

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Машински елементи

Број индекса: 113/2009

Марко Д. Чолаковић

**Утицај расподеле оптерећења на носивост и
радни век котрљајног лежаја
завршни рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Зорица Ђорђевић, доцент - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба укратко да објасни карактеристике, примену, поделу, означавање и прорачун носивости котрљајних лежаја. Посебну пажњу у овом раду кандидат треба да посвети анализи утицајних параметара на расподелу оптерећења на котрљајна тела и радни век лежаја.

Препоручена литература:

- [1] Николић В., Машински елементи-теорија, прорачун примери, Машински факултет, Крагујевац, 2004.
- [2] Ристивојевић М., Расподела оптерећења, зупчасти парови и котрљајни лежаји, Београд, 2002.
- [3] Милтеновић В., Машински елементи, Машински факултет, Ниш, 2009.

Крагујевац, септембар 2013. год.

ментор:

Др Зорица Ђорђевић, доцент

Резиме рада:

Циљ овог завршног рада је анализа утицаја расподеле оптерећења на носивост и радни век котрљајног лежаја. Анализирано је како број котрљајних тела и унутрашњи радијални зазор утичу на вредност фактора расподеле оптерећења. Такође, разматран је и утицај унутрашњег радијалног зазора и фактора расподеле оптерећења на радни век лежаја. Наведене зависности су приказане коришћењем одговарајућих израза као и у облику дијаграма.

Кључне речи: котрљајни лежај, унутрашњи радијални зазор, расподела оптерећења, радни век

Summary of work:

The aim of this study was to analyze the final impact of the load distribution on the bearing capacity and service life of rolling bearing. The study analyzed the number of rolling elements and the inner radial clearance affect the value of the load factor. Also considered is the effect of internal radial clearance and load factor on bearing lifetime. These curves have been given by the use of terms and in the form of diagrams.

Keywords: rolling bearing, internal radial clearance, load distribution, service life

Садржај:

1. УВОД	1
2. КОТРЉАЈНИ ЛЕЖАЈИ - ОСНОВНИ ПОЈМОВИ.....	2
2.1 Делови котрљајног лежаја.....	2
2.2 Врсте и карактеристике котрљајних лежаја	3
2.3 Означавање котрљајних лежаја	12
3. НОСИВОСТ И РАДНИ ВЕК ЛЕЖАЈА	14
3.1 Динамичка носивост лежаја	14
3.2 Радни век лежаја	16
3.3 Еквивалентно динамичко оптерећење лежаја.....	17
3.4 Избор величине лежаја с обзиром на динамичку носивост	19
3.5 Статичка носивост лежаја	20
3.6 Еквивалентно статичко оптерећење лежаја	21
3.7 Избор величине лежаја с обзиром на статичку носивост	22
4. УТИЦАЈНИ ПАРАМЕТРИ НА РАСПОДЕЛУ ОПТЕРЕЋЕЊА НА КОТРЉАЈНА ТЕЛА ЛЕЖАЈА	23
4.1 Утицај броја котрљајних тела у лежају.....	24
4.2 Појам зазора.....	26
4.3 Утицај унутрашњег радијалног зазора	28
5. РАДНИ ВЕК КОТРЉАЈНОГ ЛЕЖАЈА У ФУНКЦИЈИ РАСПОДЕЛЕ ОПТЕРЕЋЕЊА НА КОТРЉАЈНА ТЕЛА	31
6. УТИЦАЈ УНУТРАШЊЕГ РАДИЈАЛНОГ ЗАЗОРА НА РАДНИ ВЕК ЛЕЖАЈА...	34
7. ЗАКЉУЧАК.....	36
Литература.....	37

1. УВОД

Лежајеви су машински елементи који омогућавају обртно кретање вратила и делова постављених на вратилима, уз истовремено преношење оптерећења и обезбеђење њиховог тачног положаја. Лежајеви преносе силе са обртних вратила и осовина на непокретну носећу конструкцију, или са клипњаче на коленасто вратило када су оба дела у покрету. Лежајеви преносе само силе, али не и обртне моменте.

Лежајеви се првенствено користе код покретних веза са кружним кретањем (у ослонцима вратила и осовина). У тим ослонцима се омогућује кретање рукавца у односу на непомицни ослонац, уз истовремено преношење одговарајућег оптерећења. Код котрљајних лежајева релативно кретање обртних делова се остварује на принципу котрљања.

Квалитет лежаја, сам за себе, не може да гарантује рад без проблема јер постоје и други фактори који имају утицај на његов рад као што су: радна средина, правилна уградња, правилно одржавање.

Радни век лежаја дефинисан је као број обртаја (или радних сати при одређеном, константном броју обртаја), које он може да издржи пре него што се појаве први знаци замора (прскотине, љуштење) на неком од његових прстенова или котрљајних елемената.

Откази лежаја нису само условљени замором материјала, већ врло често хабањем, корозијом, контаминацијом, отказом система заптивања, итд.

Само мањи део уграђених лежајева се оштети у току рада. Далеко већи део надживи уређај или машину у коју су уграђени. До оштећења лежајева може да дође из више разлога. Ако је оптерећење веће него што је предпостављено, ако заптивке нису добре, ако је радни зазор лежаја превише мали због неодговарајућих налегања итд. Сваки од ових разлога проузрокује специфични тип оштећења и оставља свој специфични траг на лежају. Ово се посебно наглашава, јер се најчешће посматрањем оштећеног лежаја може утврдити узрок оштећења и на основу тога спровести одређене превентивне активности.

Од свих лежајева који откажу, приближно код једне трећине се то деси због замора материјала, код друге трећине због лошег подмазивања, а код треће трећине због утицаја контаминаната, нестручног руковања или погрешне уградње.

2. КОТРЉАЈНИ ЛЕЖАЈИ - ОСНОВНИ ПОЈМОВИ

2.1 Делови котрљајног лежаја

Котрљајни лежајеви се састоје од: прстенова или колутова, котрљајних тела и кавеза (држача котрљајних тела). Котрљајна тела су смештена између прстенова (или колутова), а помоћу кавеза се одржава њихово константно међусобно растојање (Слика 2.1.).



Слика 2.1. Котрљајни лежајеви

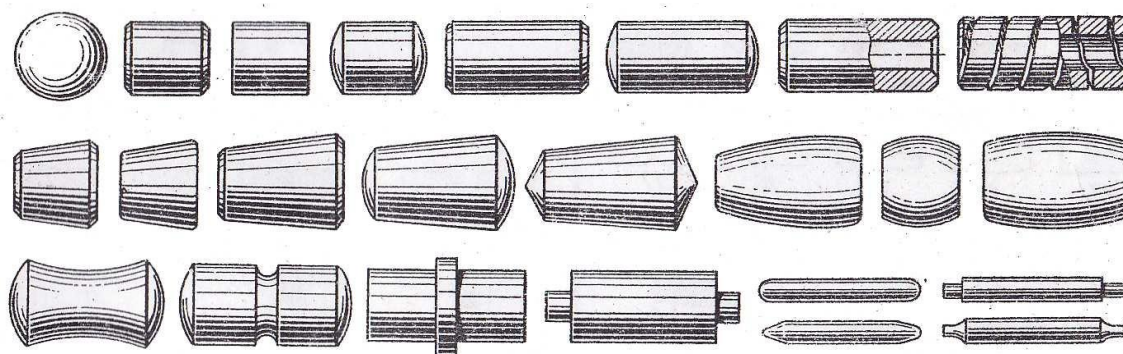
Према облику котрљајних тела, котрљајни лежајеви могу бити: куглични и ваљчасти који могу бити: цилиндрично-ваљчасти, конусно-ваљчасти, бачвасти и иглчасти.

Према броју редова котрљајних тела лежајеви могу бити: једноредни и вишередни (најчешће дворедни). Према правцу деловања силе деле се на: радијалне (преносе силу у радијалном правцу), аксијалне (преносе силу у аксијалном правцу) и радијалноаксијалне (преносе силу у оба правца).

Облици котрљајних тела:

- куглица;
- цилиндрични ваљчић са праволинијском изводницом;
- конусни ваљчић са праволинијском изводницом;
- цилиндрични ваљчић са кружнолучном изводницом;
- конусни ваљчић са кружнолучном изводницом;
- иглица.

Код котрљајних лежајева се куглице, ваљци, иглице и други облици котрљајних тела (Слика 2.2.) котрљају по отворднутим, брушеним и полираним површинама, због чега је главни отпор, који се јавља, отпор котрљања. У општем случају, овај отпор је много мањи од отпора клизања.



Слика 2.2. Облици котрљајних тела

2.2 Врсте и карактеристике котрљајних лежаја

Примена котрљајних лежајева је знатно већа у односу на примену клизних лежајева. То је пре свега условљено високим степеном стандардизације и масовном производњом у фабрикама које су специјализоване у тој области.

Основне предности котрљајних лежајева у односу на клизне су:

- нижа производна цена и лака набавка;
- задовољавајућа носивост за ниже и средње учестаности обртања;

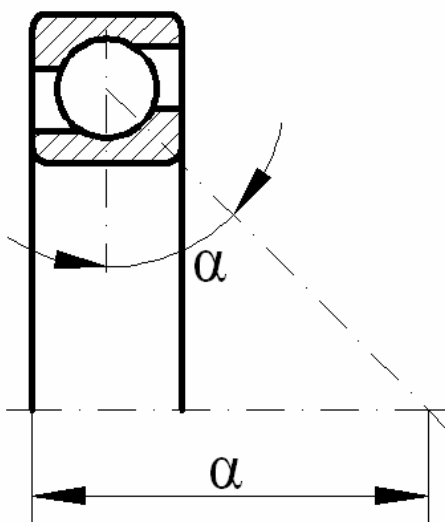
- једноставно подмазивање и одржавање;
- лака замена, јер нема хабања рукавца, па није потребна његова накнадна обрада;
- мањи губици енергије;
- реализују тачније вођење.

Основни недостаци котрљајних лежајева у односу на клизне су:

- виши ниво буке и вибрација;
- већа осетљивост на ударна оптерећења (слој уља између додирних површина клизних лежајева у извесној мери амортизује ударе);
- котрљајни лежајеви су једноделни, па је код неких конструкционих извођења лакше уградити дводелне клизне лежајеве;
- за високе учестаности обртања не могу да раде тако успешно као клизни лежајеви јер им се носивост, односно радни век, јако смањује.

