاری شده‌اند) فرورفتگی‌هایی ملاحظه می‌شود که به‌صورت یکنواخت در محیط رینگ پخش شده‌اند و از نظر شکل شبیه به سطوح تماس هرتزین هستند.

در نتیجه بروز این فرورفتگی‌ها، بیرینگ هنگام کار صدا ایجاد کرده و روان *نمی‌چرخد*. این عیب را اثر گذاشتن ساچمه‌ای می‌نامند و سه علت در پیدایش آن مؤثر است.

ایجاد فرورفتگی در اثر تغییر شکل پلاستیکی

اعمال‌بار بیش ازحد به یک بیرینگ در حالت سکون یا هنگامی که حین عملکردکمی انحراف یابد، به بیرینگ صدمه وارد می‌کند.

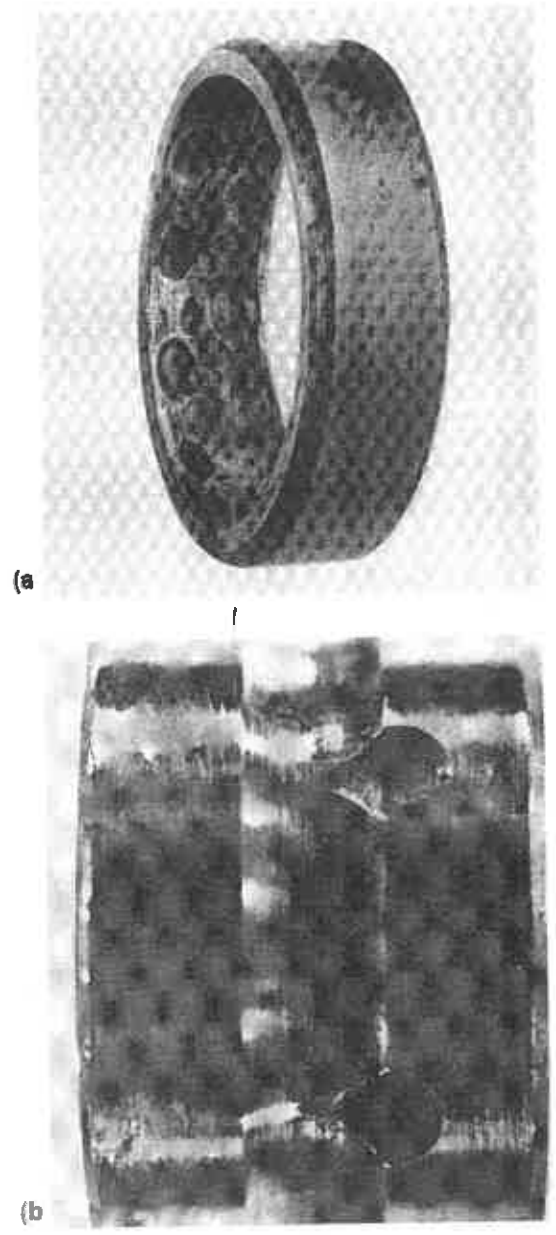
صدمه ناشی از تغییر شکل پلاستیکی در بیرینگ در سطح تماس اجزاء غلتنده با رینگ رخ می‌دهد. در شکل ۵-۱۶، رینگ خارجی یک بلبیرینگ با تماس زاویه‌ای نشان داده‌شده است که در حال سکون تحت بار زیاد اعم از شوک، ضربه یا نیروهای *نادرست* هنگام نصب قرار داشته است (ر.ک. بخش ۴-۵، ۵-۲-۶). در این حالت ساچمه‌ها نیروی زیادی به رینگ‌ها وارد کرده و آن را دچار تغییر شکل پلاستیکی کرده است. وجود چنین صدمه‌ای در بیرینگ آن را غیرقابل استفاده کرده و درصورت استفاده، این بیرینگ حرکتی غیرروان خواهد داشت. وجود این حفره‌ها می‌تواند منشا پیدایش خستگی زودرس در بیرینگ نیز باشد.



شکل ۵-۱۶ تغییر شکل پلاستیکی که در اثر فشار ساچمه‌ها بر روی رینگ خارجی یک بلبیرینگ با تماس زاویه‌ای ایجاد شده است

اثرگذاری ساچمه در اثر ارتعاش

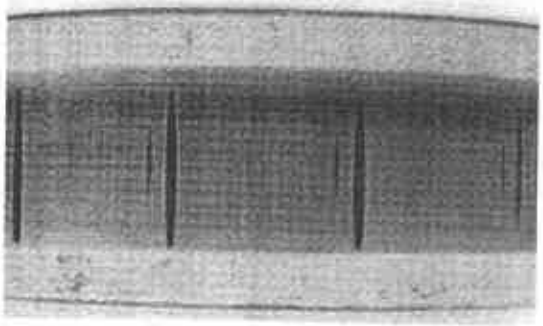
اگر یک بیرینگ در حال سکون در معرض ارتعاش یا بارهای ضربه‌ای قرار گیرد نیز چنین صدمه‌ای در بیرینگ ایجاد خواهد شد. نمونه‌ای از فرورفتگی‌های ایجاد شده در رینگ خارجی یک بلبیرینگ خود تنظیم در شکل ۵-۱۷a نشانداده شده است. وجود یک عیب مشابه در رینگ داخلی یک بلبیرینگ شیار عمیق نیز در شکل ۵-۱۷b ملاحظه می‌شود. در این مورد، بلبیرینگ دایماً تحت ارتعاش محوری قرار داشته است



شکل ۵-۱۷ فرورفتگی‌هایی که به علت اثرگذاری ساچمه اتفاق افتاده‌اند: a) رینگ خارجی یک بلبیرینگ خودتنظیم، b) رینگ داخلی یک بلبیرینگ شیار عمیق

(همانند بیرینگ‌هایی که در قطب نمای ژیروسکوپی به کار می‌روند) و بتدریج ساچمه‌ها تقریباً تا نیمی از رینگ فرو رفته‌اند. وجود ارتعاش در رینگ داخلی یک رولربیرینگ استوانه‌ای (شکل ۵-۱۸) باعث ایجاد فرورفتگی‌های طولی شده است. فرورفتگی‌های کوچکتری که در کنار فرورفتگی‌های بزرگتر دیده می‌شوند، نشاندهنده گردش گاه به گاه بیرینگ بوده است. بررسی‌های انجام شده نشانداده است که این فرورفتگی‌ها به علت خوردگی حاصل از سایش یا اثر گذاشتن ساچمه‌ها به وجود می‌آیند. کنده شدن سطح ماده در محیط ناحیه تماسی هرتزین آغاز می‌شود و حاصل نیروهای اصطکاکی مماسی می‌باشد.

بیرینگ‌های به کار رفته در اهرم‌بندی سیستم فرمان خودروها، بیرینگ‌های ماشین‌آلاتی که توسط قطار یا کامیون در جاده‌های ناهموار حمل می‌شوند و درواقع تمام بیرینگ‌هایی که در حال سکون در معرض ارتعاش یا ضربه قرار دارند، مستعد ایجاد چنین عیبی هستند. لقی زیاد در بیرینگ‌های ساکن باعث می‌شود در آنها حفره‌هایی در اثر ساچمه‌ها به وجود می‌آید، بنابراین باید سعی شود مقدار لقی در حداقل ممکن انتخاب گردد.



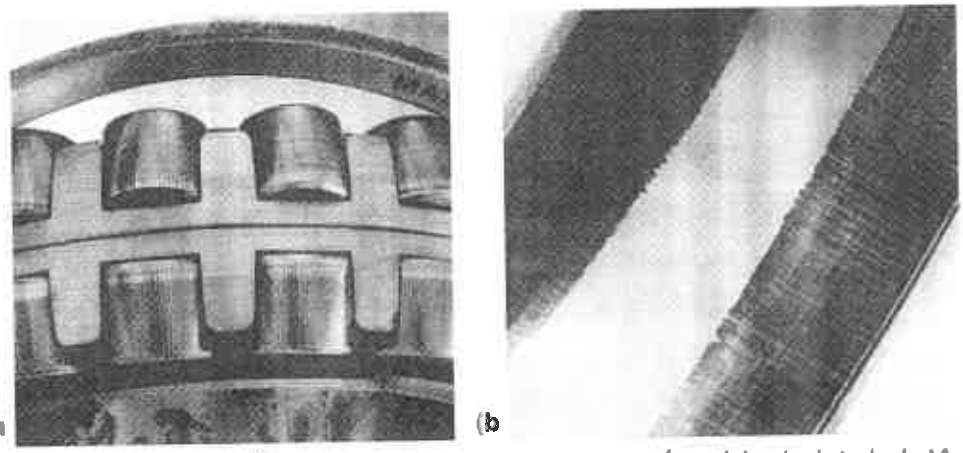
شکل ۵-۱۸ فرورفتگی‌های طولی ایجاد شده به علت اثرگذاری رولرها در رینگ داخلی رولربیرینگ استوانه‌ای

به همین دلیل بیرینگ‌های به کار رفته در سکان کشتی را بدون لقی و یا با مقداری بار اولیه نصب می‌کنند. در حمل و نقل ماشین‌آلات، بهتر است با استفاده از مکانیزم‌های گوه‌ای از لرزش بیرینگ‌های موجود در آن جلوگیری نمود. روغن با غلظت کم و متوسط سطوح غلتش یک بیرینگ را بهتر از روغن‌های غلیظ حفظ می‌کنند. کاهش سطح فشار هرتزین با افزایش دادن ابعاد، *نمی‌تواند* از اثرگذاری ساچمه‌ها بر روی رینگ بیرینگ جلوگیری کند.

عبور جریان الکتریکی از بیرینگ

علت سوم ایجاد فرورفتگی‌های منظم در رینگ بیرینگ‌ها، عبور جریان الکتریکی است. در اثر عبور جریان الکتریسیته، شیارهای شبیه آنچه در شکل ۵-۱۹ ملاحظه می‌شود، به وجود می‌آید.

در اثر عبور جریان الکتریکی از یک بیرینگ ممکن است به علت ذوب شدن آن حفره‌هایی در سطح رینگ ایجاد شود. این حفره‌ها اغلب در طول یک خط محیطی قرار می‌گیرند و تعداد این حفره‌ها بستگی به مقاومت ناحیه عبور جریان دارد که در اثر وجود لایه روغن، مقدار آن تغییر می‌کند. در اثر عبور جریان و ایجاد جرقه، لایه روغن گسیخته شده و حفره‌هایی شبیه شکل ۵-۲۰ به وجود خواهد آمد. یک دلیل عبور جریان الکتریسیته از بیرینگ، انجام جوشکاری بر روی یک دستگاه دارای بیرینگ و اتصال کابل برگشت به یک محل *نادرست* دستگاه است، به‌طوری که جریان از داخل بیرینگ عبور کند اگر عبور جریان الکتریکی با شدت کم از یک بیرینگ اجتناب‌ناپذیر باشد، می‌توان با استفاده از نوعی



شکل ۵-۱۹ ایجاد شیارهای طولی : a) بر روی رولرهای یک رولربیرین کروی، b) در رینگ خارجی یک رولربیرینگ کروی

شکل ۵-۲۰ حفره‌های ایجاد شده در رینگ یک رولربیرینگ استوانه‌ای به دلیل جرقه‌های حاصل از عبور جریان الکتریکی از بیرینگ

گریس هادی جریان از ایجاد جرقه و آسیب رسیدن به بیرینگ جلوگیری کرد. اگر امکان عبور جریان الکتریکی زیاد از یک بیرینگ، مثلاً در سیستم ترن برقی وجود داشته باشد، لازم است این سیستم به‌خوبی عایق شده یا از بیرینگ‌های عایق الکتریسیته استفاده کرد.

۵-۲-۶ نصب نادرست

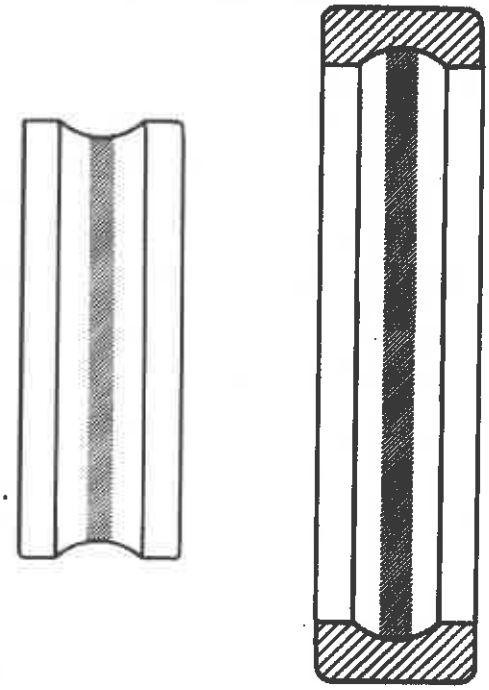
چگونگی توزیع بار در رینگ‌های یک بیرینگ که تحت بار قرار می‌گیرد به جهت اعمال بار خارجی و شرایط گردش بیرینگ بستگی دارد (جدول ۳-۳). قسمت‌های تحت بار در یک بیرینگ معمولاً پس از گذشت مدت زمان خاصی، به واسطه ظاهر مات و تیره‌ای که پیدا می‌کنند، به‌خوبی قابل تشخیص خواهد بود. با بررسی قسمت‌های تحت بار در یک بیرینگ می‌توان فهمید که آیا بیرینگ به‌صورت مطلوب تحت بار قرار دارد یا خیر.

در بیرینگ‌های شعاعی، اعمال یک بار نقطه‌ای از یک طرف و در راستای شعاعی باعث می‌شود مسیر غلتش به اندازه کمتر از نیمی از محیط رینگ‌ها مات شود. اگر یک بیرینگ شعاعی تحت بار محوری قرار گیرد، کمربند محیطی مات شده بر روی مسیر غلتش خارج از مرکز خواهد بود.

اعمال بار اولیه بیش از حد یا تغییر شکل داخل را نیز می‌توان از اثری که روی رینگ‌ها ایجاد می‌شود،

تشخیص داد. اعمال بار اولیه شعاعی یا محوری به یک بیرینگ، فقط در مواردی که در طراحی سازه لازم تشخیص داده شود، مجاز است. ایجاد بار اولیه در بیرینگ به‌صورت ناخواسته و غیرعمدی، شایع‌ترین عیبی است که هنگام نصب به وجود می‌آید و می‌تواند صدمات جدی به بیرینگ وارد کند.

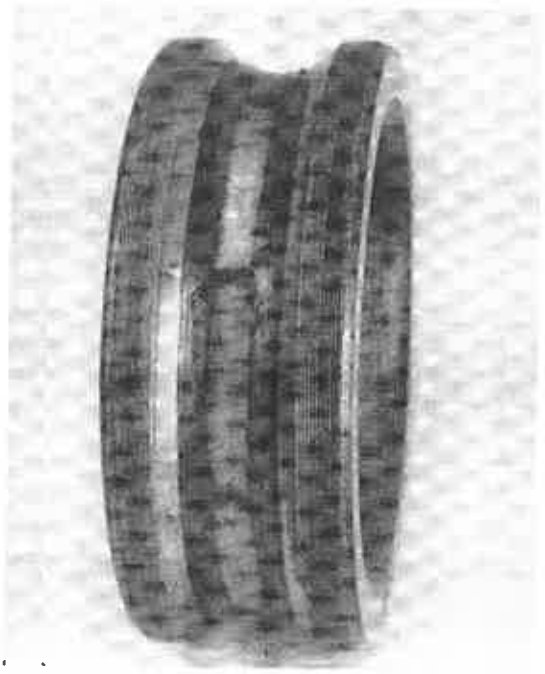
گاهی اوقات یک بار شعاعی *ناخواسته* در بیرینگ‌های شعاعی با انطباق پرسی، هنگامی که حرارت بیرینگ بالا می‌رود، ایجاد می‌شود و در این حالت تمام اجزاء غلتنده تحت بار شعاعی *ناخواسته* به گردش در می‌آیند. در شکل ۵-۲۱ یک بیرینگ شیار عمیق که تحت بار شعاعی *ناخواسته* مدتی کار کرده، نشانداده شده است.



شکل ۵-۲۱ مسیر غلتش خراب شده در یک بلبیرینگ شیار عمیق تحت بار شعاعی اولیه بیش از حد

در این وضعیت، ناحیه تخریب شده، مسیر غلتش پیرامون رینگ را در برگرفته است، حتی اگر یک بار نقطه‌ای از یک طرف به آن وارد شده باشد. اصولاً وجود بار اولیه شعاعی در یک بیرینگ باعث ایجاد صدا و افزایش حرارت شده و اختلاف دمای رینگ‌های یک بیرینگ به ایجاد بار اولیه اضافی که *ناخواسته* و مضر است، منجر خواهد شد. فشار تماسی بیشتر به ایجاد خستگی زودرس و گرم شدن بیش از حد بیرینگ می‌انجامد.

