

**Факултет инжењерских наука Универзитета у
Крагујевцу**



Назив студијског програма: Машинско инжењерство
Ниво студија: Основне академске студије
Модул: Машинске конструкције и механизација
Предмет: Машински елементи 2
Број индекса: 34/2017

Јока Л. Стојановић
Композитна клизна лежишта
завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Зорица Ђорђевић, ред. проф.
2. _____
3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да да опис карактеристика и основне поделе клизних лежишта, материјале за израду клизних лежишта, као и карактеристике клизних лежишта од композитних материјала. Рад треба да садржи примере примене композитних клизних лежишта, као и предности лежишта од композитних материјала у односу на клизна лежишта од метала. Такође, у оквиру рада кандидат треба да, кроз конкретан пример, покаже прорачун носивости металног и композитног лежишта.

Препоручена литература:

[1] Branko Katana: Životni vijek kompozitnog kliznog ležaja, doktorska disertacija Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.

[2] Вера Николић: Машински елементи, теорија, прорачун, примери Машински факултет, Крагујевац, 2004.

[3] Душан Ј. Витас, Миладнин Д. Трибојевић: Машински елементи II, Београдско издавачко – графички завод, Београд, 1978.

Крагујевац, август 2020.

Ментор:

Др Зорица Ђорђевић, ред. проф.

Садржај

1. Увод.....	1
2. Карактеристике и подела клизних лежишта.....	3
2.1 Основна подела клизних лежаја.....	3
2.2 Клизни спој и облици трења у клизним лежиштима	6
2.3 Хидродинамичко и хирдостатичко подмазивање	8
2.3.1 Канали за развођење мазива	10
2.4 Носивост лежишта.....	10
2.4.1 Поступак прорачуна клизних лежишта.....	15
2.5 Загревање лежишта.....	21
3. Материјали за израду клизних лежишта	23
3.1 Врсте материјала	24
4. Карактеристике клизних лежишта од композитних материјала	27
4.1 Композитни материјали	27
4.1.1 Пуниоци и матрице.....	28
4.2 Клизна лежишта од композитних материјала.....	29
4.3 Триболошки састав композитних клизних лежишта	33
4.3.1 Хабање композитних клизних лежишта.....	36
5. Примена композитних клизних лежишта.....	39
6. Пример прорачуна композитних клизних лежишта	45
Закључак	48

The summary

This paper provides an overview of the increasing use of composite materials in the manufacturing industry with the aim of replacing metal materials and thus more economical production as well as reducing the risk of environmental pollution due to the use of lubricants. The paper focuses on the application of composite materials for the production of composite journal bearings, as well as the application of these bearings in various types of industries. The basics of calculation of elements of sliding bearings made of metal in comparison with the calculation for composite materials and plastics are given, as well as additional information related to the method of operation and maintenance of journal bearings in general.

Key words: friction, lubrication, lining, shaft, composites.

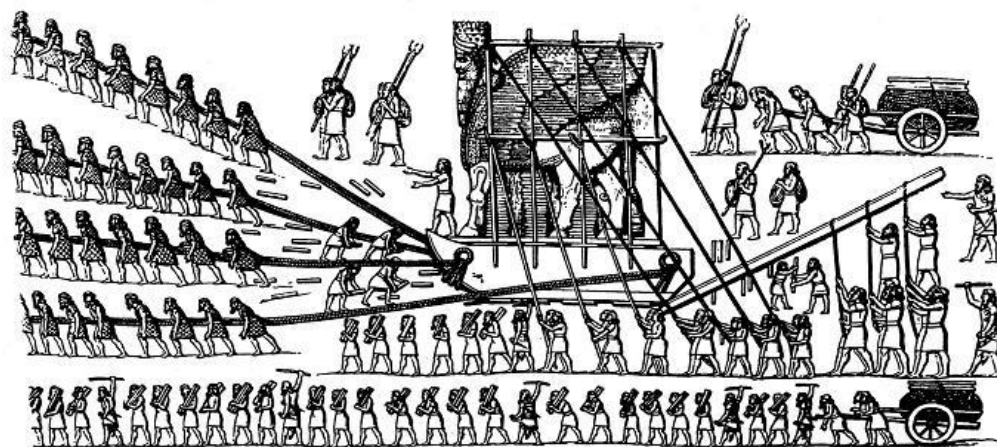
Резиме

Овим радом дат је преглед све веће примене композитних материјала у индустрији са циљем замене металних материјала и тиме економичнијом производњом као и смањењем ризика загађења околине услед примене мазива. Рад се фокусира на анализи композитних материјала који се користе за израду клизних лежишта, као и примени тих лежишта у разним видовима индустрије. Дате су основе прорачуна елемената клизних лежишта од метала, извршено је поређење са прорачуном за композитне материјале и пластичне масе као и додатне информације везане за начин рада и одржавања клизних лежишта.

Кључне речи: клизна лежишта, композити, носивост, трење, подмазивање.

1. Увод

Најранији записи о лежиштима датирају још из Древног Египта и Месопотамије, где се идеја о смањењу трења између два елемента која се међусобно обрћу јавља у постављању котрљајних елемената, понекад са или без средства за подмазивање, испод тзв. санки за превоз великих камених блокова или статуа (слика 1.1). У Римском царству се вид конструкције клизних лежишта среће у облику дрвених ваљака унутар дрвене чауре за окретне столове на војним бродовима, како би се олакшала подела хране.



Слика 1.1: Сликовити запис из Месопотамског царства превоза камене статуе за изградњу храма [4]

Клизна лежишта, као и котрљајна, се као стандардни машински елементи уводе крајем 18. века захваљујући индустријској револуцији и све већој употреби и једноставнијој набавци челика. Основна идеја је остала иста било то у Римском царству или данас, а то је да лежишта омогућавају пренос обртног кретања смањујући трење између елемената и обезбеђују контролисану и ефикаснију трансмисију снаге. Лежишта поседују способност да подрже задато оптерећење кроз резултирајући ексцентрични положај вратила подвргнуто ротацији.

Како унутар данашње индустријализоване цивилизације претварање ротационог кретања у користан рад представља основни вид процеса у производњи и раду машина клизна као и котрљајна лежишта се могу назвати једним од *основних машинских елемената*. Клизна лежишта се могу срести у сваком аспекту живота, како у моторима возила, тако и у бициклама преко авиона, електрана све до свемирских летелица.

Конвенционалана клизна лежишта су од метала и раде на принципу хидродинамичког пливања посредством мазива како би се смањило трење између елемената и успоставио притисак који одржава ексцентричност вратила и омогућава пренос оптерећења. Индустријска мазива (уља, минерална уља, масти, итд.) знатно утичу на продужење радног века елемената клизог лежишта, међутим могу бити јако штетна за околину у случају да се неконтролисано испуштају. Обзиром на штетна својства мазива као и самој тежњи очувања ресурса металних материјала, самим тим

уштедом у производњи, на тржишту су се појавила пластомерна и композитна клизна лежишта.

Композитна клизна лежишта, захваљујући начину израде, су економичнија јер је сам састав материјала подесив примени и не захтевају подмазивање. У случају да се подмазују оно може бити ваздухом из околине или водом, што је додатна предност у погледу смањења загађења. Композитна клизна лежишта се такође примењују тамо где употреба металних клизних лежишта није могућа.

Примена композита у клизним лежиштима се углавном односи на израду постељица од композитних материјала. Композитна клизна лежишта се могу израђивати и од материјала сличног састава у потпуности.

На слици 1.2 дат је пример композитних постељица *TENMAT FEROFORM* и *RAILKO* које спадају у високо напредне моделе композитних постељица за примену при високим оптерећењима као што су на вратилима пропелера, дизалица и кранова, управљачким компонентама радних машина и др.

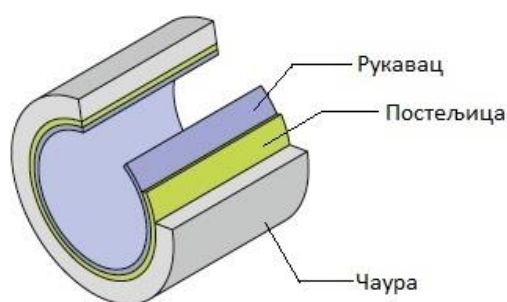


Слика 1.2: Приказ постељица *TENMAT FEROFORM* и *RAILKO* произвођача *TENMAT* [5]

2. Карактеристике и подела клизних лежишта

Клизна лежишта представљају лежишта код којих се међусобно кретање делова уз истовремено преношење оптерећења остварује клизањем. Основни делови клизног лежишта су: покретна површина (рукавац), који врши кретање (клизањем) по непокретној површини лежишта (постељици) и чаура чија је улога да обухвати елементе (кућиште), (сл. 2.1).

Утицај сувог трења између елемената се компензује присуством флуида између површина (подмазивањем), чиме се спречава директан контакт постељице и рукавца, што смањује оштећења у виду разарања као последица хабања [2].



Слика 2.1: Пресек са основним деловима клизног лежишта [6]

Предности клизних лежишта:

- конструкцијски могу бити једноделна и вишеделна, примењују се тамо где није могућа употреба котрљајних лежишта,
- у односу на котрљајна лежишта слој мазива између постељице и рукавца амортизује ударе и ударна оптерећења, односно поседује могућност пригушења вибрација и буке које би у одређеним случајевима биле присутне код котрљајних лежишта,
- релативно дуг век трајања – остварењем хидромеханичког подмазивања постиже се скоро неограничен радни век,
- погодна за рад при великим брзинама, тамо где би котрљајна лежишта имала ограничен век трајања, итд.

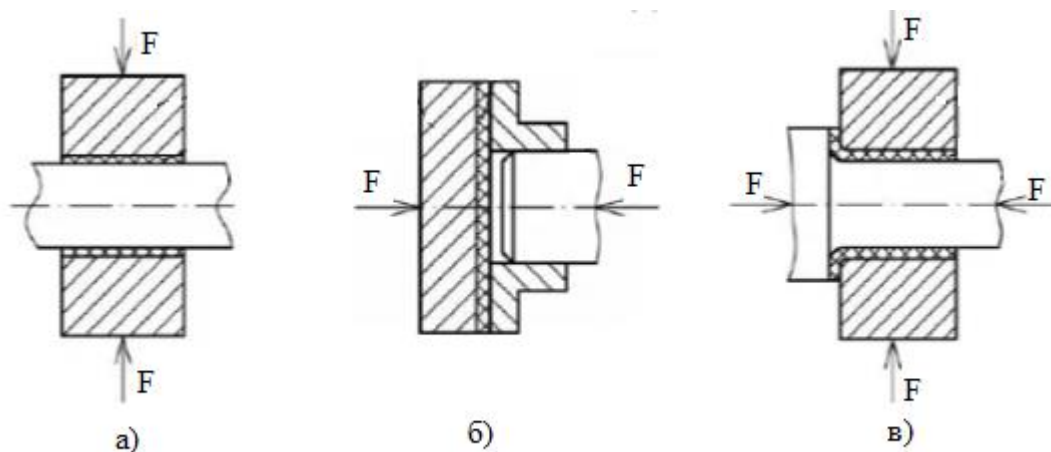
Недостаци клизних лежишта :

- велики губици енергије услед трења,
- хабање додирних површина услед несавршености подмазивања [2].

2.1 Основна подела клизних лежишта

У зависности од врсте и правца оптерећења која делују, разликују се статичко и динамичко оптерећење, на радијалним, аксијалним и радијално-аксијалним клизним лежиштима [7].

Код радијалних лежишта је оптерећење управно на уздужну осу вратила и лежаја (сл.2.2.1, а)). У случају аксијалних лежишта сила је паралелна са уздужном осом (б). Радијално-аксијална лежишта су истовремено оптерећена дејством сила управно и паралелно са уздужном осом (в) [8].



Слика 2.1.1: Типови оптерећења клизних лежишта [8]

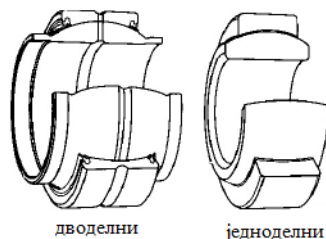
Основни део радијалног клизног лежаја је постелица, а аксијалног – плоча (прстен) [9].

Рукавац вратила код радијалних лежаја непосредно належа на постелицу, док код аксијалног чеона површина и плоча нису у директном контакту него се на крај вратила учвршћује главчина са венцем чија површина належа на плочу. У циљу преношења аксијалног оптерећења, радијално-аксијални лежаји поседују са једне, или обе, чеоне стране прстенасто проширење на које належа венац вратила и тиме преноси аксијалну силу. У случају промене смера дејства аксијалног оптерећења, треба предвидети и проширење са друге стране [9].

Клизна лежишта се могу поделити и према:

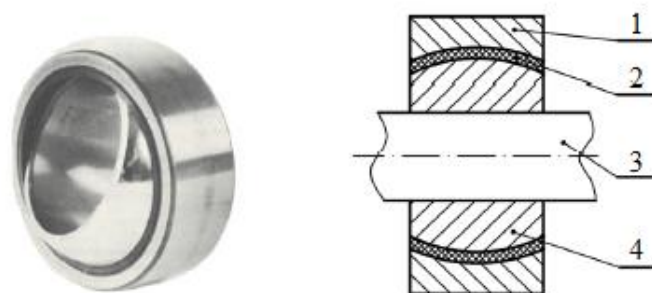
- начину налегања на: фиксирана (врше пренос како аксијалне тако и радијалне силе) и слободна (преносе само радијалне силе, са малим померањима у аксијалном правцу),
- према начину остварења притиска у уљу: хидростатичка и хидродинамичка,
- према прилагођавању деформацијама вратила: крута (неподесива) и зглобна (подесива), ... [2].

Најчешћи конструкциони облик клизних лежишта јесте цилиндричан, а постоје и други као што су нпр. сферни. Сферна клизна лежишта могу бити за радијална, аксијална и радијално-аксијална оптерећења (са косим додиром), као и једноделна или дводелна (сл. 2.2). Основна примена сферних клизних лежишта јесте за поравњење несаосних вратила или отвора лежишта [10].



Слика 2.2: Приказ дводелног и једноделног клизног лежишта [10]

Лежиште може бити самоподесиво (сл. 2.3), односно дозвољава мала радијална заокретања вратила. Значај примене оваквих лежаја јесте код вратила већих дужина при чијем раду се могу јавити угиб и осцилације, као што је нпр. изражено код пољопривредних машина [10].

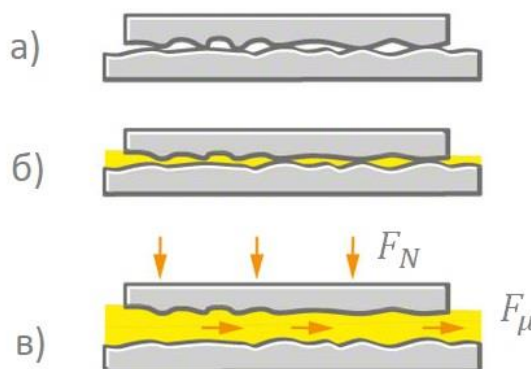


Слика 2.3: Самоподесиво лежиште: 1) спољашњи прстен лежишта; 2) постељица; 3) вратило; 4) унутрашњи прстен лежишта [10]

2.2 Клизни спој и облици трења у клизним лежиштима

Контакт двеју покретних површина, између којих се јављају отпори клизању, чини један клизни спој.