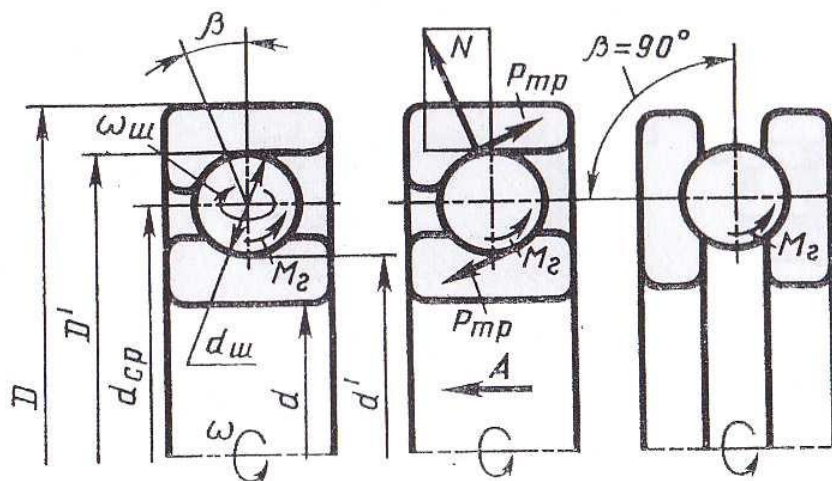
Материјал стандардних котрљајних лежајева је челик, док се код минијатурних котрљајних лежајева котрљајна тела израђују од сафира. За примену у агресивним срединама, какве су киселине, користе се котрљајни лежајеви од керамике и пластике. По аналогији са клизним лежајевима, код котрљајних лежајева се дефинише коефицијент трења редукован на пречник рукавца, који износи $\mu_1 = 0,0010$ (код кугличних лежајева) до $\mu_1 = 0,0045$ (код игличастих лежајева).

Јако велики значај за конструкционо извођење, као и за носивост котрљајних лежајева има угао α . То је угао између радијалног правца (нормале на подужну осу лежаја) и правца који дефинишу тачке додира котрљајних тела, односно куглица, са спољашњим и унутрашњим прстеном (Слика 2.3.).



Слика 2.3. Лежај са косим додиром

Котрљајни лежајеви преносе често и аксијалне и радијалне силе. Резултујућа сила при томе гради угао β са радијалном равни. Величина аксијалне силе коју може да пренесе лежај зависи од додирног угла α . Са повећањем угла α повећава се и аксијална сила коју може да пренесе лежај. Искоришћење лежаја у погледу носивости повећава се смањењем разлике између углова α и β . Максимално искоришћење лежаја постиже се за $\alpha = \beta$ (Слика 2.4.).



Слика 2.4. Шематски приказ оптерећења лежаја

Стандардни конструкциони облици котрљајних лежајева су:

- прстенасти куглични једноредни лежај са радијалним додиром;
- прстенасти куглични једноредни лежај са косим додиром;
- прстенасти куглични дворедни лежај са косим додиром;
- прстенасти куглични дворедни подесиви лежај;
- прстенасти цилиндрично ваљчасти једноредни лежај;
- игличасти лежај;
- прстенасти конусно ваљчасти лежај;
- прстенасти бачвасти једноредни подесиви лежај;
- колутни куглични једноредни и дворедни лежај.

Прстенасти куглични једноредни лежај са радијалним додиром

На спољашњем и унутрашњем прстену ових лежаја налазе се жлебови за кретање котрљајних тела. Радијуси кривине ових жлебова су нешто већи од полупречника котрљајних тела - куглица, тако да је у неоптерећеном стању додир у тачки. Овај тип лежаја може да пренесе релативно велико радијално и знатно аксијално оптерећење у оба смера. Због једноставног конструкционог облика, смањеног шума и вибрација у раду и ниске цене, ови лежаји имају јако велику примену: за преноснике код свих врста машина, у индустрији моторних возила. Конструкционо могу да се изведу са једним или два заштитна чеона

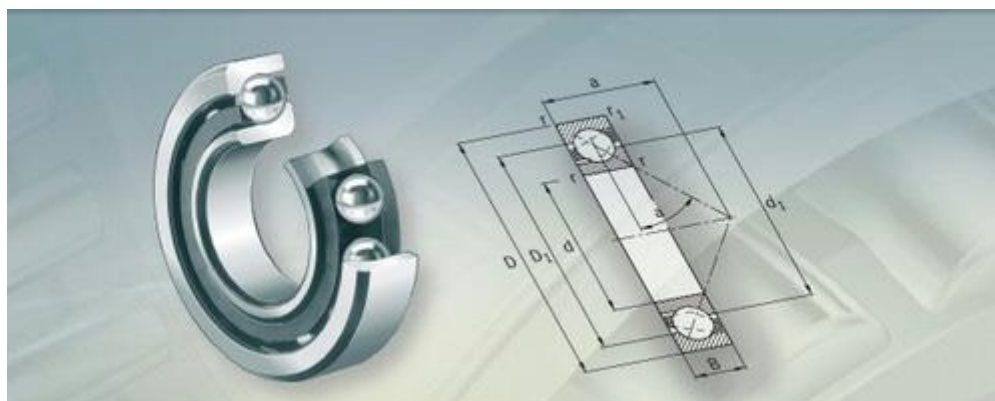
прстена [6]. Чеони заштитни прстенови служе да заштите лежај од продора страних тела и да спрече истицање масти којом се подмазује лежај (Слика 2.5.).



Слика 2.5. Прстенасти куглични једноредни лежај са радијалним додиром

Прстенасти куглични једноредни лежај са косим додиром

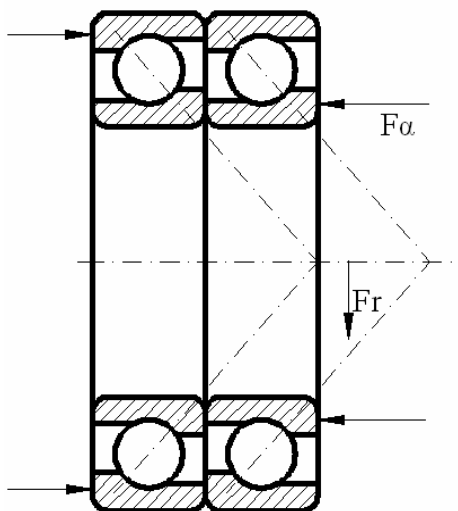
Жлеб за котрљајна тела на спољашњем и унутрашњем прстену има наслон само са једне стране, док је друга страна изведена равно. Преносе и радијалну и аксијалну (само у једном смеру) силу. Намењени су за веће учестаности обртања и за веће аксијалне силе. Због могућности подешавања зазора у току монтаже, користе се код вратила са тачним вођењем (Слика 2.6.).



Слика 2.6. Прстенасти куглични једноредни лежај са косим додиром

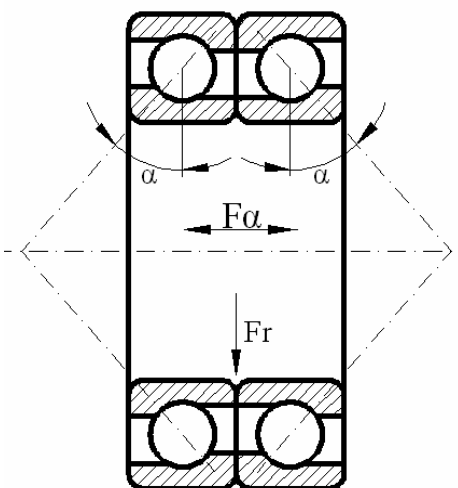
Начини уградње у једном ослонцу: уградња у тандему, где оба лежаја имају исти положај и могу да пренесу веома велику аксијалну силу у једном смеру [2, 3].

Аксијална сила се равномерно дели на оба лежаја (Слика 2.7.).



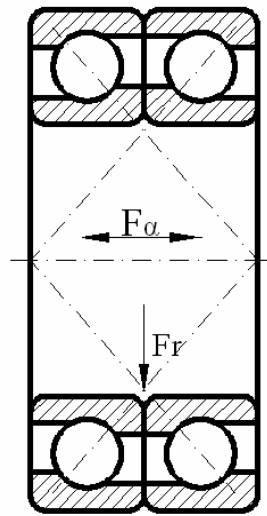
Слика 2.7. Уградња у тандему

Начини уградње у једном ослопцу: О-уградња користи се као аксијално непокретни ослонац вратила, јер може да пренесе аксијалну силу у оба смера. Ово је јако круто улежиштење, па се захтева висока саосност спољашњег и унутрашњег прстена лежаја (Слика 2.8.).



Слика 2.8. Уградња у једном ослопцу О-уградња

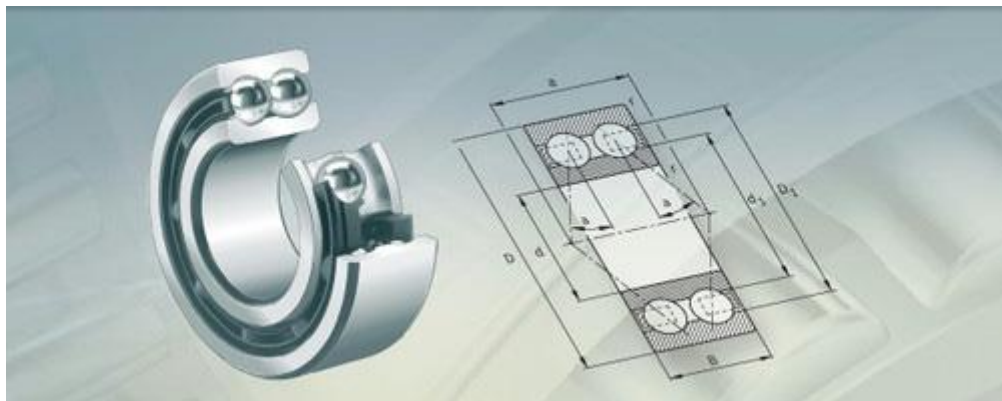
Начини уградње у једном ослопцу: Х-уградња користи се такође као аксијално непокретни ослонац вратила, јер може да пренесе аксијалну силу у оба смера. Ово је мање круто улежиштење (Слика 2.9.).



Слика 2.9. Уградња у једном ослонцу X-уградња

Прстенасти куглични дворедни лежај са косим додиром

Одговара пару једноредних кугличних лежаја са косим додиром (О извођење). Може да пренесе знатно радијално оптерећење, као и аксијална оптерећења у оба смера. Користе се у ослонцима крајних крутих вратила за ниже учестаности обртања (Слика 2.10).



Слика 2.10. Прстенасти куглични дворедни лежај са косим додиром

Прстенасти куглични дворедни подесиви лежај

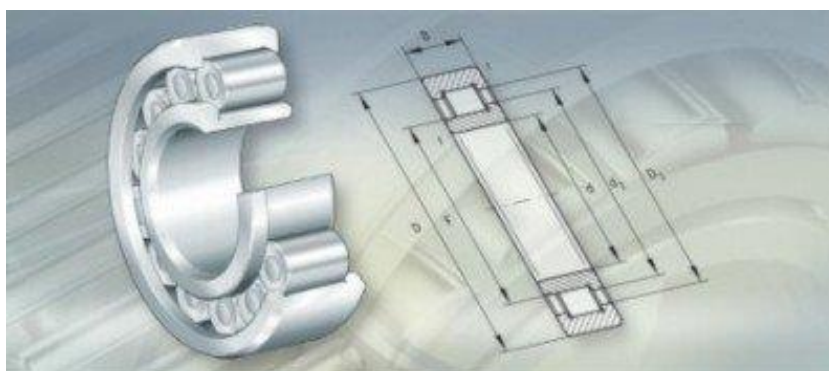
Површина котрљања куглица на спољашњем прстену је сферног облика, што омогућује угаоно прилагођавање деформацијама вратила и до 4° . Може да пренесе првенствено радијално оптерећење, као и умерена аксијална оптерећења у оба смера [2,3]. Користе се код вратила већег распона између ослонаца, где не може да се постигне одговарајућа тачност при монтажи и где се очекују деформације вратила у раду (Слика 2.11.)