در شکل ۵-۲۲، رینگ داخلی بلبیرینگ شیار عمیق نشان داده شده که در اثر حرارت بیش از حد، ماده سازنده آن در اثر فشار ساچمه‌ها به طرفین جابه‌جا شده است.



شکل ۵-۲۲ گرم شدن بیش از حد، به رینگ داخلی این بلبیرینگ شیار عمیق آسیب رسانده است

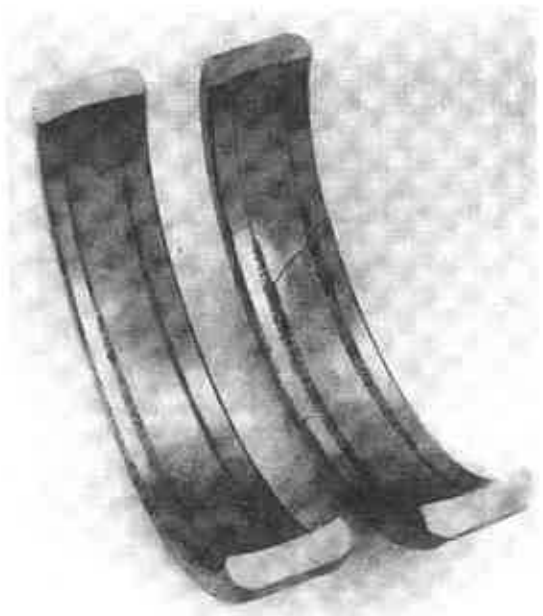
ادامه گردش یک بیرینگ که بدین صورت تخریب شده و تحت بار شعاعی قرار دارد، ممکن است به گیرکردن بیرینگ منجر گردد.

اگر یکی از رینگ‌ها یا مثلاً، شفت دو پهن (oval) باشد و در بیرینگ واقع روی آن بارا ولیه وجودداشته باشد، رینگ‌های بیرینگ از دو طرف تحت تنش *ناخواسته* قرار می‌گیرند. در شکل ۵-۲۳، رینگ خارجی یک بیرینگ خودتنظیم ملاحظه می‌شود که در یک بدنه دو پهن جاسازی شده و به مرور تخریب شده است. رینگ خارجی این بیرینگ به حدی تغییر شکل یافته که دو ناحیه تخریب شده روبه‌روی هم در آن به‌وجود آمده است. شیارهای ایجاد شده، درقسمتی که قطر بیرینگ کمتر بوده، پهنای بیشتری دارد. انحراف رینگ‌های بیرینگ‌هایی که خود تنظیم *نیستند* باعث ایجاد یک بار اولیه *ناخواسته* در آنها می‌شود.

هنگامی که رینگ‌های داخلی و خارجی نسبت به هم کج شوند، اجزاء غلتنده بر روی مسیرغلتش، به‌صورت مورب گردش می‌کنند و در دو موضع روبه‌روی هم تحت بار *ناخواسته* قرارمی‌گیرند.

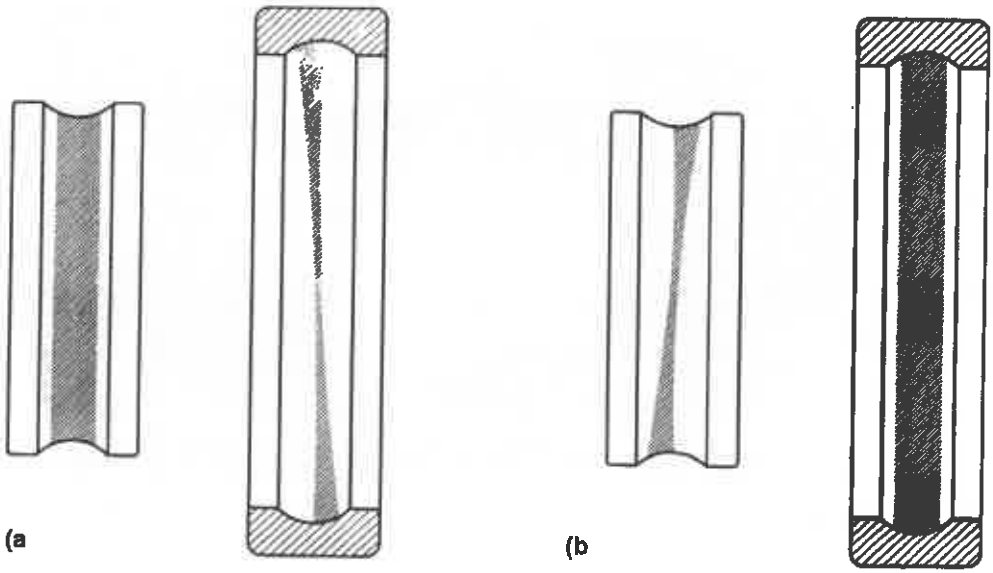
وجودچنین وضعی باعث می‌شود، اثر به جامانده در اثر گردش اجزاء غلتنده روی رینگ گردان به صورت یک مسیر پهن یکنواخت باشد، ولی این اثر برروی رینگ ثابت دارای پهنای غیریکنواخت ولی به صورت متقارن روبه‌روی هم ظاهر شود (شکل ۵-۲۴).

در شکل ۵-۲۵ رینگ داخلی یک بلبیرینگ شیارعمیق نشانداده شده که رینگ‌های آن نسبت به هم انحراف داشته‌اند. در این بیرینگ، رینگ داخلی روی شفت ثابت بوده و رینگ خارجی گردش داشته است. اثر به جامانده



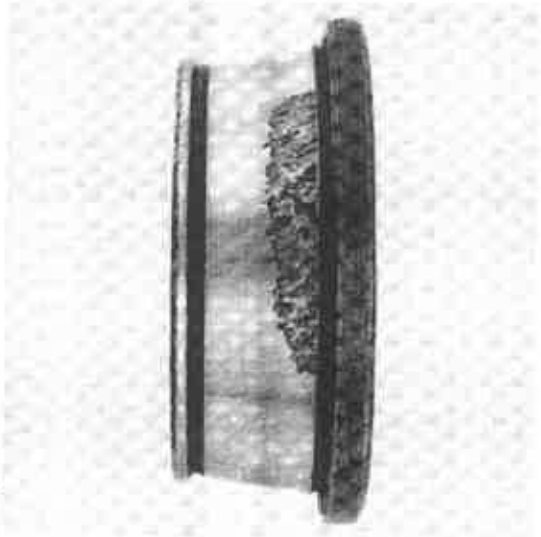
شکل ۵-۲۳ کنده شدن سطح رینگ و ایجاد شیارهای نسبتاً عمیق به‌واسطه دو پهنی رینگ خارجی در یک بلبیرینگ خود تنظیم

از انحراف روی رینگ داخلی یک رولربیرینگ مخروطی در شکل ۵-۲۶ ملاحظه می‌شود. هنگامیکه در یک بلبیرینگ، یک رینگ نسبت به دیگری منحرف می‌شود، ساچمه‌ها اجباراً در مسیری که قطر آن در حال تغییر است گردش کرده و بنابراین سرعت آنها دایماً تغییر می‌کند و چنانچه انحراف افزایش یابد، نیروهای زیادی بین ساچمه‌ها و قفسه نگهدارنده آنها به‌وجود می‌آید. اگر قفسه فلزی باشد، این نیرو باعث سایش در مواضع خاصی از قفسه خواهد شد (شکل ۵-۲۷). در صورت امکان باید از انحراف یافتن دو رینگ نسبت به هم جلوگیری کرد. اگر انحراف قابل جلوگیری *نباشد*،

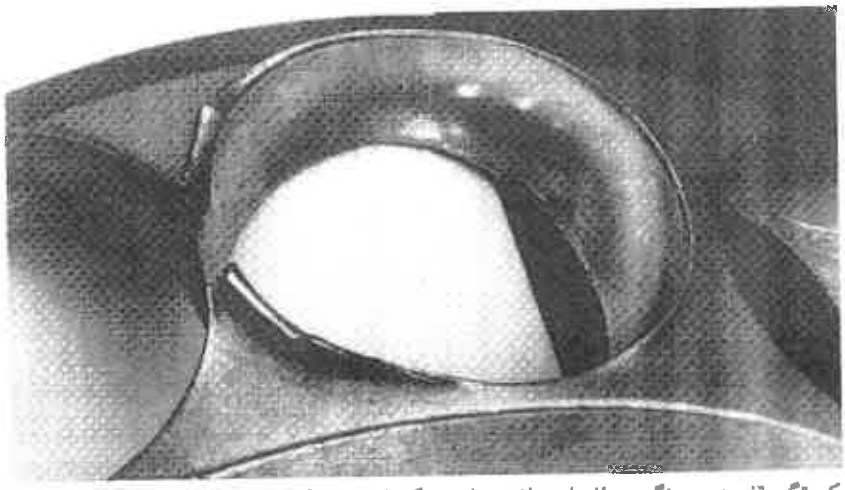


شکل ۵-۲۴ مسیرحرکت‌ساچمه‌ها دربلبیرینگ‌هایی‌که رینگ‌های آن نسبت به هم انحراف داشته‌اند : a) رینگ داخلی گردان بوده است، b) رینگ خارجی گردان بوده است

شکل ۵-۲۵ وجود انحراف در رینگ‌های این بیرینگ از اثر به جامانده غلتش ساچمه‌ها به‌صورت مورب مشهود است. در این بیرینگ شیار عمیق، رینگ داخلی ثابت بوده است.



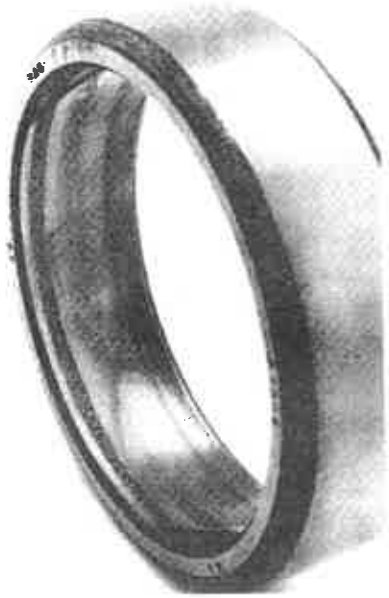
شکل ۵-۲۶ پوسته شدن موضعی در رینگ داخلی این رولربیرینگ مخروطی به دلیل انحراف رینگ‌ها نسبت به هم به‌وجود آمده است



شکل ۵-۲۷ شکستگی قفسه بیرینگ در اثر انحراف زیاد رینگ‌های بیرینگ به طرف یکدیگر. این انحراف سبب می‌شود نیروهای متقابل بین ساچمه‌ها و قفسه به‌وجود آید که به شکست قفسه منجر می‌گردد.

قفسه‌های پلاستیکی مناسب‌تر خواهند بود، زیرا حالت الاستیک آنها به ساچمه‌ها اجازه جابه‌جایی کمی را می‌دهد.

یک بار اولیه محوری زیاد، در اثر تنظیم بیش از حد در جهت محوری حین نصب به‌وجود می‌آید. ممکن است در اثر حرارت نیز یک جابه‌جایی طولی در سازه ایجاد شود و به دنبال آن یک بیرینگ در معرض بار محوری *ناخواسته* واقع شود. اگر یک بیرینگ با رینگ شناور به صورت *نادرست* نصب شود، به طوری که جای حرکت *نداشته* باشد نیز ممکن است یک بار محوری مضر در آن به‌وجود آید. در شکل ۵-۲۸ رینگ خارجی یک بلبیرینگ خودتنظیم نشانداده شده است که طبق طراحی نیاز به لقی طولی داشته ولی در اثر نصب *نادرست* تحت بار اولیه محوری قرار گرفته و بدین ترتیب دچار آسیب شده است. مسیر غلتش ردیف ساچمه‌هایی که تحت بار محوری زیاد قرار می‌گیرد، پوسته کرده است.

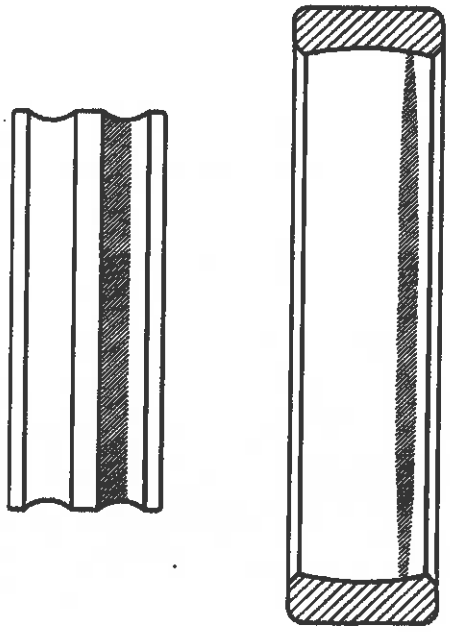


شکل ۵-۲۸ وجود بار محوری زیاد باعث پوسته شدن یکی از مسیرهای غلتش ساچمه در رینگ خارجی این بلبیرینگ دو ردیفه خود تنظیم شده است.

اگر علاوه بر بار محوری، بار شعاعی زیاد نیز به بیرینگ وارد شود، اثر به‌جا مانده دارای پهنای متغیری روی رینگ ثابت خواهد بود (**شکل ۵-۲۹**).

۵-۲-۷ عیوب ناشی از روش‌های *نادرست* نصب

در **شکل ۵-۳۰** یک رولربیرینگ نشانداده شده، که لبه‌های رینگ داخلی آن در قسمت‌های واقع شده بین رولرها دچار شکست شده است. پس از بررسی معلوم شده که برای نصب این بیرینگ از ضربات مستقیم چکش (بدون استفاده از یک بوش واسطه نرم) استفاده شده و شکستگی‌ها ناشی از ضربه‌های چکش بوده است.



شکل ۵-۲۹ اثر زیاد بودن بار محوری : در این بلبیرینگ دو ردیفه خود تنظیم، رینگ داخلی گردان بوده و بار اولیه شعاعی نیز در بیرینگ وجود داشته است.

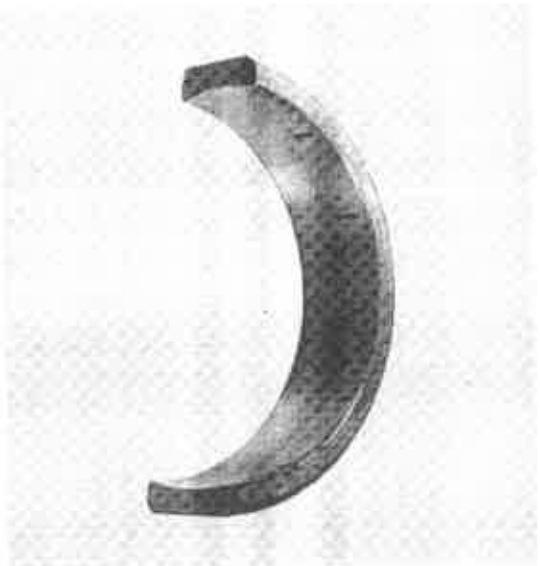
شکل ۵-۳۰ لبه‌های شکسته در یک رولربیرینگ: رینگ داخلی این بیرینگ به هنگام نصب مورد ضربات چکش قرار گرفته است.

در بلبیرینگ شیار عمیق نشانداده شده در **شکل ۵-۳۱**، به هنگام بیرون آوردن بیرینگ از محل خود شاخک‌های پولی‌کش در پشت رینگ بیرونی قرار گرفته و نیرو از طریق ساچمه‌ها به رینگ داخلی منتقل شده و لذا اثرات فرورفتگی ساچمه‌ها در رینگ داخلی مشاهده می‌شود.

شکل ۵-۳۱ بیرون آوردن این بیرینگ به روش *نادرست* باعث شده در لبه رینگ داخلی آن فرورفتگی‌هایی ایجاد گردد.

هر چند بعضی از عیوب ناشی از روش‌های *نادرست* هنگام نصب ممکن است اندک و قابل چشم پوشی به نظر آیند، ولی بعضی از آنها در آینده منشا صدمات جدی خواهند شد. تغییر شکل پلاستیکی ایجادشده در رینگ خارجی رولربیرینگ خود تنظیم نشانداده شده در شکل ۵-۳۲ به‌هنگام نصب، سبب شکستگی‌های موضعی در آن شده است. باید به خاطر داشت که به هنگام نصب یک بیرینگ، نیروی وارده هرگز *نباید* از طریق اجزاء غلتنده انتقال یابد (ر.ک. بخش ۴-۵).

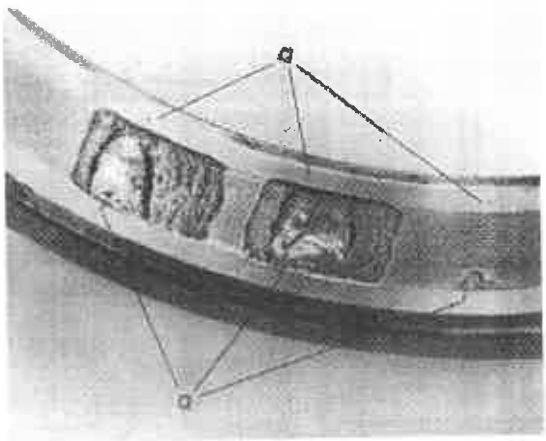
به هنگام نصب رولربیرینگ‌های استوانه‌ای توصیه می‌شود دقت خاص به عمل آید، زیرا اگر رینگ در یک وضعیت کج جازده شود، به‌راحتی آسیب خواهد دید. خراش‌های طولی در یک بیرینگ (شکل ۵-۳۳) می‌تواند پوسته شدن موضعی را به‌دنبال داشته باشد.



