

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ГЛУХОНЕЦЬ АНДРІЙ ОЛЕКСІЙОВИЧ

УДК 621.891

ДИСЕРТАЦІЯ
ЕЛАСТОГІДРОДИНАМІЧНІ АСПЕКТИ МАЩЕННЯ В УМОВАХ
ЛОКАЛЬНИХ КОНТАКТІВ ТЕРТЯ

Спеціальність: 05.02.04 – «Тертя та зношування в машинах»

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ А.О. Глухонець

Науковий керівник –
Дмитриченко Микола Федорович
доктор технічних наук, професор

Ідентичність усіх примірників дисертації
Засвідчую

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д26.059.03

_____ С.В. Ковбасенко

Київ – 2021

АНОТАЦІЯ

Глухонець А.О. Еластогідродинамічні аспекти мащення в умовах локальних контактів тертя. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.04 – «Тертя та зношування в машинах». – Національний транспортний університет, Київ, 2021.

Актуальність роботи пов'язана з вирішенням проблем підвищення надійності різного роду машин і механізмів, що на сьогоднішній день не знижується, а неухильно зростає.

Це пов'язано не тільки з посиленням режимів експлуатації устаткування і машин різного типу, але також з відсутністю в багатьох випадках розрахункових методів обґрунтованого вибору зносостійких, конструкційних і мастильних матеріалів, захисних покриттів, а також ефективних методик оптимізації режимів експлуатації обладнання, що забезпечують найбільшу довговічність провідних деталей.

Аналіз сучасного стану проблеми підвищення довговічності трибомеханічних систем показує, що мащення є одним із найбільш поширених і ефективних засобів впливу на процеси перенесення енергії і матеріалів у трибомеханічних системах, зниження тертя та зменшення інтенсивності зношування деталей. Будь яке порушення встановленого режиму мащення має негативні наслідки для працездатності трибомеханічних систем.

У роботі наведені процеси і явища, що охоплюють локальний контакт тертя. Складність, різноманіття і швидкоплинність різномірних механо-фізико-хімічних явищ, що відбуваються в контакті тертя, зумовили пріоритет досліджень стану еластогідродинамічної (ЕГД) – плівки і структури граничних шарів, які характеризують мастильну здатність олив.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої науково-прикладної задачі щодо подовження ресурсу роботи трибомеханічних систем з локальною формою контакту за рахунок удосконалення їх триботехнічних характеристик шляхом оптимального підбору мастильних матеріалів та встановлення динаміки формування змащувальної плівки при рясному та обмеженому мащенні.

Для дослідження триботехнічних властивостей мастильних матеріалів проведено комплексні лабораторні випробування на трибометрі CSM Instruments SA.

Для вимірювання товщини мастильного шару в широкому діапазоні параметрів вузла тертя з можливістю реального огляду картини підведення і розподілу мастильного матеріалу в локальному контакті використовується модернізований робочий стенд для визначення товщини мастильного шару інтерференційним методом.

Встановлено оптимальний вибір модифікаторів тертя для сучасних моторних олив, що змащують деталі двигунів класу ЄВРО-5 та ЄВРО-6.

Під час лабораторних досліджень було встановлено, що при зростанні швидкості кочення, для всіх досліджених мастильних матеріалів відбувається підвищення товщини мастильного шару в центральній зоні контакту, як в умовах чистого кочення так і кочення з проковзуванням при рясному мащенні, тим самим забезпечується перехід від граничного до гідродинамічного режимів мащення.

За результатами експериментальних досліджень були визначені закономірності кінетики зміни реологічних характеристик олив різного експлуатаційного призначення, які полягають в наступному:

- виявлена залежність ефективної в'язкості в контакті від градієнту швидкості зсуву, отже оливи набувають властивостей неньютонівських рідин. Ефективна в'язкість в контакті є найбільшою при

найменшій сумарній швидкості кочення в умовах початкового формування товщини мастильного шару;

– товщина мастильного шару в початковий період формування мастильної плівки, незалежно від типу оливи, на 6 – 8% перевищує товщину мастильної плівки, визначену за формулами Даусона та Хемрока. При розрахунку сталої товщини мастильного шару, яка встановлена експериментальним шляхом, та обчисленої за даними формулами, розбіжність становить 4%. На нашу думку, це обумовлено тим, що при відновленні ньютонівських властивостей олив η_{ef} в контакті зменшується для TEMOL CLASSIC 15w40 на 77%, для ЄМТ-8 на 77%; для І-40А на 74%, для М8Г2К на 86%; для М10Г2К на 79% та для ПРОТЕК ЄМТ-8 на 72%; в умовах зростання товщини мастильного шару зафіксовано зниження коефіцієнту тертя та напруги зсуву цього шару: для TEMOL CLASSIC 15w40 f_T (коефіцієнт тертя) та τ (дотична напруга зсуву мастильного шару) знижуються на 50%, ЄМТ-8 – на 49%, І-40А – на 52%, М8Г2К – на 55%, М10Г2К – на 49%, ПРОТЕК ЄМТ-8 на 38%.

