

# فصل یک:

معرفی عضو مکانیکی، انواع، جنس

## معرفی یاتاقان

یاتاقان ها با تحمل بارهای محوری و شعاعی ، قطعات متحرک را در مسیر حرکت خود نگاه

میدارد. چرخ دنده ها ، چرخ ها و شفت ها به وسیله یاتاقان در محل استقرار خود نصب شده

و در مقابل اصطکاک و فرسایش محافظت میشوند .

یاتاقان ها وظایف زیر را انجام میدهند

۱- قطعه ی متحرک را نگه میدارند.

۲- اصطکاک را کاهش میدهند.

۳- فرسایش و سائیدگی را کاهش میدهند.

۴- یک سطح سایشی قابل تعویض را تشکیل میدهند

## اجزای یاتاقان:

۱- دو قطعه ی فولادی سخت که قفسه نام دارد.

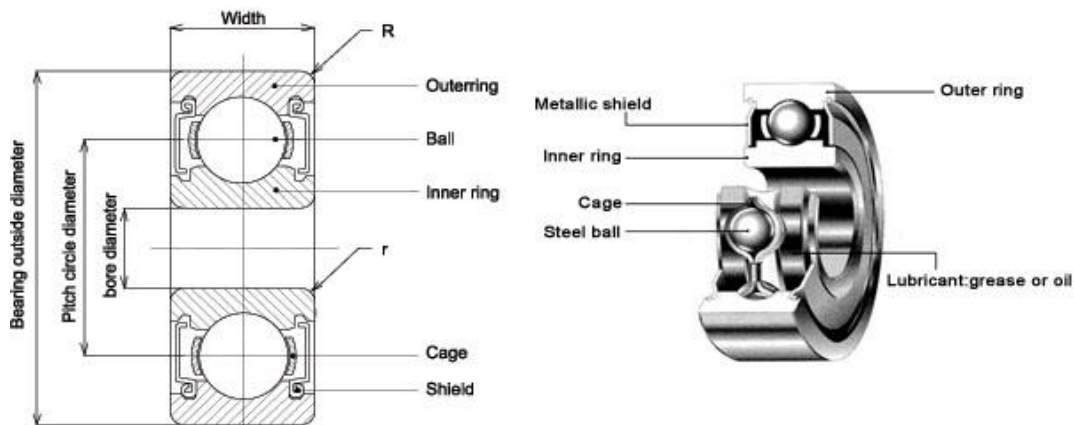
۲- ساچمه ها غلتک ها و سوزن هایی از فولاد سخت شده که در بین قفسه می

غلتند.

۳- جدا کننده یا محفظه که اطراف اجزای غلتان را نشان می دهد اجزاء

یاتاقانهای ساچمه ای :

|                             |                         |
|-----------------------------|-------------------------|
| <b>Ball</b>                 | ساچمه ها                |
| <b>External Ring</b>        | رینگ بیرونی             |
| <b>Internal Ring</b>        | رینگ داخلی              |
| <b>Cage (Ball Retainer)</b> | قفسه نگهدارنده ساچمه ها |



شکل (۱-۲) نمای برش خورده یاتاقان ساچمه ای

## انواع یاتاقان

از لحاظ نیروی وارده: به دو دسته زیر تقسیم بندی میشوند

- **شعاعی** : نیروی شعاعی را تحمل میکند و نشیمنگاه اینگونه یاتاقان بشکل استوانه است.
- **محوری**: نیروی محوری را تحمل میکند و نشیمنگاه اینگونه یاتاقان ها تخت و بشکل دایره و یا تاج دایره می باشند.

از لحاظ نوع حرکت : به دو دسته زیر تقسیم بندی میشوند.

• یاتاقان های لغزشی

• یاتاقان های غلتشی

### یاتاقان های لغزشی:

در یاتاقان های لغزشی محور در داخل سوراخ یاتاقان می گردد. به خاطر لغزیدن محور در سطح یاتاقان اصطکاک لغزشی ناخواسته ای به وجود می آید البته با قرار دادن لایه ای از مواد روانکاری بین سطوح زبانه و یاتاقان می توان مقدار اصطکاک را به میزان قابل ملاحظه ای کاهش داد. عیب این نوع یاتاقان ها در بالا بودن مقاومت شروع به کارشان می باشد.

### این نوع یاتاقان ها دارای خصوصیات زیر می باشند:

(۱) نیروهای زیادی را تحمل می کنند

(۲) آرام و بی سروصدا کار می کنند

(۳) در مقابل ضربه و ارتعاش حساس نیستند

(۴) محدودیتی از نظر تعداد دور ندارند

(۵) جای کمتری را در جهت شعاعی اشغال می کنند.

از خواص دیگر این یاتاقان ها اینکه مونتاژ و پیاده کردن آنها راحت است و

نسبت به دقت حرکت محور میتواند قابل تنظیم باشد. یاتاقان های لغزشی

احتیاج به روغنکاری و مراقبت زیاد دارند و معمولا دارای اصطکاک بیشتر و در نتیجه کارایی کمتری نسبت به یاتاقان های غلتشی دارند.

### انواع یاتاقان های لغزشی:

- یاتاقان های چشمی
- یاتاقان های دو تکه
- یاتاقان های قابل تنظیم

### یاتاقان های غلتشی:

هر گاه بین محور و یاتاقان قطعات گردنده ای بشکل کره و یا استوانه قرار داده شود اصطکاک لغزشی به اصطکاک غلتشی تبدیل می شود. در این حالت چون اجسام غلتنده با تماس نقطه ای (کره) یا تماس خطی (استوانه ای) می غلتند، نتیجه کار این است که ضریب اصطکاک تقلیل یافته، نیروی لازم برای غلبه به آن به مراتب کمتر از اصطکاک لغزشی می باشد. یاتاقان هایی که در آنها از این خاصیت استفاده می شود یاتاقان های غلتشی یا تماس غلتشی و یا یاتاقان های ضد اصطکاکی نامیده می شوند. در این دسته از

یاتاقان ها اصطکاک آغاز کار حدود دو برابر اصطکاک حین کار است ولی هنوز در مقایسه با اصطکاک آغاز کار یاتاقان لغزشی ناچیز است.

### این نوع یاتاقان ها دارای خصوصیات زیر می باشند:

۱. احتیاج به گشتاور کمتری برای شروع حرکت دارند
  ۲. بعلت نیاز کمتر به روغنکاری مراقبت چندانی لازم ندارند
  ۳. حرارت زیادی تولید نمی کنند و کارایی خوبی دارند
  ۴. این یاتاقان ها مخصوص حرکت آرام و دوره های کمتری هستند
  ۵. در مقابل ضربه و ارتعاش حساسند و عمر آنها نسبت به تعداد دورشان محدود است
  ۶. در مقابل آلودگی ها حساسیت زیادی داشته برای آبدی در مقابل نفوذ آلودگی ها احتیاج به هزینه بیشتری دارند
- و همچنین این یاتاقان ها بعلت استاندارد بودن اندازه ها براحتی تعویض می شوند. مقدار کمتری در امتداد محور جای می گیرند و در نتیجه می توان محور را کوتاهتر در نظر گرفت و در صورت خراب شدن با سروصدای غیر عادی بروز اشکال را اعلام می کنند.

## انواع یاتاقان های غلتشی:

- تقسیم بندی بر حسب نیروهایی که متحمل میشوند
- تقسیم بندی از نظر شکل هندسی عناصر غلتشی
- تقسیم بندی بر حسب جبران نامیزانی محور
- تقسیم بندی از لحاظ ساختمان
- تقسیم بندی بر حسب اندازه هر سری یاتاقان

## تقسیم بندی بر حسب نیروهایی که متحمل میشوند:

- شعاعی .....نیروی شعاعی را تحمل میکند
- محوری (کف گرد) ..... نیروی محوری را تحمل میکند
- شعاعی محوری .....هر دو نیرو را تحمل میکند

مشخصه اصلی تمایز بین بیرینگهای شعاعی از بیرینگهای محوری ، راستای اعمال بار اصلی به آنها میباشد .



مشخصه مهم دیگر جهات مهار کردن حرکت شفت توسط بیرینگ غلتشی است .  
مثلا آیا بیرینگ امکان جابجایی محوری به شفت میدهد ؟ یا آیا بیرینگ اجازه  
حرکت زاویه ای به شفت میدهد تا بتواند خود را با انحراف شفت به هنگام دوران  
رینگها تطبیق دهد؟

## **بلبیرینگهای شعاعی :**

### **۱- بلبیرینگهای شیار عمیق :**

در این نوع بلبیرینگها ، در هر رینگ یک شیار عمیق دایره ای با شعاعی برابر شعاع ساچمه  
وجود دارد . بخاطر وجود همین شیار و ایجاد سطح تماس بالا بین ساچمه ها و رینگها ،  
این نوع بلبیرینگها توان تحمل بارهای شعاعی زیاد بهمراه نیروهای محوری را دارند  
بلبیرینگهای شیار عمیق به دلیل توانایی تحمل بارهای شعاعی و محوری ، اصطکاک کم و  
توانایی تحمل سرعتهای بالا ، کاربرد گسترده ای در صنایع پیدا کرده اند . بلبیرینگهای شیار  
عمیق دو ردیفه علاوه بر اینکه قابلیت تحمل بارهای خمشی را دارند برای شفتهای  
کوتاهی که بخواهیم فقط از یک بلبیرینگ در انتهای آن استفاده کنیم نیز مناسب است . این  
نوع بلبیرینگها خصوصا برای طراحی ماشینهای جمع و جور مناسب هستند زیرا دیگر نیاز  
به در نظر گرفتن فضایی برای نصب کاسه نمد جهت محافظت از بلبیرینگها نمی باشد

## ۲- بلبیرینگهای نوع S

### ۳- بلبیرینگهای شیار عمیق با شیار جازنی ساچمه ها :

این نوع بلبیرینگ نمونه اولیه بلبیرینگهای شیار عمیق بدون شیار جازنی می باشند . در یک طرف از این بلبیرینگها روی لبه هر دو رینگ داخلی و خارجی ، شیارهایی تعبیه شده که از طریق این شیارها میتوان به راحتی ساچمه ها را داخل بلبیرینگ جا زد . این بلبیرینگها جهت تحمل بارهای محوری زیاد مناسب نمی باشند ، زیرا در آن صورت ساچمه ها از شیارهای جازنی خارج خواهند شد . چون تقریباً به تمام بلبیرینگها بار محوری نیز وارد میشود ، بلبیرینگهای بدون شیار جازنی کاربرد بیشتری دارند .

### ۴- بلبیرینگهای دینام :

ساختمان بلبیرینگهای آهنربایی بسیار شبیه به بلبیرینگهای شیار عمیق بدون شیار جازنی است . اما چون در رینگ خارجی فقط یک لبه وجود دارد ، اجزاء آن میتوانند به راحتی از بلبیرینگ جدا شوند . بلبیرینگهای دینام بار محوری را فقط در یک جهت میتوانند تحمل کنند . به همین دلیل برای مهار نمودن شفت در راستای محوری باید از دو بلبیرینگ رو در روی

هم استفاده نمود. این بیرینگها در انواع لوازم الکتریکی کوچک از قبیل دینام، استارت خودرو، جارو برقی و ... استفاده شده اند.

#### ۵- بلیرینگ با تماس زوایه ای یک ردیفه :

در این نوع شیارها به نحوی قرار گرفته اند که نیروها تحت زاویه تماس مشخصی از یک رینگ به رینگ دیگر منتقل میشوند. بلیرینگ با تماس زوایه ای در انواع مختلف با زاویه تماس ۱۵-۲۵ و ۴۰ درجه ساخته شده اند. بلیرینگ با تماس زوایه ای یک ردیفه به شکل O و X و یا پشت سر هم کنار هم مونتاژ میشوند که به این چیدمانها طرح عمومی یا U گفته میشود. طرحهای با زاویه تماس ۱۵ درجه برای سرعتهای بسیار بالا و طرحهای با زاویه ۲۵ درجه جهت تحمل بارهای محوری بالا مناسب هستند.

#### ۶- بلیرینگ با تماس زوایه ای دو ردیفه :

طرح آنها مشابه بلیرینگهای یک ردیفه جفت شده با چیدمان O می باشد که قادر به تحمل بارهای سنگین شعاعی و محوری هستند. به ویژه آنها برای ثابت کردن شفت در راستای محوری مناسب هستند.

#### ۷- بیرینگهای با تماس چهار نقطه ای :

پروفیل شیار هر یک از رینگهای داخلی و خارجی در این نوع از دو کمان تشکیل شده است که مراکز آنها بر هم منطبق نمی باشند، به همین دلیل هنگام اعمال بارهای شعاعی، ساچمه ها در چهار نقطه با شیارها تماس پیدا می کنند. زاویه تماس بیرینگهای با تماس

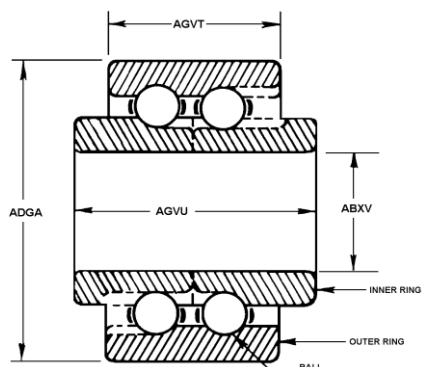
چهار نقطه ای ، بزرگ است (معمولا ۳۵ درجه) لذا توانایی تحمل بارهای محوری بالایی را در هر دو جهت دارند. کاربرد اصلی آنها در زمینه تجهیزات انتقال قدرت میباشد. این نوع به هیچ وجه برای تحمل بارهای شعاعی غالب بر بارهای محوری مناسب نیستند زیرا تحت بار شعاعی نقاط تماس به چهار نقطه افزایش و در نتیجه اصطکاک افزایش می یابد .

### تقسیم بندی از نظر شکل هندسی عناصر غلتشی

- |                    |   |
|--------------------|---|
| ۱. ساچمه ای (کروی) | <b>Ball Bearing</b>                                       |
| ۲. غلطکی           | <b>Role Bearing</b> استوانه کوتاه ، استوانه بلند ، مخروطی |
| ۳. سوزنی           | <b>Needle Bearing</b> متقارن و نا متقارن                  |

## انواع یاتاقانهای ساچمه ای :

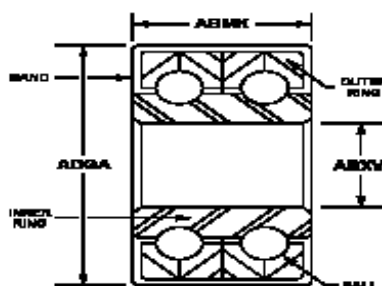
در شکل زیر برخی از یاتاقان های ساچمه ای نشان داده شده است.



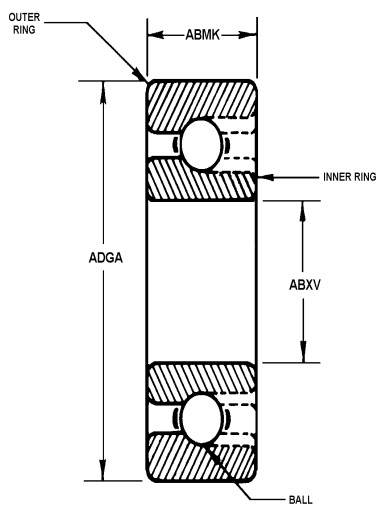
تماس مایل  
(Angular Contact)



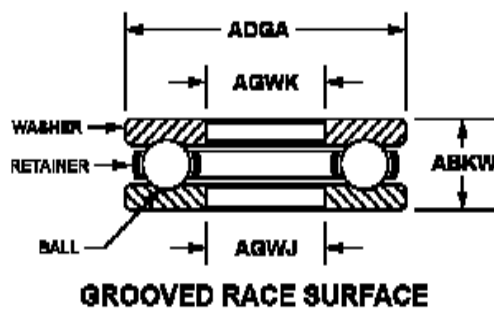
شیار عمیق  
(Deep Groove)



دوردیفه  
(Double Row)



با شکاف ساچمه جازنی  
(Filling Notch)

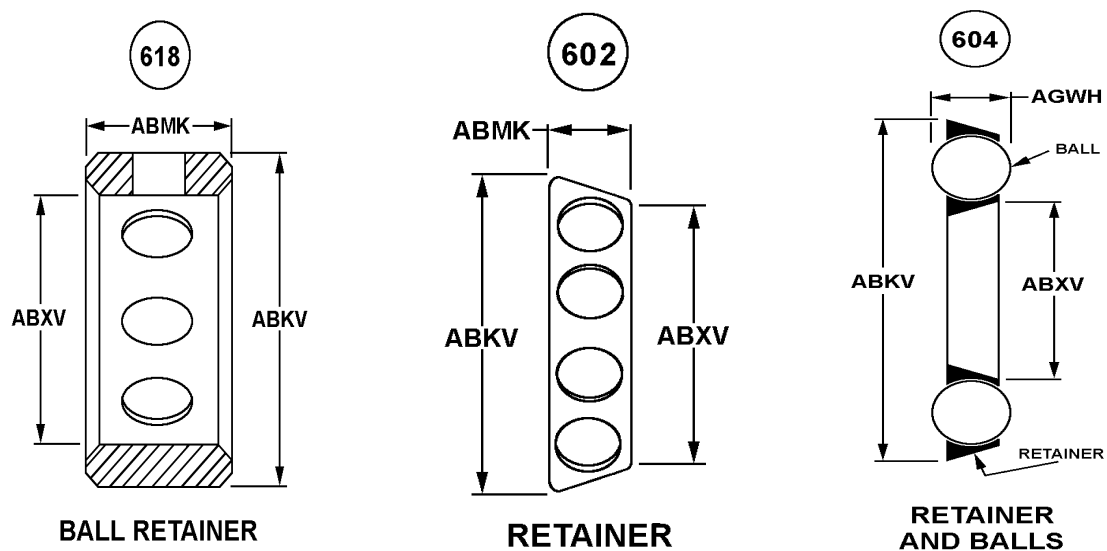


کف گرد  
(Thrust)

شکل (۱-۳) انواع یاتاقان ساچمه ای

## انواع قفسه یاتاقانهای ساچمه ای:

در شکل زیر نمونه ای از قفسه یاتاقان ساچمه ای آمده است.



شکل (۴-۱) انواع قفسه یاتاقان ساچمه ای

## یاتاقان های دو ردیفه :

برای حمل بارهای شعاعی و محوری سنگینتر استفاده میشوند.



Double-row ball bearing  
with step in outer ring

یاتاقان ساچمه ای دوردیفه  
دارای پله خارجی



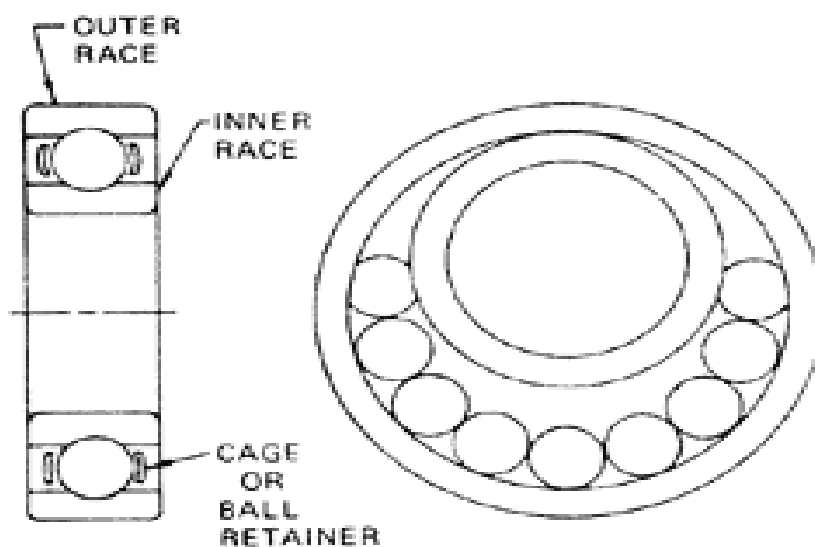
Linear guide

یاتاقان ساچمه ای دوردیفه

شکل (۱-۵) نمونه ای از یاتاقان های دوردیفه

### شیوه جا زدن ساچمه:

شیوه ی جا زدن ساچمه ها بدین طریق است که رینگ داخلی را خارج از مرکز درمی آورند و سپس ساچمه ها وارد فضای بین دو کرده و سپس قفسه را سوار می کنند. در شکل زیر چگونگی جا زدن نشان داده شده است.



