

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: 24/2010

Слободан Р. Гарић

Радијална клизна лежишта

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 да објасни карактеристике, примену, поделу, подмазивање и др. клизних лежишта са посебним освртом на радијална клизна лежишта. Такође, треба да обради и носивост радијалних клизних лежишта као и конструкционе облике истих. На крају, кроз практичне примере, кандидат треба да покаже начин прорачуна носивости и топлотне стабилности анализираних лежаја.

Препоручена литература:

- [1] Николић В., Машински елементи – теорија, прорачун, примери, Машински факултет, Крагујевац, 2004.
- [2] Милентовић В., Огњановић М., Машински елементи – III, елементи за обртно кретање, течности и гасове, Машински факултет, Ниш, Београд, 1995.

Крагујевац, Септембар 2013. год.

ментор:

Др Зорица Ћорђевић, доцент

Резиме:

У оквиру рада извршено је прикупљање, систематизација и анализа података везаних за радијална клиза лежишта. Описан је њихов развој, карактеристике и поделе, односно суштина радијалних клизних лежишта. Такође је описан и поступак одређивања носивости ових лежаја услед различитих облика додирних површина. Анализом материјала је показан њихов велики утицај на избор и животног века лежишта, док нам конструкциони облици показују разноликост, различите облике и њихове дизајне у широкој примени коју остварују. Такође су приказани и примери прорачуна који играју битну улогу у избору радијалних клизних лежишта.

Кључне речи: Радијални клизни лежај, постељница, рукавац, клизање, подмазивање.

Abstract:

In this work, there were collected, systematized and analyzed data related to the radial slide bearings. The work described their development, characteristics and divisions, and the essence of radial sliding bearing. It is also described the procedure of determining the carrying capacity of the bearings due to different contact surfaces. Analysis of the material was shown their great influence on the selection and bearing life, while constructional types show the variety, the different forms and their designs are widely used which they realized. It also presents examples and calculations which play an important role in the selection of radial sliding bearings.

Key words: Radial plain bearing, brass, axle spindle, slidings, lubrication.

Садржај

1 Увод	5
2 Карактеристике, подела и подмазивање лежишта	6
2.1 Карактеристике и подела	6
2.2 Подмазивање лежишта	8
2.2.1 Стање у клизном споју	8
2.2.2 Клизање полуоквашених површина	9
2.2.3 Клизање оквашених површина	9
2.2.4 Хидростатичко подмазивање лежаја	11
2.2.5 Хидродинамичко подмазивање лежаја	12
2.2.6 Канали за развођење мазива	16
2.2.7 Трење	20
2.3 Мазива и системи за подмазивање	23
2.3.1 Улога и врсте мазива	23
2.3.2 Својства течних мазива	25
2.3.3 Довођење мазива и системи за подмазивање	28
3 Материјали клизних лежаја	32
3.1 Опште напомене	32
3.2 Материјали рукаваца	33
3.3 Материјали за израду постелица	34
4 Носивост радијалних клизних лежишта	37
4.1 Носивост радијалних лежаја са полуоквашеним површинама	39
4.2 Носивост радијалних лежаја са хидродинамичким подмазивањем	42
4.3 Загревање радијалних клизних лежишта	45
4.3.1 Губици енергије услед трења	45
4.3.2 Одвођење топлоте природним хлађењем лежаја	45
4.3.3 Одвођење топлоте принудним хлађењем лежаја	46
5 Конструкционо извођење радијалних клизних лежишта	49
5.1 Облици лежишта	49
5.2 Облици лежишних чаура	51
6 Примери прорачуна клизних лежишта	54
7 Закључак	57
Литература	58

1 Увод

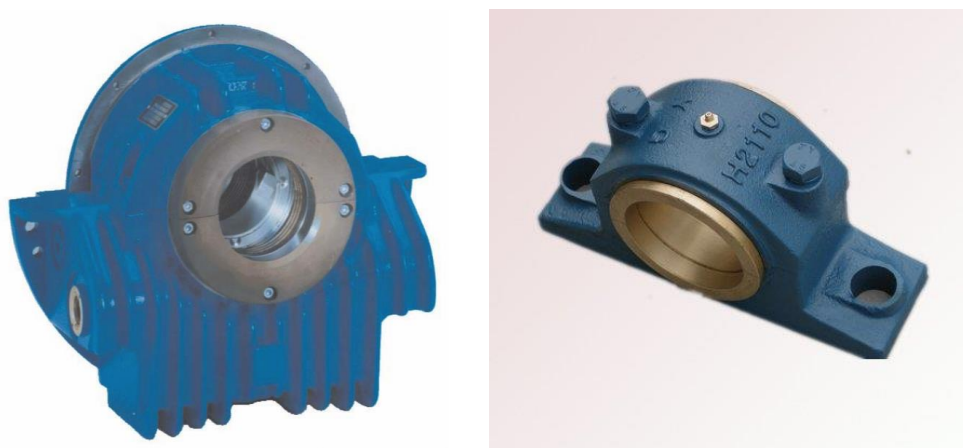
Прва сазнања о лежајима потичу из II века пре Христа, када су се камени блокови “транспортивали” на дрвеним ваљцима у древном Египту. Најстарији пронађен клизни лежај је из доба неолита, на алату који је служио за бушење рупа у стенама [8]. Аристотел је у својим радовима дискутовао о тзв. Теорији отпора ваљања. Да би се смањило трење које је трошило доста енергије, тадашњи “лежајеви” су били подмазивани. Као мазиво су коришћена биљна уља, а касније и животињска маст, која се касније побољшавала минералним смесама за згушњавање. Археолози су налазили античке кочије које су имале осовине са тадашњим мазивом. Плиније из Рима (23-73 год. Нове ере) је направио списак животињских масти и минералних смеса које су се користиле као мазиво за тадашња превозна средства [8]. Тачка топљења им је била око 50°C.

Данашња клизна лежишта представљају покретни спој два или више делова машина остварен клизањем. Рукавац се налази у додиру са постељицом лежишта тј. контакт се остварује трењем клизања. Главна улога им је преношење оптерећења, као и ослањање или вођење других делова машина. Иако су данас скоро у потпуности потиснута од стране котрљајних лежаја, ипак су се клизна лежишта одржала у неким веома специфичним машинским апликацијама. Свој рад заснивају на већ поменутом трењу клизања са свим пропратним предностима и недостацима. Конструкција им је веома једноставна. Састоји се од постоља и поклопца, у који се смешта постељица (једноделна или дводелна) и обртни елемент (вратило или осовина), међусобно спојени завртњима. За клизна лежишта је од најбитнијег значаја подмазивање између обртног тела и постељице. Стога се мазиво сматра елементарним конструктивним делом без којег клизна лежишта не би могла радити у економском погледу. Добро подмазивање доводи до хидродинамичког пливања рукавца што је још један од услова рада ових лежишта. Такође, посебну пажњу треба обратити још и на: ексцентричност, зазор између рукавца и постељице, брзину обртања рукавца, вискозност мазива... [6].

2 Карактеристике, подела и подмазивање лежишта

2.1 Карактеристике и подела

Код клизних лежаја релативно кретање делова, уз истовремено преношење оптерећења, остварује се посредством клизања. Основна подела клизних лежаја је на **радијалне**, који преносе попречне силе, и **аксијалне** који преносе уздужне силе. Радијални и аксијални лежај су приказани на (сл. 2.1). Постоји и конструкциона варијанта радијалног и аксијалног клизног лежаја, такозвани **аксијално-радијални клизни лежај**, којим се изводи аксијално фиксирани ослонац вратила и на тај начин добија компактна конструкција. Ови лежаји могу да се примене и код праволинијског кретања, на пример као вођице код разних алата и уређаја. Најважнији део клизног лежаја је клизни пар. Код радијалних лежаја клизни пар чине рукавац вратила и лежишна чаура (постељица) (сл 2.1. лево). Код аксијалних лежаја (сл 2.1. десно) клизни пар чине покретни прстен везан за вратило и непокретни прстен вазан за кућиште. Основне димензије радијалног клизног лежаја су пречник рукавца d , унутрашњи пречник D и дужина постељице лежаја B . Код аксијалног клизног лежаја основне димензије су спољашњи и унутрашњи пречник клизног прстена. И у једном и у другом случају у клизном пару постоји носећи слој мазива (уљни филм) .



Слика 2.1. Радијални (лево) и аксијални (десно) клизни лежај

Због низа предности које имају котрљајни лежаји су у знатној мери потисли из примене клизне лежаје. Међутим, истраживања извршена последњих година довела су до значајног усавршавања клизних лежаја.

Од низа предности клизних лежаја посебно треба истаћи следеће:

- Основна предност клизних лежаја је њихова носивост. Ако се код клизног лежаја обезбеде услови хидродинамичког пливања, онда им је скоро неограничен радни век. Ово је битно код рада на високим учестаностима обртања, где котрљајни лежаји због ограничене носивости и радног века не могу да се примене.
- Због велике површине клизања по којој се додирују рукавац и постељица, а који су раздвојени уљем, клизни лежаји имају могућност пригушења буке и вибрације, односно могу да приме знатна ударна оптерећења у току рада.
- Клизни лежаји могу бити израђени као једноделни и дводелни, док котрљајни могу бити само једноделни. То им омогућава примену у случајевима где лежаји због монтаже морају да се раде из два дела, као код коленастих вратила.
- Разлика у цени израде између појединачне и серијске производње је далеко мања код клизних него код котрљајних лежаја. Котрљајни лежаји су конкурентнији са ценом у односу на клизне само у случају серијске производње.
- Још једна предност односи се на компактност конструкције. За исту носивост димензије клизних лежаја су мање у односу на котрљајне.

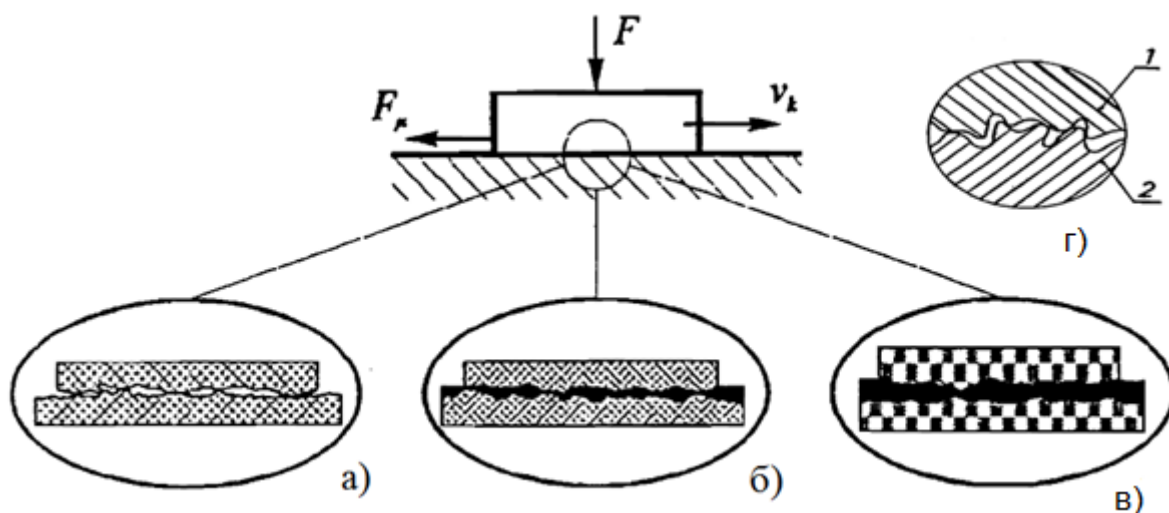
Поред основне поделе на радијалне и аксијалне, клизни лежаји се могу поделити и на следећи начин:

1. Према начину извођења улежиштења клизни лежаји могу бити **фиксирани**, који преносе и аксијалне и радијалне силе, и **слободни**, који преносе само радијалне силе и дозвољавају извесна померања у аксијалном правцу.
2. Према начину стварања притиска у слоју уља између клизних површина, деле се на **хидродинамичке** и **хидростатичке**.
3. Према способности прилагођавања деформацијама вратила у ослонцима могу бити крута (**неподесива**) и зглобна (**подесива**).
4. Према стању додирних површина деле се на лежаје са **течним** и лежаје са **полутечним** или **сувим** (мешовитим) трењем.

2.2 Подмазивање лежишта

2.2.1 Стање у клизном споју

Клизни спој је додир две релативно покретне површине машинских делова између којих делују отпори клизања. При кретању тела 1 по подлози 2 (сл. 2.2) између додирних површина јавља се сила трења $F_{\mu} = \mu F$ која зависи од вредности спољашњег оптерећења F и коефицијента трења μ . Смањење трења постиже се подмазивањем додирних површина. Коефицијент трења много утиче на стање у клизном споју и не зависи од величина додирних површина, већ од карактеристика материјала и храпавости додирних површина [2].

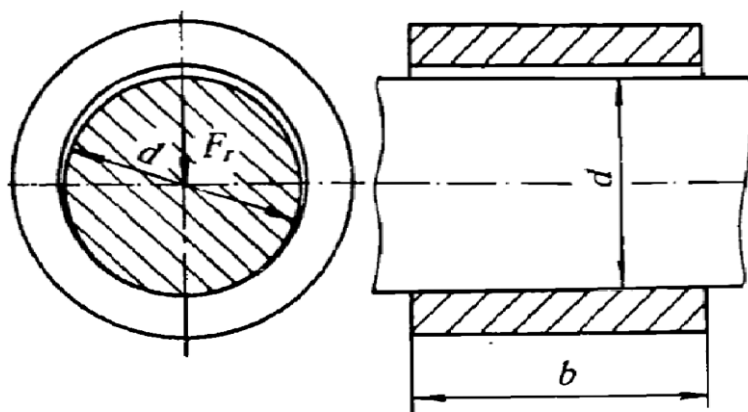


Слика 2.2 Стање у клизном споју, суво трење (а), полутечно (б), течно трење (в) и макроскопски изглед површине у додиру (г)

У општем случају додирне површине ових релативно покретних делова могу бити **неподмазане** и **подмазане**. Неподмазане површине представљају оне површине где долази до **сувог трења**, тј. површине у споју се непосредно додирују преко сувих металних делова. Коефицијент трења има овде велику вредност $\mu \geq 0,3$. Услед повећаног трења, већи део механичне енергије претвара се у топлотну, хабање додирних површина је изражено што доводи до оштећења и разарања истих. Овај случај није дозвољен код клизних лежишта. Клизање у подмазаној средини може да се одвија у два правца: да буде у **полуоквашеној** средини где уље продире само у простор између неравнина, смањујући при том коефицијент трења, а други је да се нађе у **потпуно оквашеној** средини где између клизних средина се налази флуид који их раздваја. Клизање у потпуно оквашеној средини можемо поделити на клизање по **хидродинамичком** и **хидростатичком** принципу [2], [4],...

2.2.2 Клизање полуоквашених површина

Оваква врста клизања настаје када су клизне површине делимично у непосредном додиру, делимично раздвојене мазивом. Мазиво практично попуњава само удубљења додирних површина као што се види на сл. 2.3. Клизне површине и даље се местимично додирују преко врхова њихових површинских храпавости (сл. 2.2,б) где је прекинута веза између слоја мазива. Мазиво делимично прихвата оптерећење рукавца. У оваковом стању није значајна вискозност мазива већ његова прионљивост. Овакво клизање се остварује при релативно малој брзини клизања (покретање и заустављање машине). Такође велико оптерећење (велики притисак на додирним површинама) и недовољна количина мазива условљавају трење полуоквашених површина. Наиме, под дејством оптерећења (оптерећење је велико - велика сила) истисне се мазиво са додирних површина. С друге стране, оштре ивице тела 1 (сл.2.2,г) скидају мазиво при клизању по површини 2 па су додирне површине полуоквашене. Примери оваквог клизања додирних површина су: кулисе, зглавкасте везе и др. Оваква трења се називају и **полутечна трења**. Коефицијент трења има мању вредност у односу на случај сувог трења, $\mu < 0,3$. При полутечном трењу присутно је атхезивно и абразовно хабање [5].



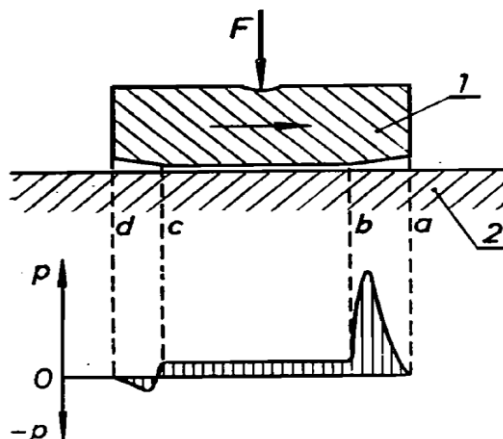
Слика 2.3 Клизни лежај са клизањем полуоквашених површина

2.2.3 Клизање оквашених површина

Оваква врста клизања подразумева раздвајање клизних површина слојем уља (уљним филмом), (сл.2.2,в). Дебљина уљног филма је већа од збира храпавости и свих других одступања додирних површина. Овакво подмазивање зове се још и потпуно подмазивање, а оно се постиже када је додирна површина 1 мало закошена на крајевима (сл. 2.4). При довољној брзини кретања тела 1 расте притисак у слоју мазива и тело 1 се одваја од подлоге 2. Овај притисак, који зависи од брзине кретања и од вискозности уља, омогућиће да тело 1 заплива по уљу, тј. да се потпуно одвоји од подлоге. Тиме ће се постићи потпуно подмазивање

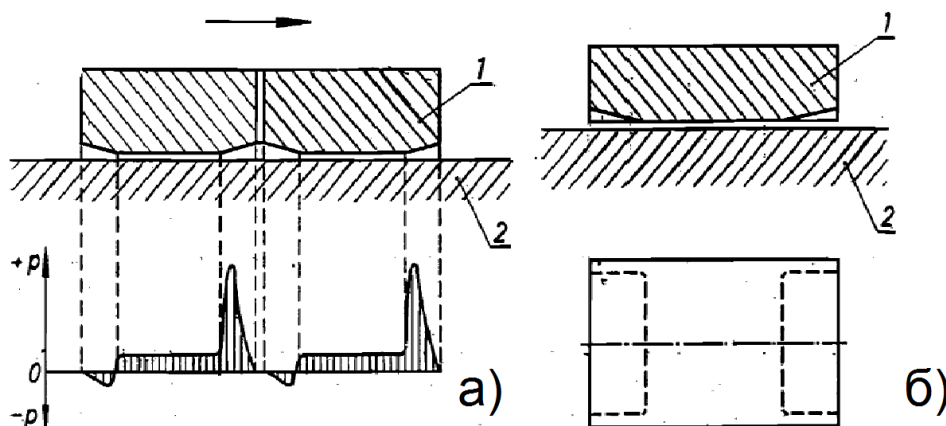
са најповољнијим стањем трења оквашених површина; метални делови 1 и 2 неће се тада више непосредно додиривати. Отпори клизању, у овом случају, сразмерни су хидродинамичким отпорима у уљном филму и не зависе од материјала клизних површина. Величина отпора се повећава са повећањем брзине клизања. Коефицијент трења је знатно мањи, и до 100 пута ($\mu=0,005 \dots 0,001$).

