

10.31653/smf45.2022. 134-144

Козицький С.В., Дем'яненко І.А.

Національний університет «Одеська морська академія»

ВИКОРИСТАННЯ НАНОЧАСТИНОК ОКСИДУ ТИТАНУ (IV) TiO_2 ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ТРИБОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗМАЩУВАЛЬНОГО МАСТИЛА

Постановка задачі і її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями. Зменшення тертя та зносу має важливе значення для підвищення енергоефективності та надійності механічних систем. Зазвичай це досягається шляхом використання рідких змащувальних матеріалів та мастил, які утворюють тонку плівку між поверхнями, щоб нести навантаження і запобігти прямому контакту між твердими поверхнями тертя. Рідкі мастильні матеріали, як правило, складаються з базового мастила та присадок, де присадки доповнюють чи розширюють функціональність базового мастила.

Аналіз досліджень і публікацій. Раніше активно вивчалися та використовувалися саме присадки і добавки до мастил та палив на основі частинок мікронних розмірів [1-3]. У якості присадок для зниження тертя і зношуваності вивчалися ще жирні кислоти та їхні ефіри, органічні сполуки сірки й інших елементів VI групи різного характеру, такі як аліфатичні та ароматичні сульфіди, дисульфіди.

З появою нових технологій та методів дослідження було доведено і практично продемонстровано, що нанорозмірні частинки мають суттєву перевагу над мікронними частинками [2,3]. Дослідники та автори праць [4,5] стверджують, що наночастинки (НЧ) у мастилі діють як модифікатори тертя, сприяють протизношувальному ефекту і позитивно впливають на теплові показники.

Механізм змащування заснований на фізико-хімічних взаємодіях між молекулами змащувальних матеріалів, поверхнями, що змащуються, і навколишнім середовищем. У області граничного змащування додавання НЧ (наприклад, MoS_2 , Al_2O_3 та CuO) може знизити коефіцієнт тертя (КФТ) до 70%, а об'єм зносу – до 75% [4,5].

Переваги, які демонструють присадки НЧ зумовлені особливостями їх властивостей та впливом на мастильний матеріал та поверхні тертя, як зображено на рис. 1.

Основні механізми дії НЧ полягають у наступному:

- НЧ сферичної форми діють як крихітні кульки між поверхнями тертя, а це, у свою чергу, змінює ковзання на кочення і призводить до зменшення коефіцієнта тертя [7,9-11];
- НЧ утворюють захисний шар на поверхні деталей [12];
- НЧ заповнюють зазори і тріщини від тертя, утворюючи більш гладкі поверхні, що називається ефектом виправлення [13];
- шорсткість поверхні зменшується завдяки абразивній дії НЧ, що називається ефектом полірування [14,15].

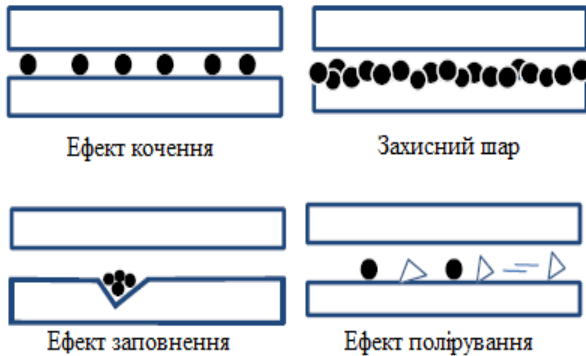


Рис. 1 – Механізми дії наночастинок при використанні у мастильному матеріалі [8]

Можливості додавання НЧ металів у мастила та змащувальні матеріали активно вивчалися і досліджувалися у роботах [4,15].

Таким чином, такі мастильні матеріали, що складаються з базового мастила та дисперсних нанорозмірних частинок, з'явилися та відокремилися як новий клас у галузі мастильних матеріалів

Метою роботи є загальний аналіз перспективності використання наночастинок TiO_2 і описання можливості його подальшого ефективного використання для покращення трибологічних властивостей змащувального мастила і подібних рідин.