شکل (۱-۶) شیوه جا زدن ساچمه

## یاتاقان های غلطکی

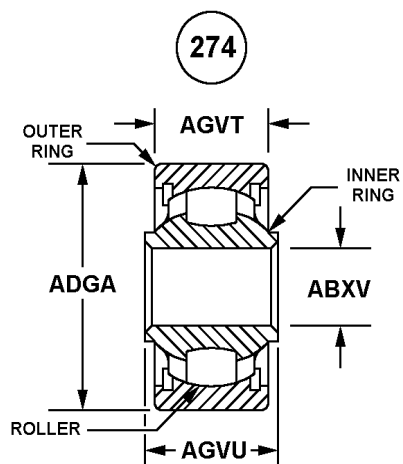
اجزاء یاتاقانهای استوانه ای :

| Role                 | غلطکها                |
|----------------------|-----------------------|
| External Ring        | رینگ بیرونی           |
| Internal Ring        | رینگ داخلی            |
| Cage (Role Retainer) | قفسه نگهدارنده غلطکها |

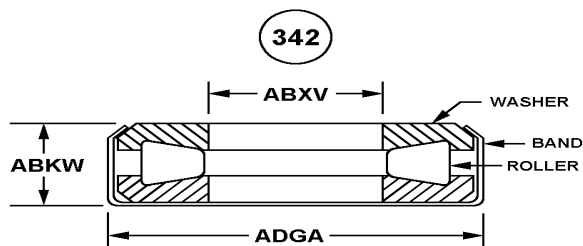
انواع یاتاقانهای استوانه ای :

در شکل زیر برخی از انواع یاتاقان های استوانه ای نشان داده شده است.

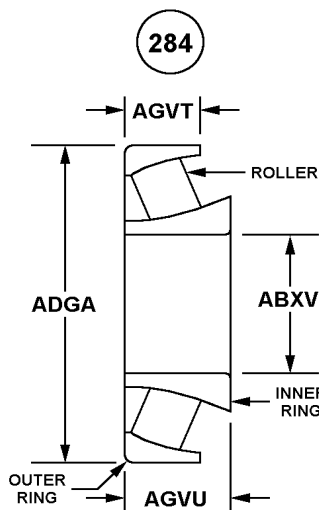




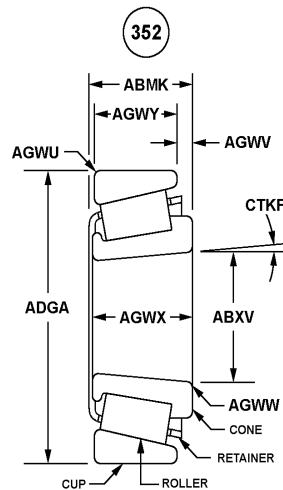
بشکه ای یک ردیفه  
(Single-Row Spherical Roller)



کف گرد غلطک مخروطی  
(Tapered Roller Thrust)



استوانه ای مورب یک ردیفه  
(Steep-Angle Straight Roller)

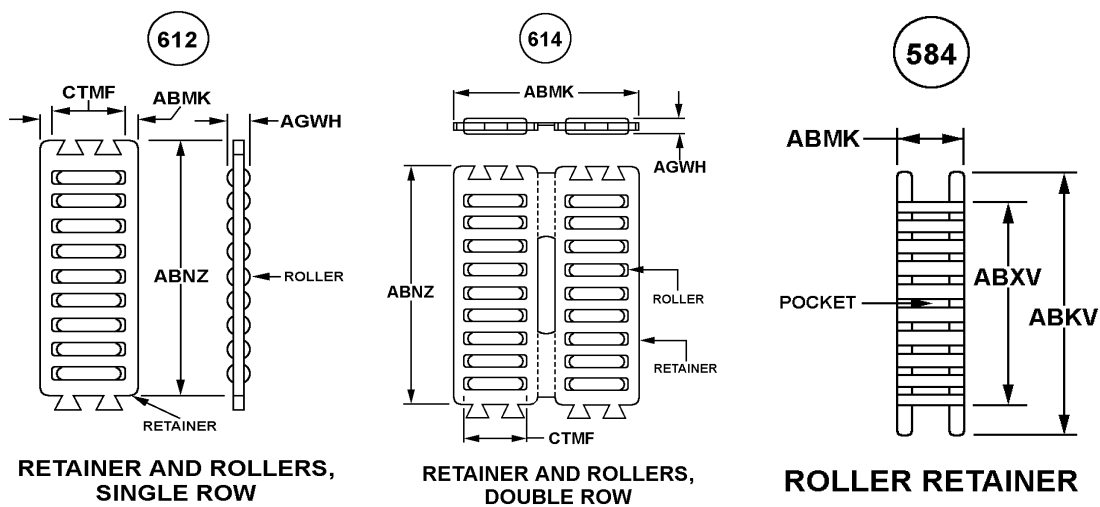


مخروطی یک ردیفه  
(Single-Row Tapered Roller)

شکل (۱-۷) انواع یاتاقانهای استوانه ای

## انواع قفسه یاتاقانهای استوانه ای :

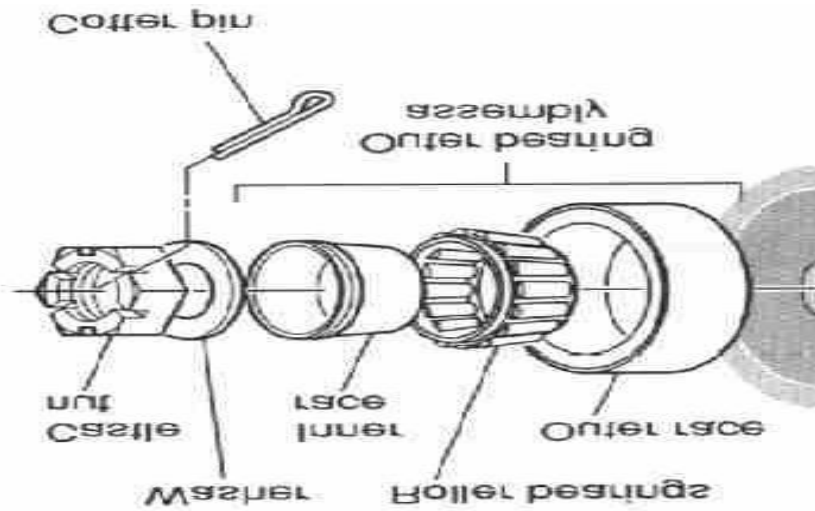
در شکل زیر انواع قفسه یاتاقان های استوانه ای نشان داده شده است.



شکل (۸-۱) انواع قفسه یاتاقانهای استوانه ای

## نحوه قرار گرفتن یاتاقان استوانه ای:

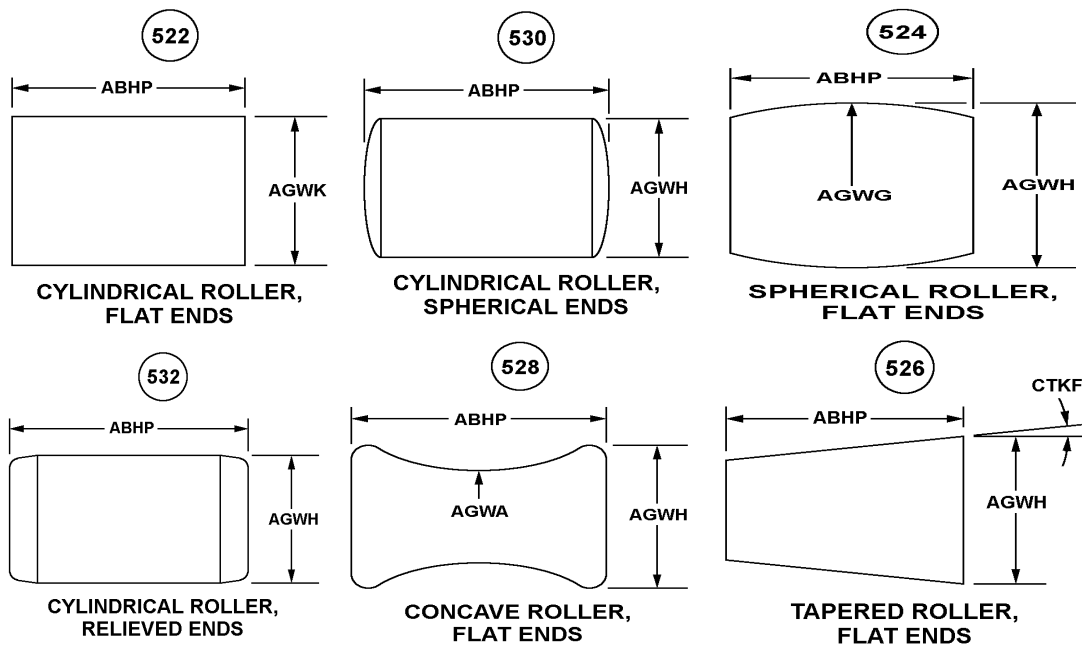
نحوه قرار گرفتن یاتاقان استوانه ای در شکل نشان داده شده است



شکل (۹-۱) نحوه قرار گرفتن یاتاقان استوانه ای

## انواع غلtek :

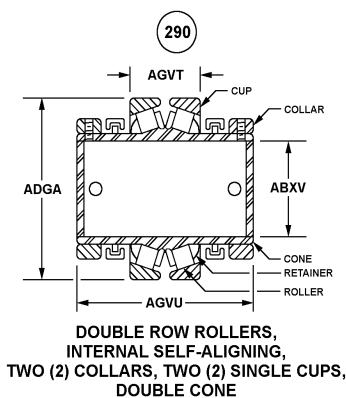
در شکل زیر انواع غلtek نشان داده شده است.



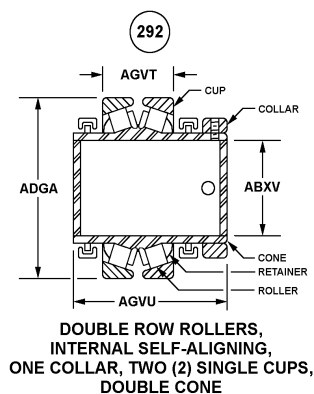
شکل (۱۰-۱) انواع غلtek

## یاتاقانهای غلظکی دو ردیفه :

نمونه ای از یاتاقان های غلظکی دو ردیفه شان داده شده است.



یاتاقان غلظکی دو ردیفه با حلقه داخلی خود تنظیم **دو لبه** با دو حلقه خارجی مجزا و حلقه داخلی مشترک



یاتاقان غلظکی دو ردیفه با حلقه داخلی خود تنظیم **تک لبه** با دو حلقه خارجی مجزا و حلقه داخلی مشترک

شکل (۱-۱۱) نمونه از یاتاقان غلظکی دو ردیفه

اجزاء یاتاقانهای سوزنی :

**Needle**

سوزن ها

**External Cons**

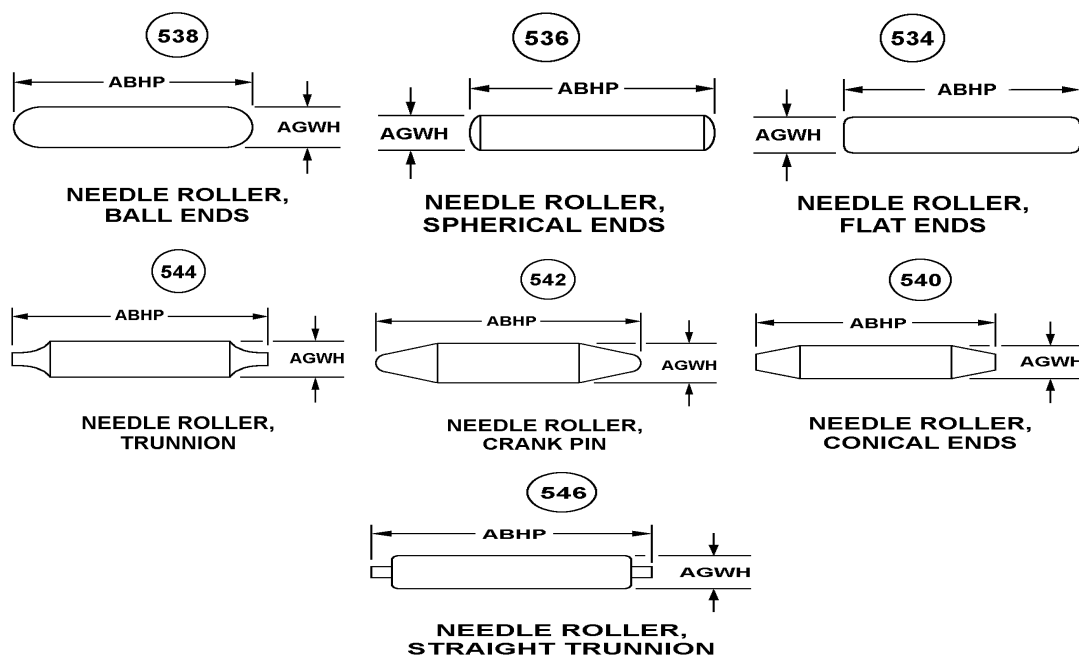
رینگ بیرونی

**Internal Cons**

رینگ داخلی

**Cage (Needle Retainer)** قفسه نگهدارنده سوزن ها

## انواع سوزن :

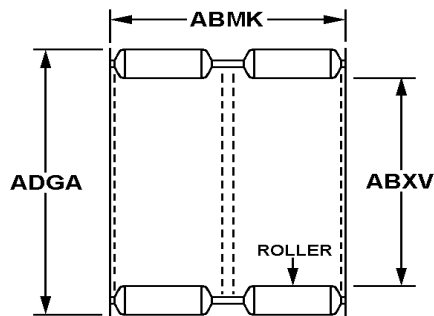


شکل (۱-۱۲) انواع سوزن

## قفسه یاتاقان سوزنی :

کاربرد : مواقعی که محدودیت شعاع داریم

587



**RETAINER AND NEEDLE  
ROLLERS, DOUBLE ROW**

شکل (۱۳-۱) نمونه ای از قفسه یاتاقان سوزنی

## تقسیم بندی بر حسب جبران نامیزانی محور:

### ۱- خود میزان:

در یک بلبرینگ خود تنظیم پروفیل شیار رینگ خارجی کروی شکل است. همچنین رینگ داخلی دو شیار با مقطع دایره ای دارد. قفسه، هر دو ردیف ساچمه ها را روی رینگ داخلی ثابت کرده و تشکیل یک مجموعه را می دهد. این مجموعه داخل رینگ خارجی به صورت مفصلی می چرخد و خود را با وضعیت شفت تنظیم میکند لذا مشکلات همراستا نبودن نشیمنگاه بلبرینگ،

عدم توازی شفت با محور رینگ خارجی و یا خیز شفت، اثر نامطلوبی بر رینگ نمی

گذارند. این نوع در مواردی استفاده میشود که لقی معینی بین

میله و یاتاقان مورد نظر باشد و عموماً در ماشین آلات کشاورزی، نوارنقاله ها

، ماشینهای ساده ، صنایع چوب و هواکشها کاربرد دارند .

## ۲- غیر خود میزان

### تقسیم بندی از لحاظ ساختمان:

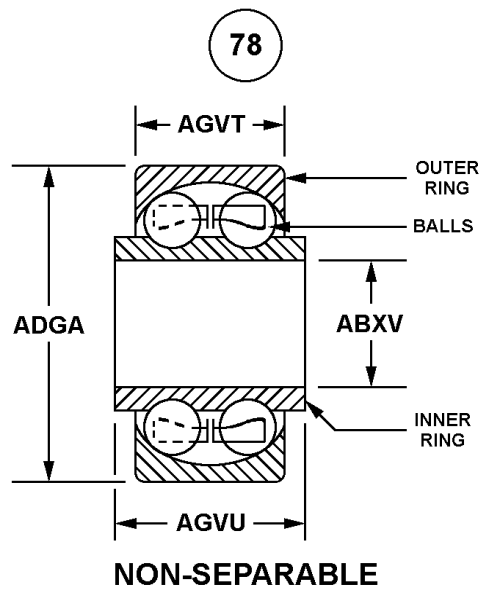
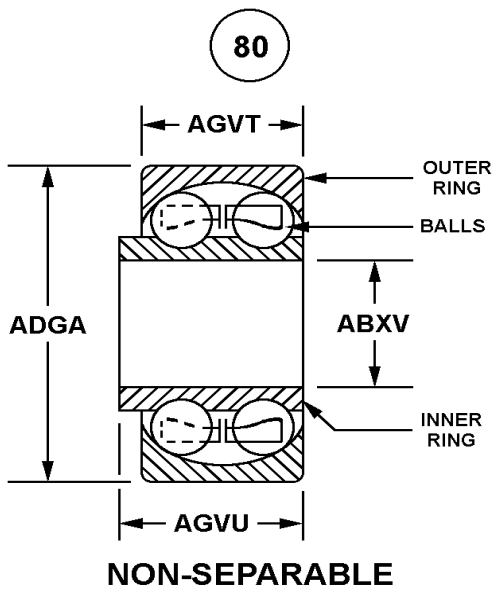
- یاتاقانهای یک تکه

- یاتاقانهای دو تکه:

از دو قسمت پایه و درپوش و از جنس چدن خاکستری ساخته میشوند که به کمک پله مرکز یاب در امتداد هم قرار گرفته و بوسیله دو عدد پیچ بسته میشوند. این یاتاقانها در دو نوع بوشدار و بدون بوش ساخته میشوند .

### یاتاقانهای دو ردیفه یکپارچه (جدا نشدنی) :

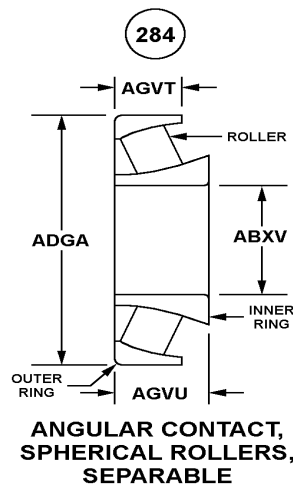
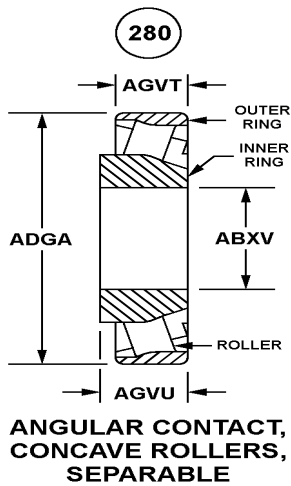
نمونه ای از این نوع یاتاقان ها در شکل نشان داده شده است.



شکل (۱-۱۴) نمونه ای از یاتاقان های دو ردیفه یکپارچه

## یاتاقانهای یک ردیفه جداشدنی :

در شکل نشان داده شده است.



شکل (۱-۱۵) یاتاقان یک ردیفه جداشدنی



## مزایای عمده یاتاقانهای غلتشی :

- ۱) هزینه اولیه کم می باشد
- ۲) آنها میتوانند بدون مراقبت با پریودهای طولانی کار کنند
- ۳) آنها معمولاً نسبت به یاتاقانهای لغزشی با وظیفه مشابه محفظه های کوچکتر و کم هزینه ای لازم دارند
- ۴) بمنظور تعویض سریع می توان از منابع متنوعی استفاده کرد
- ۵) موجب صرفه جویی انرژی می شوند. تعویض روانساز بدلیل ضریب اصطکاک کم به دفعات بسیار کمتری نسبت به یاتاقانهای لغزشی انجام می شود و بیشتر یاتاقانهای غلتشی توسط روانکار داخلی با درپوش آبنند تهیه شده که برای عمر کاری آنها کافی است.

## معایب یاتاقانها غلتشی :

- ۱) حلقه و تمام اجزای چرخشی در معرض تنشهای متناوب و سریع می باشند که باعث عیب ناشی از خستگی می شود .
- ۲) بسیاری از یاتاقانهای لغزشی هنگام متناژ و دمتناژ نیازمند احتیاط زیاد و مراقبتهای ویژه ای هستند
- ۳) نیازمند مراقبتهای ویژه ای از نظر میزان روانساز می باشند (نه کم نه زیاد

## انواع یاتاقان های غلتشی بر اساس شکل هندسی

یاتاقان ها از لحاظ شکل ساچمه ها نام گذاری میشوند که عبارتند از:

■ یاتاقان های کروی

■ یاتاقان های استوانه ای

■ یاتاقان های مخروطی

■ یاتاقان های سوزنی

■ یاتاقان های بشکه ای.

بجز یاتاقان های غلتشی ساچمه کروی که بلبرینگ نامیده می شوند بقیه انواع یاتاقان های غلتشی را

رولبرینگ نامند.