Промену притиска на појединим местима показује дијаграм на сл. 2.4. Притисак је на нивоу a једнак нули па полазећи одатле он расте, уколико се смањује пресек „процепа“ у који се уље потискује услед кретања тела 1, да би непосредно пре ивице b достигао највећу позитивну вредност, па одмах затим опао до извесне вредности која се практично не мења од b до c . Од места c до места d пресек процепа се повећава, притисак у слоју уља опада, постаје чак и негативан и најзад је поново једнак нули у тачки d . Због тога у области негативног притиска може наступити и сисање, свакако у незнатној мери.



Слика 2.4. Расподела притисака у слоју мазива при кретању тела удесно

Кад су оптерећења јача, а покретно тело дуже, снабдеће се оно већим бројем нагнутих равни одн. процепа, да би се обезбедило тзв. „динамичко пливање“ и потпуно подмазивање као на сл. 2.5. Према томе, да би се постигло динамичко пливање потребно је да мазиво буде довољно вискозно, да брзина клизања буде довољно велика и да се процеп у коме је уље, сужава у смеру кретања.

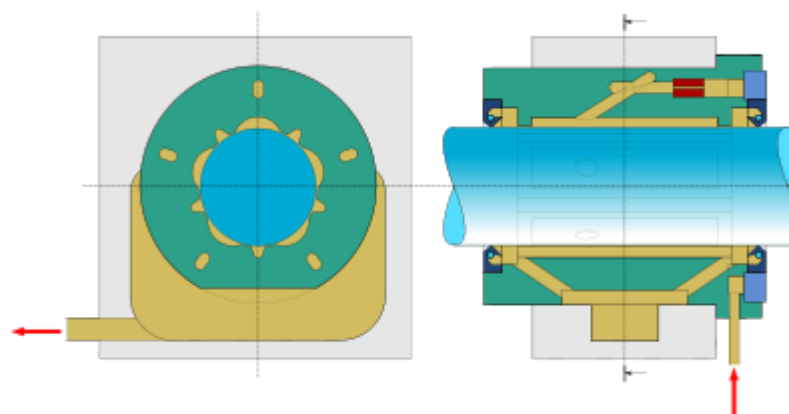


Слика 2.5 Расподела притиска у слоју мазива код дужег покретног тела са две нагнуте равни (а), и бочне бране дуж нагнутих равни (б)

Дијаграми на сликама 2.4 и 2.5 важе за један смер кретања; за супротан смер кретања дијаграм би имао симетрично супротан облик. Нагиб процепа је врло мален, готово не приметан; он треба да износи између 1 : 500 при мањим брзинама и јачим притисцима и 1 : 200 при већим брзинама и слабијим притисцима. Ивице морају бити благо заобљене. Процеп са нагибом се не протеже по целој ширини покретног тела (сл. 2.5,б) тј. он има бране са стране да не би уље бочно измицало, због чега би притисак ослабио [4]. Ове бране могу бити изостављене при слабијим оптерећењима и већим брзинама.

2.2.4 Хидростатичко подмазивање лежаја

Подмазивање клизних површина код хидростатички подмазиваних лежаја, врши се убацивањем уља под високим притиском директно између клизних површина. Клизне површине се раздвајају за неколико стотих делова милиметра независно од тога да ли се оне међусобно крећу или мирују. Притисак уља остварује се помоћу пумпе која се налази изван лежишта, а уље се одговарајућим цевима доводи у сам лежај. Уље се доводи у одговарајуће плитке коморе (сл.2.6) које су израђене у постелици лежаја. Погодно конструкционо извођење лежаја је са неколико комора, са независним доводом уља и са могућношћу регулације количине доведеног уља, односно притиска, у свакој од њих. То може да се изведе преко одговарајуће пригушнице (сл.2.6). У самим коморама влада притисак p_0 , али између клизних површина смањује се приближно на половину. Притисак у коморама зависи од величине и правца спољашњег оптерећења.



Слика 2.6. Хидростатички подмазивани радијални клизни лежај

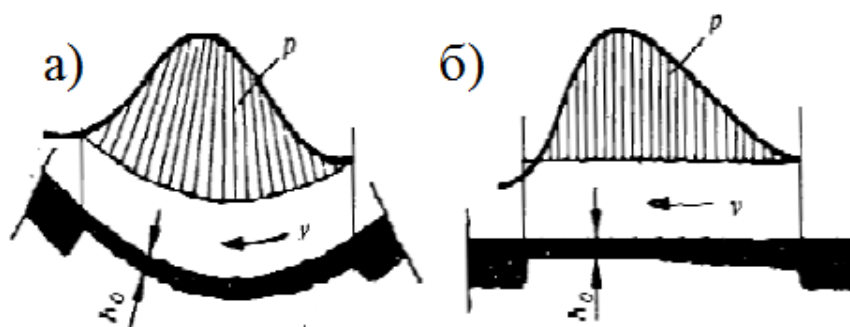
Хидростатички лежаји могу да пренесу врло велика оптерећења. Регулација притиска у појединим коморама омогућује да се утиче на тачност положаја вратила у току рада. Код хидростатички подмазиваних клизних лежаја, клизне површине су увек раздвојене слојем уља независно од режима рада (покретање, заустављање, промена смера окретања, нижа учестаност

обртања, нестационални режими рада). Због тога су отпори трења врло мали, а радни век практично неограничен. Носивост ових лежаја је такође велика, а имају и високу тачност вођења. И поред овако изванредних карактеристика хидростатички клизни лежаји немају велику примену. Целокупна инсталација везана за пумпу, доводни и регулациони систем као и за заптивање чини их јако скупим. Сложене су конструкције и захтевају велики простор за уградњу пратеће опреме.

2.2.5 Хидродинамичко подмазивање лежаја

Код хидродинамички подмазиваних клизних лежаја стварање носећег уљног слоја могуће је само уколико се клизне површине крећу релативно једна у односу на другу довољно великом брзином и уколико су постављене под одговарајућим углом (положај клина). Брзина релативног кретања клизних површина (брзина клизања) једнака је обимној брзини рукавца v .

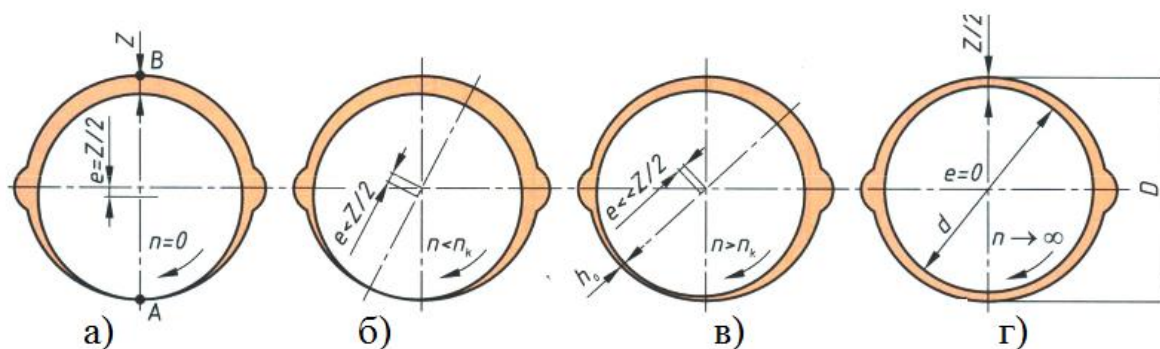
Уље, које приања на клизне површине, бива захваћено од покретне површине и убачено у клинасти зазор (сл.2.7). Са повећањем брзине клизања повећава се и притисак уља у клинастом зазору и достиже свој максимум нешто испод минималне дебљине уљног слоја h_0 . Затим се притисак уља смањује до нуле, а понекад може да се јави чак и подпритисак. Распоред притиска је исти без обзира да ли су површине равне (сл.2.7,а) или закривљене (сл.2.7,б) [4].



Слика 2.7 Хидродинамичко пливање цилиндричних (а) и равних (б) клизних површина

Овакав модел можемо разматрати на хидродинамичком пливању радијалних клизних лежаја. Под дејством спољашњег оптерећења – силе F , рукавац вратила 2 у стању мировања $n=0$ додирује постелицу 1 дуж заједничке изводнице двају цилиндара (сл. 2.8,а). С обзиром да зазор у лежају износи $f = D - d$, то се оса рукавца O и оса постелице C налазе ексцентрично на растојању $e = f/2$.

Зазор између рукавца и постелице има клинасти облик, а целокупни простор испуњен је уљем.



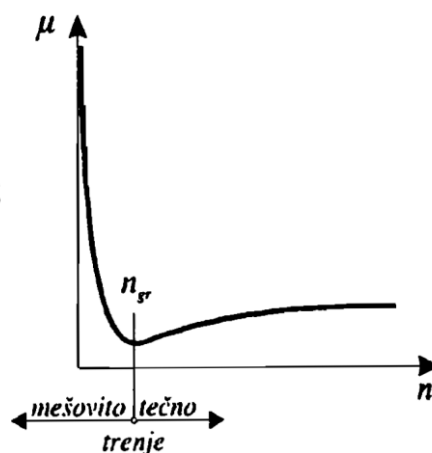
Слика 2.8 Шематски приказ положаја вратила у стању мировања (а)
и са порастом учестаности обртања (б, в, г)

Када вратило почне да се окреће јављају се отпори трења у смеру супротном од смера окретања вратила. У почетку је то полутечно трење, а касније прелази у мешовито трење. Слично напред описаном моделу хидродинамичког пливања, рукавац захвата пријањајуће уље и сабија га у клинасти зазор. Притисак у слоју уља се повећава тако да се вратило подиже и помера у страну (сл.2.8,б). Са повећањем брзине клизања, односно учестаности обртања рукавца, удео полутечног трења се смањује, а повећава удео течног трења. Када брзина клизања буде довољно велика између рукавца и постелице ствара се довољна дебљина уљног слоја h_0 , тако да мешовито трење прелази у течно трење (сл. 2.8,в). Ексцентричност између рукавца и постелице се смањује и износи $e = f/2 - h_0$. Учестаност обртања, у тренутку прелаза из мешовитог у течно трење, назива се **гранични број обртаја** n_g а брзина клизања – **гранична брзина клизања** v_{gr} .

Због промене положаја рукавца мења се и нападна тачка спољашње радијалне силе (F). Овој сили супротставља се резултујућа сила притиска уља на рукавац. Између ових сила успоставља се динамичка равнотежа, тако да рукавац „плива“ у слоју уља, односно, на овај начин остварује се **хидродинамичко пливање** [2]. Даљим повећањем брзине ексцентричност се смањује (сл.2.8,г).

На (сл. 2.9) приказана је зависност између коефицијента трења μ и учестаности обртања рукавца n . Ова зависност назива се и Стрибекова (Stribeck) крива. На почетку обртања између рукавца и постелице јавља се полутечно трење, па је и коефицијент трења велики.

Са повећањем удела течног трења смањује се и коефицијент трења, тако да најмању вредност има у тренутку остваривања хидродинамичког пливања.



Слика 2.9 Зависност између коефицијента трења (μ) и учестаности обртања (n_{gr})

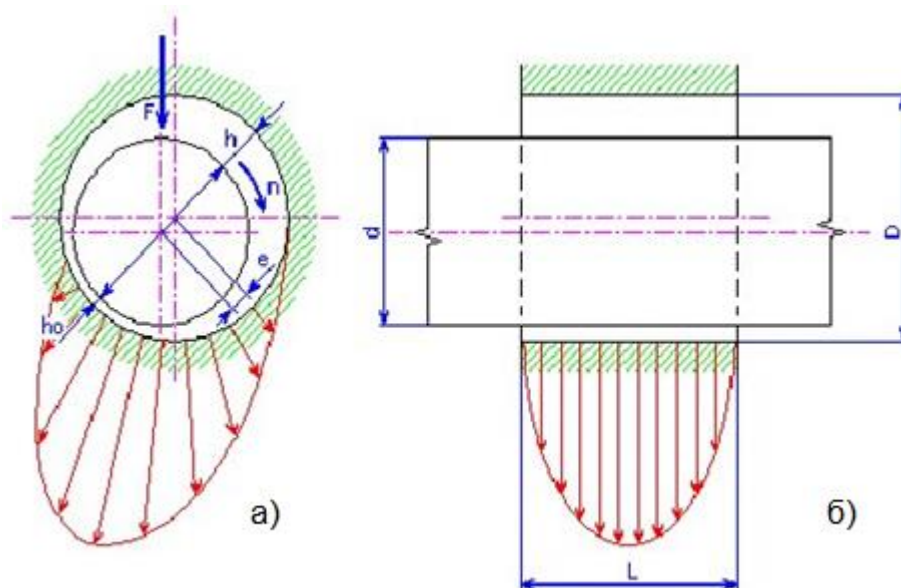
Гранична учестаност обртања n_{gr} одговара минималној вредности коефицијента трења. Даљим повећањем учестаности обртања изнад n_{gr} повећава се и коефицијент трења μ , што је последица отпора трења које се јавља у самом уљу. При томе се повећава и температура уља.

На сл. 2.10,а приказана је расподела притиска у носећем слоју уља за радијални клизни лежај са кружно цилиндричним обликом постелице, који је оптерећен константном силом F . У самој постелици обично су израђени и жлебови за довод уља. Притисак у клинастом слоју уља јавља се одмах иза жлеба Е, а затим се повећава и достиже свој максимум нешто испред места са минималном дебљином уљног филма h_0 . Иза ове тачке, посматрајући у смеру окретања вратила, притисак опада, тако да иза места са минималном дебљином уљног филма има вредност нула, а понекад може и да се јави и подпритисак уља. Укупно подручје носећег уљног филма налази се на обиму обухваћеном углом φ . Уколико је ово подручје веће, већа је и носивост лежаја.

Канали за довод уља не смеју бити постављени у зони где се остварује носећи уљни филм, јер би то нарушило стварање притиска у уљном слоју.

У принципу важи да је хидродинамичко пливање лакше остварити уколико је мање оптерећење F и зазор f , и уколико су већи радна учестаност обртања n и вискозност уља η .

Распоред притиска по дужини лежаја приказан је на сл. 2.10,б . Због бочног истицања уља највећи притисак влада на средини лежаја, док према ивицама опада до нуле.



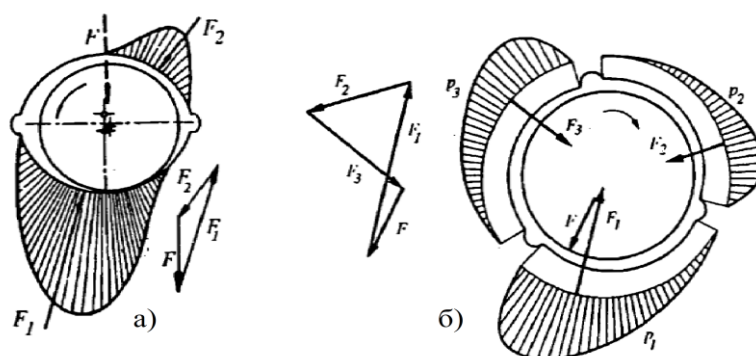
Слика 2.10 Расподела притиска у уљном слоју по обиму рукавца (а) и по ширини лежаја (б)

Напред приказану расподелу имају само клизни лежаји одговарајуће тачности израде и код којих је постигнута задовољавајућа паралелност оса рукавца и постелице.

Описано хидродинамичко пливање вратила остварено је само са једним носећим клинастим слојем мазива. Смањивањем ексцентричности код оваквог извођења смањује се и носивост лежаја, а вратило лако губи стабилност положаја. Поред тога стварање притиска у уљном слоју условљено је деловањем спољашњег оптерећења или тежине, јер само у том случају постоји ексцентрични положај рукавца и постелице, односно, зазор има клинасти облик. Ови недостаци отклањају се применом лежаја са **вишеповршинским** постелицама, чиме се постиже већа стабилност у раду и прецизније вођење вратила.

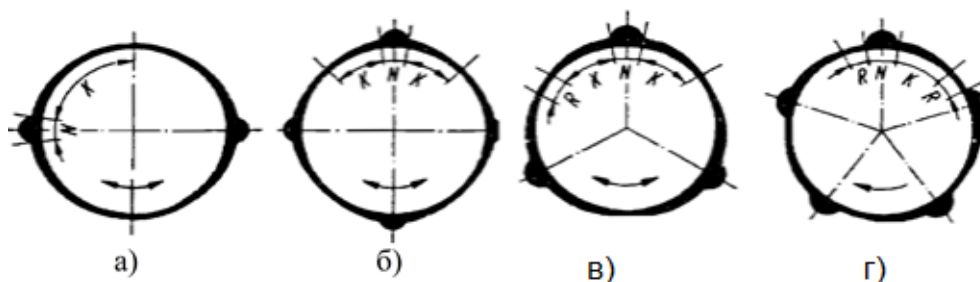
Један од начина конструкционе измене облика постелице је да се повећа зазор у правцу нормалном на правац деловања спољашње силе, а смањи у правцу деловања силе (отвор постелице има облик лимуна). У таквом лежишном зазору формираће се два клинаста носећа слоја мазива (сл. 2.11,а). Ови лежајеви називају се **двоповршинским**. Динамичка равнотежа лежаја остварује се тако што је резултујућа сила притиска на ове две површине по интензитету и правцу једнака спољашњој сили. С обзиром да се овде ради о полигону сила то постављање два носећа клина има стабилизирајуће дејство.

На сл. 2.11,б приказана је **тропараметарска** постелица. Код динамичке равнотеже вратила спољашња сила F је у равнотежи са резултантом парцијалних сила F_1 , F_2 , и F_3 .



Слика 2.11 Динамичка равнотежа рукавца код лежаја са двоповршинском (а) и троповршинском (б) постелицом

Могући облици вишеповршинских постелица приказани су на сл.2.12. Клизни лежаји са вишеповршинским постелицама примењују се код турбинских вратила, код алатних машина за тачно вођење вретена, односно свуда где се ради са високом учестаношћу обртања и прецизним вођењем.



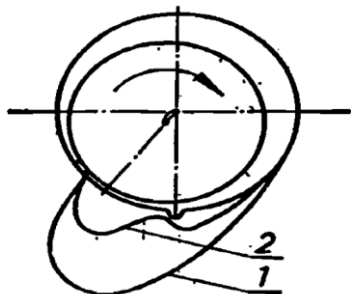
Слика 2.12 Могући облици вишеповршинских постелица за оба смера обртања (а), (б), (в) и за један смер обртања (г) Ознаке: К – дужина клина ; N – ширина жлеба ; R – подручје константног зазора

2.2.6 Канали за развођење мазива

Канали у лежишним постелицама имају задатак да омогуће, да се мазиво доведе у лежиште, разводи у лежишту и одводи из њега. Да ли ће се канали уопште предвидети и какви ће бити када су потребни зависи од начина подмазивања, од облика и положаја површина клизања, од врсте релативног кретања рукавца и постелице, од брзине обртаја и од величине, смера, положаја и променљивости резултантне силе која делује на лежиште. На дијаграму на сл.2.10 а види се како расте притисак при динамичком пливању рукавца у лежишту [10].

