

Татјана Лазовић

АБРАЗИВНО ХАБАЊЕ КОТРЉАЈНИХ ЛЕЖАЈА

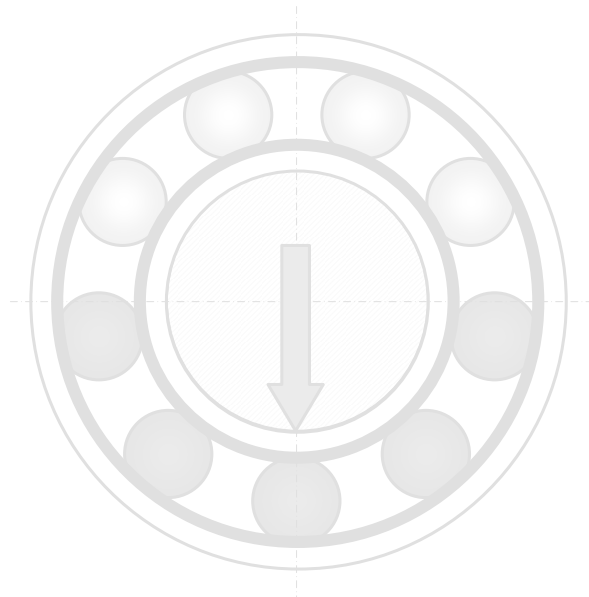


Универзитет у Београду
Машински факултет

Београд, 2014.

Татјана Лазовић

АБРАЗИВНО ХАБАЊЕ КОТРЉАЈНИХ ЛЕЖАЈА



Универзитет у Београду
Машински факултет

Београд, 2014.

АБРАЗИВНО ХАБАЊЕ КОТРЉАЈНИХ ЛЕЖАЈА

Аутор

Др Тајјана М. Лазовић, дипл.инж.маш.

Рецензенти:

Проф. др Радивоје Митровић
Машински факултет Универзитета у Београду

Проф. др Милета Ристивојевић
Машински факултет Универзитета у Београду

Проф. др Мирослав Вереш
Машински факултет, Словачки технички универзитет у Братислави

Издавач:

МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Краљице Марије 16, Београд

Тел.: +381 11 3370 760

Факс.: +381 11 3370 364

www.mas.bg.ac.rs



За издавача

Проф. др Милорад Милованчевић, декан

Главни и одговорни уредник:

Проф. др Војкан Лучанин, продекан за НИД

Одобрено за штампу одлуком Декана бр. 270/14 од 24.4.2014.

Техничка припрема текста, илустрације и дизајн корица

аутор

Тираж

200 примерака

Штампа:

Планета принт

Рузелтова 10, Београд

Тел/фах: +381 11 3088 129

www.planeta-print.rs

ISBN 978-86-7083-827-7

*Ево моје тајне. Сасвим је једноставна: човек само
срцем добро види. Суштина се очима не да сагледати.*

Антоан де Сент-Егзипери (“Мали принц”)



Скица Леонарда да Винчија, 15.век



Издавање ове монографије је финансијски подржало

Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије,
а на основу Другог јавног позива за учешће у средствима за суфинансирање
издавања монографија у 2013. години, расписаног 20. септембра 2013. године.

Средства су додељена Решењем о распореду средстава надлежног Министарства
број 451-032875/2013-14/2 од 22.11.2013. године.

ПРЕДГОВОР

Монографија „Абразивно хабање котрљајних лежаја“ је резултат вишегодишњих сопствених теоријских и практичних истраживања из области теорије котрљајних лежаја, презентованих у магистарском раду „Утицај геометрије котрљајног лежаја на расподелу оптерећења на котрљајна тела и крутост“ (2000) и докторској дисертацији „Истраживање абразивног хабања котрљајних лежаја“ (2007). Осим тога, у монографији је приказан и део резултата истраживања спроведених у оквиру пројеката технолошког развоја, финансираних од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја РС, публикованих кроз велики број тимских научних радова, штампаних у међународним научним часописима или изложених на међународним научним скуповима.

У монографији је презентован развијен оригинални математички модел расподеле оптерећења на котрљајна тела кугличног котрљајног лежаја са радијалним додиром. На Катедри за Опште машинске конструкције Машинског факултета Универзитета у Београду, током низа година, посебно је истраживан феномен расподеле оптерећења код котрљајних лежаја и зупчастих парова. Овим феноменом су се бавили професори Слободан Верига и Вера Угреновић-Крсмановић, чији је истраживачки рад био подстицај другим члановима Катедре за сопствена истраживања. Значајан допринос у овој области, кроз своје магистарске тезе, докторске дисертације и научне радове, пружили су професори Пауна Обрадовић, Милета Ристивојевић, Радивоје Митровић, Александар Субић. У том смислу, посебно се истиче значај монографије „Расподела оптерећења – зупчасти парови и котрљајни лежаји“ аутора проф. др Милете Ристивојевића и проф. др Радивоја Митровића, публиковане 2002. године у издању Машинског факултета Универзитета у Београду. У овој научној публикацији је презентован и

део полазних истраживања аутора ове монографије Татјане Лазовић, започетих током израде магистарске тезе, а у домену геометријских и механичких аспеката расподеле оптерећења код котрљајних лежаја. Математички модел расподеле оптерећења, који је аутор Татјана Лазовић након израде магистарске тезе даље развијала и усавршавала, применила је за математичко моделирање абразивног хабања котрљајних лежаја у оквиру израде своје докторске дисертације, као и у оквиру тимског рада на реализацији истраживачких активности националних научних пројеката технолошког развоја, од 2008. године до данашњих дана. Резултати ових истраживања управо и чине део садржаја ове монографије.