Викладення основного матеріалу. Значна кількість досліджень стосувалася оксиду чотирьох валентного титану (IV) – TiO_2 [16-19], де він використовується у якості мастильної присадки на водній основі, мастильної присадки у вигляді наносуміші, тощо. Наночастинки TiO_2 мають середні розміри від 18 до 21 нм, що робить ці НЧ дуже дієвими з точки зору покращення змащувальних та антифрикційних властивостей мастила.

Автори роботи [20] оцінювали антифрикційні та протизношувальні властивості суспензій і сумішей TiO_2 за допомогою трибометра з чотирма кульками (рис. 2). Стандартна металева кулька була виконана з легованої хромистої сталі марки 52100, мала діаметр 12,7 мм з шорсткістю поверхні $R_a = 0,1$ мкм; ступенем полірування EP = 25 та твердістю за Роквеллом у 54~58 відповідно.

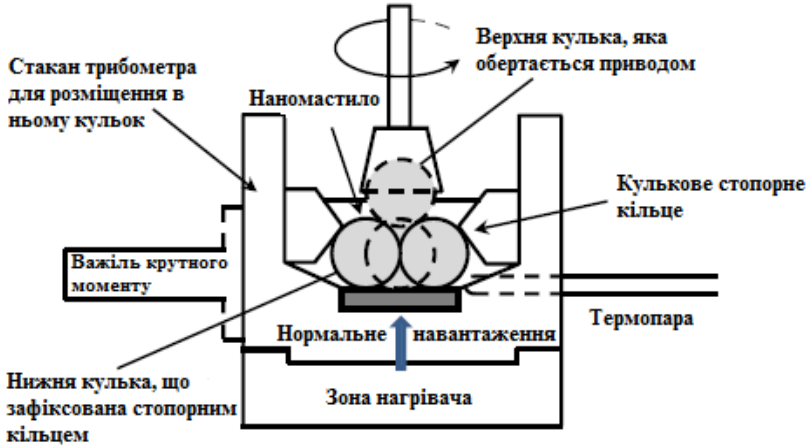


Рис. 2 – Схематичне зображення трибометра з 4-ма кульками [20]

Ефективність дії присадки визначалась по схемі, яка представлена на рис. 3. Потім досліджували пошкодження поверхні кульок шляхом аналізу подряпин та слідів від зношування.

За допомогою цього методу було досліджено різні зразки моторного мастила з різним відсотковим вмістом TiO_2 (0,01%, 0,025%, 0,05% і 0,075% за масою) при кімнатній ($t = 23 \pm 2^\circ C$) та підвищеній ($t = 75 \pm 2^\circ C$) температурах на швидкості 1200 ± 60 об/хв з навантаженням 396 ± 4 Н по 30 хвилин на кожний зразок. Результати досліджень представлені на наступних сторінках на рис. 4 та 5.

На рис. 4 приведені експериментальні дані по зношуванню та вигляд поверхонь кульок після проведення випробування трибометром при кімнатній температурі, де зразок LS – це чисте базове мастило без присадки, а зразки L0, L1, L2 та L3 – це мастило зі вмістом 0,01%, 0,025%, 0,05% і 0,075% за масою наночастинок TiO_2 відповідно.

Поверхня зношування кульок, що змащується НЧ TiO_2 , доданими до мастила, є більш гладкою [20], ніж та, що змащується чистим маслом (рис. 4-5). Причому зі збільшенням концентрації наночасти-

нок TiO_2 глибокі борозни на поверхнях подряпин від зносу стають дедалі ще меншими і дрібнішими. Не було виявлено ніяких ознак того, що НЧ осіли на поверхні ковзання.

Аналогічні процеси спостерігаються і при підвищеній темпера-



Рис. 3 – Трибологічна система з чотирьох кульок при використанні трибометра [20]

турі (рис. 5) де плями від зношування стали дещо меншими, а борозни та подряпини – менш глибокими та широкими ніж при кімнатній температурі.

Додавання НЧ TiO_2 до мастила показало стабільне зниження тертя за рахунок утворення захисних плівок на зношених поверхнях (рис.6) [6,20].

Отже, присадки TiO_2 до мастильного матеріалу сприяють змащуванню і запобігають інтенсивному зношуванню у процесі прокатки металічних деталей та зменшують коефіцієнт тертя.