На слици 2.2.1 су приказана стања у клизном споју, односно облици трења клизањем, при чему се уочава да је смањење силе трења могуће постићи адекватним и правилним подмазивањем.



Слика 2.2.1: Стања у клизном споју додирних површина, а) суво трење, б) полутечно трење в) течно трење [11]

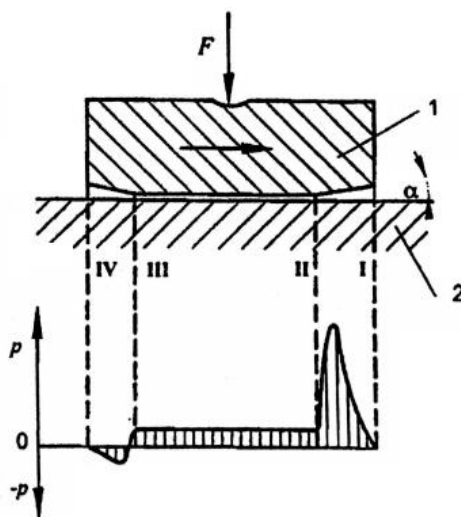
Код легаја у нормалном раду разликују се:

- Суво трење - без подмазивања, оно се не примењује (сл. 2.2.1, а)).
- Полутечно трење (*полуоквашено*) (слика 2.2.1 б)) се може срести при неустаљеном раду и онда када је подмазивање оскудно, при чему је коефицијент трења $\mu \approx 0,1 \div 0,2$ [12].
- У случају полутечног трења већи део радних површина је раздвојен слојем средства за подмазивање, али и даље постоје делови додирних површина где су елементи у директном додиру. Када је трење течно (слика 2.2.1, в)) дати елементи су потпуно раздвојени [12].

Услед несавршености додирних површина треба извршити њихово раздвајање, што се постиже слојем мазива односно уља, формирањем тзв. *уљног филма*. Када би додирне површине биле идеално глатке тај слој би био минималан. Међутим, такве површине не постоје чак ни при најфинијој обради рукавца и постељице. Увек постоје микроскопске неравнине у виду брегова и долина [3]. Код потпуног подмазивања је дебљина уљног филма већа од збира површинских одступања додирних површина (слика 2.2.1, в)). Овакво подмазивање је омогућено закошењима на крајевима тела 1 (под углом α), односно када постоји процеп као што је приказано на слици 2.2.2. При порасту притиска у мазиву, услед довољне брзине тела 1, уље продире између клизних површина и оне га захватају кретањем [2].

Формиран притисак омогућава да тело 1, такоређи, *заплива* по слоју мазива и тако се одвоји од тела 2, док је слој уља континуалан (слика 2.2.2). Овим настаје течно трење односно тзв. *динамичко пливање* [2].

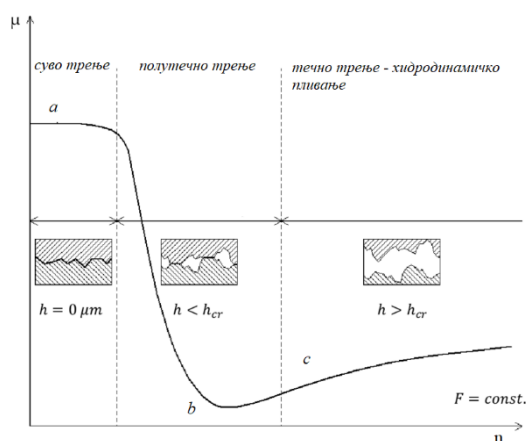
Расподела притиска зависи од брзине и вискозности уља. На слици 2.2.2 се уочава нагли пораст притиска у пресеку I при продору уља у процеп, као последица кретања тела 1. Услед смањења пречника процепа притисак достиже максимум непосредно при улазу у поље II. У области од II до III је притисак константан. Од пресека III се повећава пречник процепа и притисак нагло опада при чему постаје и мањи од атмосферског. У пресеку IV долази до стабилизације притиска, једнак је нули.



Слика 2.2.2: График расподеле притиска у уљном филму [2]

Остварење процепа нагињањем додирних површина примењује се код аксијалних клизних лежишта. Код радијалних клизних лежишта се рукавци обрћу. Додирне површине су цилиндричне, а не равне. Процеп се остварује зазором између рукавца и постељице [2].

Зависност коефицијента трења од броја обртаја, односно обимне брзине рукавца, приказана је графиком на слици 2.2.3. Ова зависност је позната под називом *Стрибекова крива* (Stribeck).



Слика 2.2.3: Зависност коефицијента трења (μ) од броја обртаја (n), где су: h - дебелина уљног филма, h_{cr} - збир одступања површина [13]

На графику се види да при вредности угаоне брзине $n = 0$ површине су у директном контакту при чему се јавља суво трење, чија је максимална вредност у тачки *a*. Повећањем брзине вредност коефицијента трења μ опада, до минимума у тачки *b*, где почиње одвајање рукавца од постељице, све до потпуног одвајања. Између *a-b* је област полутечног трења. Од тачке *c* настаје течно трење односно динамичко пливање.

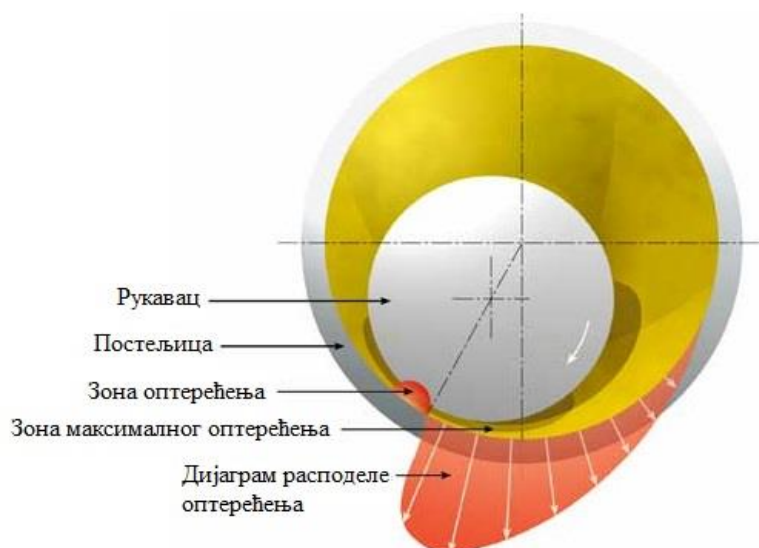
Код праволинијског кретања незнатних брзина се не може постићи хидродинамичко пливање. Трење је тада у области полуоквашених површина [3].

Из претходно поменутог следи да клизна лежишта могу исправно да обављају функцију, у току предвиђеног радног века, ако је обезбеђено хидродинамичко пливање [2].

2.3 Хидродинамичко и хидростатичко подмазивање

У случају хидростатичког подмазивања слој мазива одржава растојање између елемената како у раду тако и у стању мировања, док се код хидродинамичког носећи слој остварује као последица обртања рукавца. При обртању, рукавац врши померање и издиже се услед хидродинамичког притиска. У тренутку успостављања динамичке равнотеже настаје *пливање рукавца* на слоју мазива (сл. 2.2.3).

Мазива која се најчешће користе за подмазивање клизних лежишта су: уља, масти, чврста мазива, мешавина истих са уљима и мастима, вода (лежишта од дрвета, гуме и пластике) или примена антифрикционих материјала, најчешће у облику пластичних маса [2].

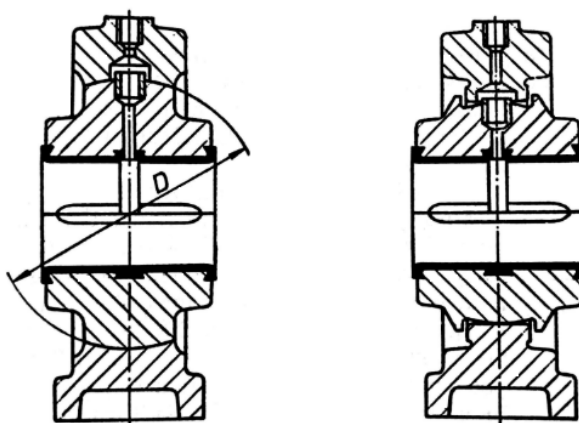


Слика 2.2.3: Хидродинамичко подмазивање клизних лежишта [14]

Слој средства за подмазивање је облика клина чија је улога уравнотежење спољних оптерећења (слика 2.2.3) [12].

Течно трење је осигурано само у присуству одређеног односа вискозитета средства за подмазивање, брзине обртања и зазора између рукавца и постелице [12].

На хидродинамичко пливање такође утиче и положај рукавца унутар лежишта. Да би се остварило хидродинамичко пливање осе рукавца и лежишта треба да буду паралелне како би се избегле додатне деформације. За вратила која су услед услова рада подложна деформацијама треба користити кратка и окретљива лежишта, која су самоприлагодљива положају рукавца, тј. остварују паралелност оса аутоматски. Последице деформација вратила могу бити: изражена оптерећења (претерани специфични притисци) на крајевима лежишта, трење полуоквашених површина и хабање. На слици 2.2.4 дат је пример два окретна лежишта чије су постелице са сферним ослоном [3].



Слика 2.2.4: Окретна лежишта [3]

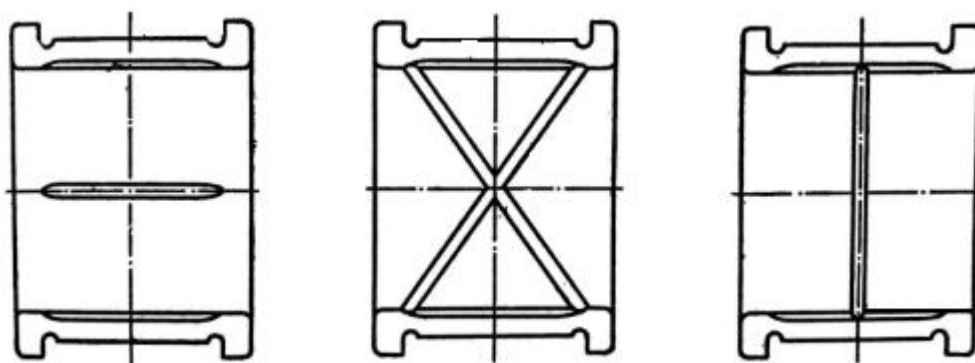
Основни услови за потпуно подмазивање (хидродинамичко пливање) били би:

- Пречник рукавца треба бити мањи од пречника лежишта тако да се оствари потребна вредност зазора и тиме добио процеп у виду клина који омогућава промену притиска у уљу.
- Брзина обртања (клизања) треба да буде довољно велика да би се остварио хидродинамички притисак који омогућава хидродинамичко пливање.
- Уље треба бити довољне вискозности и геометријске осе рукаваца паралелне (по потреби користити окретно лежиште) [3].

2.3.1 Канали за развођење мазива

Основне улоге канала у лежишним постелицама јесу: да омогуће довођење, развођење и одвођења мазива. Да ли ће се користити канали, као и њихов положај, зависи од: врсте подмазивања, облика и положаја површина клизања, релативног кретања постелице и рукавца, брзине обртања, итд. По правилу се канали за развођење не постављају на оптерећеним деловима постелице како не би био ометен пораст притиска. Ако би се поставили уздужни канали на оптерећеним деловима дошло би до наглог пада притиска у том делу, услед наглог повећања пресека. На излазу из процепа би притисак поново порастао, али не довољно да обезбеди динамичко пливање. Такође је непожељна примена дијагоналних канала за развођење. Код дијагоналних би дошло до спајања делова нижег са деловима вишег притиска и тиме дошло до изједначења притисака, што би поново спречило динамичко пливање. Прстенасти као и попречни канали у оптерећеним деловима би уље које доспе у процепе истиснули на другу страну и тиме исто то уље не учествује у подмазивању. Из наведених разлога следи: да би се остварило хидродинамичко пливање не треба постављати канале за развођење у оптерећеним деловима постелице.

На слици 2.2.5 су прикази примери лошег извођења канала за развођење мазива (са погледом на оптерећени део).



Слика 2.2.5: Лоше извођење канала за развођење мазива у оптерећеном делу постелице [3]

2.4 Носивост лежишта

Носивост лежишта представља вредност максималне радне силе којом се оптерети лежиште током радног века. Променом вредности оптерећења или димензија радних површина, радни притисак се доводи у прописане границе ($p < p_{doz}$) [15].

За радијално лежиште израз за прорачун радног притиска гласи:

$$p = \frac{Fr}{A} = \frac{Fr}{D \cdot B} \leq p_{doz} \quad (2.4.1)$$

где су: p_{doz} – вредност дозвољеног притиска, МПа; p – вредност радног притиска, МПа; Fr – вредност радијалне силе, N; A – вредност оптерећене површине, mm^2 ; D – унутрашњи пречник постелице, mm; B – ширина лежишта, mm.

За аксијално лежиште:

$$p = \frac{Fa}{A} = \frac{Fa}{\frac{\pi}{4}(d_s^2 - d_u^2)} \leq p_{doz} \quad (2.4.2)$$

где су: p_{doz} – вредност дозвољеног притиска, MPa ; p – вредност радног притиска, MPa ; Fa – вредност аксијалне силе, N ; A – вредност оптерећене површине, mm^2 ; d_u – спољашњи пречник прстена, mm ; d_s – унутрашњи пречник прстена, mm .

Према изабраним димензијама, сила која одговара дозвољеном притиску (F) представља носивост лежишта [15]:

$$F = A \cdot p_{doz} \geq F_r \quad (2.4.3)$$

где су: p_{doz} – вредност дозвољеног притиска, MPa ; F – вредност радијалне/ аксијалне силе, N ; A – вредност оптерећене површине, mm^2 ; p_{doz} – вредност дозвољеног притиска, MPa ; F_r – вредност радног оптерећења, N .

Вредност стварног површинског притиска p_{max} може бити знатно већа од средњег p , у зависности од радних услова и величине контактне површине између рукавца и постељице [1].

Како ће у даљем раду бити више речи о клизним лежиштима од композитних материјала потребно је дати образац који се односи на површински притисак $p_{H,max}$ за мање (слика 2.4.1) вредности додирних површина (између рукавца и лежишта) за пластомерне материјале. Поменути образац произилази из Херцове теорије и гласи:

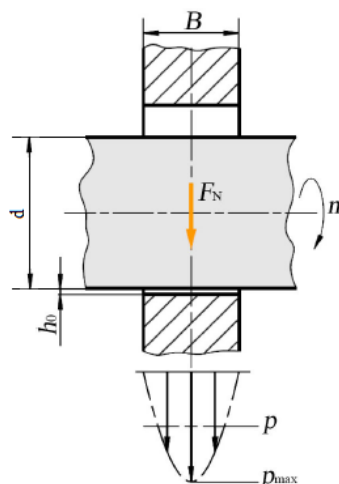
$$p_{H,max} = 0,836 \sqrt{p E_k \psi} \quad (2.4.4)$$

где су: p – вредност средњег притиска, MPa ; E_k – модул еластичности за композитне материјале, N/mm^2 ; ψ – релативни зазор (једначина 2.4.1.4).