شکل ۵-۳۲ صدمه ناشی از خستگی زودرس که در اثر فرورفتگی‌های اجزاء غلتنده در رینگ حاصل شده است.

شکل ۵-۳۳ خراش‌های طولی در رینگ داخلی یک رولربیرینگ استوانه‌ای

در شکل ۵-۳۴، علایم خراش‌های اولیه (که با a مشخص شده‌اند)، به‌خوبی در کناره‌های مسیرغلتش آشکار است.

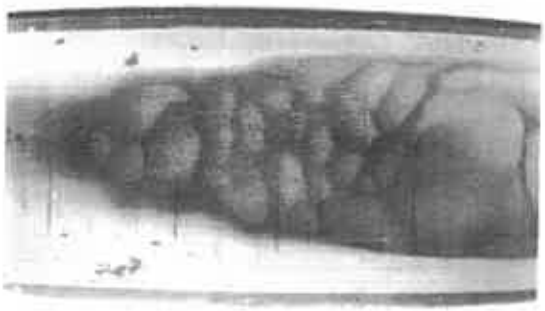


شکل ۵-۳۴ خراش‌های مشخص شده با a باعث خستگی زودرس حلقه خارجی در این رولربیرینگ استوانه‌ای شده است

به هنگام نصب بیرینگ با قفسه پلاستیکی، باید به خاطر داشت که اگر از روش گرم کردن مستقیم برای انبساط بیرینگ استفاده شود، ممکن است دمای قفسه به‌سرعت به 180 °C رسیده و تغییر فرم دهد. بنابراین در این‌گونه موارد باید از تماس قفسه با صفحه گرم کننده جلوگیری کرد (شکل ۴-۵۹).

۵-۲-۸ صدمات ناشی از روانکاری ضعیف

بیش از 50% صدمات ایجاد شده در بیرینگ‌های غلتشی به علت روانکاری ناقص آنها اتفاق می‌افتد. روانکاری ضعیف به آسیب‌هایی پی‌درپی منجر می‌شود، به‌طوری که پی بردن به علت اصلی یعنی روانکاری ناقص را دشوار می‌کند. روانکاری *ناکافی* در سطوح لغزش سبب ایجاد سایش، خراش و عدم گردش روان بیرینگ می‌شود (شکل ۵-۱۳). آسیب‌هایی که پس از این ظاهر می‌شوند عبارتند از: ایجاد خستگی زودرس، پوسته شدن، حفره‌دار شدن سطح (شکل ۵-۸)، ترک‌های حرارتی و علایم‌ناشی از لغزش اجزاء (شکل‌های ۵-۱۵ و ۵-۳۵).



شکل ۵-۳۵ علایم ناشی از لغزش اجزاء برروی هم در رینگ داخلی یک رولربیرینگ استوانه‌ای

گاهی اوقات نیز استفاده بیش از حد گریس در یک بیرینگ سبب داغ شدن آن می‌شود، زیرا رینگ‌ها قادر *نخواهند* بود گرمای ایجاد شده را از خود دور کنند. بدین ترتیب با افزایش حرارت در بیرینگ لقی آن کم شده و حتی ممکن است یک بار *ناخواسته* در آن به‌وجود آید. دلایل عمده‌ای که در رابطه با روانکاری در یک بیرینگ ممکن است به آسیب منجر شود، عبارتنداز:

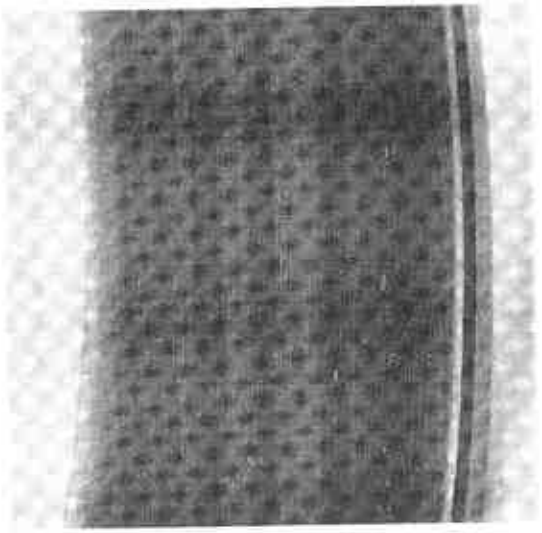
- نوع *نامناسب* روانکار،
- کم بودن مقدار روانکار در سطوح غلتش،
- وجود آلودگی و ذرات خارجی در روانکار،
- تغییر حالت و خواص روانکار در اثر گذشت زمان و
- روانکاری بیش از حد.

منظور از نوع روانکار *نامناسب*، مثلاً استفاده از روانکار با لزجت کم یا با مواد افزودنی *نامناسب* است. وجود یک ماده افزودنی خاص در یک روانکار ممکن است اثر *نامطلوبی* در بیرینگ داشته باشد. کم بودن یا زیاد بودن مقدار روانکار در یک سیستم را می‌توان با به‌کارگیری یک سیستم تغذیه و توزیع روانکار مطابق با نیاز بیرینگ‌ها، برطرف نمود. همچنین با تدوین یک برنامه روانکاری مناسب می‌توان در انتخاب ماده روانکار مناسب و زمان تعویض و سرویس صحیح، مصرف کننده را راهنمایی کرد. جزییات دیگر در این رابطه را می‌توان در فصل ۲ ملاحظه نمود.

روانکاری مناسب اهمیت خاصی در عملکرد صحیح و ایمن یک مجموعه بیرینگ دارد. اثرات داغی یا خراش‌های ایجاد شده در رینگ‌های یک بیرینگ می‌تواند کمک موثری در بررسی و تحلیل علل آسیب رسیدن به یک بیرینگ باشند (بخش ۵-۲-۶). اکثر

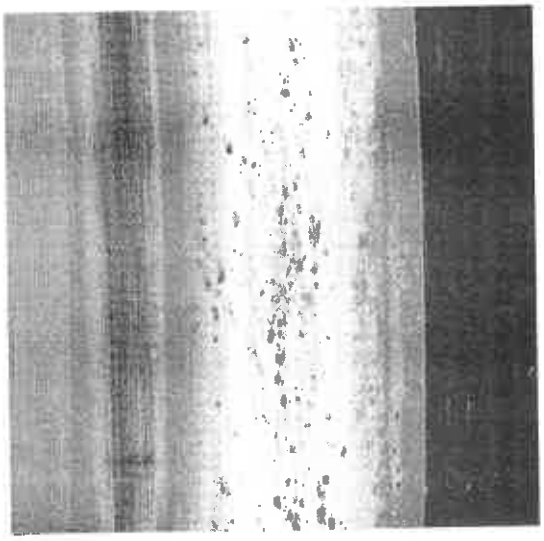
آسیب‌ها، همان طور که گفته شد به علت نقص در روانکاری به‌وجود می‌آیند.

هنگامی که بافت سطحی طبیعی رینگ‌ها که دارای خطوط ظریف باقی‌مانده از عملیات ماشینکاری و سنگ‌زنی است، به یکی از علل گفته شده تخریب شود، می‌توان نتیجه گرفت که به بیرینگ آسیب رسیده است. این اثرات *نامطلوب* سطحی، هنگامی که روغن آلوده شده یا لایه روانکار درون بیرینگ نازک‌تر شود، شدیدتر بروز خواهد کرد و نشاندهنده این حقیقت است که روانکار *نتوانسته* سطوح فلزی را از هم جدا نگه دارد. هم آلوده بودن روانکار و هم نازک بودن لایه روانکار در بین قطعات بر عملکرد صحیح و عمر مفید بیرینگ‌ها اثر *نامطلوب* دارند.



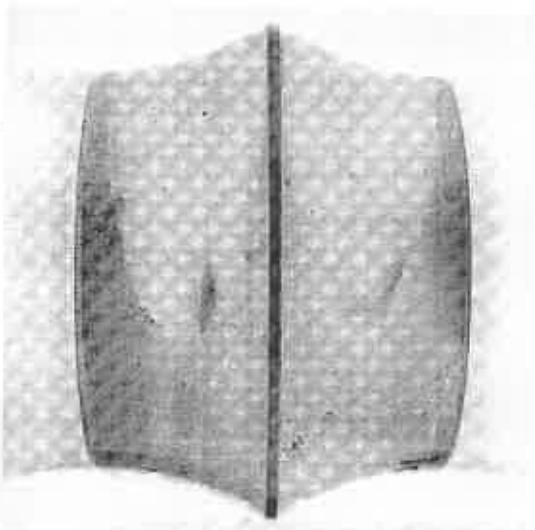
شکل ۵-۳۶ سطوح غلتش یک بیرینگ که به‌خوبی روانکاری شده است؛ تعداد فرورفتگی‌های اندکی در ناحیه‌های تحت بار بیرینگ مشاهده می‌شود، ولی هنوز بافت سالم سطحی (خطوط حاصل از سنگ‌زنی) باقی مانده است.

هنگامی می‌توان از حداکثر ظرفیت و توان کاری یک بیرینگ استفاده کرد که یک ماده روانکار پاک، سطح غلتش قطعات را به‌خوبی با لایه‌ای محکم از روانکار، از هم جدا نگه دارد. بررسی سطوح غلتش یک بیرینگ که مدتی کارکرده است و اثرات *نامطلوب* سطحی که احتمالاً در این مواضع به‌وجود آمده‌اند، مشخص می‌کند که روانکاری یا آب‌بندی یک بیرینگ تا چه اندازه خوب بوده و آیا احتیاج به انجام اصلاحاتی هست یا خیر. همچنین معلوم می‌شود انجام اصلاحات قبلی تا چه حد کارساز بوده است. اثرات *نامطلوب* سطحی در بیرینگ‌ها که به واسطه خواص و شرایط روانکاری ایجاد شده‌اند را می‌توان در **شکل‌های ۵-۳۷ تا ۵-۳۹** مشاهده کرد.



شکل ۵-۳۷ حفره‌های کوچک و زیادی که در اثر وجود ذرات خارجی سخت روی سطح غلتش بیرینگ به‌وجود آمده و این سطح را خشن کرده است. اثر روانکار در جدا کردن سطح اجزاء غلتنده مطلوب بوده ولی آلودگی موجود در روغن باید برطرف شود.

شکل ۵-۳۸ تماس فلز با فلز که بین اجزاء غلتنده و رینگ‌ها در بار اعمالی متوسط و لایه روانکار ضعیف ایجاد شده است. سطوح غلتش ساییده شده و اثری از سطح ماشینکاری شده اولیه مشاهده نمی‌شود. برای جلوگیری از این آسیب باید از روانکار مناسب دیگری استفاده نمود.



شکل ۵-۳۹ بار زیاد (P/C = 0.67) و عدم جدایش مطلوب سطوح غلتش سبب شده که این سطوح خیلی براق و سطوح ماشینکاری شده اصلی کاملاً صاف شوند. با اعمال بار زیاد به این بیرینگ، عمر خستگی آن کوتاه خواهد بود.

۵-۲-۹ صدمات ناشی از طراحی *نادرست*

همانطور که در بخش ۳-۸ ذکر شده، رینگ‌های یک بیرینگ باید بخوبی توسط قطعات سازه مهار شوند. شکل *نامتقارن* شفت یا بدنه نگهدارنده بیرینگ، باعث ایجاد بارهای موضعی زیاد در آن می‌شود. دو عامل اصلی را باید در طراحی سازه مدنظر داشت : انطباق لازم بین رینگ با نشیمنگاه و صلبیت نشیمنگاه. وجود بارهای محیطی برروی رینگ بیرینگی که انطباقی آزاد با نشیمنگاه داشته باشد، سبب می‌شود که رینگ‌ها در محل استقرار خود جابه‌جا شده و به همین دلیل خراش و سایش در سطح آنها ایجاد گردد.

براده‌هایی که در اثر این خراش‌ها تولید می‌شود ممکن است به‌تدریج به همراه مواد روانکار به داخل بیرینگ نفوذ کرده و با گردش بین اجزاء غلتنده، سطوح غلتش را دچار سایش کنند. اگر میزان انطباق پرسی یک بیرینگ روی محل استقرار خود به اندازه کافی *نباشد* و یا تکیه‌گاه یک بیرینگ کاملاً صلب *نباشد*، خوردگی سایشی حاصل از حرکت‌های کوچک سبب تغییرشکل جزیی در سطوح‌خارجی بیرینگ شده و بیرون‌آوردن آن را در آینده مشکل می‌کند.

اگر یک بیرینگ با انطباق آزاد (لق) در معرض بار زیاد قرار گیرد، صدای تقه از آن به گوش می‌رسد که ناشی از حرکت‌های لحظه‌ای رینگ در نشیمنگاه می‌باشد. این عیب به مرور به خوردگی سایشی رینگ و جابه‌جا شدن بیرینگ بر روی محل نشیمنگاه خود منجر خواهد شد.

صلبیت *ناکافی* یا غیریکنواخت نشیمنگاه در عمر مفید بیرینگ تأثیر می‌گذارد. بیرینگ‌هایی که ضخامت رینگ‌های آنها خیلی کم باشد، لازم است به‌خوبی در

نشیمنگاه مهار شوند. وجود تکیه‌گاه‌های محکم و دقیق برای مهارکردن این بیرینگ‌ها از ایجاد تنش‌های اضافی و عدم گردش روان جلوگیری خواهد کرد. امروزه برای صرفه‌جویی در مواد و انرژی از بدنه‌های ریخته‌گری شده یا جوشکاری شده از جنس آلیاژهای سبک استفاده می‌شود.

برای ایجاد استحکام کافی در سازه‌های سبک بین دیواره‌های عمود بر هم از تیغه‌های تقویت استفاده می‌کنند. اگر در چنین بدنه‌های ریخته‌گری شده لازم باشد بیرینگ‌هایی نصب شود باید در ماشینکاری محل‌های نشیمنگاه مربوطه دقت کافی به عمل آید تا از صلبیت و استحکام کافی برای نگهداری صحیح بیرینگ برخوردار باشد. وجود تغییرات زیاد در صلبیت یک بدنه ریخته‌گری شده تأثیر *نامطلوبی* در تمرکز نواحی اعمال بار بیرینگ می‌گذارد.

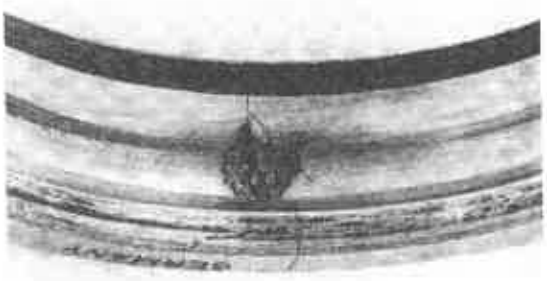
این نواحی را نقاط سخت می‌نامند. وجود این نقاط سخت باعث می‌شود بار وارد به بیرینگ به طور غیرمتقارن توزیع شده و در آن تنش‌های موضعی *ناخواسته* به‌وجود آید (ر.ک. بخش ۴-۳).

بیرینگ‌هایی که در بدنه‌های ریخته‌گری شده جای گرفته‌اند، ممکن است حین کار در محل‌هایی از بدنه که تیغه‌های تقویت‌کننده قرار دارند، تحت تنش بیش از حد قرارگیرند. یکی از دلایل بروز چنین پدیده‌ای، انتخاب جای غلط برای این تیغه‌های تقویتی می‌باشد، همانطور که در بلبیرینگ شیار عمیق شکل ۵-۴۰ ملاحظه می‌شود.