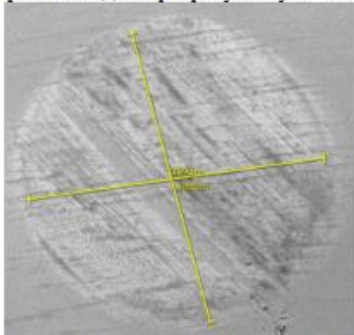
Підсумовуючи результати, констатуємо, що при температурі 23°C і при збільшенні концентрації TiO_2 зменшується коефіцієнт тертя. Середнє значення КФТ знизилося з 0,15 до 0,05 в діапазоні від 0,01% до 0,075% за масою добавки НЧ TiO_2 [20].

Дослідження, проведені при 75°C , показали ще більше зниження КФТ. Так, середній коефіцієнт тертя, знизився з 0,095 до 0,015 в діапазоні від 0,01% до 0,075% вмісту TiO_2 за масою. Отже, додавання НЧ до мастила починає ефективно діяти при кількостях наноприсадки TiO_2 починаючи вже з 0,025% за масою.

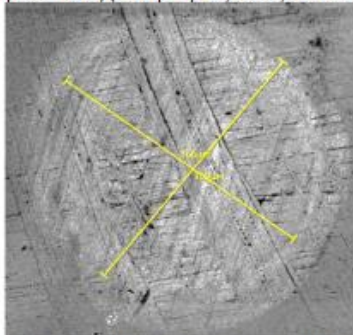
Також найнижчий показник КФТ був отриманий для зразка з 0,075% вмістом НЧ TiO_2 , який зумовив його зниження приблизно на

60% у порівнянні з чистим базовим мастилом при кімнатній температурі (23°C) і приблизно на 80% при температурі 75°C. 60% у порівнянні з чистим базовим мастилом при кімнатній температурі (23°C) і приблизно на 80% при температурі 75°C.

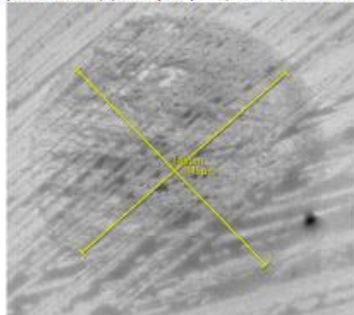
Зразок LS - Діаметр шраму зносу 388 мкм



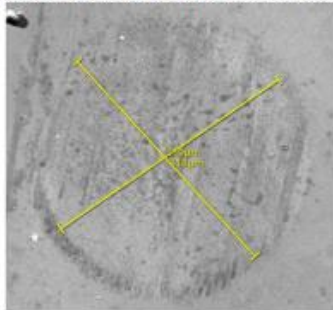
Зразок L0 - Діаметр шраму зносу 368 мкм



Зразок L1 - Діаметр шраму зносу 345 мкм



Зразок L2 - Діаметр шраму зносу 319 мкм



Зразок L3 - діаметр шраму зносу 313 мкм

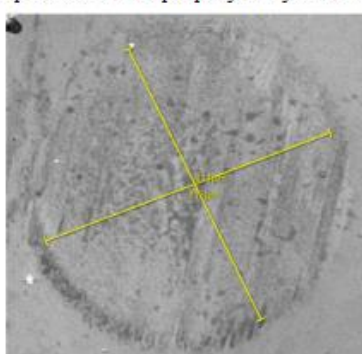
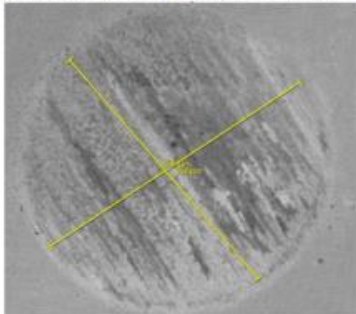
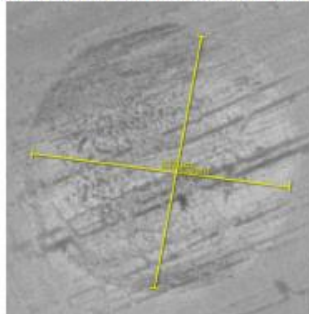


Рис. 4 – Знімки кульок, отримані скануючим електронним мікроскопом після випробування трибометром при кімнатній температурі [20]