Модул еластичности за пластомерне као и композитне материјале се може израчунати као *еквивалентни модул еластичности* [1]:

$$E_k = \frac{1}{E_e} = \frac{1}{2} \left[\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right] \quad (2.4.5)$$

где су: E_1 и E_2 модули еластичности задатих материјала, MPa ; ν_1 и ν_2 Поасонови коефицијенти задатих материјала, E_e ознака еквивалентног модула еластичности површина у контакту.



Слика 2.4.1: *Расподела притиска за мале додирне површине између рукавца и лежишта [1]*

Такође се, приближно, максимални притисак може одредити и једначином описаном од стране истраживача Erhard [16] и Strickle [17].

$$p_{s,max} = \frac{\pi}{2} \frac{F_N}{d B} \quad (2.4.6)$$

где су: F_N – оптерећење нормално на додирну површину, N ; B – ширина лежишта, m ; d – пречник рукавца, m .

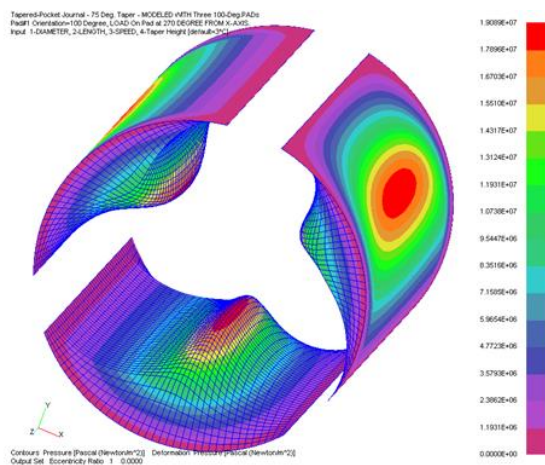
Поменути истраживачи, на основу претпоставке о синусној расподели притиска, узимају у обзир само 75% контактне површине, па тиме максимални притисак има облик:

$$p_{v,max} = \frac{16}{3\pi} \frac{F_N}{d B} \quad (2.4.7)$$

На основу претходно реченог може се закључити да максимални површински притисак већим делом зависи од:

- топлотне проводности,
- интензитета хабања,
- оптерећења,
- модула еластичности материјала лежишта,
- величине додирних површина између рукавца и лежишта.

Коришћењем широког асортимана софтвера могу се анализирати и најсложеније концепције лежишта. На слици 2.4.2 дат је 3D приказ расподеле притиска на сегментима вишеповршинске постељице коришћењем ARMD софтвер пакета. На слици се може уочити и поменути клинасти облик расподеле притиска.



Слика 2.4.2: 3D приказ расподеле површинског притиска вишеповршинске постељице коришћењем ARMD софтвер пакета [19]

У табели 2.4.1 дате су карактеристике материјала за постељице у зависности од мазива и услова рада. Што се тиче композитних материјала према препорукама произвођача *Norden Maritime* [18] је да при раду без мазива оптерећење не сме да прелази више од 0,2 МПа, док уз подмазивање водом оно не сме прећи 0,8 МПа .

Табела 2.4.1 : Карактеристике материјала за постељице клизних лежаја у зависности од мазива и услова рада [2]

Материјал		Ознака величине						Клизање полуокважених површина – недовољно подмазивање				Хидрод. пливање	Област примене
		R _{p0,2} N/mm ²	E N/mm ² X 10 ³	HB 20°C (100°C)	α °C ⁻¹ X 10 ⁻⁶	ν m/s	θ °C	Маст (ручно подмазивање машћу и уљем)		Уље (подмазивање капањем)		p _{douz} N/mm ²	
								V _{douz} m/s	p _{douz} N/mm ²	V _{douz} m/s	p _{douz} N/mm ²		
Сиви лив	SL200 SL250	500-700 800-900	105 115	HB 30 ≈ 2000	10	1,0...4 0,1...3	300	1	0,4	3	0,8		Зглобне везе, ручне дизалице, млинови, вагони
Pb - легуре ISO 4381	L.PbSn10 PbSn15Sn10	(70) 43	31	23 (9) 21 (115)	24,5 24	1...4	150	3	0,1	3	0,3	5 (15)	Алатне машине, вагони, спороходне клипне машине
Sn - легуре ISO 4381	L.Sn80 SnSb12Cu6Pb L.Sn89 SnSb8Cu4	(60) 61 (45) 47	57 58	27 10 25 15 23 10 23 14	22 22.7 23 23.9	60	110	3	0,1	3	0,3	5 (15)	Мотори СУС, алатне машине, Клипне машине, пумпе,парне турбине, турбогенератори
Sn-Pb бронза DIN1705	P.CuSn12Pb C.CuSn12Pb	140 150	105	80 90	18	3	250	2	0,6	2	1,2	7 (20)	Вентилатори, ЕМ, компресори, цетриф. Пумпе, дизалице, пресе, прен. Снаге
Црвени лив ISO 4382	P.CuSn10Zn P.CuSn7ZnPb C.CnSn7ZnPb	150 120 130	150 95 95	75 65 75	17,5	4	250	2	0,6	2	1,2	7 (20)	Коачке машине, манипулатори, ваљаонички станови, тешке алатне машине, дробилице, млинови
Al – бронза DIN1714	P.CuAl11Ni P.CuAl11Ni	320 320	110 110	170 170	23 23	15 15	250 250	2 2	0,3 0,3	2 2	0,4 0,4	7 (18) 7 (18)	Ваљаонички станови, алатне машине, вентилатори ЕМ
Pb – бронза ISO 4382	P.CuPb10Sn C.CuPb10Sn P.CuPb15Sn C.CuPb15Sn P.CuPb20Sn	80 110 90 110 90	83 90 86 86 87	65 70 60 65 50	18	12	230	2	0,6	2	1,2	-	Клипне машине, алатне машине, ковачке машине, ваљаонички станови, мотори СУС, пренос. Снаге
Zn – DIN 17660	CuZn13Si	250	105	110	18	12	230	2	-	-	-	7 (20)	Умерена оптерећења без већих удара
Синтеров. материјал								1	1	1	1,8	-	Механизми са осцилаторним кретањем

2.4.1 Поступак прорачуна клизних лежишта

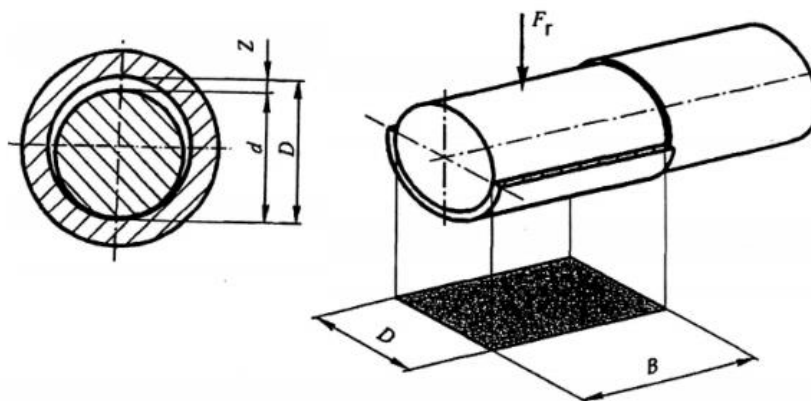
При прорачуну радијалних лежишта битне су следеће величине:

Брзина клизања при познатом пречнику рукавца d , m , и броју обртаја n , min^{-1} :

$$v = \frac{\pi d n}{60}, m/s \quad (2.4.1.1)$$

Конструкциона карактеристика лежишта ϕ , која представља однос дужине B и номиналног пречника лежишта D . Номиналан пречник рукавца и постелице су међусобно једнаки ($D_n = d_n$) (слика 2.4.1.1).

$$\phi = \frac{B}{D} = 0,2 \dots 1 \dots 1,5 \quad (2.4.1.2)$$



Слика 2.4.1.1: Пресек радијалног клизног лежишта [2]

Веће вредности конструкционе карактеристике лежишта поседују лежишта која раде са високим бројем обртаја, мањим оптерећењем и великом брзином клизања. Ужа лежишта са мањим вредностима карактеристике лежишта ($\phi = 0,5 \dots 1$) имају мање вредности притиска на ивицама постелице. Код оваквих лежишта уље брже бочно истиче и боље је одвођење топлоте. У случају да су вредности карактеристике лежишта премале, вредност притиска у уљу је недовољна.

Лежишта веће дужине (за веће вредности карактеристике лежишта $\phi = 1 \dots 1,5$) бочно истицање уља је спорије и температуре су самим тим више. Повишена температура има као последицу смањење вискозности уља и носивости. Као последица одступања лежишта од паралелности и услед еластичних деформација, постоји опасност од појаве великих притисака на ивици постелице, као и неравномеран распоред притиска дуж лежишта [2].

Зазор у лежишту

Као што је претходно речено у поглављу 2.2 код радијалних лежишта је кретање рукавца кружно, а не праволинијско и она поседују цилиндричне додирне површине. Хидродинамичко пливање се постиже стварањем процепа што се постиже зазором у лежишту. На слици 2.4.1.2 се види да је пречник лежишта D већи од пречника рукавца d ; њихова разлика представља *апсолутни зазор* Z [3]:

$$Z = D - d \quad (2.4.1.3)$$

Најчешће се уместо стварног зазора користи тзв. *релативни зазор*, који представља однос апсолутног зазора и пречника рукавца лежишта:

$$\psi = \frac{Z}{D} = \frac{D-d}{D} \quad (2.4.1.4)$$

У пракси се такође описује средњи зазор, обзиром да зазор варира између минималне и максималне вредности:

$$\psi = \frac{Z_m}{d_m} \quad (2.4.1.5)$$

где су:

$$Z_m = \frac{Z_{max} + Z_{min}}{2}; d_m - \text{средњи пречник рукавца [2]} \quad (2.4.1.6)$$

Вредност релативног зазора зависи од услова рада као и материјала постелице. У табели 2.4.1.1 дати су примери препоручених вредности зазора за одређене материјале.

Табела 2.4.1.1: Вредности релативног зазора према материјалу постелице [3]

Материјал	Вредност релативног зазора ψ
Бели метал	0,0004 ÷ 0,0009
Сиви лив	0,001 ÷ 0,002
Лаке легуре	0,0013 ÷ 0,0017
Оловне бронзе	0,002 ÷ 0,003
Металокерамика	0,002 ÷ 0,004
Пластичне масе	0,003 ÷ 0,004

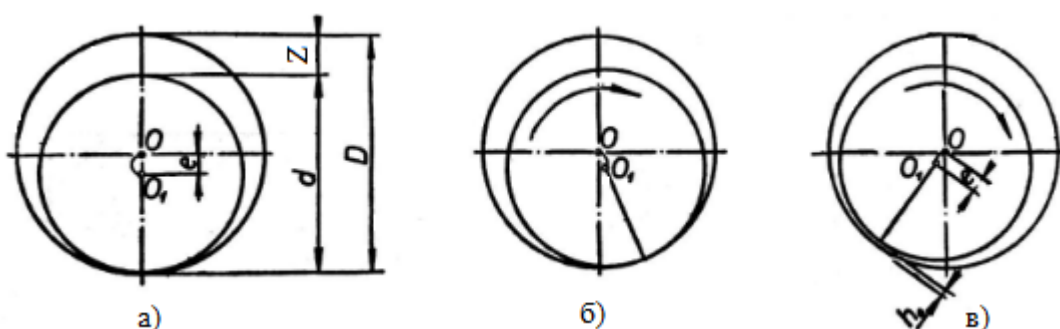
Ефективна вредност зазора се добија збиром вредности средњег релативног зазора, зависно од брзине клизања ψ_m (табеларне вредности добијене експериментално) и промене зазора услед загревања лежишта $\Delta\psi$ [2].

$$\psi = \psi_m + \Delta\psi \quad (2.4.1.7)$$

2.4.1.1 Носивост радијалних лежишта са хидродинамичким подмазивањем

У стању мировања (слика 2.4.1.1.1, а)) ексцентричност e , која представља удаљеност средишта лежишта O од средишта рукавца O_1 , има максималну вредност која износи $e = Z/D$. Када рукавац започне обртање смањује се ексцентричност и рукавац се бочно помера.

У случају смера обртања као што је дат сликом 2.4.1.1.1, рукавац се прво мало помери удесно, затим склизне улево услед мазива које улази у процеп облика полумесеца [3].

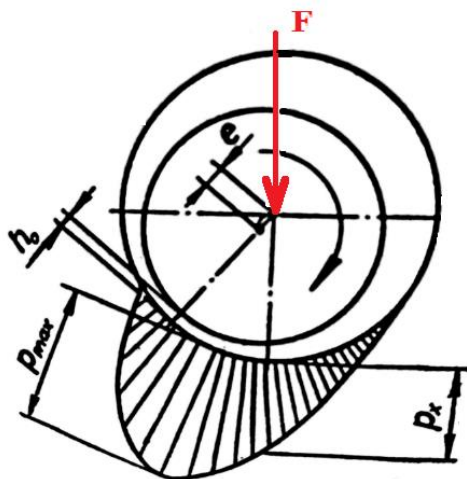


Слика 2.4.1.1.1: Положај рукавца и промена ексцентричности за: а) стање мировања, б) при поласку, в) рад при пуном обртању [3]

Рукавац се све више помера улево услед пораста брзине обртања и притиска у слоју мазива који је већи са десне него леве стране. Односно, са порастом брзине обртања ексцентричност се смањује. Геометријско место тачака O и O_1 преставља криву линију приближну облику кружног лука.

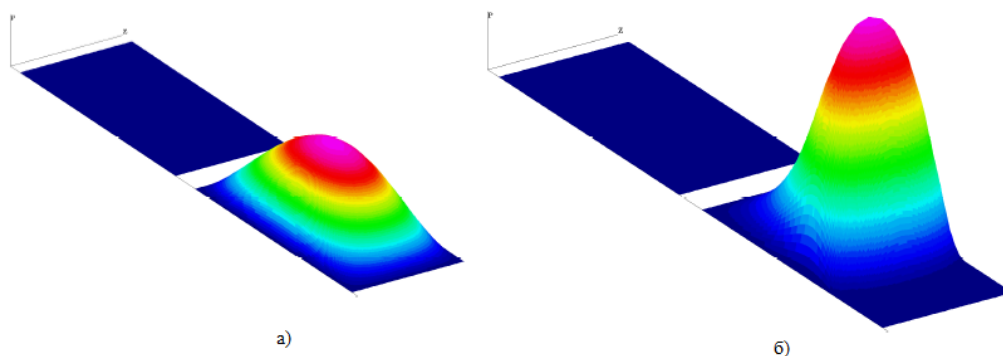
Обзиром на смањење ексцентричности са порастом брзине обртања, теоријски би при $n = \infty$ ексцентричност била једнака нули ($e = 0$) [3].

Асиметричан распоред притиска омогућава пренос оптерећења. На слици 2.4.1.1.2 приказан је график расподеле притиска уља за задато оптерећење лежишта F . Свака линија профила графика притиска представља вектор притиска уља. Вертикалне компоненте притиска се додају на постављено оптерећење док се хоризонталне компоненте потиру како би се успоставила равнотежа [20].