Слика 2.11. *Прстенасти куглични дворедни лежај*

Прстенасти цилиндрично ваљчасти једноредни лежај

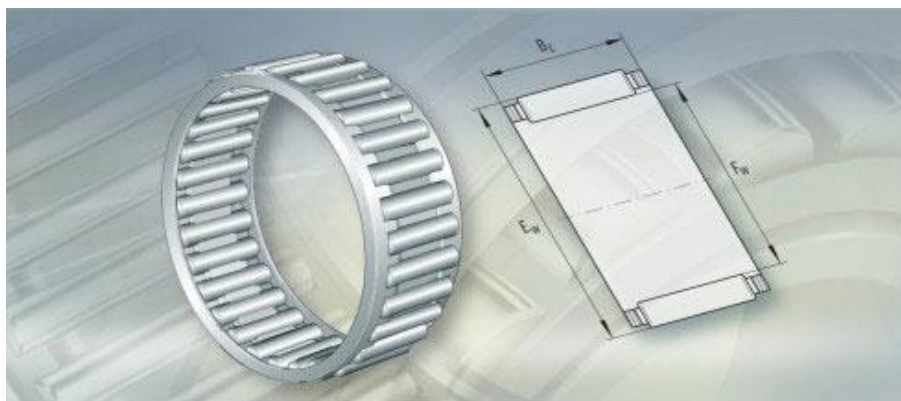
Додир између прстенова и котрљајних тела је линијски, што овим лежајевима омогућава већу носивост у односу на кугличне лежаје истих димензија са додиром у тачки. Ови лежајеви добро подносе високе учестаности обртања и велика радијална оптерећења. Примењују се код преносника, електромотора, код осовина шинских возила (Слика 2.12.).



Слика 2.12. *Прстенасти цилиндрично ваљчасти једноредни лежај*

Игличасти лежаји

Представљају специјално извођење цилиндрично ваљчаних лежаја, где котрљајна тела имају мали пречник у односу на дужину (иглице). Могу да пренесу само радијално оптерећење. Јако су крути, захтевају високу тачност обраде површина и врло прецизно вођење вратила. Примењују се код нижих и средњих учестаности обртања, у ослонцима алатних машина, код трансмисије моторних возила, код вратила електричних уређаја, код рукаваца електромагнетних и карданових спојница (Слика 2.13.).



Слика 2.13. *Игличасти лежај* [1]

Прстенасти конусно ваљчасти лежај

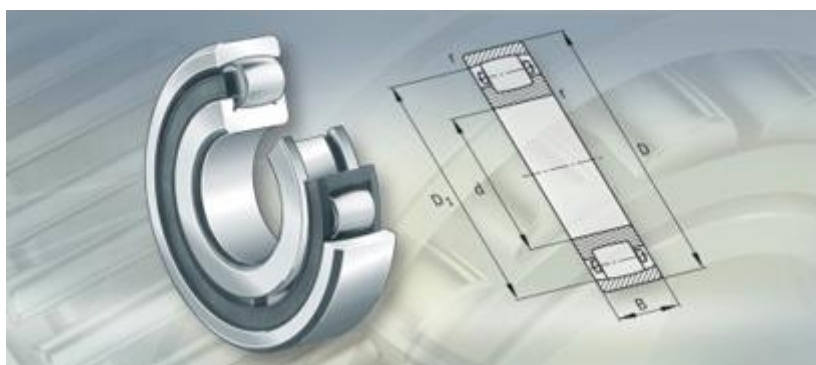
Као котрљајна тела користе се делови конуса (конусни ваљчићи), а површине котрљања спољашњег и унутрашњег прстена су делови конуса. Уграђују се у пару, као слике у огледалу, да би се елиминисала додатна индукована аксијална сила која тежи да раздвоји прстенове лежаја. Могу да пренесу висока и радијална и аксијална оптерећења. Спадају у круте лежаје, погодни су за ниже учестаности обртања. Примењују се код трансмисије моторних возила, код свих врста преносника снаге, код алатних машина (Слика 2.14.).



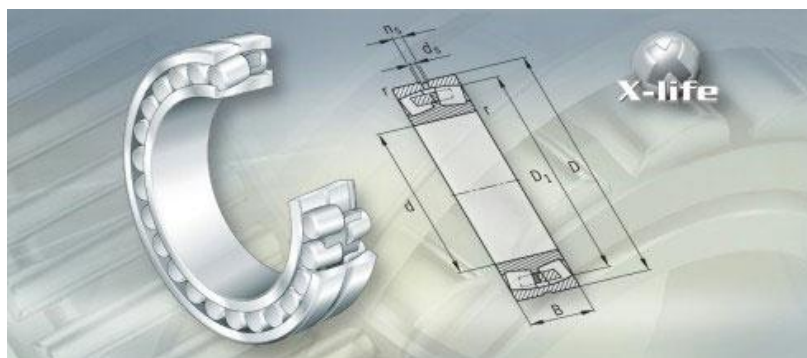
Слика 2.14. *Прстенасти конусно ваљчасти лежај*

Прстени бачвасти једноредни и дворедни подесиви лежај

Имају изванредне карактеристике у погледу носивости и пријема ударних оптерећења, као и у погледу могућности прилагођавања еластичним деформацијама вратила и непаралелности оса ослоних површина. То омогућује већа додирна површина између котрљајних тела и прстенова и сферни облик површине котрљања по спољашњем прстену. Котрљајна тела су са лучном изводницом тако да подсећају на бачвице (Слика 2.15. и Слика 2.16.). Намењен је за велика радијална оптерећења, а могу да пренесу и мања аксијална оптерећења. Погодни су за ниже учестаности обртања. Примењују се код возила, у тешкој машиноградњи и код вратила изложених великим радијалним оптерећењима при јаким ударима.



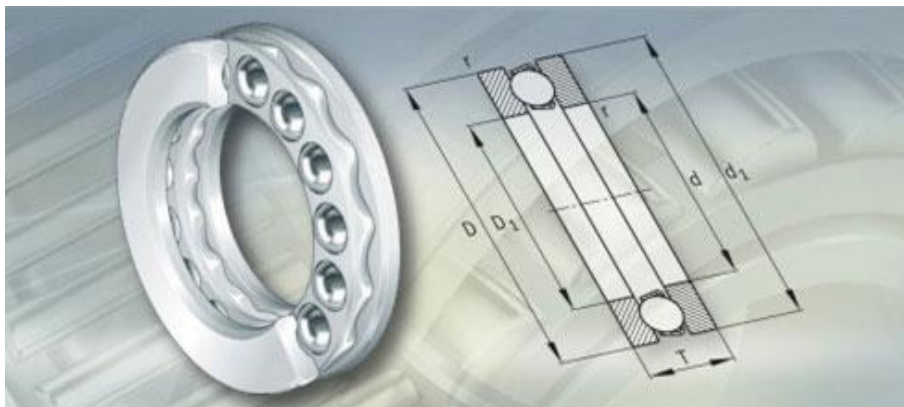
Слика 2.15. *Прстенасти бачвасти једноредни подесиви лежај*



Слика 2.16. *Прстенасти бачвасти дворедни подесиви лежај*

Колутни куглични једноредни и дворедни лежај

Једноредни лежаји преносе чисто аксијално оптерећење, али само у једном смеру и погодни су за ниже учестаности обртања (Слика 2.17.). Дворедни лежаји преносе аксијалну силу у оба смера. Могу да приме велику аксијалну силу у ослоњцима вратила које радијални лежаји не могу да поднесу, нпр. улежиштење вратила пужа, вретена бушилица, код ослонаца обртних кранова, код кранских кука, код обртних постоља итд.



Слика 2.17. Колутни куглични једноредни лежај

2.3 Означавање котрљајних лежаја

Ознака котрљајних лежајева састоји се из основне и допунске ознаке. Основна ознака састоји се од три групе бројева или слова које означавају: тип лежаја, ред мера и ознаку проврта.

Тип лежаја се означава помоћу једног или више бројева или слова. Тако на пример, прстенасти куглични једнореди лежајеви са радијалним додиром имају ознаке 60, 62, 63 и 64. Прстенасти куглични једнореди лежајеви са косим додиром имају ознаке 72, 73. Прстенасти куглични двореди лежајеви са косим додиром имају ознаке 32, 33. Прстенасти куглични двореди подесиви лежајеви имају ознаке 12, 22, 23. Прстенасти цилиндрично-ваљчасти једнореди лежајеви имају ознаке NU, NJ, NUP, NN,... Прстенасти конусно-ваљчасти једнореди лежајеви имају ознаке 302, 322, 303, 313, 323. Прстенасти бачвасти једнореди подесиви лежајеви имају ознаке 202, 203, 204. Игличасти лежајеви имају ознаке NA48, NA49. Колутни куглични једнореди и двореди лежајеви имају ознаке 511, 512, 513, 514, 522.

Ред мера је означен различитим бројним ознакама. За један унутрашњи пречник предвиђен је већи број спољашњих пречника и ширина, што значи да је за један исти пречник рукавца вратила могућ избор низа лежајева истог типа, а различите носивости. Први број се односи на ширину (висину) лежаја, а други на спољашњи пречник прстена (колута).

Унутрашњи пречник дефинишу последња два броја у ознаци. Систем обележавања је следећи:

- Пречници мањи од 10 mm се наводе непосредно у номиналним вредностима;
- Пречници од 10, 12, 15 и 17 mm се означавају бројевима 00, 01, 02 и 03;
- Ознака за пречнике у интервалу од 20 mm до 500 mm добија се дељењем пречника у mm са бројем 5;
- За пречнике веће од 500 mm вредности пречника се наводе непосредно у mm, али се од ознаке реда мера одвајају косом цртом.

Иза основне ознаке може се појавити допунска ознака, која дефинише одступања конструкције лежаја у односу на основно извођење. Допунска ознака испред основне ознаке значи да су лежаји некомплетни.

Избор типа лежаја се врши на основу радних услова, дефинисаних величином и правцем оптерећења, бројем обртаја, веком трајања и другим факторима. На основу познатих оптерећења врши се прорачун лежајева [2].

3. НОСИВОСТ И РАДНИ ВЕК ЛЕЖАЈА

Прорачун лежајева врши се према моћи ношења, која може бити статичка и динамичка.

Динамичка моћ ношења лежаја (C) је меродавна за прорачун лежаја када лежаји имају учесталост обртања већу од 10 min^{-1} . Динамичка моћ ношења је оптерећење (сила) константног правца и интензитета коју лежај може да пренесе у току 10^6 обртаја, а да при том најмање 90% испитиваних лежајева буде неоштећено.

Статичка моћ ношења (C_0) је меродавна за лежајеве који у току рада мирују, то јест окрећу се са малим бројем обртаја (до 10 min^{-1}), или имају осцилаторно кретање.