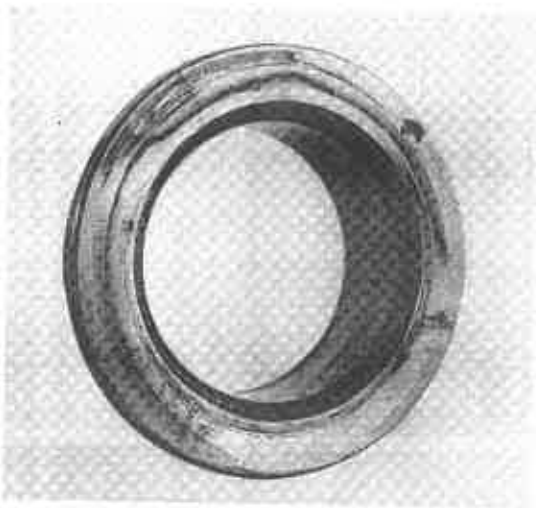
نشیمنگاهی که این بیرینگ در آن جای داشته است، در یک نقطه صلب، بیشترین بار را تحمل کرده و در همین نقطه دچار خستگی زودرس شده است. بررسی‌های انجام شده در این مورد نشانداده‌اند که ترک ایجاد شده در این نقطه از بیرینگ در اثر خم شدن‌های پی‌درپی رینگ خارجی در قسمت‌های مجاور نشیمنگاه الاستیک رخ داده است. بنابراین در بدنه‌های ریخته‌گری شده، تیغه‌های تقویت‌کننده باید محل‌هایی نصب شوند که به رینگ خارجی بیرینگ نیروهای یکنواختی وارد کند (ر.ک. بخش ۴-۳). بر روی رینگ داخلی رولربیرینگ مخروطی نشانداده شده در شکل ۵-۴۱، ترک‌های مویی بسیاری دیده می‌شود. این ترک‌ها ناشی از حرارت بیش از حد در این ناحیه و در اثر مالیده‌شدن مستمر این قسمت برروی نشیمنگاه اتفاق افتاده است.

۵-۳ نظارت بر عملکرد بیرینگ‌ها

آنچه مسلم است، بیرینگ‌های غلتشی یکی از اجزاء بسیار قابل اعتماد در ماشین‌های صنعتی هستند و این مهم میلیون‌ها بار به اثبات رسیده است. دفعات خرابی بیرینگ‌ها کم است و آسیب در آنها به کُندی پیشرفت



شکل ۵-۴۰ پوسته شدن موضعی و ایجاد ترک در یک بیرینگ شیار عمیق که نیروهای وارد بر آن از سوی تکیه‌گاه خیلی غیریکنواخت بوده است



شکل ۵-۴۱ ترک‌های حرارتی در طرفین رینگ داخلی یک بیرینگ

می‌کند. ولی برای اطمینان از عملکرد درست بیرینگ‌ها لازم است بر آنها نظارت نمود. البته در اکثر موارد این نظارت به سرویس‌های ادواری که توسط اپراتور ماشین انجام می‌شود، خلاصه می‌گردد. مواردی که می‌تواند زنگ خطری برای آغاز صدمه به بیرینگ‌ها باشد، عبارتند از : ایجاد حرارت زیاد در ماشین، عدم گردش روان بیرینگ، صدای غیرعادی نظیر سوت کشیدن و تق تق کردن و یا هرگونه تغییر در صدای عادی و کاهش دقت عملکرد دستگاه. در موارد زیر لازم است با استفاده از تجهیزات و ادوات مخصوص، نظارت دقیق‌تری بر عملکرد بیرینگ‌ها اعمال شود :

- هنگامی که آسیب رسیدن به یک بیرینگ سبب آسیب رسیدن به انسان گردد (مثلاً بیرینگ‌های هواپیماها)،
- هنگامی که بیرینگ‌ها در حداکثر ظرفیت خود کار کنند، مخصوصاً بیرینگ‌های دور بالا،
- هنگامی که خرابی ناگهانی در یک بیرینگ سبب توقف طولانی یک خط تولید شود و
- هنگامی نظارت دقیق بر بیرینگ‌ها سبب کاهش قابل ملاحظه هزینه نگهداری و تعمیرات گردد.

۵-۳-۱ معیارهای نظارت بر بیرینگ‌ها قبل از خرابی

دو دسته اصلی خرابی در بیرینگ‌ها وجود دارند که باید متمایز گردند :

- عملکرد بیرینگ رفته‌رفته و به‌طور پیوسته افت کند، که احتمالاً مربوط به خستگی یا سایش است و
- خرابی در بیرینگ به‌صورت اتفاقی ظهور کند، که احتمالاً مربوط به گرم شدن یا گیر کردن آن است.

خرابی اتفاقی در یک بیرینگ اصولاً هنگامی که جریان روانکار در بیرینگ‌های سرعت بالا قطع شود، به‌وجود می‌آید. بر اساس تجربیات، خرابی‌های ناگهانی در بیرینگ‌ها خیلی کم اتفاق می‌افتد و معمولاً خرابی‌های کوچک بتدریج به خرابی‌های بزرگتر تبدیل می‌شوند. ایجاد صدمات تدریجی را در رینگ‌ها می‌توان تحت نظارت و کنترل داشت. معیارهای مورد توجه در این نظارت سه پارامتر زیر هستند :

- درجه حرارت بیرینگ،
- ارتعاش و صدای بیرینگ و
- سایش.

عوامل دیگر که ارتباط مستقیم با خرابی یک بیرینگ *ندارند* ولی آنها نیز باید تحت کنترل باشند عبارتند از :

- دمای کارکرد ماشین،

• سیستم روانکاری و
• بار وارد به بیرینگ.

۵-۳-۲ اندازه‌گیری درجه حرارت

اگر برای یک کاربرد خاص، یک بیرینگ مناسب انتخاب شود، دمای بیرینگ تا یک حدخاص رسیده و در همان حدباقی می‌ماند. اگر دمای بیرینگ بدون یک علت خارجی مثلاً تغییر سرعت، بار اعمالی یا تغییر در شرایط انتقال حرارت افزایش یابد، معمولاً نشاندهنده وجود اختلال در روانکاری بیرینگ می‌باشد. روانکاری خوب، شرط اساسی در عمرطولانی بیرینگ‌های غلتشی است. بنابراین کنترل دمای کاری یک بیرینگ در واقع کنترل روانکاری آن را نیز دربرمی‌گیرد. همچنین تغییرات بار که متلاً در اثر تغییر شکل یا عدم گردش روان در یک بیرینگ به‌وجود می‌آید نیز با کنترل طرح دمایی مطلوب آن بیرینگ آشکار می‌شود. نظارت بر عملکرد یک بیرینگ با کنترل دمای کاری آن یک روش پیشگیرانه خوب است و در تعیین علل ایجاد صدمات در بیرینگ‌ها که در قسمت‌های قبل به آنها اشاره شد، کمک خواهد کرد. بدین ترتیب با برطرف کردن علل افزایش حرارت یک بیرینگ می‌توان از خرابی ناگهانی و زودرس آن جلوگیری کرد. البته صدمات ناشی از خستگی را بسختی می‌توان با کنترل دمای بیرینگ تشخیص داد.

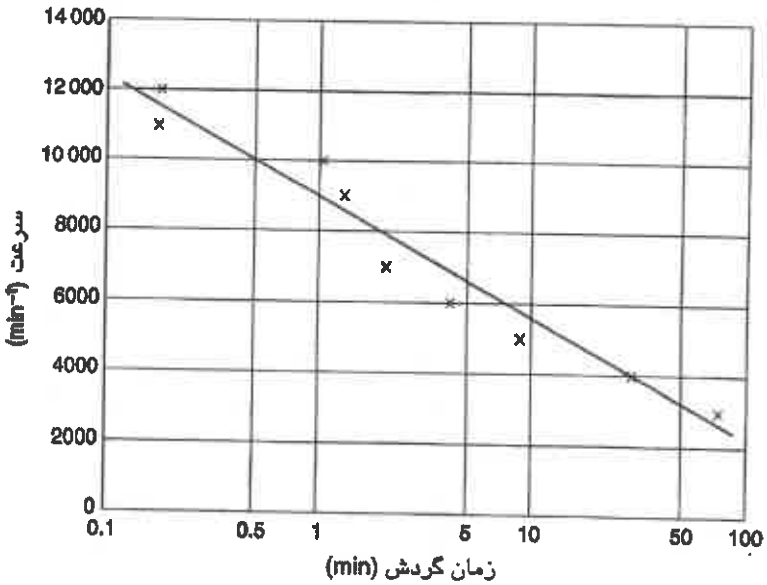
تأثیر روانکاری بر دمای کاری بیرینگ

نظارت بر دمای یک بیرینگ هنگامی مفید است که رابطه حرارت با دیگر عوامل مؤثر در بیرینگ‌ها، هنگامی که دمای بیرینگ به دمای ثابت کاری می‌رسد، روشن باشد. آزمایشاتی درباره افزایش دمای بیرینگ‌ها به هنگام قطع جریان روانکار انجام شده است. در شکل ۵-۴۲ زمان کار بیرینگ‌های با تماس زاویه‌ای، پس از قطع جریان روغن از آن نشانداده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، سرعت اولیه دورانی بیرینگ تاثیر زیادی در زمان کارکرد آن بدون روغن دارد. هنگامی که سرعت دوارنی خیلی زیاد باشد، معمولاً زمان در دسترس برای برطرف کردن اشکال خیلی کمتر از زمانی است که سیستم حس‌کننده حرارتی برای تشخیص و انجام عکس‌العمل مناسب نیاز دارد. در شکل ۵-۴۳ مثالی از اثر قطع جریان روانکاری با گریس در یک بیرینگ نشانداده شده است. در مورد روانکاری با گریس معمولاً زمان بیشتری، برای برطرف کردن عیب ماشین در حال کار وجود دارد.

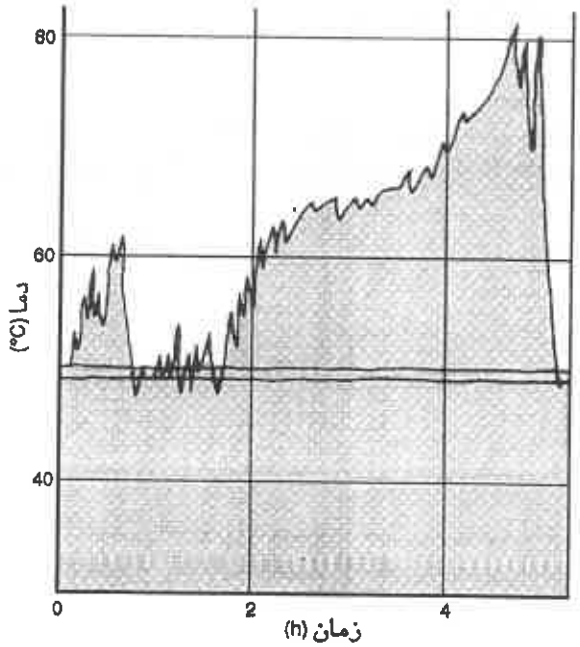
تغییر در دمای یک بیرینگ شناور با حرکت محدود شده

اندازه‌گیری‌دمای یک مجموعه دارای بیرینگ گاهی اوقات می‌تواند اطلاعاتی در مورد نحوه درست یا *نادرست* عملکرد یک ماشین را ارائه کند. طرح افزایش دمای مورد انتظار در یک مجموعه بیرینگ اسپیندل ماشین‌های ابزار در شکل ۵-۴۴ مشاهده می‌شود.

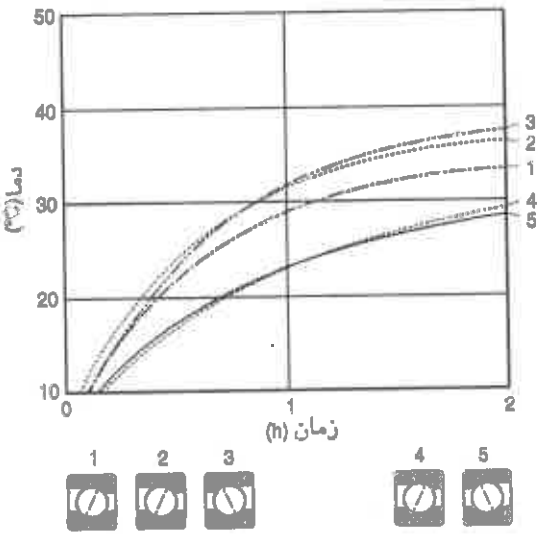
همانطور که ملاحظه می‌شود نرخ افزایش دما بتدریج کاهش می‌یابد. همچنین نسبت افزایش دمای بیرینگ‌های مختلف مجاور هم نیز نشانداده شده است. اگر در اندازه‌گیری دما مشخص شد که نحوه افزایش دما



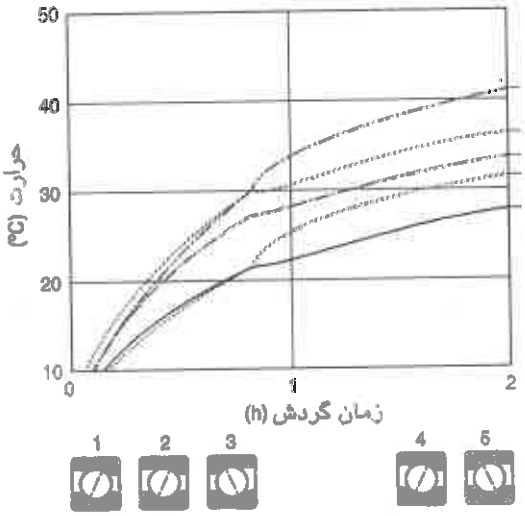
شکل ۵-۴۲ اثر توقف جریان ورودی روغن به یک بیرینگ : ارتباط سرعت گردش بیرینگ و زمان گردش آن بدون روانکار تا ایجاد خرابی در یک بیرینگ B7216.TPA.P4 با $\alpha_0 = 40°$ و $P/C = 0.1$.



شکل ۵-۴۳ اثراختلال روانکاری با گریس در عملکردبیرینگ: درجه حرارت بیرینگ برای $nd_m = 200\,000$ mm/min



شکل ۵-۴۴ مجموعه‌ای از بیرینگ‌های سالم در اسپیندل یک ماشین ابزار و حرارت آنها برای nd_m = 750 000 mm/min



شکل ۵-۴۵ اثرایجاد تزاحم و اختلال در حرکت شناور بیرینگ‌های اسپیندل در تغییر دمای آنها، برای nd_m = 750 000 mm/min

با این منحنی‌ها مطابقت *ندارد*، معلوم است که یک تزاحم یا حالت غیرعادی برای آن بیرینگ ایجاد شده است. مثلاً در شکل ۴-۴۵ طرح افزایش دما در چند بیرینگ شناور معیوب نشانداده شده است. حرکت شناوری این بیرینگ‌ها ممکن است به دلیل کج شدن یا ایجاد خوردگی سایشی براحتی دچار اختلال گردد. همچنین انبساط حرارتی نیز بر تنش‌های موجود دربیرینگ می‌افزاید. همانطورکه در شکل ۵-۴۵ مشخص است، افزایش بار روی بیرینگ باعث افزایش حرارت در بیرینگ‌های تحت بار و کاهش حرارت در بیرینگ‌های آزاد می‌شود.

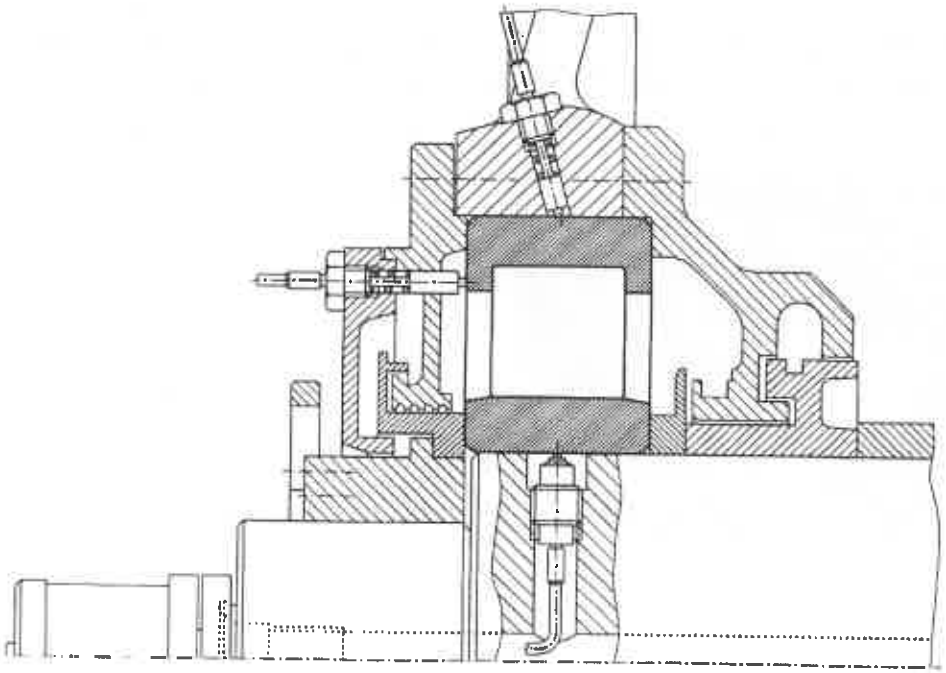
معمولاً در اندازه‌گیری دمای بیرینگ‌ها از ترموکوپل استفاده می‌شود ولی می‌توان برای این کار از دیگر نشانگرهای حرارتی نظیر فیوزها یا رنگ‌های حساس به حرارت نیز بهره برد. دقیق‌ترین نتایج را می‌توان با ثبت مستمر مقادیر دمایی اندازه‌گیری شده و پردازش آنها توسط یک واحد پردازشگر الکترونیکی به‌دست آورد. ترمومترها را باید در نزدیکترین محل نسبت به منبع حرارت و همچنین چسبیده به قطعه‌ای که لازم است حرارت آن کنترل شود، قرارداد (مثلاً توسط فنر). قسمت تماس ترمومتر با قطعه باید کاملاً تمیز باشد. در شکل ۵-۴۶ نمونه‌ای از روش و محل‌های نصب ترمومترها برای اندازه‌گیری حرارت رینگ‌ها و لبه جانبی یک رولربیرینگ استوانه‌ای نشانداده شده است.