Слика 2.4.1.1.2: График расподеле притиска уља за задато оптерећење, где је h_0 минимална дебљина уљног филма [3]

Профил притиска се такође може представити у тродимензионалном формату коришћењем разних софтвера као што је приказано на слици 2.4.1.1.3.



Слика 2.4.1.1.3: Тродимензионални приказ притиска у уљу за: а) мало оптерећење, б) повишено оптерећење [20]

Горњи део лежишта је по правилу неоптерећени део и ту нема притиска и количина уља је већа него у доњем оптерећеном делу. Уље горњег дела не утиче на хидродинамичко пливање, већ има улогу одвођења топлоте, због тога се на овом месту врши довођење мазива [2].

При изучавању хидродинамичког пливања радијалних лежишта се полази од претпоставке да је струјање мазива ламинарно и да је реч о *Њутновој течности*. Њутнове течности имају линеаран однос између вискозности и напона смицања (вода, минерална уља, алкохол и др.). Обзиром на дате претпоставке треба извршити проверу *Рејнолдсовог броја (Reynolds)* одређеног једначином [2]:

$$Re = \frac{\rho v z}{2 \eta} \quad (2.4.1.1.1)$$

За ламинарно струјање:

$$Re \leq 41.3 \sqrt{\frac{D}{Z}} \quad (2.4.1.1.2)$$

где су: ρ – густина уља, kg/m^3 ; η – динамичка вискозност уља на радној температури, Ns/m^2 ; v – брзина клизања, m/s ; D – пречник лежишта, m ; Z – апсолутни зазор, m .

Важна карактеристика носивости клизних лежишта такође представља *Сомерфелдов број (Sommerfeld)*. Овај број представља показатељ стабилности вратила и бездимензиона је величина.

Ова величина је одређена изразом:

$$S_0 = \frac{p \psi^2}{\eta \omega} \quad (2.4.1.1.3)$$

где су: η – динамичка вискозност уља на радној температури, Ns/m^2 ; p – средње специфично оптерећење, N/m^2 ; ω – угаона брзина, s^{-1} ; ψ – релативни зазор.

Детаљније о Сомерфелдовом и Рејнолдсовом броју се може наћи у литератури [2].

Носивост радијалних клизних лежишта при хидродинамичком пливању (носивост уљног филма) износи [2]:

$$Fr = p A = p B D = S_0 \frac{B D}{\psi^2} \eta \omega \quad (2.4.1.1.4)$$

Расподела притиска у уљном филму:

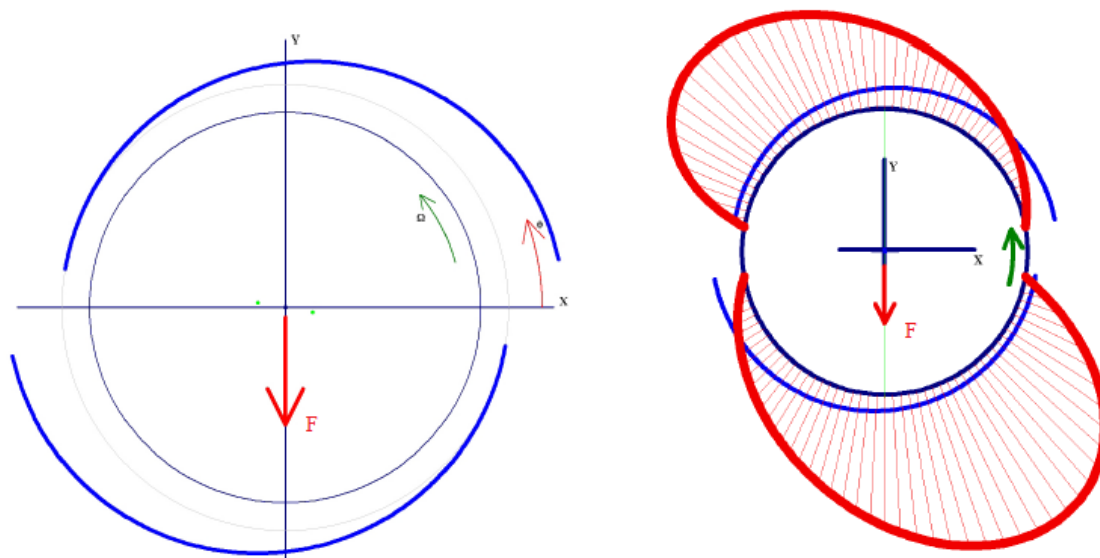
$$p = \frac{Fr}{A} = \frac{Fr}{B D} = S_0 \frac{\eta \omega}{\psi^2} \leq p_{doz} \quad (2.4.1.1.5)$$

Треба поменути да је највећа дозвољена ексцентричност (одступање) до 50%, већа од 50% се не препоручује. Контролом ексцентричности се могу регулисати карактеристике лежишта као што су: крутост, пригушење вибрација и топлотна проводност и довођење мазива [20].

При повећању ексцентричности e вратило губи стабилност, нарочито при великим брзинама. У овом случају се хидродинамичко пливање остварује помоћу носећих површина са више клинова (сегментни лежаји), односно примењују се лежаји са вишеповршинском постељицом [2]. Често се у употреби могу наћи лежишта са *двоповршинском* и *троповршинском* постељицом, при чему се притисак у појединим сегментима преноси као оптерећење у осталим. Оваква расподела притиска са појединих уљних клинова на сегменте постељице има за резултат веће укупно оптерећење сегмената од спољашњег, што повећава крутост слојева мазива и стабилан положај рукавца [2].

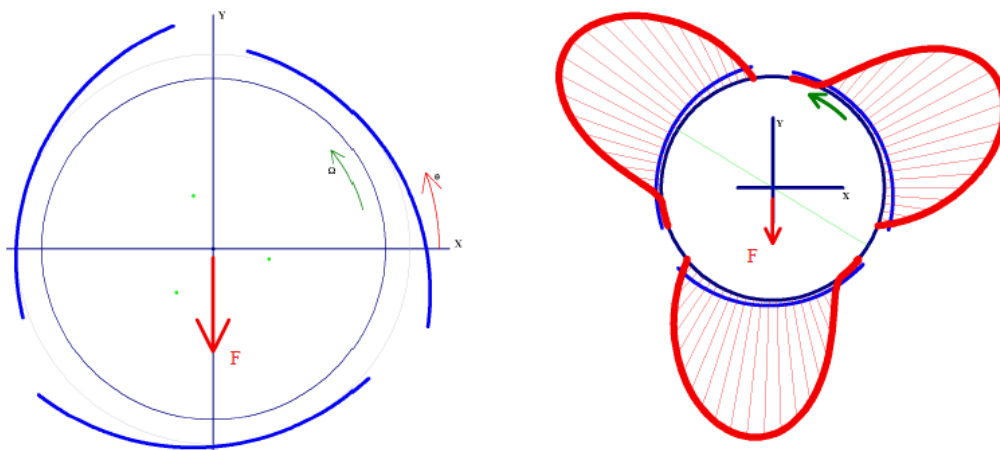
Конфигурација вишеслојне постелице омогућава конструктору да контролише расподелу притисака на деловима постелице, као и да усклади и предвиди промену ексцентричности при раду, за дато оптерећење [20].

Пример двоповршинских постелица дат је сликом 2.4.1.1.4. чија је конфигурација једноставна и ефикасна. Састоји се из два сегмента који су са тзв. 100% размештеним сегментима и у већини случајева са предоптерећењем. Могу се једноставно направити тако што се почетни комад постелице избуши ван центра и затим заокрене горња половина отвора за 180° како би се добио сразмерно размештен доњи део сегмента постелице.



Слика 2.4.1.1.4: Двоповршинска постелица са конфигурацијом 100% размештаја [20]

Као што је претходно речено троповршинске постелице (слика 2.4.1.1.5) су једне од најзаступљенијих конфигурација постелица, међутим могу бити јако скупе за израду. Конструктор при овој конфигурацији може изабрати потребну ексцентричност као и предоптерећење и тиме, са довољном прецизношћу да одреди распоред притиска на сегментима постелице. Оваква вид постелица наилази примену код вертикалних постројења [20].



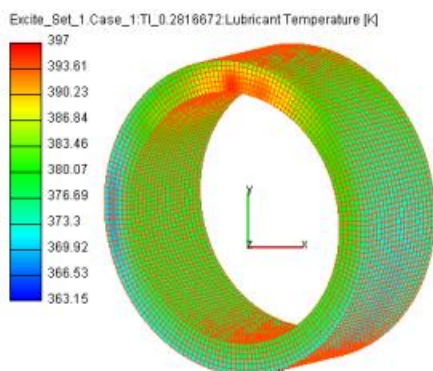
Слика 2.4.1.1.5: *Расподела хидродинамичког притиска на појединачним заобљеним и нагнутим сегментима постелице [20]*

2.5 Загревање лежишта

Услед обртања рукавца који је унутар постелице јавља се сила трења које се преводи у топлоту, чиме долази до загревања целокупног склопа. Произведена топлота у контакту површина или у слоју мазива се делом проводи у околину (природно хлађење лежишта). Нагли пораст температуре се јавља у периоду уходавања и убрзања рукавца, затим се у једном периоду успорава пораст температуре све док не достигне стационарну вредност. Стационарна вредност температуре се достиже при номиналном броју обртаја и не сме прећи одређену границу при раду. При прекорачењу стационарне температуре може доћи до појаве изразитих дилатација и деформација лежишта, рукавца и опадање вискозитета мазива [3].

Стационарна температура клизних лежишта у нормалним условима рада се креће у границама 40° - 50°C. Стационарна температура не треба да прелази 70° – 80°C, док у посебним случајевима и преко 100°C [3].

На слици 2.4.1.1.6 је представљен тродимензионални приказ расподеле температуре као резултат TEHD (Thermo-elasto-hydrodynamic) анализе лежишта где је температура највиша на местима највеће вредности ексцентричности оса лежита и рукавца.



Слика 2.4.1.1.6: *Тродимензионални приказ расподеле температуре уља унутар лежишта као резултат TEHD анализе [19]*

Лежишта са природним хлађењем, за обртање рукавца малом брзином, поседују температуру уља приближну средњој температури лежишта. Мазиво има улогу појачања природног хлађења, па се тиме сходно тај вид хлађења назива *вештачким хлађењем* [3]. Уље се по правилу доводи у лежиште на месту најмањег оптерећења, што је по правилу горњи слој уља, а у одређеним условима и кроз оптерећену зону [2].

Вредности које карактеришу загревање су коефицијент трења μ , који зависи од материјала постелице и мазива, као и коефицијент одвођења топлоте α . Коефицијент одвођења топлоте се креће у границама од $50 \div 140$, у зависности од услова рада [3].

- за лежишта у неповољним условима рада: $\alpha = 50$,
- за лежишта у нормалним условима рада: $\alpha = 70 \div 80$,
- за лежишта под врло повољним условима рада: $\alpha = 140$.

3. Материјали за израду клизних лежишта

Како би се смањило трење клизања при изради елемената се користе материјали са малим коефицијентом трења клизања у комбинацији са одређеним мазивима. Један од разлога употребе различитих врста материјала за елементе рукавца и посебно између постељице и самог вратила, јесте појава завареног споја при високим температурама као последица сувог трења између два иста материјала, као што је приказано на слици 3.1 [1].



Слика 3.1: Пример оштећења при појави међусобног заваривања постељице и вратила [22]

Изабрани материјали елемената треба да задовоље одређене захтеве у случају високих напрезања и температура. Неки од наведених захтева су:

- механичка постојаност,
- отпорност на хабање,
- добра топлотна проводност,
- хемијска отпорност, ... [1]

Материјал рукавца се одређује при прорачуну вратила и углавном се усваја челик високог квалитета површинске обраде и велике тврдоће (64 HRC и више). Површина клизања је по правилу брушена и глачана, бољи услови у клизном споју се постижу и хормирањем рукавца [2].

Материјал кућишта није значајан за рад лежишта.

Материјал постељице треба да поседује особине за ефикасно преношење оптерећења и омогући што боље клизне карактеристике. Најпознатија легура постељице је бели метал, чије је састав прописан стандардом.

Поред метала користе се и: металокерамички материјали, гума, пластичне масе, композитни материјали, итд. [2]. Захтеви које ови материјали треба да испуне јесу: мали

коэффициент трења, мекан тако да добро належе на вратило, као и да се исхаба пре површине вратила, итд. [2]

Правилан одабир лежajних материјала зависи и од брзина и оптерећења којима су елементи изложени. Такође, треба обратити пажњу и на смер обртања рукавца, односно да ли је обртно кретање једносмерно или се одвија у оба смера [1].

Са гледишта брзина постоје брзоходна и спороходна постројења. Брзина се у овом случају повезује са појавом угиба. У стању мировања угиб је једнак нули као и брзина, док при почетку рада долази до промене брзине и појаве тзв. почетног угиба. Вредност нормалног угиба код спороходних се одвија при мањим брзинама, док код брзоходних при великим брзинама. Према томе следи да код брзоходних постројења имамо како угиб при мањим тако и при већим брзинама током циклуса: мировања, почетка рада и нормалног рада, који по правилу траје дуже од претходна два [1].

3.1 Врсте материјала

Употребом само једног материјала се не могу задовољити сви захтеви. Односно, немогуће је истовремено остварити довољну жилавост и мали коэффициент трења. С обзиром на поменуто се тело постелице израђује од материјала довољне чврстоће (нпр. челик и сиви лив), а унутрашњост превлачи слојем материјала малог коефицијента трења. Превлачење је могуће остварити на више начина као што су: центрифугално ливење, заливање, ливење под притиском, итд [23].

Најчешћи материјали у употреби су: легуре бакра, алуминијума, олова и калаја. Поред ових материјала се користе и порозни материјали, пластичне масе и гуме.

Материјали за израду постелице који у основи садрже олово и калај су познати као бели метали. Ови метали поседују мале коефицијенте трења, малу вредност тврдоће, лако се прилагођавају рукавцу и поседују добру способност апсорбовања нечистоћа, високу температурну отпорност и отпорност на корозију. Међутим, нису погодна за ударна оптерећења и основне компоненте (олово и калај) су осетљиве на продукте оксидације масти. Бели метал калајне-основе садржи антимон, бакар и понекад олово [23].

Оловне и оловно – калајне бронзе

Представљају легуре бакра и олова, (тј. бакра, олова и калаја). Најчешће се користе за моторе СУС и алатне машине. Имају мали коефицијент трења као и линеарног ширења. Апсорпција нечистоћа је мања као и прилагодљивост рукавцу. Отпорне су на ударе, високе температуре и корозију као последицу оксидације мазива [23].

Алуминијумске бронзе

Представљају легуре отпорне на корозију и морску воду. Користе се за висока оптерећења и замена за калајне бронзе. Високе су тврдоће и поседују велики коефицијент линеарног ширења. Услед високе тврдоће су осетљивије на продор нечистоћа [23]. Отпорне су на киселине и високе температуре и имају добра клизна својства при правилном подмазивању.