Посебну захвалност за искрену подршку и корисне сугестије, изражавам према рецензентима, проф. др Мирославу Верешу са Машинског факултета Словачког универзитета Братислави, као и проф. др Милети Ристивојевићу и проф. др Радивоју Митровићу са Машинског факултета Универзитета у Београду.

Колегама и пријатељима проф. др Радивоју Митровићу и проф. др Милети Ристивојевићу се захваљујем на постављању основа за моја научна интересовања и даљи научни рад и професионални развој, на другарском подстреку, разумевању и успешној дугогодишњој сарадњи, што је у великој мери допринело публиковању и квалитету ове монографије.

Лазовић

У Београду, априла 2014.

др Татјана Лазовић, дипл.инж.маш.
ванредни професор на Катедри за ОМК
Машинског факултета
Универзитета у Београду

1

УВОД

Статистички подаци из литературе показују да је 75% отказа машина последица хабања њихових делова. Стога, повећање отпорности на хабање је основни предуслов повећања радног века елемената машина, а на тај начин и радног века машина. Повећање радног века машинских елемената изложених хабању се може остварити развојем одговарајућих инжењерских метода прорачуна. Ове методе прорачуна треба да се заснивају на математичким моделима који узимају у обзир конструкционе особености делова, хемијске, физичке и механичке особине материјала спрегнутих делова, радне услове (оптерећење, брзина, учестаност обртања), стање радне средине (мазиво, температура, присуство нечистоћа, влаге, течности).

Зависно од радних услова, узроци и механизми процеса хабања машинских елемената могу бити различити. Од почетка развоја трибологије – науке о трењу, хабању и подмазивању, дефинисани су и проучавани разноврсни видови хабања. Многи од њих су до данашњих дана у великој мери расветљени и математички описани. Међутим, висок ниво квалификације и квантификације процеса хабања достигнут је на једноставним моделима тела у котрљајном и/или клизном контакту. Пракса је показала да развијени математички модели хабања нису универзални и да се не могу једноставно апликовати на случајеве сложених објеката, нпр. котрљајних лежаја, зупчаника [95,96] и др. Математички модели хабања за сваки од тих објеката се посебно морају кориговати, даље развијати и усавршавати уз респектовање свих специфичности наведених машинских елемената, њихове геометрије, кинематике и радних услова.

Котрљајни лежаји су најраспрострањенији машински елементи, без којих је немогуће пренети оптерећење, реализовати обртно кретање и обезбедити потребну тачност између делова у релативном кретању у

2

ИСТРАЖИВАЊЕ АБРАЗИВНОГ ХАБАЊА КОТРЉАЈНИХ ЛЕЖАЈА

У току свог развоја, наука о машинама се обogaћује и проширује новим областима чији је настанак диктиран практичним потребама. Тако су се први прорачуни машина заснивали на кинематској анализи рада машинских елемената и делова у релативном кретању. Са даљим развојем машина појавила се потреба за прорачуном чврстоће и стабилности. У новије време смо сведоци бурног развоја нове области науке о машинама – трибологије. Трибологија је наука о трењу и процесима повезаним са трењем - подмазивању и хабању. Као научна дисциплина, трибологија обухвата експериментална и теоријска истраживања механичких, физичких, хемијских, биолошких и других феномена који прате трење, подмазивање и хабање. Термин трибологија је почео да се примењује релативно скоро (Lubrication Engineering Group, 1966) [1], иако прва теоријска сазнања о трењу и хабању потичу још из античких времена, а практични аспекти ове науке се протежу и до Праисторије.

Историјски поглед на развој теорије трења и хабања

Још у време античке Грчке и Старог Рима, било је познато да се правилним избором материјала делова у релативном кретању, као и подмазивањем уљем, може редуковати трење и хабање додирних површина. Након античког доба наступа период од IV до половине XV века који карактерише блага стагнација у развоју машина и машинских елемената. У овом дугом периоду није било никаквих новина у основама трибологије [7]. Епоха ренесансе (крај XV века и XVI век) са аспекта развоја технике и инжењерства представља еру *LEONARDA DA VINCI*-ја (1452-1519), који је формулисао прве законе трења. У току

3

РАСПОДЕЛА ОПТЕРЕЋЕЊА НА КОТРЉАЈНА ТЕЛА ЛЕЖАЈА

С пољашње оптерећење које делује на котрљајни лежај, преноси се преко котрљајних тела са једног прстена лежаја на други. Расподела оптерећења на котрљајна тела лежаја зависи од конструкције лежаја и карактера спољашњег оптерећења.

С обзиром да се полазна хипотеза истраживања презентованих у овој монографији заснива на утицају расподеле оптерећења у котрљајном лежају на карактер и интензитет абразивног хабања, неопходно је дати кратки преглед теорија расподеле оптерећења на котрљајна тела лежаја.