# فصل دوم:

مواد یاتاقانها و عملیات حرارتی

مواد یاتاقان ها

## مواد و عملیات حرارتی

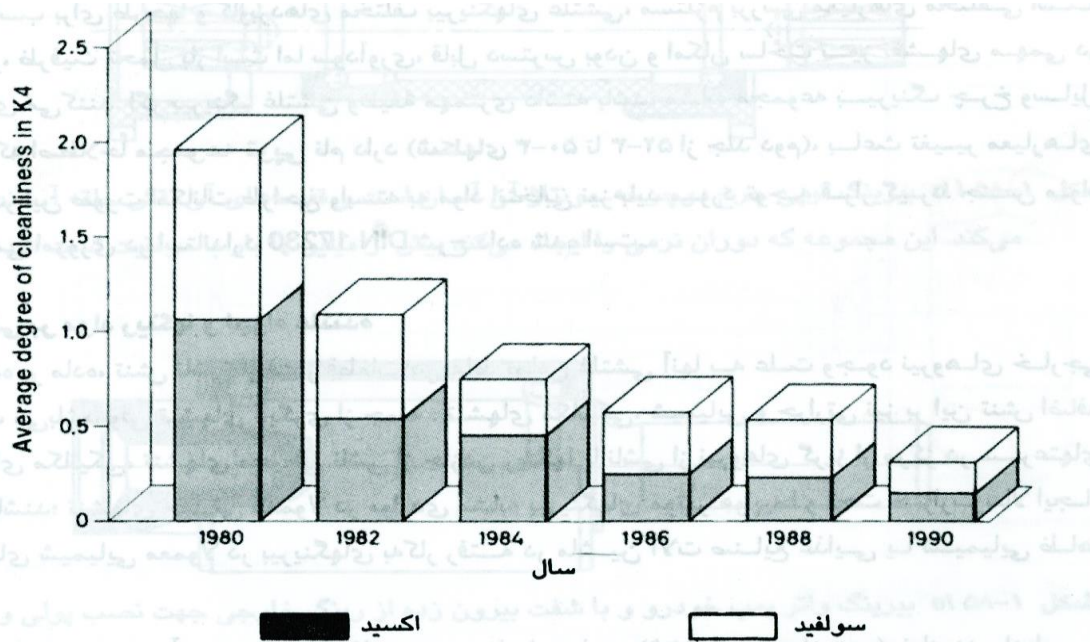
### رینگها و اجزاء غلتنده

انتخاب ماده مناسب برای طرح ها و کاربردهای مختلف بیرینگ های غلتشی ، مستلزم بررسی معیارهای مختلفی است. اصلی ترین معیار ، ظرفیت تحمل بار است اما سودآوری ، قابل دسترس بودن و امکان ساخت نیز نقش های مهمی در انتخاب مواد بازی می کنند. اگر بیرینگ غلتشی وظیفه مهمتری داشته باشد، مشابه مجموعه بیرینگ چرخ وسایل نقلیه مسافرتی که اصطلاحاً مجموع 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 بیرینگ های غلتشی امروزی در استاندارد **DIN 17230** شرح داده شده است.

### فشارهای اعمالی بر مواد رینگ ها و اجزاء غلتنده

تنش اصلی وارد بر ماده، تنش ناشی از فشار قطعات در نقاط تماس غلتشی آنها به علت وجود نیروهای خارجی وارده بر بیرینگ می باشد ولی تنش های دیگری از جمله : تنشهای مکانیکی ، تنش های محیطی ناشی از جا زدن رینگ ها یا ناشی از نیروهای گریز از مرکز در سرعت های دورانی بالا می باشند؛ تنش های حرارتی معمولاً در مواردی مشابه بیرینگهای موتور هواپیما و تحت حرارت بالا ایجاد می شود و تنش های شیمیایی معمولاً در بیرینگ های به کار رفته در ماشین آلات صنایع غذایی یا شیمیایی ظاهر می شود.

تحمل تنش های داخلی به وجود آمده در قطعات غلتشی تحت فشار تماسی ، نیاز مند ماده ای با استحکام استاتیکی و دینامیکی بالا به همراه بیشترین چقرمگی ممکن است. با انتخاب مواد مناسب و انتخاب پروسه صحیح عملیاتی می توان به توازن ایده آلی بین این دو خاصیت دست یافت. از این گذشته، درجه پاکی یک ماده ، عامل تعیین کننده استحکام خستگی آن در تماس غلتشی و همچنین ظرفیت تحمل بار توسط بیرینگ می باشد. ناخالصی های غیر فلزی و غیرقابل اجتناب در پروسه تولید فولاد ، عامل اصلی ناهمگن شدن مواد می شوند. آنها عامل اصلی ایجاد خستگی زودرس در قطعه شده و مقدمه ای بر ایجاد وانتشار ترک و نهایتاً ایجاد فرورفتگی در منطقه وسیعی از قطعه می شوند که در نتیجه باعث کاهش عمر مفید بیرینگ خواهند شد. ارتباط بین میزان درجه پاکی فولاد (برای مثال عاری بودن از اکسیدها ، سولفیدها و دیگر ناخالصیها) و عمر مفید بیرینگ های غلتشی در همان اوایل کشف شد و از آن به بعد باعث ایجاد انگیزه در افزایش کیفیت در تولید فولاد گردید.



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

تغییرات ساختاری ماده ناشی از پدیده خستگی ، موضوع انجام تحقیقات زیادی گردید. رشد تغییرات ساختاری مواد ، به بزرگی و مدت اعمال بار وابسته است و توسط منحنی های S-N می توان این مسئله را توضیح داد. بر پایه این کشف بنیادی و به علت ارتقاء قابل توجه کیفیت در تولید فولاد ، شرکت تولید کننده بیرینگ های غلتشی FAG ، اولین شرکتی بود که در سال ۱۹۸۱ ثابت کرد که بیرینگ های غلتشی نیز مشابه دیگر اجزاء ماشین ، می توانند تحت وضعیت کاری مشخصی ، با قابلیت اطمینان بالا و بدون بروز هیچ عیب فنی کار کنند.. این دانش، سالها پیش وارد محاسبات اصلاح یافته عمر مفید

بیرینگ های غلتشی شد. امروزه مواد استاندارد به کار رفته در بیرینگ های غلتشی باید درجه خلوص بالایی داشته باشند؛ یکی از راههای دست یافتن به فولاد خلوص بالا ، دور کردن گازهای مضر توسط خلا می باشد، امروزه این روش در تمام دنیا رایج شده است.

استاندارد نمودن مواد و پروسه های عملیات حرارتی ، تضمین کننده تولید اقتصادی و در عین حال ، فراوانی مواد می شود. مواد ویژه برای کاربردهای ویژه به کار می روند، مشابه بیرینگ های بزرگ یا بیرینگ های به کار رفته در صنایع هوا فضا، این مواد در سری های بسیاری از بیرینگ ها ، علامت مشخصه مخصوص دارند.

بنابراین در کنار فولادهای کرم دار فهرست شده در جدول ۱-۱ ، فولادهای دیگر به شرطی استفاده می شوند که خصوصیات مورد نیاز را داشته باشند. تولیدکننده های بیرینگ های غلتشی که در نقاط مختلف جهان ، کارخانجات تولید داشته باشند و از نقاط مختلف مواد اولیه خود را تامین کنند، باید استانداردهای ملی مربوط به شرایط مورد نیاز مواد بیرینگ های غلتشی که امکان دارد بین کشورهای مختلف متفاوت باشد، را رعایت کنند. تفاوتها معمولاً در عناصر شیمیایی تشکیل دهنده می باشند، گرچه این تفاوت ها بسیار ناچیزاند.

جدول ۱-۱ فولادهای بیرینگ غلتشی با قابلیت سختکاری عمقی

| درجه بندی فولاد | ترکیب شیمیایی (wt%) |      |      |      |       |       |      |      |      |
|-----------------|---------------------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|
|                 | DIN                 | 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 |

### فولادهای بیرینگ غلتشی با قابلیت سختکاری عمقی

اکثر رینگ ها و اجزاء غلتنده را از موادی می سازند که عناصر شیمیایی اصلی آنها تقریباً از سال ۱۹۰۰ که توسط **Stribeck** تعیین شده است (تقریباً ۱٪ کربن و ۱۰۵٪ کرم)، تغییر نیافته اند. تفاوت های ساختاری در آلیاژهای **100Cr6** (مشابه آلیاژ با استاندارد آمریکایی **52100**) تا **100 CrMnMo 8**، تضمین کننده توانایی سختکاری عمقی در تمام مقاطع از مقاطع کوچک تا بزرگ می باشد.

میزان عناصر تشکیل دهنده فولاد بیرینگ غلتشی توصیه شده در جداول، مطابق استانداردهای اجرایی مربوطه می باشند. پیروی از استانداردها، حتی برای تولیدکنندگان



بیرینگ های غلتشی باعث بسته تر شدن محدوده تغییرات عناصر در آنالیز ترکیبی مواد می شود که در نتیجه قابلیت ساخت و مصرف بیرینگ ها به وضعیت ایده آلی می رسد. اجزاء با ضخامت کم ، مشابه واشرهای پرسکاری شده رولربیرینگ های کف گرد برای بیرینگ های با نشیمنگاه فنی از فولادهای غیر آلیاژی کربن دار مشابه **Ck 67** یا **Ck 75** تولید می شود.

رینگ ها و اجزاء غلتنده معمولاً حداقل **HRC 58** سختی دارند. سختی بالاتر عمر مفید بیرینگ را بالا نمی برد. میزان کمتر سختی ، که امکان دارد به دلیل نوع ماده یا پروسه ایجاد شود، توسط فاکتور کاهش سختی  $f_H$  در محاسبات عمر مفید تاثیر داده می شود.

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

بعد از این مرحله ، جهت آزاد ساختن تنش های به وجود آمده در قطعه ، آن را در درجه حرارت پایین ، تمپر می نمایند. با تغییر درجه حرارت سختکاری و تمپر، می توان خصوصیات متفاوتی در ماده ایجاد کرد. برای مثال ، اگر **Cr 6 100** را تا  $850^{\circ}C$  حرارت دهیم، سختی پس از کونچ کردن بین **HRC 65-66** خواهد شد. همچنین با تمپر کردن آن در  $200^{\circ}C$  سختی به عددی حدود **HRC 62** کاهش خواهد یافت.

گرایش های تا حدودی مثبت دیگر، نیازمند یک آنالیز دقیق از تنش های احتمالی اعمالی به قطعه هنگام کار و تعیین خواص مورد نیاز می باشد.

پروسه عملیات حرارتی رینگ ها و اجزاء غلتنده، مثلاً قطعات مربوط به رولربیرینگ های استوانه ایو مخروطی، به نحوی انتخاب می شود که حتی با سایش ناشی از وجود آلودگی های معدنی، عملکرد بیرینگ و ظرفیت تحمل بار آن در بالاترین میزان ممکن باقی بماند.

خصوصیت مهم دیگر، انتشار تنش پس ماند در قطعه است که یکی از علل آن عملیات حرارتی است. سختکاری باینیتی (سختکاری همدم) باعث انتشار مطلوب تنش پس ماند در قطعات بیرینگ های غلتشی می شود. این حالت با نگه داشتن قطعه کونچ شده در دمای تغییر فاز به فاز باینیت حاصل می شود، اندازه این دما به نوع مواد بستگی دارد. نگه داشتن قطعه در دمای مطلوب به صورت همگن و برای چند ساعت، باعث تغییرات فازی تدریجی در ساختار میکروسکوپی قطعه خواهد شد. طی این پروسه، تنشهای پس ماند فشاری در لایه سطحی قطعه ایجاد می شوند. این تنش های فشاری، باعث کاهش تنشهای اعمالی به قطعه تحت تماس غلتشی گشته و رشد ترک ها را هزاران سیکل به تاخیر می اندازد. بعضی از بیرینگ های غلتشی را با روش های نسبتاً پیچیده ای عملیات حرارتی می کنند.

جهت تکمیل بحث لازم به ذکر است ، فولادهای کرم دار با قابلیت های سختکاری عمقی برای سختکاری القایی نیز مناسب هستند. آنها در طرح های مختلفی از توپهای بیرون زده از رینگ به کار می روند.

### فولاد های با قابلیت سختکاری سطحی

بیرینگ های غلتشی که تحت شوک یا تنش های خمشی تناوبی هستند را از فولادهای مخصوص سختکاری سطحی ، مطابق جدول ۱-۳ تولید کرد. رولربیرینگ های مخروطی چهار ردیفه روی شفت به صورت لق مونتاژ می شوند. حالت مشابه در رولربیرینگ های استوانه ای به کار رفته در ماشین های نورد ، مشاهده می شود. نشیمنگاه لق امکان جابه جایی بین قطعات بیرینگ و شفت را ایجاد نموده و باعث گرم شدن فوق العاده موضع و تشکیل ترک می شود. در نتیجه تمام قطعات و یا بخشی از قطعات این بیرینگها و بیرینگ های ماشین آلات نورد ، که قطر خارجیشان به بیش از 450 mm می رسد ، از فولادهای مخصوص سختکاری سختی ساخته می شود.

پس از کربن دهی گازی ، که گاهی توسط کامپیوتر کنترل می شود، قطعات را جهت دستیابی به ساختار میکروسکوپی با فاز مارتنزیت با سطح سخت و مغز نرم، عملیات حرارتی می کنند. در خلال این عملیات ، تنش های پس ماند فشاری در لایه های نزدیک سطح ایجاد می شوند. کاربرد اصلی فولادهای پر آلیاژ موجود در جدول ۱-۳ ، در

سختکاری قطعات با سطح مقطع بزرگ است که در آنها نرخ سرد شدن قطعه هنگام کونچ کردن پایین می باشد.

فولادهای کم آلیاژ یا غیر آلیاژی ، از قبیل St 4 یا 15 Cr 3 ، در قطعاتی با ضخامت کم مثل رینگ خارجی رولربیرینگ های سوزنی کشیده شده دو سر باز یا یک سر بسته استفاده می شوند. از آنجا که در عملیات سختکاری سطحی ، سختی و استحکام قطعه هر چه به مرکز حرکت کنیم کاهش می یابد، لذا لازم است نسبت به میزان بار وارده و هندسه تماس (قطر سطح تماس ، ضریب انحنا) عمق مناسب نفوذ سختی در قطعه تعیین و ایجاد شود تا تاثیر صدمات ناشی از خستگی و تغییر شکل های پلاستیک نزدیک منطقه تماس در وضعیت کاری استاتیکی و دینامیکی در بیرینگ خشی گردد. عمق نفوذ سختی مورد نیاز را می توان توسط فرمول زیر تخمین زد:

$$\text{قطر جزء غلنده} \times (0.07 - 0.21) \geq \text{عمق سختی } 550HV$$

جدول ۱-۳ فولادهای با قابلیت سختکاری سطحی

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

## فولادهای مخصوص سختکاری سطحی به روش القایی

معمولاً بخشی از قطعات بیرینگ ها سخت می شوند، خصوصاً در مواردی که وظیفه ای خاص در مجموعه داشته باشند. مثالهای بارز آن ، رینگهای داخلی و خارجی در مجموعه تویی با فلنج یکپارچه در خودروهای سواری و کامیون ها، شفت های واتر پمپ و محورهای رزوه دار در رولربیرینگ های جراحی با محور رزوه دار می باشند فقط سطوح تماس با اجزاء غلتنده و محل های تماس با حلقه های آب بند به روش القایی سخت می شوند. می توان از سختکاری شعلهای به جای روش القایی استفاده کرد. در موارد بسیار نادری از روش های مدرن از قبیل سختکاری توسط پرتوهای یونی یا لیزر استفاده می شود. سطوح تماس بیرینگ های مفصلی نیز سختکاری سطحی می شوند. دندانهای آنها سختکاری سطحی و یا تا ریشه دندانها ، سختکاری عمقی می شوند.

فولادهای بیرینگ غلتشی مناسب برای سختکاری با شعله یا القایی ، یا از نوع فولادهای کونچ و تمپر شده (جدول ۱-۴) هستند و یا فولاد کرم دار با قابلیت سختکاری عمقی (جدول ۱-۱) می باشند. درجه خلوص بالای فولاد ، شرط اولیه برای دستیابی به استحکام خستگی بالا در قطعه می باشد.

باید در محاسبه عمق نفوذ سختی مورد نیاز ، میزان بار اعمالی و هندسه تماس در نظر گرفته شود. به عنوان یک راه حل تجربی ، می توان از فرمول زیر برای محاسبه استفاده

کرد:

قطر جزء غلتنده  $\times (0.1-0.15) \geq$  عمق سختی

550HV

برای رسیدن به سختی سطحی **HRC 58** به پایین، می توان از فولادهای با سختی پذیری کمتر که در جدول ۱-۴ آورده شده اند استفاده کرد. این مورد را می توان در محاسبات عمر مفید بیرینگ داخل کرد. باید با در نظر گرفتن تنش های وارده و قابلیت تولید قطعه، در کنار دیگر پارامترها، نوع ماده اولیه را از بین فولادهای کونچ و تمپر شده، فولادهای نرمالیزه شده و یا فولادهای آنیل شده انتخاب کرد.

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

|                     |       | ترکیبات شیمیایی (wt%) |      |      |       |       |      |      |      |
|---------------------|-------|-----------------------|------|------|-------|-------|------|------|------|
| درجه فولاد          | DIN   | C                     | Si   | Mn   | P     | S     | Cr   | Mo   | Ni   |
| 43 CrMo 4<br>1.3536 | 17230 | 0.40                  | 0    | 0.60 | 0     | 0     | 0.90 | 0.15 | -    |
|                     |       | 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<br>1.1219     | 17230 | 0.50                  | 0    | 0.40 | 0     | 0     | -    | -    | -    |
|                     |       | 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 | -    | -    | -    |

## فولادهای مقاوم در برابر خوردگی

تعدادی از فولادهای مقاوم در برابر خوردگی مناسب برای مصرف در بیرینگ های غلتشی با محیط کاری خورنده در دسترس می باشند. (جدول ۱-۵). مقاومت این مواد زمانی به میزان رضایت بخش می رسد که آنها را در کمترین درجه حرارت ممکن ، کونچ و تمپر نماییم و همچنین صافی سطح بالایی داشته باشند. اطلاعات دقیقتر در مورد مقاومت فولاد را می توان از تولیدکننده های فولاد وسازندگان بیرینگ های غلتشی ، به دست آورد.

فولادهای مقاوم به خوردگی را می توان به دو گروه تقسیم کرد، فولادهایی که به خاطر کربن کم ، توان سختکاری سطحی پایبتری داشته و در نتیجه ظرفیت تحمل بار کمتری نسبت به فولادهای استاندارد بیرینگ های غلتشی دارند (مثل X 45 Cr 13)، و فولادهایی که این نقیصه را نداشته ولی به خاطر داشتن کربن بالا و کرم، کاربرد زیادی در ساختارشان دارند ( مثل X 102 CrMo 17). هنگام سنگ زنی سطح تماس قطعات ، کاربردهای موجود ظاهر شده و از سطح آن جدا می شوند که باعث پاره پاره شدن سطح می گردد. نتیجه، افزایش صدای ایجاد شده هنگام غلتش است. جهت پیشگیری از این عارضه ، فولاد مقاوم به خوردگی X 65 Cr 13، سالهاست که به کار می رود. این فولاد به حد کافی سخت می شود و اشکالات ساختاری کمتری دارد.

جدول ۱-۶ فولادهای مقاوم به حرارت، آلیاژهای استلایت

| درجه فولاد                                    |                    | ترکیب شیمیایی (wt%) |      |      |       |       |      |      |      |      |      |
|---|--------------------|---------------------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|
| کد یا شماره ماده                              | DIN                | C                   | Si   | Mn   | P     | S     | Cr   | Mo   | Ni   | V    | W    |
| M50<br>(80 MoCrV 42 16)<br>1.3551 ≈ AISI M 50 | 17230              | 0.77                | 0    | 0    | 0     | 0     | 3.75 | 4.0  | -    | 0.90 | -    |
|   |                    | 0.085               | 0.25 | 0.35 | 0.015 | 0.015 | 4.25 | 4.5  | -    | 1.10 | -    |
| X 75 WCrV 18 4 1<br>1.3558 ≈ AISI T1          | 17230              | 0.70                | 0    | 0    | 0     | 0     | 3.80 | 0    | -    | 1.0  | 17.5 |
|   |                    | 0.78                | 0.45 | 0.40 | 0.030 | 0.030 | 4.50 | 0.60 | -    | 1.2  | 18.5 |
| X 12 MoCrNiV 443<br>M50NIL<br>AMS 6278        | M50NIL<br>AMS 6278 | 0.11                | 0.10 | 0.15 | 0     | 0     | 4.0  | 4.0  | 3.2  | 1.13 | 0    |
|   |                    | 0.15                | 0.25 | 0.35 | 0.015 | 0.010 | 4.25 | 4.5  | 3.6  | 1.33 | 10.5 |
| X 20 WCr 10 3<br>(RBD)                        |                    | 0.16                | 0    | 0.20 | -     | -     | 2.75 | -    | 0.50 | 0.35 | 9.5  |
|   |                    | 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 | -    |
| همراه N : 0.35 - 0.43                         |                    |                     |      |      |       |       |      |      |      |      |      |
| Stellite<br>Alloy Nr. 19 PM                   |                    | 1.50                | 0    | 0    | -     | -     | 29.5 | -    | 0    | -    | 9.5  |
|   |                    | 2.25                | 1.0  | 1.0  | -     | -     | 32.5 | -    | 3.0  | -    | 11.5 |
| کل بقیه : Fe : 0 - 2.0, B : 0 - 1.0, Co       |                    |                     |      |      |       |       |      |      |      |      |      |
| Stellite<br>Alloy Nr. 25 PM                   |                    | 0.05                | 0    | 1.0  | -     | -     | 19.0 | -    | 9.0  | -    | 14.0 |
|   |                    | 0.15                | 1.0  | 2.0  | -     | -     | 21.0 | -    | 11.0 | -    | 16.0 |
| کل بقیه : Fe : 0 - 2.0, Co                    |                    |                     |      |      |       |       |      |      |      |      |      |

دو نمونه پیشرفته جدید که در صنایع هوا فضا و صنایع غذایی به کار می روند، فولادهای

پرنترولن مارتنزیتی X 30 CrMoN 15 و X 15 CrMoN 15 می باشند، که مقاومت

بالایی در برابر خوردگی دارند. بعضی از بیرینگ ها را با پوشش دهی ، در مقابل خوردگی

حفظ می کنند. یک پوشش نازک از کرم ، غالباً برای بیرینگ هایی که سطح تماسشان نیز

باید پوشش داده شود ، موثر است.