Легуре алуминијума

Што је алуминијум чистији то је већа отпорност на корозију, међутим, као такав не поседује добре механичке особине, што захтева употребу легура. Одликују се високом тврдоћом и отпорношћу на хабање. Побољшане механичке особине се добијају додатком бакра, цинка, магнезијума итд. Легуре поседују високу динамичку чврстоћу и отпорност на корозију. Различит садржај калаја који се најчешће користи као додатак за лежајне легуре одређује поменуте особине. Ове легуре су јефтиније, међутим захтевају високу тачност израде, квалитет обраде површине и добро подмазивање. Највећу примену имају код мотора СУС на коленастом вратилу [23].

Порозни материјали

Код клизних лежаја се користе порозни материјали који су израђени синтерованем металног праха односно, сабијањем ситних зрна у чврстом стању при високим температурама и под одређеним притиском [23]. У односу на доминантни састојак се могу разликовати тзв. гвоздени, бакарни, графтни или посебно керамичи елементи (*кермети*) [23]. Порозност ових материјала је око 20-30% [23]. Ова особина омогућава продор мазивног средства у поре које се при загревању шире и тиме омогућавају самоподмазивање [24].

Примењују се за мање радне брзине и притиске. Отпорни су на хабање, поседују добре клизне карактеристике, омогућавају мирнији рад. Не могу се применити у условима хидродинамичког подмазивања [23].

Пластичне масе

За израду полимерних (пластичних) клизних лежишта (слика 3.1.1) се најчешће користи политетрафлуоретилен – PTFE и слични материјали. Ови лежаји не захтевају подмазивање, поседују мали коефицијент трења и велику отпорност на хабање. Одликују се једноставним руковањем и ниском ценом израде. Упркос лошој топлотној проводности захтевају добро хлађење [25].



Слика 3.1.1: Приказ клизних лежишта од пластичних маса [26]

Гуме

Налазе примену код водених турбина, бродских пропелера, пумпи и др. Подмазивање се врши водом, што омогућава дуг век трајања без ризика загађења околине. Смањују вибрације,буку и лежаји нису осетљиви на продор нечистоћа [23].

На слици 3.1.2 су представљени примери лежишта употребном разних врста материјала од произвођача GGB (Glacier Garlock Bearings) [27].



Слика 3.1.2 .: Приказ клизних лежишта од различитих материјала [27]

4. Карактеристике клизних лежишта од композитних материјала

Услед потребе замене неких метала са истовремено јефтинијим и квалитетним материјалима, као и потребом смањења загађења околине средствима за подмазивање, у одсеку индустрије за израду делова се све чешће користе полимерни и композитни материјали. Тако се и у индустрији лежаја срећу ови материјали и наилазе на све ширу примену.

4.1 Композитни материјали

Развој композитних материјала је проистекао из потребе за материјалима високе јачине и крутости, а да при томе имају мању масу. Предност ових материјала је што се делови могу пројектовати тако да су прецизнијих како мањих тако и већих димензија. Регулацијом састава се могу адаптирати потребним оптерећењима која су усаглашена прорачуном. Композитни материјали, као и полимерни, у виду материјала за израду лежишта наилазе највећу примену у прехранбеној индустрији, бродоградњи, хидроелектранама и сл. односно тамо где су особине као што су самоподмазивање и искључење мазивних средстава битни фактори.

Полимери поседују нека лошија својства као што су мала механичка издржљивост, ниска топлотна проводљивост и велика топлотна експанзија. Како би се побољшала ова својства у полимере се уграђују пуниоци као ојачања и ради постизања потребне чврстоће, топлотне проводљивости и ниског коефицијента термичког ширења [28].

Композитни материјали се састоје од две или више компоненте. Основа се назива *матрицом*, а материјал за ојачавање *ојачивач (пуниоц)*. Ови материјали задржавају основне особине полимерних материјала и додатно су ојачани додацима који могу бити метални, неметални или комбиновани. Пуниоци композитних материјала, односно ојачивачи, могу бити облика влакна или зрнастих пуниоца. Овим се добија материјал који има комбинована својства, односно допуњене недостатке појединачних у саставу [24].

Композитни материјали омогућавају релативне деформације при повишеним температурама, а притом задржавају добре особине као што су: мала маса, мали коефицијент трења, добра отпорност на хабање и амортизацију удара [25].

Композитни материјали се одликују високом чврстоћом и модулом еластичности, жилавости, топлотне постојаности и отпорности хабању [1].

Распоред ојачавајућих елемената композитних материјала може бити анизотропан, изотропан или ортотропан. Код анизотропних материјала особине елемента зависе од распореда влакана која су оријентисана у једном правцу. Код изотропних материјала распоред зрнастих честица је случајан. Код ортотропних особине зависе од три међусобно управна правца [24].

4.1.1 Пуниоци и матрице

Пуниоци (ојачивачи) као елементи композитних материјала имају улогу допуне физичких и механичких карактеристика основног материја (матрице - полимера). Ојачивачи обезбеђују захтевану јачину, крутост, модул еластичности, и др. у зависности од концентрације и распореда.

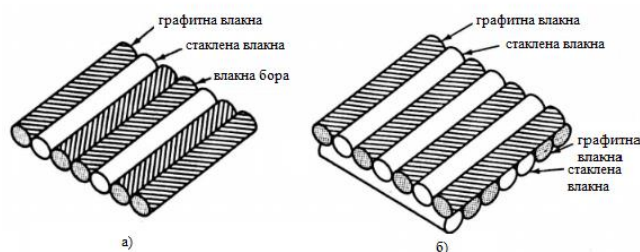
Према врсти ојачивача композитне материјале можемо поделити у две групе:

- композити са зрнастим пуниоцима,
- композити са влакнастим пуниоцима.

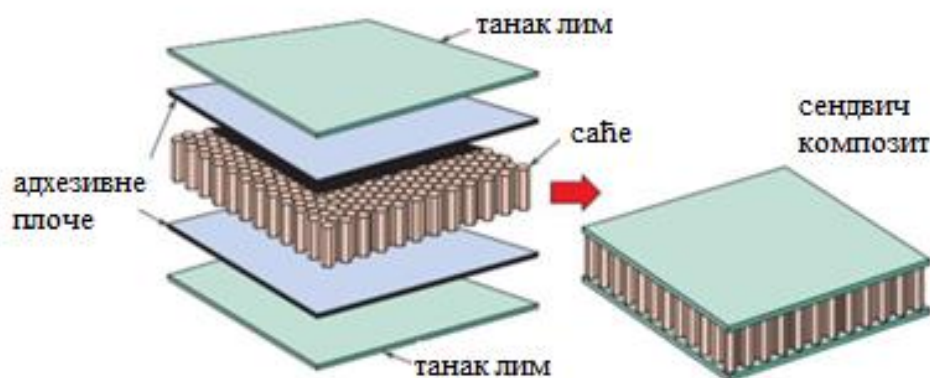
Композитни материјали са *зрнастим пуниоцима* поседују матрицу углавном од полимерне смоле (термореактивне смоле: епоксидна, полиестерска, фенолна,...), керамичку или металну. Пуниоци су лоптастог или љуспастог облика. Лоптице су велике тврдоће и израђују се од: Al_2O_3 , SiO_2 , такође од кречног камена и стакла и дају изотропне композите. Љуспасти пуниоци се израђују од каолина, самлевоног лискуна и стаклене вуне, дају анизотропне композите [24].

Улога *влакнастих пуниоца* је да ојачају и обезбеде крутост пластичној матрици. Ови композити се могу наћи у аутомобилској индустрији, индустрији авиона, шинских возила, хемијске опреме итд. Одликују се малом масом и повећаном носивошћу. Влакна могу бити: угљенична, стаклена, армидна, борна. Треба поменути и угљенична од графена, данас најтањи и најјачи познат елемент.

Врсте влакана се могу комбиновати. Њихов распоред може бити једнослојан или вишеслојан. Једнослојни (слика 4.1.1.1, а)) се користе када је оптерећење такво да се поклапа са оријентацијом влакана. Чешћи су вишеслојни облика ламината (попречно слагана влакна) (слика 4.1.1.1, б)), слагање преплитањем, селективни размештај или сендвич конструкције (слика 4.1.1.2). Сендвич конструкција се састоји од лимова који облажу саћасту конструкцију посредством адхезивне плоче [24].



Слика 4.1.1.1: *Распоред графитних и стаклених влакана за: а) једнослојно слагање и б) попречно вишеслојно слагање [24]*



Слика 4.1.1.2: Сендвич структура композита [29]

Материјали који спајају влакна у целину су тзв. *матрице*. Поред своје основне функције обликовања, матрица има улогу у заштити дела од спољашњих утицаја. Матрица омогућава равномерну расподелу оптерећења на влакна при експлоатацији композита. Густина и чврстоћа матрице је мања од пуниоца. Вискозност матрице треба да буде тачно прилагођена према пуниоцима како би се равномерно испунио простор око њега [1].

Полимери који се користе у функцији матрице се могу поделити у две основне групе:

- дуромерна матрица,
- пластомерна матрица.

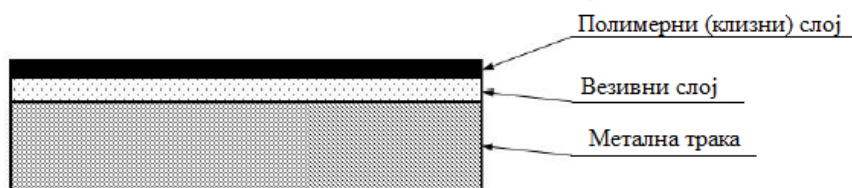
Дуромери који су најчешће у употреби су епоксидне и полиестерске матрице, са добрим механичким особинама као и отпорношћу на хемијска једињења. Крутост је променљива са променом температуре и имају изотропну структуру.

Пластомерне матрице у употреби су полипропилен (PP), полиамид (PA) и поликарбонати (PC). У односу на дуропласте имају анизотропну структуру. Код полимерних композита оптерећених константним оптерећењем је деформација материјала променљива у функцији времена. Ово може довести до ставрања пукотина и пуцања материјала [1].

4.2 Клизна лежишта од композитних материјала

Најчешћа композитна клизна лежишта у данашњој употреби су тзв. металопласти, који се састоје из металног слоја и полимера на контактним површинама, при чему се између ових слојева налази везивни слој (слика 4.2.1) [25].

Када се говори о врсти клизних лежишта од композита тада се најчешће мисли на састав постељице која се монтира у лежиште.



Слика 4.2.1: *Расподела слојева у пресеку металопласта [25]*

Познати представници оваквих лежаја су модели тзв. серије Glacier DU и DX код којих се клизни слој састоји од неколико међусобно повезаних слојева полимерних трака, на који се надовезује порозни међуслој бронзе, чија је улога одвођење толоте са клизног слоја на метал (слика 4.2.2) [25].



Слика 4.2.2: *Цилиндрична постелица клизног лежаја - металопласта - са порозним међуслојем бронзе – модела MB-DX [27]*

Пример постелице од PTFE полиамида произвођача SKF [30] је дат на слици 4.2.3. Ове постелице не захтевају подмазивање, односно примењују се за *рад на сувом*. Међутим, употребом мазива се могу додатно побољшати њене радне карактеристике. Подмазивање се може вршити како одређеном количином уља тако и водом. Коефицијент трења ових постелица се креће у границама $\mu = 0,03 \dots 0,25$, за радне температуре $t = -200 \div 250^{\circ}\text{C}$.



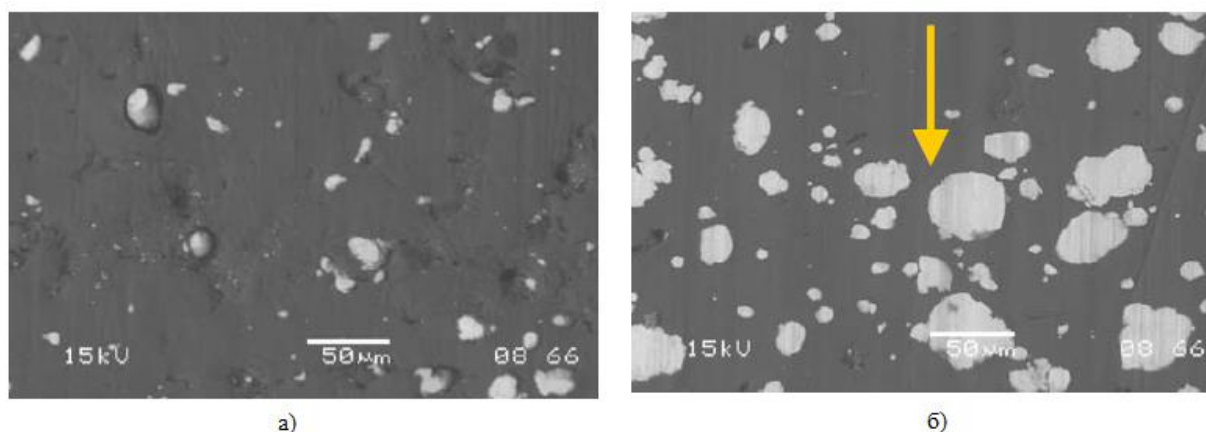
Слика 4.2.3: *PTFE полиамидна постелица са и без ободног прстена, произвођача SKF [30]*

Композитне постелице, компаније SKF, са намотаним влакнастим пуниоцима дате су на слици 4.2.4. Лежишта са овим постелицама поседују одличне радне карактеристике при раду без подмазивања захваљујући намотаним PTFE и PES (полиестер) влакнастим пуниоцима унутар епоксидне матрице. Овај састав обезбеђује довољно низак коефицијент трења ($\mu=0,03 \dots 0,08$) без подмазивања, међутим присуство мазива може додатно заштитити додирне површине. Употреба мазива је могућа, али не и неопходна. Радна температура дата од стране произвођача се креће у границама $t = -50 \div 140 \text{ }^{\circ}\text{C}$.