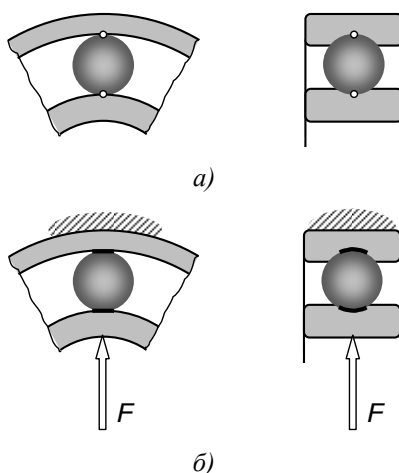
SJOVÄLL се 30-их година прошлог века бавио расподелом оптерећења на котрљајна тела лежаја са унтрашњим радијалним зазором [52]. Претпостављајући да су радни контактни углови на месту свих куглица исти и да се у зони оптерећења налази бесконачан број куглица врло малог пречника, он је коначне суме у одговарајућим изразима расподеле оптерећења заменио интегралима (тзв. *SJOVÄLL* -ови интеграл). На основу *SJOVÄLL*-овог модела проблем расподеле спољашњег радијалног оптерећења на котрљајна тела радијалног лежаја решавао је *STRIBECK* [52], који се ограничио на случај кугличног лежаја са нултим радијалним зазором оптерећеног спољашњим радијалним оптерећењем у правцу једне од куглица. Добијено решење касније је проширено и на случај произвољног положаја куглица у односу на нападну линију спољашњег оптерећења.

Најопштији математички модел расподеле оптерећења на котрљајна тела геометријски идеалног лежаја представља модел *JONES*-а. Он је котрљајни лежај сматрао геометријски идеалним, тј. без одступања димензија, облика и положаја радних површина спрегнутих делова и на основу те претпоставке и применом теорије контактних напона *HERTZ*-а

4

КИНЕМАТИКА КОНТАКТА
СПРЕГНУТИХ ДЕЛОВА ЛЕЖАЈА

У неоптерећеном стању кугличног котрљајног лежаја са радијалним додиром, котрљајна тела – куглице, које су сферног облика, и стазе котрљања, које су тороидалног облика, додирују се у тачки (Сл.4.1а).



Слика 4.1. Додир котрљајног тела и стаза котрљања кугличног котрљајног лежаја са радијалним додиром: а) у неоптерећеном стању; б) у оптерећеном стању

Када преносе оптерећење, котрљајна тела и стазе котрљања се површински еластично деформишу, тако да се стварно додиривање остварује по некој малој, коначној површини (Сл.4.1б). Облик додирне површине зависи од облика радних површина делова лежаја у додиру.

5

ПОДМАЗИВАЊЕ КОТРЉАЈНИХ ЛЕЖАЈА

Трење је неминовни пратилац рада машина и у већини случајева је непожељни процес. Смањење трења се може остварити:

- избором оптималног конструкционог решења спрегнутих делова;
- избором материјала са малим коефицијентом трења и високом отпорношћу на хабање и
- адекватним **подмазивањем** (одговарајућа врста мазива, количина и редовна замена мазива).

Подмазивање представља увођење мазива између спрегнутих делова у релативном кретању – стаза котрљања и котрљајних тела. При томе, радне површине спрегнутих делова лежаја се раздвајају слојем мазива, а њихово трење се замењује унутрашњим трењем у мазиву. Тако се релативно кретање контактних површина остварује са малим губицима енергије.

Увођењем мазива у зону контакта спрегнутих делова постижу се следећи ефекти:

- смањење трења на додирним површинама спрегнутих делова лежаја;
- заштита радних површина од корозије;
- побољшање одвођења топлоте;
- смањење буке;
- заштита лежаја од продирања нечистоћа из спољашње средине.

6

МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛ АБРАЗИВНОГ ХАБАЊА КОТРЉАЈНОГ ЛЕЖАЈА

Абразивно хабање је површинско разарање које се манифестује резањем и браздањем контактних површина у релативном кретању – клизању или котрљању са проклизавањем. Зависно од броја тела у додиру, абразивно хабање може бити: абразивно хабање два тела и абразивно хабање три тела.

Абразивно хабање у додиру два тела се јавља као последица интеракције две контактне површине, нпр. при брушењу и машинском резању материјала или када у контакту површина различитог квалитета површине и/или тврдоће, неравнине храпаве површине врше абразију глатке површине.

Абразивно хабање три тела је последица интеракције контактних површина у релативном кретању и абразивних честица, које се налазе између њих. Дакле, абразивне честице представљају “треће тело”. Абразивно хабање три тела може бити отворено и затворено [17].

Отворено абразивно хабање три тела се јавља када се контактне површине налазе на великом растојању или када се само једна површина хаба јер се креће у маси абразивних честица. Пример отвореног абразивног хабања три тела је хабање радних површина грађевинских машина при захватању абразивног материјала (земља, камен, песак, шљунак, угаљ и др.).

Затворено абразивно хабање три тела се јавља када се абразивне честице налазе између површина у непосредном клизном и/или котрљајном контакту.

У интеракцији са контактним површинама абразивне честице се понашају двојачко:

7

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА

Претходна поглавља обухватају развој математичког модела абразивног хабања кугличног котрљајног лежаја са радијалним додиром, а у циљу прецизнијег научног описивања појаве абразивног хабања котрљајних лежаја. То подразумева квалитативно дефинисање утицајних фактора, издвајање најутицајнијих међу њима и квантификацију њихових утицаја на карактер и интензитет абразивног хабања котрљајних лежаја.

Помак напред у односу на актуелно математичко описивање феномена абразивног хабања радних површина спрегнутих делова котрљајног лежаја је увођење утицаја расподеле оптерећења на котрљајна тела. Овај утицај се узима у обзир посредством **фактора расподеле оптерећења**, који обухвата релевантне геометријске утицајне параметре: број котрљајних тела и унутрашњи радијални зазор. Дефиниција и математички опис фактора расподеле оптерећења на котрљајна тела лежаја, као и његова имплементација у математички модел абразивног хабања котрљајног лежаја представљају оригинални допринос математичком моделирању абразивног хабања котрљајних лежаја. Овај допринос мора бити утемељен на експерименталној потврди, чији део је и обухваћен планом спроведених истраживања.