جدول ۱-۵ فولادهای مقاوم به خوردگی

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



## مواد مقاوم به حرارت (نسوز)

در مواردی که دمای محیط کاری بالا باشد و استفاده از بیرینگ های ساخته شده از فولادهای کرم دار با قابلیت سختکاری عمقی که ابعاد ثابتی ندارند نامناسب باشد، از بیرینگ های ساخته شده از مواد مقاوم به حرارت استفاده می شود.

عناصر تشکیل دهنده مواد مقاوم به حرارت مخصوص بیرینگ ها ، مشابه فولادهای ابزار است. (جدول ۱-۶) از این مواد در ساخت بیرینگ های موتور هواپیما استفاده می شود. این فولادها نسبت به دیگر فولادهای بیرینگ ختی بالاتری در دماهای بالا دارند. یک نمونه پیشرفته ، از این مواد ، فولاد مارتنزیتی پر نیتروژن **HSN) X 30 CrMoN 15** است، که با سختکاری ثانویه در دمای تمپراسیون بالا ، می توان 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 کاربرد های صنایع هوافضا ایده آل باشد.

معمولاً رینگ های به کار رفته در صنایع هوا فضا را تا عمق سخت می کنند. ولی در مواردی که بیرینگ تحت تنش بالایی باشد، مثل دوران با سرعت بالا ، از فولادهای مقاوم به حرارت با قابلیت سختکاری سطحی استفاده می شود. فولاد

M50NiL یکی از نمونه های برجسته از این نوع فولادهاست که در سالهای اخیر به خوبی در صنعت معرفی شده است. عملیات حرارتی این فولادها نیازمند اطلاعات فنی بسیار بالا ، ماشین آلات پیشرفته و مهندسی پروسه پیشرفته ای است. آلیاژهای زینتر شده استلایت برای دماهای بالای  $600^{\circ}C$  نیز به کار می روند.

### مواد مخصوص کاربردهای ویژه

طیف گسترده طرح ها و کاربردهای بیرینگ ها ، ما را به سوی مصرف موادی هدایت می کند که نمی توان آنها را به تفصیل شرح داد. بیرینگهای غلتشی مورد استفاده در صنایع شیمی و صنایع غذایی، جزو این دسته از بیرینگ ها می باشند. در مواردی با بار اعمالی پایین، می توان آنها را از فولاد زنگ نزن غیر قابل سختی پذیری با مواد پلاستیکی ساخت سرامیک ها گروه دیگری از مواد مهم هستند که جایگاه خوبی دارند، نیتريد سيليكون ( $Si_3N_4$ ) را معمولاً در ساخت ساچمه به کار می برند(مانند شکل) خصوصیات ویژه سرامیک ها از قبیل: وزن کم(وزن قطعات سرامیکی تنها ۴۰٪ وزن قطعات مشابه فولادهای است)، انبساط حرارتی کم، سختی بالا، مقاومت در برابر حرارت ، ثبات ابعادی عالی، مقاومت بسیار خوب در برابر خوردگی ، مدول الاستیسته بسیار بالا و غیر مغناطیسی بودن، برای بعضی از

کاربردها بسیار ایده آل است. هنگام بررسی های 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.



شکل ۱-۷۱ قطعات بیرینگهای غلتشی ساخته شده از نیتريد سيليكون ( $Si_3N_4$ )

### ثبات ابعادی بیرینگ های غلتشی

ابعاد بیرینگ های غلتشی باید تا دمای کاری خاصی ثابت بماند تا بتواند در محدوده حرارتی تعریف شده و حتی فراتر از آن به خوبی کار خود را ادامه دهد. عدم ثبات ابعادی فولادی بیرینگی که سختکاری شده باشد ولی عملیات ثانویه ای روی آن انجام نشده باشد، باعث می شود در دمای کاری بالا ، تغییرات ابعادی به سرعت آشکار شوند.

تأثیرات منفی این پدیده ، عبارتند از : تغییر در میزان لقی بیرینگ ، کاهش بار اولیه یا ایجاد بارهای اولیه زیان آور، کاهش نیروی جازنی و از کارافتادگی زودرس بیرینگ.

تغییرات ابعادی ، ناشی از تغییرات در دو جزء تشکیل دهنده ساختار میکروسکوپی فولاد ، یعنی آستنیت و مارتنزیت می باشد. تاثیر 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 می شود.

تغییر ابعادی نهایی ، تفاضل تغییرات ابعادی خالص این دو فاز خواهد بود.

این تغییرات ابعادی تابع قانون کوچکترین محدودیت می باشند. تنش های کششی ، که مثلاً در رینگ به خاطر جا زدن در شفت ایجاد شده باشد، باعث تسهیل در افزایش قطر می شوند. سازندگان بیرینگهای غلتشی ، توسط یک پروسه مخصوص تمپراسیون، بعد از سختکاری ، اینگونه تغییرات ابعادی را حذف می کنند. در این پروسه تمپراسیون ، میزان آستنیت باقی مانده ، کاهش یافته و کاربیدها در فاز مارتنزیت رسوب داده می شوند. اگر بیرینگ ها در حرارت های بالاتر از حد مجاز جدول قرار نگیرند، تغییرات طولی ایجاد نخواهد شد. بسته به سازنده بیرینگ غلتشی ، بیرینگ های استاندارد تا دماهای  $120^{\circ}C$  یا  $150^{\circ}C$  ثبات ابعادی دارند.

امکان دارد تغییرات ابعادی در لایه های سطحی سختکاری شده قطعات در دماهای پایین تمپر می شوند، اتفاق بیفتد. این نوع تغییرات ابعادی ، ناشی از تغییرات ساختاری در لایه های

سطحی است. دردهای کاری بالا، باید تمام موارد در نظر گرفته شود تا متوجه شویم که آیا به عملیات ویژه ای جهت ثبات ابعادی نیاز داریم یا خیر.

### پروسه های عملیات سطحی

بعضی اوقات، هزینه های گزافی صرف توسعه و پیشرفت پوشش های بیرینگ های غلتشی می شود. برخی از اهداف تکنولوژی های عملیات سطحی، بهبود رفتارهای سایشی قطعات است، که بعضی اوقات با پوشش دهی سطح تماس فقط یکی از اعضاء تحت تماس، می توان به هدف مورد نظر دست یافت. اهداف دیگر عبارتند از: افزایش مقاومت به خوردگی و یا عایق بندی در مقابل جریان برق.

پروسه های سیاه کاری اکسیدی و فسفاته کردن، جهت بهبود خاصیت آب بندی سطوح تحت سایش یا ایجاد قابلیت دوران بدون روانکاری، مدتهاست که به کار میروند. یک پروسه پیشرفته تر که در کاربردهای مختلف آزمایش شده است، پوشش دهی لایه نازکی از کرم به روش کاتدی است. این پوشش عمر سطوح تماس غلتشی را افزایش می دهد و مقاومت آنها را در مقابل سایش، خصوصاً تحت شرایط اصطکاکی مختلط، بالا می برد. لایه کرم پوشش داده شده، نباید پس از یک دوره طولانی گردش بیرنگی کهروغنکاری مناسبی دارد، کنده شود، زیرا لایه 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 فرا گرفته باشد، باعث افزایش مقاومت به خوردگی فولادهای معمولی بیرنگ سختکاری عمقی شده می شود. پوشش دهی به روش فیزیکی بخار فز (PVD) ، پوشش دهی به روش رسوب شیمیایی بخار فاز (CVD) و اصلاح سطح به روش کاشت یونی ، روش هایی هستند که آزمایش شده اند و در بعضی موارد به کار می روند. البته در کنار قواعد فنی ، مقرون به صرفه بودن بیرنگ نقش قاطعی در انتخاب پروسه پوشش دهی بازی می کند. صدمات ناشی از عبور جریان برق در موارد ویژه را می توان با عایق بندی بیرنگ با پوشش لایه های سرامیکی روی سطح خارجی رینگ خارجی از بین برد. این لایه ها توسط روش پاشش شعله ای و یا پلاسما ایجاد شوند.

### مواد اولیه قفسه ها

قفسه های بیرنگ های غلتشی را از فلز یا پلاستیک می سازند . در ساخت قفسه های فلزی بیرنگ های کوچک، از ورق های فولادی و برنجی استفاده میشود. قفسه های بیرنگ های متوسط و بزرگ را به روش آهنگری سرد یا ماشینکاری از فولاد یا برنج می سازند. در موارد ویژه نیز امکان دارد قفسه ها را از برنز یا آلیاژ آلومینیوم بسازند. سالهاست که در انواع زیادی از بیرنگ های غلتشی ، از قفسه های

پلاستیکی استفاده می شود. امروزه ترمو پلاستها ، به خاطر خواص لغزشی مناسب ، وزن کم و خاصیت الاستیسیته ، تبدیل به مواد اولیه پراهمیتی جهت ساخت قفسه ها شده اند. قفسه های ترموپلاستی حتی با شکل های پیچیده را می توان با روش های ارزان اقتصادی تزریق پلاستیک تولید نمود.

اکثر قفسه های پلاستیکی از ماده ترموپلاست پلی آمید 66 (PA66.GF) که توسط لیاف شیشه تقویت شده است ، ساخته می شوند، این ماده به حرارت نیز مقاوم است. این قفسه ها برای دمای ثابت تا  $120^{\circ}C$  مناسب هستند.

در بیرینگ هایی که با روغن روان کاری می شوند، عمر قفسه به خاطر وجود احتمالی افزودنی های داخل روغن و همچنین تاثیر روغن کهنه در حرارت های بالا ، کاهش خواهد یافت. در نتیجه ، باید فواصل تعویض روغن سیستم روانکار، کاملاً رعایت شود.

قفسه های ویژه را از دیگر مواد ترموپلاست و دیورپلاست، تولید می نمایند: قفسه های تحت تنش های حرارتی بالا از ترموپلاست PEEK ساخته می شوند و یا در ساخت قفسه های بیرینگ های محور کارگیر ماشین های ابزار ، از رزین فنولی با لایه های بافته استفاده می شود.

## مواد اولیه حلقه های آب بند

حفاظ های گردگیر تقویتی به کار رفته در حلقه های آب بند را از ورق فولادی می سازند. نوع مواد پلاستیکی به کار رفته در اکثر حلقه های آب بند لاستیکی، آکریلونیتریل بوتادین (NBR) است که به نامهای لاستیک نیتریل یا بونا-N نیز معروف است. برای حلقه های آب بند تحت وضعیت های حرارتی یا شیمیایی ویژه ، نیاز به انواع لاستیک های گرانتیمت تر می باشد.

اطلاعات مربوط به تاثیر مواد شیمیایی خورنده ، خصوصاً موادی که از بیرون حلقه آب بند با آن در تماس هستند را می توان از دفترچه های دستورالعمل مصرف حلقه های آب بند یا از طریق تولیدکننده های لاستیک به دست آورد. از تولید کننده های بیرینگ های غلتشی هم می توان اطلاعات مشابهی به دست آورد. ماده به کار رفته در یک حلقه آب بند را می توان از روی پسوند داخل کد بیرینگ و مشاهده رنگ لاستیک تشخیص داد.



## فصل سوم:

مجلات و نرم افزار های مرتبط با یاتاقان

## معرفی سایت ها

معرفی برخی از امکانات وجود در سایت **SKF.COM**

■ کاتالوگ آنلاین

■ تهیه نقشه ها

■ انتخاب پایه یاتاقان

■ انتخاب روانساز

■ انجام محاسبات

■ پشتیبانی خرید

■ آموزش مونتاژ و دی مونتاژ

■ ...

## کاتالوگ آنلاین

در این قسمت می توان کاتالوگ محصولات تولیدی این شرکت را مشاهده نمود. که با انتخاب نوع یاتاقان و سپس اندازه آن، مشخصات قابل دسترسی خواهد بود

## تهیه نقشه ها

در این قسمت می توان فایل های عکس، نقشه های دو بعدی و سه بعدی محصولات این شرکت را در تمامی نرم افزار های مهندسی دریافت کرد.

## انتخاب پایه یاتاقان

در این قسمت می توان با مشخصاتی که از یاتاقان و محور به سایت داده می شود، پایه یاتاقان مناسب را انتخاب کرد.

## انجام محاسبات

در این قسمت می توان انواع محاسبات مربوط به یاتاقان را انجام داد:

- عمر یاتاقان

- بار یاتاقان و عمر محک
- حداقل بار
- بار محوری دینامیکی
- گشتاور اصطکاکی - تلفات توان
- عمر روانساز
- فرکانس یاتاقان
- ...

آموزش مونتاژ و دی مونتاژ

در این قسمت در مورد نحوه مونتاژ و دموونتاژ انواع محصولات تولیدی این

شرکت همراه با عکس و متن توضیح داده می شود

## معرفی نرم افزار

### **COBRA™ Software Family (Computer Optimized Ball and Roller bearing Analysis software)**

این نرم افزار قادر به تحلیل و بهینه سازی انواع یاتاقان ها می باشد که

خود شامل دو قسمت است:

**COBRA-EHL™**

**COBRA-AHS™**

**COBRA-EHL**

**(ElastoHydrodynamic Lubrication)**

■ تحلیل عکس العمل های تا ۶ یاتاقان روی یک محور صلب با

بارگذاری مرکب ۳ درجه آزادی

■ ارائه نتایج بصورت بصری که به طراح اجازه تغییر اطلاعات ورودی و

مشاهده نتیجه را می دهد

■ تحلیل ضخامت فیلم روانساز و مشخصه های عمر آن

■ توانایی تحلیل یاتاقان های صلب و غیر صلب

■ دارای بلبرینگ های شعاعی و تماس زاویه ای و رولبرینگ های

استوانه ای، مخروطی و کروی

■ محاسبه میزان عمر L10 با استاندارد های ISO و ANSI

■ محاسبه مشخصه های عمر و Timken BBR برای رولبرینگ های

مخروطی

■ تخمین اندازه های هندسی بر اساس اطلاعات داده شده

...

## COBRA-AHS

(Advanced High Speed)

■ تحلیل عکس العمل های تا ۶ یاتاقان روی یک محور صلب و غیر

صلب با بارگذاری مرکب ۵ درجه آزادی

■ توانایی تحلیل غلتنده های کروی سرعت بالا و استوانه ای و

رولبرینگ های مخروطی

■ بررسی تاثیرات اعوجاج پایه و محور بر روی یاتاقان ها

■ محاسبه گرمای و نیروی قفسه ایجاد شده در یاتاقان

■ محاسبه تمرکز تنش گوشه های غلتنده های محدب در اثر غیر هم

محوری

■ در نظر گرفتن بوش های یاتاقان و پایه در صورت وجود

■ ورودی و خروجی اطلاعات از طریق نمایش بصری

■ امکان تحلیل عکس العمل های حرارتی و ابعادی تکرار شونده

...

# فصل چهارم:

**خرابی یاتاقان ها ( Bearing failures )**

## انواع خرابیها

۱- خرابی معمولی ناشی از خستگی مواد

۲- خرابی زودرس که با ننگه داری صحیح رفع نمی شود.

گردش یکنواخت

صدای غیرعادی ناشی از پوسته شدن سطح

تغییر لقی ناشی از سایش

ایجاد حرارت بیش از حد

■ خرابی ناشی از خستگی

**عمر خستگی بستگی دارد به :**

۱- بار بیش از حد استحکام دوام

۲- دفعات گردش یاتاقان

خستگی به دو نوع تقسیم می شود



■ ۱- خستگی معمولی : از ایجاد ترک های ریز در زیر سطح و رشد

ترک ها تا سطح و کنده شدن تکه های کوچک

■ پیشگیری: کاهش بار و سرعت

عمر کاری یاتاقان را افزایش می دهد.

۲- خستگی ناشی از گردش ذرات خارجی درون یاتاقانها:

. تمیز بودن روانکار پیش شرط افزایش عمر

. ذرات خارجی عمر مفید یاتاقان را تغییر می دهند

## آلودگی و سایش یاتاقان

■ عوامل موثر در سایش عبارتند از:

آلودگی

ذرات خارجی

آب و مواد خنک کننده

## روغن آلوده

### خوردگی یاتاقان ها :

■ اثرات زنگ آهن بر روی سطوح :

۱- ایجاد صدا و گردش غیر روان و اثر سایشی

۲- ایجاد حفره های کوچک و نقاط تمرکز تنش

### ■ دلایل خوردگی :

۱- نفوذ آب به علت خرابی و اثر های آب بند

۲- اسید و روانکارهای اسیدی

۳- میعان آب موجود در هوا

### ■ پیشگیری

۱- پوشاندن لایه نازک مواد نفتی بر روی یاتاقان

۲- نگه داری در روغن در موقع انبار داری

صدمات ناشی از لغزش :

■ پاره شدن لایه روغن در سطوح تماسی در اثر سرعت و بار زیاد

■ تحت بار قرار گرفتن موضعی یاتاقان ها در بار های کم

■ پیشگیری :

۱- استفاده از روغن مطلوب مرغوب تر یا روغن حاوی EP

۲- کاهش لقی یاتاقان

ایجاد فرورفتگی در اثر تغییر شکل پلاستیک

اعمال بار بیش از حد به یاتاقان در حال سکون

اثرگذاری ساچمه در اثر ارتعاش

■ در اثر بارهای ضربه ای و ارتعاش در حالت سکون

■ در اثر گردش گاه به گاه رولربیرینگ فرورفتگی طولی به وجود

می آید.

## ■ پیشگیری

۱- کاهش لقی در حداکثر ممکن

۲- استفاده از مکانیزم های گوه ای

عبور جریان الکتریسیته از یاتاقان

■ هنگام جوشکاری و اتصال کابل برگشت به محل نادرست باعث عبور

جریان از یاتاقان می شود.

■ ایجاد جرقه باعث گسیخته شدن لایه روغن و ایجاد حفره هایی

شبیه شکل می شود.

## ■ پیشگیری :

۱- استفاده از نوعی گریس هادی جریان در یاتاقان در جران های کم

۲- استفاده از یاتاقان های عایق الکتریسیته

## نصب نادرست یاتاقان

■ اعمال بار اولیه شعاعی یا محوری در طراحی سازه به جز در موارد خاص

غیر مجاز است .

■ افزایش حرارت یاتاقان باعث به وجود آمدن بار شعاعی ناخواسته می شود.

■ انحراف رینگ های داخلی و خارجی نسبت به هم باعث غلتش

مورب اجزاء غلتنده بر روی مسیر غلتش می شود

■ حرکت مورب و منحرف اجزاء غلتنده باعث سایش قفسه فلزی می

شود.

■ پیشگیری :

■ ۱- از انحراف رینگ ها جلوگیری شود.

■ ۲- قفسه پلاستیکی استفاده شود.

■ در صورتی که یاتاقان لقی طولی نداشته باشد باعث ایجاد بار محوری

اولیه اضافی می شود.

■ ضربات چکش در هنگام نصب بدون بوش واسطه نرم

■ در هنگام نصب نیروی وارده نباید از طریق اجزاء غلتنده منتقل شود.

■ در صورتی که از گرم کردن یاتاقان استفاده شود باید از تماس قفسه با

صفحه گرم جلوگیری کرد.