Слика 4.2.4: *Постелице са пуниоцима од намотаних PTFE и PES влакана SKF [30]*

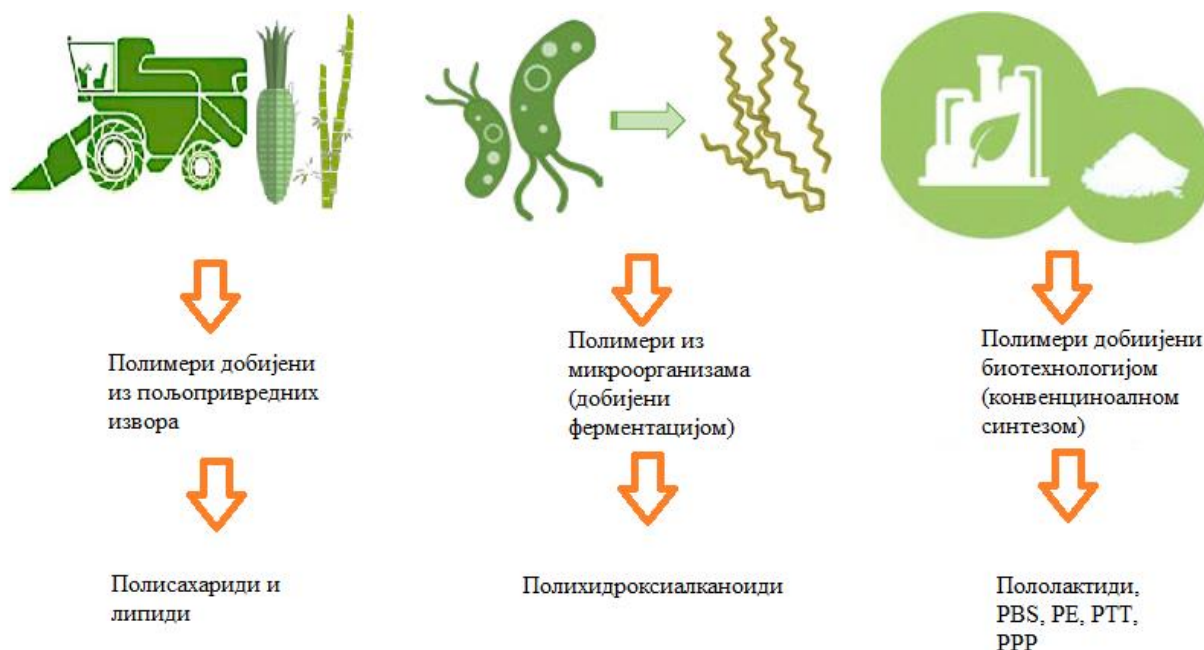
Треба споменути и да од одабира пуниоца зависи отпорност на хабање, чиме се додатно могу побољшати карактеристике материјала. На слици 4.2.5 је приказан пример хабање композитне постелице која се састоји од полимерне матрице, тачније од политетрафлуоретилена (PTFE) и пуниоца од бронзе (PTFE + 40% bronze). Овај полимерни композит је такође познат и као РВ. Током рада контактна површина постелице се хаба и формира ефикаснији преносни слој који остварује погоднији контакт са рукавцем. На слици се може уочити да бронзани пуниоци нису уклоњени из матрице већ размазани по истој градећи бакромобогатен контактни слој [31].



Слика 4.2.5: Хабање РВ композитне постелице при константном оптерећењу; а) пре хабања, б) након хабања [31]

У току протекле деценије примећен је знатан раст употребе и биокompозита (композита са природним влакнима) у сектору производње: грађевинског материјала, ваздухопловне индустрије, електронских плоча и аутомобила, док је примена у другим секторима до сада ограничена. Усмерењем развоја еколошке ефикасности и зелене хемије на нове генерације материјала, производа и процеса, доводи до тога да се у будућности очекује велика примена биокompозита и у индустрији израде клизних лежишта.

Истраживања су фокусирана на проналажење врста природних влакана и полимерних матрица за добијање сложених материјала, који су конкурентни композитима од синтетичких влакана. Једна од маркетиншких привлачности јесте употреба пољопривредног, прехранбеног и индустријског отпада за припрему полимерних композита ојачаних влакнима за комерцијалну употребу (слика 4.2.6) [32].



Слика 4.2.6: Извори производње био-полимера [33]

4.3 Триболошки састав композитних клизних лежишта

Класификација триболошког састава композитних клизних лежишта зависи од услова које лежај треба да испуни:

- преузимање радијалне, односно аксијалне силе,
- да обезбеди релативно померање између рукавца и лежај, са минималним трењем и хабањем,
- пригушење вибрација и одвођење топлоте.

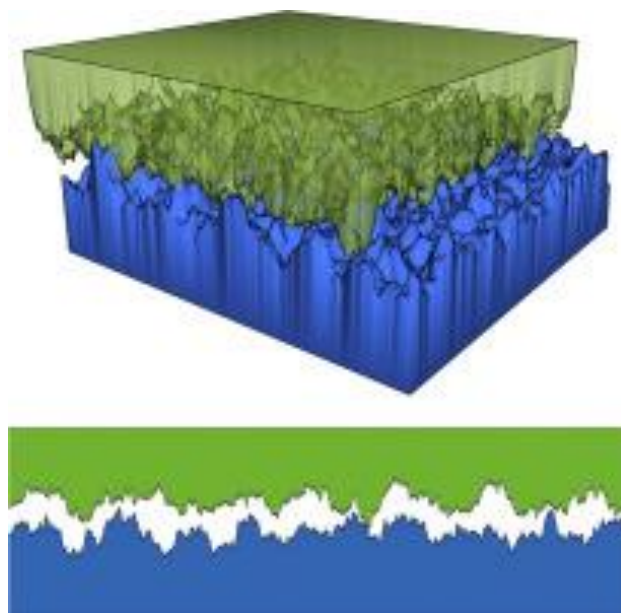
Копозитни клизни лежаји у експлоатацији се не подмазују уобичајеним мазивима. Када се не подмазују мазивима тада се као међуслој између рукавца и постелице користи ваздух из околине, а у случају када се користе мазива то су најчешће масти са силиконском основом и додатком полимера (PTFE). Подмазивање се такође може остварити посредством воде и одређених масти и спрејева [1].

У употреби су и превлаке које се често користе као допунско подмазивање. Улога превлаке је смањење хабања и трења, као и *stick – slip* ефекта, тиме и спречавање корозије. Превлаке су изразито постојане при трењу клизања, док при трењу котрљања треба избегавати њихову употребу. Поред претходно наведених функција превлака такође може имати улогу одржавања постојаности геометријског облика и тиме олакшава монтажу и доприноси заштити од хемијских утицаја.

При одређивању триболошког састава треба узети у обзир и загревања елемената. При раду се, услед трења и хабања између делова, механичка енергија претвара у топлоту која доводи до пораста температуре целог постројења. Пораст температуре може директно утицати на квалитет рада постројења, промену чврстоће материјала делова, промену вискозности мазива, што утиче на дебљину уљног филма, итд. [1].

За триболошке карактеристике лежишта је довољно изучавање на основу квалитативне микроанализе обзиром да би квантитивна анализа била и сувише сложена.

Микроанализом су уочљиве неправилности додирних површина (брегови и долине) које директно утичу на квалитет релативног померања између елемената (слика 4.3.1). Детаљније о свођењу истраживања на микроанализу дато је литературом [34].



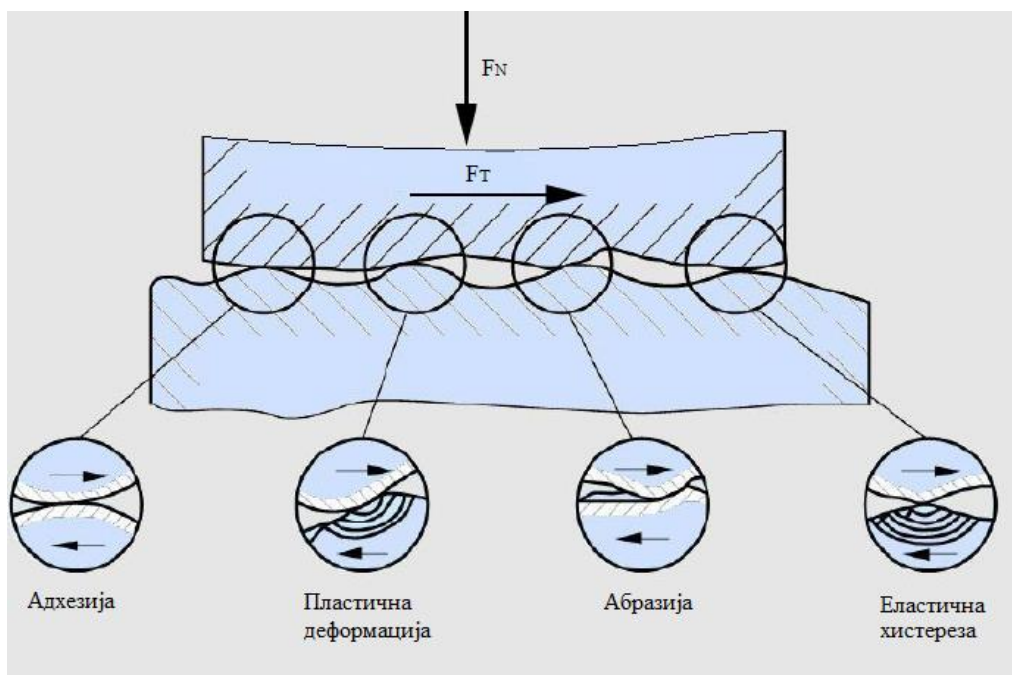
Слика 4.3.1: Трoдимензионални и двoдимензионални приказ микроскопске анализе склизног споја двеју контактних површина [35]

Како би се избегло трење између рукавца и постелице, како је претходно речено, уводи се слој мазива (уљни филм) који има улогу да раздвоји поменуте неравнине. У супротном, након одређеног времена, настају последице динамичког трења: адхезије, пластичне деформације, абразије и еластична хистереза (слика 4.3.2). Ове последице настају као последица наизменичног загревања и хлађења, што за последицу има деформацију материјала и појаве микро зава. Код композитних материјала долази до периодичног раскидања формираних микро зава, услед чега долази до промене храпавости контактних површина [1].

Истраживач Попов у свом раду о микроанализи долази до закључка да су стварне додирне површине мање од називних површина [34]. Равнотежа између површина се остварује када се напрезање изједначи са границом еластичности материјала, као што је дато једначином 4.3.1 [1]:

$$\sigma_n = \frac{F_N}{A} = R_e \quad (4.3.1)$$

Постоји више последица трења као што је дато сликом 4.3.2. Њихово објашњење следи у даљем тексту.



Слика 4.3.2: Последице динамичког трења; F_N – нормална сила, F_T – вучна сила [1]

Адхезивне деформације подразумевају контакт и интеракцију двеју површина различите храповости посредством јаке адхезионе (привлачне) силе, при чему долази до лепљења поменутих површина. Два главна фактора појаве адхезије:

1) Тенденција различитих материјала да формирају чврсте растворе или интерметална једињења. Према томе: комбинацијом материјала са знатном разликом кристалне структуре и разликом хемијских својства, добијаја се клизни спој са слабом адхезијом. Резултат оваквих спојева је смањено хабање и трење између елемената.

2) Чистоћа површине – постоји мања вероватноћа спајања површина које поседују оксидни слој. Легуре никла и нерђајући челици са танким заштитним површинским слојем су отпорнији на хабање и самим тим адхезију [36].

Пластична деформација настаје када се под дејством сила пређе граница течења, односно пређе граница еластичности материјала. У тренутку прелаза, из еластичне у пластичну деформацију, везе суседних атома се раскидају и образују нове атомске групе. Образовањем нових гурпација долази до растерећења и елемент се не враћа у свој првобитни облик. Деформација је трајна [36].

Абразивно хабање настаје када одређени материјал оштети мекши у споју. Оштећење је најчешће у виду резова. Процењује се да је абразивно хабање вид оштећења одговоран за 50% кварова насталих као последица хабања. Карактеристичан пример је оштећење жлебова радилице клипног компресора услед продора честица нечистоћа које продиру кроз слој мазива и усецају површину рукавца [37].

Еластична хистереза је појава расипања унутрашње енергије унутрашњим молекулатним трењем, када материјал подлеже варијабилном напрезању унутар границе течења. Еластична хистереза је честа код полимерних и дуромерних композита. Провера материјала за пригушење вибрација се врши поређењем еластичне хистерезе са могућношћу пригушења материјала, при чему инжењери могу једноставно потврдити његову примену. На пример гуме са већом вредношћу еластичне хистерезе имају добру способност расипања енергије за пригушење вибрација и звука [38].

4.3.1 Хабање композитних клизних лежишта

Хабање се може дефинисати као одвајање слоја материјала са чврстог тела као последица механичког дејства. Тако се хабање између рукавца и постељице код композитних клизних лежишта може описати као одвајање материјала услед механичког дејства насталог међусобним кретањем два тела. У случају да је одвајање материјала изазвано хемијским путем, тада се по DIN 50320 [39] то не сматра хабањем [1].

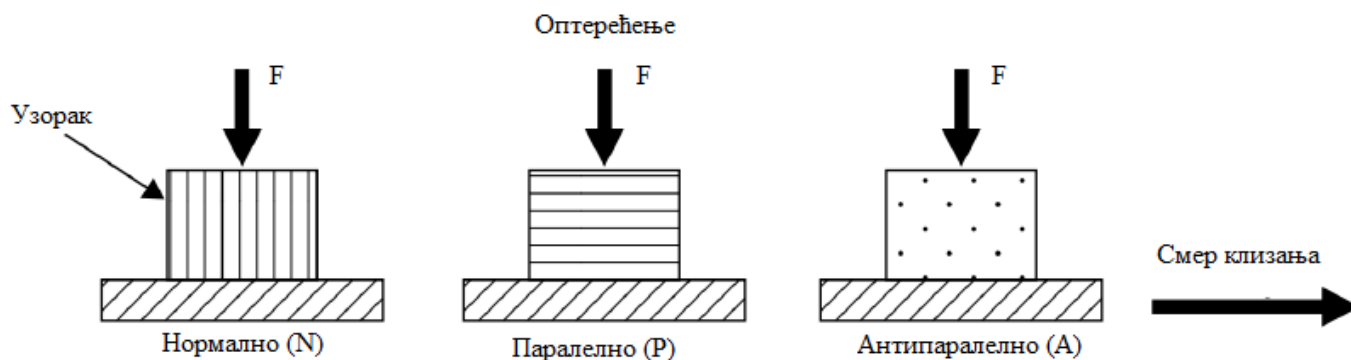
На хабање рукавца како металних тако и композитних клизних лежишта пре свега утичу:

- контактни притисак између елемената (лежишта и рукавца),
- брзина обртања,
- међутело (мазиво, било у течном, чврстом или гасовитом стању),
- површинска храпавост тврђег материјала (рукавца),
- температура,
- микро и макро геометрија површинске структуре рукавца.

Према DIN 50320 [39] вибрације и појава кавитације (код подмазивања водом), су од мањег значаја за триболошки састав.

Хабање композита ојачаних влакнима је сложен процес, јер већим делом зависи од распореда и врсте влакана. Према истраживачу Wileba [40] најчешћи облик хабања ових композита је најчешће, последица појаве адхезије између додирних површина.

Од смера клизања у односу на смер влакана и од густине распореда ојачавајућег елемента у великој мери зависи интензитет хабања. Према овоме разликују се 3 међусобна положаја влакана: нормални, паралелни и антипаралелни (слика 4.3.1.1) [1].



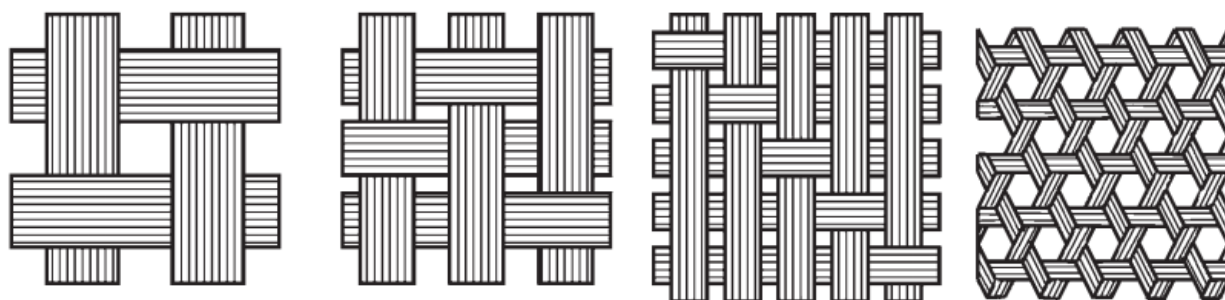
Слика 4.3.1.1: Хабање композита у зависности од смера клизања и распореда ојачавајућих влакана у композиту [1]

Најмања оштећења материјала и највећа носивост се добија паралелном и антипаралелном оријентацијом влакана док се најмања носивост добија нормалном. Код нормалне оријентације постоји ризик лома матрице услед великог оптерећења влакана.