Обим експерименталних истраживања је ограничен са два аспекта: материјално-финансијског и временског. Материјално-финансијска ограничења се односе на могућности припреме узорака за испитивање и њихову количину. Количина узорака је ограничена високом ценом, с обзиром да се ради о производу високог нивоа технологије. Временско ограничење обима експеримента се заснива на чињеници да су испитивања узрока и карактера разарања котрљајних лежаја, тј.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Abrasive Wear – J965*, Report of Iron and Steel Technical Committee, Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, PA, 1966
- [2] Adachi, K., Hutchings, I.M.: *Wear-mode mapping for the micro-scale abrasion test*, *Wear*, 255, 2003, 23–29
- [3] Badisch, E., Mitterer, C.: Abrasive wear of high speed steels: Influence of abrasive particles and primary carbides on wear resistance, *Tribology International*, 36, 2003, 765–770
- [4] Bakić, G., Đukić, M., Lazović, T., Prokić-Cvetković, R., Popović, O., Rajčić, B.: New methodology for monitoring and prevention of rotating parts failures, *FME Transactions*, Vol.35, №4, 2007, pp. 195-200
- [5] Balogh, I.: Contribution to the formation mechanism of spherical wear particles, *Proceedings of II World Tribology Congress*, Vienna, 2001
- [6] Barge, M., Kermouche, G., Gilles, P., Bergheau, J.M.: Experimental and numerical study of the ploughing part of abrasive wear, *Wear*, 255, 2003, 30–37
- [7] Bartz, W.: History of Tribology – the Bridge between the Classical Antiquity and the 21st Century, *Proceedings of II World Tribology Congress*, Vienna, 2001
- [8] Бейзельман, Р.Д., Цыпкин Б.В.: Подшипники качения, Машгиз, Москва - Ленинград, 1959
- [9] Bingley, M.S., Schnee, S.: A study of the mechanisms of abrasive wear for ductile metals under wet and dry three-body conditions, *Wear*, 258, 2005, 50–61
- [10] Blank, V., Popov, M., Pivovarov, G., Lvova, N., Terentev, S.: Mechanical properties of different types of diamond, *Diamond and Related Materials*, 8, 1999, 1531-1535

- [11] Colaço R., Vilar R.: Abrasive wear of metallic matrix reinforced materials, *Wear*, 255, 2003, 643–650
- [12] Црнојевић, Ц.: Транспорт чврстих материјала флуидима, Ed.: Механика флуида и хидрауличне машине, Машински факултет, Београд, 2002
- [13] Drozdov, Y.N., Ignatieva, Z.V., Drozdova, E.Y.: Wear rate prediction on the base of a theoretical – invariant method, *Proceedings of II World Tribology Congress, Vienna, 2001*
- [14] Dwyer-Joyce, R.S., Hamer, J.C., Sayles, R.S., Ioannides, E.: Lubricant Screening for Debris Effects to Improve Fatigue and Wear Life, *Proceedings of 18th Leeds-Lyon Symposium on Tribology (Wear Particles – from the cradle to the grave)*, Elsevier, Amsterdam, ed.D.Dowson, C.M.Taylor, M.Godet, 1991
- [15] Dwyer-Joyce, R.S., Heymer, J.: The Entrainment of Solid Particles into Rolling Elastohydrodynamic Contact, *Proceedings of 22nd Leeds-Lyon Symposium on Tribology – The Third Body Concept*, Elsevier, Amsterdam, 1995
- [16] Dwyer-Joyce, R.S., Sayles, R.S., Ioannides, E.: An investigation into the mechanisms of closed three-body abrasive wear, *Wear*, 175, 1994, 133-142
- [17] Dwyer-Joyce, R.S.: Predicting the Abrasive Wear of Ball Bearing by Lubricant Debris, *Wear*, Vol.233-239, 1998, 692-701
- [18] Eschman, P., Hasbargen, L., Weigand, R.: *Die Wälzlagerpraxis*, Verlag von R.Oldenbourg, München, 1978
- [19] FAG Kotrljajni ležaji, Katalog WL 41 520/3 HrA, FAG Kugelfischer Georg Schäfer AG, 2002
- [20] FAG Lebendauerrechnung, TI Nr. WL 40-48 D, FAG Kugelfischer AG & Co. KG, 2003
- [21] Farcas, F., Gafitanu, M.D.: Some influence parameters on greases lubricated rolling contacts service life, *Wear*, 225–229, 1999, 1004–1010
- [22] Fatigue Life of Roller Bearing, *Industrial Technology Journal*, on line, 3/1998
- [23] Fernandez Rico, J.E., Hernandez Battez, A., Garcia Cuervo, D.: Rolling contact fatigue in lubricated contacts, *Tribology International*, 36, 2003, 35-40
- [24] Fernández, J. E., Fernández, M.R., Diaz, R.V., Navarro, R.T.: Abrasive wear analysis using factorial experiment design, *Wear*, 255, 2003, 38–43
- [25] Галахов, М.А., Бурмистров А.Н.: Расчет подшипниковых узлов, Машиностроение, Москва, 1988
- [26] Garbar, I.: Structural properties of steels after two-body abrasive wear, *Proceedings of II World Tribology Congress, Vienna, 2001*