۵-۳-۳ اندازه‌گیری ارتعاش

نخستین ترک‌ها و صدمات ناشی ازخستگی با اندازه‌گیری ارتعاش یک بیرینگ آشکار می‌شود. هنگامی که سطوح حفره‌دار یا شکست‌های ریز در یک بیرینگ به گردش در می‌آیند، یک صدای طنین‌دار تولید کرده و این پدیده را می‌توان با سوزن‌های ارتعاش سنج (مبدل‌های ظریف مکانیکی به الکتریکی) ثبت نمود (ر.ک. بخش ۳-۶). با توجه به نحوه عملکرد، سیگنال‌های ایجاد شده در اثر این عیب، فرکانسی حدود 100 kHz – 1 دارند. بر خلاف کنترل درجه حرارت در بیرینگ‌های غلتشی، کنترل ارتعاش برای تشخیص زودرس یک عیب در یک نقطه کوچک از بیرینگ که اصولاً در اثر خستگی ایجاد شده، به‌کار می‌رود.

اندازه‌گیری ارتعاش، روش قابل اطمینانی برای کنترل صحت روانکاری نیست. برای انجام یک اندازه‌گیری دقیق ارتعاش، باید نکات زیر مورد توجه قرار گیرند :

- اندازه‌گیری‌های ارتعاش، اندازه‌گیری‌های نسبی هستند. این اندازه‌گیری‌ها اطلاعاتی درباره تحلیل روند گسترش عیب و یا مقایسه‌ای بین قسمت‌های مختلف بیرینگ ارائه می‌کنند،
- حس‌کننده‌های ارتعاش باید در محل خود محکم قرار گیرند،
- در صورت امکان، نقاط سنجش باید در منطقه اعمال بار بیرینگ باشند و
- صدای انتشار یافته از بیرینگ آسیب دیده، در محدوده فرکانسی مورد تحلیل، باید بالاتر از تمام صداهای دیگر در ماشین باشد.



شکل ۵-۴۶ تماس‌ترموکوپل‌ها با نقاط مختلف یک رولربیرینگ استوانه‌ای برای کنترل دمای آن

در میان تمام انواع تجهیزات اندازه‌گیری ارتعاش، دو نوع اندازه‌گیر پالس ضربه و تحلیل سیگنال بر انواع دیگر ترجیح داده می‌شوند :

- انرژی پالس الکتریکی،
- اندازه‌گیر پالس ضربه،
- تجهیزات اندازه‌گیری Bearcon و
- تجهیزات تحلیل سیگنال.

از این تجهیزات می‌توان برای اندازه‌گیرهای موردی در فواصل زمانی خاص و یا به‌صورت تجهیزات نصب شده ثابت در کارخانجات استفاده نمود.

اندازه‌گیر پالس ضربه

این تجهیزات، ضربه‌هایی که حین گردش ناحیه آسیب دیده در یک بیرینگ ایجاد می‌شود را حس کرده و ارزیابی می‌کند. این پالس‌های ضربه دارای ارتعاش‌های فرکانس بالا هستند. با ایجاد پوش برروی محدوده‌های فرکانسی مختلف، ارتعاشات فرکانس بالا به محدوده فرکانس پایین تبدیل می‌شوند. با ترکیب سه پارامتر این سیگنال، یعنی حداکثر دامنه، زمان ایجاد و حد پوششی صدا، یک پارامتر ترکیبی از سیگنال به‌دست می‌آید که برای قضاوت درباره وضعیت بیرینگ مورد بررسی قرار می‌گیرد. محدوده‌های فرکانسی برای ایجاد پوش برروی منحنی، بستگی به روش به‌کار گرفته شده دارد. دستگاه‌های SPM از فرکانس 32 kHz و تجهیزات انرژی پالس الکتریکی از فرکانس 50 – 5 kHz استفاده می‌کنند. در تجهیزات انرژی پالس الکتریکی یک مقدار مرکب، حاصل از ترکیب مقدار متوسط دامنه‌ها، نحوه توزیع پالس‌ها (Kurtosis) و مقدار حاصل از تحلیل منحنی پوش نشانداده می‌شود. مقدار نشانداده شده (SE = Spike Energy) g_{SE} می‌باشد. این مقدار حاصل تحلیل و پردازش انرژی مقادیر حداکثر فرکانسی است که بالاتر از حد صدای عادی یک بیرینگ غلتشی قرار می‌گیرند. تجهیزات اندازه‌گیر پالس ضربه، دستگاه‌هایی کم حجم بوده و استفاده از آنها آسان است (شکل ۵-۴۷).

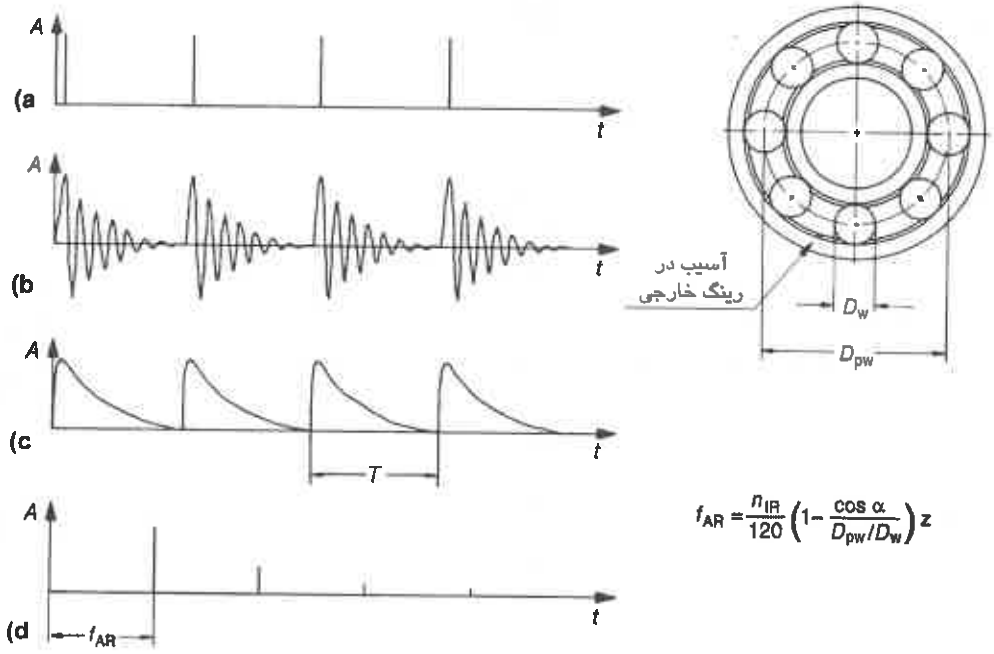
برای تشخیص آسیب در یک بیرینگ غلتشی، قابلیت اطمینان هر یک از روش‌های گفته شده بستگی به شرایط خاص هر سنجش دارد. در هر آزمایش، نتایج اندازه‌گیری شده ممکن است با نتایج آزمایشات قبلی خیلی متفاوت باشد، زیرا *نمی‌توان* تداخلات فرکانسی دیگر اجزاء ماشین مانند حلقه‌های آب‌بندی، چرخدنده‌ها و ... را کاملاً فیلتر نمود. البته اگر این تجهیزات توسط افراد با تجربه و طبق دستورالعمل‌های ارائه شده توسط سازنده تجهیزات به‌کاربرده شوند، می‌توانند نقش مؤثری در کنترل عملکرد بیرینگ‌های

شکل ۵-۴۷ تجهیزات اندازه‌گیری پالس ضربه

غلتشی داشته باشند. در بسیاری موارد ابتدا لازم است کل کارخانه نیز مورد بررسی قرار گیرد، زیرا ممکن است تجربه‌های کسب شده درباره شرایط عملکردی یک ماشین را *نتوان* درباره یک ماشین دیگر نیز اعمال نمود.

تحلیل کننده‌های سیگنال

تحلیل‌کننده‌های سیگنال یا تحلیل‌گرهای FFT با استفاده از تبدیل ریاضی سری فوریه، سیگنال‌های اندازه‌گیری شده را خیلی دقیق‌تر از سیستم‌های اندازه‌گیر پالس ضربه، پردازش می‌کنند. روش به کار رفته در این تحلیل، جستجوی فرکانس‌های مجزا حاصل از گردش ناحیه آسیب دیده در رینگ داخلی، رینگ خارجی و یا اجزاء غلتنده است. به‌عنوان یک قاعده، سیگنال‌های ارتعاشی پردازش نشده در حوزه زمان یا حوزه فرکانسی، اطلاعات قابل اعتمادی در باره آسیب یک بیرینگ *نخواهند* داشت. بلکه پس از پردازش این سیگنال‌ها موقعیت آسیب و میزان آن مشخص می‌گردد. یکی از روش‌های پردازش این سیگنال‌ها، آشکارسازی پوششی است (شکل ۵-۴۸).



$$f_{AR} = \frac{n_{IR}}{120}\left(1 - \frac{\cos\alpha}{D_{pw}/D_w}\right) z$$

شکل ۵-۴۸ آشکار سازی با ایجاد پوش برروی منحنی : a) سیگنال‌های گردش بیرینگ سالم، b) سیگنال‌های اضافه شده حاصل از گردش ناحیه آسیب دیده، c) ایجاد پوش بر روی منحنی، d) طیف فرکانسی حاصل از پوش منحنی

A = دامنه t = زمان f = فرکانس (Hz) f_{AR} = فرکانس سیگنال رینگ خارجی (فرکانس گردش) n_{IR} = سرعت گردش رینگ داخلی (min^{-1}) α = زاویه‌تماس (درجه) D_{PW} = دایره‌گام اجزاء غلتنده (mm) D_W = قطر اجزاء غلتنده (mm) Z = تعداد اجزاء غلتنده

یک بیرینگ غلتشی سالم، یک سیگنال ارتعاشی با دامنه تقریباً ثابت ایجاد می‌کند. وقتی که ناحیه‌ای از این بیرینگ آسیب ببیند، یک پالس ضربه به علت گردش این ناحیه و تماس آن با دیگر اجزاء نیز تولید می‌شود که به‌صورت ناگهانی دامنه ارتعاش اولیه را بالا می‌برد. سپس دامنه سیگنال، تا رسیدن پالس ضربه بعدی از ناحیه آسیب دیده، کاهش می‌یابد. با ایجاد پوش بر منحنی‌های حاصل و تحلیل فرکانسی می‌توان فرکانس ضربه را از دیگر سیگنال‌ها تشخیص داد. پس از مقایسه فرکانس با فرکانس‌های دوران بیرینگ (با توجه به هندسه بیرینگ قابل محاسبه است)، می‌توان نتایج خوبی درباره آسیب بیرینگ به‌دست آورد. با این روش می‌توان اطمینان داشت که صداهای تداخل یافته از آزمایش حذف شده‌اند. امروزه دستگاه‌های تحلیل کننده سیگنال در ابعاد کوچک و اطمینان بالا در انواع مختلف در دسترس هستند (شکل ۵-۴۹).

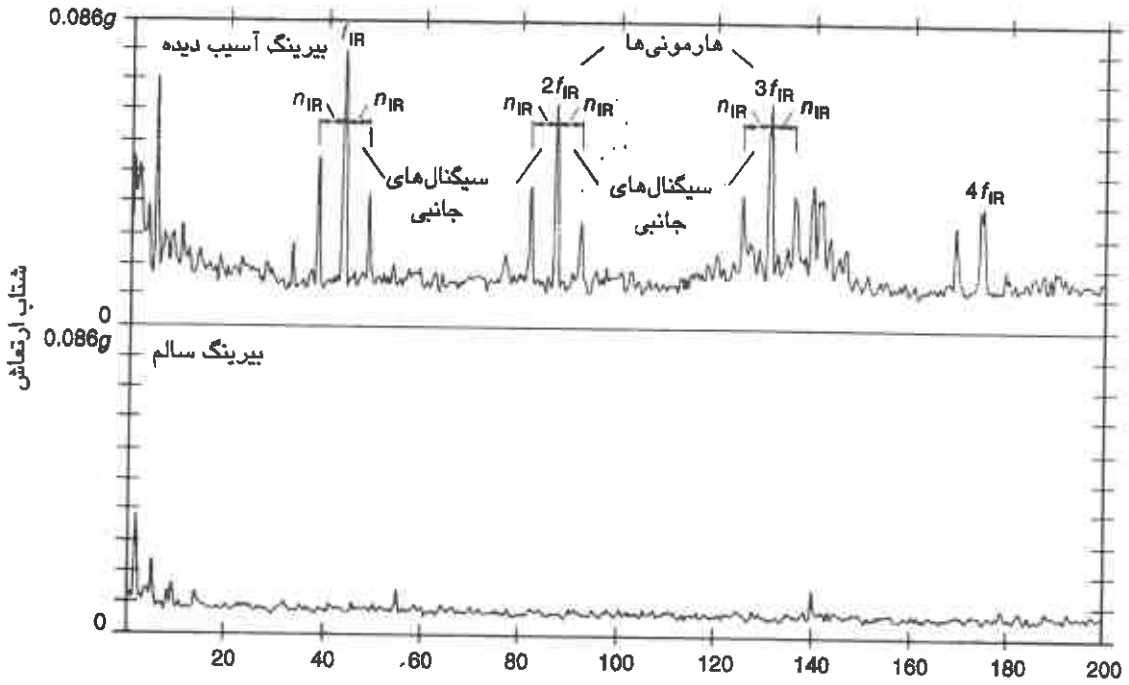
از دستگاه‌های تحلیل‌کننده سیگنال، با موفقیت در کنترل آسیب‌های بیرینگ‌های ماشین‌آلات کاغذسازی استفاده شده که در شکل ۵-۵۰ نتایج حاصل از آن نشانداده شده است. در گردش بیرینگ در محدوده فرکانس گردش 50 Hz – 0، تفاوت آشکاری بین طیف سیگنال‌های بیرینگ سالم و بیرینگ آسیب دیده مشاهده می‌شود. فرکانس گردش رینگ داخلی و هارمونی‌های آن بخوبی دیده می‌شوند. اگر در بیرینگ مورد آزمایش، رینگ داخلی گردان باشد، آسیب‌های موجود در آن با سیگنال‌های جانبی ایجاد شده قابل تشخیص خواهند بود که فاصله آنها نسبت به فرکانس گردش، برابر سرعت گردش رینگ داخلی می‌باشد.

شکل ۵-۴۹ دستگاه پرتابل تحلیل‌کننده سیگنال: در این دستگاه با ایجاد پوش روی منحنی‌های سیگنال، امکان جستجوی فرکانس‌هایی که ممکن است از یک آسیب کوچک در بیرینگ حاصل شده باشند، فراهم می‌گردد.

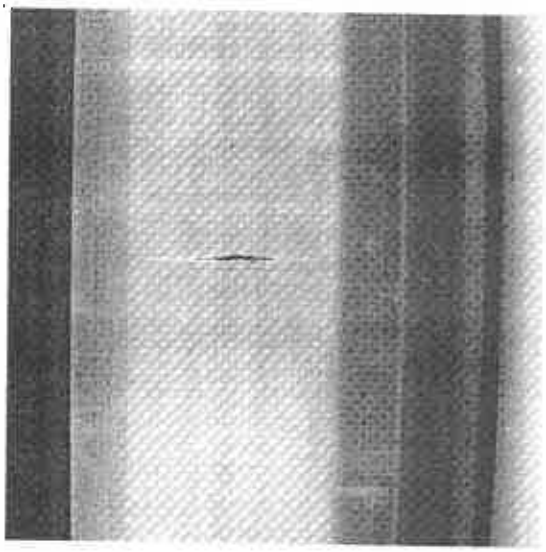
در شکل ۵-۵۱، رینگ داخلی بیرینگ مورد آزمایش، دمونتاژ شده و به نمایش گذاشته شده است. آسیب ایجاد شده در این بیرینگ خیلی کوچک و تازه است (سطح رینگ پوسته نشده است). بدین ترتیب با به‌کارگیری این روش می‌توان با اطمینان و در مراحل اولیه به عیب بیرینگ پی برد.

۵-۳-۴ اندازه‌گیری سایش

علاوه بر آسیب‌های ناشی از خستگی، ایجاد سایش نیز می‌تواند به عمرکاری یک بیرینگ خاتمه دهد. اگر روانکاری یک بیرینگ با روغن انجام شود، میزان سایش بیرینگ را می‌توان با تعیین مقدار ذرات ساییده شده در



شکل ۵-۵۰ طیف فرکانس پوش منحنی‌های سیگنال در محدوده فرکانسی 0 – 200 Hz؛ n_{IR} سرعت گردش رینگ داخلی (min^{-1}) و f_{IR} فرکانس سیگنال ایجاد شده از گردش رینگ داخلی (Hz) است که فرکانس سیکل نیز نامیده می‌شود.