У зависности од примене се обраћа пажња на дужину влакана која се користе за израду композитних клизних лежишта. Дуга влакна за композитна клизна лежишта се најчешће израђују као стаклена или угљенична. Примена дугих влакана се избегава због тешког остварења трасфер филма на супротну површину чиме је повећано хабање композита. Више о истраживањима композитних клизних лежишта са дугим влакнима се може наћи у литератури [41].

Композитни материјали са кратким влакнима су у већој употреби за израду делова као што су: зупчаници, клизна лежишта, и др. Израда ових композита је једноставнија, исплативија и омогућава једноставно управљање триболошким карактеристикама применом разних примеса. За смањење појаве адхезија се најчешће додаје политетрафлуоретилен (PTFE) или графит, а применом армидних, стаклених или угљеничних влакана се повећавају отпорност на пузање и вучна оптерећења. Овакви материјали поседују и до четири пута већу чврстоћу од полиметних материјала без влакана [1].

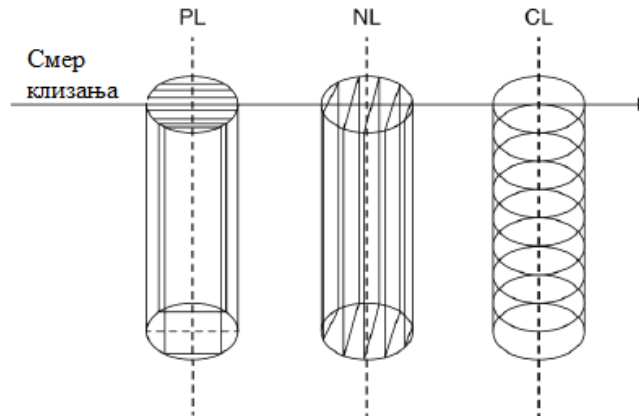
Код композитних материјала са ламинарним ојачањем, упркос својим одличним механичким карактеристикама, триболошка својства, такође, у великој мери зависе од оријентације влакана и количине матрице. Оријентација влакана у ламинарном ојачању зависи од начина ткања (слика 4.3.1.2) [1].



Слика 4.3.1.2: Примери ткања влакана за ламинарно ојачане композите [42]

У односу на оријентацију влакана поново разликујемо 3 случаја (слика 4.3.1.3):

- паралелна оријентацију у односу на раван клизања (PL),
- нормална оријентација (NL),
- кружна оријетација (CL).



Слика 4.3.1.3: Приказ оријентација ламиарног пуниоца у односу на раван клизања [1]

У случају PL оријентације су влакна како нормална на контактну површину тако и паралелно распоређена у односу на правац силе клизања. Оваквом оријентацијом се хабање пројектује на ојачавајућа влакна, док је контакт са матрицом знатно смањен. Код NL оријентације су влакна такође нормална на површину клизања, али је њихов распоред попречан (на контра површини) од правца клизања. При NL оријентацији долази до оптерећења савијањем рубова комада који се испитује. Савијање рубова доводи до смицања и тиме појачаног хабања. Кружном CL оријентацијом забележен је најмањи фактор трења захваљујући директном контакту ламиларне структуре са површином клизања. Ламиларна структура влакана спречава њихово одвајање услед трења, а матрица је смештена између ових површина тако да је и њено оштећење минимално [1].

5. Примена композитних клизних лежишта

Због повећане потребе за јефтиним и високо ефикасним материјалима сваке године инжењери развијају преко 100 нових пластичних једињења и спроводе преко 3500 испитивања на клизним лежиштима *без одржавања* [43]. Захваљујући великом броју истраживања и разних модела данас се располаже великом базом података о триболошким карактеристикама полимера и композита [43]. Овим се успешно замењују метални материјали са материјалима високе ефикасности и једноставног руковања, смањујући тако трошкове и повећавајући дуготрајност и поузданост система [44].

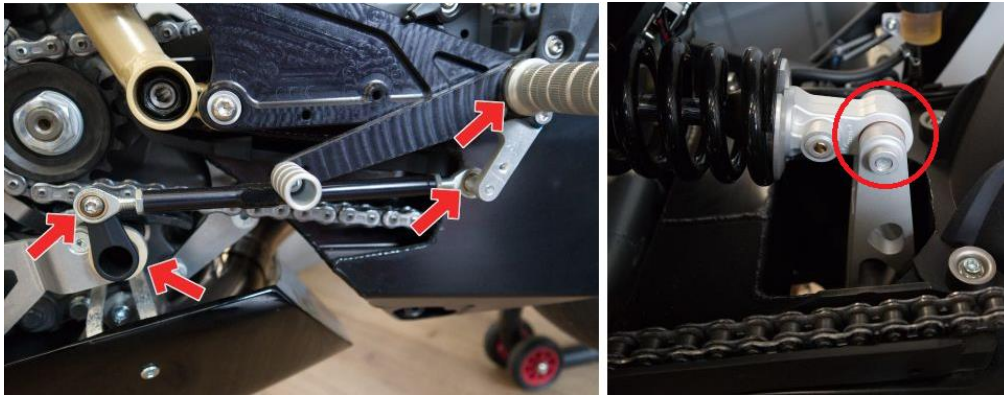
Клизна композитна лежишта наилазе на примену у многим видовима индустрије као што су: аутомобилска, прехранбена, ваздохлопа, индустрији кућних апарата и др. Упркос широкој примени и масовној производњи клизна лежишта од композитних материјала омогућавају једноставну технологију израде делова високог квалитета и олакшавају уградњу. Обзиром на наведене карактеристике и карактеристике композитних материјала, овакви лежаци представљају све већу конкуренцију на тржишту. Конкурентност се огледа у једноставној прилагодљивости материјала будућој намени, у виду димензија и састава. Особине материјала се прилагођавају у зависности од врсте оптерећења и радних услова.

Употреба како композитних тако и полимерних лежишта се простира од прехранбене индустрије, индустрије намештаја, хемијске, медицинске и спортске опреме, преко ваздухопловства и бродоградње, све до свемирских летилица и истраживачких сонди. У даљем тексту дати су примери примене композитних клизних лежишта у одређеним гранама индустрије.

Аутомобилска индустрија

Код аутомобила се клизна композитна лежишта могу срести као делови склопа: управљачког механизма, конструкцији ремена, шарки на вратима, у механизму седишта и др. Предност композитних клизних лежишта у поменутим применама јесте њихово једноставно обликовање, мала маса и рад без подмазивања.

На широку примену наилазе и у мото-спорту, захваљујући малој маси и добрим карактеристикама на повишеним температурама, једноставном одржавању и замени. Најчешћи композити у мото-спорту су ојачани карбонским влакнима чија је температура термичке обраде преко 1800°C за пречник влакана од 4,4μm [43]. На слици 5.1 означена су места ослонаца за ноге на кочионом систему и систему за амортизацију удара мотоцикла произвођача *Krämmer Motorcycles (КМС)* где се најчешће уграђују композитна и полимерна лежишта.



Слика 5.1: Места употребе композитних и полимерних лежишта на моделу мотоцикла HKR-EVO2, произвођача Krämer Motorcycles (KMC) [45]

Ваздухопловство и свемирска истраживања

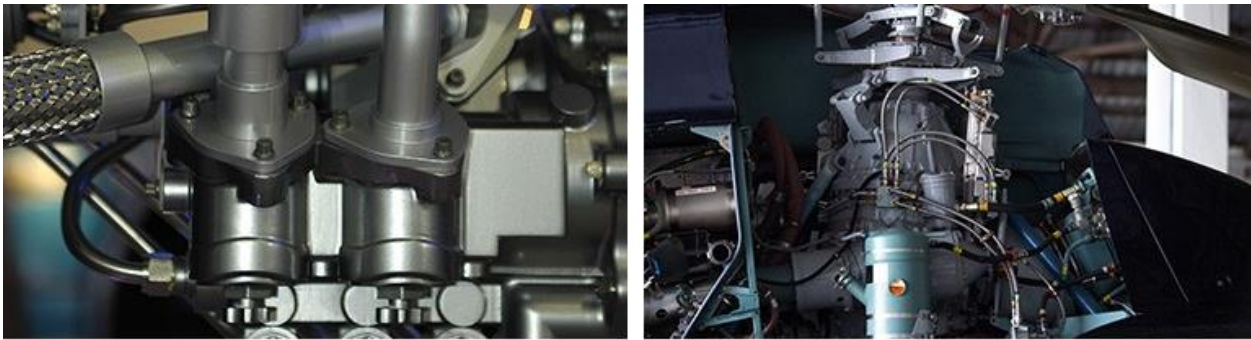
У ваздухопловној индустрији као и индустрији за свемирска истраживања (летилице, сателити, итд.) композитна клизна лежишта наилазе на широку примену. Популарност произилази како због њихових својства мале масе и самоподмазивања тако и захвљујући карактеристикама као што су: непроводност електричне струје, отпорност на корозију и једноставно одржавање.

Код авиона и хеликоптера су лежишта, како клизна тако и котрљајна, неки од најоптерећенијих елемената. Карактеристичан пример су клизна лежишта у систему за приземљавање и управљање на копну, односно на точковима авиона (слика 5.2). Ова лежишта раде под великим ударним оптерећењима, и под разним спољашњим условима рада као што су велике температурне промене. При раду у поменутих околностима долази до знатних оштећења. Композитна клизна лежишта не само да олакшавају одржавање овог система, већ су и исплативија од металних, обзиром да су врста потрошног материјал у овом сегменту рада и често се замењују.



Слика 5.2: Систем за приземљавање и управљање на моделу Boeing 737 [46]

Композитним клизним лежиштима се данас све чешће замењују лежишта унутар система за допремање горива (најчешће метално-полимерни композити) (слика 5.3, а)) и на актуаторима (најчешће са порозним филмом од бронзе испуњен епокси смолом) (слика 5.3, б)). Полимерна као и композитна лежишта се комбиновано примењују за намештај унутар авиона, бравама и др.



а)

б)

Слика 5.3: а) Пумпе система за допремање горива, б) актуатор [47]

У летилицама, сондама и сателитима за свемирска истраживања је предност композитних клизни лежишта слична као и у ваздухопловној индустрији. Због своје мале масе, једноставног одржавања, једноставне измене и претходно поменутих карактеристика, композитна лежишта представљају одличну замену за метална клизна лежишта.

Упркос непроводности струје у знатној мери је смањен ризик појаве галванске корозије. Међутим, могућа је њена појава при уградњи композитно - металних лежишта у носаче друге врсте метала. Како би се ово избегло користе се не само постелице од композитних материјала него и сама кућишта. Кућишта се најчешће израђују од композита епоксидне матрице ојачане графитом са радном температуром до 150°C , или полимидне матрице ојачане графитом, са радном температуром до 300°C [48]. Овакво решење се такође среће и у ваздухопловној индустрији.

Елементи уређаја који излазе или се враћају из орбите подлежу високим температурама, док они које такорећи мирују изван подлежу веома ниским температурама. Напрезања услед ширења и скупљања материјала су један од битних фактора у производњи клизних лежишта од композита. Поред поменутих напрезања, може доћи и до појаве оксидације примеса композита, што би убрзало процес отказа дела услед појаве бубрења. Разна истраживања се спроводе сваке године од којих је једно испитивање *плазмом бризаног композита* од CaF_2 , стакла и метала који су развијени у програму истраживачког центра *Lewis*. Више информација о испитивању дата су литературом [49]. Истраживање је показало да плазмом бризгани композит састављен од комбинације NiCr , CaF_2 и стакла подлеже само 7% теоријској оксидацији након 240 радних сати при температури од 900°C и да CaF_2 , из и даље непознатих разлога, помаже смањењу оксидације легуре никла.

Бродоградња и подводна истраживања и одржавања

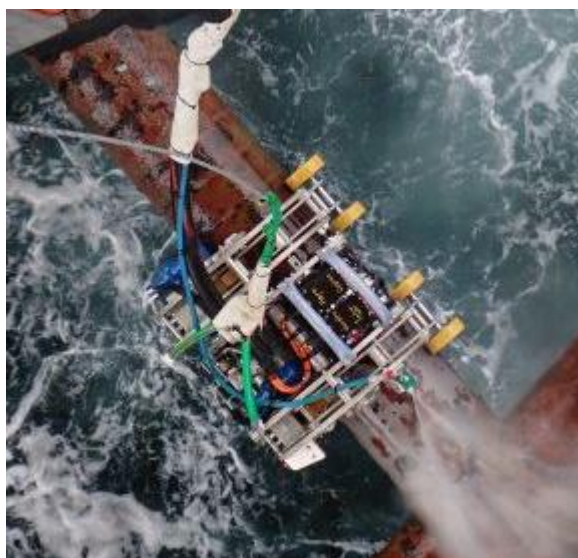
Композитна клизна лежишта у производима бродоградње се срећу како приобално тако и на отвореним водама. Делови изложени морској води су високо подложни корозији што знатно скраћује њихов радни век, при чему метална лежишта подлежу оштећењима и упркос постојању механизма филтрације и чишћења. Овде знатну примену налазе композитна клизна лежишта како у бродограђи тако и у осталим уређајима који раде под поменутих условима.

Услед континуираног повећања захтева регулације и надзора емисије, отока и количина мазива, индустрија бродоградње се фокусира на редизајнирање делова тако да одговарају еколошким регулацијама. Карактеристичан пример примене су лежишта која подржавају вратило пропелера (како на бродовима тако и подморница) (слика 5.4). Лежишта са подмазивањем уљима годишње избацују и преко 10 тона уља у море, што знатно утиче на загађење окружења. Из поменутих разлога ова лежишта се замењују композитним клизним лежиштима са самоподмазивањем или подмазивањем водом [50].



Слика 5.4: Лежишта за вратила пропелера произвођача General Metals & Polymers, GMP [51]

Код уређаја за подводно истраживање и одржавање поред фактора корозије изразита је потреба за издржљивошћу. Уређаји, најчешће роботи, који врше прикупљање узорака или поправке на разним постројењима као нпр. нафтне платформе, су изложени јаким ударима како таласа тако и непредвидивих рељефних структура. Ови уређаји у потпуности треба да буду прилагођени суровим условима рада. Према претходно реченом композитна клизна лежишта су се показала ефикасна за замену металних, захваљујући доброј издржљивости и једноставној замени услед отказа. На слици 5.5 приказан је рад једног робота, по имену *Tyra*, за контролу и одржавање Данске нафтне платформе, изложен суровим условима северног мора [43].