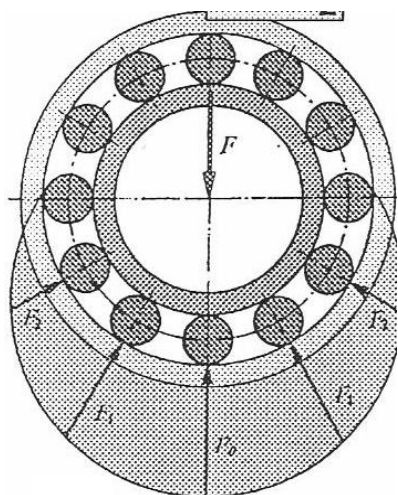
3.1 Динамичка носивост лежаја

Елементи котрљајних лежаја: прстенови, лоптице или ваљци, изложени су у раду врло учесталим променама оптерећења, јаком замарању, пре свега због котрљања лоптица (ваљака) између прстенова. Додирне површине лоптица (ваљака) и прстенова на оптерећеном делу сваког прстена, стално мењају положај. Оптерећење које замара материјал, изазива после одређеног времена рада високе знаке заморености на елементима лежаја, напрслине које за последицу имају љуштење површине, што чини лежај неисправним за даљи рад.

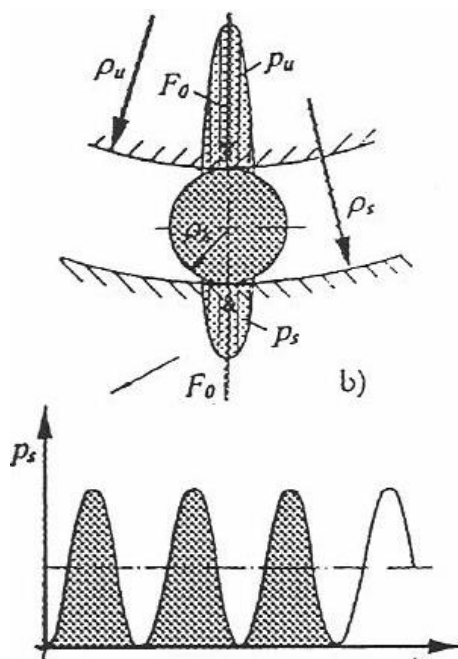
Да би се дошло до закључка како се лоптице понашају при оптерећењу Hertz, је испитивао лоптице у три карактеристична случаја. У сваком од три случаја, додир је теоријски у тачки.

Под дејством силе F на котрљајно тело (Слика 3.1.), на додирним површинама се јавља притисак (Слика 3.2.) чија највећа вредност за додир цилиндричних површина по Hertz-у износи (Израз 3.1.):

$$p_{max} = 0,418 \sqrt{\frac{F_0 \cdot E}{\rho \cdot b}} \quad (3.1)$$



Слика 3.1. Расподела оптерећења код лежаја



Слика 3.2. Притисак на додиру котрљајних тела

$$F_o = k_o \frac{F}{z} \quad (3.2)$$

$$\rho = \frac{\rho_u \cdot \rho_k}{\rho_u + \rho_k} < \frac{\rho_s \cdot \rho_k}{\rho_s + \rho_k} \quad (3.3)$$

k_o - коефицијент сразмере: $k_o=5$ - за кугличне лежаје, $k_o=4$ - за ваљчасте лежаје;

F_o - сила на средњем котрљајном телу (Израз 3.2.);

z - број котрљајних тела;

E - еквивалентни модул еластичности делова у додиру;

b - ширина додира;

ρ - еквивалентни радијус (Израз 3.3.).

У току једног обртања лежаја притисак се промени онолико пута колико је котрљајних тела у лежају. Промене на унутрашњем прстену, а нарочито на котрљајном телу су сложене временске функције.

3.2 Радни век лежаја

Номинални радни век лежаја је број обртаја или часова рада веће групе истих лежаја константне учесталости обртања. При томе не долази до никаквих знакова оштећења на најмање 90 % лежаја.

Радни век лежаја изражен бројем часова до разарања L_h (Израз 3.4.), може се изразити и бројем обртаја до разарања N (Израз 3.5.):

$$L_h = \frac{10^6}{60 \cdot n} \left(\frac{C}{F} \right)^a \quad (3.4)$$

$$N = 60 \cdot n \cdot L_h \quad (3.5)$$

n - број обртаја у минуту;
 F - еквивалентно динамичко оптерећење лежаја;
 C - динамичка носивост лежаја;
 α - коефицијент ;
 $\alpha=3$ - за кугличне лежајеве;
 $\alpha=\frac{10}{3}$ - за ваљчане лежајеве.

Међутим врло често радни услови одступају од нормалних па се поред номиналног радног века користи и модифицирани радни век лежаја.

Модифицирани номинални радни век лежаја изражен у часовима рада (Израз 3.6.):

$$L_{Mh} = L_h \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot f_\theta \quad (3.6)$$

Коефицијент a_1 узима у обзир вероватноћу издржљивости.

Динамичке носивости лежаја дате у каталозима прооизвођача односе се на одређене материјале од којих је лежај израђен. За друге материјале вредности радног века коригују се фактором a_2 .

Ако се услови подмазивања разликују од опитних, односно, уколико је подмазивање неповољно, или је уље мање вискозности уз могућност продирања нечистоће, онда се ови утицаји узимају у обзир преко фактора a_3 .

Носивост лежаја се на повишеним температурама смањује, што се узима у обзир фактором f_θ .

3.3 Еквивалентно динамичко оптерећење лежаја

Прорачун лежаја према еквивалентном динамичком оптерећењу се врши применом израза 3.7.:

$$F = X \cdot F_r + Y \cdot F_a \quad (3.7)$$

F_r - радијална сила;

F_a - аксијална сила;

X - фактор радијалног оптерећења;

Y - фактор аксијалног оптерећења.

Вредности фактора X и Y зависе од типа лежаја и од односа радијалне и аксијалне компоненте оптерећења. Одређују се према таблицама [2]. Уколико лежај преноси чисто радијалну силу ($F_a = 0$) онда је $F = F_r$, а уколико преноси чисто аксијалну силу ($F_r = 0$) онда је $F = F_a$.

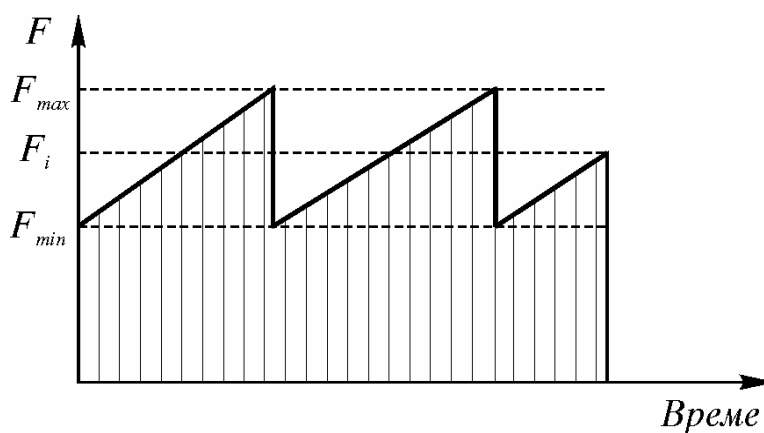
Овакав прорачун важи под претпоставком:

- Да је радно оптерећење приближно константно;
- Да се у раду не мења учесталост обртаја лежа.

Уколико то није испуњено онда се прорачун изводи према идеалном оптерећењу. Идеално оптерећење је константно оптерећење, при коме би лежај имао исти радни век, као при променљивом оптерећењу.

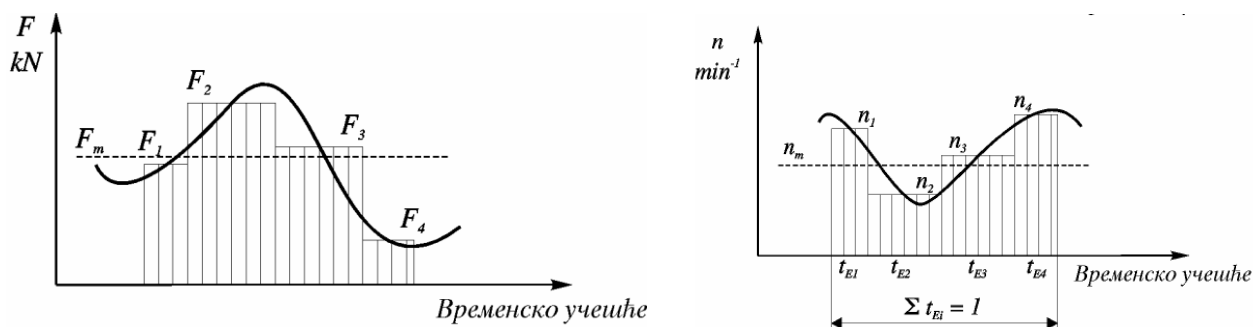
Ако се сила коју преноси лежај мења периодично (Слика 3.3.), приближно линеарно у границама од F_{min} до F_{max} при томе учесталост обртања лежаја остаје непромењива, на пример код алатних машина или машина за обраду дрвета, онда идеално оптерећење може да се одреди према изразу 3.8.:

$$F_i = \frac{F_{min} + 2 \cdot F_{max}}{3} \quad (3.8)$$



Слика 3.3. Периодична промена силе

Код лежаја код којих се у току рада мења и оптерећење и учестаност обртања и при томе промена има стохастички карактер, овај прорачун је компликованији. На основу случајне функције тока промене оптерећења и бројева обртаја, статистичком обрадом добијају се одговарајуће законитости тока промена оптерећења, односно процентуалног учешћа бројева обртаја на одговарајућем нивоу оптерећења. На овај начин добијен спектар оптерећења графички је приказан на слици 3.4. [3]:



Слика 3.4. Спектар оптерећења са одговарајућим учешћем бројева обртаја

Полазећи од хипотезе о линеарној акумулацији оштећења у материјалу, идеално оптерећење лежаја F_i у kN , може се одредити према следећем изразу (Израз 3.9.):

$$F_i = \sqrt[a]{F_1^a \cdot \frac{n_1}{n_m} \cdot t_{E1} + F_2^a \cdot \frac{n_2}{n_m} \cdot t_{E2} + F_3^a \cdot \frac{n_3}{n_m} \cdot t_{E3} + \dots F_n^a \cdot \frac{n_n}{n_m} \cdot t_{En}} \quad (3.9)$$

$F_1, F_2, \dots, F_n$ - радијалне или аксијалне компоненте силе на одговарајућем нивоу спектра оптерећења односно за одговарајући период рада у kN ;

$n_1, n_2, \dots, n_n$ - бројеви обртаја на одговарајућем нивоу спектра оптерећења, респективно у min^{-1} ;

$t_{E1}, t_{E2}, \dots, t_{En}$ - релативно временско учешће оптерећења одговарајућег нивоа (на пример ако је временско учешће првог нивоа 25% онда је $t_{E1} = 0,25$);

α - експонент ($\alpha = 3$ - за кугличне; $\alpha = 10/3$ - за ваљчане лежаје);

n_m - средња вредност бројева обртаја која се одређује према:

$$n_m = n_1 \cdot t_{E1} + n_2 \cdot t_{E2} + \dots + n_n \cdot t_{En}$$

3.4 Избор величине лежаја с обзиром на динамичку носивост

Да би лежај био потпуно дефинисан потребно је знати тип лежаја, унутрашњи пречник и величину лежаја. Тип лежаја усваја се на основу експлоатационих услова везаних за оптерећење, конструкционо извођење ослонаца, крутост вратила, учестаности обртања итд. Унутрашњи пречник лежаја одређен је пречником рукавца вратила и конструкционим условима везаним за комплетан склоп вратила са деловима на њему.