Природно је да ће овакав континуални пораст притиска у слоју уља бити ометен, ако се на неком месту нагло промени пресек процепа у коме је мазиво. Тако, на пример, уздужни

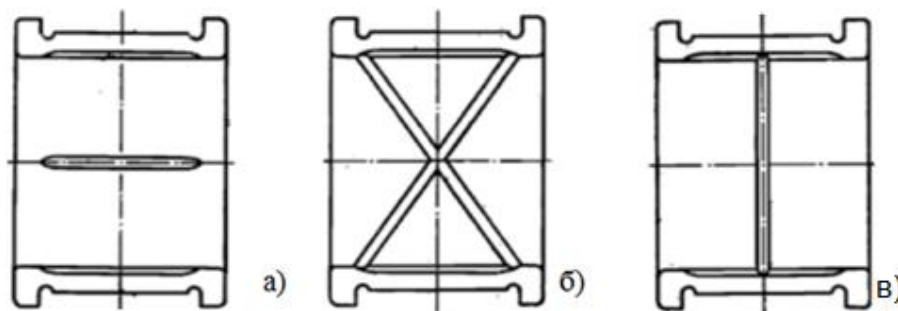
канал, урезан у постелици, повећава пресек процепа па ће ту наступити нагло опадање притиска у слоју уља (сл 2.13), јер ће уље овим каналом истицати из лежишта. После тога, притисак ће поново расти јер ће преостали део уља улазити у процеп, али неће достићи ону вредност коју би имао када не би било канала (крива 1 на сл.2.13).



Слика 2.13 Опадање притиска у слоју мазива због уздужног канала (1-крива притиска без уздужног канала лежишта, 2- крива притиска са уздужним каналом)

Према томе, у лежишту са уздужним каналом у оптерећеном делу постелице неће бити обезбеђено динамичко пливање рукавца. Стога уздужне канале не треба правити у оптерећеном делу постелице јер су штетни.

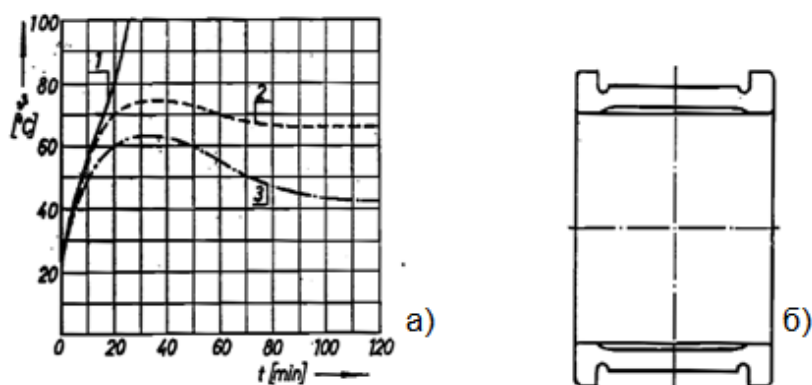
Постелица на сл 2.14,а, посматрана у смеру деловања силе, је лоша. Дијагонални канали (сл.2.14,б) спајају места вишег притиска са местима нижег притиска. Због тога настаје изједначавање тј. снижавање притиска у слоју уља па је и оваква постелица лоша. Попречни канали у виду прстена (сл.2.14,в) утичу такође неповољно на процес подмазивања. Попречни канали смањују активну дужину постелице, олакшавају аксијално излажење уља, па уље које доспева у овакав канал добрим делом бива истиснуто кроз исти и не учествује у подмазивању. Стога треба избегавати и попречне канале.



Слика 2.14 Поглед на оптерећени део постелице снабдевен лоше израђеним каналима

Из свега овога можемо закључити да у оптерећеном делу постелице не сме бити канала за развођење мазива ако се жели да буде обезбеђено потпуно подмазивање. Канали би проузроковали трење полуоквашених површина, а последице би биле: повишење температуре лежишта, појачано трење и хабање и умањена моћ ношења лежишта. Резултати испитивања које је извршио Falc (Falz) са лежиштем у облику полупостелице од графитисаног оловног белог метала, показани су на сл. 2.15. Карактеристике лежишта су: $L=90\text{mm}$, $d=45\text{mm}$, $p=2,6\text{ MPa}$ и $n=2000\text{ min}^{-1}$. Дијаграм представља зависност температуре лежишта $\varphi^{\circ}\text{C}$ од времена

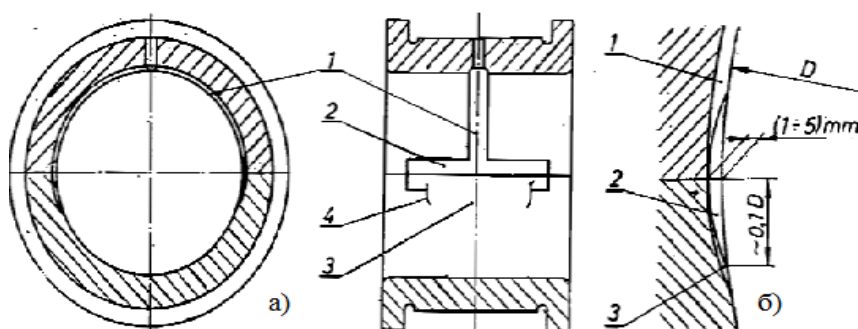
трајања рада лежишта t . Из дијаграма се види да је за лежиште повољније када у постелици нема канала; температура лежишта је тада најнижа. Када су у постелици канали, температура лежишта је повишена.



Слика 2.15 Утицај канала у постелици на температуру лежишта (а) (крива 1- температура за постелицу као на сл.2.14,ц), крива 2- за постелицу као на сл. 2.14,б), крива 3- за постелицу као на сл.2.15,б)) и правилно израђена постелица (б)

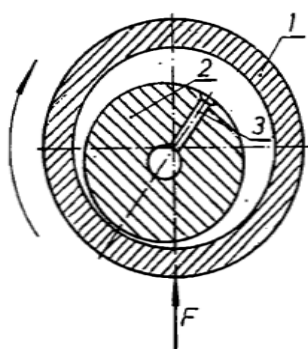
Правилно конструисану оптерећену страну постелице показује сл.2.15,б.То је доња постелица дводелног лежишта. На раставку постелице налазе се канали у којима се скупља уље које се доводи кроз неоптерећену горњу постелицу које бива захваћено од рукавца и допремано у процеп. У смеру обртања поменути канал треба постепено да се улива у површину клизања па се зато изводи са што је могуће већим полупречником заобљења R на прелазу (сл.2.16,а).

Често је корисно (за мале конструктивне карактеристике $= L/d$) да акумулациони канал буде ужи у средини него на крајевима. Мазиво треба уводити у лежиште на неоптерећеном месту постелице. Питање увођења мазива лако се може решити када се правац оптерећења не мења или мења у мањим границама. Када се правац оптерећења мења у широким границама, треба тачно одредити неоптерећену или најмање оптерећену област постелице па ту одводити мазиво.

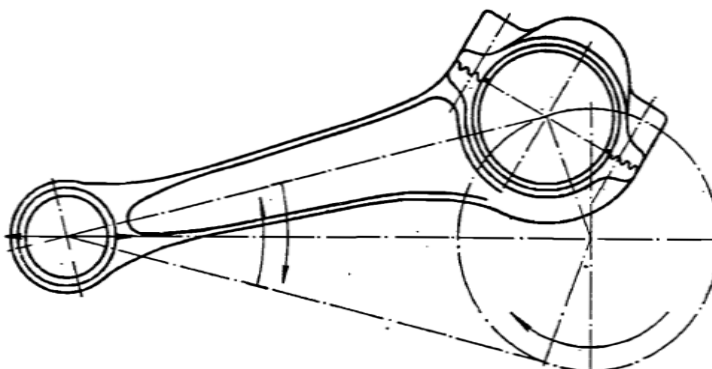


Слика 2.16 (а) Доводни (1) и акумулациони (2) канал за уље са проширењем у средини (3) и постепеним пролазом (4) у површини клизања и (б) прелаз акумулационог канала у површини клизања (1- горња, 2- доња постелица, 3- почетак прелазног заобљења полупречника (R))

У случајевима када рукавац стоји а постелица се окреће, канал за довођење мазива налази се у рукавцу (сл.2.17). Важно је водити рачуна о смеру обртања рукавца као и о положају при решавању питања довођења мазива у лежиште.



Слика 2.17 Довођење мазива кроз рукавац
за случај да се лежиште обрће
(1- лежиште, 2- рукавац, 3-канал за
додавање мазива)

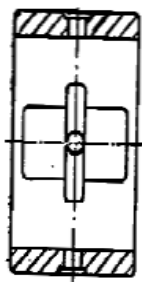


Слика 2.18 Моторна полука код које
оптерећење у лежишту осцилује

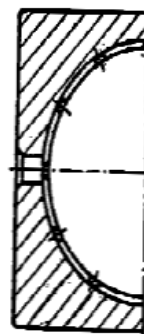
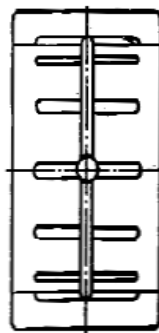
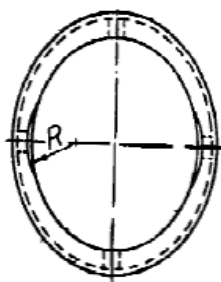
Канали за подмазивање рукавца потребни су понекад и у оптерећеном делу постелице као нпр. када се рукавац осцилаторно креће у лежишту, када је обимна брзина сувише мала, мања од $0,5 \div 0,7 \text{ m/s}$, када је лежиште изложено врло јаким ударима, врло променљивим оптерећењима и врло јаким оптерећењима. У овим случајевима, у лежишту влада трење полуоквашених површина и подмазивање није потпуно. Процес подмазивања рукавца који осцилује друкчији је него код рукавца који се обрћу. Пример пружа лежиште мотора полуке у укрсној глави, која се обрће час у једном час у другом смеру па се због тога не може остварити потпуно подмазивање (сл.2.18). Приликом премештања рукавца са једне на другу страну, појављују се удари. Ради смањивања хабања потребно је ублажити ударе и смањити трење клизања. И једну и другу улогу треба мазиво да прими на себе. Слој уља делује у тренутку удара као одбојник. Приликом премештања рукавца уље се сабија и тако ублажава удар; при томе притисак у слоју уља расте утолико више, уколико је више отежан излазак уља из простора између постелице и рукавца. Слој уља служи једновременно и као еластични одбојник и као средство за подмазивање. Подмазивање није потпуно, хабања увек има у мањој или већој мери.

Рукавац, када се премешта са једне стране постелице на другу, сабија слој уља настојећи да га истисне из лежишта. У том тренутку, када се у оптерећеном делу постелице ствара повећани притисак, у неоптерећеном делу ствара се потпритисак.

Зато треба омогућити да уље каналом пређе из оптерећеног у неоптерећени део лежишта (сл. 2.19).



Слика 2.19 Лежиште рукавца изложеног оптерећењу које осцилује



Слика 2.20 Канали у лежишту оптерећеном са једне стране, за рукавац са осцилаторним кретањем

Ипак се не може избећи изванредан губитак уља. Због тога и због појаве „сисања“ у неоптерећеном делу лежишта у тренутку премештања положаја „оптерећене зоне“ треба обезбедити довођење довољне количине мазива. Када не би било добољно мазива, улазио би ваздух у простор сисања. Да би обе стране лежишта могле бити снабдеване уљем, доводни отвор треба да је у средини (сл.2.19). Најнеповољније је за процес подмазивања када рукавац који осцилује налаже увек на једну страну постелице, тј. када рукавац није изложен силама променљивог смера. Потпуно подмазивање се не може постићи у том случају. Трење је увек у области полуоквашених површина, хабање је осетно. Важно је да лежиште буде тачно подешено према рукавцу. У оваквом случају, често је тешко обезбедити трење полуоквашених површина са релативно повољним коефицијентом трења.

2.2.7 Трење

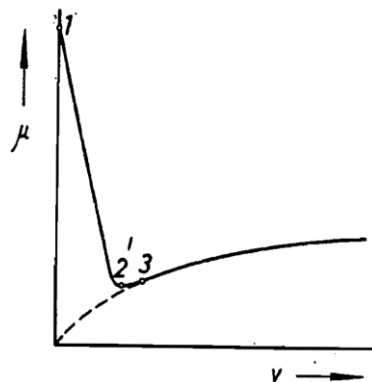
При обртању рукавца у лежишту увек постоји отпор трења који се у суштини знатно разликује по томе да ли се ради о трењу оквашених или полуоквашених површина. Рачунски коефицијент трења може се одредити из образаца за момент отпора на основу мерења.

$$T_{\mu} = \mu F d/2 \quad (2.1)$$

Где је μ коефицијент трења, F оптерећење рукавца, а d пречник рукавца.

Карактер зависности коефицијента трења μ од периферне брзине рукавца v (или његове угаоне брзине ω , или минутног броја обртаја n) за одређено мазиво и одређени специфични притисак p показује дијаграм на сл.2.21. У тренутку када кретање почиње, тј. када је брзина једнака нули, у лежишту влада трење сувих површина; коефицијент трења μ има највећу вредност, означену на дијаграму тачком 1. Уколико брзина расте коефицијент трења опада, док при некој брзини не падне на минимум, означеног на дијаграму тачком 2. Област 1 – 2 је област трења полуоквашених површина. Тачка 2 обележава стање у коме почиње

одвајање рукавца од постелице. Ту је гранична област која се протеже још мало даље до тачке 3, док слој мазива не постане толики да се постигне потпуно подмазивање, одн. сигурно одвајање металних површина рукавца и постелице. Од тачке 3 почиње права област трења потпуно оквашених површина у којој коефицијент трења расте са повећањем брзине.



Слика 2.21 Зависност коефицијента трења μ од брзине обртања

Број обрта који одговара тачки 3 може се према Falsu, израчунати на основу следећег израза:

$$n_g = \frac{0,61 \cdot p \cdot \psi \cdot h}{d \cdot \eta}, s^{-1} \quad (2.2)$$

где је: n_g – гранични број обрта при коме почиње динамичко пливање, p, Pa – средњи специфични притисак $p = F/(dL)$, ψ – релативни зазор $\psi = (D - d)/d$, h, m – дебљина слоја мазива у најдужем делу процепа, $h \approx (D-d)/4$, d, m – пречник рукавца, и $\eta, Pa \cdot s$ – динамичка вискозност мазива. Ако је број обрта већи од овако прорачунатог може се остварити динамичко пливања – уколико су остали услови испуњени.

Коефицијент трења у стању потпуног подмазивања зависи од угаоне брзине обртања ω, s^{-1} , средњег специфичног притиска p, Pa , динамичке вискозности употребљеног уља $\eta, Pa \cdot s$, оквашене површине и ексцентрицитета e , односно дебљине слоја мазива на најужем месту (сл. 2.10,а) и износи по Falsu.

$$\mu = K \sqrt{\frac{\eta \omega}{p}} \quad (2.3)$$

где је K коефицијент који зависи од ексцентричности e и конструктивне карактеристике φ ; може се усвојити да је просечно $K \approx 1$. Новија испитивања показују да коефицијент трења зависи од релативног зазора ψ и релативне дебљине слоја мазива $h/(R-r)$, као и конструктивне карактеристике φ . Ова зависност дата је образцем.

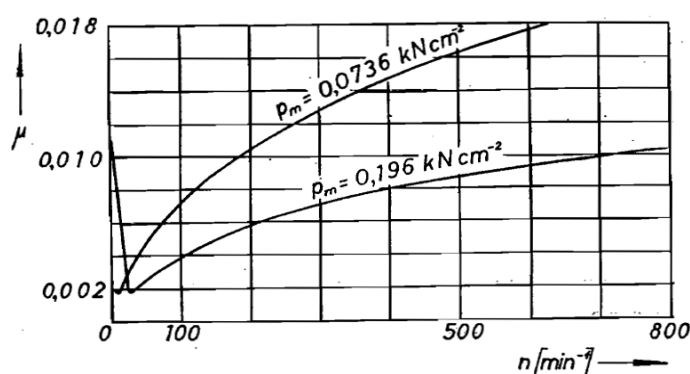
$$\mu = K_1 \psi \sqrt{\frac{h}{R-r}} \quad (2.4)$$

Gде је K_1 фукција која зависи од релативне дебљине слоја мазива и конструктивне карактеристике.

Из образаца (2.3) следи да коефицијент трења расте са повећањем вискозности и брзине, а опада са повећањем средњег специфичног притиска. Према обрасцу (2.4) изгледа да је та зависност сасвим другачија. Како, мађутим, дебљина слоја мазива зависи од притиска,

вискозност и угаоне брзине, ова два образаца нису у супротности, али се ипак резултати добијени по једном и другом образцу не подударају.

Дијаграм на сл.2.22 показује зависност коефицијента трења од минутног броја обртаја и специфичног притиска, коју је добио Стрибек (Stribeck) испитивањем лежишта са постелицом од белог метала пречника $d = 70 \text{ mm}$, и дужине $L=70 \text{ mm}$ са уљем вискозности $\eta = 0,18 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ при температури $\vartheta=25^\circ\text{C}$. Са дијаграма се види да је коефицијент трења мањи када је специфични притисак већи. Минимум коефицијента трења приближно је једнак ма какав био специфични притисак. Положај минимума коефицијента трења зависи од средњег специфичног притиска; он се помера удесно – тј. у смеру већег минутног броја обртаја, када је специфични притисак већи.



Слика 2.22 Зависност коефицијента трења μ од минутног броја обртаја n и средњег површинског притиска p_m ($1 \text{ kN/cm}^2 = 10^7 \text{ Pa}$)

На коефицијент трења утиче и температура, јер вискозност зависи од температуре; када је температура виша, вискозност је слабија. При вишој радној температури треба бирати вискозније мазиво, иако то повлачи повећање коефицијента трења да не би рукавац зашао у област трења полуоквашених површина због слабије вискозности. Ово се очигледно види и из образаца за гранични број обрта n_g .

И други чиниоци утичу на коефицијент трења, нарочито трење полуоквашених површина: материјал и конструкција лежишта, зазор, квалитет мазива, врста обраде рукавца и постелице итд.

У сваком лежишту у почетку рада, приликом убрзавања, и при завршетку рада, приликом заустављања машине, рукавац мора пролазити кроз краткотрајно стање трења полуоквашених површина; тада, у тим периодима, наступа увек јаче трење и трошење металних површина рукавца, а нарочито лежишта.

2.3 Мазива и системи за подмазивање

2.3.1 Улога и врсте мазива

Основна улога мазива је олакшање клизања належућих површина и смањење њиховог трошења. Мазива треба да имају следеће особине: да добро приањају уз материјал, да имају довољну вискозност како би се образовао уљни филм између површина налегања, да не нагризају материјал, да их штите од корозије, да хладе додирне површине циркулацијом уља, да обезбеђују термичку стабилност лежишта, преносе притисак, штите површине од нечистоћа и воде, амортизују ударна и вибрациона оптерећења, итд. [4].