شکل ۵-۵۱ ترک ایجاد شده در رینگ داخلی یک رولربیرینگ کروی 22320 E که با روش آشکارسازی پوش منحنی فرکانسی تشخیص داده شده است.

روغن، تحت کنترل داشت (شکل ۵-۵۲). در روش‌های مدرن سنجیدن سایش، مقدار بسیار کم ذرات ساییده شده را نیز می‌توان آشکار نمود. مثلاً به روش طیف نگاری جذب اتمی می‌توان مقدار 0.1 mg ذرات فلزی را در یک کیلوگرم روغن تشخیص داد. با این روش می‌توان مثلاً مقادیر تجمعی ذرات ساییده شده در روغن موتور هواپیماها را تحت کنترل داشت،

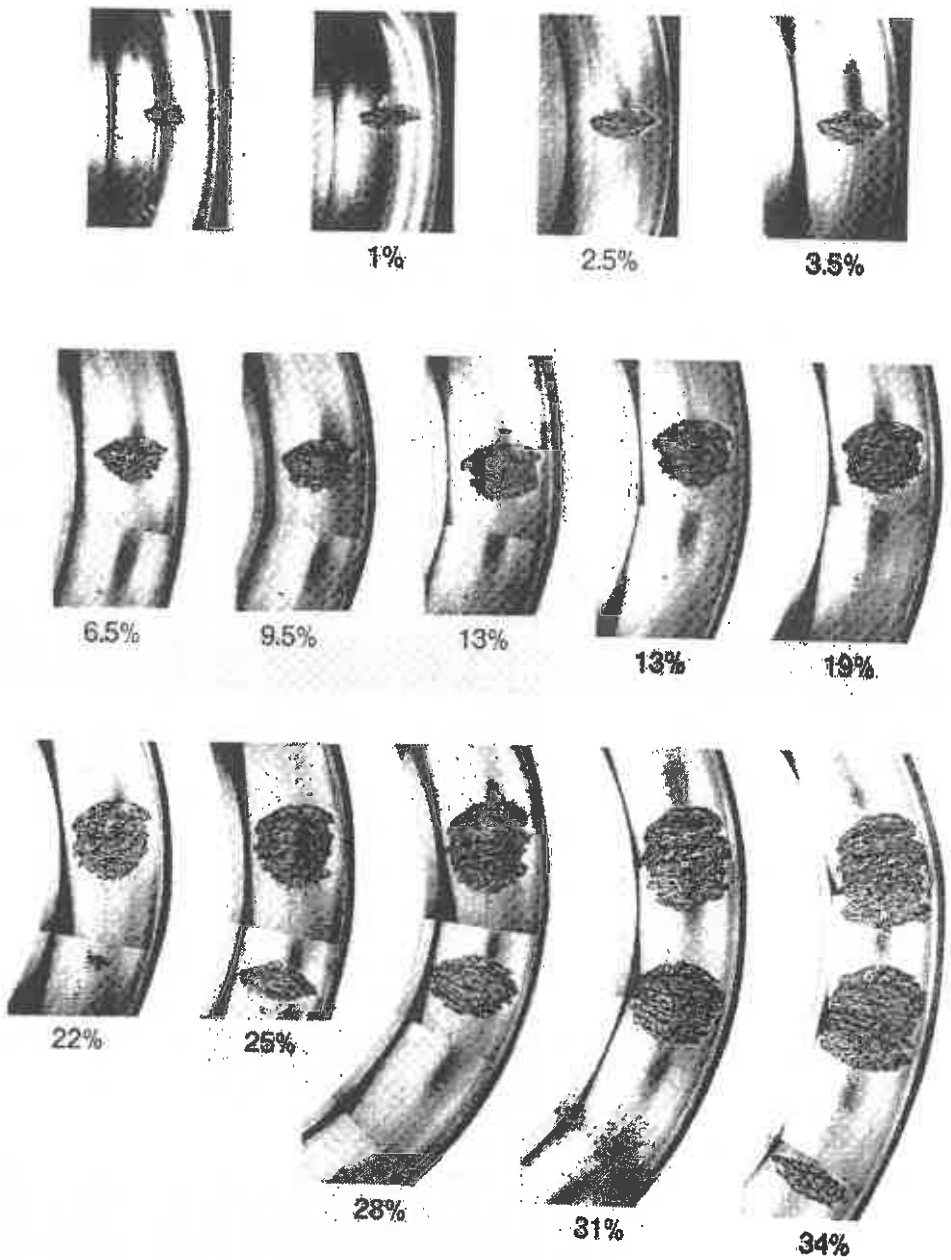
شکل ۵-۵۲ حس‌کننده میزان براده در روغن، هنگامی که مقدار ساییده شده در روغن به حد خاصی برسد، سیگنال مناسبی به سیستم کنترل می‌فرستد.

بدین ترتیب که در هر پرواز مقدار ذرات افزوده شده به روغن و همچنین اندازه این ذرات را اندازه‌گیری می‌کرد. قابلیت اطمینان این روش به محل اندازه‌گیری و چگونگی نمونه‌گیری از روغن بستگی دارد.

حس‌کننده براده هنگامی که مقدار ذرات ساییده شده موجود در روغن به یک حد خاص برسد، یک سیگنال ارسال می‌کند. در این حس‌کننده یک آهن‌ربای دایمی میله‌ای شکل در مرکز و یک آهن‌ربای حلقه‌ای شکل با قطب مخالف در پیرامون آن قرار گرفته است. وقتی که این دو قطب توسط براده‌های جمع شده روی آهن‌رباها با یکدیگر اتصال می‌یابند، یک مدارالکتریکی بسته شده و سیگنالی به سیستم کنترل ارسال می‌دارد. البته ذراتی که به این حس‌کننده می‌چسبند، حاصل سایش تمام اجزاء ماشین است که توسط این روغن روانکاری می‌شوند. روشن است که هر چه ذرات فلزی معلق در روغن بیشتر باشد، سایش بیرینگ نیز سریع‌تر اتفاق می‌افتد. بنابراین در سیستم‌های گردش روغن اغلب ماشین‌آلات از فیلتر روغن استفاده می‌کنند (ر.ک. بخش ۲-۶-۲ جلد اول). حس‌کننده براده را باید در جلوی فیلتر نصب کرد. این حس‌کننده پمپ‌های روغن و تجهیزات توزیع را تحت کنترل دارد. در بعضی سیستم‌های گردش روغن از پیچ‌های تخلیه روغن مغناطیسی برای جمع آوری براده‌های آهنی نیز استفاده می‌گردد.

۵-۳-۵ چه وقت باید یک بیرینگ آسیب دیده را بیرون آورد

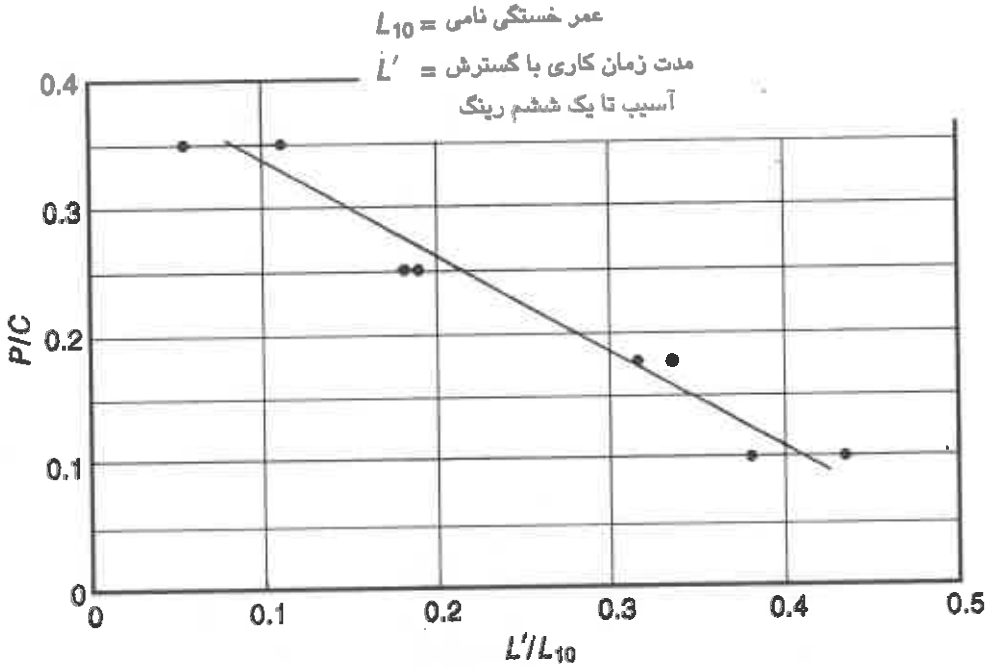
همانطور که گفته شد بعضی از تجهیزات عیب‌یابی بیرینگ‌ها قادر هستند وجود یک آسیب را در مراحل ابتدایی شناسایی کنند و بنابراین لازم است تصمیم گرفته شود که یک بیرینگ با آسیب دیدگی جزیی تا چه مدتی می‌تواند به‌کار ادامه دهد. البته این تصمیم‌گیری در موارد مختلف، می‌تواند خیلی متفاوت باشد. در شکل ۵-۵۳ مراحل گسترش یک عیب کوچک ناشی از خستگی نشانداده شده است. در این مثال، یک بلبیرینگ با تماس زاویه‌ای 25 mmx62 mm × 17 mm که با سرعت گردشی $6000\ min^{-1}$ و $P/C = 0.18$ و با روانکاری روغن کار می‌کند، تحت بررسی قرار گرفته است. در شکل ۵-۵۴ نشانداده شده که پس از بروز اولین صدمات ناشی از خستگی، بعد از گذشت 40% دیگر از عمر L_{10} بیرینگ تحت بار متوسط ($P/C = 0.07 - 0.15$, DIN 5425)، آسیب وارده محیط گسترده‌تری از رینگ را در برخواهد گرفت.



شکل ۵-۵۳ پیشرفت آسیب ناشی از خستگی در رینگ داخلی یک بلبیرینگ با تماس زاویه‌ای: درصدهای نوشته شده در زیر هر تصویر، نسبت‌های L_{10} هستند که نشاندهنده فواصل زمانی بازرسی بیرینگ، پس از شروع اولین آسیب می‌باشند.

البته عمر مفید قابل دستیابی در یک بیرینگ پس از شروع آسیب در آن نیز ممکن است خیلی متفاوت باشد که این امر بستگی به شرایط روانکاری و وجود ذرات خارجی درون بیرینگ دارد. بنابراین در صورت امکان بهتر است پس از شروع آسیب در یک بیرینگ هر چه سریع‌تر آن را تعویض نمود. در این باره راهنمایی‌های زیر می‌تواند مفید باشد :

- اگر وجود آسیب در یک بیرینگ در مراحل اولیه شناسایی شود، این امکان وجود دارد که بتوان بیرینگ را آسان‌تر تعویض کرد و
- در اغلب موارد بازرسی بیرینگ در فواصل زمانی معین، برای کنترل عملکرد آن کافی است.



شکل ۵-۵۲ تغییرات عمر باقیمانده L'، پس از ایجاد آسیب خستگی، نسبت به بار وارده تا وقتی که به اندازه یک ششم رینگ دچار آسیب گردد. قبل از شروع آسیب ناشی از خستگی، این بیرینگ با بهترین شرایط و با روغن تمیز در شرایط روانکاری EHD (الاستوهیدرودینامیک) کار می‌کرده است.

کتابهای منتشر شده از نشر طراح (تا۱۴۰۰/۲)

کد	عنوان	تعداد صفحه	قیمت

مراجع و جداول مهندسی

۰۰۱-	جداول طراحی و ماشین‌سازی (رنگی، جلد پلاستیکی)	۴۲۴	۸۵۰،۰۰۰ریال
۰۰۲-	جداول طراحی و ماشین‌سازی (رنگی، جلد معمولی)	۴۲۴	۶۵۰،۰۰۰ریال
۰۰۲-	جداول مهندسی برق و قدرت	۳۴۰	۶۰۰،۰۰۰ ریال
۰۰۳-	کلید فولاد، انواع فولادها، عملیات حرارتی و ...	۳۵۴	۷۰۰،۰۰۰ ریال
۰۰۶-	جداول و استاندارد پلاستیک‌ها	۱۹۶	۴۵۰،۰۰۰ ریال
۰۴۰-	جداول، فرمول‌ها و ... ساخت و تولید	۴۶۸	۷۰۰،۰۰۰ ریال
۰۵۴-	جداول و مشخصات مواد مهندسی	۳۲۴	۴۸۰،۰۰۰ریال

قالب‌های برش، لید و بست‌ها (جیگ و فیکسچر)

۰۰۴-	قالب‌های برش، (ویرایش سوم)	۳۶۲	۷۰۰،۰۰۰ ریال
۰۰۵-	طراحی و ساخت قالب‌های دایکاست	۳۲۴	۴۸۰،۰۰۰ ریال
۰۰۷-	طراحی و ساخت قالب و قیود و فرامین	۲۵۲	۶۰۰،۰۰۰ ریال
۰۲۱-	جیگ و فیکسچر	۳۷۸	۷۰۰،۰۰۰ ریال
۰۲۴-	مهندسی عملی شکل دادن	۲۸۸	۶۰۰،۰۰۰ ریال
۰۳۶-	قالب‌های - برش، - شکل‌دادن، اجزاء قالب، آموزش طراحی با ۱۰۰۰ مثال کاربردی و ...	۴۴۴	۸۰۰،۰۰۰ ریال
۰۳۷-	قید و بست‌های ماشینکاری تجهیزات کمکی تولید ـ آموزش طراحی با ۱۰۰۰ مثال کاربردی و ـ	۴۱۴	۸۰۰،۰۰۰ ریال
۰۳۹-	اکستروژن، فرآیندها، ماشین‌ها و قالب‌ها	۴۱۴	۸۰۰،۰۰۰ ریال
۰۷۴-	پرسکاری ورق‌ها، فرآیندها و قالب‌ها	۲۵۶	۴۸۰،۰۰۰ ریال
۰۸۹-	اصول طراحی ابزارهای رول‌فرمینگ	۱۱۶	۳۵۰،۰۰۰ ریال
۰۹۰-	رفع عیوب قالب‌ها و ابزارها	۲۲۴	۴۵۰،۰۰۰ ریال
۱۲۹-	غلتک‌های نورد آشنایی، تولید و شکست آنها	۷۶	۱۸۰،۰۰۰ ریال
۱۷۸-	طراحی و ساخت مدل‌های ریخته‌گری	۳۸۴	۱،۲۰۰،۰۰۰ریال

قالب‌های تزریق پلاستیک

۰۰۸-	قالب‌های تزریق پلاستیک تئوری و عملی	۶۱۶	۱،۵۰۰،۰۰۰ریال
۰۱۸-	قالب‌های تزریق پلاستیک، ۱۰۸ مثال	۲۶۰	۵۰۰،۰۰۰ ریال
۰۳۸-	قالب‌های تزریق پلاستیک، ... آموزش طراحی با ۱۰۰۰ مثال کاربردی و صنعتی	۵۳۲	۸۵۰،۰۰۰ ریال
۰۹۱-	راهنمای نرم‌افزار MoldFlow (با CD)	۳۴۸	۶۰۰،۰۰۰ ریال
۱۱۸-	قالب‌های تزریق پلاستیک گام به گام	۳۶۶	۷۰۰،۰۰۰ ریال
۱۴۶-	طراحی و ساخت قالب‌های بادی	۲۰۶	۴۰۰،۰۰۰ ریال
۱۹۶-	ماشین‌های تزریق پلاستیک	۳۱۶	۷۰۰،۰۰۰ ریال
۲۲۰-	در پیرامون تزریق پلاستیک	۳۰۴	۶۵۰،۰۰۰ ریال

پلاستیک‌ها

۰۰۶-	جداول و استاندارد پلاستیک‌ها	۱۹۶	۴۵۰،۰۰۰ریال
۰۷۷-	راهنمای جیبی جوشکاری پلاستیک‌ها	۱۵۰	۲۵۰،۰۰۰ریال
۰۸۱-	پلاستیک‌ها، فرآیندها و قالب‌ها	۴۳۲	۱،۱۵۰،۰۰۰ ریال
۱۲۴-	پلاستیک‌های صنعتی	۲۳۲	۴۵۰،۰۰۰ ریال
۱۴۷-	محصولات لاستیکی، راهنمای طراحی ـ	۱۸۸	۴۳۰،۰۰۰ ریال