Под претпоставком да су тип лежаја и његов унутрашњи пречник познати, избор величине лежаја (реда мера) врши се према динамичкој носивости лежаја (Израз 3.10.):

$$C \geq F \cdot \sqrt[a]{\frac{60n \cdot L_h}{10^6}} \quad (3.10)$$

L_h - номинални радни век лежаја у часовима рада;

n - број обртаја лежаја min^{-1} ;

F - еквивалентно динамичко оптерећење у kN .

На основу потребне динамичке носивости лежаја одређене према изразу 3.10. из каталога произвођача лежаја бира се одговарајући лежај.

При одређивању динамичке носивости лежаја потребно је познавати номинални радни век лежаја, чије се вредности бирају на основу искуства и зависе од врсте машине, трајности погона и поузданости машине. [3]

3.5 Статичка носивост лежаја

За лежаје који у току рада мирују односно окрећу се са малим бројевима обртаја ($n < 10 \text{ min}^{-1}$) или имају осцилаторно кретање за прорачун је меродавна статичка носивост.

Додир између делова котрљајних лежаја је у тачки односно линији, па се пластичне деформације на местима додир а јављају већ код умерених статичких оптерећења. Са порастом оптерећења нагло расту и пластичне деформације. Пластичне деформације не смеју међутим бити сувише велике, јер у том случају битно нарушавају радну способност лежаја. Као мера ових пластичних деформација узима се однос између статичке носивости лежаја C_0 и статичког оптерећења F_0 , односно:

$$k_0 = \frac{C_0}{F_0} \quad (3.11)$$

Величина k_0 (Израз 3.11.) је мера сигурности против појаве сувише великих пластичних деформација на местима додир а котрљајних тела са осталим деловима лежаја и назива се статичка карактеристика носивости.

Статичка носивост лежаја C_0 представља оптерећење које на најоптерећенијем месту додир а котрљајних тела и прстенова односно колотова неће изазвати трајне пластичне деформације веће од 0,01% пречника котрљајних тела. При томе је оптерећење код радијалних лежаја чисто радијално, а код аксијалних лежаја чисто аксијално. Вредности за статичку носивост одређују се експериментално и дате су у каталозима произвођача.

Статичка карактеристика носивости k_0 креће се у границама:

$k_0 = 1,5 \dots 2,5$ - код ударних оптерећења и високих захтева у погледу тачности и мирноће рада;

$k_0 = 1,0 \dots 1,5$ - код нормалних радних услова и нормалних захтева у погледу мирноће рада;

$k_0 = 0,7 \dots 1,0$ - ако су радни услови такви да се дозвољавају веће пластичне деформације на местима додир а и код нижих захтева у погледу мирноће рада.

3.6 Еквивалентно статичко оптерећење лежаја

Еквивалентно статичко оптерећење лежаја F_0 је оно радијално или аксијално статичко оптерећење које би у деловима лежаја изазвало исте трајне деформације као и реално оптерећење у радним условима. Са изузетком колутних конусно бачвастих подесивих лежаја, еквивалентно статичко оптерећење лежаја F_0 у kN одређује се према изразу 3.12.:

$$F_0 = X_0 \cdot F_{r0} + Y_0 \cdot F_{a0} \quad (3.12)$$

F_{r0} - радијална компонента статичког оптерећења лежаја у kN ;

F_{a0} - аксијална компонента статичког оптерећења лежаја у kN ;

X_0 - фактор радијалног статичког оптерећења;

Y_0 - фактор аксијалног статичког оптерећења.

Вредности фактора X_0 и Y_0 зависе од типа лежаја и од односа радијалне и аксијалне компоненте оптерећења, одређују се према таблицама [2].

Уколико лежај преноси чисто радијалну силу ($F_{a0} = 0$) онда је $F_0 = F_{r0}$, а уколико преноси чисто аксијалну силу ($F_{r0} = 0$) онда је $F_0 = F_{a0}$.

Код радијално и аксијално оптерећених колутних конусно бачвастих лежаја еквивалентно статичко оптерећење лежаја F_0 у kN одређује се према изразу 3.13.:

$$F_0 = F_{a0} + 2,7 \cdot F_{r0} \quad (3.13)$$

при чему такође мора бити испуњен услов $F_{r0} \leq 0,55 \cdot F_{a0}$, као и да буде обезбеђена центричност колутова.

3.7 Избор величине лежаја с обзиром на статичку носивост

Под претпоставком да су тип и унутрашњи пречник лежаја познати, сходно изразу 3.11., потребна статичка носивост лежаја C_0 у kN одређује се према изразу 3.14.:

$$C_0 \geq k_0 \cdot F_0 \quad (3.14)$$

F_0 - еквивалентно статичко оптерећење лежаја у kN ;
 k_0 - статичка карактеристика носивости лежаја.

На основу статичке носивости лежаја (одређене према изразу 3.14.) из каталога произвођача лежаја бира се одговарајући лежај.

Треба напоменути да учестаност обртања лежаја није довољан критеријум за избор поступка прорачуна лежаја. За случај да је радни век лежаја мали, онда прорачун према динамичкој носивости дозвољава релативно велика радна оптерећења, која могу довести до појаве пластичних деформација. У том случају и за бројеве обртаја $n > 10 \text{ min}^{-1}$ потребна је поред динамичке и провера статичке носивости лежаја.

4. УТИЦАЈНИ ПАРАМЕТРИ НА РАСПОДЕЛУ ОПТЕРЕЋЕЊА НА КОТРЉАЈНА ТЕЛА ЛЕЖАЈА

Расподела оптерећења на котрљајна тела лежаја је неравномерна. Степен неравномерности расподеле оптерећења зависи од више чинилаца:

- спољашњег оптерећења;
- запреминске и површинске крутости спрегнутих делова лежаја;
- укупног броја котрљајних тела у лежају;
- унутрашњег радијалног зазора;
- тачности димензија, облика и положаја радних површина спрегнутих делова лежаја;
- крутости осталих делова улежиштења.

У погледу анализе утицајних параметара на расподелу оптерећења биће разматран прстенасти куглични котрљајни лежај са радијалним додиром, оптерећен спољашњим радијалним оптерећењем. При томе, претпоставља се да спрегнути делови лежаја имају "апсолутну" запреминску крутост, а да су површински деформабилни.

Анализе различитих утицаја на расподелу оптерећења се могу извршити на основу математичког модела расподеле оптерећења. Основу математичког модела расподеле оптерећења чини фактор расподеле оптерећења на котрљајна тела лежаја. Он изражава квантитативну карактеристику расподеле оптерећења. Наиме, ако је за задате радне услове (спољашње оптерећење и унутрашња геометрија лежаја) позната вредност фактора расподеле оптерећења сваког котрљајног тела лежаја, онда је у потпуности дефинисана расподела оптерећења, у квалитативном и квантитативном смислу [4].

4.1 Утицај броја котрљајних тела у лежају

У циљу анализе утицаја укупног броја котрљајних тела лежаја на расподелу оптерећења, треба искључити све остале утицаје на расподелу оптерећења, обухваћене развијеним математичким моделом расподеле оптерећења, представљен фактором стварне расподеле оптерећења (Израз 4.1.):

$$K_{ri} = \frac{\left(\cos(i\gamma) - \frac{\Delta h_i + \frac{e}{2}}{w}\right)^{3/2} \cos(i\gamma) \Phi(\delta_i)}{\sum_{i=0}^{Z-1} \left(\cos(i\gamma) - \frac{\Delta h_i + \frac{e}{2}}{w}\right)^{3/2} \cos(i\gamma) \Phi(\delta_i)} \quad (4.1)$$

Δh_i - промена растојања између центара кривина стаза котрљања у попречном пресеку лежаја на месту i – те куглице;

γ – угао између куглице у неоптерећеном стању;

δ_i – укупна контактна деформација спрегнутих делова лежаја;

w – релативно радијално померање прстенова лежаја под дејством спољашњег радијалног оптерећења ;

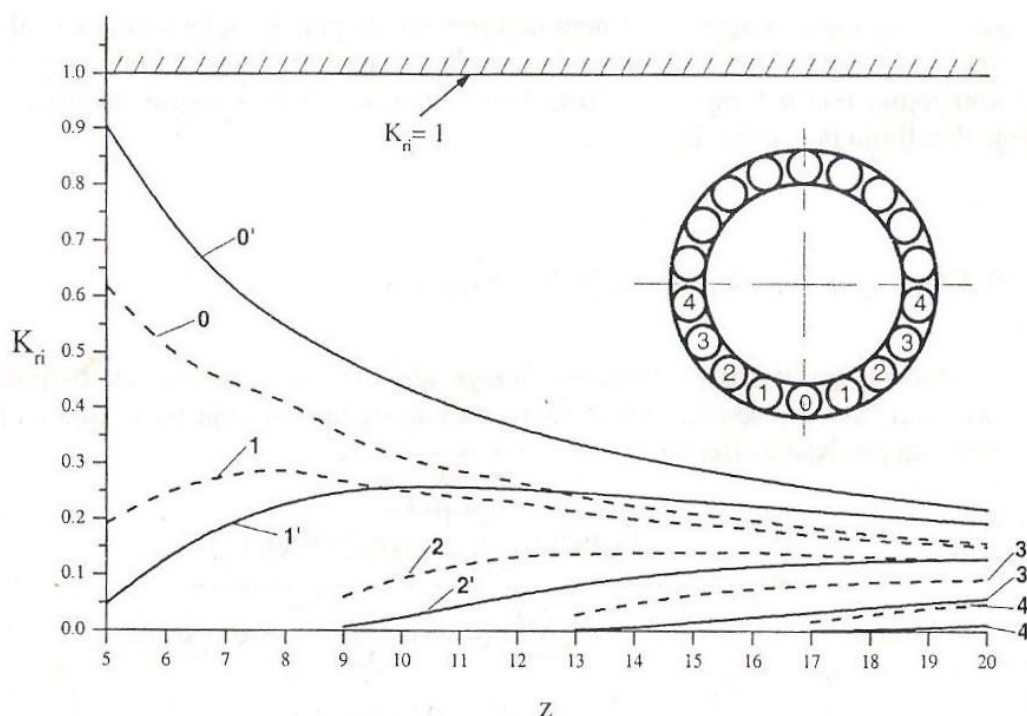
e – унутрашњи радијални зазор лежаја;

$\Phi(\delta_i)$ – функција контакта:

$$\Phi(\delta_i) = \begin{cases} 1, & w \cos(i\gamma) > \Delta h_i + \frac{e}{2} \\ 0, & w \cos(i\gamma) \leq \Delta h_i + \frac{e}{2} \end{cases}$$

Ако предпоставимо да су спрегнути делови лежаја идеалног облика ($\Delta h_i = 0$) и унутрашњи радијални зазор је једнак нули ($e = 0$), израз за фактор расподеле оптерећења на котрљајна тела геометријски идеалног лежаја са нултим радијалним зазором има облик:

$$K_{ri} = \frac{\cos^{5/2}(i\gamma)}{1 + 2 \sum_{j=1}^n \cos^{5/2}(i\gamma)} \quad (4.2)$$



Слика 4.1. Зависност фактора расподеле оптерећења на котрљајна тела радијално оптерећеног лежаја са нултим унутрашњим радијалним зазором од укупног броја котрљајних тела у случају идеално равномерне (0,1,2,3,4) и теоријске (0',1',2',3',4') расподеле оптерећења

Дијаграмом на слици (Слика 4.1.) приказана је промена фактора K_{ri} теоријске расподеле оптерећења на котрљајна тела геометријски идеалног лежаја са нултим радијалним зазором (линије 0', 1', ..., 4') и лежаја са идеално равномерном расподелом оптерећења (линије 0, 1, ..., 4) у зависности од укупног броја котрљајних тела. Са порастом броја котрљајних тела у лежају, степен равномерности расподеле оптерећења на котрљајна тела лежаја расте и асимптотски тежи вредности $1/z$. Наиме, у теоријском случају када $z \rightarrow \infty$, расподела оптерећења тежи равномерној расподели.