Као мазиво клизних лежаја користе се:

- **Течна мазива (уља)**

Зависно од основне сировине и начина производње уља за подмазивање можемо поделити у две основне групе: **минерална** и **синтетичка**.

Минерална уља добијају се прерадом нафте вакуум дестилацијом и рафинацијом. Тако добијени производи називају се основна или чиста минерална уља. Њиховом даљом прерадом поступцима легирања добијају се финални производи.

Синтетичка уља добијају се хемијским поступком синтезе више органских материја. Имају већу термичку стабилност и боље мазивне карактеристике, али због високе цене у поређењу са минералним уљима имају ограничену примену. Карактеристике ових уља такође се могу побољшати поступцима легирања. Најбоље карактеристике показује синтетичко силиконско уље. Примењује се за температурно подручје $-70\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +250\text{ }^{\circ}\text{C}$ са вискозношћу $\nu_{50} = 25 \dots 350\text{ mm}^2/\text{s}$.

За подмазивање клизних лежаја махом се користе рафинисана минерална уља са побољшаним својствима. Минерална уља су сложене материје које се састоје из угљоводоника различитих својстава. Овим уљима додају се адитиви против корозије, оксидације и хабања.

У циљу адекватног подмазивања од минералних уља се захтевају да поседују одређена тачно дефинисана својства. Поред вискозности од значаја су и следеће физичко хемијске карактеристике: густина, индекс вискозности, температура паљења, температура стињавања, топлотна проводљивост, специфична топлота, итд.

Индекс вискозности је фактор којим се изражава тенденција промене вискозности са променом температуре. То је број од нуле до сто који се одређује емпиријским путем. Што је индекс вискозности већи, то је тенденција промене вискозности мања.

Температура паљења је температура уља при којој се пара уља у мешавини са ваздухом пали у присуству пламена или електричне варнице.

Температура стињавања се дефинише као највиша температура на којој уља губе течљивост у датим условима испитивања. Због тога је неопходно обезбедити одговарајућу течљивост уља и при најнижим могућим температурама.

Адитиви су различите материје које се додају мазивима у циљу побољшања њихових својстава. Постоје адитиви који утичу на поједине физичке карактеристике мазива (за снижавање температуре стињавања, за спречавање паљења, за спречавања стварања пене, за повећање индекса вискозности), и адитиви који утичу на хемијске карактеристике (оксидациона стабилност, антихабајућа својства).

- **Маси**

Маси се користе за лежишта која раде са малим учестаностима обртања и прекидима у раду. Погодне су и код машина које раде при ударним оптерећењима када је немогуће остварити хидродинамичко подмазивање (лежишта пољопривредних машина, дизалица, преса и др.). Маст се дуже задржава у лежишту и штити га од прашине и нечистоће, што је и њихова предност.

- **Чврста мазива**

Чврста мазива су облика праха или пасте [4]. Веома добро приањају уз клизне површине побољшавајући клизна својства. Употребљавају се код спороходних клизних лежишта и лежишта која раде на високим температурама. Чврста мазива се наносе директно на клизне површине. Најчешће се употребљавају графит и молибдендисулфит у споју са уљима и мастима.

- **Мешавине чврстих мазива са уљима и мастима**

Ова мазива се добијају додавањем праха и уља у маси. Наноси се у танким слојевима на клизне површине. Нарочито се користе у периоду уходавања машина и уређаја.

- **Вода**

Вода се користи за подмазивање лежишта од дрвета, гуме и пластичних материјала. Применом воде постиже се боље хлађење лежишта.

- **Примена антифрикционих материјала**

Применом ових материјала за израду лежишта, престаје потреба за подмазивањем [5]. На пример, пластичне масе (полиамид, полиацетан и др.) имају *самоподмазујуће особине*. Ипак у овом случају остварује се суво трење. Коефицијент трења $\mu \leq 0,3$.

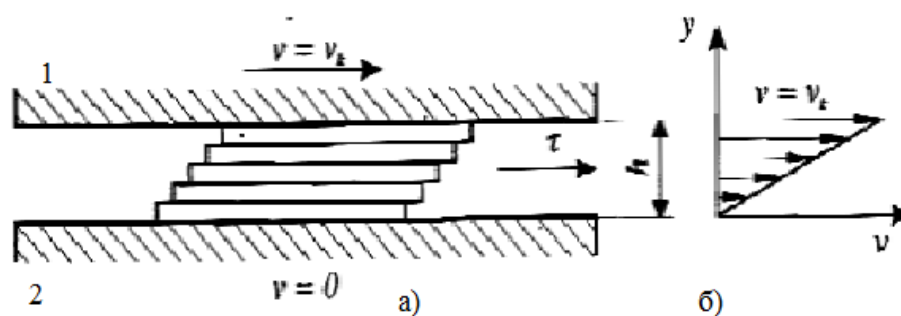
- **Ваздух, азот, угњендиоксид и др.**

Подмазивање ваздухом (аеростатичко и аеродинамичко) је могуће код брзоходних и мање оптерећених лежишта. Такав случај се среће код лежишта малих апарата и инструмената у прехранбеној и фармацеутској индустрији.

2.3.2 Својства течних мазива

Претпоставка за успешно стварање носећег уљног слоја између клизних површина је избор уља одговарајућих мазивних карактеристика. И у условима течног трења такође се јављају отпори релативном кретању клизних површина. Отпори се јављају у самом мазиву, а мера ових отпора је вискозност. Према томе вискозност може да се означи као својство флуида да се супротстави промени облика, а изражава се интензитетом тангентних напона између слојева који се међусобно релативно померају.

Слој уља изложен трењу, код хидродинамичког подмазивања може се посматрати као слој састављен од танких листића који се крећу (клизе један преко другог), (сл. 2.23,а) при кретању тела 1 по непомичној подлози 2. Између слојева мазива јавља се напрезање на смицање. Вредност напона смицања зависи од врсте мазива и разлике брзине слојева. За већи пад брзине, тангенцијални напони су већи и обрнуто. Брзина граничног слоја флуида на телу које мирује (тело 2) је $v = 0$, а на телу које се креће једнака је брзини кретања тела, $v = v_k$. Промена брзине слојева уља (флуида) између површине тела 1 и 2 је линеарна.



Слика 2.23 Померање слојева флуида између покретне и непокретне плоче (а)
и распоред брзина (б)

Према Њутновом (Newton) закону тангентни напон смицања у паралелним равнима плоча је:

$$\tau = \frac{F_t}{A} = \eta \cdot \frac{dv_k}{dy} \quad (2.5)$$

односно пропорционалан је градијенту брзине по нормали на правац кретања. Коефицијент пропорционалности η назива се динамичка вискозност и сходно образцу (2.5) износи:

$$\eta = \frac{\tau}{dv_k/dy} \quad (2.6)$$

Ако се тангентни напон изрази у N/m^2 , брзина у m/s , а y у m онда је мерна јединица динамичке вискозности:

$$1 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^{-1} = 1 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2 = 1 \text{ Pa} \cdot \text{s} \text{ (Паскал} \cdot \text{секунда)}$$

Користе се и мање јединице као *милипаскал-секунд*:

$$1 \text{ mPa} \cdot \text{s} = 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s} = 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2 = 10^{-9} \text{ N} \cdot \text{s} / \text{mm}^2$$

Поред динамичке вискозности врло често се као карактеристика мазива користи и кинематска вискозност ν , која је једнака односу динамичке вискозности η и густине уља ρ , односно:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (2.7)$$

Ако се динамичка вискозност η изрази у $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$, а густина ρ у kg/m^3 , то пошто је $1\text{N} = 1\text{kgm}/\text{s}^2$, као мерна јединица кинематске вискозности добија се m^2/s . Користи се и мања јединица $1\text{mm}^2/\text{s} = 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$. Течности које се при струјању понашају сходно изразу (2.5) називају се Њутнове течности и код њих је зависност између напона на смицање и градијента брзине смицања линеарна. Вискозност ових течности је независна од градијента брзине смицања. За одређени флуид на датој температури и притиску, вискозност Њутнових течности је стална величина.

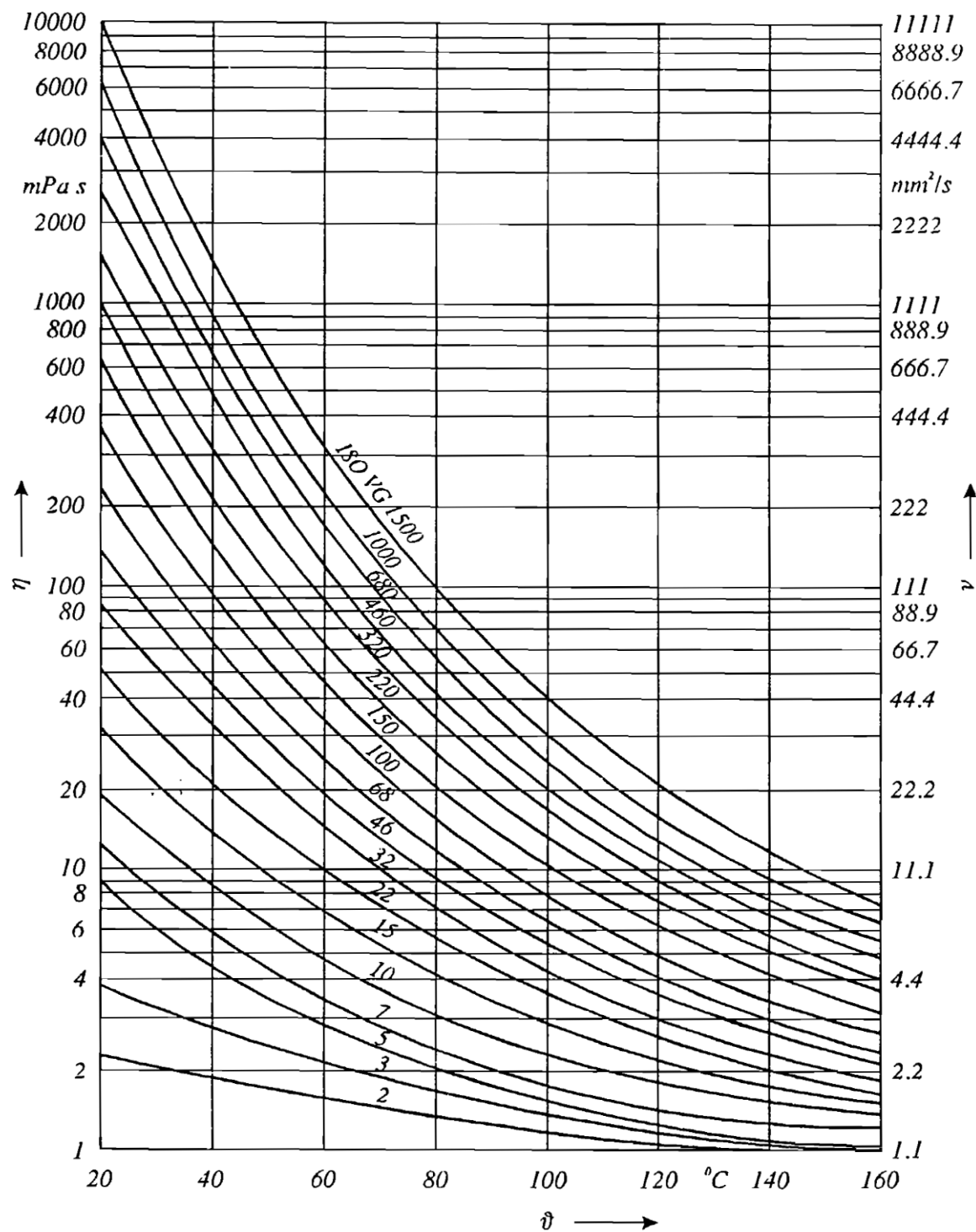
Вискозност течних мазива зависи од температуре и притиска [4]. Са повећањем температуре вискозност течних мазива опада, а са повећањем притиска вискозност се повећава. Течна мазива показују различите промене вискозности са променом температуре, чак и у оквиру исте групе уља. С обзиром да су у процесу подмазивања мазива изложена променљивим температурама и с обзиром на значај вискозности на подмазивање, јако је битно познавати зависност између вискозности и температуре. Због тога се вискозност уља даје заједно са температуром. На примеру $\nu_{50} = 90\text{mm}^2/\text{s}$ означава да је кинематска вискозност $90\text{mm}^2/\text{s}$ на температури $\vartheta = 50\text{ }^\circ\text{C}$.

Према ISO класификацијама вискозности, сва течна мазива за индустријске намене разврстана су према средњој вредности кинематске вискозности на $40\text{ }^\circ\text{C}$ у 18 група и то ISO VG 2,3,5,7,10,15,22,32,46,68,100,150,220,320,460,680,1000 и 1500. Бројеви садржани у ознаци представљају заокружене вредности кинематске вискозности, при чему треба рачунати са расипањем ових вредности за $\pm 10\%$.

За одређене кинематске и динамичке вискозности уља за температурно подручје $20^\circ\ldots 160^\circ\text{C}$ може се користити дијаграм на сл. 2.24. Промена вискозности уља са променом притиска није значајна за притиске у границама $20\ldots 30\text{MPa}$, тако да се утицај притиска на вискозност уљног слоја може занемарити. Густина уља ρ у kg/m^3 такође зависи од температуре и од притиска. Утицај притиска на густину уља може се занемарити, док зависност између температуре и густине уља може аналитички да се изрази следећим изразом:

$$\rho = \rho_{20} \cdot [1 - 65 \cdot 10^{-5}(\vartheta - 20)] \quad (2.8)$$

Где је ρ – густина уља на температури ϑ , а ρ_{20} – густина уља на температури од $20\text{ }^\circ\text{C}$ (креће се у границама $\rho_{20} = 800 \ldots 980\text{kg}/\text{m}^3$). Обично се при прорачуну динамичке вискозности користи средња вредност густине уља, која на температури од $50\text{ }^\circ\text{C}$ износи $\rho = 900\text{kg}/\text{m}^3$. Уз напред наведено поједностављење веза између динамичке вискозности η у $\text{Pa}\cdot\text{s}$ и кинематске вискозности ν_{50} у mm^2/s је: $\eta_{50} = 900 \cdot 10^{-6} \cdot \nu_{50} = 0,0009 \cdot \nu_{50}$

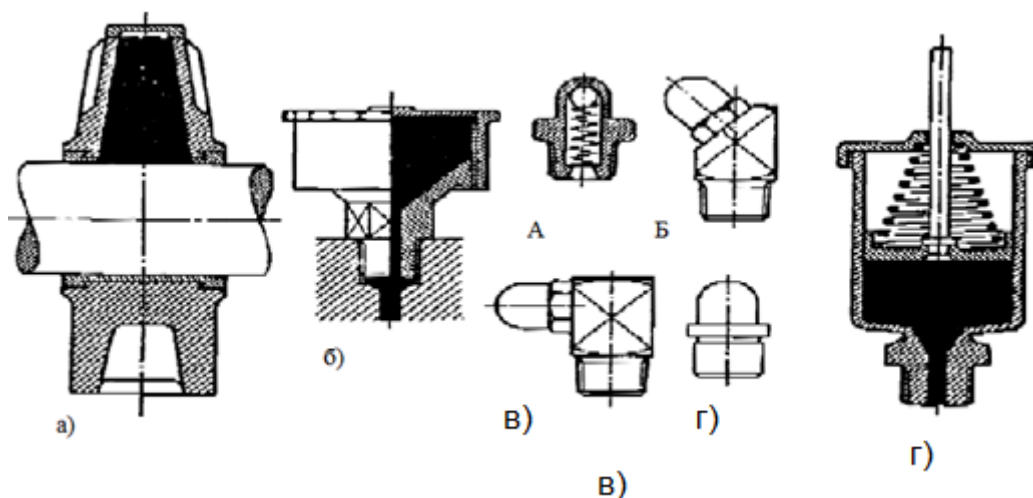
Слика 2.24 Зависност динамичке η и кинематске вискозности ν од температура ϑ , °C

2.3.3 Довођење мазива и системи за подмазивање

На начин довођења мазива у лежај утичу учестаност обртања вратила, оптерећење, радна температура, положај лежаја и врста мазива [2]. Простор лежаја мора бити перманентно и у довољној количини снабдевен мазивом, што се обезбеђује избором одговарајућег система за подмазивање. Системи за подмазивање могу бити **појединачни** и **централни**. Код појединачних система за подмазивање, сваки лежај подмазује се засебно. Примењује се и код подмазивања машћу и код подмазивања уљем и то за лежаје који су издвојени тако да чине засебне склопове. Код централних система за подмазивање мазиво се са једног места истовремено доводи у више клизних лежаја.

Појединачно подмазивање лежаја **машћу** може да се оствари на више начина:

- Најједноставнији начин подмазивања машћу је да се изнад самог клизног пара конструкционо предвиди одговарајући простор који се пуни машћу (сл. 2.25,а). Маст се у току рада загрева, топи и услед сопствене тежине долази у простор између клизних површина. Овакав начин подмазивања погодан је за радне температуре $40^{\circ}\dots 50^{\circ}\text{C}$.
- За подмазивање клизних лежаја машћу најчешће се применљује Штауферова мазалица (сл. 2.25,б). Мазалица се пуни машћу и затвара преко поклопца са навојем. Повременим притезањем поклопца маст се потискује ка рукавцу. Мере ове мазалице су стандардизоване.



Слика 2.25 Подмазивање клизних лежишта машћу: а) подмазивање сопственом тежином масти; б) Штауферова мазалица; в) мазалица са лоптастим вентилом; г) мазалица са опругом

- Канали за довод масти у лежај имају навој у који се поставља мазалица са лоптастим вентилом. Зависно од места уградње могу се користити различити облици ових мазалица (облици А до Г на сл. 2.25,в). Маст се у лежаје утискује помоћу пресе, а лоптасти вентил се аутоматски затвара после пуњења и спречава истицање масти и продор нечистоћа. Мере мазалице су стандардизоване и могу бити са цилиндричним или коничним навојем.
- Једна од бољих конструкцијских варијанти је мазалица са опругом (сл. 2.25,г). Опруга

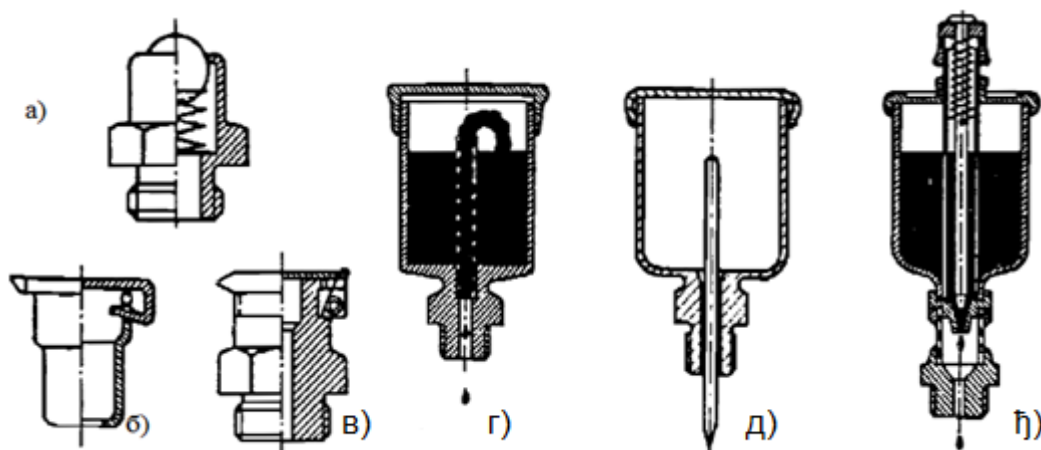
преко одговарајућег клипа стално потискује маст у лежај. Недостатак је што притисак није константан, већ се постепено смањује.