- [27] Grünberg, U.: Untersuchungen über den Einfluß des Spiels zwischen Außenring und Gehäuse auf die Tragfähigkeit radial belasteter Zylinderrollenlager, 1. Teil: Theoretische Grundlagen und Berechnung, "Konstruktion" 22 Heft 2, 48-55, 1970
- [28] Grünberg, U.: Untersuchungen über den Einfluß des Spiels zwischen Außenring und Gehäuse auf die Tragfähigkeit radial belasteter Zylinderrollenlager, 2. Teil: Praktische Anwendung und Ergebnisse, "Konstruktion" 22 Heft 3, 97-103, 1970
- [29] Harris, T.A.: Rolling Bearing Analysis, John Wiley and Sons, New York, 1984
- [30] Hernot, X., Sartor, M., Guillot, J.: Calculation of the Stiffness Matrix of Angular Contact Ball Bearings by Using the Analytical Approach, ASME Journal of Mechanical Design, Vol 122, №1, 83-90, 2000
- [31] Hisakado, T., Miura K., Suda H.: Effects of debris transfer and abrasive particle damage on the abrasive wear of hardened bearing steel, Wear, 247, 2001, 24-32
- [32] Hisakado, T., Tanaka, T., Suda, H.: Effect of abrasive particle size on fraction of debris removed from plowing volume in abrasive wear, Wear, 236, 1999, 24-33
- [33] Hokkirigawa, K., Kato, T., Fukuda, T., Shinooka, M.: Experimental and theoretical analysis of wear mechanism of metals in tilted block on plate type sliding, Wear, 214, 1998, 192-201
- [34] Hoo, J.J.C.: Rolling contact fatigue testing of bearing steels, ASTM Special Technical Publication 771, 1982
- [35] Hua Zhu, Shirong Ge, Xiaolong Huang, Dekuen Zhang, Jinlong Liu: Experimental study on the characterization of worn surface topography with characteristic roughness parameter, Wear, 255, 2003, 309-314
- [36] International Standard ISO-281: Rolling bearings – Dynamic load ratings and rating life, International Standards Organizations, 1990
- [37] Ioannides, E. Berling, G., Gabelli, A.: The SKF formula for rolling bearing life, SKF Journal Evolution, №1/2001, 25-28
- [38] Ioannides, E., Harris, T.A.: A new fatigue life model for rolling bearings, ASME Journal of Tribology, 107, 1985, 367-378
- [39] Ioannides, E.: Life prediction in rolling element bearings, Proceedings of I World Tribology Congress, London, 1997
- [40] Irimescu, L., Diaconescu, E.N.: A model of surface failure due to micro-slip in a rolling contact, Proceedings of II World Tribology Congress, Vienna, 2001
- [41] Itagaki T., Ohta H., Igarashi T.: Effect of grease type on abnormal vibration of ball bearing, Journal of Sound and Vibration, 268, 2003, 933-946

- [42] Ивковић, С.: Откази елемената рударских машина, Рударско-геолошки факултет, Београд, 1997
- [43] Извештај са пројекта: Развој методологија за повећање радне способности, поузданости и енергетске ефикасности машинских система у енергетици, Технолошки развој, св.бр. ТР 35029, Машински факултет Универзитета у Београду, руководилац пројекта проф.др Радивоје Митровић, пројекат финансиран од стране Министарства за просвету, науку и технолошки развој РС, 2011-2014
- [44] Jacobson, В.: Contamination and bearing life, SKF Journal Evolution
- [45] Jacobson, В.: Lubrication of Rolling Bearings, KOYO Engineering Journal, №159E, 2001
- [46] Явленский, К.Н.: Приборные шариковые подшипники, Машиностроение, Москва, 1981
- [47] Ямпольский, Г.Я., Крагельский, И.В.: Исследование абразивного износа элементов пар трения качения, Наука, Москва, 1973
- [48] Jha, A.K., Prasad, B.K., Modi, O.P., Das, S., Yegneswaran, A.H.: Correlating microstructural features and mechanical properties with abrasion resistance of a high strength low alloy steel, Wear, 254, 2003, 120-128
- [49] Karamis Baki, M.: A model on wear behavior of metallic materials working in free abrasive media, Proceedings of 2nd International Conference on Tribology, Thessaloniki, 1996
- [50] Kato, K.: Wear mechanisms, Proceedings of I World Tribology Congress, London, 1997
- [51] Kelly, D.A., Hutchings, I.M.: A new method for measurement of particle abrasivity, Wear, 250, 2001, 76-80
- [52] Ковалев, М.П., Народецкий, М.З.: Расчет высокоточных шарикоподшипников, Машиностроение, Москва, 1975
- [53] Коросташевский, Р.В.: Влияние методов смазывания на работоспособность подшипников, Сборник научных трудов ВНИПП, №2, Москва, 1988
- [54] Коросташевский, Р.В.: Влияние характера нагрузок на работу подшипников в жидкой маловязкой среде, Сборник научных трудов ВНИПП, №2, Москва, 1991
- [55] Крагельский, И.В., Добычин, М.Н., Комбалов, В.С.: Основы расчетов на трение и износ, Москва, Машиностроение, 1977
- [56] Кудиш, И.И.: Расчет износостойкости и усталостного выкрашивания подшипников качения под осевой нагрузкой, Сборник научных трудов ВНИПП, №2, Москва, 1988
- [57] Лазовић, Т.: Анализа утицаја геометрије котрљајног лежаја на расподелу оптерећења на котрљајна тела и крутост, Магистарска теза, Машински факултет, Београд, 2000