На дијаграму се уочава да је најоптерећеније котрљајно тело идеалног лежаја са нултим радијалним зазором (линија 0'), у случају теоријске расподеле оптерећења више ангажовано у преношењу спољашњег радијалног оптерећења, него исто котрљајно тело код идеално равномерне расподеле оптерећења. Непосредно по уласку у зону оптерећења, котрљајна тела код лежаја са нултим радијалним зазором су мање ангажована у преношењу спољашњег радијалног оптерећења, у поређењу са истим котрљајним телима код теоријског лежаја са идеално равномерном расподелом оптерећења.

На основу изнетог се може закључити да се, са повећањем укупног броја котрљајних тела у лежају, неравномерност расподеле оптерећења смањује. Иако је са аспекта смањења неравномерности расподеле оптерећења повољнији већи број котрљајних тела, постоје одређена ограничења

максималног броја котрљајних тела у лежају условљена конструкцијом и технологијом монтаже [4].

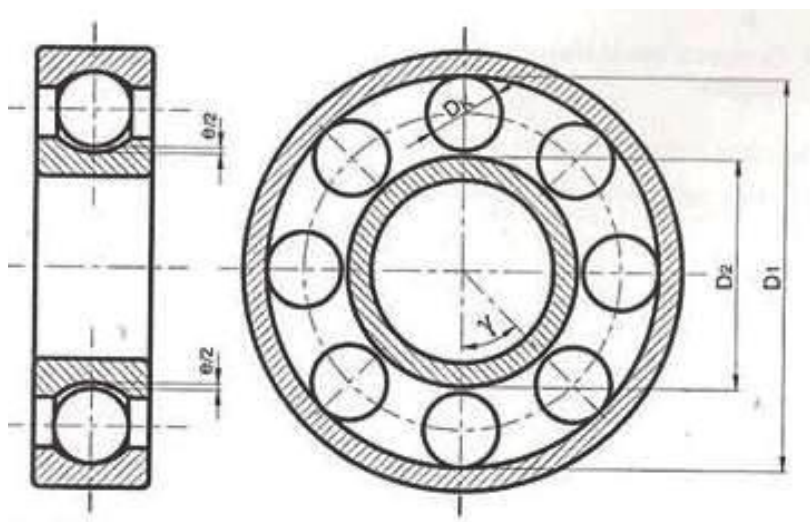
4.2 Појам зазора

Радијални зазор у лежају представља највеће могуће померање једног прстена у односу на други у радијалном правцу. Радијални зазор котрљајног лежаја дефинисан је (SRPS M.C3.754) као "средња вредност укупних померања која су управна на осу проврта лежаја, при чему је један прстен променљив а други мирује". При томе је претпостављено да су пречници стаза котрљања прстенова и котрљајних тела, њихов облик и положај, идеално тачни.

Теоријски радијални зазор лежаја, (Слика 4.2.), може се израчунати (Израз 4.3.):

$$e = D_1 - D_2 - 2D_K \quad (4.3)$$

D_1 - пречник стазе котрљања спољашњег прстена,
 D_2 - пречник стазе котрљања унутрашњег прстена,
 D_K - пречник куглице.



Слика 4.2. Радијални зазор кугличног једноредног лежаја

Према ISO 5593 радијални унутрашњи зазор лежаја је дефинисан као "средња аритметичка вредност радијалног растојања за које се један прстен

или колут може померити у односу на други из једног крајњег положаја у супротни крајњи положај, при различитим угаоним положајима, без деловања спољашњег оптерећења. Средња вредност укључује у себе и померање прстенова или колута у различитим угаоним положајима, међусобно и са гарнитуром котрљајних тела у различитим угаоним положајима у односу на прстенове и колутове".

У погледу подешавања зазора разликујемо две групе лежаја. Прву групу чине лежаји са неподесивим зазором а другу групу са подесивим зазором (код ових лежаја је могуће мењати величину радијалног зазора при уградњи, аксијалним померањем једног прстена у односу на други).

Лежаји су према величини зазора сврстани у четири групе: нормална група зазора, група 2 (са зазором мањим од нормалног) и група 3 и 4 (са зазором већим од нормалног). Ако лежај има зазор различит од нормалног, онда се до означава допунском ознаком лежаја.

Код лежаја са неподесивим зазором, зависно од стања лежаја, разликујемо три вида радијалног зазора, и то:

- фабрикациони зазор (e_f) – зазор који лежај поседује при испоруци из фабрике и прописан је стандардима; лежаји се испоручују са нормалним, смањеним и повећаним зазорима. То је зазор неуграђеног и неоптерећеног лежаја.
- монтажни зазор (e_m) – при уградњи лежаја, радијалне мере унутрашњег прстена се повећавају, услед еластичних деформација, а спољашњег смањују, те је због тога монтажни зазор лежаја мањи од фабрикационог зазора.
- радни зазор (e_r) – зазор лежаја у раду при радном оптерећењу и на радној температури. Радни зазор зависи од величине монтажног зазора, који се смањује због ширења унутрашњег прстена услед повећања радне температуре, а повећава под дејством оптерећења, због појаве контактних деформација спрегнутих делова на додирним површинама. Радни зазор у лежају мора постојати безусловно. Да би се постигао потребан зазор неопходно је рукавце и проврте израдити са толеранцијама које прописују произвођачи лежаја [5].

Прописивање фабрикационог радијалног зазора лежаја, од кога у великој мери зависи величина радног зазора лежаја, има за циљ да обезбеди одговарајућу:

- расподелу спољашњег оптерећења на котрљајна тела лежаја;
- тачност обртања лежаја;
- ниво вибрација лежаја у току рада;
- ниво буке лежаја у раду;
- губитке на трење;
- температуру лежаја.

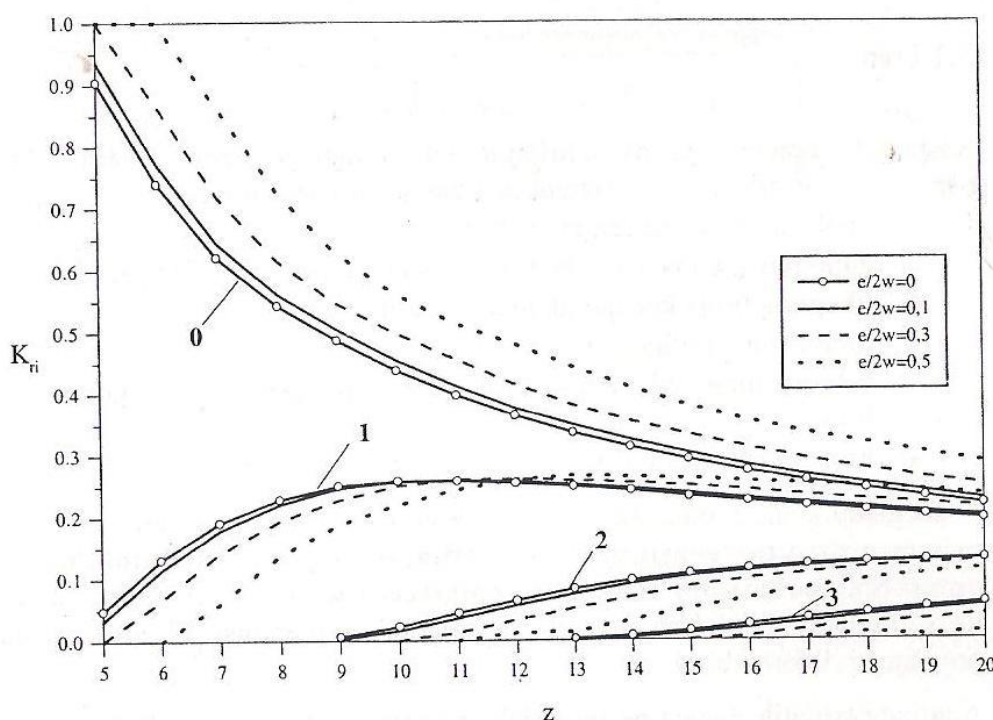
4.3 Утицај унутрашњег радијалног зазора

У случају геометријски идеалног лежаја ($\Delta h_i = 0$) са унутрашњим радијалним зазором фактор расподеле спољашњег радијалног оптерећења на котрљајна тела може се представити изразом 4.4.:

$$K_{ri} = \frac{\left(\cos(i\gamma) - \frac{e}{2w}\right)^{3/2} \cos(i\gamma) \Phi(\delta_i)}{\left(1 - \frac{e}{2w}\right)^{3/2} + 2 \sum_{j=1}^n \left(\cos(j\gamma) - \frac{e}{2w}\right)^{3/2} \cos(j\gamma) \Phi(\delta_j)} \quad (4.4)$$

$$\Phi(\delta_i) = \begin{cases} 1, & \cos(i\gamma) > \frac{e}{2w} \\ 0, & \cos(i\gamma) \leq \frac{e}{2w} \end{cases} \quad (4.5)$$

На основу (Израз 4.4.) може се закључити да вредност фактора расподеле оптерећења на котрљајна тела геометријски идеалног лежаја са унутрашњим радијалним зазором оптерећеног спољашњим радијалним оптерећењем зависи од: укупног броја котрљајних тела z ; унутрашњег радијалног зазора e ; и релативног радијалног померања прстенова лежаја w под дејством спољашњег оптерећења (Слика 4.3.).