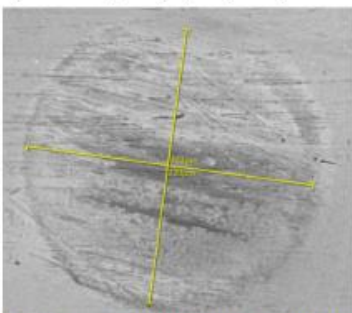
Зразок L5 - Діаметр шраму зносу 350 мкм



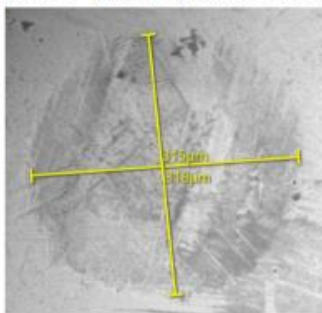
Зразок L0 - Діаметр шраму зносу 336 мкм



Зразок L1 - Діаметр шраму зносу 330 мкм



Зразок L2 - Діаметр шраму зносу 317 мкм



Зразок L3 - Діаметр шраму зносу 269 мкм

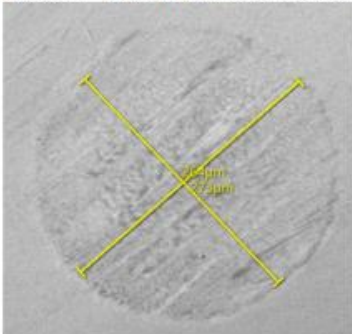


Рис. 5 – Знімки кульок, отримані скануючим електронним мікроскопом після випробування трибологом при температурі $\pm 75^{\circ}\text{C}$ [20]
Експерименти, проведені у роботі [21] з середнім діаметром НЧ TiO_2

50 нм при високій концентрації частинок у 5% від маси з використанням альтернативного тестера ковзання для аналізу тертя і зносу, показали, що середня шорсткість поверхні зменшилася на 80-84%, а

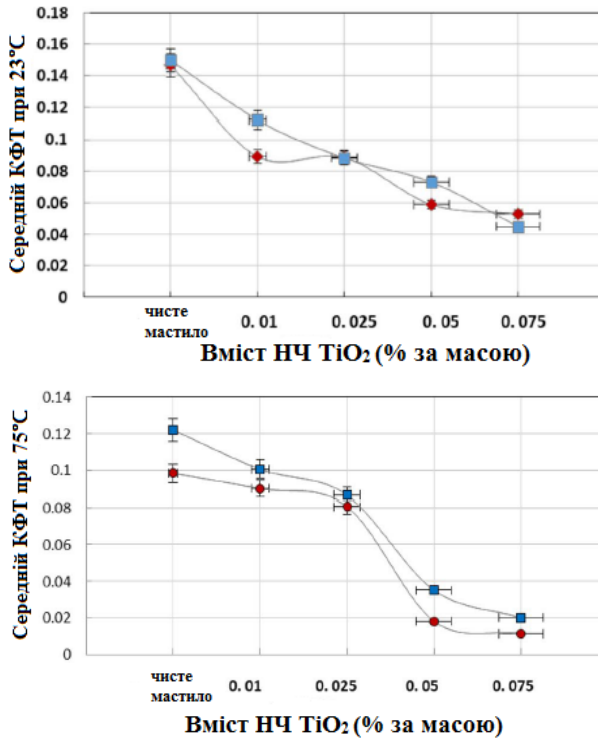


Рис. 6 – Середній коефіцієнт тертя (КФТ) для різної кількості присадки НЧ TiO₂ при температурах 23°C та 75°C і КФТ у стаціонарному стані після ефекту притирання [20]

КФТ та шрами зносу зменшились приблизно на 15,2% та 11% відповідно.

Майже ідентичні результати були отримані в роботі [22], де концентрація у 0,3% TiO₂ в моторному маслі, дає аналогічне зниження КФТ на 86%. Аналіз також показує, що сегмент розмірів НЧ <30 нм показує більш кращі результати, ніж усі інші групи. Знову ж таки, сегмент розмірів <30 нм показує найкращі результати з точки зору максимального зниження КФТ. Також отримані результати з присадкою TiO₂ до мастильного матеріалу показали більш високу несучу

здатність приблизно на 35% у порівнянні з використанням мастила без додавання НЧ.