- صدمات ناشی از روانکاری مناسب
- بیش از ۵۰٪ صدمات به این علت است.
- سایش - خراش - عدم گردش روان - ایجاد خستگی زودرس - پوسته شدن سطح - حفره دار شدن

### ■ منظور از روانکاری نامناسب:

- ۱- نوع روانکار نامناسب (لزجت و مواد افزودنی آن)
- ۲- کم بودن مقدار روانکار
- ۳- وجود آلودگی و ذرات خارجی در روانکار
- ۴- روانکاری بیش از حد
- ۵- تغییر خواص و حالت روانکار در اثر زمان

■ معیار های نظارت بر یاتاقان قبل از خرابی

■ درجه حرارت یاتاقان

■ ارتعاش و صدای یاتاقان

■ دمای کارکرد ماشین

■ سیستم روانکاری

بار وارده به یاتاقان جدول ۳- راهنمای عیوب یاتاقان

| توصیه  | علت  | عیب   |
|--|--|---|
| <p>۱. بازرسی طراحی ماشین و انتخاب یاتاقان</p> <p>۲. نصب صحیح</p> <p>۳. آنالیز طراحی ماشین و یاتاقان کاربردی جابجایی و تعویض یاتاقان مناسب تر</p> | <p>۱. نیروی بیش از حد</p> <p>۲. پیش بار بیش از حد</p> <p>۳. بار بیش از حد توسط انبساط حرارتی</p> <p>۴. وجود زنگ زدگی و کثیفی</p> | <p>پوسته شدن:</p> <p>۱. روی بخش های دوار</p> <p>۲. روی شیارها</p> <p>۳. پوسته شدن محیطی روی شیار</p>    |
| <p>نوع روانکار و روش روانکاری چک گردد.</p> <p>پیش بار ایجاد شده اصلاح گردد.</p>  | <p>۱. بار بیش از حد</p> <p>۲. روانکاری نامناسب</p> <p>روانکار نامناسب</p>  | <p>قفل شدن (جام کردن):</p> <p>۱. تغییر رنگ یا یا نرمی بخش های دوار یا رینگ ها</p> <p>۲. خرابی کامل</p>  |
| <p>نگهداری و نصب صحیح</p> <p>بررسی دقت ساخت شفت یا نشیمنگاه یاتاقان</p>  | <p>۱. پوسته شدن در اثر ضربه یا نصب</p> <p>۲. لقی بیش از حد</p> <p>۳. بار شعاعی در گوشه</p>                                       | <p>ترک دار شدن</p> <p>دو نیمه شدن</p>   |
| <p>۱. کاربرد صحیح</p> <p>۲. روش روانکاری و نوع روانکار</p>   | <p>۱. بار زاویه ای</p> <p>۲. سرعت دورانی بالا</p> <p>۳. روانکار نامناسب</p> <p>۴. وجود کثیفی</p>                                 | <p>خرابی قفسه:</p> <p>۱. خرابی</p> <p>۲. سایش روی یک طرف قفسه</p> <p>۳. سایش قفسه</p> <p>۴. خراشیدن</p> |
|  | <p>۱. نگهداری نامناسب</p>  | <p>زنگ زدگی:</p>  |



|   |  |  |
|---|--|--|
| <p>نگهداری و تعمیر مناسب<br/>اصلاح روش های نگهداری و<br/>تعمیر<br/>نگهداری در مقابل رطوبت،<br/>بررسی ساخت شفت و<br/>نشمنگاه یاتاقان</p> | <p>۲. تمیز نکردن یاتاقان<br/>۳. عدم حفاظت مناسب<br/>۱. بدون محافظ نگه داشتن<br/>۲. مرطوب بودن یاتاقان<br/>۱. لقی به هنگام نصب<br/>۲. مراقبت ضعیف</p> | <p>۱. زنگ زدگی در سراسر یاتاقان<br/>۲. زنگ زدگی موضعی<br/>۳. خوردگی روی سطوح</p>                                     |
| <p>بازرسی روانکار و نحوه ی<br/>روانکاری</p>   | <p>۱. وجود کثیفی در روانکار<br/>۲. زنگ زدگی<br/>۳. روانکاری نامناسب</p>  | <p>سایش :<br/>سایش سریع شیارها یا غلطک ها<br/>سایش قفسه</p>  |
| <p>اتصال به زمین</p>  | <p>جرقه زدن الکتریکی</p>   | <p>سایش الکتریکی</p>   |
| <p>نگهداری و تعمیر مناسب</p>  | <p>۱. آلودگی باقی مانده و فشرده شده بین<br/>سطح ساچمه ها و رینگ ها<br/>۲. جابجایی بدون دقت<br/>۳. نصب بدون دقت</p>                                   | <p>زبری:<br/>۱. زبری<br/>۲. خرابی سطوح حاصل از جرقه<br/>۳. ضربه خوردن در هنگام حمل و نقل<br/>۴. خرابی در اثر نصب</p> |

# استانداردها

## استاندارد AFBMA:

استاندارد AFBMA یکی از انواع استاندارد آمریکا می باشد.  
در اسلاید بعدی نمونه ای از جدول استاندارد AFBMA آورده شده  
است. (استاندارد شرکت SKF بر اساس AFBMA می باشد.)

## استاندارد DIN :

این استاندارد که یکی از معتبرترین و پرکاربردترین انواع استاندارد در جهان می  
باشد در کشور آلمان تعریف شده است ولی در بسیاری از کشورهای جهان به  
عنوان استاندارد اصلی مورد استفاده قرار می گیرد.

سری ۶۰۰ از این استاندارد به طبقه بندی انواع یاتاقانهای غلتشی می پردازد.

# فصل پنجم:

ضمائم (مقالات)

## توسعه اسپیندل های ماشین ابزار برای عملکرد بهتر

### چکیده

نیاز عمده سیستم های اسپیندل در ماشین های ابزار پیشرفته، عملی کردن سرعت های چرخشی بالاتر به منظور افزایش راندمان ابزار می باشد. بعلاوه، برای یک محدوده سرعت داده شده، توانایی بهتر مورد نیاز است بگونه ای که سیستم اسپیندل نسبت به شرایط کاربردی نامناسب، حساس نباشد.

این مقاله نتایج تحقیقات در حوزه های مختلف را ارائه می دهد که برای اصلاح سیستم های یاتاقان اسپیندل بکار گرفته شده اند. در ابتدا، نتایج جدید برای سینماتیک یاتاقان اسپیندل جایگزین با چهار نقطه تماس ارائه می شود. سپس، راه حل جدیدی برای چینش یاتاقان های شناور بحث می شود. یک رلبرینگ استوانه ای تغییر یافته که می تواند در سرعت های بالاتر استفاده شود، ارائه می شود. و در نهایت، قابلیت اجزای یاتاقان پوششی تحت عنوان خواص اصلاح شده ایمن-غیر ایمن در متن بحث می شود. در این مقاله هم مطالعات تحلیلی و هم تست های تجربی ارائه می شوند.

### کلیدواژه ها

ماشین، اسپیندل، یاتاقان

## ۱. مقدمه

بهره وری ماشین های ابزار پیشرفته عمدتاً با سرعت مجاز چرخشی و ظرفیت تحمل بار هر یک از قطعات عمده اسپیندل تعیین می شود.

از یک سو، ماشین کاری آلومینیوم یا منیزیم بوسیله ابزار های برش پیشرفته با تعبیه برون نیتريد مکعبی<sup>۱</sup> (CBN) یا الماس های چند کریستالی<sup>۲</sup> (PCD) این اجازه را به ما می دهد تا سرعت برش را به ۵۰۰۰ متر بر دقیقه تا ۱۰,۰۰۰ متر بر دقیقه افزایش دهیم. برای عملی کردن این سرعت های برشی خیلی بالا، در مورد فرز های انتهایی با قطر های بین ۲۰ تا ۳۰ میلی متر نیاز به سرعت های اسپیندل بیش از ۱۰۰,۰۰۰ دور بر دقیقه داریم. بر طبق حالت واقعی تکنولوژی های رلبرینگ، این امکان فقط بوسیله یاتاقان های اسپیندل با قطر متوسط ۳۰ میلی متر امکان پذیر است. اما بخاطر شرایط های کاربردی خیلی زیاد همه اجزای کاربردی قطعه اسپیندل اصلی - یاتاقان های اسپیندل، روتور موتور و همچنین مجموعه چرخشی - تا حد مجاز فیزیکی شان بارگذاری می شوند.

از سوی دیگر، نیاز است تا اسپیندل های اصلی برای ماشین های ابزار چند منظوره قابل استفاده باشند. و این نیاز های چند منظوره، ویژگی آنها را تعیین می کند. به عنوان مثال خشن کاری فولاد از طریق نیروهای برشی بالا و گشتاور ها و میانگین

---

<sup>۱</sup> cubic boron nitride

<sup>۲</sup> polycrystalline diamond

سرعت های چرخشی تعیین می شود. در این موارد اسپیندل و قطر های یاتاقان بزرگتر برای تحمل این بارگذاری ها ضروری است.

با توجه به نیاز های ذکر شده، روش های اساسی ذیل برای طراحی اسپیندل های اصلی طرح شده است. برای عملی کردن این خواسته ها، با اطمینان از سختی کافی و توانایی بدنه اسپیندل و یاتاقان های اسپیندل، مشخصه ضریب سرعت  $n \times d_m$  باید تا  $3.5-4.0 \times 10^6$  میلی متر بر دقیقه افزایش یابد.

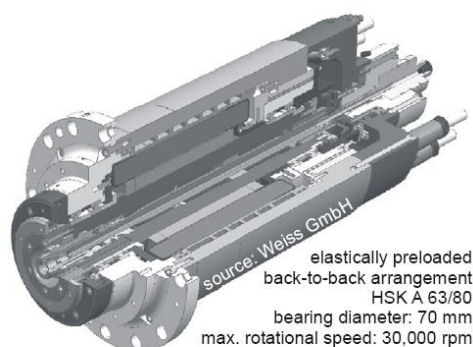


Figure 1: Milling motor spindle with rolling bearings.

شکل ۱ یک نمونه اسپیندل موتور با قدرت خروجی ۸۰ کیلو وات و ماکزیمم سرعت چرخشی ۳۰,۰۰۰ دور بر دقیقه را نشان می دهد. پوسته محرکه با آب خنک می شود. بدنه اسپیندل از یک شافت مخروطی توخالی تشکیل می شود که از نظر دورانی بوسیله یک یاتاقان اسپیندل پشت به پشت از قبل بارگذاری شده الاستیکی حمایت می شود.

به منظور ایجاد یک یاتاقان و اسپیندل پیشرفته، بهتر است طراحی بهینه یاتاقان ثابت (هندسه گوناگون یاتاقان درونی)، یاتاقان متحرک (رولبرینگ های استوانه ای

الاستیک) و همچنین خصوصیات سطح (پوشش سطحی، روانساز) مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد.

## ۲. یاتاقان های اسپیندل چند نقطه ای (۳ نقطه ای، ۴ نقطه ای)

### ۱-۲ انگیزه ای برای بهینه سازی هندسه یاتاقان

یاتاقان های اسپیندل برای استفاده در اسپیندل های اصلی ماشین های ابزار پیشرفته باید بالاترین خواسته ها را با صلیت و دقت انجام دهند. در گذشته، اصلاحات مختلفی به منظور بهینه سازی عملکرد یاتاقان انجام شده است. در این میان می توان ابزار های روانسازی خاص از میان حلقه های بیرونی، ساچمه های سرامیکی یا ساچمه های کوچکتر و همچنین قفسه های بهینه شده را برشمرد.

معهدا، بالاترین سرعت ها شدیداً عمر یاتاقان های اسپیندل را کاهش می دهند. اثرات عمده زیربنایی در طی روند کار بوسیله نویسندگان متفاوت مورد بررسی قرار گرفته و به عنوان مثال در کتب [۱]، [۲]، [۳]، [۴] خلاصه شده اند. مخصوصاً، انحراف ناشی از سرعت زاویه های تماس روی حلقه داخلی و خارجی، باعث کاهش سختی محوری و شعاعی می شوند. بعلاوه، مناطق تماس حلقه خارجی شدیداً بوسیله نیروهای گریز از مرکز که روی ساچمه ها عمل می کنند، بار گذاری می شود.

وک و همکارانش<sup>۳</sup> در کتاب [۱] آورده اند که یاتاقان های اسپیندل با اشکال هندسی مختلف داخلی، به منظور کاهش اثرات منفی نیرو های گریز از مرکز روی ساچمه ها عمل می کنند. بعلاوه، توانایی یاتاقانها بهتر است افزایش یابد. وک و همکارانش نقاط تماس اضافی را روی مسیر گردش ساچمه های حلقه داخلی و خارجی یاتاقانهای اسپیندل معمولی بوجود آوردند. به همین دلیل، از حرکات محوری و شعاعی ساچمه ها جلوگیری می شود و مطمئنا در یک دامنه سرعت گسترده، زاویه های تماسی ثابت و نابجایی محوری حلقه داخلی کاهش خواهد یافت. مفاهیم یاتاقان در کتاب [۱] آنگونه که در شکل (a)، (b)، ۲ آمده است معرفی شده است. شکل (c) ۲ مفهوم سوم جدیدی را در این مقاله نشان می دهد.

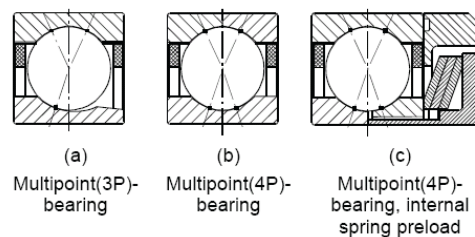


Figure 2: Different alternatives of multipoint(3P,4P)-spindle bearings.

## ۲-۲ بررسی تحلیلی یاتاقان های چند نقطه ای (۴ نقطه ای)

محتوای کتاب [۱] هم از نظر تئوری و هم از نظر تجربی روی رفتار های کارکردی یاتاقان های چند نقطه ای (۳ نقطه ای) تمرکز می کند. یاتاقان های آزمایشی در آزمایشگاه ماشین های ابزار و مهندسی تولید (WZL) بر اساس یاتاقان های اسپیندل معمولی ساخته می شوند. همچنین بعضی از خصوصیات یاتاقان های

<sup>3</sup> Weck et al



چند نقطه ای (۴ نقطه ای) از طریق محاسبات عددی مورد تجزیه تحلیل قرار می گیرند.

در نتیجه، نتایج بیشتری در ارتباط با سینماتیک یاتاقان های جدید با چهار نقطه تماس به ازای هر ساچمه با در نظر گرفتن اثرات گرمایی، ارائه خواهد شد. همه محاسبات برای یاتاقان های اندازه ۷۰۱۴ با ساچمه های سرامیکی با قطر ۱۲/۷ میلی متر انجام می شود. زاویه های تماس ۱۵ درجه است. اختصارات استفاده شده در نمودار ذیل در جدول ۱ آمده است.

|                              |                             |
|------------------------------|-----------------------------|
| حلقه داخلی، نقطه تماس ۱ یا ۲ | حلقه داخلی <sup>۴</sup> ۱/۳ |
| حلقه خارجی، نقطه تماس ۳ یا ۴ | حلقه خارجی <sup>۵</sup> ۳/۴ |
| دمای اضافی                   | ET                          |

جدول ۱ - اختصارات استفاده شده در شکل های ۳، ۴، ۵

در کتاب [۱] از طریق محاسبات نشان داده می شود که نابیجایی محوری حلقه داخلی می تواند تا دو میکرون کاهش می یابد و مانع از تغییر زاویه های تماس ناشی از سرعت شود. گرچه یاتاقان های چند نقطه ای (۴ نقطه ای) با لقی شعاعی صفر نصب می شوند. بنابراین آنها بیش از اندازه به اثرات گرمایی حساس هستند. مخصوصاً دمای اضافی ناشی از حلقه داخلی ممکن است سختی یاتاقان را به همراه داشته باشد. این اثر در رلبرینگ های استوانه ای با سرعت چرخشی بالا نیز اتفاق می افتد.

<sup>4</sup> in.ring

<sup>5</sup> out.ring

شکل ۳ تنش هرتز در تماس ۱ حلقه داخلی، و تماس ۴ حلقه خارجی یاتاقان چند نقطه ای (۴ نقطه ای) را نشان می دهد. این تماس ها مستقیماً بار محوری را انتقال می دهند (خط صورتی) و تا بالاترین میزان تحت تنش قرار می گیرند. یاتاقان لقی شعاعی ۲۲ میکرونی را نشان می دهد. برای جلوگیری از بالا آمدن حلقه داخلی، اندازه بین حلقه داخلی و اسپیندل تا ۳۵ میکرون تعیین می شود. بنابراین یاتاقان اندکی از قبل بارگذاری می شود. منحنی های ۱ و ۲ محاسبه یاتاقان را بدون در نظر گرفتن اثرات گرمایی نشان می دهد. هر چه انحنای وسیعتر باشد میزان تنش روی مسیر گردش ساچمه ها روی رینگ داخلی هم بیشتر می شود. افزایش نیروهای گریز از مرکز حلقه داخلی و نیروهای گریز از مرکزی که روی ساچمه ها عمل می کنند باعث افزایش تنش هرتز می شوند. گرچه، تنش ها از مقادیر بحرانی جنس یاتاقان معمولی  $100Cr6$  ( $2,000 N/mm^2$ ) تجاوز نمی کنند.

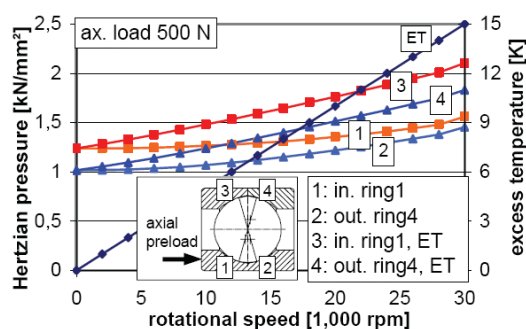


Figure 3: Hertzian pressures in a multipoint(4P)-bearing dependent on speed and excess temperature.

شکل ۳: تنش های هرتزی در یاتاقان های چند نقطه ای ناشی از سرعت و افزایش دما

<sup>6</sup> Excess temperature

در مقایسه منحنی‌های ۳ و ۴ نشان‌دهنده تأثیر افزایش درجه حرارت (افزایش خطی) حلقه داخلی در ترکیب با اثرات گریز از مرکز می‌باشد.

این منحنی‌ها از مجموع گرادیان  $1 K^\circ$  به ازای هر  $2000$  دور در دقیقه محاسبه شده‌اند. افزایش چشمگیر تنش‌های داخلی می‌تواند قابل مشاهده باشد. در ماکزیمم سرعت‌های چرخشی  $3000$  دور دقیقه تنش‌های هرتزی بر روی حلقه داخلی بالاتر از حد  $2000$  (نیوتن بر میلیمتر مربع) افزایش می‌یابد. علاوه بر این نتایج نظری نکته دیگر شامل افزایش تنش‌های داخلی از یک طرف و افزایش دما از طرف دیگر می‌باشد که ترکیب این دو اثر باعث اثرات خود انرژی‌زایی می‌شود. بنابراین آنچه که از بررسی و جمع‌بندی نتایج یاتاقان‌های چندنقطه‌ای (چهارنقطه‌ای) می‌توان انتظار داشت افزایش درجه حرارت حلقه داخلی در سرعت‌های چرخشی بالا می‌باشد. این فرضیه در آزمایشات تجربی در بخش  $2/3$  مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

شکل ۲ (c) مفهوم سوم هندسه جدید یاتاقان می‌باشد که به منظور جلوگیری از بارگذاری داخلی بیش از حد یاتاقان‌های چندنقطه‌ای (۴ نقطه‌ای) گسترش یافته است.

این مفهوم به وسیله تجزیه حلقه داخلی مشخص می‌شود. نیمی از این حلقه که بر روی سمت اسپیندل ابزار منطبق می‌گردد با بدنه اسپیندل ثابت می‌گردد که در نتیجه می‌تواند نیروهای نشای از فرآیند ماشین‌کای را تحمل کند. نیمه دوم که به طور محوری قابل حرکت می‌باشد توسط یک فنر دیسکی در مقابل ساچمه‌ها فشرده می‌شود. که موجب پیش بارگذاری داخلی یاتاقان می‌گردد.

نمودار شکل ۴ نشان‌دهنده افزایش خطی دمای رینگ‌های داخلی تا ۱۵ کلوین (رجوع شود به شکل ۳) که متأثر از سرعت در هندسه گسترش یافته در یاتاقان چندنقطه‌ای (۴ نقطه‌ای) می‌باشد. مقدار پیش بارگذاری فنر داخلی ۳۷۰ نیوتن می‌باشد.

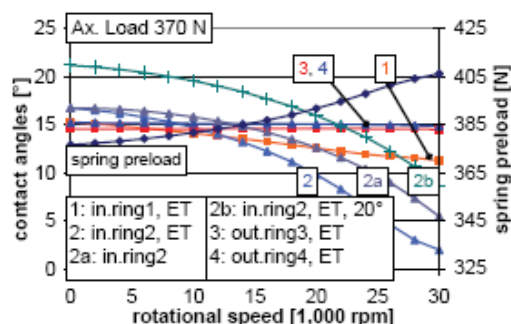


Figure 4: Contact angles in a multipoint(4P)-bearing with internal spring preload of 370 N.

شکل ۴ زوایای تماس در یاتاقان چندنقطه‌ای (۴ نقطه‌ای) با پیش بارگذاری فنر داخلی به اندازه

**370N**

بارگذاری محوری خارجی تا 370N کاهش می‌یابد که این جهت اطمینان حاصل کردن از بارگذاری اولیه مشابه نقاط تماس در شکل ۳ می‌باشد. همان طور که در کتاب [۱] شرح داده شده زوایای تماس خارجی (منحنی ۴ و ۳) در تمام دامنه سرعت ثابت باقی می‌مانند. به دلیل تأثیرات گریز از مرکزی و گرمایی، نیمه اول حلقه باز (منبسط) می‌شود (تماس ۱). بنابراین یک کاهش جزئی در زاویه تماس مطابق (منحنی ۱) داریم و متعاقباً محور جابه‌جا می‌گردد. نیمه دوم متحرک داخلی به دلیل شدت گریز از مرکزی باز (منبسط) می‌گردد و دیگر بر روی اسپیندل با فشار قرار نمی‌گیرد و کاهش شدید زاویه تماس را داریم (منحنی ۲) منحنی 2a نشان‌دهنده کاهش زاویه تماس بدون در نظر گرفتن اثرات دمایی می‌باشد.