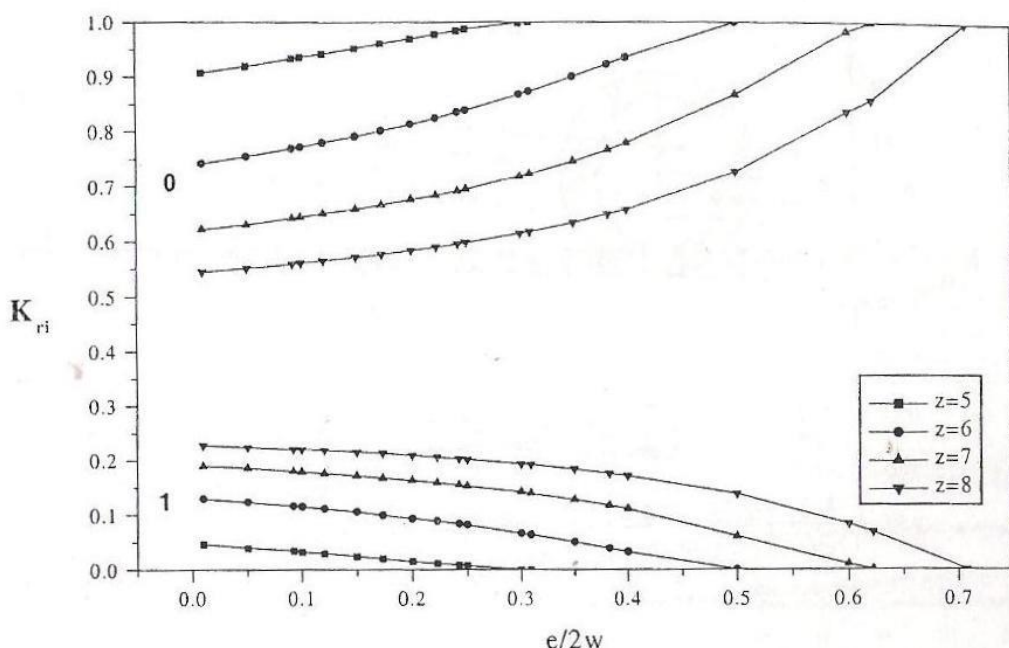


Слика 4.3. Зависност фактора расподеле оптерећења од укупног броја котрљајних тела за различите вредности унутрашњег радијалног зазора

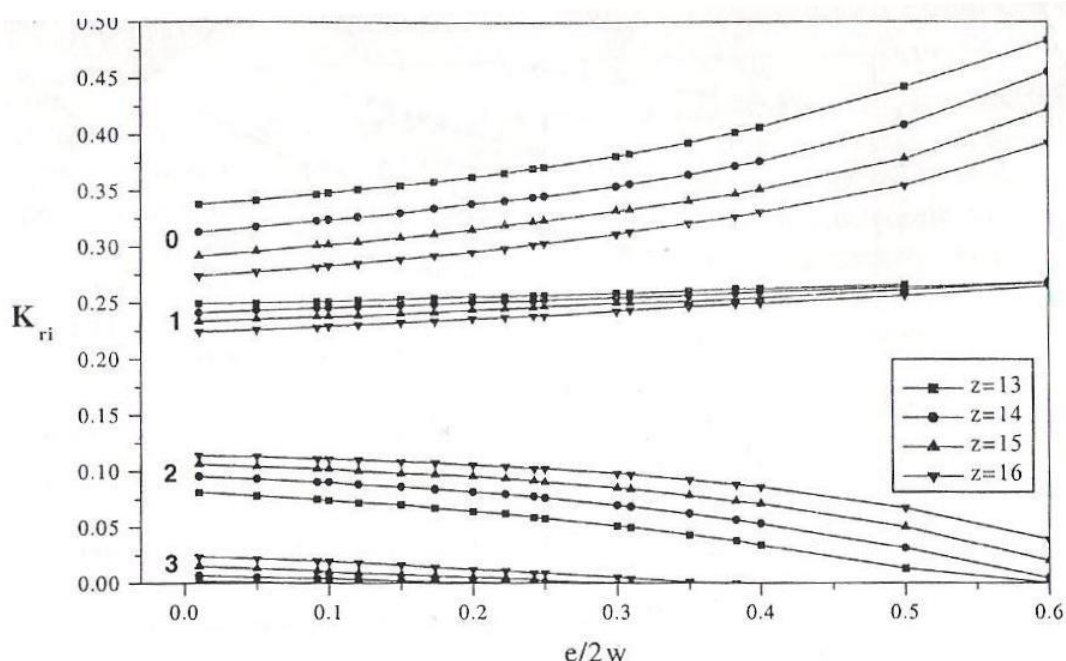
На дијаграму (Слика 4.3.) приказана је зависност фактора расподеле оптерећења на котрљајна тела радијално оптерећеног лежаја са унутрашњим радијалним зазором од укупног броја котрљајних тела у лежају, за различите вредности односа унутрашњег радијалног зазора и релативног померања прстенова $e/2w$, за случај ангажовања свих котрљајних тела у теоријској зони оптерећења. Ако се дате карактеристике упореде са карактеристикама теоријске расподеле оптерећења код лежаја са нултим унутрашњим радијалним зазором, може се закључити да присуство зазора не утиче значајно на карактер расподеле оптерећења при релативно малим вредностима односа $e/2w$ ($e/2w < 0,1$). Међутим, са повећањем вредности $e/2w$, повећава се и степен неравномерности расподеле оптерећења.

Са повећањем унутрашњег радијалног зазора, оптерећење најоптерећенијег („0“-тог) котрљајног тела се повећава. На рачун тога, оптерећење осталих котрљајних тела се смањује. При томе, градијент промене оптерећења опада са повећањем укупног броја котрљајних тела, до достизања неког карактеристичног укупног броја котрљајних тела. При томе ће оптерећење посматраног котрљајног тела бити приближно исто, без обзира на величину зазора. У том случају, посматрано котрљано тело преноси део спољашњег оптерећења одређен теоријском расподелом за нулти радијални зазор и не учествује у прерасподели оптерећења са повећањем вредности унутрашњег радијалног зазора.

На сликама 4.4. и 4.5. приказани су дијаграми зависности фактора расподеле оптерећења од величине $e/2w$, за различите вредности укупног броја котрљајних тела у лежају. На основу датих дијаграма, може се константовати да се са повећањем односа $e/2w$ повећава и неравномерност расподеле оптерећења на котрљајна тела лежаја. То се манифестује повећањем фактора расподеле оптерећења „0“-тог, најоптерећенијег котрљајног тела и адекватном променом фактора расподеле оптерећења осталих котрљајних тела из теоријске зоне оптерећења.



Слика 4.4. Дијаграм зависности фактора расподеле оптерећења од вредности унутрашњег радијалног зазора лежаја за укупан број котрљајних тела у лежају $z=5, 6, 7, 8$



Слика 4.5. Дијаграм зависности фактора расподеле оптерећења од вредности унутрашњег радијалног зазора лежаја за укупан број котрљајних тела у лежају $z=13, 14, 15, 16$

Упоредном анализом посматраних дијаграма, може се константовати да је градијент промене фактора расподеле оптерећења у функцији односа $e/2w$, највећи у случају најмањег теоријског броја котрљајних тела у зони оптерећења, због прерасподеле оптерећења између мањег броја активних котрљајних тела. Затим се смањује, са повећањем броја котрљајних тела ангажованих у преношењу спољашњег оптерећења. Градијент промене фактора расподеле оптерећења за поједина котрљајна тела приближно је константан.

При одређеним критичним вредностима односа $e/2w$, долази до растеређења котрљајних тела непосредно испод меридијанске равни. Спољашње оптерећење се прерасподељује између осталих котрљајних тела. Услед сужења зоне оптерећења, повећава се градијент промене фактора расподеле оптерећења преосталих активних котрљајних тела. Са даљим повећавањем унутрашњег радијалног зазора, растеређују се сва котрљајна тела, осим „0“-тог котрљајног тела, све до појаве изразито неравномерне расподеле оптерећења. Тада целокупно спољашње радијално оптерећење носи само једно котрљајно тело.

5. РАДНИ ВЕК КОТРЉАЈНОГ ЛЕЖАЈА У ФУНКЦИЈИ РАСПОДЕЛЕ ОПТЕРЕЋЕЊА НА КОТРЉАЈНА ТЕЛА

Радни век котрљајног лежаја, изражен милионима обртаја, може се одредити на основу израза 5.1.:

$$L = \left(L_i^{-\frac{10}{9}} + L_e^{-\frac{10}{9}} \right)^{-\frac{9}{10}} \quad (5.1)$$

L_i - радни век покретног (најчешће унутрашњег) прстена,

L_e - радни век непокретног (најчешће спољашњег) прстена.

Израз 5.1 не садржи компоненту радног века котрљајних тела, јер је његов утицај на укупни радни век лежаја занемарљив.

Радни век прстена лежаја јесте функција односа носивости прстена F_c и еквивалентног оптерећења прстена F_{ekv} (Израз 5.2.):

$$L_{i(e)} = \left(\frac{F_{e,i(e)}}{F_{eq,i(e)}} \right)^3 \quad (5.2)$$

Носивост прстенова је сложена функција геометријских карактеристика лежаја. Она се може одредити на основу израза 5.3:

$$F_{c,i(e)} = A \left(\frac{2f_{i(e)}}{2f_{i(e)}-1} \right)^{0,41} \frac{(1\pm\gamma)^{1,39}}{(1\pm\gamma)^{1,3}} \gamma^{0,3} Z^{-\frac{1}{3}} \quad (5.3)$$

$$f_{i(e)} = \frac{r_{i(e)}}{D_K}, \quad \gamma = \frac{D_K}{D_m},$$

A – константа;

$r_{i(e)}$ - полупречник профила стазе котрљања унутрашњег (спољашњег) прстена;

D_K - пречник котрљајног тела;

D_m - подеони пречник лежаја.

Због незнатних разлика у геометрији стаза котрљања спољашњег и унутрашњег прстена, може се претпоставити релација (Израз 5.4.):

$$F_{c,i} \approx F_{c,e} = F_c = \text{const} \quad (5.4)$$

На основу формуле (Израз 5.1.), (Израз 5.2.) и претпоставке (Израз 5.4.), може се написати израз за радни век лежаја (Израз 5.5.):

$$L = F_c^3 \left(F_{eq,i}^{\frac{10}{3}} + F_{eq,e}^{\frac{10}{3}} \right)^{-\frac{9}{10}} \quad (5.5)$$

Lundberg је експериментално установио да се неравномерно распоређено спољашње радијално оптерећење може са довољно тачношћу заменити еквивалентним средњим кубним оптерећењем прстенова, представљеног следећим изразима:

$$F_{eq,i} = \left(\frac{1}{Z} \sum_{k=1}^Z F_k^3 \right)^{\frac{1}{3}} \quad F_{eq,e} = \left(\frac{1}{Z} \sum_{k=1}^Z F_k^{\frac{10}{3}} \right)^{\frac{3}{10}} \quad (5.6)$$

У преношењу спољашњег радијалног оптерећења истовремено учествује само део од укупног броја котрљајних тела лежаја. Зато се изрази могу написати у облику:

$$F_{eq,i} = \left(\frac{1}{Z_s} (F_0^3 + 2 \sum_{j=1}^n F_j^3) \right)^{\frac{1}{3}} \quad F_{eq,e} = \left(\frac{1}{Z_s} \left(F_0^{\frac{10}{3}} + 2 \sum_{j=1}^n F_j^{\frac{10}{3}} \right) \right)^{\frac{3}{10}} \quad (5.7)$$