- [58] Lazović, T.: Influence of internal radial clearance of rolling bearing on load distribution between rolling elements, *J.of Mechanical Engineering Design*, Vol.4, №1, 2001, 25-32
- [59] Лазовић, Т.: Истраживање абразивног хабања котрљајних лежаја, Докторска дисертација, Машински факултет, Београд, 2007
- [60] Lazović, T., Marinkovic, A.: Influence of lubricant contamination on rolling bearing microgeometry, *Proceedings of ÖTG-SYMPOSIUM 2008 "Innovation in materials and lubricants for advanced eco-oriented tribosystems"*, Vienna, Austria, 20 November, 2008, pp. 229-236
- [61] Lazovic, T., Marinković A.: Influence of wear rate on the rolling bearing life, *Solving Friction and Wear Problems, Proceedings of 17th International COLLOQUIUM TRIBOLOGY*, Technische Akademie Esslingen, 2010, Stuttgart/Ostfildern Germany, Manuscripts Proceedings CD, Book of Synopses p.195
- [62] Lazovic, T., Marinkovic, A, Trisovic, N., Mitrovic, C.: Mathematical modelling of load and stress distribution in a ball bearing, *Proceedings of the 7th International Conference on Engineering Computational Technology, ECT'10*, Valencia, Spain, 2010, paper №81, pp. 1-12
- [63] Lazovic, T., Marinkovic, A., Skoko, D.: Influence of abrasive wear on ball bearing internal geometry, *Proceedings of 11th International Conference on Tribology – SERBIATRIB '09*, Belgrade, Serbia, 2009, pp. 233-237
- [64] Lazovic, T., Mitrovic, R., Marinkovic, A.: Influence of abrasive wear on the ball bearing service life, *Proceedings of European Conference on Tribology – ECOTRIB 2009*, Pisa, Italy, 2009, pp. 387-392
- [65] Lazović, T., Mitrović, R., Ristivojević, M.: Load distribution between rolling elements of ball and roller bearings, *Proceedings of 3rd International Conference Research and Development in Mechanical Industry – RaDMI '03*, Herceg Novi, 2003
- [66] Lazović, T., Mitrović, R., Ristivojević, M.: Influence of internal radial clearance on the ball bearing service life, *Journal of the Balkan Tribological Association*, Vol.16, №1, 2010, pp. 1-8
- [67] Lazović, T., Mitrović, R., Ristivojević, M.: Influence of abrasive particles geometry and material properties on the type of abrasive wear, *Proceedings of 8th International Tribology Conference – ITC '03*, Belgrade, 2003
- [68] Lazovic, T., Mitrovic, R., Ristivojevic, M.: Influence of internal radial clearance on the ball bearing service life, *Proceedings of 3rd Int. Conference POWER TRANSMISSIONS 09*, Kallithea – Chalkidiki, Greece, 2009, pp. 441-444
- [69] Lazovic, T., Ristivojevic, M., Mitrovic, R.: Mathematical model of load distribution in rolling bearing, *FME Transactions*, Vol.36, №4, 2008, pp. 189-196

- [70] Lazovic, T., Trisovic, N., Milovic, LJ.: Modelling interaction between worn surface and abrasive particle based on their geometry and material properties, Book of abstracts of 2nd Int. Conference on Material Modelling, ICMM2, Paris, France, 31 August – 2 September, 2011, p.261
- [71] Marinkovic, A., Lazovic, T., Stankovic, M.: DAQ and tribology performances for experimental investigations of bearings, Proceedings of the 29th DANUBIA-ADRIA- SYMPOSIUM on Advances in Experimental Mechanics, Belgrade, Serbia, 2012, pp. 258-261
- [72] Marinkovic, A., Lazović, T.: Modelling and simulation of rolling bearings using advance software tools, Proceedings of 6th Vienna Conference on Mathematical Modelling – MATHMOD'09, Vienna, Austria, 2009, pp. 2580-2583
- [73] Митровић, Р.: Анализа утицаја еластичних деформација и унутрашњег радијалног зазора котрљајног кугличног лежаја на расподелу оптерећења на котрљајна тела и носивост, Магистарска теза, Машински факултет, Београд, 1987
- [74] Митровић, Р.: Истраживање утицаја конструктивних и триболошких параметара котрљајног кугличног лежаја на радну способност при великим учестаностима обртања, Докторска дисертација, Машински факултет, Београд, 1992
- [75] Митровић, Р., Лазовић, Т., Ристивојевић, М.: Анализа расподеле оптерећења на котрљајна тела лежаја, Зборника радова са XXII Југословенског конгреса теоријске и примењене механике, Врњачка Бања, 1997
- [76] Митровић, Р., Лазовић, Т.: Анализа утицаја хабања на радни век лежаја, Зборник радова са VII Југословенске конференције о трибологији, Београд, 2001
- [77] Митровић, Р., Ристивојевић, М., Лазовић, Т.: Различити приступи процени радног века котрљајних лежаја, Зборник радвоа са IX СЕВЕР-овог симпозијума о механичким преносницима, Суботица, 2003
- [78] Митрович, Р., Ристивоевич, М., Лазович, Т.: Распределение нагрузки между телами качения шариковых подшипников, Вестник машиностроения, 3/2000, стр. 14-17
- [79] Mitrovic, R., Lazovic, T.: Influence of wear on deep groove ball bearing service life, Facta universitatis, Series: Mechanical Engineering Vol.1, No 9, 2002, pp. 1117-112
- [80] Mitrović, R., Ristivojević, M., Lazović, T.: Influence of internal radial clearance on service life of deep groove ball bearing, Proceedings of XVII International Conference on MATERIAL FLOW, MASCHINES AND DEVICES IN INDUSTRY, Belgrade, 2002
- [81] Морозов, Е.М., Зернин, М.В.: Контактные задачи механики разрушения, Машиностроение, Москва, 1999