- За остваривање сталног притиска масти користе се пресе. Помоћу пресе и уз примену разводног и регулационог система могуће је са једног места истовремено подмазивање већег броја лежаја.

Појединачно подмазивање лежаја уљем може бити **проточно** и **циркулационо (кружно)**. Код проточног подмазивања уље се само једном употреби за подмазивање и више се не враћа у лежај. За подмазивање се увек користи ново уље. Код циркулационог подмазивања иста количина уља се стално користи за подмазивање, односно уље кружи па се овај начин подмазивања назива и кружно подмазивање.

Проточно подмазивање лежаја уљем може се остварити на више начина [4]:

- Најпростији начин подмазивања је ручно подмазивање. Са горње стране лежаја постављени су отвори преко којих се повремено сипа уље. Отвори морају на одговарајући начин бити затворени и то преко куглица (сл. 2.26,а) или поклопца (сл. 2.26,б,в). Подмазивање лежаја на овај начин није равномерно и примењује се врло ретко, углавном за споредне лежаје са честим прекидима у раду.



Слика 2.26 Подмазивање клизних лежаја уљем: а,б,в) отвори за доливање уља; г) мазалица са фитиљем; д) мазалица са шипком; ђ) мазалица са вентилом

- Равномерније подмазивање постиже се применом мазалице са фитиљем (сл. 2.26,г). Уље се у малим количинама доводи у лежаје. Шипка доњим крајем додирује рукавац и при његовом обртају вибрира и помало пропушта уље у лежај.
- Код подмазивања мазалицом са шипком (сл. 2.26,д) уље се у малим количинама доводи у лежај. Шипка доњим крајем додирује рукавац и при његовом обртању вибрира и помало пропушта уље у лежај.
- Мазалица са вентилом (сл. 2.26,ђ) омогућује регулацију количине уља које се доводи у лежај (5...40 капи/мин). Уље се налази у стакленом суду на чијем дну је код отвора за уље постављен затварач вентила у облику игле. Регулационом навртком затварач вентила се

подиже и спушта чиме се регулише количина уља која долази у лежај. Уље капље кроз отвор вентила, а број капи у јединици времена контролише се кроз стаклени цилиндар. С обзиром да се уље налази у стакленом суду, лако се контролише ниво уља.

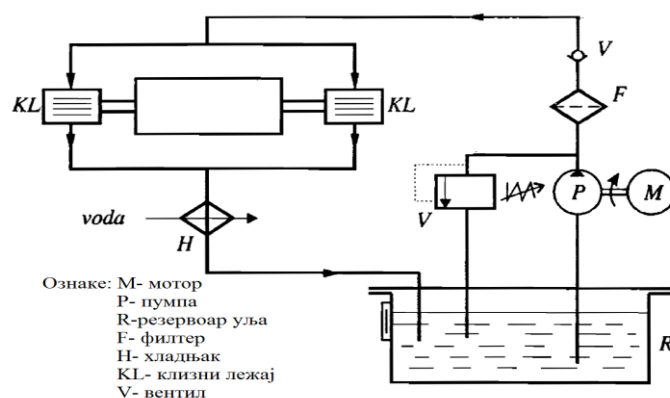
Циркуларно подмазивање може бити **појединачно** или **централно**.

Један од начина појединачног циркуларног подмазивања је **подмазивање помоћу прстена** (сл. 2.27). Прстен лежи слободно на рукавцу, а његов доњи део је потопљен у уљу. При обртању рукавца обрће се и прстен, при томе захвата уље из резервоара и доноси га до рукавца, где се оно распростире и долази између клизних површина. На тај начин одређена количина уља стално кружи и подмазује лежај. Замена уља врши се у одређеним интервалима. Подмазивање је успешно код хоризонталних вратила, чија се учестаност обртања креће у границама 100...2000 о/min. Постоје и конструкционе варијанте где је прстен чврсто везан за рукавац вратила. Овакав начин подмазивања није погодан за лежаје који раде са ударним оптерећењима.



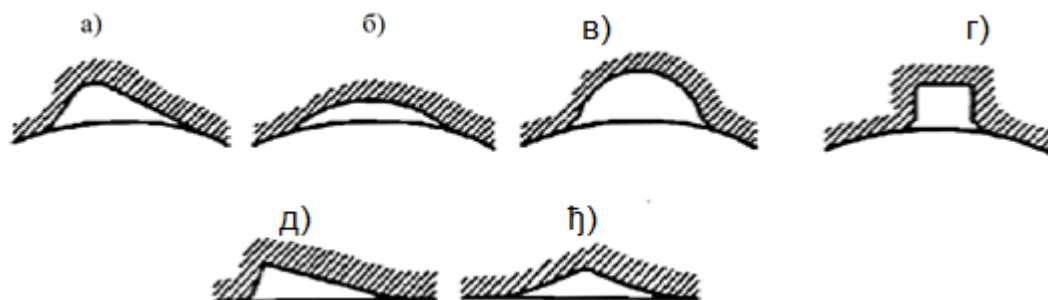
Слика 2.27 Подмазивање помоћу прстена

- Код лежаја који раде са високом учестаношћу обртања и која су изложена јаким оптерећењима, уље се у лежај доводи под притиском. Притисак у уљу стварају пумпе, а затим се уље директно доводи у лежај. Резервоар са уљем издигнут је изнад места подмазивања, тако да се уље слободним падом доводи у лежај, а затим се сакупља и помоћу пумпе поново враћа у резервоар. На тај начин уље стално кружи, односно циркулише. Оваквим системом може се подмазивати већи број клизних лежаја истовремено (централно подмазивање). Шематски приказ централног подмазивања лежаја приказан је на сл. 2.28.



Слика 2.28 Шематски приказ система за централно подмазивање клизних лежаја

• Лежаји уређаја и механизма који раде у затвореном простору подмазују се распрскавањем уља при кретању покретних делова тих механизма (моторне полуге, зупчаници). Уље за подмазивање доводи се у лежај преко посебних канала у телу лежаја и постелице, а затим се преко посебних жлебова уља расподељују на клизне површине. Ови жлебови прекидају клизне површине постелице и морају бити одговарајуће заобљени и обликовани (сл. 2.29). Оштре ивице се не препоручују. Код окретање рукавца само у једном смеру погодан је облик жлеба а и д, а код окретања у оба смера облици б, в, г и ђ.



Слика 2.29 Облици жлебова за довод уља у лежај

Увођење уља у лежај изводи се увек са супротне стране у односу на место додира рукавца и постелице. Жлебови се никад не постављају у зони стварања носећег уљног слоја, јер би довело до пада притиска у њему. Увек се изводе на непокретном делу клизног лежаја. У случају да је рукавац непокретан онда се преко њега уље доводи између клизних површина.

3 Материјали клизних лежаја

3.1 Опште напомене

Клизни лежај чини један триболошки систем, чији су основни елементи материјал рукавца, материјал постељице и средство за подмазивање. Хидродинамички подмазивани лежаји раде у прелазним периодима са мешовитим трењем, док лежаји подмазивани машћу увек раде са мешовитим трењем. Правилним избором материјала рукавца и постељице могуће је смањити отпоре клизању и задовољити захтеве у погледу статичке чврстоће и динамичке издржљивости. У том смислу од значаја је познавање следећих антифрикционих и осталих меродовних својстава лежишних материјала [2], [4]:

- отпорност на хабање;
- што мањи коефицијент трења;
- способност брзе разраде, односно међусобно прилагођавање клизних површина;
- способност стварања носећег слоја мазива;
- способност апсорбовања страних честица (странице честице које продиру у лежај непосредно или преко мазива, могу да оштете лежај);
- отпорност према корозији;
- добра чврстоћа и издржљивост;
- добар коефицијент провођења топлоте;
- мали коефицијент линеарног ширења на топлоти;
- отпорност против заривавања;
- понашање у критичним периодима рада.

Код лежаја који раде увек са течним трењем антифрикционе особине површинских слојева рукавца и постељице су од секундарног значаја. Тада материјали клизног пара морају имати довољну чврстоћу и издржљивост да приме притисак носећег уљног слоја и довољну отпорност на кавитациона разарања. У том смислу тело постељице се ради од материјала довољне чврстоће, а затим се пресвлачи слојем антифрикционог материјала.

Нема реалног материјала који може да задовољи све наведене захтеве истовремено. Због тога се на основу радних услова бира комбинација материјала рукавца и постељице. Препоруке за избор материјала налазе се у табели 3.1.

Табела 3.1. Препоруке за избор материјала лежишта

Захтев у односу	Лежишни материјал								
	Сиви лив	Синт маст	CuSn легури	CuPb легури	PbSn маса	Пласт маса	Дрво	Гума	Угаљ- графит
Антифрикционе особине	3	3	4	5	5	5	5	5	5
Критични услови рада	3	5	4	4	4	5	2	1	5
Отпорност на хабање	5	3	5	3	2	3	2	1	2
Статичка чврстоћа	5	3	4	2	2	2	1	1	2
Динамичка издржљивост	4	2	4	2	2	2	1	1	1
Велика брзина клизања	2	1	3	5	5	1	1	1	4
Неосетљивост на површински прит. на крају	1	1	4	4	5	5	4	5	3
Прилагодљивост при уходавању	1	1	4	4	5	4	4	5	4
Термичка стабилност лежаја	3	3	4	3	2	1	1	1	4
Мали коефицијент линеарног ширења на топлоти	5	5	4	3	3	1	2	1	5
Отпорност на повишеним температурама	3	3	3	1	1	1	1	1	5
Подмазивањем уљем	5	5	5	5	5	5	5	3	5
Подмазивањем водом	1	1	1	1	1	5	5	5	5
Суво подмазивање	1	1	1	1	1	5	1	1	5
Ознаке: 5-одличан, 4- врло добар, 3- добро, 2- слабо, 1- не задовољава									

3.2 Материјали рукаваца

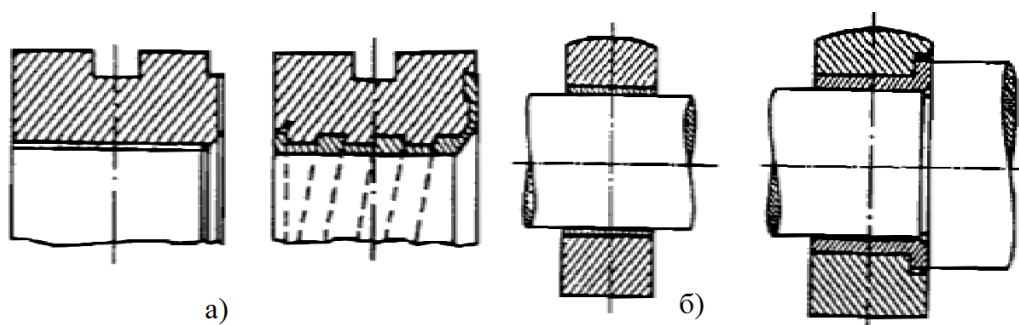
Отпор клизања је мањи уколико је већа разлика тврдоће спрегнутих клизних површина. Општа је препорука да површина рукавца буде са 3...5 пута већом тврдоћом од тврдоће површине постељице. Рукавци односно вратила се најчешће израђују од челика. Морају бити високог квалитета површинске храпавости до 64 HRc (810 HV). Код вратила која су израђена од угљеничних челика погодно је да клизне површине рукаваца буду технички или термохемијски отврднуте. У том смислу примењује се цементација и нитрирање, а добре резултате даје и пламено и индукционо каљење. Од легираних челика треба избегавати челике легиране никлом, јер је никл склон ка заривавању. Боље резултате показују челици легирани хромом. Пожељно је да клизне површине буду хромиране због слабо изражене склоности

хрома у односу на заривавање. Галвански наношене пресвлаке хрома (до 0,3 mm) морају касније бити брушене и полиране. Погодно је да дебелина пресвлаке буде до 20 μm .

3.3 Материјали за израду постелица

За израду постелица користе се нечелични материјали и то сиви лив, легуре обојених метала, синтеровани материјали и неметали.

Постелице могу бити израђене из једног дела, од материјала задовољавајуће чврстоће и издржљивости и са добрим антифрикционим карактеристикама. Претежно се користе сиви лив, CuSn и CuSnZn легуре. Ове постелице су дебелозидне и израђују се од вучених цеви или шипки, а затим пресују у тело лежаја (сл. 3.1,б).



Слика 3.1 Постелица са (а) и без (б) посебног антифрикционог слоја

Погодније је, међутим, уколико се тело постелице ради од материјала довољне чврстоће и издржљивости (сл. 3.1,а), а клизне површине пресвлаче танким слојем легуре изванредних антифрикционих својстава. Код јако одговорних клизних лежаја могу на клизне површине постелице бити нанешена 3 па и више слоја различитих антифрикционих материјала [7].

За израду постелице користе се следећи материјали.

а) **Сиви лив**, који се применљује са и без пресвлака на клизним површинама. Без пресвлаке примењује се за мање брзине клизања $v = 0,1 \dots 0,3 \text{ m/s}$. Због велике тврдоће клизних површина осетљив је на продор страних тела, а није погодан ни за ударна оптерећења. Рукавци морају бити каљени или цементиран и брушени. За слабије оптерећења користе се SL 150 и SL 200 а за јака оптерећења SL 250 и SL 300.

б) **Синтеровани материјали** (металокерамички материјали), омогућили су развој самоподмазујућих клизних лежаја која имају јако велику примену на местима где подмазивање није могуће или је јако скупо. Лежишне чауре израђују се од мешавине Fe, Cu, Sn, Zn и Pb са и без додатка графита. Овако пресовани део се затим загрева на $750 \dots 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ при чему се зрна међусобно лепе односно спајају синтеровањем. Чаура постаје врло чврста и прелази у порозну, сунђерасту масу. Порозност се креће и до 35 %. Потапањем у уљу, поре се пуне и уље остаје у

самој постелици. У току рада услед загревања уље долази у лежај и подмазује га. По престанку рада, услед капиларног деловања, уље се поново враћа назад и попуњава поре.

Постелице од синтерованих материјала лако подносе критичне услове рада, имају мању чврстоћу од металних постелица и осетљиве су на ударна оптерећења. Примењују се за мање брзине ($v < 1 \text{ m/s}$) на пример код механизма са осцилаторним кретањем.

ц) **Легуре калаја.** Калај се легира са оловом, бакром и антимоном. Ова легура позната је под називом „бели метал“. Има изванредне антифрикционе особине. Доста је мек и користи се као пресвлака постелице израђене од бронзе и од челика. Легуре калаја одликују се добром прилагодљивошћу при уходавању, способношћу апсорпције страних тела и добром отпорношћу на хабање. Примењују се за брзине клизања до 60 m/s и температуре 110°C . Наносе се у танким слојевима дебљине $0,1\ldots 3 \text{ mm}$. Због цене калаја, ова легура је доста скупа.

д) **Легуре цинка.** Најважнији легирајући елемент осим цинка су алуминијум и бакар. Цинк има низак коефицијент трења али су му остале антифрикционе карактеристике скромне, па се користи у мањој мери. Цинк, а и његове легуре, нису скуп.

е) **Легуре олова.** Олово се легира са бакром, калајем и цинком. Због своје пластичности лако подноси нетачности при изради лежаја. Добро подноси прелазне периоде у току рада, али има слабу отпорност на хабање. Примењује се код лежаја вагонских осовина.

ф) **Легуре бакра.** Највише се користе бронза, која садржи преко 50% бакра, остатак су други легирајући елементи. Довођењем меких метала као што су олово, цинк, алуминијум побољшавају се антифрикциона својства. Примењују се за јака и ударна оптерећења. Због релативно високе тврдоће ових легура, рукавци вратила морају бити термички обрађени и брушени. Захтева се и висока тачност у погледу паралелности оса постелице и рукавца. Легуре бакра имају слабу моћ апсорпције страних тела, што захтева добру заштиту од продора спољне нечистоће и добро подмазивање. Добро проводе топлоту, чиме се обезбеђује одговарајућа термичка стабилност лежаја. Највећу примену за израду постелица имају следеће легуре бакра.

- **Калајна бронза** која садржи 5...14 % калаја. Поседује одлична антифрикциона својства. Додавањем фосфора (калајно-фосфорна бронза) повећава се прионљивост уља, што омогућује овим постелицама знатну носивост и при машовитом трењу и рад при повишеним радним температурама.

- **Оловна бронза** која садржи 10...20 % олова. То је мека легура, која је у великој мери неосетљива на високе притиске на ивицама постелице, који су последица нетачности при изради или савијања вратила односно рукавца. Нема добру отпорност на хабање, добро подноси критичне услове рада и примењује се за мање брзине клизања. Код постелица од оловне бронзе није неопходна термичка обрада рукавца.

▪ **Калајно - оловна бронза** садржи до 5...14 % калаја и 3...25 % олова. Олово побољшава радну способност у критичним условима рада као и прилагодљивост при уходавању, али и смањује отпорност на хабање.

▪ **Алуминијумска бронза** садржи до 10 % алуминијума и у мањим количинама никл, манган, гвожђе и друге елементе. Има одличну отпорност на хабање и отпорност према корозији, као и добру чврстоћу, па се примењује код неизменично променљивих оптерећења.

▪ **Црвени лив** је легура бакра, калаја, цинка. Има нижу цену од калајних легура, али и нешто слабија антифрикциона својства. Са 10% калаја, 4% цинка и 1% олова црвени лив успешно замењује скупе легуре калаја. Користи се као превлака клизних површина постељица израђених од других материјала.

г) **Алуминијум** са додатком бакра, гвожђа, цинка, мангана и других метала примењује се такође за израду лежишних чаура, али само уколико је и сам лежај израђен од лакших метала. На тај начин и тело лежаја и сама чаура имају приближно исте термичке дилатације, чиме се избегавају могуће деформације у току рада.

х) **Пластичне масе** се користе пре свега код лежишних чаура које раде без подмазивања или уз недовољно подмазивање. Имају мали коефицијент трења и теже се у току разраде прилагођавају облику рукавца. Од пластичних маса за израду постељица користе се термопласти и термореактивни материјали.

и) **Угаљ – графит** је композитни материјал који се састоји од 20 % нафтног кокса, 60% других облика кокса и 20 % природног графита, чађи, катрана и пунитеља на бази фенолних и епоксидних смола. То је крут и порозан материјал који је хемијски стабилан у многим агресивним течним и гасним срединама. Антифрикциона својства зависе од материјала рукавца. Додатком бакра, сребра, бронзе, калаја и других материјала побољшавају му се механичке карактеристике. Примењује се са и без подмазивања, а подноси врло високе радне температуре (до 600 °C).