Висновки

Таким чином, наночастинки TiO_2 відіграють вирішальну роль у покращенні трибологічних характеристик мастильних матеріалів шляхом різних механізмів дії на деталі пар тертя: полірування, заповнення шороховатості, заміну ковзання на кочення та формування захисної плівки протягом тривалого проміжку часу.

НЧ оксиду титану (TiO_2) можуть успішно використовуватися у вигляді присадок, оскільки покращують трибологічні властивості пар тертя, суттєво зменшують показники зношування, знижують КФТ і, отже, значно покращують властивості мастильного матеріалу.

Список використаних джерел та літератури

1. Nanoparticles and Nanostructured Films: Preparation, Characterization and Applications. Book Editor: Prof. Janos H. Fendler / WILEY-VCH Verlag GmbH, 1998. P. 468;
2. Omrani E. «Effect of Micro- and Nano-Sized Carbonous Solid Lubricants as Oil Additives in Nanofluid on Tribological Properties» / Emad Omrani, Pradeep L. Menezes & Pradeep K. Rohatgi. Journal «Lubricants», Volume 7, Issue 3, 2019 [Electronic resource]. – Access mode: <https://doi.org/10.3390/lubricants7030025>;
3. Pena-Paras L. «Effects of substrate surface roughness and nano/micro particle additive size on friction and wear in lubricated sliding» / Laura Pena-Paras, Hongyu Gao, Demoflio Maldonado-Cortes, Azhar Vellore *et al.* Journal «Tribology International», Volume 119, pages 88-98, 2018 [Electronic resource]. – Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.09.009>;
4. Dai W. «Roles of nanoparticles in oil lubrication» / Wei Dai, Bassem Kheireddin, Hong Gao & Hong Liang. Journal «Tribology International», Volume 102, pages 88–98, 2016 [Electronic resource]. – Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.05.020>;
5. Gulzar, M. «Tribological performance of nanoparticles as lubricating oil additives» / M. Gulzar, H.H. Masjuki, M.A. Kalam, *et al.* «Journal of

- Nanoparticle Research», Volume 18, Article No: 223, 2016 [Electronic resource]. – Access mode: <https://doi.org/10.1007/s11051-016-3537-4>;
6. Tang Z. «A review of recent developments of friction modifiers for liquid lubricants (2007-present)» / Zhenglin Tang & Shaohui Li. Journal «Current Opinion in Solid State and Materials Science», Volume 18, Issue 3, pages 119-139, 2014 [Electronic resource]. – Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2014.02.002>;
7. Lee K. «Understanding the role of nanoparticles in nano-oil lubrication» / Kwangho Lee, Yujin Hwang, Seongir Cheong, Youngmin Choi, Laeun Kwon & Soo Hyung Kim. Journal «Tribology Letters», Volume 35, pages 127-131, 2009 [Electronic resource]. – Access mode: <https://doi.org/10.1007/s11249-009-9441-7>;
8. Singh A.P. «Influence of nano particles on the performance parameters of lube oil – a review» / Anoop Pratap Singh, Ravi Kumar Dwivedi and Amit Suhane. Journal «Materials Research Express», Volume 8, Number 10, 2021 [Electronic resource]. – Access mode: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2053-1591/ac2add/meta>;
9. Rapoport L. «Mechanism of friction of fullerenes» / Rapoport L., Leshchinsky V., Lvovsky M., Nepomnyashchy O., Volovik Y. and Tenne R. Journal «Industrial Lubrication and Tribology», Volume 54, Number 4, pages 171-176, 2002 [Electronic resource]. – Access mode: <https://doi.org/10.1108/00368790210431727>;
10. Wu Y.Y. «Experimental analysis of tribological properties of lubricating oils with nanoparticle additives» / Y.Y. Wu, W.C. Tsui, T.C. Liu. Journal «Wear», Volume 262, Issues 7-8, pages 819-825, 2007 [Electronic resource]. – Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.08.021>;
11. Chinas-Castillo F. «Mechanism of action of colloidal solid dispersions» / F. Chinas-Castillo and H.A. Spikes. «Journal of Tribology», Volume 125, Issue 3, pages 552-557, 2003 [Electronic resource]. – Access mode: <https://doi.org/10.1115/1.1537752>;
12. Ginzburg B.M. «Antiwear effect of fullerene C₆₀ additives to lubricating oils» / B. M. Ginzburg, L. A. Shibaev, O. F. Kireenko, A. A. Shepelevskii, M. V. Baidakova & A. A. Sitnikova. «Russian Journal of Applied Chemistry», Volume 75, pages 1330-1335, 2002 [Electronic resource]. – Access mode: <https://doi.org/10.1023/A:1020929515246>;