- [82] Nelias, D.: Contribution a l'Etude des Roulements. Modélisation globale des roulements et avaries superficielles dans les contacts EHD pour des surfaces réelles ou indentées, Dossier d'Habilitation a Diriger des Recherches, Institut National des Sciences Appliquées, Université Claude Bernard, Lyon, 1999
- [83] Olofsson, U., Svedberg, G.C.: Low concentration level contaminant related wear in sliding and rolling contacts, Proceedings of II World Tribology Congress, Vienna, 2001
- [84] Pellegrin, D.V. , Stachowiak, G.W.: Assessing the role of particle shape and scale in abrasion using “sharpness analysis”, Part I. Technique development, *Wear*, 253, 2002, 1016–1025
- [85] Pellegrin, D.V. , Stachowiak, G.W.: Assessing the role of particle shape and scale in abrasion using “sharpness analysis”, Part II. Technique evaluation, *Wear*, 253, 2002, 1026–1034
- [86] Pellegrin, D.V., Stachowiak, G.W.: Evaluating the role of particle distribution and shape in two-body abrasion by statistical simulation, *Tribology International*, 37, 2004, 255–270
- [87] Pellegrin, D.V. , Stachowiak, G.W.: Sharpness of abrasive particles und surfaces, *Wear*, 256, 2004, 614–622
- [88] Piekoszewski, W., Samborski, T., Wisniewski, M.: Modelling and analysis of the abrasive wear, II World Tribology Congress, Vienna, 2001
- [89] Пинегин, С.В., Орлов, А.В., Табачников, Ю.Б.: Прецизионные опоры качения и опоры с газовой смазкой, *Машиностроение*, Москва, 1984
- [90] Пинегин, С.В.: Трение качения в машинах и приборах, *Машиностроение*, Москва, 1976
- [91] Рац, А.: Основы трибологии, Машински факултет, Београд, 1991
- [92] Ristivojevic, M., Lazovic, T., Vencl, A.: Studying the load carrying capacity of spur gear tooth flanks, *MECHANISM AND MACHINE THEORY*, Vol. 59, pp. 125-137
- [93] Ristivojevic, M., Lazovic, T., Vencl, A.: Influence of the pitch point position on tooth flanks wear, Proceedings of 5th World Tribology Congress – WTC'13, Torino, Italy, pp. 1020/1-4
- [94] Ристивојевић, М., Митровић, Р.: Расподела оптерећења – Зупчасти парови и котрљајни лежаји, Машински факултет, Београд, 2002
- [95] Rolling bearing lubrication, Publ.No. WL 81 115/4 EA, FAG Kugelfischer Georg Schäfer AG, 2002
- [96] Ружальский, В.З., Коган, Н.В., Щипунов, Л.И., Уганина, Л.И.: Исследование абразивной загрязненности рабочих поверхностей деталей подшипников и ее влияние на поясковый износ шариков, *Сборник научных трудов ВНИПП, №2*, Москва, 1989

- [97] Ружальский, В.З., Проценко, А.И., Нефедов В.В.: Методы приработки высокооборотных приборных шариковых подшипников, Сборник научных трудов ВНИПП, №2, Москва, 1989
- [98] Ружальский, В.З., Уганина, Л.И., Нефедова, В.В., Фотин, А.Г.: Использование статистических методов для анализа и обработки результатов испытаний на износ приборных подшипников, Сборник научных трудов ВНИПП, №2, Москва, 1988
- [99] Ружальский, В.З.: Управление процессом износа высокооборотных приборных подшипников, Сборник научных трудов ВНИПП, №2, Москва, 1989
- [100] Савић, В., Ковач, О.: Подмазивање мастима, ЈУГОМА, Загреб, 1988
- [101] Справочник по триботехнике/Под общ.ред. М.Хебды, А.В.Чичинадзе. В 3 т. Т.1. Теоретические основы, Машиностроение, Москва, 1989
- [102] Справочник по триботехнике/Под общ.ред. М.Хебды, А.В.Чичинадзе. В 3 т. Т.2. Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения, Машиностроение, Москва, 1990
- [103] Справочник по триботехнике/Под общ.ред. М.Хебды, А.В.Чичинадзе. В 3 т. Т.3. Триботехника антифрикционных, фрикционных и сцепных устройств. Методы и средства триботехнических испытаний, Машиностроение, Москва, 1992
- [104] Stachowiak, G.B., Stachowiak, G.W.: The effects of particle characteristics on three-body abrasive wear, *Wear*, 249, 2001, 201–207
- [105] Stachowiak, G.B., Stachowiak, G.W.: Wear mechanisms in ball-cratering tests with large abrasive particles, *Wear*, 256, 2004, 600–607
- [106] Stachowiak, G.W., Podsiadlo, P.: Classification of tribological surfaces, *Tribology International*, 37, 2004, 211–217
- [107] Stachowiak, G.W.: Numerical characterization of wear particle morphology and angularity of particles and surfaces, I World Tribology Congress, London, 1997
- [108] Stachowiak, G.W.: Particle angularity and its relationship to abrasive and erosive wear, *Wear*, 241, 2000, 214–219
- [109] Szeri A.Z.: Fluid Film Lubrication – Theory and Design, Cambridge University Press, Cambridge, 1998
- [110] Takemura, H., Matsumoto, Y., Murakami, Y.: Development of New Life Equation for Ball and Roller Bearings, *NSK Journal Motion & Control*, №11/2001, 1-10
- [111] Tallian, T.E.: Prediction of Rolling Bearing Contact Fatigue Life in Contaminated Lubricant: Part I – Mathematical Model, *Transactions of the ASME, Journal of Lubrication Technology*, Vol.98, Series F, №2, 1976, 251-257