ј) **Гума** – природна и синтетичка користи се код лежаја који раде у води и другим срединама, код машина у хемијској индустрији. Подмазивање се најчешће изводи водом при чему се коефицијент трења креће у границама $\mu = 0,01 \dots 0,005$. Максимална вредност брзине клизања је $v \leq 35 \text{ m/s}$, а максимална радна температура 80 °C. Клизни лежаји са гуменом постељицом добро подnose ударна и вибрациона оптерећења и бешумни су.

4 Носивост радијалних клизних лежишта

Носивост радијалних клизних лежишта представља максималну вредност силе која се преноси при датом радом веку, без различитих видова оштећења или других непогодности.

При прорачуну радијалних клизних лежишта битне су следеће величине:

- **Кинематске величине**

Важна кинематска величина је брзина клизања $v, m/s$. При познатом пречнику рукавца d, m и

броју обртаја n, min^{-1} , брзина је:
$$v = \frac{\pi d n}{60} \quad (4.1)$$

- **Конструкционе карактеристике лежишта φ**

Конструкциона карактеристика лежишта је однос дужине лежишта B и номиналног пречника лежишта D (номинални пречници рукавца и постелице су међусобно једнаки, $d_n = D_n$ (сл. 4.2)

$$\varphi = B/D = 0,2 \dots 1 \dots (1,5) \quad (4.2)$$

Веће вредности φ (0,5...1) имају лежишта са високим бројем обртаја n , великом брзином клизања и мањим оптерећењем F_r . Обрнуто, лежишта са мањом брзином клизања и већом силом F_r имају мање вредности карактеристике φ ($\varphi \leq 0,5$).

Код ових лежишта (при мањим вредностима карактеристике φ), јавља се мала вредност притиска на ивицама постелице, уље бочно брже истиче и боље је одвођење топлоте. Међутим, премала вредност карактеристике φ има за последицу недовољне вредности притиска у уљу.

Обрнуто, код лежишта веће дужине ($\varphi = 1 \dots 1,5$) уље спорије бочно истиче, температура је виша. То има за последицу смањење вискозности уља и смањење носивости. Услед одступања паралелности оса рукавца и лежишта и услед еластичних деформација, при већим вредностима карактеристике φ , јавља се опасност појаве великих притисака на ивицама постелице и неравномерне расподеле притиска по дужини лежишта.

Оптималан вредност за φ је од 0,3 ... 0,7.

- **Зазор у лежишту**

Разлика пречника D отвора у постелицу лежишта и пречника d рукавца представља *апсолутну вредност зазора* у клизном лежају (видети сл. 4.2):

$$Z = D - d \quad (4.3)$$

Ако се ова вредност зазора сведе на јединицу пречника рукавца добија се *релативни зазор*:

$$\psi = \frac{Z}{d} = \frac{D-d}{d} \quad (4.4)$$

С обзиром да зазор Z варира између минималне и максималне вредности, у пракси се прописује *средњи релативни зазор*.

$$\psi_m = \frac{Z_m}{d_m}; \quad Z_m = \frac{Z_{\max} + Z_{\min}}{2} \quad (4.5)$$

Где је d_m средњи пречник рукавца.

Вредности релативног зазора се усвајају у зависности од радних услова и материјала постелице (Табела 4.1), брзине клизања и специфичног оптерећења (средњег површинског притиска између постелице и рукавца), (Табела. 4.2) пречника рукавца d и брзине клизања v (Табела 4.3) [2].

Табела 4.1 Релативни зазор ψ_m у зависности од врсте материјала постелице

Материјал постелице	Релативни зазор ψ_m
Su- Pb легуре	0,0004 ... 0,001
Cu-Pb легуре	0,0005 ... 0,0025
Cu- Sn легуре	0,0005 ... 0,0025
Al легуре	0,001 ... 0,0025
Сиви лив	0,002 ... 0,003
Синтеровани материјали	0,001 ... 0,0025

Табела 4.2. Релативни зазор ψ_m у зависности од брзине клизања и површинског притиска

Брзина клизања $v, m/s$ изнад до	Површински притисак $p, N/mm^2$		
	≤ 2	$> 2 \dots 10$	> 10
... 20	0,0003 ... 0,0006	0,0006 ... 0,0013	0,0012 ... 0,002
20 ... 100	0,0006 ... 0,0012	0,0012 ... 0,002	0,002 ... 0,003
100 ... 1000	0,0012 ... 0,002	0,002 ... 0,003	0,003 ... 0,0045

Табела 4.3. Релативни зазор ψ_m у зависности од брзине клизања и пречника рукавца

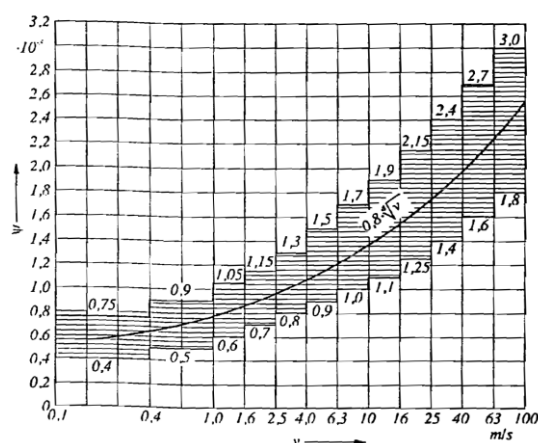
Пречник рукавца d, mm изнад ... до	Брзина клизања $v, m/s$				
	... 3	3 ... 10	10 ... 25	25 ... 50	50 ... 125
... 100	0,00132	0,0016	0,0019	0,00224	0,00224
100 ... 250	0,00112	0,00132	0,0016	0,0019	0,00224
250 ...	0,00112	0,00112	0,00132	0,0016	0,0019

За изабрану вредност ψ_m бира се одговарајуће налагање и налази стварна вредност зазора. Препоручена налагања ISO систему стандардних толеранција су: H7/a8, b8, c8, d8, d9, e8; H6/j6, j7, j8, g6; H7/g6 и др.

Оријентационо ψ_m се израчунава у зависности од брзине клизања $v, m/s$:

$$\psi_m = (0,0007 \dots 0,0009) \sqrt[4]{v} \quad (4.6)$$

на основу чега се закључује да је за формирање уљног филма потребан већи зазор, односно већа брзина клизања. За веће притиске ($\geq 10 \text{ N/mm}^2$), шира лежишта ($\varphi > 0,8$) и материјале постељице веће тврдоће (веће вредности модула еластичности) бира се горња граница зазора. Обрнуто за $\varphi \leq 0,8$, притиске око 2 N/mm^2 и материјале мале тврдоће (меке материјале; ниже вредности модула еластичности) бира се доња граница зазора. За мале брзине бирају се мање вредности за ψ_m и обрнуто (сл. 4.1).



Слика 4.1 Зависност средњег релативног зазора ψ_m од брзине клизања v

У току рада, услед загревања лежишта, долази до промене релативног зазора:

$$\Delta\psi = (\alpha_p - \alpha_R)(\vartheta_L - 20^\circ\text{C}) \quad (4.7)$$

где су α_p и α_R коефицијенти линеарног ширења материјала постељице рукавца у K^{-1} , ϑ_L радна температура лежишта.

$$\text{На основу претходног добија се: } \psi = \psi_m + \Delta\psi \quad (4.8)$$

што представља ефективну вредност релативног зазора лежишта [2].

4.1 Носивост радијалних лежаја са полуоквашеним површинама

Клизање полуоквашених површина настаје када мазиво делимично продре између клизних површина, тако да су неравнине додирних површина рукавца и постељице у непосредном додиру уз присуство атхезионог и абразивног хабања. За смањење хабања потребан је одговарајући избор материјала рукавца и постељице. Како је рукавац обично од челика, за постељицу се бира материјал мање тврдоће подложнији хабању, на пр, SL, бронза, бели метал (легура бакра, калаја, олова и антимона). За димензионисање и проверу носивости

лежишта мередовна је вредност радног притиска на додирним површинама, који је мањи или највише једнак дозвољеном.

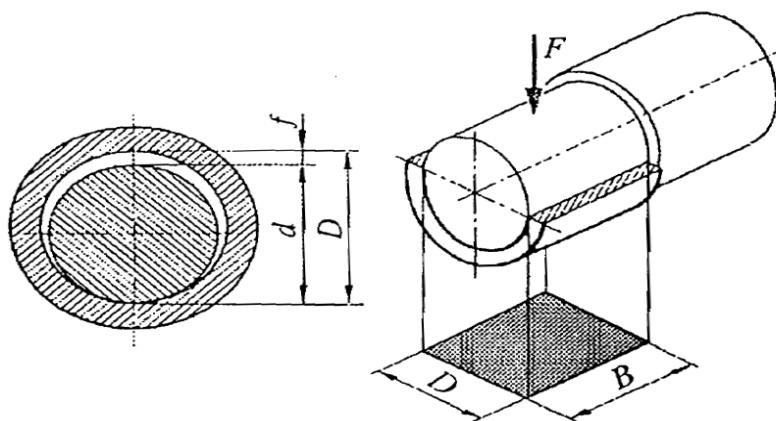
Дозвољени површински притисак је количник динамичке чврстоће материјала при контактним напрезањима p_n и степена сигурности S , па је:

$$p_{doz} = p_n / S \quad (4.9)$$

Величина p_n зависи од величине похабаног слоја (Δh), пређеног пута клизања у радном веку $v \cdot t$, коефицијента трења μ , односно тврдоће материјала рукавца и постељице HB1/HB2, итд.:

$$p_n = f \left(\frac{HB1}{HB2}, \frac{|\Delta h|}{v, t, \mu} \right) \quad (4.10)$$

Дозвољена вредност похабаног слоја $|\Delta h|$ је мања за лежишта већа тачност и обрнуто.



Слика 4.2 Радијално клизно лежиште са трењем полуоквашених површина

Тачне вредности p_n нису утврђене и зато се користе искуствени подаци из табеле о материјалима. Радни притисак у клизним лежиштима се доводи у прописане границе варирањем димензија лежишта и оптерећења.

При димензионисању нових лежишта меродован је **средњи површински притисак између постељице и рукавца.**

$$p = \frac{F_r}{A} = \frac{F_r}{D \cdot B} \leq p_{doz} \quad (4.11)$$

где је D , mm унутрашњи пречник постељице (номинални пречници рукавца и постељице су међусобно једнаки, $d_n = D_n$), B , mm ширина лежишта (дужина постељице) и F_t , N радијално оптерећење лежишта (сл. 4.3). Непознате димензије радијалних клизних лежишта са трењем полуоквашених површина се одређују на следећи начин:

- Ако су познати пречник рукавца d и дозвољени притисак, одређује се (на основу

једначине 4.11 за $d = D$) дужине лежишта и проверава се конструкциона карактеристика лежишта у односу на препоручене вредности:

$$B = \frac{F_r}{d p_{doz}}; \quad \varphi = B/D; \quad (4.12)$$

• Када је вредност пречника рукавца непозната, усваја се карактеристика φ , а димензије d и B се одређују према:

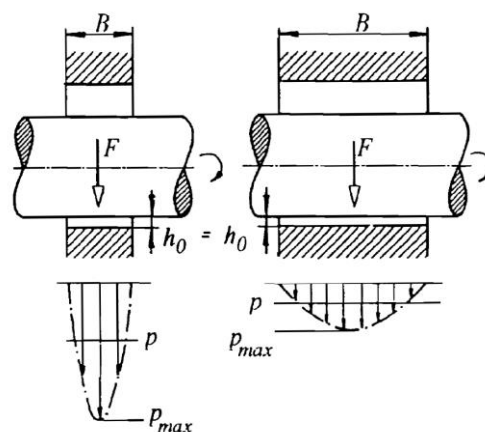
$$d = \sqrt{\frac{F_r}{\varphi p_{doz}}}; \quad B = \varphi d \quad (4.13)$$

При већим брзинама постоји опасност развијања велике количине топлоте у јединици времена. Због тога се проверава тзв. карактеристика лежаја $p v$:

$$p v \leq (p v)_{doz} \quad (4.14)$$

Вредност за $(p v)_{doz}$ дају се у табелама, на пример: за Sl је 0,7, Al – бронзе је 20, Pb – бронза 30, Al – легуре 60, калајне бронзе 10 ... 15, Pb – легуре 15, итд.

Претходно дат поступак прорачуна је изведен под претпоставком да је површински притисак равномерно распоређен по дужини лежишта. У стварности расподеле притиска у уљном слоју је као на (сл. 4.3). Са слике се уочава да је максимална вредност притиска на средини дужине лежишта. Максимална вредност притиска: $p_{max} = (2 \dots 10)p$. Такође, са слике се може сагледати и утицај вредности карактеристике φ , односно дужине лежишта B (при истом пречнику d и дебљини уљног филма h_0), на расподелу притиска.



Слика. 4.3 Расподела притиска у уљном филму у зависности од дужине лежишта

За одабране димензије радијалног лежишта, сила која одговара дозвољеном притиску је **носивост лежишта**:

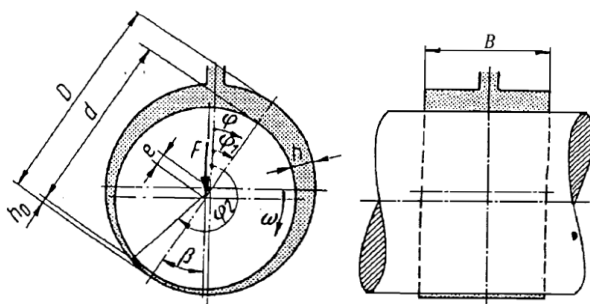
$$F = A p_{doz} \geq F_r \quad (4.15)$$

Овако срачуната вредност силе F мора бити већа од стварне силе F_r која оптерећује лежиште.

4.2 Носивост радијалних лежаја са хидродинамичким подмазивањем

Хидродинамичко подмазивање радијалних лежаја остварује се ако је обезбеђен одговарајући зазор у лежишту. При томе, број обртаја вратила треба да је већи од граничног односно $n > n_g$. У стању мировања остварена је максимална ексцентричност осе рукавца и постелице e (сл. 4.4). Њена вредност је $e = Z/2$. Са порастом брзине ексцентричност је све мања. Уопштено ексцентричност e , у односу на стање мировања, при раду смањује се за дебљину уљног филма: $e = f/2 - h_0$. Минимална дебљина уљног филма се своди обично на четвртину зазора Z . Тако за $R=D/2$ и $r=d/2$ (сл. 4.4), добија се:

$$h_0 + r + e = R; \quad h_0 = Z/2 - e \approx Z/4 \quad (4.16)$$



Слика 4.4 Скица радијалног клизног лежишта

За динамичко пливање, само код идеално глатких додирних површина, довољна је минимална дебљина уљног филма. Иначе увек је $h > h_0$, јер идеално глатке површине не постоје. И код најфиније обрађених рукавца и постелице постоје микроскопске неравнине. Услед ових неравнина додир рукавца и постелице у стању мировања је само местимичан, а не по континуалној правој линији што је у складу са теоријским анализама. Средња вредност висина неравнина рукавца и постелице је $R_{z1} = R_{z2} = 0,005 \text{ mm}$. Најтањи слој мазива, у тренутку додира врхова неравнина на површинама рукавца и постелице, једнак је збиру $R_{z1} + R_{z2}$.

На основу свега следи: динамичко пливање се јавља када је дебљина уљног филма већа од $R_{z1} + R_{z2}$, тј. $h > R_{z1} + R_{z2}$, што за средњу вредност храпавости од $0,005 \text{ mm}$ износи више од $0,01 \text{ mm}$. Рукавац се одваја од постелице ако је $h > 0,01 \text{ mm}$. Минимална дебљина уљног филма се, даље, може изразити као:

$$h_0 = \frac{D \cdot \psi}{2} (1 - \varepsilon) \quad (4.17)$$

Пошто се у литератури често користи податак о дозвољеној вредности дебљине уљног филма h_{olim} , па се усваја услов $h_0 > h_{olim}$.

Релативна дебљина уљног филма је:

$$\delta = \frac{h_0}{Z/2} \quad (4.18)$$

а релативна ексцентричност:

$$\varepsilon = \frac{e}{Z/2} = \frac{2e}{(D-d)} \quad (4.19)$$

Израчунавање радијалних лежишта при **хидродинамичком подмазивању** се изводи и под претпоставком да је струјање ламинарно и да се ради о Њутновој течности. Због тога је потребно при прорачуну ових лежишта проверити и **Reynolds-ov broj**.

Уопштено, Reynolds-ov broj је одређен изразом: $Re = \frac{\rho v Z}{2 \eta}$

За ламинарно струјање треба да је испуњен услов: $Re \leq 41,3 \sqrt{\frac{D}{Z}}$, где је ρ , kg/m^3 , густина уља; v , m/s , брзина клизања; Z , m , апсолутни зазор, η , $\text{Pa} \cdot \text{s}$, динамичка вискозност уља на радној температури и D , m пречник лежишта.

Важна карактеристика носивости клизних лежишта је *Somerfeld-ov (Sommerfeld) broj*. То је бездимензиона величина одређена изразом:

$$S_0 = \frac{\rho \psi^2}{\eta \omega} \quad (4.20)$$

где је ρ , N/m^2 средње специфично оптерећење лежишта, ψ релативни зазор (једначина 4.4), η , $\text{Pa} \cdot \text{s}$, динамичка вискозност уља, ω , s^{-1} , угаона брзина.

Somerfeldov broj је показатељ стабилности вратила. Тако, за $S_0 = 1$ и $\varphi = B/D = 1$, ексцентричност $e = Z/4$, (сл. 4.4), притисак у уљном слоју је мали. Довољна је мала сила да изведе вратило из равнотеже. Значи $S_0 = 1$ је гранична вредност између стабилног рада ($S_0 > 1$) и нестабилног рада лежишта ($S_0 < 1$). Зато са $S_0 < 1$ лежиште треба да има два или више носећих клинова или да буде изведено из сегмента. Ако је $S_0 < 0,7$ и број обртаја $n/2$ постоји опасност настанка резонанце. Вредност за *Somerfeldov broj* могу да се одреде у зависности од релативне дебљине уљног филма δ , конструкционе карактеристике φ на основу дијаграма (сл.4.5). *Somerfeldov broj* је карактеристика носивости и брзоходности лежишта. Вредност за S_0 се креће у следећим границама:

- $S_0 \leq 1$ код брзоходних и лако оптерећених лежишта,
- $1 < S_0 \leq 3$ код средње оптерећених лежишта,
- $S_0 > 3$ код тешко оптерећених клизних лежишта.