Слика 5.5: *Tyra the Robotic Crawler* при раду на одржавању нафтне платформе [43]

Бициклизам

Квалитет лежишта на бициклама, поготову професионалним за прелаз великих раздаљина, планинске успоне или за екстремне спортове, је од великог значаја не само за ефикасност у раду већ и сигурност возача. За разлику од скејт-бордова и ролера у бициклама се користе клизна лежишта. Клизна лежишта од композита су трајнија, једноставнија за одржавање, не захтевају подмазивање, и поседују велику чврстоћу у односу на старе моделе од месинга. Према претходно реченом композитна клизна лежишта, такорећи, и прелазе очекивања у овом сегменту индустрије.

Клизна композитна лежишта за одређене моделе предвиђене за већа ударна оптерећења се такође израђују и са браздама за проток мазива (у случају да се мазиво користи). Оваква лежишта се најчешће монтирају на местима везивања педала и рама, управљачке виљушке и рама и за везу система за амортизацију са рамом и виљушком точка бицикле као што је приказано сликом 5.6 [52].



Слика 5.6: Веза система за амортизацију са рамом бицикле и виљушком точка са означеним местима уградње композитних клизних лежишта [43]

6. Пример прорачуна композитних клизних лежишта

За радијални клизни лежај, оптерећен силом $F_r=70 \text{ N}$ при броју обртаја $n=800 \text{ min}^{-1}$, потребно је:

- 1) Одредити димензије лежаја и проверити носивост уколико је постељица лежаја израђена од оловне легуре PbSb15Sn10. Подмазивање лежаја се врши капањем.
- 2) Проверити да ли се може наведени материјал постељице лежаја заменити PTFE композитом ($E=2100 \text{ МПа}$; $\nu=0,4$; $p_{doz}=3,45 \text{ МПа}$) при истим осталим радним условима.

Решење 1):

За материја PbSb15Sn10 у табели 2.4.1 дате су следеће карактеристике:

Дозвољена брзина клизања: $v_{doz} = 3 \frac{m}{s}$

Дозвољена вредност површинског притиска: $p_{doz} = 0,3 \frac{N}{mm^2}$

Радна брзина клизања: $v = 1 \div 4 \rightarrow$ усваја се: $v = 2 \frac{m}{s}$

Радна брзина клизања се може рачунати као:

$$v = \frac{\pi d n}{60}$$

Из дате једначине следи да је пречник рукавца d једнак:

$$d = \frac{v \cdot 60}{n \pi} = \frac{2 \cdot 60}{800 \cdot \pi} = 0,04777 \text{ m} = 47,77 \text{ mm}$$

Према табели 3.7 датај литературом [3], се усваја стандардна вредност пречника рукавца:

$$d = 50 \text{ mm}$$

* У прорачуну се узма да је пречник рукавца једнак пречнику унутрашњег дела постељице, тј. номиналном пречнику. Односно $D = d$.

Вредност конструкционе карактеристике усвојена је према препорукама за радијално клизно лежиште изложено мањим оптерећењима при високим бројевима обртаја и већом брзином клизања. Ова препорука је дата литературом [2]:

$$\varphi = 0,5$$

Конструкциона карактеристика се може рачунати као количник ширине лежишта B и пречника рукавца d :

$$\varphi = \frac{B}{d}$$

слиди да је дужина лежишта B једнака :

$$B = d \cdot \varphi = 0,5 \cdot 50 = 25 \text{ mm}$$

Како је позната дужина B лежишта и пречник рукавца d може се израчунати површина A на коју делује површински притисак p :

$$A = d \cdot B = 25 \cdot 50 = 1250 \text{ mm}^2$$

Провера носивости:

$$F = A \cdot p_{doz} \geq Fr$$

$$F = 1250 \cdot 0,3 = 375 \text{ N} > 70 \text{ N}$$

Овим је показано да је максимално дозвољено оптерећење за дате параметре:

$$F = 375 \text{ N} , \text{ тј. да носивост лежишта задовољава дате услове.}$$

Познатим вредностима оптерећења F и површине на коју делује A , може се израчунати радни притисак p :

$$p = \frac{Fr}{A} = \frac{70}{1250} = 0,056 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Провером услова $p \leq p_{doz}$:

$$p = 0,056 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < p_{doz} = 0,3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Слиди да за дато оптерећење и материјал димензије постељице износе:

$$d = 50 \text{ mm}$$

$$B = 25 \text{ mm}$$

Према препорукама дате литературом [3] дебљина постељице δ износи:

За $d = 35 \div 60 \text{ mm}$ препоручена вредност дебљине постељице износи $\delta = 5 \text{ mm}$.

Решење 2):

За дате вредности карактеристика новог материјала постељице тј. PTFE композита: $E=2100 \text{ MPa}$; $\nu=0,4$; $p_{doz}=3,45 \text{ MPa}$, потребно је израчунати вредност максималног притиска:

$$p_{H,max} = 0,836 \sqrt{p E_k \psi}$$

При чему се еквивалентни модул еластичности израчунава као:

$$E_k = \frac{1}{E_e} = \frac{1}{2} \left[\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right]$$

Где су:

$$E = E_1 = 2100 \text{ MPa}$$

$$E_2 = 210000 \text{ MPa}$$

$$\nu_1 = 0,4$$

$$\nu_2 = 0,3$$

Материјал постељице је замењен композитним материјалом и његов модул еластичности је E_1 , а E_2 је модул еластичности рукавца који је од челика

Следи:

$$\frac{1}{E_e} = \frac{1}{2} \left[\frac{1 - 0,4^2}{2100} + \frac{1 - 0,3^2}{210000} \right] = 0,000202167$$

Односно:

$$E_k = \frac{1}{0,000202167} = 4946,41 \text{ MPa}$$

Релативан зазор ψ је усвојен за вредности $d = 50 \text{ mm}$ и $\nu = 2 \frac{m}{s}$ према табели 8.3.3 датој литературом [2]:

$$\psi = 0,00132$$

Вредност радног притиска позната је из претходног дела задатка:

$$p = 0,056 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Заменом вредности добија се вредност максималног радног притиска:

$$p_{H,max} = 0,836 \sqrt{p E_k \psi} = 0,836 \sqrt{0,056 \cdot 4946,41 \cdot 0,00132} = 0,506 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Провером услова долази се до закључка да је могуће задату металну постељицу заменити задатим PTFE композитом при истим условима рада:

$$p_{H,max} \leq p_{doz}$$

$$0,506 \frac{N}{\text{mm}^2} < 3,45 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Закључак

Клизна лежишта су релативно једноставне конструкције и једноставног принципа рада, међутим не треба занемарити њихов значај у склоповима великих и најчешће одговорних постројења.

Захваљујући непрекидним истраживањима на пољу материјала и њихових триболошких особина како из економских тако и еколошких аспеката, производња клизних лежишта наилази на значајне промене. Овај значај се огледа у томе да поменути материјали, у овом раду конкретно композити, омогућавају високу ефикасност рада са минималним одржавањем и високом поузданошћу клизних лежишта. Клизна лежишта од композита захваљујући својим карактеристикама постају све већа конкуренција у индустрији лежишта, па се тиме у блиској будућности очекује већи број истраживања на пољу композита за клизна лежишта.

Препоруке за даља истраживања, поред развоја дуромерних композита и подмазивања течностима мале вискозности као што је вода, јесу интензивнија истраживања био-полимерних композита и могућност њихове примене у изради клизних лежишта како би се додатно смањио фактор загађења околине.

Литература

- [1] Branko Katana: Životni vijek kompozitnog kliznog ležaja, doktorska disertacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [2] Вера Николић: Машински елементи, теорија, прорачун, примери, Машински факултет, Крагујевац, 2004.
- [3] Душан Ј. Витас, Миладнин Д. Трибојевић: Машински елементи II, Београдско издавачко – графички завод, Београд, 1978.
- [4] <https://www.nsk.com/services/basicknowledge/introduction/#tab2> (30.07.2020)
- [5] <https://www.ship-technology.com/contractors/bearings/tenmat-ship/> (30.07.2020)
- [6] <https://www.ludwigmeister.de/produkte/gleitlager/39096> (14.06.2020)
- [7] Karl – Heinrich Grote, Beate Bender und Dietmar Göhlich: DUBBEL: Taschenbuch für den Maschinenbau, 25. Auflage, Springer Vieweg, Berlin, Deutschland, 2018.
- [8] <https://www.scribd.com/doc/180538016/Lezaji-i-lezista-pdf> (14.06.2020)
- [9] Милосав Огњановић: Машински елементи, Машински факултет, Универзитета у Београду, Београд, 2016.
- [11] <https://www.ksb.com/kreiselpumpenlexikon/gleitlager/186084/> (14.06.2020)
- [12] Предраг Црнковић, Божидар Ловренски: Инжењерски технички приручник, четврта књига, Издавачко предузеће „RAD“, Београд, 1967.
- [13] https://www.researchgate.net/publication/329368836_Theoretical_and_Experimental_Investigations_on_Transient_Run-Up_Procedures_of_Journal_Bearings_Including_Mixed_Friction_Conditions (20.06.2020)
- [14] <https://www.machinerylubrication.com/Read/126/journal-bearing-contamination> (20.06.2020)
- [15] Veljko Vuković, Miljana Vuković, Ivan Knežević i Mirjana Božović: Osnove mašinstva, prvo izdanje, Univerzitet za poslovni inženjering i menadžment Banja Luka, PIM Univezitet, Banja Luka, 2015.
- [16] G. Erhard i E. Strickle, Berechnung der statischen Tragfähigkeit von Querlagern aus thermoplastischen Kunststoffen, Konstruktion, Sves. 1 od 2S. 237-241, 1977.
- [17] G. Erhard i E. Strickle, Maschinenelemente aus thermoplastischen Kunststoffen: Lager und Antriebselemente, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1985.
- [18] <https://www.nordenmaritim.no/> (25.06.2020)

- [19] <http://www.rbts.com/armd/ffbrg.aspx> (25.06.2020)
- [20] Malcolm E. Leader, P.E.: Understanding Journal Bearings, Applied Machinery Dynamics Co. Durango, Colorado, 2001.
- [21] H. Chamania, H. Karimaeia, M. Bahramib and S. M. Agha Mirsalimb: Thermo-elasto-hydrodynamic (TEHD) analysis of oil film lubrication in big end bearing of a diesel engine, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, 2015-16.
- [22] <https://www.knowyourparts.com/technical-resources/engine/types-of-engine-bearing-damage/> (27.06.2020)
- [23] Милета Р. Ристојевић: Машински елементи 1/ предавање 7, Машински факултет, Универзитета у Београду, Београд, 2018.
- [24] Милорад Јовановић, Вукић Лазић, Душан Арсић: Наука о материјалима, Факултет инжењерских наука, Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2017.
- [25] Милош Б. Станковић: Триболошке карактеристике клизних лежишта од композитних материјала са полимерном основом, докторска дисертација, Машински факултет, Универзитета у Београду, Београд, 2019.
- [26] <https://www.astbearings.com/astepb-injection-molded-thermoplastic.html> (28.06.2020)
- [27] <https://www.ggbearings.com/en> (28.06.2020)
- [28] Byung Chul Kim, Dai Gil Lee: Endurance and performance of a composite spherical bearing, Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, ME3221, Guseong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-701, Republic of Korea, 2008.
- [29] <http://www.sciepub.com/portal/search?q=%20sandwich%20structures> (05.07.2020)
- [30] SKF Group 2010: SKF bushings, thrust washers and strips, PUB BU/P2 06225/1 EN · March 2010.
- [31] D.M.C. McCarthy and S.B. Glavatskih: ASSESSMENT OF POLYMER COMPOSITES FOR HYDRODYNAMIC JOURNAL BEARING APPLICATIONS, Division of Machine Elements, Luleå University of Technology, SE-971 87 Luleå, Sweden, 2008.
- [32] https://www.researchgate.net/publication/282611442_Applications_of_biocomposite_materials_based_on_natural_fibers_from_renewable_resources_A_review (06.07.2020)
- [33] <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jctb.5778> (07.07.2020)
- [34] V. . L. Popov, Kontaktmechanik und Reibung, Berlin : Springer-Verlag, 2009.

- [35] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301679X15004181?via%3Dihub> (11.07.2020)
- [36] W.F. Gale and T.C. Totemeier: Smithells Metals Reference Book, 8th Edition, Butterworth-Heinemann, Copyright © 2004 Elsevier Ltd. All rights reserved.
- [37] Fred K. Geitner and Heinz P. Bloch: Machinery Failure Analysis and Troubleshooting, 4th Edition, Copyright © 2012 Elsevier Inc. All rights reserved.
- [38] [https://www.instron.us/our-company/library/glossary/e/elastic-hysteresis#:~:text=Elastic%20Hysteresis%20is%20the%20difference,testing%20\(l%20loading%20and%20unloading\).](https://www.instron.us/our-company/library/glossary/e/elastic-hysteresis#:~:text=Elastic%20Hysteresis%20is%20the%20difference,testing%20(l%20loading%20and%20unloading).) (19.07.2020)
- [39] Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin, und Iri der Staatlichen Materialprüfung, Universität Stuttgart, vom Arbeitsausschuß 832 "Verschleiß fragen" des Normenausschusses Materialprüfung (NMP) aufgestellt: Verschleiß Begriffe DIN 50320 Systemanalyse von Verschleißvorgängen Gliederung des Verschleißgebietes, Berlin, November 1953.
- [40] W. Wieleba, The mechanism of tribological wear of thermoplastic materials, Archives of Civil and Mechanical Engineering, br. 7(4), 2007.
- [41] J. K. Lanchester, Polymer-based bearing materials - The role of fillers and fibre reinforcement, 1972.
- [42] https://www.researchgate.net/figure/Plain-a-twill-b-and-c-biaxial-woven-d-triaxial-woven-fabrics_fig1_44222200 (22.07.2020)
- [43] <https://www.igus.eu/info/plain-bearings-plain-bearings-overview> (23.07.2020)
- [44] <https://www.semanticscholar.org/paper/Bearing-Materials-and-Current-Trends-Babu-Krishna/74484c9ac01cb17cddf0d2ab67bce31f201fc189> (23.07.2020)
- [45] <https://www.igus.eu/info/maintenance-free-plastic-plain-bearings-in-racing-motorcycle> (24.07.2020)
- [46] <https://thepointsguy.com/news/how-airplanes-landing-gear-works/> (24.07.2020)
- [47] <https://www.ggbearings.com/en/solutions-bearings/reduce-size-weight/aerospace/landing-gears> (24.07.2020)
- [48] Harold E. Sliney and Frank J. Williams: Performance of PTFE-Lined Composite Journal Bearings, NASA Technical Memorandum 82779, Prepared for the Annual Meeting of the American Society of Lubrication Engineers Cincinnati, Ohio, May 10-13, 1982
- [49] Harold E. Sliney: SELF-LUBRICATING PLASMA-SPRAYED COMPOSITES FOR SLIDING-CONTACT BEARINGS TO 900° C, Lewis Research Center, NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION • WASHINGTON, D. C., February 1974

[50] Arash Golchin: Polymeric Materials for Bearing Applications, Tribological Studies in Lubricated Conditions, Luleå University of Technology, Luleå 2015.

[51] <https://www.indiamart.com/proddetail/cutlass-bearing-for-propeller-shaft-stern-tubes-21310361748.html> (27.07.2020)

[52] Turner Suspension Bicycles: The Journal Bearing Hex-Loc System, US Patent 7128329, © copyright 2009 Turner Suspension Bicycles.