- [112] Tallian, T.E.: Prediction of Rolling Bearing Contact Fatigue Life in Contaminated Lubricant: Part II – Experimental, Transactions of the ASME, Journal of Lubrication Technology, Vol.98, №3, 1976, 384-392
- [113] Tomovic, R.: Calculation of the boundary values of rolling bearing deflection in relation to the number of active rolling elements, Mechanism and Machine Theory, Vol.47, 2012, 74-88
- [114] Трение, изнашивание и смазка: Справочник. В 2-х кн. /Под ред. И.В.Крагельского, В.В.Алишина, Машиностроение, Москва, 1979
- [115] Ville, F.: Pollution Solide des Lubrifiants, Indentation et Fatigue des Surfaces, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, Université Claude Bernard, Lyon, 1998
- [116] Vukadinović, Z., Josifović, D.: Identification of machine system wearing with wear products in oils, Proceedings of 4th International Conference Research and Development in Mechanical Industry – RaDMI '04, Zlatibor, 2004
- [117] Yuan, C.Q., Lib, J., Yan, X.P., Peng, Z.: The use of the fractal description to characterize engineering surfaces and wear particles, Wear, 255, 2003, 315–326
- [118] Zaretsky, E.V., Poplawski, J.V. et al.: Rolling Bearing Life Prediction – Past, Present and Future, Proceedings of International Tribology Conference, Nagasaki, 2000
- [119] Zaretsky, E.V.: A.Palmgren revisited – a basis for bearing life prediction, Proceedings of STLE Annual Meeting, Kansas City, Missouri, 1997
- [120] Zum Gahr, K.H.: Wear by hard particles, Proceedings of I World Tribology Congress, London, 1997

САДРЖАЈ

| | | |
|--|--|-----------|
| | ПРЕДГОВОР | 1 |
| | 1 | 3 |
| | УВОД | 3 |
| | 2 | 5 |
| | ИСТРАЖИВАЊЕ АБРАЗИВНОГ ХАБАЊА | 5 |
| | КОТРЉАЈНИХ ЛЕЖАЈА | 5 |
| | 3 | 19 |
| | РАСПОДЕЛА ОПТЕРЕЋЕЊА НА КОТРЉАЈНА ТЕЛА | 19 |
| | ЛЕЖАЈА | 19 |
| | 3.1 | 23 |
| | Статичка равнотежа котрљајног лежаја | 23 |
| | 3.2 | 26 |
| | Релативно радијално померање прстенова лежаја | 26 |
| | 3.3 | 29 |
| | Релативни радијални зазор и релативна контактна деформација | 29 |
| | 3.4 | 34 |
| | Фактор расподеле оптерећења | 34 |
| | 3.5 | 30 |
| | Редуковани фактор расподеле оптерећења | 30 |
| | 4 | 55 |
| | КИНЕМАТИКА КОНТАКТА | 55 |
| | СПРЕГНУТИХ ДЕЛОВА ЛЕЖАЈА | 55 |
| | 4.1 | 56 |
| | Елипса контакта котрљајних тела и стаза котрљања | 56 |
| | 4.2 | 73 |
| | Зона контакта котрљајних тела и стаза котрљања | 73 |
| | 4.3 | 83 |
| | Проклизавање у котрљајном контакту котрљајних тела и стаза котрљања | 83 |
| | 4.4 | 90 |
| | Пут клизања у котрљајном контакту котрљајних тела и стаза котрљања | 90 |
| | 4.5 | 94 |
| | Средњи пут клизања у котрљајном контакту котрљајних тела и стаза котрљања | 94 |

ПОДМАЗИВАЊЕ КОТРЉАЈНИХ ЛЕЖАЈА | 5 | **100**

| | |
|---|-----|
| 5.1 | 102 |
| Еластохидродинамичко подмазивање | |
| 5.2 | 104 |
| Слој мазива у контакту спрегнутих делова лежаја | |
| 5.3 | 135 |
| Мазива | |
| 5.4 | 161 |
| Абразивне честице у мазиву | |

МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛ АБРАЗИВНОГ ХАБАЊА | 6 | **177**
КОТРЉАЈНОГ ЛЕЖАЈА

| | |
|--|-----|
| 6.1 | 178 |
| Затворено абразивно хабање три тела | |
| 6.2 | 180 |
| Утицај карактеристика абразивних честица на врсту абразивног хабања | |
| 6.3 | 187 |
| Карактеристике микроогреботине | |
| 6.4 | 189 |
| Запремина материјала одвојеног хабањем | |
| 6.5 | 191 |
| Абразивно хабање кугличног котрљајног лежаја | |
| 6.6 | 204 |
| Анализа развијеног математичког модела абразивног хабања кугличног котрљајног лежаја | |

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА | 7 | **208**

| | |
|---|-----|
| 7.1 | 209 |
| Опис истраживања | |
| 7.2 | 213 |
| Теоријска анализа абразивног хабања испитиваних котрљајних лежаја | |
| 7.3 | 219 |
| Резултати испитивања абразивног хабања котрљајних лежаја | |
| 7.4 | 230 |
| Утицај абразивног хабања на радни век котрљајног лежаја | |

| | |
|-------------------|------------|
| ЛИТЕРАТУРА | 241 |
| САДРЖАЈ | 250 |