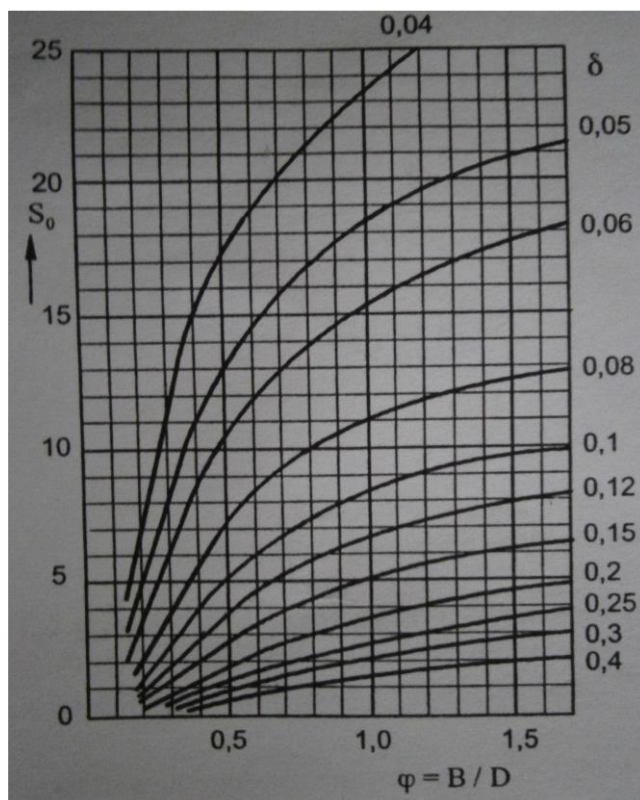
Гранични број обртаја у min^{-1} при коме настаје одвајање постелице од рукавца (динамичко пливање) је:

$$n_g = \frac{30 \omega_{gr}}{\pi} = \frac{30}{\pi} \frac{\rho(Z/D)^2}{\eta S_{ogr}} = \frac{30}{\pi} \quad (4.21)$$

односно гранична учестаност обртања (у s^{-1}) је :

$$\omega_{gr} = \frac{p \psi^2}{\eta S_{ogr}} \quad (4.22)$$

где p средњи специфични притисак, а S_{ogr} је дат изразом (4.20). Међутим, исправан рад лежишта зависи и од радне температуре (термичке стабилности лежишта).



Слика 4.5 Зависност релативне дебљине уљног филма δ , Somerfeldov-овог броја S_0 и конструкционе карактеристике φ

Носивост радијалних лежишта при хидродинамичком пливању, је:

$$F_r = p A = p B D = S_0 \frac{B D}{\psi^2} \eta \omega \quad (4.23)$$

Вредност, према изразу (4.23), представља притисак који преноси уљни филм, без истискивања уља између додирних површина. У том простору се налази већа количина уља него у доњем оптерећеном делу. Уље из горњег дела лежишта не утиче непосредно на динамичко пливање, већ одводи топлоту, хлади и незнатно повећава трење. Због ових чињеница уље се доводи у лежиште на месту нижих притисака, у неоптерећеној зони.

Коефицијент трења код потпуног подмазивања зависи од релативног зазора и Somerfeldovog броја:

$$\bullet \quad \mu \approx \frac{3 \psi}{S_0} \quad \text{у брзоходном подручју при } S_0 < 1 \quad (4.24)$$

$$\bullet \quad \mu \approx \frac{3 \psi}{\sqrt{S_0}} \quad \text{у подручју тешког оптерећења при } S_0 > 1 \quad (4.25)$$

4.3 Загревање радијалних клизних лежишта

4.3.1 Губици енергије услед трења

У току рада, при обртању рукавца, јављају се отпори трења у слоју мазива и на додирим површинама. Због тога се део механичке енергије претвара у топлоту. Губитак снаге, снага која се троши на савладавање отпора трења (снага трења), се добија као производ силе трења и брзине клизања [2]:

$$P_G = v F_\mu = F \mu v \quad (4.26)$$

Где је $F_\mu = F \mu$; F, N сила која оптерећује лежај; μ коефицијент трења (табела 4.4); $v, m/s$ брзина клизања.

Табела. 4.4 Коефицијент трења клизних лежишта у зависности од мазива

Врста лежишта	Материјал постељице	Врста мазива	Средње вредности коефицијента трења μ		
			полутечно трење	мешовито трење	течно трење
Радијално	SI, бронза, црвени лив	маст	0,12	0,05 ... 0,1	-
	SI, бронза, црвени лив	уље	0,14	0,02 ... 0,1	0,003 ... 0,008
	легури олова и калаја	уље	0,24	-	0,002 ... 0,003
	синтеровани материјал	уље	0,17	0,05 ... 0,1	0,002 ... 0,014
Аксијално (прстенаста дод. повр.)	SI, бронза, црвени лив, легуре калаја	маст	0,15	0,05 ... 0,1 0,03	-
		уље	0,25		-
Аксијално сегментно лежиште	легури калаја	уље	0,25	0,02	0,002

4.3.2 Одвођење топлоте природним хлађењем лежаја

У почетку рада температура лежишта нагло расте због повећања броја обртаја. У току даљег рада лежишта део топлоте се одводи у околину, па температура лежишта спорије пада. После 3... 5 сати рада, температура се устали. То је тзв. *устаљени или стационарни режим* када постоји равнотежа произведене и одведене количине топлоте. Вредност стационарне радне температуре обично износи 50 ... 60 °C а ретко је у границама 70 ... 80 °C. Ако се употребљавају мазива постојана на повишеним температурама, дозвољава се радна температура изнад 100 °C.

Количина произведене топлоте једнака је снази трења у W :

$$q_1 = F \mu v \quad (4.27)$$

Количина топлоте која се предаје околина пропорционална је површини кућишта лежишта и износи:

$$q_0 = K_c A (\vartheta_L - \vartheta_0) = K_c A \Delta\vartheta; \quad \Delta\vartheta = \vartheta_L - \vartheta_0 \quad (4.28)$$

Где је q_0 , W одведена количина топлоте природним путем; K_c , $W/(m^2K)$ коефицијент прелазности топлоте; A , m^2 површина кућишта лежишта; ϑ_L , $^{\circ}C$ радна температура лежишта (од 70 до 100 $^{\circ}C$); ϑ_0 , $^{\circ}C$ температура околине (обично 20 $^{\circ}C$).

При номиналним условима рада, када нема струјања ваздуха или је оно мало, коефицијент прелаза је $K_c = 15 \dots 20 \text{ W}/(m^2K)$. При струјању ваздуха брзином $v > 1,2 \text{ m/s}$, коефицијент прелаза топлоте се одређује према једначини:

$$K_c = 7 + 12 \sqrt{v_0} \quad (4.29)$$

Површина кућишта зависи од конструкционог извођења и пропорционална је унутрашњем пречнику постелице D и дужини лежишта B , односно унутрашњој површини постелице $\pi \cdot D \cdot B$. Приближно је $A = (5 \dots 6) \pi \cdot D \cdot B$ за лака лежишта, $A = (6 \dots 7) \pi \cdot D \cdot B$ за тежа лежишта и $A = (8 \dots 8.5) \pi \cdot D \cdot B$ за врло тешка лежишта. Такође, површина кућишта се може одредити и према:

$$A = \frac{\pi}{2} (D_H^2 - d^2) + \pi D_H + B_H \quad - \text{ лежишта са цилиндричним кућиштем,}$$

$$A = \pi H \left(B_H + \frac{H}{2} \right) \quad - \text{ лежишта са једноделним и дводелним кућиштем,}$$

$$A = (15 \dots 20) D B \quad - \text{ лежишта која се уграђују у кућиште машине.}$$

где је B_H дужина лежишта у правцу осе рукавца, D_H спољашњи пречник кућишта, H укупна висина лежишта, D пречник постелице, B дужина постелице.

4.3.3 Одвођење топлоте принудним хлађењем лежаја

Ако је количина топлоте q_1 мања или једнака q_0 , природно хлађење задовољава; у супротном се врши *вештачко хлађење*.

Код граничног случаја ($q_1 = q_0$) температура лежишта је:

$$\vartheta_L = \vartheta_0 + \frac{F \mu v}{K_c \pi D B} = \vartheta_0 + \frac{\mu}{K_c \pi} \rho v \quad (4.30)$$

Када је $\vartheta_L > 80^\circ\text{C}$ природно хлађење не задовољава, па треба вештачким путем појачати хлађење лежишта. То може да се оствари на више начина: јачом циркулацијом веће количине уља, хлађењем лежишта водом или уљем, повећањем површине зрачења топлоте (израда ребара на кућишту) и применом боље вентилације лежишта. Стабилна (фиксирана) лежишта више се загревају од покретних лежишта, на пример лежишта моторних возила. За лежишта у возилима коефицијент K_c је пет пута већи. Количина топлоте која се одведе преко уља које циркулише кроз лежиште је:

$$Q_p = \rho c q (\vartheta_i - \vartheta_u) \quad (4.31)$$

где је ρ , kg/m^3 густина уља (обично $\rho = 900 \text{ kg/m}^3$), а воде $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$; c , $\text{J/(m}^2 \text{ K)}$ специфична топлота уља (обично $c = 2000 \text{ J/(m}^2 \text{ K)}$); q , m^2/s укупни проток уља, односно воде; ϑ_i $^\circ\text{C}$ температура уља (или воде) на излазу; ϑ_u $^\circ\text{C}$ температура уља (или воде) на улазу (у прорачуну се узима да је $\vartheta_i - \vartheta_u = 15 \dots 20 \text{ K}$) и $m = \rho q$ проток уља кроз лежиште.

Ефективна температура мазива, радна температура лежишта је:

$$\vartheta_{ef} = \vartheta_L = (\vartheta_i - \vartheta_u) / 2 \quad (4.32)$$

У тренутку када се сва ослобођена топлота одведе уљем, $Q_1 = Q_p$, па се из те једнакости добије потребан проток уља за хлађење лежишта:

$$m = \mu F v / (\vartheta_i - \vartheta_u) \quad (4.33)$$

Количина уља потребна за подмазивање је различита од m и одговара протоку уља кроз уљни филм и одређује се према:

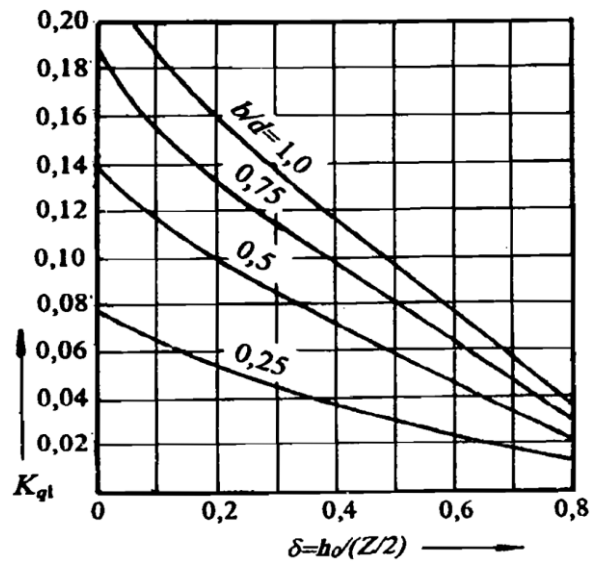
$$q_1 = D^3 \psi \omega K_{q1} \quad (4.34)$$

где је D , m унутрашњи пречник постељице; ψ релативни зазор ($\psi = \psi_m$, табела 4.1), 4.2 и 4.3, или $\psi = \psi_m + \Delta\psi$; ω , s^{-1} угаона брзина лежишта и K_{q1} бездимезиони коефицијент протока у зони хидродинамичког пливања (одређује се аналитички или из дијаграма (сл. 4.6). Значи, када се уље доводи у лежиште без надпритиска, укупни проток уља кроз лежиште је $q = q_1$.

Ако се уље доводи у лежиште под притиском p_E (на улазу у лежиште $p_E \approx 0,05 \dots 0,5 \text{ MPa}$), који је мањи од средњег површинског притиска p , додатни проток уља кроз лежиште је:

$$q_2 = \frac{d^3 \psi^3 p_E}{\eta} K_{q2} \quad (4.35)$$

где је K_{q2} бездимензиони коефицијент.



Слика 4.6 Дијаграм за одређивање K_{q1}

Укупан проток уља кроз лежиште, ако се уље доводи под надпритиском, је $q = q_1 + q_2$. Коришћење израза (4.30) одређује се пораст температуре лежишта:

$$\Delta\vartheta = \vartheta_L - \vartheta_0 = \frac{p v \mu}{\pi k_c} \quad (4.36)$$

Из претходног израза произилази да се на пораст температуре $\Delta\vartheta$ може утицати повољним избором коефицијента трења μ (уколико трење расте са повећањем обимне брзине, а опада са повећањем оптерећења). Поред тога, потребно је да се узме у обзир врста мазива и др.

5 Конструкционо извођење радијалних клизних лежишта

На конструкционо извођење клизних лежаја битну улогу има величина и карактер деловања спољашњег оптерећења, учестаност обртања односно брзина клизања, радни век, експлоатациони услови, услови одржавања, могућност израде, итд. Постоје конструкционо разрађени и стандардима дефинисани облици лежишних чаура и комплетних лежаја, који најчешће испуњавају напред наведене захтеве, па се врло често задатак конструктора своди на прорачун носивости и избор одговарајућег типа лежаја. Основни делови клизних лежишта су **кућиште** и **постељница**.

5.1 Облици лежишта

Кућиште лежишта може бити **једноделно**, **дводелно** и **вишеделно**.

Једноделни лежаји примењују се када у току монтаже постоји могућност да се вратило убаци у отвор лежаја, или пак сам лежај навуче на вратило аксијалним померањем. Примењује се у случају када нема опасности брзог трошења лежишне чауре, на пример код малих брзина и малих оптерећења, чисте средине, итд. Примењују се за осовине и вратила пречника 10 - 300 mm, ако се они при раду сасвим незнатно угибају.

Код лежаја са дводелним кућиштем, скидањем поклопца омогућена је лака монтажа и демонтажа постељице и самог вратила. Дводелни лежаји су скупљи од једноделних, али због предности које имају, чешће се примењују у пракси. Главна предност је што је у већини случаја код лежишта тешко или немогуће померити вратило у аксијалном правцу, а код њих је то могуће због способности склапања и расклапања [9].

Једноделни клизни лежаји изводе се у варијантама за причвршћење на вертикални зид и на хоризонталној подлози. У првом случају тело лежаја има одговарајућу прирубницу, која се причвршћује са два или четири завртња за вертикални лимени зид (сл. 5.1, лево). Постоје два конструкциона извођења - облик А са засебно уграђеном лежишном чауром и облик Б, који нема посебно уграђену лежишну чауру, већ је у самом кућишту од ливеног гвожђа обрађена одговарајућа површина клизања. Израђује се за пречник отвора од 25 до 80 mm.

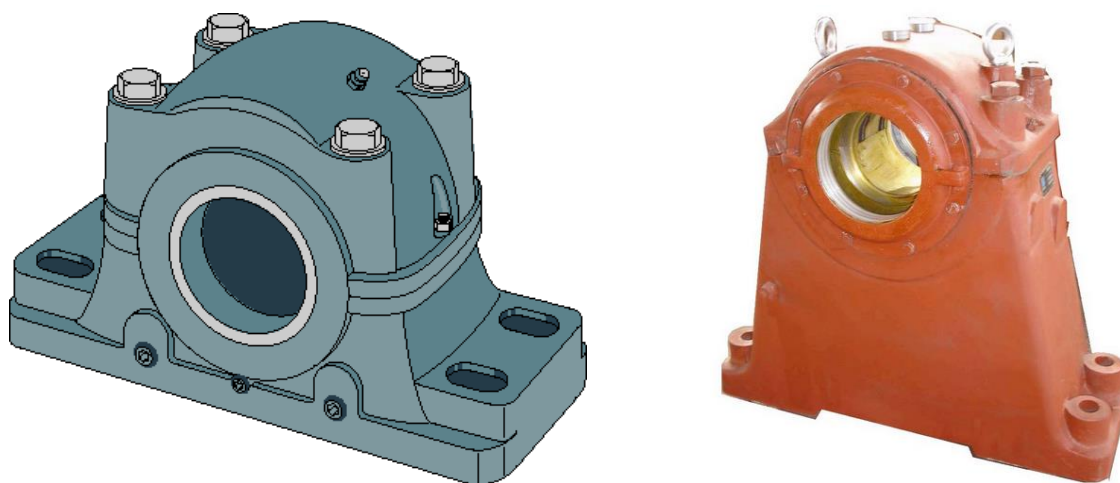
Једноделни клизни лежаји са стопалом за причвршћење на хоризонталној подлози помоћу завртњева предвиђени су за подручје пречника од 20 до 180 mm (сл. 5.1, десно). Изводе се у варијанти са (облик А) и без (облик Б) засебне лежишне чауре.



Слика 5.1 Једноделни клизни лежај са прирубницом (лево), и са стопалом (десно)

Дводелни клизни лежаји (сл. 5.2, лево) причвршћују се са два (облик L) или четири (облик М) завртња за хоризонталну подлогу. Унутрашњи пречник лежаја креће се у границама $d_1 = 25 \dots 150 \text{ mm}$, код причвршћивања са два завртња, односно $d_1 = 55 \dots 300 \text{ mm}$, код причвршћивања са четири завртња [9]. У ове лежаје уграђују се дводелне лежишне чауре од CuSn – легура. Кућиште клизних лежаја најчешће се израђује од сивог лива SL 200.

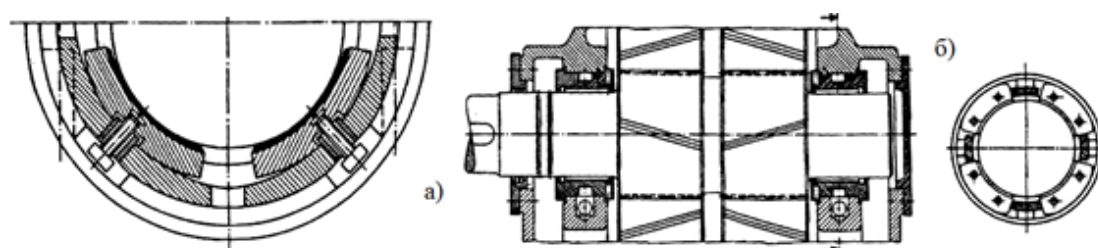
Напред наведена конструкција извођења односи се на круте (неподесиве) лежаје. За случај да постоје знатне деформације вратила, неопходна је примена зглобних (подесивих) клизних лежаја. Једна таква варијанта дводелног клизног лежаја приказана је на (сл. 5.2, десно). Постељница лежаја израђена је са сферним ослоним површинама које се ослањају на унутрашњост сферне површине у кућишту лежаја, чиме је омогућено прилагођавање лежаја нагибима вратила [10]. У њима се налази корито за смештај уља и стакло за показивање нивоа уља. Постељница може бити израђена са прорезом за смештај прстена за подмазивање. Примењује се за пречнике вратила од 25 до 300 mm. Мере ових лежаја су стандардизоване према DIN 118.



Слика 5.2. Дводелни клизни лежај према DIN 505 (лево), и високе носивости према DIN 118 (десно)

Стабилност положаја рукавца обезбеђује се применом вишеповршинских постелица. То је нарочито изражено код рада са високом учестаношћу обртања и нестационарно променљивим оптерећењима. Вишеповршинске постелице могу конструкционо да се изведу преко одговарајућих носећих сегмената, где сваки од њих има могућност стварања носећег уљног клина. Начин уградње радијалних клизних сегмената приказан је на сл. 5.3,а. Сегменти имају способност извесног заокретања, чиме су у раду добија клинасти зазор и остварује носећи уљни слој.