13. Liu G. «Investigation of the mending effect and mechanism of copper nano-particles on a tribologically stressed surface» / G. Liu, X. Li, B. Qin, D. Xing, Y. Guo & R. Fan. Journal «Tribology Letters», Volume 17, pages 961-966, 2004 [Electronic resource]. – Access mode: <https://doi.org/10.1007/s11249-004-8109-6>;
14. Tao X. «The ball-bearing effect of diamond nanoparticles as an oil additive» / Xu Tao, Zhao Jiazheng and Xu Kang. «Journal of Physics D: Applied Physics», Volume 29, Number 11, pages 29-32, 1996 [Electronic resource]. – Access mode: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/29/11/029>;
15. Jason, Y.J.J. «A study on the tribological performance of nanolubricants» / Yeoh Jun Jie Jason, Heoy Geok How, Yew Heng Teoh & Hun Guan Chuah. Journal «Processes», Volume 8, Issue 11, 2020 [Electronic resource]. – Access mode: <https://doi.org/10.3390/pr8111372>;
16. Gu Y. «Preparation and tribological properties of dual-coated TiO₂ nanoparticles as water-based lubricant additives» / Yue Gu, Xiuchen Zhao, Ying Liu & Yunxia Lv. «Journal of Nanomaterials», Volume 16, pages 1-8, 2014 [Electronic resource]. – Access mode: <https://doi.org/10.1155/2014/785680>;
17. Luo T. «Tribology properties of Al₂O₃/TiO₂ nanocomposites as lubricant additives» / Ting Luo, Xiaowei Wei, Haiyan Zhao, Guangyong Cai & Xiaoyu Zheng. Journal «Ceramics International», Volume 40, Issue 7, Part A, pages 10103-10109, 2014 [Electronic resource]. – Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.03.181>;
18. Binu, K.G. «Static characteristics of a fluid film bearing with TiO₂ based -nanolubricant using the modified Krieger–Dougherty viscosity model and couple stress model» / K.G. Binu, B.S. Shenoy, D.S. Rao, R. Pai. Journal «Tribology International», Volume 75, pages 69-79, 2014 [Electronic resource]. – Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.03.013>;
19. Ingole, S. «Tribological behavior of nano TiO₂ as an additive in base oil» / Sudeep Ingole, Archana Charanpahari, Amol Kakade, S.S. Umare, D.V. Bhatt, Jyoti Menghani. Journal «Wear», Volume 301, Issues 1-2, pages 776-785, 2013 [Electronic resource]. – Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.037>;
20. Birleanu, C. «Effect of TiO₂ nanoparticles on the tribological properties of lubricating oil: an experimental investigation» / Corina Birleanu,

Marius Pustan, Mircea Cioaza, Andreia Molea, Florin Popa & Glad Con-tiu. Journal «Scientific Reports», Volume 12, Article No: 5201, 2022 [Electronic resource]. – Access mode: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09245-2>;

21. Arumugam, S. «Preliminary study of Nano- and Microscale TiO₂ additives on Tribological behavior of chemically modified Rapeseed Oil» / S. Arumugam & G. Sriram. Journal «Tribology Transactions», Volume 56, Issue 5, pages 797-805, 2013 [Electronic resource]. – Access mode: <https://doi.org/10.1080/10402004.2013.792977>;

22. Ilie, F. «Tribological Properties of the Lubricant Containing Titanium Dioxide Nanoparticles as an Additive» / Filip Ilie & Cristina Covaliu. Journal «Lubricants», Volume 4, Issue 2, 2016 [Electronic resource]. – Access mode: <https://doi.org/10.3390/lubricants4020012>.