فرآیندهای ساخت و تولید

۰۱۴-	روش‌های تولید مخصوص (ماشینکاری مدرن)	۲۷۲	۴۰۰،۰۰۰ ریال
۰۲۲-	مهندسی طلاسازی، تئوری و عملی (دوره دو جلدی)	۷۳۲	۱،۲۵۰،۰۰۰ریال
۰۶۲-	چرخدنده تراشی	۲۹۲	۵۳۰،۰۰۰ریال
۰۶۵-	سنگ‌زنی و ابزار تیزکنی	۴۱۴	۱،۰۰۰،۰۰۰ریال
۰۷۱-	فرآیندهای تولید مرجع کامل (با DVD)	۵۴۰	۹۵۰،۰۰۰ریال
۰۷۳-	درس فنی پایه حرفه ریخته‌گری	۱۴۴	۴۸۰،۰۰۰ریال
۱۲۵-	اصول مهندسی معکوس	۱۰۴	۲۸۰،۰۰۰ریال
۱۴۲-	اصول اسپارک و وایرکات (EDM) (با CD)	۱۶۰	۴۰۰،۰۰۰ ریال
۱۵۲-	توانایی ماشینکاری	۱۶۴	۳۰۰،۰۰۰ ریال
۱۸۷-	لیزر در ماشینکاری وساخت و تولید اصول و کاربرد	۱۰۸	۲۵۰،۰۰۰ریال
۲۰۱-	لوله‌های فولادی و پلی‌اتیلنی، آشنایی و روش‌های ساخت	۱۷۴	۴۵۰،۰۰۰ ریال
۲۱۲-	طراحی برای راحتی تولید و مونتاژ (DFMA)	۲۶۰	۲۵۰،۰۰۰ریال
۲۲۶-	پوشش‌های سد حرارتی آشنایی - طراحی	۱۱۰	۲۸۰،۰۰۰ ریال
۲۲۸-	FACTORY I/O شبیه‌ساز خط تولید کارخانه	۲۳۶	۵۵۰،۰۰۰ریال

آبکاری، پوشش‌دادن

۰۱۲-	مهندسی آبکاری فلزات	۴۳۸	۱،۱۰۰،۰۰۰ریال
۰۶۸-	تکنیک‌های پوشش‌دادن	۲۵۶	۶۸۰،۰۰۰ریال
۱۱۰-	پوشش‌دهی پودری	۲۱۲	۵۰۰،۰۰۰ ریال
۲۰۵-	رنگ‌های صنعتی، ساختمانی ... و اجزاء	۱۵۰	۴۰۰،۰۰۰ ریال
۲۲۶-	پوشش‌های سد حرارتی آشنایی - طراحی	۱۱۰	۲۸۰،۰۰۰ریال

ماشین‌های ابزار، ماشینکاری و ابزارها

۰۰۹-	ماشین‌های ابزار مقدمه‌ای بر دستگاه‌های تولیدی ـ	۳۶۶	۹۰۰،۰۰۰ ریال
۰۱۷-	تکنولوژی و برنامه نویسی CNC	۱۲۸	۲۵۰،۰۰۰ریال
۰۳۵-	در پیرامون ماشینکاری و ماشین‌های ابزار	۵۴۶	۹۰۰،۰۰۰ ریال
۰۴۵-	راهنمای ابزارهای برشی مدرن (دوره ۳ جلدی)	۹۴۶	۲،۱۰۰،۰۰۰ریال
۰۴۹-	ماشینکاری سرعت بالا (HSM)	۱۹۰	۴۵۰،۰۰۰ریال
۱۱۲-	ابزارشناسی عمومی، اصول و کاربرد	۳۲۰	۷۳۰،۰۰۰ ریال
۱۸۶-	پرس‌های مکانیکی آشنایی، نصب و تعمیرات	۱۰۸	۲۸۰،۰۰۰ ریال
۲۱۱-	تراشکاری، ... اصول عمومی روش‌های ماشینکاری	۱۷۶	۳۰۰،۰۰۰ ریال
۲۱۸-	پرداده‌برداری تئوری - عملی (دوره دو جلدی)	۵۷۲	۱،۰۰۰،۰۰۰ریال

۲۲۴- ماشینکاری CNC با نرم‌افزار SIEMENS–NX (با دو DVD) رنگی ۲۹۶ ۳.۰۰۰.۰۰۰ریال

۲۴۹- ماشینکاری CNC با نرم‌افزار SIEMENS–NX (با دو DVD) ساده ۲۹۶ ۱.۱۵۰.۰۰۰ ریال

نقشه‌کشی و تلرانسها

۰۱۵- نقشه‌کشی صنعتی ۳۰۰ ۷۰۰.۰۰۰ریال

۰۲۰- جدول انطباقات و تلرانس‌های ISO ۴۸ ۲۰۰.۰۰۰ ریال

۰۵۰- هندسه ترسیمی صنعتی ۲۶۴ ۵۳۰.۰۰۰ ریال

۰۵۱- مفاهیم تلرانس‌های ابعادی و... ۲۹۴ ۴۵۰.۰۰۰ریال

۱۰۳- آموزش تلرانس‌های هندسی ۲۲۰ ۴۵۰.۰۰۰ریال

۱۰۴- صافی سطوح، مفاهیم ... ۱۱۲ ۳۰۰.۰۰۰ریال

۱۴۳- تلرانس‌های هندسی و وضعی ۲۷۶ ۵۵۰.۰۰۰ریال

۱۸۹- رسم فنی عمومی (با DVD) . ۴۶۲ ۶۵۰.۰۰۰ریال

۲۲۲- راهنمای جیبی T ASME Y14.5&GD ۱۴۶ ۳۵۰.۰۰۰ریال

اجزای ماشین و تجهیزات

۰۱۰- مکانیزم‌ها و تجهیزات مکانیکی ۵۴۰ ۱.۲۵۰.۰۰۰ ریال

۰۲۹- بلبرینگ‌ها و رولربرینگ‌ها تئوری- طراحی- کاربرد ۳۲۰ ۸۰۰.۰۰۰ریال

۰۶۲- چرخدنده تراشی ۲۹۲ ۵۳۰.۰۰۰ریال

۰۶۹- تسمه و زنجیرها ۱۱۴ ۳۰۰.۰۰۰ریال

۰۷۸- طراحی اجزاء ماشین ۱ ۴۲۰ ۷۵۰.۰۰۰ریال

۰۷۹- طراحی اجزاء ماشین ۲ ۳۶۰ ۷۰۰.۰۰۰ ریال

۰۸۰- جداول و دیاگرام‌های طراحی اجزاء ۱۸۰ ۳۸۰.۰۰۰ریال

۱۰۲- راهنمای آب‌بندها و اجزای آنها ۲۷۶ ۴۵۰.۰۰۰ریال

۱۳۱- جرثقیل‌ها، لیفتراک‌ها، کانوایرها، ... ۳۴۴ ۸۸۰.۰۰۰ریال

۱۶۷- کانوایرها کاربرد و انتخاب ۱۹۶ ۴۵۰.۰۰۰ ریال

۱۹۷- چرخدنده‌ها مقدمه و آشنایی ۱۰۸ ۳۳۰.۰۰۰ ریال

۱۹۸- چرخدنده‌ها تعاریف و محاسبات ۳۲۸ ۵۵۰.۰۰۰ ریال

۱۹۹- مکانیزم‌های پایه تجهیزات مکانیکی ۱۳۴ ۳۸۰.۰۰۰ ریال

رزوه‌ها و پیچ‌ها

۰۶۰- استاندارد رزوه کشورها ۷۸ ۱۸۰.۰۰۰ ریال

۱۵۸- اتصالات پیچی اصول، طراحی و کاربرد ۲۱۶ ۵۳۰.۰۰۰ ریال

۱۵۹- رزوه‌ها، پیچ‌ها، اتصالات، (با CD) ۳۰۸ ۷۳۰.۰۰۰ ریال

نگهداری و تعمیرات

۰۵۵- روغنکاری و انتخاب روغن‌ها ۲۹۶ ۵۵۰.۰۰۰ ریال

۰۷۲- اصول نگهداری و تعمیرات، نت ۴۵۰ ۸۵۰.۰۰۰ریال

۱۱۴- نت پیشگیرانه (PM) ۱۲۰ ۲۵۰.۰۰۰ ریال

۱۲۰- شناسایی و ریشه‌یابی شکست ماشین ۲۲۴ ۴۵۰.۰۰۰ ریال

تاسیسات مکانیکی، نیروگاه و انرژی

۰۱۹- تکنولوژی دیگ‌های بخار صنعتی ۳۱۲ ۵۵۰.۰۰۰ ریال

۰۵۲- تاسیسات مکانیکی، گرمایش،بهداشتی، تهویه ۵۵۸ ۹۰۰.۰۰۰ ریال

۰۷۰- اصول کاربردی دستگاه‌های سردکننده ۲۴۸ ۴۰۰.۰۰۰ ریال

۱۴۴- تکنولوژی هوای فشرده، راهنمای تصویری ۲۶۴ ۴۸۰.۰۰۰ ریال

۱۵۰- مبانی تکنولوژی هسته‌ای یا انرژی پاک ۲۷۶ ۶۰۰.۰۰۰ ریال

۱۶۴- چیلرها، راهنمای صنعتی و کاربردی ۱۶۰ ۳۸۰.۰۰۰ریال

۱۶۵- مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله (با CD) ۱۶۶ ۴۳۰.۰۰۰ ریال

۱۶۹- توربین‌های بخار ۳۳۶ ۷۰۰.۰۰۰ ریال

۱۷۰- توربین‌های گاز ۱۸۰ ۴۵۰.۰۰۰ ریال

۱۷۱- بویلرها ۲۶۸ ۶۵۰.۰۰۰ ریال

۱۸۵- تبریدتجاری و خانگی مرجع کاربردی و مهندسی ۶۰۶ ۱.۴۰۰.۰۰۰ ریال

۱۸۸- مسیر بخار توربین ۲۱۶ ۵۳۰.۰۰۰ ریال

۲۲۱- سونا اصول، روش‌های استفاده بهینه ۱۲۰ ۲۵۰.۰۰۰ ریال

ماشین‌های دوار

۰۵۷- پمپهای سانتریفیوژ ۲۵۶ ۴۵۰.۰۰۰ ریال

۱۲۱- کمپرسورها ۳۸۰ ۸۰۰.۰۰۰ ریال

۱۶۹- توربین‌های بخار ۳۳۶ ۷۰۰.۰۰۰ ریال

۱۷۰- توربین‌های گاز ۱۸۰ ۴۵۰.۰۰۰ ریال

۱۹۵- بالانس و هم‌محوری راه‌های عملی ... ۲۲۴ ۴۰۰.۰۰۰ ریال

۲۰۷- پمپ‌های آسیادی، شناخت طراحی و انتخاب ۲۱۰ ۵۰۰.۰۰۰ ریال

سیستمهای اندازه‌گیری

۰۱۳- گیجها (سنجه‌ها، فرمان‌ها) و ابزارهای اندازه‌گیری ۱۶۰ ۳۰۰.۰۰۰ ریال

۰۳۱- مترولوژی و مهندسی دقیق ۲۱۶ ۳۵۰.۰۰۰ ریال

۰۴۲- سیستم‌های اندازه‌گیری دقیق ۵۲۸ ۸۵۰.۰۰۰ریال

تاسیسات و تجهیزات برقی، الکتریکی و ابزار دقیق

۰۰۲- جداول مهندسی برق و قدرت ۳۴۰ ۶۰۰.۰۰۰ ریال

۰۲۸- تاسیسات برق زیمنس (دوره دو جلدی) ۷۳۶ ۱.۴۰۰.۰۰۰ ریال

۰۳۲- ابزار دقیق تئوری و عملی ۲۰۰ ۴۰۰.۰۰۰ ریال

۰۳۳- ابزاردقیق صنعتی، مرجع مهندسی ۳۴۸ ۷۵۰.۰۰۰ریال

۰۴۷- فرهنگ جیبی برق (الکترونیک، کنترل، مخابرات) ۴۹۸ ۳۵۰.۰۰۰ ریال

۰۵۶- سنسورها و ترانسدیوسرها ۳۲۰ ۵۰۰.۰۰۰ ریال

۰۵۸- مرجع کاربردی کابل‌ها و سیم‌ها ۳۳۶ ۵۳۰.۰۰۰ ریال

۰۶۳- تکنولوژی برق صنعتی ۲۸۴ ۸۰۰.۰۰۰ ریال

۰۷۵- کنترل موتورهای الکتریکی ۳۳۶ ۶۰۰.۰۰۰ ریال

۱۱۳- کابل‌کشی و توزیع برق، راهنمای عملی ۳۲۴ ۶۵۰.۰۰۰ ریال

۱۴۵- راهنمای تجهیزات و ادوات الکترومکانیکی ۴۱۴ ۷۸۰.۰۰۰ ریال

۱۴۸- راهنمای کامل کاربردی ارتینگ و بانديتنگ ۲۲۰ ۴۸۰.۰۰۰ ریال

۱۷۶- ایمنی در برق ۳۳۶ ۷۳۰.۰۰۰ریال

۱۷۷- ترانسفورماتورهای توزیع ۲۲۰ ۵۳۰.۰۰۰ ریال

۱۹۳- ایمنی در برق، پرسش و پاسخ ۸۰ ۲۰۰.۰۰۰ ریال

۲۰۸- تست مقاومت عایقی ۶۶ ۱۵۰.۰۰۰ ریال

کنترل و اتوماسیون صنعتی

۶۴- مکاترونیک کاربردی، کنترل در ماشین‌سازی	۲۹۴	۶۰۰،۰۰۰ ریال
۱۱۶-آموزش گام به گام PLC	۳۴۲	۸۵۰،۰۰۰ریال
۱۵۴- سروو صنعتی، مبانی و اصول	۲۳۶	۶۸۰،۰۰۰ریال
۱۶۶- اتوماسیون صنعتی با...Automation (باCD)	۲۷۲	۵۰۰،۰۰۰ ریال

روشنایی و نورپردازی

۸۸-۰ طراحی روشنایی، آموزش نرم‌افزار DIALux (با DVD)	۲۹۴	۷۰۰،۰۰۰ ریال
۹۶-۰ طراحی‌روشنایی از دیدگاه ایمنی و بهداشت	۲۰۰	۴۰۰،۰۰۰ ریال
۱۳۵- روشنایی و نورپردازی در معماری	۲۰۰	۵۰۰،۰۰۰ ریال
۱۵۵- مهندسی روشنایی، راهنمای تصویری ...	۱۶۸	۴۰۰،۰۰۰ ریال
۱۹۰- طراحی روشنایی بیرونی با (CD)	۲۷۶	۶۵۰،۰۰۰ ریال
۲۲۳- روشنایی اضطراری -راهنمای مهندسین برق	۱۰۶	۲۵۰،۰۰۰ ریال

مواد و عملیات حرارتی

۳-۰۰ کلید فولاد،انواع فولادها،عملیات‌حرارتی و...	۳۵۴	۷۰۰،۰۰۰ ریال
۱۶-۰ عملیات حرارتی کاربردی	۲۷۲	۵۵۰،۰۰۰ ریال
۲۵-۰ دوره آموزشی ساخت کامپوزیت‌ها	۲۰۴	۴۰۰،۰۰۰ ریال
۵۴- جداول و مشخصات مواد مهندسی	۲۶۰	۴۸۰،۰۰۰ ریال
۶۶-۰ راهنمای کوچک فولادهای ماشین‌سازی	۱۰۸	۲۸۰،۰۰۰ ریال
۹۷-۰ تئوری و عملی علم مواد (با CD)	۳۴۸	۷۰۰،۰۰۰ ریال
۱۰۰- متالوگرافی، مفاهیم و آزمایشگاه (با CD)	۲۲۸	۴۸۰،۰۰۰ ریال
۱۰۸- راهنمای تست مواد، مکانیکی، متالورژیکی	۲۱۸	۴۳۰،۰۰۰ ریال
۱۰۹- عملیات حرارتی – آزمایشگاه	۱۶۰	۵۳۰،۰۰۰ ریال
۱۶۱- آلیاژسازی مکانیکی، نانوتکنولوژی، متالورژی پودر	۳۲۴	۸۳۰،۰۰۰ریال
۱۸۴- عملیات حرارتی فولادها، اصول مهندسی، ...	۴۰۸	۷۵۰،۰۰۰ریال
۲۰۳ – مواد موتورهای احتراق داخلی	۲۹۰	۷۵۰،۰۰۰ریال
۲۱۵- خواص مغناطیسی مواد، اصول و... اندازه‌گیری	۳۱۸	۷۳۰،۰۰۰ریال