علاوه بر زوایای تماس منحنی پیش بارگذاری فنر نشان داده شده است. به دلیل جابه‌جایی بدنه اسپیندل و نیمه متحرک حلقه، بار تا  $406N$  افزایش می‌یابد.

دیاگرام موجود در شکل ۵ نشان‌دهنده تنش‌های هرتزی در یاتاقان‌های چندنقطه‌ای (۴ نقطه‌ای) پیش بارگذاری شده است. دوباره منحنی‌های ۱ تا ۴ نشان‌دهنده بارگذاری تماس‌های ۱ (رینگ‌های داخلی) و ۴ (رینگ خارجی) همراه با افزایش درجه حرارت رینگ داخلی است. کاملاً آشکار است که میزان تنش به وضوح پایین‌تر از یاتاقان چندنقطه‌ای (۴ نقطه‌ای) نوع صلب (سخت) است.

$$\text{حداکثر مقدار تنش} \left( \frac{N}{mm^2} \right) 1600 \text{ است.}$$

به منظور درک اثر کاهش زاویه تماس بر روی نیمه متحرک حلقه داخلی تنش هرتزی در تماس ۲ (حلقه داخلی متحرک) نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. منحنی ۵ نشان‌دهنده حداکثر مقدار در حدود  $2000 \left( \frac{N}{mm^2} \right)$  است این تنش هرتزی می‌تواند با مهیا کردن یک زاویه تماس بزرگ‌تر کاهش یابد. این اثر توسط منحنی ۶ در دیاگرام‌های شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است.

با افزایش زاویه تماس تا ۲۰ درجه امکان کاهش تنش تا  $1200 \left( \frac{N}{mm^2} \right)$  فراهم می‌شود.

آنالیزهای تئوری یاتاقان چندنقطه‌ای (۴ نقطه‌ای) همراه با پیش‌بارگذاری فنر داخلی نشان می‌دهد که قرار دادن الاستیکی دو نیمه رینگ داخلی می‌تواند از فشرده شدن یاتاقان جلوگیری کند. اثرات منفی ناشی از افزایش دماهای رینگ داخلی می‌تواند کاهش یابد. به دنبال آن نتایج

آزمایشگاهی گردآوری شده رفتار یاتاقان‌های چند نقطه‌ای (۴ نقطه‌ای) را تحت تأثیر افزایش

دما نشان می‌دهند.

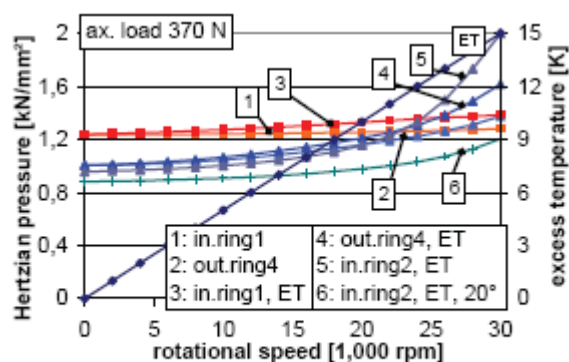


Figure 5: Hertzian pressure in a multipoint(4P)-bearing with internal spring preload of 370 N

شکل ۵- تنش هرترزی در یاتاقان چند نقطه‌ای (۴ نقطه‌ای) با پیش‌بارگذاری فنر داخلی به اندازه 370N

### ۲.۳- بررسی آزمایشگاهی یاتاقان‌های چندنقطه‌ای (۴ نقطه‌ای)

جایگاه مورد استفاده برای بررسی‌های آزمایشگاهی در شکل ۶ نشان داده شده است.

یک محرک (گیربکس) مستقیم می‌تواند ماکزیمم سرعت‌های چرخشی تا  $90000 \text{ (rpm)}$  دور در دقیقه را ایجاد کند. مقادیر گشتاور نامی تا  $4/2$  (نیوتن-متر) برای سرعت نامی  $23000 \text{ rpm}$  اسپیندل آزمایش و محرک توسط کلاچ چنگکی متصل هستند. یاتاقان‌های آزمایش می‌توانند توسط یک پیستون هیدرولیکی بارگذاری محوری شوند. خنک‌کاری حلقه خارجی توسط گردش آب در فلانچ انجام می‌شود. بنابراین گرمای به وجود آمده در حلقه خارجی توسط افزایش تماس غلشی می‌تواند کاهش یابد. درجه حرارت داخل یاتاقان توسط

یک حسگر غیرتماسی که در نزدیکی رینگ داخلی چرخشی نصب می‌شود اندازه‌گیری می‌شود.

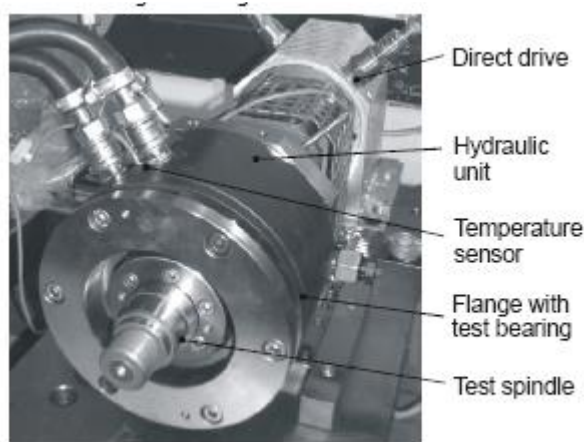


Figure 6: Test stand.

شکل ۶

دیاگرام شکل ۷ نشان‌دهنده نتایج آزمایشگاهی برای هر دو نوع یاتاقان چندنقطه‌ای (۴ نقطه‌ای) صلب و الاستیک می‌باشد. در ابتدا یاتاقان صلب (مفهوم (b) و شکل ۲) آزمایش شدند. آزمایش‌ها همراه با و بدون خنک‌کاری حلقه خارجی انجام شدند. دماهای اندازه‌گیری شده نشان‌دهنده وابستگی به دمای محیط است. مقادیر گشتاور از موتور موجود در حین آزمایش استخراج شده‌اند. اختصارات استفاده شده در شکل ۷ در جدول ۲ شرح داده شده است.

جدول ۲- اختصارات به کار رفته در شکل ۷

|  |                     |
|--|---------------------|
| افزایش درجه حرارت حلقه داخلی / خارجی گشتاور، مفهوم (b) عدم خنک‌کاری                      | <i>it1, ot1, t1</i> |
| افزایش درجه حرارت حلقه داخلی / خارجی گشتاور، مفهوم (b) عدم خنک‌کاری $40^{\circ}\text{C}$ | <i>It2, ot2, t2</i> |
| افزایش درجه حرارت حلقه داخلی / خارجی گشتاور، مفهوم (c) عدم خنک‌کاری $40^{\circ}\text{C}$ | <i>It3, ot3, t3</i> |

منحنی‌های  $[it1]$  و  $[it2]$  نشان‌دهنده دماهای حلقه داخلی و خارجی در اولین آزمایش یاتاقان، مفهوم (b) مقایسه بار محوری تا  $1000N$  یاتاقان به وسیله گریس *Kluber spood BF 72-22* روان‌کاری شده است.

تا  $19000\text{ rpm}$  در هر دقیقه سرعت چرخشی در هر ۲ ساعت به اندازه  $2000\text{ rpm}$  افزایش می‌یابد سپس در هر ۲ ساعت به اندازه  $1000\text{ rpm}$  افزایش می‌یابد. چنانچه درجه حرارت به درجه حرارت  $55^{\circ}k$  رسید (درجه حرارت خاموش کردن) آزمایش متوقف می‌گردد.

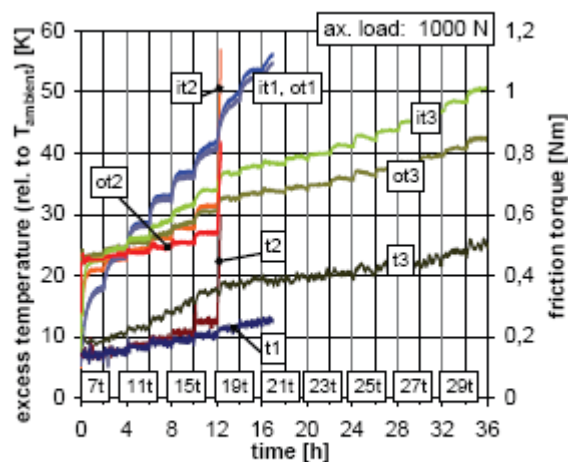


Figure 7: Operational behaviour of multipoint(4P)-bearings.

شکل ۷- رفتار عملکرد یاتاقان‌های چندنقطه‌ای

با جایگزینی اولین یاتاقان حداکثر سرعت چرخشی  $21000\text{ rpm}$  به دست می‌آید. درجه حرارت‌های داخلی و خارجی یاتاقان به مقادیر یکسان رسیده تا درجه حرارت خاموشی  $55^{\circ}k$  افزایش می‌یابد. (منحنی  $[it1]$  و  $[ot1]$ ) مقدار گشتاور تا  $0.25N.m$  می‌رسد.



در مرحله بعدی یاتاقان مشابه با خنک‌کاری رینگ خارجی مورد آزمایش قرار گرفت. در واحد خنک‌کاری درجه حرارت کاری  $40^{\circ}C$  تنظیم شده بود. در مقایسه با اولین آزمایش تا  $17000\ rpm$  دماهای یاتاقان به وضوح کاهش یافت (منحنی‌های  $[it2]$  و  $[ot2]$ ) دمای رینگ خارجی تا  $4k$  پایین‌تر از رینگ داخلی رسید. این در اثر بهینه‌سازی اتلاف حرارتی از طریق چرخش آب در فلانچ انجام می‌شود. چگونگی عملکرد یاتاقان شکل ۳ محاسبه شده است. پس از افزایش میزان سرعت تا  $19000$  دور در دقیقه شاهد افزایش ناگهانی درجه حرارت و گشتاور اصطکاکی می‌باشیم. آزمایش بلافاصله متوقف می‌شود. مشاهده این اثر این فرضیه را تأیید می‌کند که مفهوم  $(b)$  یاتاقان در افزایش شدید دماهای رینگ داخلی به گسیختگی خواهد انجامید. در نهایت سومین مفهوم  $(c)$  یاتاقان همراه با پیش بارگذاری الاستیکی، نیمه‌متحرک حلقه داخلی مورد آزمایش قرار گرفت بار محوری تا  $800\ N$  به منظور مطابقت مطابقت با بارگذاری تماس‌های غلتکی در اولین آزمایش‌ها انجام‌ها افزایش یافت. دوباره رینگ خارجی به وسیله گردش آب خنک‌کاری شد. دماهای اندازه‌گیری شده در مفهوم  $(C)$  مابین نتایج به دست آمده در دو آزمایش فوق‌الذکر هستند. آنها کمتر از دماهای اندازه‌گیری شده در تست ۱ (به دلیل خنک‌کاری) و بیشتر از نتایج تست (۲) (به علت پیش بارگذاری مضاعف فتر داخلی در حدود  $380\ N$  هستند).

دوباره یک افزایش دما در رینگ داخلی می‌توان قابل مشاهده باشد با این حال یاتاقان در سرعت‌های چرخشی نهایی سیکل آزمایش ( $30000\ rpm$ ) دور در دقیقه به ماکزیمم افزایش

دماهای نسبی محیط دماهای ۵۰ درجه کلوین برای رینگ داخلی و ۴۳ درجه کلوین برای رینگ خارجی می‌رسد.

آزمایش ما همراه با مفاهیم یاتاقان  $b$  و  $c$  به منظور تصدیق نتایج محاسباتی انجام شدند علیرغم این که اندازه‌گیری مستقیم سینماتیک داخلی یاتاقان در حین عملکرد امکان‌پذیر نیست نتایج اساسی گردآوری شده رفتار عملکردی یاتاقان چندنقطه‌ای قابل اثبات می‌باشد.

### ۳- یاتاقان غلتک استوانه‌ای به عنوان یک یاتاقان قابل حرکت

واحدهای اسپیندل اصلی برای رسیدن به بالاترین سرعت‌های چرخشی معمولاً بر اساس یک آرایش الاستیکی از یاتاقان‌های ساچمه‌ای مماس زاویه‌ای طراحی شده‌اند. این طرح اسپیندل با استفاده از یک واحد یاتاقان ثابت و متحرک به منظور جبران ازدیاد طول ناشی از دما و حرکت اسپیندل تعریف می‌شود. راه‌حل‌هایی نمونه برای واحد شناوری وجود دارند که بوش لغزنده یا بوش ساچمه‌ای نامیده می‌شوند. در این حالت گرادیان دمایی در اسپیندل رینگ‌های یاتاقان، بوش‌ها یا مجموعه نگهدارنده حرکت محوری بوش‌ها امکان کاهش یا حتی جلوگیری از به وجود آمدن زوال در اسپیندل می‌شود. در این متن یاتاقان‌های غلتک استوانه‌ای می‌تواند یک یاتاقان متحرک ایده‌آل نامیده می‌شود. حرکت محوری نسبی رینگ داخلی و خارجی توسط یک چرخش مارپیچی غلتک‌ها امکان‌پذیر است. با این حال دسترس به سرعت‌های چرخشی به دلیل فشردگی شعاعی ناشی از دما و تأثیر اثرات گریز از مرکز بر روی اجزای یاتاقان محدود می‌باشد.

بنابراین پیشنهاداتی برای یاتاقان‌های غلتک استوانه‌ای سرعت بالا به منظور کاهش گرمای تولید شده داخلی ناشی از افت توان و تنش‌های هرتزی در تماس‌های خطی ارائه می‌گردد. در کتاب [۵] یانگانگ و همکارانش.

غلتک‌هایی با تقعر انتهایی عمیق به منظور کاهش تنش‌های لبه تیز برای یاتاقان‌های غلتک استوانه‌ای ارائه شده است. در فعالیت تحقیقاتی موجود در  $wzI$ ، بارهای داخلی یاتاقان‌های غلتک استوانه‌ای همانند روش پیشنهادی در یاتاقان چند نقطه‌ای کاهش می‌یابد علاوه بر این اصطکاک داخلی کاهش می‌یابد.

شکل ۸ سه یاتاقان اصلاح شده مختلف را نشان می‌دهد که با هدف کاهش اصطکاک داخلی (باریک شدن مسیر گردش و غلتک‌های سرامیکی) و کاهش سرعت و تبادل حرارت تنش‌های هرتزی در تماس‌های خطی (رینگ‌های یاتاقان الاستیک)

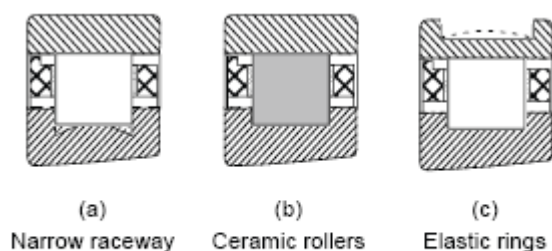


Figure 8: Different alternatives of modified cylindrical roller bearings.

شکل ۸ گزینه‌های مختلف در یاتاقان‌های غلتک استوانه‌ای اصلاح شده

در قسمت بعدی آزمایش نتایجی برای اولین مفهوم (a) و سومین مفهوم یاتاقان (c) ارائه شده است. یاتاقان‌های غلتک استوانه‌ای با استفاده از غلتک‌های پوشش فولادی مجهز شده‌اند. اصلاحات عبارتند از شیارهای ایجاد شده در رینگ خارجی یا رینگ داخلی یا باریک کردن

مسیر گردش رینگ داخلی به طور هماهنگ با این اصلاحات میزان سفتی یاتاقان‌ها و حرارت تولید شده کاهش یافته است. طرح شیار هماهنگ با مفاهیم محاسباتی  $F-E$  در کتاب [5] به منظور یکسان‌سازی رینگ‌ها در حالت افزایش بارهای داخلی گسترش یافته است.

تمامی یاتاقان‌های آزمایش شده با لقی شعاعی اولیه ۲ میکرون نصب شده‌اند و روان‌کاری هوا-روغن در، روغن با لزجت  $32 \frac{mm^2}{s}$  هوا با فشار ۱/۷ بار انجام می‌شود در طول آزمایش‌ها سرعت چرخشی به صورت پله‌ای افزایش می‌یابد. منحنی ۱ در شکل ۹ نشان دهنده رفتار عملکرد یک یاتاقان مرجع است. دماهای اندازه‌گیری شده در رینگ خارجی پس از عبور از سرعت‌های چرخشی ۱۲۰۰۰ دور در دقیقه به وضوح افزایش می‌یابد. سرعت نهایی چرخش ۱۵۰۰۰ دور در دقیقه با دمای مطلق ۷۰ درجه سانتیگراد برای رینگ خارجی است. در نتیجه منطقی بالاترین سرعت‌های چرخشی با یاتاقان همراه با مسیر گردش رینگ داخلی باریک شده افزایش می‌یابد. بیشترین مقادیر سرعت تا ۲۳۰۰۰ دور در دقیقه یاتاقان‌ها با رینگ‌های الاستیکی یک افزایش دمای آشکار پس از عبور از  $16000 \text{ rpm}$  دور در دقیقه (منحنی ۴) و  $18000 \text{ rpm}$  می‌رسند. طبق نتایج مشاهده شده از آزمایش تمام انواع یاتاقان‌های اصلاح شده مجاز به افزایش سرعت‌های بالاتر می‌باشند. این تأثیرات مثبت گسترش بهینه‌سازی قابل قبول می‌باشد.

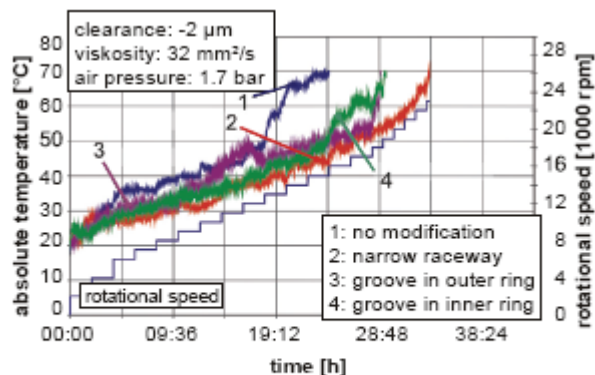


Figure 9: Test results for modified cylindrical roller bearings (type N1014K).

شکل ۹- نتایج آزمایش برای یاتاقان غلتکی استوانه‌ای اصلاح شده (نوع N1014K)

#### ۴- بهینه‌سازی خواص شکست

ایمنی در یاتاقان‌های اسپیندل با استفاده از پوشش‌های  $A-C:H:W$

از سوی دیگر طراحی یاتاقان پیشرفت کرده است. به علاوه فعالیتهای تحقیقاتی انجام شده متمرکز بر بهینه‌سازی خواص زوال- ایمنی یاتاقان‌های اسپیندل متداول می‌باشد. بریدن اسپیندل اغلب به دلیل روانکاری نامطلوب است. مخصوصاً در روانکاری با گریس کاربرد یک روانکار نامناسب ممکن است منجر به شکست قفسه یا پدیده داغی در یاتاقان شود.

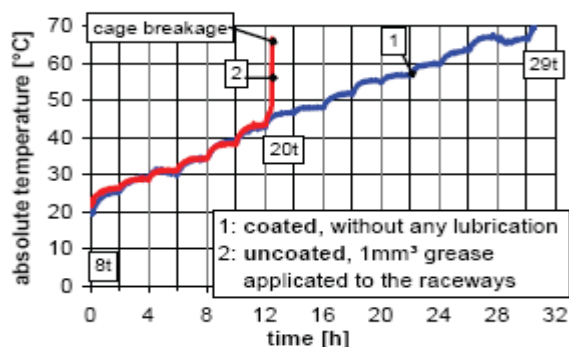


Figure 10: Hybrid spindle bearing, uncoated / a-C:H:W, without lubrication.

شکل ۱۰- یاتاقان اسپیندل هیبرید، بدون پوششش بدون روانکار

بنابراین کاربرد پوشش‌های  $A-C:H:W$  برای بهبود مقاومت به شکست با استفاده از تست‌های کاربردی بر روی یاتاقان اسپیندل بدون استفاده از روان کار بررسی شد.

یک پوشش  $A-C:H:W$  که از نظر شکلی معمولاً به عنوان  $DLC$  شناخته می‌شود نماد جدید مطابق با دستورالعمل ( $VDI 2840$ ) بر روی مسیر گردش رینگ‌های یاتاقان داده شد. که مشخصه آن افزایش کربن در سمت سطح پوشش داده شده است بنابراین انتقال کربن به قسمت تماسی با اندازه زمان تماس جفتی و در نتیجه کاهش ضریب اصطکاک اولیه را خواهد داشت. بنابراین پوشش مسیر گردش یاتاقان به منظور کاهش سایش سطوح می‌باشد یا حداقل باعث تأخیر در زوال یاتاقان می‌گردد.