Оптерећење најоптерећенијег котрљајног тела F_0 и осталих котрљајних тела у зони оптерећења F_j се може изразити у функцији од спољашњег радијалног оптерећења F_r , (Израз 5.8.):

$$F_0 = K_{r0} F_r$$

$$F_j = \frac{K_{rj}}{\cos(j\gamma)} F_r \quad (5.8)$$

На основу формула (Израз 5.5.), (Израз 5.7.) и (Израз 5.8.) добија се израз за радни век котрљајног лежаја у функцији од фактора расподеле оптерећења на котрљајна тела (Израз 5.9.):

$$L = \left(\frac{F_c}{F_r} \right)^3 \left(\left(\frac{1}{Z_s} \left(K_{r0}^3 + 2 \sum_{j=1}^n \left(\frac{K_{rj}}{\cos(j\gamma)} \right)^3 \right) \right)^{\frac{10}{9}} + \frac{1}{Z_s} \left(K_{r0}^{\frac{10}{3}} + 2 \sum_{j=1}^n \left(\frac{K_{rj}}{\cos(j\gamma)} \right)^{\frac{10}{3}} \right) \right)^{-\frac{9}{10}} \quad (5.9)$$

Увођењем израза за фактор расподеле оптерећења на котрљајна тела лежаја у израз 5.9., добија се коначна формула за радни век лежаја, у функцији од унутрашњег радијалног зазора (Израз 5.10.):

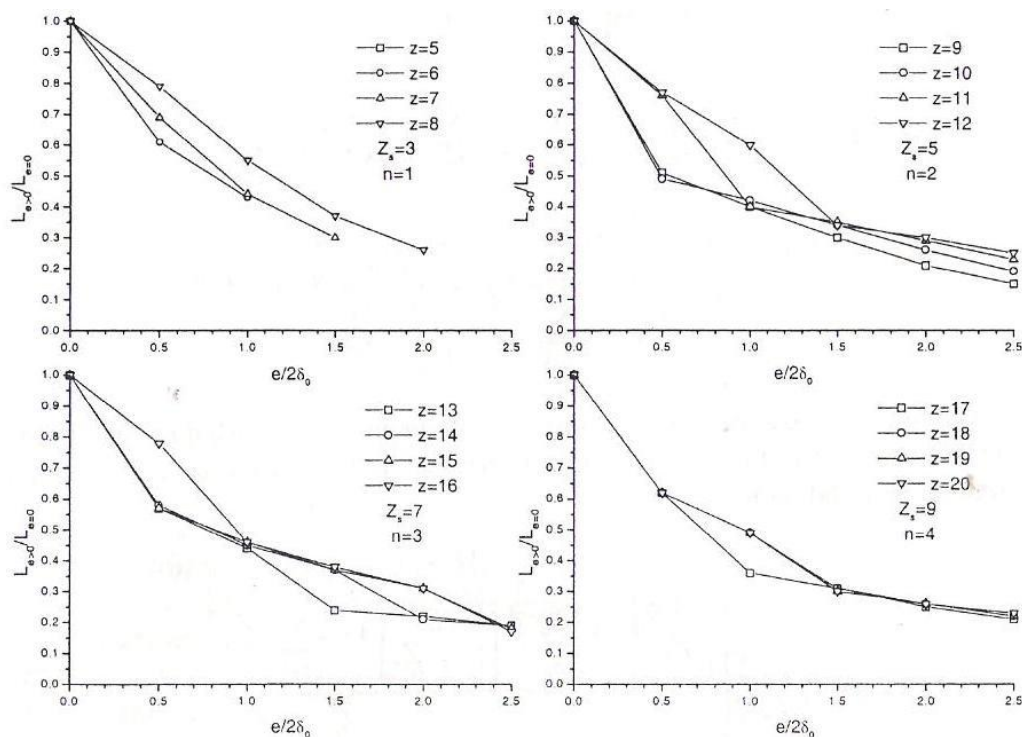
$$L = \left(\frac{F_c}{F_r} \right)^3 \left(\frac{\left(\frac{1}{Z_s} \left(1 + 2 \sum_{j=1}^n E_j^{\frac{9}{2}} \right) \right)^{\frac{10}{9}} + \frac{1}{Z_s} \left(1 + 2 \sum_{j=1}^n E_j^5 \right)}{\left(1 + 2 \sum_{j=1}^n E_j^{\frac{3}{2}} \cos(j\psi) \right)^{\frac{10}{3}}} \right)^{-\frac{9}{10}} \quad (5.10)$$

$$E_j = \cos(j\gamma) + \frac{e}{2\delta_0} (\cos(j\gamma) - 1) - \text{помоћна величина.}$$

На основу израза 5.9. и израза 5.10. може се константовати да радни век лежаја зависи од носивости прстенова лежаја, интезитета спољашњег оптерећења, величине унутрашњег зазора, укупне контактне деформације на месту најоптерећеније куглице, укупног броја куглица, као и броја истовремено активних куглица у зони оптерећења [4].

6. УТИЦАЈ УНУТРАШЊЕГ РАДИЈАЛНОГ ЗАЗОРА НА РАДНИ ВЕК ЛЕЖАЈА

Зависност радног века лежаја од односа величине унутрашњег радијалног зазора и укупне контактне деформације најоптерећеније куглице за различите вредности укупног броја куглица и броја истовремено активних куглица које учествују у преношењу оптерећења, приказана је дијаграмима на слици 6.1. У циљу елиминације утицаја интензитета, разматрана је промена релативне вредности радног века у односу на радни век лежаја са нултим унутрашњим радијалним зазором.

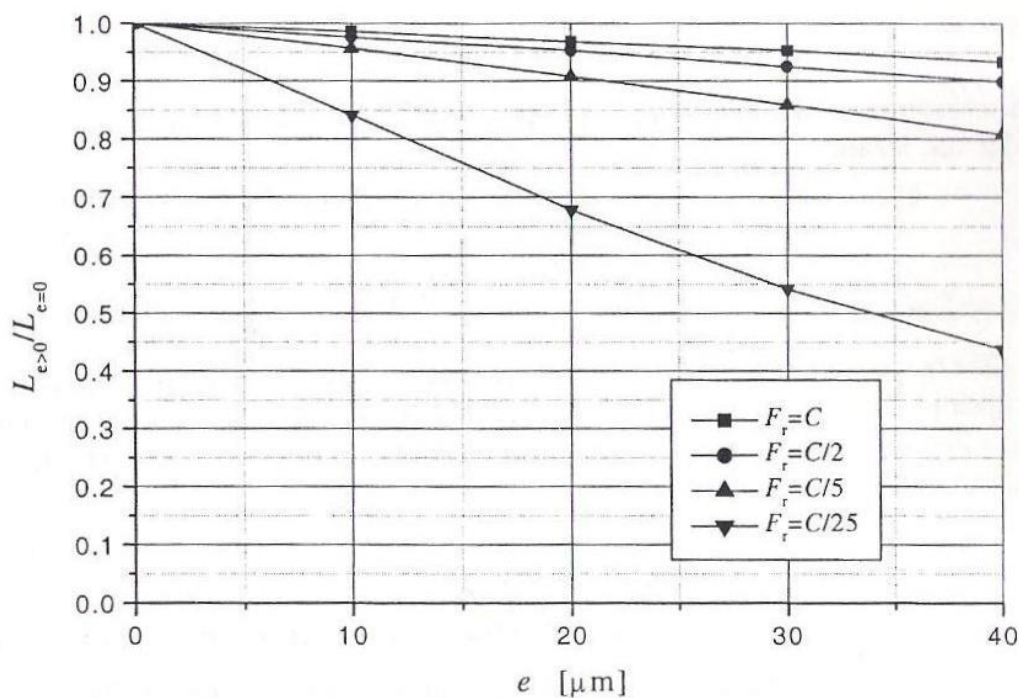


Слика 6.1. Радни век котрљајног лежаја у функцији од унутрашњег радијалног зазора

Према дијаграмима на слици 6.1. евидентна су већа расипања вредности за случајеве лежаја са мањим бројем куглица. Са повећањем броја куглица у лежају, криве конвергирају ка некој средњој вредности. Са повећањем унутрашњег радијалног зазора, сужава се зона оптерећења и повећава неравномерност расподеле оптерећења. Оптерећење најоптерећеније куглице се повећава. То условљава смањење радног века лежаја. Градијент смањења

радног века лежаја је знатно мањи у области $0 < e/2\delta_0 \leq 1$, него у области $1 < e/2\delta_0 \leq 2$. У првој области смањење радног века износи 50%, док је у другој области око 20%. Када је однос $e/2\delta_0 > 2$, радни век скоро да не зависи од унутрашњег радијалног зазора.

Осетљивост радног века лежаја од унутрашњег радијалног зазора је већа у области мањих зазора. То је условљено учешћем свих котрљајних тела испод меридијанске равни у преношењу спољашњег оптерећења. У случајевима већих зазора, када је број котрљаних тела која учествују у преношењу оптерећења мањи од теоријске вредности, утицај зазора на расподелу оптерећења и радни век лежаја се смањује. Радни век котрљајног лежаја не зависи од унутрашњег радијалног зазора у случају граничне – изразито неравномерне расподеле оптерећења. Тада само једно котрљајно тело учествује у преношењу спољашњег оптерећења (Слика 6.2.).



Слика 6.2. Зависност радног века котрљајног лежаја од спољашњег радијалног оптерећења и унутрашњег радијалног зазора лежаја 6306 ($C=28,1 \text{ kN}$; $z=8$; $z_s = 3$)

7. ЗАКЉУЧАК

Године инжењерског истраживачког рада су биле потребне за постизање квалитета данашњих лежајева. Квалитетан лежај је врло тешко произвести тако да је то привилегија само малог броја технолошки јаким компанија. То су унапређења конструкције на микро нивоу, чиме се постижу побољшања у расподели оптерећења и напона у лежају.

Котрљајни лежајеви су најосетљивији елемент скоро сваког машинског система. То је једноставно последица њиховог начина функционисања. Оштећење на неком делу лежаја утиче на радни век котрљајног лежаја и доводи до његовог застоја, а затим, и до застоја комплетног склопа или машинског система у који је он уграђен.

.Расподела оптерећења на котрљајна тела лежаја је неравномерна. Анализе различитих утицаја на расподелу оптерећења се могу извршити на основу математичког модела расподеле оптерећења. Основу овог модела расподеле оптерећења чини фактор расподеле оптерећења на котрљајна тела лежаја. Он изражава квантитативну карактеристику расподеле оптерећења. Наиме, ако је за задате радне услове (спољашње оптерећење и унутрашња геометрија лежаја) позната вредност фактора расподеле оптерећења сваког котрљајног тела лежаја, онда је у потпуности дефинисана расподела оптерећења, у квалитативном и квантитативном смислу.

Литература

- [1] Ашоња А., Адамавић Ж., Глигорић Р., Избор и димензионисање котрљајних лежаја, Пољопривредни факултет, Нови Сад , 2005.
- [2] Николић В., Машински елементи-теорија, прорачун примери, Машински факултет, Крагујевац, 2004.
- [3] Милтеновић В., Машински елементи, Машински факултет, Ниш, 2009.
- [4] Ристивојевић М., Расподела оптерећења, зупчасти парови и котрљајни лежаји, Београд, 2002.
- [5] Стефановић С., Утицај еластичних деформација и унутрашњег радијалног зазора на статичку носивост котрљајног кугличног лежаја, Магистарски рад, Крагујевац, 2004.
- [6] <http://www.designparticles.com/ljubex/index.php?lang=sr>