هیدرولیک و پنوماتیک

۱۱-۰ اصول، طراحی و کاربردهای پنوماتیک	۳۰۰	۶۸۰،۰۰۰ ریال
۲۳-۰ هیدرولیک موبایل (هیدرولیک در ماشین‌آلات متحرک)	۲۳۴	۵۳۰،۰۰۰ ریال
۳۰-۰ آب‌بندهای لاستیکی برای... هیدرولیک صنعتی	۱۶۴	۳۰۰،۰۰۰ ریال
۴۳-۰ هیدرولیک و پنوماتیک مقدماتی ... آموزش و طراحی	۲۷۶	۵۵۰،۰۰۰ ریال
۵۳-۰ روغن‌های هیدرولیک	۱۹۰	۴۸۰،۰۰۰ ریال
۵۹-۰ هیدرولیک در ماشین‌آلات صنعتی و کشاورزی	۲۷۶	۵۸۰،۰۰۰ ریال
۷۶-۰ هیدرولیک صنعتی پیشرفته	۳۴۴	۹۵۰،۰۰۰ ریال
۱۳۹- قطعه‌شناسی هیدرولیک	۲۱۰	۴۳۰،۰۰۰ ریال
۱۴۰- تکنولوژی شیرهای هیدرولیکی، کارتریج‌ها	۱۳۸	۳۸۰،۰۰۰ ریال
۱۵۷- شیرهای هیدرولیکی پروپرشنال و سرو	۲۴۰	۵۵۰،۰۰۰ ریال
۱۶۶- اتوماسیون صنعتی با ... Automation (با CD)	۲۷۲	۵۰۰،۰۰۰ ریال
۱۷۲- هیدرولیک صنعتی مرجع کامل مهندسی	۳۱۲	۶۰۰،۰۰۰ ریال
۱۷۳- سیستم‌های هیدرولیک صنعتی مرجع طراحی	۳۲۴	۶۵۰،۰۰۰ ریال
۱۷۴- فرهنگ هیدرولیک – پنوماتیک – کنترل	۲۱۴	۴۵۰،۰۰۰ ریال
۱۹۴- عیب‌یابی سیستم‌های هیدرولیک	۱۲۴	۲۸۰،۰۰۰ریال
۲۲۹- هیدرولیک صنعتی مشکلات، پیشگیری و رفع آنها	۱۶۰	۳۳۰،۰۰۰ ریال
۲۳۰- محرک‌های هیدرولیکی و پنوماتیکی صنعتی	۱۲۸	۲۵۰،۰۰۰ ریال
۲۳۲- شیرهای اطمینان فشار راهنمای جامع	۳۲۴	۷۰۰،۰۰۰ریال
۲۳۳- محاسبات در هیدرولیک صنعتی	۱۱۶	۳۰۰،۰۰۰ ریال

جوشکاری

۶۷-۰ مرجع کامل تکنولوژی جوشکاری	۵۵۶	۱،۳۰۰،۰۰۰ریال
۷۷-۰ راهنمای جیبی جوشکاری پلاستیک‌ها	۱۵۰	۲۵۰،۰۰۰ ریال
۸۵-۰ تست‌های غیرمخرب (NDT) ...	۲۱۲	۴۵۰،۰۰۰ ریال
۸۶-۰ طراحی اتصالات جوشکاری	۱۳۲	۳۵۰،۰۰۰ ریال
۹۲-۰ مرجع کامل متالورژی جوشکاری	۳۲۴	۷۰۰،۰۰۰ ریال
۹۳-۰ متالورژی و جوشکاری فولادهای زنگ‌نزن	۲۶۴	۶۵۰،۰۰۰ ریال
۹۴-۰ تکنولوژی جوشکاری آلومینیم	۱۶۴	۳۵۰،۰۰۰ ریال
۱۰۶- تکنیک‌های عملی جوشکاری	۳۴۲	۷۲۰،۰۰۰ریال
۱۲۸- اصول بازرسی جوش	۲۶۸	۴۸۰،۰۰۰ ریال
۱۳۲- عیوب جوش در فولادها	۲۸۸	۶۰۰،۰۰۰ ریال
۱۳۳- علایم جوشکاری، مفاهیم، استانداردها	۹۶	۲۵۰،۰۰۰ ریال
۱۳۴- ایمنی و بهداشت در جوشکاری	۲۴۴	۴۵۰،۰۰۰ ریال
۱۵۶- جوشکاری میگ/مگ، با گاز محافظ	۳۰۴	۵۸۰،۰۰۰ریال
۱۸۲- فرهنگ جوشکاری و بازرسی جوش	۵۰۰	۵۵۰،۰۰۰ ریال
۱۸۳- جوشکاری و بازرسی جوش، راهنمای سریع	۱۴۴	۲۵۰،۰۰۰ ریال
۲۰۶- بازرسی جوش با ذرات مغناطیسی	۱۷۶	۳۳۰،۰۰۰ریال
۲۱۰- تنش‌های پسماند در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (۸ صفحه رنگی)	۹۲	۲۰۰،۰۰۰ ریال

پایپینگ، نفت و گاز و مهندسی شیمی

۹۸-۰ پایپینگ، اصول طراحی کاربردی	۲۶۰	۴۸۰،۰۰۰ ریال
۹۹-۰ هندبوک انتخاب شیرهای صنعتی	۳۱۶	۵۸۰،۰۰۰ریال
۱۰۷- خوردگی، اصول، بازرسی، نظارت	۳۳۴	۷۸۰،۰۰۰ریال
۱۱۱- طراحی پایپینگ با PDMS (با CD)	۲۲۴	۴۰۰،۰۰۰ ریال
۱۱۵- شیرهای کنترل	۱۸۸	۴۰۰،۰۰۰ ریال
۱۲۳- مرجع مهندسی گاز طبیعی (با CD)	۲۵۶	۴۵۰،۰۰۰ ریال
۱۲۶- اصول عملی تولید نفت و گاز	۳۱۴	۵۰۰،۰۰۰ ریال
۱۲۷- محاسبات تنش در پایپینگ	۲۶۰	۶۵۰،۰۰۰ ریال
۱۳۶- راهنمای سریع شیرهای اطمینان	۱۶۴	۲۸۰،۰۰۰ ریال

۱۳۷- نکات مهم عملی در اتصالات پایپینگ ۱۵۶ ۲۸۰،۰۰۰ ریال
۱۳۸- راهنمای کاربردی تجهیزات اصلی پایپینگ ۲۳٤ ٤۳۰،۰۰۰ ریال
۱٤۱- پایپینگ ومهندسی خطوط لوله، طراحی، نت ٤۵۶ ۱.۱۵۰،۰۰۰ ریال
۱٤۹- اصول عملی اجرای خطوط لوله نفت و گاز ۲۶۰ ٤۵۰،۰۰۰ ریال
۱۶۰- آشنایی با مهندسی شیمی، سیستم‌های فرآیندی ۳۰۰ ۵۸۰،۰۰۰ریال
۱۸۰- شیرآلات صنعتی، استانداردهای طراحی و ساخت ۳۳۲ ٤۳۰،۰۰۰ ریال
۲۲۵- تجهیزات فرآیندی، راهنمای کاربردی و مهندسی
۲۰۹- خطوط لوله انتقال مایعات ۲۵۲ ۵۳۰،۰۰۰ ریال
۲۱۳- شیرهای صنعتی راهنمای انتخاب طبق API 615 ۷۶ ۲۵۰،۰۰۰ ریال
۲۲۷- ظروف تحت فشار ٤۷۶ ۱،۰۰۰،۰۰۰ ریال
۲۳۱- پایپینگ تحت فشار فرآیندی ۵۰۲ ۱،۰۵۰،۰۰۰ ریال
۲۳۲- شیرهای اطمینان فشار راهنمای جامع ۳۲٤ ۷،۰۰۰،۰۰۰ریال

فرهنگ و زبان فنی

۰۳٤- فرهنگ تصویری، تشریحی مکانیک ساخت و تولید ۳۷۶ ۹۳۰،۰۰۰ ریال
۰٤۷- فرهنگ جیبی برق (الکترونیک، کنترل، مخابرات) ۳۲۰ ۳۵۰،۰۰۰ ریال
۰۸۲- زبان فنی مهندسی مکانیک، ساخت و تولید ۲٤٤ ۳۸۰،۰۰۰ریال
۱۱۷- فرهنگ و زبان فنی تصویری شیمی ... ۲٤۸ ٤۵۰،۰۰۰ ریال
۱۲۲- زبان فنی مهندسی خودرو ۱۷۲ ۳۵۰،۰۰۰ ریال
۱۳۰- زبان فنی معماری و ساختمان ۱۷۰ ۳۸۰،۰۰۰ریال
۱۵۳- زبان فنی مهندسی برق ۲۰٤ ٤۳۰،۰۰۰ ریال
۱۷٤- فرهنگ هیدرولیک – پنوماتیک – کنترل ۲۱٤ ٤۵۰،۰۰۰ ریال
۱۸۱- فرهنگ فنی سه‌زبانه‌انگلیسی-آلمانی-فارسی ٤۹۸ ۵۰۰،۰۰۰ ریال
۱۸۲- فرهنگ جوشکاری و بازرسی جوش ۵۰۰ ۵۵۰،۰۰۰ ریال
۲۱٤- فرهنگ فنی و مهندسی خودرودوسویه تصویری ۲۱۰ ٤۰۰،۰۰۰ ریال

اتومکانیک و خودرو

۰۲۷- موتورهای بنزینی انژکتوری ۱۲۸ ۳۸۰،۰۰۰ریال
۰۸۷- سیستم‌های مدرن انژکتوری دیزل ۱۰۸ ۳۰۰،۰۰۰ ریال
۱۲۲- زبان فنی مهندسی خودرو ۱۷۲ ۳۵۰،۰۰۰ ریال
۱۶۸- سوخت‌رسانی بنزینی مرجع کاربردی ۱۵۲ ۲۸۰،۰۰۰ ریال
۱۷۵- تایرهاو زنجیرچرخ‌های خودروهای سنگین ۱۱٤ ۳۰۰،۰۰۰ ریال
۲۰۳- مواد موتورهای احتراق داخلی ۳۰۰ ۷۵۰،۰۰۰ریال
۲۱٤- فرهنگ فنی و مهندسی خودرو دوسویه تصویری ۲۱۰ ٤۰۰،۰۰۰ ریال
۲۱۷- نقاشی خودرو آموزش گام به گام (۲۲ صفحه رنگی) ۲۶۸ ۶۰۰،۰۰۰ ریال

ارگونومی

۱۰۵- ابعاد انسانی (با CD) ۱۴۶ ۵۸۰،۰۰۰ریال
۱۶۲-ارگونومی برای مبتدیان، راهنمای سریع و ... ۱۱۶ ۳۰۰،۰۰۰ ریال

راه و عمران

۰۸٤- مرجع کامل تکنولوژی سیمان، ... (با CD) ٤۲۸ ۹۰۰،۰۰۰ ریال
۱۱۹- شناسایی و ریشه‌یابی عیوب ساختمان ۳۲۰ ۵۸۰،۰۰۰ریال
۱۳۰- زبان فنی معماری ساختمان ۱۷۲ ۳۸۰،۰۰۰ریال
۱۵۱- تئوری و اجرای راه‌سازی و ابنیه فنی، ... ٤۷۲ ۹۵۰،۰۰۰ ریال
۱۶۳- درک رفتار سازه‌ها برای مهندسان ۳۳۶ ۷۵۰،۰۰۰ریال
۱۷۹- مصالح ساختمانی سنتی و مدرن ٤۳٤ ۷۵۰،۰۰۰ریال
۱۹۱- آسفالت از موسسه آسفالت آمریکا MS-4 ۷۲۰ ۱،۰۵۰،۰۰۰ ریال
۱۹۲- سازه‌های بلند، مبانی و مفاهیم طراحی ۲۰۸ ٤۳۰،۰۰۰ ریال
۲۰۲- مخلوط‌های آسفالت، طراحی با ... MS-2 ۲۶۸ ۷۰۰،۰۰۰ ریال

سایر کتاب‌ها با موضوعات گوناگون

۰۲۶- ۵۵ دلیل برای مهندس شدن (ترجمه از منابع آلمانی) ۲۱۲ ۳۵۰،۰۰۰ ریال
۰٤۱- حل خلاقانه مسائل (ترجمه از منابع آلمانی) ۱۸۰ ۳۳۰،۰۰۰ریال
۰٤٤- اصول و مفاهیم پرواز ۲۵۶ ٤۵۰،۰۰۰ ریال
۰٤۶- تکنولوژی خلاء ۲۲٤ ٤۵۰،۰۰۰ ریال
۰٤۸- نان و نانوایی ۳۲۸ ۷۵۰،۰۰۰ریال
۰۶۱- نانو تکنولوژی،علم پایه و تکنولوژی نوظهور ۳۶۲ ۶۰۰،۰۰۰ ریال
۰۸۳- راهنمای مهندسی ژنتیک و ... (با CD) ۳۱٤ ۹۰۰،۰۰۰ ریال
۰۹۵- اقدامات پیشگیرانه ... آتش‌سوزی ساختمان‌ها ۲۲٤ ٤۵۰،۰۰۰ ریال
۱۰۱- دنیای علایم (با CD) ۱۳۲ ۳۰۰،۰۰۰ ریال
۲۰٤- جت‌ها موتورهای توربینی هوایی (رنگی) ۳۳٤ ۳،۰۰۰،۰۰۰ریال
۲۲۵- آسیای جنوب شرقی، تاریخچه مختصر ۸۰ ۹۵،۰۰۰ ریال

کتاب‌های جدید منتشر شده از نشر طراح (۱٤۰۰/۲ - ۱۳۹۹/۲)

۲۱۹- شیمی، سلامت، محیط زیست ٤۵۲ ۷۵۰،۰۰۰ریال
۲۲۰- در پیرامون تزریق پلاستیک ۳۰٤ ۶۵۰،۰۰۰ ریال
۲۲۳- روشنایی اضطراری-راهنمای مهندسین برق ۱۰۶ ۱۸۰،۰۰۰ ریال
۲۲٤- ماشینکاری CNC با نرم‌افزار SIEMENS-NX (با دو DVD) رنگی ۲۹۶ ۳،۰۰۰،۰۰۰ ریال
۲۴۹- ماشینکاری CNC با نرم‌افزار SIEMENS-NX (با دو DVD) ساده ۲۹۶ ۱،۱۵۰،۰۰۰ ریال
۲۲۷- ظروف تحت فشار ٤۷۶ ۱،۰۰۰،۰۰۰ ریال
۲۲۸- FACTORY I/O شبیه‌ساز خط تولید کارخانه ۲۳۶ ۵۵۰،۰۰۰ ریال
۲۲۹- هیدرولیک صنعتی مشکلات، پیشگیری و رفع آنها ۱۶۰ ۳۳۰،۰۰۰ ریال
۲۳۰- محرک‌های هیدرولیکی و پنوماتیکی صنعتی ۱۲۸ ۲۵۰،۰۰۰ ریال
۲۳۱- پایپینگ تحت فشار فرآیندی ۵۰۲ ۱،۰۵۰،۰۰۰ ریال
۲۳۲- شیرهای اطمینان فشار، راهنمای جامع ۳۲٤ ۷،۰۰۰،۰۰۰ ریال
۲۳۳- محاسبات در هیدرولیک صنعتی ۱۱۶ ۳۰۰،۰۰۰ ریال

هزاران کتاب صنعتی و دانشگاهی در سایت فروشگاه کتاب نشر طراح
www.tarrah-shop.com

کتاب‌های منتشر شده از نشر طراح در زمینه

اجزاء ماشین و تجهیزات

۱ مکانیزمها و تجهیزات مکانیکی
۲ بلبیرینگها و رولربیرینگها ...
۳ تسمه و زنجیرها
۴ طراحی اجزاء ماشین ۱ و ۲
۵ جداول و دیاگرامها طراحی اجزاء
۶ راهنمای آب‌بندها و اجزای آنها
۷ چرخ‌دنده‌ها، لیفتراکها، کانوایرها ...
۸ کانوایرها کاربرد و انتخاب
۹ چرخدنده‌ها مقدمه و آشنایی
۱۰ چرخدنده‌ها تعاریف و محاسبات
۱۱ مکانیزم‌های پایه تجهیزات مکانیکی
۱۲ چرخدنده تراشی

از اساتید محترم دانشکده های فنی و مهندسین جهت تالیف و ترجمه کتب فنی در زمینه تکنولوژی دعوت به همکاری می‌شود.

جهت ملاحظه اطلاعات این کتاب و نیز جستجوی کتابهای فنی و صنعتی چاپ شده در ایران به سایتهای نشر طراح و کتابفروشی طراح مراجعه کنید.

@tarrahpub
@Tarrahbook 0912 112 112 3
www.tarrah-shop.com
info@tarrah-pub.ir
www.tarrah-pub.ir
info@tarrah-shop.com

شابک ۳ - ۲۳ - ۸۶۶۶ - ۶۰۰ - ۹۷۸
ISBN 978- 600- 8666 - 23 - 3

آدرس : خیابان انقلاب ، مقابل دانشگاه تهران ، پاساژ فروزنده طبقه دوم
واحد ۵۰۶، دفتر نشر طراح/طبقه ۱- واحد ۲۰۸ کتابفروشی طراح
۰۹۱۲ - ۱۱۲ ۱۱۲ ۳ ، ۶۶۹۵۱۸۳۲ ، ۶۶۴۶۷۹۹۹ - ۰۲۱

۵۵۰۰۰۰تومان ۰۲۹