شکل ۱۰ نشان دهنده آزمایش یاتاقان اسپیندل پوشش داده شده  $A-C:H:W$  (نوع  $HC7014E, Ceramic balls$ ) در مقایسه با یاتاقان بدون پوشش است. هر دو به اندازه  $N$  ۸۰۰ بارگذاری شده است. شرایط بحرانی یاتاقان مرجع بدون پوشش به وسیله حداقل کیفیت گریس مورد استفاده ایجاد می‌گردد. ( $1\text{ mm}^3$  وزن کمتر از  $0.001\text{ gr}$  - معمولاً  $5\text{ gr}$ )

آزمایشات با افزایش سرعت‌ها از  $8000\text{ rpm}$  دور در دقیقه انجام شدند.

یاتاقان اسپیندل پوشش یافته رفتار عملکردی خوب را در همه دامنه سرعت‌ها تا  $rpm$  ۲۹۰۰۰ نشان می‌دهد درجه حرارت حلقه خارجی تا  $70$  درجه سانتی‌گراد تقریباً افزایش می‌یابد در مقایسه یاتاقان مرجع بدون پوشش بعد از  $12$  ساعت از آزمایش طی شتاب  $rpm$  ۲۰۰۰۰ به علت شکست قفسه به زوال می‌رود. به طور مشابه روانکاری نامناسب سطح تماس

جفتی قفسه با رینگ خارجی موجب تجمع گرما تولید شده می‌شود. سرانجام قفسه به انبساط بیشتر از مقادیر بحرانی می‌رسد و چرخش قفسه متوقف می‌شود بنابراین تأثیر نیروهای ساچمه بر روی حلقه‌های قفسه موجب گسیخته شدن آن شود.

این نتایج باید در آزمایش سری دوم تأیید شوند. دوباره یاتاقان بدون پوشش تحت گسیختگی قفسه و دماهای بالا دچار زوال شد.

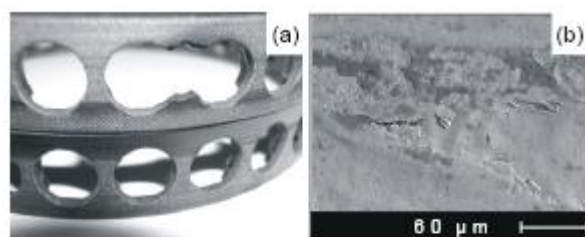


Figure 11: Cage breakage and raceway surface of an uncoated spindle bearing tested without lubrication.

شکل ۱۱- گسیختن قفسه و سطح مسیر گردش یک یاتاقان اسپیندل بدون پوشش آزمایش شده بدون روانکاری به طور پیوسته یاتاقان‌های مشابه برای مدت زمان طولانی‌تر آزمایش (۲۵۰ ساعت) با سرعت‌های ثابت ۲۳۰۰۰ دور در دقیقه تحت بار مشابه و شرایط روانکاری مشابه مورد آزمایش قرار گرفتند. یاتاقان پوشش داده شده در کل زمان آزمایش مقاومت کرده یاتاقان بدون پوشش حتی در حالت استفاده از قفسه جدید کارآمد نبود. میکروگراف در شکل (b) ۱۱ نشان دهنده سطح مسیر گردش بدون پوشش پس از ۲۳ ساعت عملکرد می‌باشد. سطح به اندازه

زیادی سایش و یاتاقان غیرقابل کارایی است. مسیر گردش یاتاقان با استفاده از  $a:C:H:W$  پوشش داده شده است حتی بعد از ۲۵۰ ساعت از آزمایش نشان داده شده که هیچ سایش اضافی در واحد مجزا شده در سطح پوشش که حدود ۱۰-۳۰ میکرومتر می باشد وجود ندارد. درجه حرارت حلقه خارجی در کل آزمایش بیش از ۵۰ درجه سانتیگراد افزایش نیافت.

## ۵- خلاصه

مطابق با حالت تکنیک طراحی اسپیندل یاتاقان‌های ساچمه‌ای تماس زاویه‌ای همانند یاتاقان‌های غلتکی استوانه‌ای در کاربردهای سرعت بالا اسپیندل مورد استفاده قرار می‌گیرند اگرچه سرعت‌های چرخش هر دو نوع یاتاقان محدود هستند مخصوصاً به وسیله اثرات فیزیکی مانند دما و نیروهای گریز از مرکز.

در این مقاله پیشنهاداتی وجود دارند که به منظور رسیدن به اهداف: افزایش توانایی و رسیدن به سرعت‌های کارایی یاتاقان ارائه شده‌اند.

یاتاقان‌های چندنقطه‌ای (۳ نقطه‌ای و ۴ نقطه‌ای) توسط وک و همکارانش در کتاب [۱] در ابتدا مقاله حاضر معرفی شدند. در مقاله حاضر مفاهیم ارتقا یافته به منظور جبران اثرات گرمایی با استفاده از کاربرد رینگ‌های پیش‌بارگذاری شده الاستیکی ارائه شده‌اند. بنابراین می‌توان از افزایش تنش‌های هرتزی در تماس‌های غلتکی جلوگیری نمود.

آزمایشات بر روی (پیش‌نمونه‌ها) مفاهیم یاتاقان‌ها، مؤثر بودن پیشنهادات جدید ارائه شده را تأیید می‌کند. در فعالیت‌های تحقیقاتی آینده سفتی شعاعی رفتار عملکردی در مدت زمان بلند بر روی این یاتاقان‌ها مورد بررسی قرار خواهند گرفت. هم‌چنین بررسی مفهوم روانکاری



(e.g) (روانکاری هوا- روغن از طریق رینگ خارجی در میان تماس‌های غلتکی) مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

یاتاقان‌های چندنقطه‌ای برای یاتاقان‌های ثابت در اسپیندل اصلی طراحی شده‌اند. اگرچه یاتاقان متحرک نیز در صورت حرکت ناصحیح بوش‌هاش یاتاقان امکان زوال را دارد. بنابراین یاتاقان‌های غلتک استوانه‌ای با هدف سرعت‌های چرخشی بالا گسترش یافته‌اند. یاتاقان‌ها در مقایسه با یاتاقان‌های غلتک استوانه‌ای معمول انعطاف بیشتری را نشان می‌دهند این ویژگی با استفاده از ایجاد مسیر گردش باریک یا شیار عمیق در رینگ‌های داخلی و خارجی امکان‌پذیر است. در آزمایشات تجربی این یاتاقان به سرعت‌های چرخشی بالاتری نسبت به انواع معمولی رسیدند نهایتاً پوشش‌ها برای بهبود خواص شکست ایمنی یاتاقان‌های اسپیندل در حالت روانکاری نامناسب معرفی شدند. افزایش قابلیت اعتماد یاتاقان‌های اسپیندل در حالت روانکاری نامناسب یا ضعیف با استفاده از پوشش  $A-C:H:W$  به وضوح نشان داده شد.

«تاثیر درجه ویسکوزیته روغن بر روی ارتعاش مکانیکی یاتاقانهای غلتکی»

خلاصه: هدف از این فعالیت عبارتست از مشخص کردن عملکرد یاتاقانهای غلتکی به عنوان یک تابع ویسکوزیته گریس. آزمایشات تجربی در یاتاقانهای غلتکی

NU205 انجام شد، که با روغن معدنی با ۳ درجه ویسکوزیته مختلف روغنکاری شد (ISO10,32,68).

ارتعاش مکانیکی از طریق پردازش و آنالیز داده های ارتعاش شعاعی یاتاقان تعیین میشود. که این داده ها از هر یک از شرایط گریسکاری در طی ۲ ساعت آزمایش برای درجه حرارت ثابت و تحت چندین سرعت یاتاقان بدست آمده است. میزان بار شعاعی تهیه شده عبارت بود از ۱۰ درصد بارگذاری نامی یاتاقان.

اگرچه ریشه مربع (RMS) آنالیز سیگنال های ارتعاشی، برای شناسایی باندهای فرکانسی خاص ممکن میباشد که بوسیله تغییر در ویسکوزیته گریس تعدیل می شود که وابسته به تغییر در ضخامت لایه روغن میباشد.

کلمات کلیدی: گریسکاری، یاتاقان غلتکی، ارتعاش، ویسکوزیته.

مقدمه:

وابسته به برخی از دیدگاهها، گریسکاری در سیستم های مکانیکی میتواند به روش های مختلفی روی دهد: لایه کامل (full film)، مخلوط شده (mixed) یا گریسکاری محدود (boundary lubrication).

گریسکاری لایه کامل میتواند به الاستیکی-هیدرودینامیکی (EHL) تقسیم میشود، که الاستیکی در تماسهای ناهماهنگ (non-conformal) و تحت فشار بالا روی میدهد و گریسکاری

هیدرودینامیکی (HD)، تحت فشار پایین روی می‌دهد و معمولاً در نقاط تماسی هماهنگ (conformal) میباشد.

در میان گروهی از عملکرد اجزاء مکانیکی تحت شرایط EHL، یاتاقانهای غلتکی وجود دارد. این نوع ماشین دارای حساسیت بیشتری برای گسترش نقص های وابسته به نقص روغنکاری میباشد. مطابق با کاربردهای تکنیکی (technical publication) یاتاقان غلتکی، از کل نقص های یافت شده در این بخش، ۵۰ الی ۸۰ درصد وابسته به نقص گریسکاری میباشد که ناشی از استفاده از گریس ناکافی، فقدان گریس، گریس با تاریخ مصرف گذشته، و وجود مواد جامد و مایع آلوده در آن میباشد.

در حالت درصد بالای نقص های یاتاقان غلتکی، گسترش تکنیک ها برای آشکارسازی نقص ها در یاتاقانهای غلتکی، در طی نقص گریس ایجاد میگردد که دارای یک سهم اساسی برای حفظ دقت ماشین میباشد. در عبارات تنظیم عملکرد یاتاقان غلتکی، ارزیابی های ارتعاش در میان اغلب تکنیک ها مورد استفاده میباشد. امروزه، بیشتر فعالیتها بر روی آشکارسازی نقصهای موضعی در اجزاء یاتاقان غلتکی از طریق آنالیز ارتعاش انجام شده که میتواند در این پروژه یافت شود.

به طور معکوس، رجوع به آشکارسازی گریس که سبب القاء نقص میگردد هنوز کم میباشد. در میان این مسائل، مسئله ای وجود دارد که یاتاقان غلتکی به طور ناکافی گریسکاری شده است، پاسخ ارتعاشی آن مشابه به سیستمی است که به طور تصادفی ارتعاش میکند.

در حالت سیستم های با دمپر پایین (**low damping**)، غالب اجزاء اینچنین پاسخی باید مطابق با فرکانسهای طبیعی یاتاقان غلتکی باشد. از طرف دیگر، مطابق با نظریه آقای **Berry** طیف فرکانس سیگنال های ارتعاشی برای شرایط گریس ناکافی بوسیله ۳ یا ۴ قله در باندهای فرکانسی از ۹۰۰ الی ۱۶۰۰ Hz مشخص میشود که مطابق با باندهای فرکانسی طبیعی یاتاقان غلتکی است، اگرچه اهمیت ارتعاش در این حالت کوچکتر میباشد.

در متن مشابه، مطالعه دیگری شامل انرژی ارتعاش یاتاقان وابسته به بی نظمی های سطحی، بارگذاری های خارجی، سرعت و ویسکوزیته گریس میباشد. برای نمونه در آزمایشات تجربی مشاهده می شود که تاثیر ویسکوزیته گریس بر روی پاسخ لرزه‌ای وابسته به سرعت میباشد:

برای یک یاتاقان تحت بارگذاری بزرگ و سرعت های پایین، افزایش در ویسکوزیته گریس سبب کاهش انرژی ارتعاش میگردد. در مقایسه، در سرعت های بالا، هنگامیکه ویسکوزیته گریس بالاست، انرژی ارتعاش نیز بالاست. بنابراین آقای **Massouros** تعیین کرد که در یاتاقانهای تحت شرایط محدود گریسکاری (**boundary lubrication**)، حرکت چرخشی منجر به تاثیرات میان درشتی و زبری سطوح لغزنده در نقاط تماسی میگردد و سبب تولید ارتعاشها به هر دو صورت نرمال و مماسی میگردد که سبب حرکت مستقیم لغزشی میشود. همه فعالیت های ذکر شده کمپلکسی هستند که وابسته به آنالیز پدیده ارتعاش در تماس های مکانیکی میباشد. فعالیت کنونی با توجه به توزیع دانش اصلاح بر روی روابط بین پدیده ارتعاش و گریسکاری

در یاتاقانها انجام شده است. این فعالیت با مطالعه چگونگی تغییر در ویسکوزیته گریس انجام شد که میتواند ارتعاش مکانیکی یاتاقان غلتکی را بوسیله روش کارهای اساسی آنالیز ارتعاش تحت تاثیر قرار دهد.

## ۲. روش شناسی: (Methodology)

یاتاقانهای غلتکی تحت آزمایش قرار گرفته از نوع NU205 با شکل هندسی در شکل ۱ نمایش داده شده است. روغن معدنی بدمن افروذنی به عنوان گریس مورد استفاده قرار میگیرد.

۳ درجه ویسکوزیته متفاوت آزمایش شدند، ISO 10(V1)، ISO 32(V2)، ISO

68(V3)، که به هدف دستیابی به پاسخ ارتعاشی وابسته به رژیم های گریس (lubrication

regimes) متفاوت در تماسهای یاتاقان انجام شد. ۲ درجه بالاتر ویسکوزیته برای عملکرد

یاتاقان ها در شرایط آزمایش انتخاب شده ذکر شد که مطابق با فهرست تولیدکنندگان بود.

درجه ISO 10 شامل مطالعه نیرو و در شرایط بحرانی گریسکاری در نقاط تماسی میباشد.

شکل ۲، تجهیزات مورد استفاده برای این آزمایشات را نشان میدهد. یاتاقان غلتکی تحت

آزمایش قرار گرفته به طور عمودی بارگذاری میشود و در یک حمام روغن، گریسکاری

میشود. مقادیر مشخص بار شعاعی میتواند از طریق یک سلول بار (load cell) با یک سیستم

پیچشی تهیه شود (به بخش راست شکل ۲ توجه کنید). ترموکوپل نوع K در حمام روغن فرو

میروود و برای تنظیم درجه حرارت روغن در طی آزمایش مورد استفاده قرار میگیرد. سیستم با

کمک پولی ها، نیرو را از یک موتور الکتریکی به محور یاتاقان منتقل می کند.

۲ یاتاقان ساچمه ای برای حمایت از این محور مورد استفاده قرار میگیرند. معکوس کننده فرکانس سبب کنترل محور میگردد. در حقیقت، ماشینها دارای یک ارتعاش اصلی میباشند که اساس عملکرد دینامیکی آنها را مشخص می سازد. مطمئناً اساس این پویایی، ارتعاش هر جزء تنظیم شده را تحت تاثیر قرار میدهد.

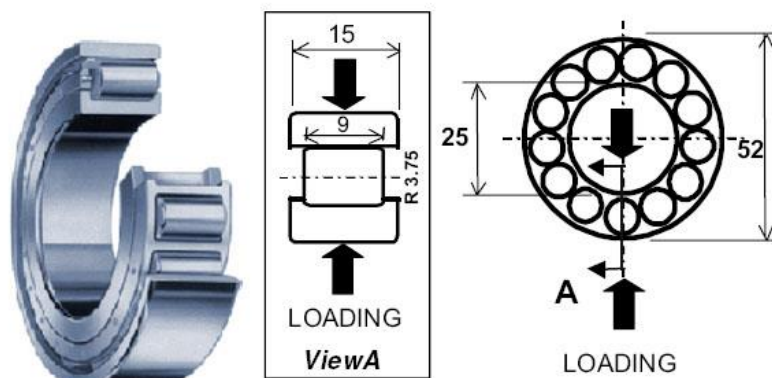


Fig. 1. Geometry of the rolling bearing used in the tests. (a) Three-dimensional overview and (b) details of dimensions.

در حقیقت، در آزمایشات انجام شده، ارتعاش بوسیله شتاب دهنده ارزیابی میشود که بوسیله پاسخ دینامیکی کل تجهیزات شامل همه بخشهای اجزاء (محور، ساختار،...) ارزیابی میشود. سپس نتایج موجود در این مقاله وابسته به تغییرات موجود در ارتعاش تجهیزات با توجه به اساس ارتعاش آن میباشد همانند تابع ویسکوزیته گریس یاتاقان غلتک آزمایش شده.

یک شتابدهنده پیزوالکتریک (piezoelectric)، (PCB 601A31, 0-10Hz, دامنه مفید، 16KHZ فرکانس رزونانسی) متصل شده با بدنه یاتاقان (bearing housing) ارتعاش شعاعی یاتاقان را مورد ارزیابی قرار میدهد. سیگنال ارزیابی شده تقویت می شود و با

عبور پایین باند در فرکانس 10KHz فیلتر میشود. سپس سیگنال از طریق دستیابی به یک زمینه در میزان نمونه 20KHz مورد نیاز می باشد.

در آزمایشات، هر سیگنال مورد نیاز دارای شماری از 100,000 داده میباشد که مطابق با مدت زمان اکتساب 5s است. همه داده های ذخیره شده با توجه به ریشه مربع این مقدار (RMS) آنالیز میشوند. مطابق با تاثیر موجود بر روی ارتعاش، تغییر ویسکوزیته روغن ناشی از افزایش درجه حرارت حمام روغن میباشد، که سیگنال های گریس در هر 15 دقیقه در طی ۲ ساعت آزمایش مورد نیاز میباشد (زمان برای تثبیت درجه حرارت حمام). بار تهیه شده برابر 1770N (مطابق با تقریباً ۱۰ درصد ظرفیت دینامیک یاتاقان) و سرعت محور تا 40Hz بود. این روش کار در آزمایشات همراه با ۳ ویسکوزیته روغن بود. بعد از تثبیت درجه حرارت، سیگنالهای ارتعاش برای ۳ سرعت محور (60Hz, 40, 20) مورد نیاز بود که البته اگر عملکرد گریس همراه با درجات ویسکوزیته مختلف به هنگام تغییر سرعت ثابت باشد. آزمایشات با هر شرایط گریسکاری جهت چک کردن صحت آن به طر تکرارپذیر چندین بار انجام شد.

۳. نتایج و بحث:

۳,۱- درجه حرارت روغن:

شکل ۳، درجه حرارت حمام روغن را به عنوان یک تابع از مدت زمان آزمایش برای ۳ ویسکوزیته تحت آزمایش قرار گرفته نشان میدهد. افزایش تدریجی درجه حرارت میتواند در طی اولین ساعت این آزمایشات مشاهده شود و در ساعت دوم فیکس میشود. این عملکرد برای ۳ درجه ویسکوزیته آزمایش شده مکرر انجام می شود. مطابق با کاربردهای تکنیکی

سازندگان یاتاقان های غلتکی، هر دو مورد افزایش و تثبیت درجه حرارت با هر نوع از یاتاقان غلتکی روی می دهد، و این تثبیت منجر به تساوی بین تولید و پخش گرما در سیستم میگردد. همچنین میتوان مشاهده کرد که برای درجات ویسکوزیته تحت مطالعه، درجه حرارت روغن، با درجه ویسکوزیته مطابق میباشد.

این پدیده وابسته به نیروی اصطکاکی است که ناشی از فعالیت ویسکوز میان لایه ها در لایه گریس میباشد که سطوح تماسی را از یکدیگر مجزا میسازد. نیروی اصطکاک بالا (ویسکوزیته بالا) سبب حدر رفتن انرژی زیادی در نقاط تماس میباشد که منجر به تولید گرمای بالا میگردد.

۳,۲- ارتعاش یاتاقان:

شکل ۴، مقادیر ارتعاش RMS یاتاقان غلتکی را به عنوان یک تابع از زمان آزمایش نشان میدهد. مقایسه این نتایج در این شکل با شکل ۳، به دو موضوع اصلی اشاره میکند که میتواند انجام شود. اول اینکه مشاهده میگردد که هر دو مورد مقادیر درجه حرارت و RMS سبب افزایش و تثبیت در زمان آزمایش میگردد. دوم اینکه، مقدار ارتعاش کوچکتر میشود همزمان که درجه ویسکوزیته روغن بالاتر میشود. که این در مقایسه با تاثیر درجه حرارت بر روی ویسکوزیته روغن سنجیده میشود. توضیح این حقیقت در بخش های بعدی در عبارات شرایط تریبولوژیکی (tribological) تماسها مورد بحث قرار می گیرد. فعالیت های قبلی نشان میدهد که تغییرات در شرایط گریس یک یاتاقان غلتکی اساساً ارتعاش آن را در باند فرکانس بالا (HF)، (600-10000Hz) تحت تاثیر قرار میدهد.