Пример улежиштења вратила двојног косозубног зупчаника једног турбо преносника велике снаге помоћу радијалних клизних лежишта дат је на сл 5.3,б [1].



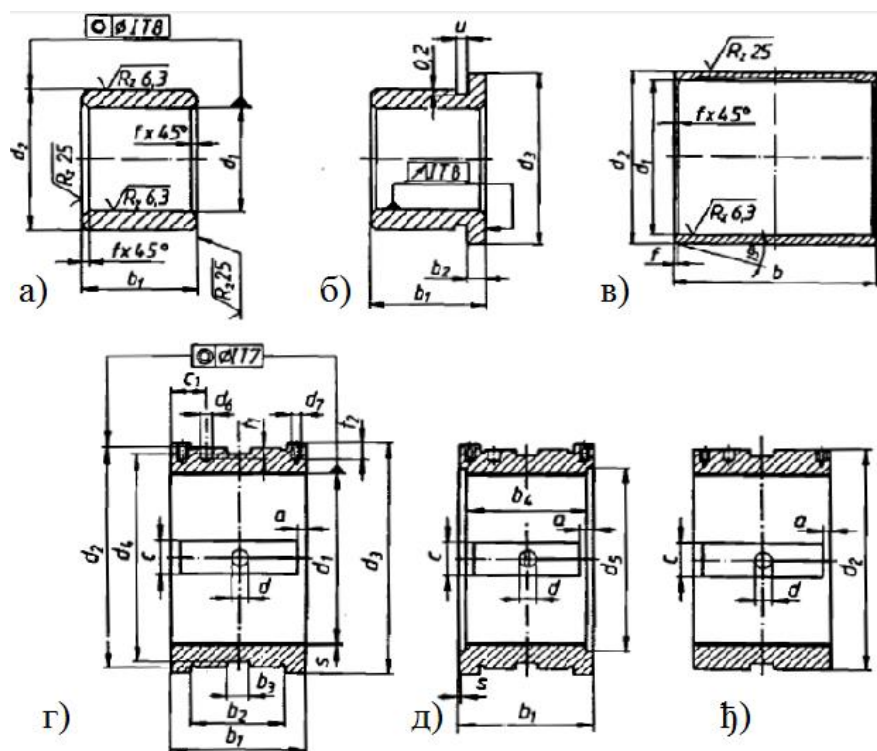
Слика 5.3 Радијални сегментни клизни лежај: а) начин уградње сегмената; б) улежиштење вратила зупчастог преносника

5.2 Облици лежишних чаура

Лежишне чауре (постелице) су најзначајнији делови лежаја. Имају облик шупљих танких цилиндара. Према дебљини деле се на **дебелозидне** и **танкозидне**, а према облику могу бити **једноделне** и **дводелне**. Једноделне чауре уграђују се у једноделне клизне лежаје пресовањем или лепљењем [8].

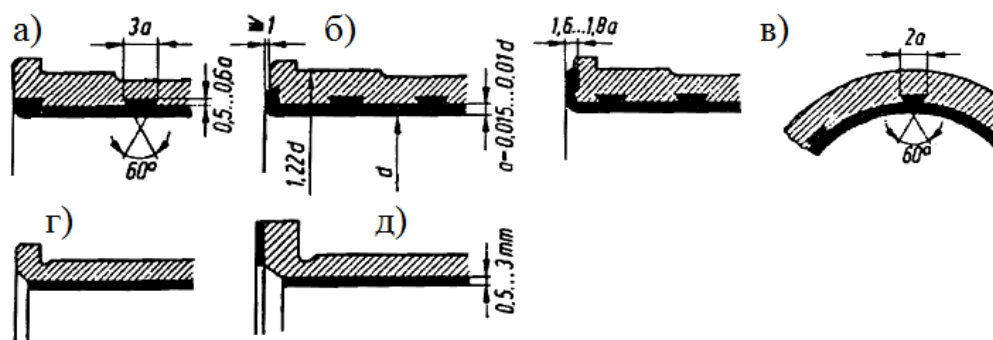
- Лежишне чауре могу бити израђене само од једног материјала који у том случају мора да задовољи захтеве у погледу чврстоће и захтеве у погледу антифрикционих особина. Стандардни облици једноделних дебелозидних лежишних чаура, израђених само од једног материјала, дати су на сл. 5.4,а и б.

Ове чауре се израђују од Cu легуре најчешће ливењем, али се израђују и од сивог лива. Ради лакше монтаже ивице чаура обрађују се под углом од 45° , што се посебно не означава. Танкозидне једноделне чауре су такође стандардизоване (сл. 5.4,в). Израђују се од легуре P.CuSn7ZnPb . Предвиђене су за уградњу у лежаје чији конструкциони облик дефинише DIN 502, DIN 503, и DIN 504.



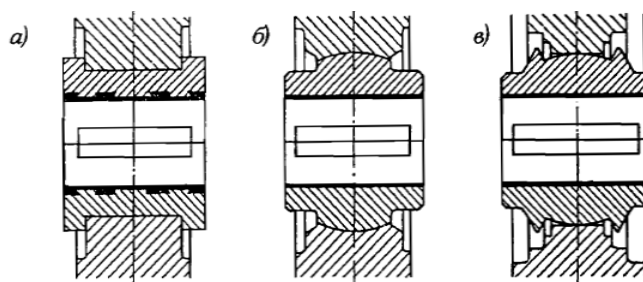
Слика 5.4 Лежишне чауре: а) дебелозидна једноделна чаура, б) дебелозидна једноделна чаура са ободним наслоном, в) танкозидна једноделна чаура од Си, г) лежишна чаура са наслоном за аксијални слободни лежај, д) лежишна чаура са наслоном за фиксирани лежај, ђ) лежишна чаура без наслона за аксијално слободни лежај

- Постоји и конструкциона варијанта где се тело лежишне чауре израђује од материјала довољне чврстоће и издржљивости, а затим се клизне површине пресвлаче танким слојем (заливком) легуре изванредних антифрикционих својстава. Понекад се наноси и већи број антифрикционих слојева. Последњи антифрикциони слој је обично од калаја или неког другог антифрикционог материјала и не прелази дебљину од 20 μm . Уколико се похаба овај слој, то у критичним периодима рада следећи, нешто дебљи, антифрикциони слој преузима улогу клизног споја. Предност оваквог извођења су уштеда скупих антифрикционих материјала и могућност регенерације радне исправности клизног лежаја, доношењем новог антифрикционог слоја. Тело лежишних чаура израђује се од челика ($\check{C}$ 0360 (S235JR), $\check{C}$ 1120 (C10E), $\check{C}$ 1220 (C15E) итд.), а клизне површине се пресвлаче антифрикционим слојем оловне легуре L.PbSn10. Због загревања чауре у току рада и различитих коефицијената линеарног ширења челика и лежишног материјала, постоји опасност њиховог раздвајања. Због тога се спајање тела чауре изводи са жлебовима у виду ластиног репа (сл. 5.5,а,б,в).



Слика 5.5 Спајање тела чауре са антифрикционим слојем помоћу жлебова (а, б, в) и лемљењем (г, д)

У ове жлебове се заливањем наноси пресвлака од калајне или оловне легуре. Тање пресвлаке дебљине 0,5...3 mm (зависи од унутрашњег пречника постељице од 50...600 mm), спајају се са телом чауре лемљењем (сл. 5.5,г,д). Постоје конструкциона извођења једноделних и дводелних лежишних чаура овог типа. Предвиђене су за пречнике отвора од $d = 50$ mm до 710 mm у толеранцијском пољу Н7. Начин уградње постељице у тело лежаја приказан је на сл.5.6.



Слика 5.6 Уградња постељице а) цилиндрични ослонац, б) сферни ослонац, в) линијски ослонац

6 Примери прорачуна клизних лежишта

Пример 1:

За клизни лежај коленастог вратила дизел мотора проверити да ли су испуњени улови хидродинамичког пливања и да ли је радна температура у дозвољеним границама. Хлађење лежаја је само принудним путем помоћу уља улазне температуре $\Theta_u = 60^\circ\text{C}$ и излазне температуре $\Theta_i = 80^\circ\text{C}$.

Подаци су: Оптерећење лежаја $F_r = 12\text{kN}$, број обртаја $n = 1700\text{min}^{-1}$, материјал постелице SnSb12Cu6Pb, материјал рукавца Č1330 (C 25), пречник лежаја $D=80\text{mm}$, дужина лежишне чауре $B=40\text{mm}$, релативна дебљина уљног филма $\delta = 0,12\text{mm}$, дозвољена вредност дебљине уљног филма $h_{olim} = 8\mu\text{m}$, радна температура лежаја $\Theta_L = 80^\circ\text{C}$.

Рад:

Провера хидродинамичког пливања:

$$1) \text{ Брзина клизања: } v = \frac{D \cdot \pi \cdot n}{60 \cdot 1000} = \frac{80 \cdot \pi \cdot 1700}{60000} = 7,12 \text{ m/s}$$

$$2) \text{ Средњи релативни зазор: } \psi_m = (0,0007 \div 0,0009) \cdot \sqrt[4]{v} = 0,0008 \cdot \sqrt[4]{7,12} = 0,0013068$$

$$3) \text{ Промена релативног зазора: } \Delta\psi = (\alpha_p - \alpha_R) \cdot (\vartheta_L - 20^\circ\text{C})$$

$$\alpha_p = 22,7 \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1} \text{ коефицијент линеарног ширења постелице}$$

$$\alpha_R = 12 \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1} \text{ коефицијент линеарног ширења рукавца}$$

$$\Delta\psi = (22,7 \cdot 10^{-6} - 12 \cdot 10^{-6}) \cdot (80 - 20) = 0,000642$$

4) Ефективна вредност релативног зазора:

$$\psi = \psi_m + \Delta\psi = 0,0013068 + 0,000642 = 0,0019488$$

$$5) \text{ Апсолутна вредност зазора } Z: \psi = Z/D \rightarrow Z = \psi \cdot D = 0,0019488 \cdot 80 = 0,155904 \text{ mm}$$

$$6) \text{ Минимална дебљина уљног филма: } h_0 = \delta \cdot \frac{Z}{2} = 0,12 \cdot \frac{0,155904}{2} = 0,00935\text{mm} = 9,35\mu\text{m}$$

$$9,35 > 8 \quad h_0 > h$$

Закључак: Испуњени су услови хидродинамичког пливања!

Провера радне температуре:

$$\text{Специфична топлота уља } c: c = 2000 \text{ J/m}^2\text{K}$$

$$\text{Густина уља } \rho: \rho = 900 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Коефицијент трења } \mu: \mu = 0,003 \text{ (табела 8.3.4, [2])}$$

$$\text{Угаона брзина } \omega: \quad \omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{\pi \cdot 1700}{30} = 178,028 \text{ rad/s}$$

$$\text{Коефицијент прелаза топлоте } k_c: \quad k_c = 15 \dots 20 \text{ W/(m}^2\text{K)}, \quad k_c = 18 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

$$\text{Бездимензиони коефицијент протока } K_{q1}: \quad K_{q1} = 0,117 \text{ (Сл. 8.3.9, [2])}$$

Проток уља q :

$$q = D^3 \cdot \psi \cdot \omega \cdot K_{q1} = 0,08^3 \cdot 0,0019488 \cdot 178,028 \cdot 0,117 = 20,78 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Из једначина: } \vartheta_L = \vartheta_0 + \frac{\mu \cdot F \cdot v}{k_c \cdot \pi \cdot D \cdot B} \quad \text{и} \quad q_p = \rho \cdot c \cdot q (\vartheta_i - \vartheta_u) \quad \vartheta_i - \vartheta_u = \Delta \vartheta \text{ следи:}$$

$$\Delta \vartheta = \frac{\vartheta_0 + \frac{\mu \cdot F \cdot v}{k_c \cdot \pi \cdot D \cdot B}}{\rho \cdot c \cdot q} = \frac{20 + \frac{0,003 \cdot 12000 \cdot 7,12}{18 + \pi \cdot 0,08 \cdot 0,04}}{900 \cdot 2000 \cdot 20,78 \cdot 10^{-6}} = 6,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{Па је излазна температура: } \vartheta_i = \vartheta_u + \Delta \vartheta = 60 + 6,3 = 66,3 \text{ } ^\circ\text{C} < \vartheta_L = 80 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Закључак: Температура је у дозвољеним границама.

Пример 2:

Одредити средњи релативни зазор ψ_m и проверити специфично оптерећење и радну температуру радијалног клизног лежаја.

Подаци су: Мередовно радијално оптерећење лежаја $F_r = 10 \text{ kN}$, број обртаја вртила на коме се налази лежај $n = 50 \text{ min}^{-1}$, маатеријал постељице P.CuSn12Pb, подмазивање лежаја машћу, налегање: $\emptyset 50\text{H7}/g6$, дужина постељице лежаја $B=60 \text{ mm}$, коефицијент трења $\mu=0,07$, површина кућишта лежаја $A=0,1 \text{ m}^2$.

Рад:

Одређивање средњег релативног зазора:

$\emptyset 50\text{H7}$

Толеранцијско поље: $T = 25 \mu\text{m} = 0,025 \text{ mm}$ Доње гранично одступања: $EI = 0 \mu\text{m}$

Горње гранично одступање: $ES = T + EI = 0 + 0,025 \text{ mm} = 0,025 \text{ mm}$

Доња гранична мера: $D_d = D + EI = 50 + 0 = 50 \text{ mm}$

Горња гранична мера: $D_g = D + ES = 50 + 0,025 = 50,025 \text{ mm}$ $\emptyset 50\text{H7} = \emptyset 50_0^{+0,025}$

$\emptyset 50g6$

Толеранцијско поље: $t = 16 \mu\text{m}$ Горње гранично одступање $es = -9 \mu\text{m} = -0,009 \text{ mm}$

Доње гранично одступања: $ei = es - t = -9 - 16 = -25 \mu\text{m} = -0,025 \mu\text{m}$

Доња гранична мера: $d_d = d + ei = 50 - 0,025 = 49,975 \text{ mm}$

Горња гранична мера: $d_g = d + es = 50 - 0,009 = 49,991 \text{ mm}$ $\varnothing 50g = \varnothing 50_{-0,025}^{-0,009}$

Максимални зазор: $Z_{max} = ES - ei = 25 + 25 = 50 \mu\text{m} = 50 \text{ mm}$

Минимални зазор: $Z_{min} = EI - es = 0 + 9 = 9 \mu\text{m} = 0,009 \text{ mm}$

Толеранција склопа: $T_n = Z_{max} - Z_{min} = 50 - 0,009 = 41 \mu\text{m} = 0,041 \text{ mm}$

Средњи зазор: $Z_m = \frac{Z_{max} + Z_{min}}{2} = \frac{0,050 + 0,009}{2} = 0,0295$

Средњи пречник рукавца: $d_m = \frac{d_d + d_g}{2} = \frac{49,975 + 49,991}{2} = 49,983$

Средњи релативни зазор: $\psi_m = \frac{Z_m}{d_m} = \frac{0,0295}{49,983} = 0,0005902$

Провера оптерећења $p \leq p_{doz}$:

$$p_{doz} = 0,6 \text{ N/mm}^2$$

$$p = \frac{F_r}{D \cdot B} = \frac{10000}{60 \cdot 50} = 3,33 \text{ N/mm}^2$$

$3,33 \not\leq 0,6$ провера не задовољава!

Провера температуре:

$$\text{Брзина обртања: } \nu = \frac{D \cdot n \cdot \pi}{60 \cdot 1000} = \frac{50 \cdot \pi \cdot 50}{60000} = 0,13 \text{ m/s}$$

Иако је притисак већи од дозвољеног, услед мале брзине оптерећење можемо занемарити и потребно је само проверити и прорачунати радну температуру.

Коефицијент прелаза топлоте k_c : $k_c = 15 \dots 20 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, $k_c = 20 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

$$\text{Радна температура } \vartheta_L = \vartheta_0 + \frac{\mu \cdot F \cdot \nu}{k_c \cdot \pi \cdot D \cdot B} = 20 + \frac{0,07 \cdot 10000 \cdot 0,13}{20 \cdot 0,1} = 65,5^\circ\text{C}$$

$$\vartheta_L < 80^\circ\text{C}$$

Закључак: Природно хлађење задовољава!

7 Закључак

Радијална клизна лежишта немају више толику примену у машинству, као када су настала, али у неким гранама индустрије су и даље незаменљива и непревазиђена због својих добрих особина. Од свог настанка развијала су се у многим правцима не би ли се прилагодила потребама тржишта.

Од једноделних до вишеделних, развијали су се посебни принципи подмазивања и велики број конструкционих облика, све из разлога да се ова врста лежишта усаврши до максимума. У томе су стручњаци скоро и успели. Временом су их направили таквима да су им обезбедили велику носивост, а мале димензије самог лежишта. Услови хидродинамичког пливања су омогућавали неограничен животни век што је посебно било добро у условима високих учестаности. Могућност пригушења буке и вибрације такође је једна од њихових добрих особина. Прилагођавање и коришћење у широкој области преноса оптерећења са покретних делова машина на непокретне представљају основну улогу ових лежаја, јер котрљајни лежајеви имају границу носивости много нижу него клизни. Али и поред свих ових добрих особина постоји и неколико особина које су ову врсту лежаја бациле у сенку котрљајних, а оне су: систем за подмазивање заузима велики простор што је и главни разлог њиховог постепеног нестајања, осетљивост на отпоре клизања, захтевају стално одржавање и проверавање мазива, обезбеђивање потребног зазора између рукавца и постељице што је само по себи тешко изградити без повећања крајње цене, потребно је имати константну велику брзину рукавца, мазиво добре вискозности и многе друге...

Управо ова проблематика подмазивања (око остваривања попуног подмазивања) и простора као и предности највећег супарника (котрљајних лежајева) је учинила да се ова врста лежаја данас ретко може срести у машинској пракси. Међутим, истраживања извршена последњих година довела су до значајног усавршавања клизних лежишта и њиховог повратка на тржиште.

Литература

- [1] Василије Волков, Елементи машина, Факултет електротехнике, стројарства и бродоградње, Сплит, 1961.
- [2] Вера Николић, Машински елементи – теорија, прорачун, примери, Машински факултет, Крагујевац, 2004.
- [3] Вера Николић, Зорица Ђорђевић, Мирко Благојевић, Машински елементи – збирка задатака, Машински факултет, Крагујевац, 2008.
- [4] Војислав Милентовић, Милосав Огњановић, Машински елементи – III, елементи за обртно кретање, течности и гасове, Машински факултет, Ниш, Београд, 1995.
- [5] Душан Ј. Витас, Милан Д. Трбојевић, Машински елементи II, Машински факултет, Београд, 1978
- [6] http://en.wikipedia.org/wiki/Plain_bearing
- [7] <http://www.radijal.com/zanimljivo.htm>
- [8] http://en.wikipedia.org/wiki/Bearing_%28mechanical%29#History
- [9] http://www.chikaasistent.com/index.php?option=com_content&view=article&id=248&Itemid=557
- [10] http://www.veleri.hr/files/datoteke/nastavni_materijali/k_promet_2/OS_12_Lezaji.pdf