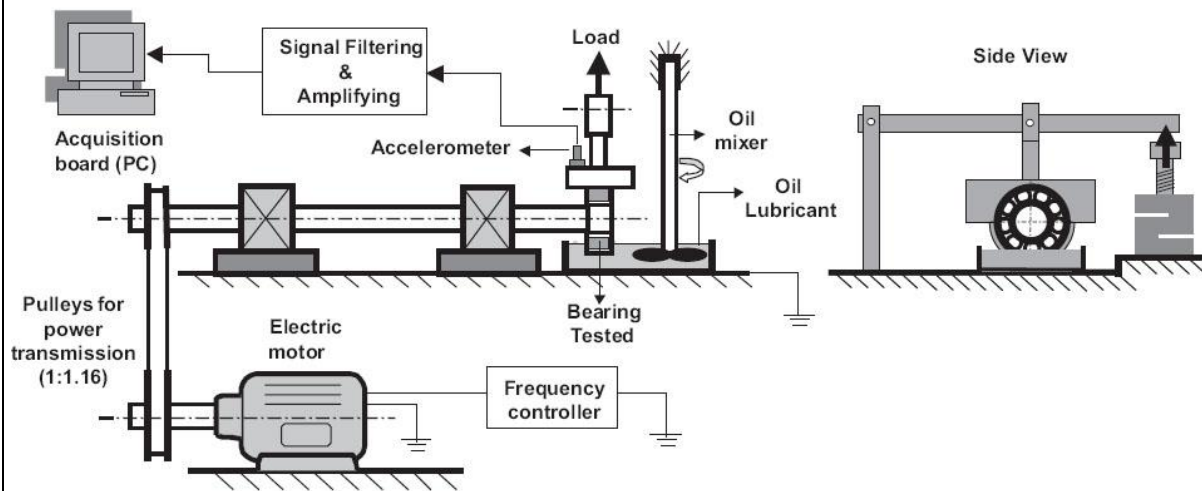


Fig. 2. Test equipment.

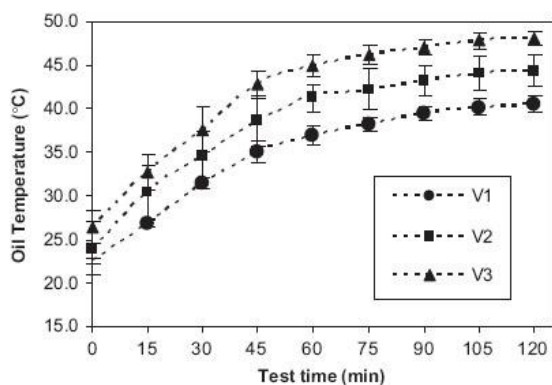


Fig. 3. Oil temperature as a function of test time. V1: ISO 10; V2: ISO 32; V3: ISO 68.

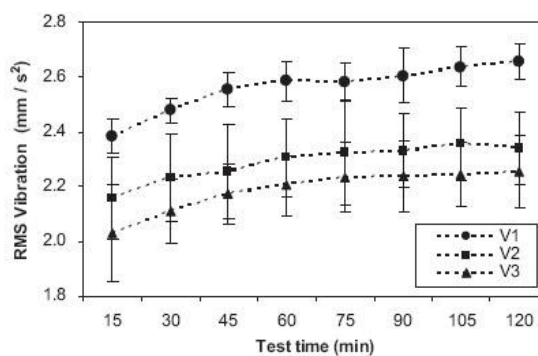


Fig. 4. Overall RMS vibration as a function of test time. V1: ISO 10; V2: ISO 32; V3: ISO 68.

تصاویر حاصل از مقادیر ارتعاشی به عنوان تابعی از زمان آزمایش به طور مجزا برای هر دو مورد باندهای پایین (0-600Hz) و بالا (600-10000Hz) همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است بررسی میشود. این شکل تایید میکند که اختلاف قابل

توجهی در ارتعاش وجود دارد که منجر به تغییر در ویسکوزیته روغن میگردد که وابسته به ارتعاش HF است.

مقادیر RMS حاصل از ارتعاش در باند فرکانسی پایین نشان دهنده حداقل ارتعاش در طول مدت زمان آزمایش میباشد و اختلاف قابل ملاحظه ای در مقدار ارتعاش میان ویسکوزیته های آزمایش شده ندارد. از طرف دیگر، مقادیر RMS، در باند HF عملکرد مشابهی را با RMS کل دارند(شکل ۴).

در این باند، توجه بیشتر به اختلاف موجود در ارتعاش با درجه ویسکوزیته کوچکتر روغن شده است(V1). مطابق با آنالیزهای انجام شده، میتوان تغییرات موجود در ویسکوزیته روغن را محاسبه کرد، که ناشی از استفاده از درجات مختلف ویسکوزیته ISO یا تغییر درجه حرارت میباشد که تنها ارتعاش یاتاقان غلتکی را در باند HF تحت تاثیر قرار میدهد.

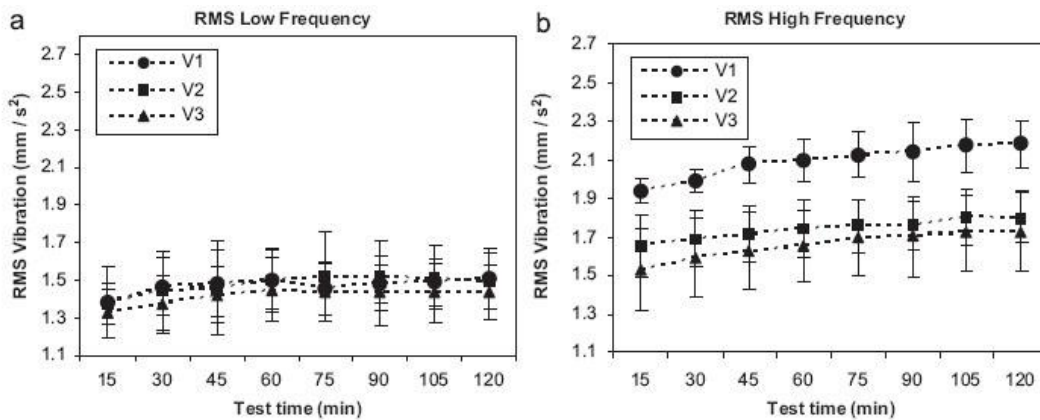


Fig. 5. RMS vibration as a function of test time. (a) Low-frequency band and (b) HF band. V1: ISO 10; V2: ISO 32; V3: ISO 68.

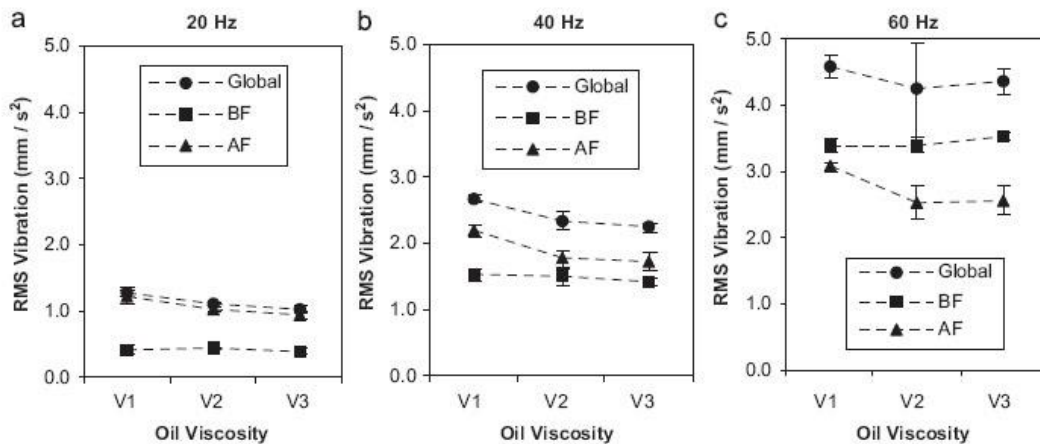


Fig. 6. RMS vibration values for the three tested oil viscosity grades. (a) Shaft speed of 20 Hz, (b) shaft speed of 40 Hz and (c) shaft speed of 60 Hz.

۱،۲،۳- تاثیر سرعت محور:

سیگنالهای ارتعاشی اضافی بوسیله آزمایشات با همه ۳ درجه ویسکوزیته در ۳ سرعت محور (20,40,60Hz) مورد نیاز است. مقادیر RMS ارتعاش کل، شامل باندهای ارتعاشی HF و فرکانس پایین در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که دیده میشود، ارتعاش با سرعت محور افزایش میابد.

از نقطه بررسی عملکرد تریبولوژیکی، افزایش سرعت منجر به یک گسترش در ضخامت لایه روغن میگردد، که دلالت بر مجزا سازی بهتر بین اجزا غلتک و سرعت یاتاقان دارد و سپس

سبب کاهش سطح ارتعاش می‌گردد. اگرچه، همانطور که قبلاً ذکر شد، از نقطه بررسی عملکرد دینامیکی، ارتعاش بوسیله شتاب دهنده بررسی میشود که بر روی محور یاتاقان مورد آزمایش قرار گرفته، جای گرفته است. که ترکیبی از ارتعاش حاصل از ناحیه تماسی یاتاقان آزمایش شده میباشد که اطراف ارتعاش در همه بخش های تجهیزات را شامل میشود. هر یک از این بخش ها، همراه با باندهای فرکانسی، سیگنالهای ارتعاشی تولید میکنند.

تغییر در سرعت محور سبب تغییر در برانگیختگی دینامیکی بخش های سیستم می‌گردد. شناسایی ارتعاش در نقاط تماس یاتاقان نیاز به یک روش شناسایی خاص دارد که در فعالیت تحقیقات کنونی موجود نیست. میتوان اطمینان حاصل کرد که ارتعاش کل تجهیزات، سطح ارتعاشی ارزیابی شده یاتاقان تماسی را تحت تاثیر قرار میدهد. بنابراین، تاثیر بر روی ارتعاش در طی تغییرات در ضخامت لایه روغن باعث تغییراتی در سرعت محور می‌گردد که از طریق شکل ۶ میتوان مشاهده کرد. از طرف دیگر، مشاهده می‌گردد که تغییرات ارتعاشی منجر به تغییرات در شرایط تماسی یاتاقان می‌گردد که ناشی از تغییرات در درجه ویسکوزیته روغن حاصل شده که در ارتعاش باند HF در شکل ۶ آشکارتر است. شکل ۶ نشان میدهد که سطح بالاتر ویسکوزیته سبب القاء ارتعاش پایین تر HF می‌گردد. این الگوی گذشته، علاوه بر روی سرعت در باند طیفی HF روی میدهد. بنابراین، آنالیز مقادیر ارتعاش RMS در باند HF میتواند شامل یک تکنیک صحیح برای آشکارسازی تغییرات در شرایط گریسکاری اجزاء ماشین در حالت یاتاقان های غلتکی گردد.

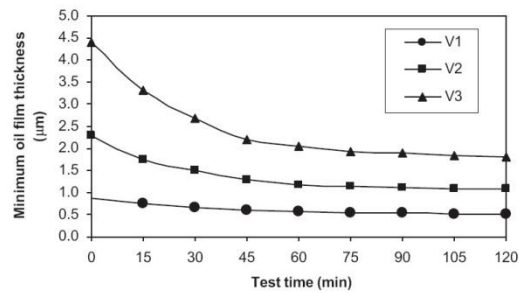


Fig. 7. Minimum theoretical oil film thickness as a function of test time.

Table 1  
Measured roughness in the bearing elements before tests ( $R_q$ : root mean square of asperity heights)

| Bearing element | $R_q$ ( $\mu\text{m}$ ) |
|-----------------|-------------------------|
| Inner race      | 0.145                   |
| Outer race      | 0.150                   |
| Roller          | 0.114                   |

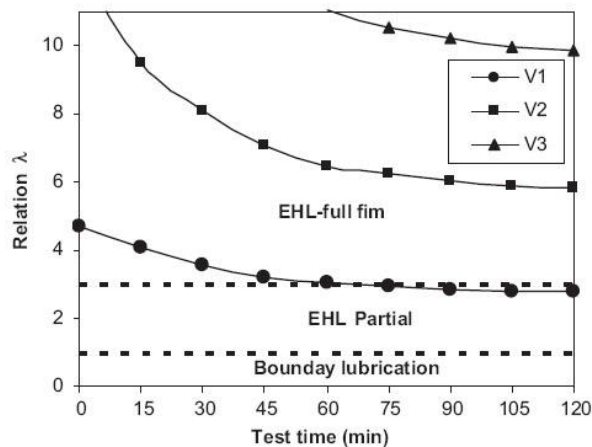


Fig. 8.  $\lambda$  values as a function of test time.

### ۳,۳- آنالیز ضخامت لایه روغن و روش گریسکاری:

یکی از دلایل ممکن برای اختلاف مشاهده شده در ارتعاش همراه با تغییر در ویسکوزیته روغن میتواند مرتبط با عملکرد ضخامت لایه روغن در هر یک از شرایط گریسکاری باشد. در شکل ۷، مقادیر حداقل ضخامت لایه روغن برای همه

ویسکوزیته های آزمایش شده به عموان تابعی از زمان نشان داده میشود. مقادیر مطابق با حداقل ضخامت لایه بین سرعت داخلی و غلتک میباشد که حداکثر تماس تریبولوژیکی بحرانی در یاتاقان غلتکی وجود دارد. تساوی داوسان [۴] برای محاسبه ضخامت لایه مورد استفاده قرار گرفت. در شکل ۷، کاهش تدریجی در ضخامت لایه میتواند در طول مدت زمان آزمایش مشاهده شود. علاوه بر این، میتوان مشاهده کرد که ضخامت لایه روغن کوچکتر میشود که این هنگامی است که درجه ویسکوزیته به مقادیر کوچکتر تغییر می یابد.

کاهش در ضخامت لایه ناشی از افزایش درجه حرارت یا تغییر در درجه ویسکوزیته و افزایش احتمال تماس مستقیم سطوح فلزی یاتاقان غلتکی میباشد. در طی چنین تماسی، تاثیرات کوچک در میان سطوح بی نظمی ها میتواند سبب برانگیختن فرکانس های طبیعی اجزا یاتاقان، افزایش سطح ارتعاش، مخصوصاً در باند HF گردد. به طور پیوسته، ضخامت کوچکتر لایه در میان اجزا یاتاقان غلتکی وابسته به ویسکوزیته پایین تر روغن می باشد که سبب ارتعاش بالاتر یاتاقان میگردد.

همچنین نتایج ارتعاش میتواند در عبارات نوع روش گریسکاری موجود در هر شرایطی از آزمایش مورد بحث قرار گیرد. روش گریسکاری میتواند با استفاده از رابطه  $\lambda$  تعیین گردد که بوسیله حداقل ضخامت روغن تقسیم شده توسط سختی سطح ترکیب تعیین میگردد همانگونه

$$\lambda = \frac{h_{\min}}{\sqrt{R_{q1}^2 + R_{q2}^2}},$$

که در تساوی (۱) نشان داده شده است.

که و عبارات هستند از مقادیر سختی سطح دو جسم در تماس و عبارت است از حداقل ضخامت لایه روغن. مقادیر  $\lambda$  در بالا ۳، دلالت بر EHL و یا HD دارد. اگر آنها بین ۱ و ۳ باشند، تماس تحت روش گریسکاری مخلوط شده میباشد، در حالیکه  $\lambda$  با توجه به گریسکاری محدود در زیر ۱ وجود دارد. نتایج ارزیابی های سختی شامل محاسبات مرتبط با  $\lambda$  در جدول ۱ نشان داده شده است. نتایج  $\lambda$  محاسبه شده در شکل ۸ نشان داده شده است.

تطبیق مقیاس نشان دهنده ارتباط  $\lambda$  با روش های گریسکاری میباشد همانگونه که در متن آمده است مشاهده انواع روش گریسکاری در هر شرایط آزمایش ممکن است. شکل ۸ نشان می دهد که با وجود روغنهای دارای درجه ویسکوزیته بالاتر،  $V2$  و  $V3$ ، روش گریسکاری ممکن عبارت است از نوع لایه کامل در طی کل مدت آزمایش، جایی

که هیچ تماسی بین دو سطح فلزی وجود ندارد. در حالت ویسکوزیته پایین تر (V1)، برای اولین ساعت آزمایش، همچنین گریسکاری لایه کامل اتفاق می افتد، که در ساعت دوم، شرایط گریسکاری با نوع مخلوط شده آغاز میگردد.

(همچنین تحت عنوان جزء EHL خوانده میشود). اگرچه، مقدار  $\lambda$  نسبتاً نزدیک به سطح محدود برای روش مخلوط شده ( $\lambda=3$ ) میباشد. گاهی تماس مستقیم بین سطح در آزمایشات با روغن V1 مورد انتظار است.

۳,۴- ارتباط بین پارامترهای تریبولوژیکی و ارتعاش:

با توجه به تایید وجود ارتباط بین ارتعاش و پدیده تریبولوژیکی، همه داده های ارتعاشی بدست آمده (تحت سرعت آزمایش 40Hz) در برابر پارامتر  $\lambda$  تعیین میگردد.

با مقایسه منحنی مناسب داده های ارتعاشی در شکل (b) ۹ با منحنی **stribeck** میتوان عملکرد سیستم را در شرایط EHL دریافت (شکل (b) ۹، [۱ و ۲])، برخی از ارتباطات بین دو پارامتر، ضریب اصطکاک و ارتعاش **RMS**، مشاهده میشود. تحت مقادیر کوچک ضخامت لایه روغن (مقادیر کوچک  $\lambda$ )، هنگامیکه احتمال تماس بین سطوح بالاتر میباشد، سطوح بالای هر دو ضریب، از اصطکاک و ارتعاش یافت میشود. از طرف دیگر، تحت مقادیر بزرگ  $\lambda$ ، تماس مستقیم بین سطوح، حداقل میباشد که سبب کاهش مقادیر هر دو متغیر میگردد.



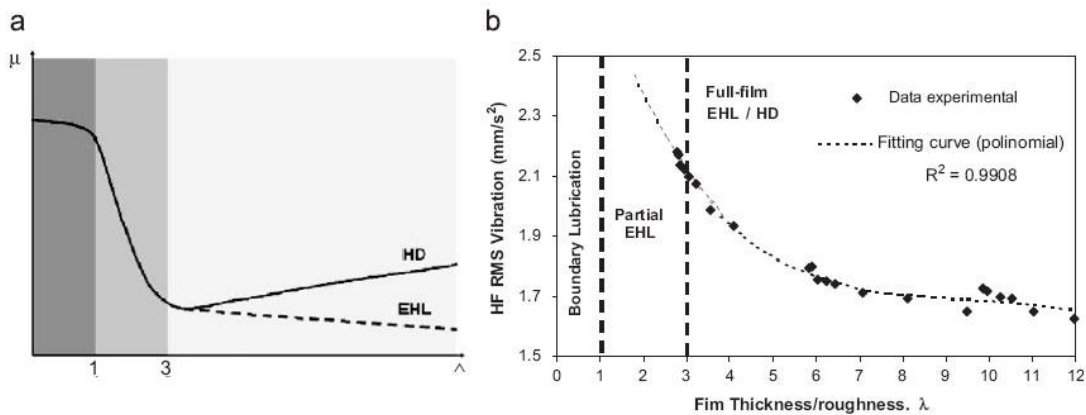


Fig. 9. (a) Stribeck diagram as a function of  $\lambda$  parameter [1] and (b) RMS vibration (related to HF band) as a function of calculated  $\lambda$  factor.

۴- نتیجه گیری:

یاتاقان های غلتکی مطابق با تایید اختلافات موجود در پاسخ ارتعاشی آزمایش میشوند که این هنگامی است که با روغن های دارای ویسکوزیته مختلف گریسکاری شوند. عملکرد ارتعاشی در ۲ باند فرکانسی اصلی با استفاده از پارامتر تریبولوژیکی (فاکتور  $\lambda$ ) مورد مطالعه قرار گرفت.

نتایج اصلی عبارتند از:

- تغییرات در روش گریسکاری یاتاقان های غلتکی که منجر به تغییر در درجه ویسکوزیته روغن می گردد که میتواند بوسیله تنظیم ارتعاش آشکار شود. در آزمایشات با درجه ویسکوزیته ISO32، ISO68، روش گریسکاری عبارت بود از نوع لایه کامل. با درجه ISO10، روش گریسکاری بسیار نزدیک به نوع مخلوط شده بود.

- تغییرات در ویسکوزیته زوغن در یاتاقان های غلتکی ناشی از استفاده از روغن های مختلف یا درجه حرارت مختلف میباشد که تنها ارتعاش یاتاقان را در باند HF (600-10000Hz) تحت تاثیر قرار میدهد.

- رابطه بین مقادیر ارتعاشی RMS در باند HF و فاکتور  $\lambda$  بدست آمد که بسیار مشابه به منحنی **stribeck** استاندارد بود، و وابسته به ضریب اصطکاک همراه با فاکتور  $\lambda$  بود که در این مقاله برای سیستم های دارای روش EHL یافت میشود.



دانشگاه آزاد اسلامی  
واحد بافق

**عنوان :**

# معرفی و بررسی انواع یاتاقان ها

(ارائه روش های بهینه سازی یاتاقان های اسپیندل ماشین ابزار و بررسی اثر درجه

ویسکوزیته روانکار در ارتعاش مکانیکی رلبرینگ ها )

**استاد گرامی :**

جناب آقای مهندس گورابیان

**تهیه و تنظیم :**

ایمان چرو

## زمستان ۸۷