За результатами дисертаційної роботи встановлено наступне:

1. Умови формування еластогідродинамічної плівки мастильного матеріалу, при яких тиск істотно впливає на деформації контактуючих тіл, тобто на форму мастильного шару і на в'язкість мастильного матеріалу має велике значення при змащуванні навантажених неконформних вузлів тертя.

2. Використання методу оптичної інтерферометрії для визначення товщини мастильного шару в локальному контакті тертя дало можливість найбільш точно диференціювати змащувальні матеріали за їх реологічними ознаками, а також встановити залежність процесу формування товщини мастильного шару від впливу наступних факторів: швидкість кочення та кочення з проковзуванням, навантаження в контакті, температура змащувального матеріалу та фізико-хімічний склад досліджуваного мастильного матеріалу.

3. Триботехнічні вимірювання об'ємного зносу та коефіцієнту тертя на трибометрі CSM Instruments SA дали можливість встановити кращий зразок оливи з поліпшеними протизношувальними та антифрикційними властивостями при різних температурах – 20 та 70°C.

4. Підвищення несучої здатності для моторної оливи TEMOL CLASSIC 15w40 при $\sigma_{\max}=362,7\text{МПа}$, що обумовлено сповільненням в зменшенні ефективної в'язкості в контакті при відновленні мастильним матеріалом ньютонівських властивостей.

5. Реверсія градієнту швидкості зсуву із збільшенням навантаження для олив TEMOL CLASSIC 15w40, ЄМТ-8 та І-40А. На нашу думку це явище обумовлено запізненням відновлення ньютонівських характеристик олив, внаслідок активації деструкційних процесів в умовах початкового формування товщини мастильного шару.

6. При зміні режиму мащення від рясного до обмеженого мащення встановлено запізнення у формуванні початкової товщини мастильного шару для всіх досліджених мастильних матеріалів.

7. При зростанні контактного навантаження з 251,5 до 362,7МПа встановлено зменшення градієнту швидкості зсуву для олив TEMOL CLASSIC 15w40, М8Г2К, М10Г2К, І-40А, ЄМТ-8 та ПРОТЕК ЄМТ-8 відповідно на 12%, 19%, 26%, 25%, 12%, 10%.

8. Для всіх досліджених мастильних матеріалів як при рясному так і при обмеженому мащенні, швидкість початкового формування товщини мастильного шару в контакті зростає при зменшенні в'язкості мастильного матеріалу, внаслідок зменшення кількості мастильного матеріалу на вході в контакт.

9. Кінетика зміни антифрикційних властивостей мастильних матеріалів при різних режимах мащення: як в умовах рясного мащення так і при обмеженому мащенні при збільшенні контактного навантаження

зростання напруг зсуву призводить до кореляційного збільшення коефіцієнту тертя для всіх досліджених мастильних матеріалів.

10. Результати досліджень впроваджені у ТОВ «КСМ Протек» (сmt. Клавдієво-Тарасове, Київська обл.) при виготовленні та оптимізації структурного складу мастильних матеріалів та філії КП «Київпаstrанс» Автобусний парк №6 (м. Київ) при прогнозуванні періодичності технічного обслуговування та заміни універсальних моторно-трансмiсійних олив в агрегатах трансмісій гусеничної техніки та в навчальний процес Національного транспортного університету.

Наукова новизна одержаних результатів.

Встановлені механізми формування початкової товщини змащувального шару в контактi та її зростання при збільшенні сумарної швидкості кочення в залежності від набуття змащувальними матеріалами неньютонівських властивостей в контактi в момент пуску, наявності різних базових олив, кількісної концентрації активованих вуглеводневих компонентів та імовірності релаксації мастильного матеріалу.

Практичне значення одержаних результатів.

Розроблені методи прогнозування довговічності неконформних вузлів тертя з точковою формою контакту на основі оцінки основних експлуатаційних чинників.

Створена аналітична модель ефективності мащення, що дає змогу визначити ступінь впливу експлуатаційних чинників, і як наслідок, можливість прогнозувати довговічність неконформних вузлів тертя.

Ключові слова.

Триботехнічна система, еластогідродинаміка, неконформні вузли, локальний контакт, рясне мащення, обмежене мащення.

Список публікацій здобувача.

Публікації у виданнях, які входять до наукометричних баз:

1. Дмитриченко М. Ф. Оценка состояния трансмиссионных масел по динамическим характеристикам трения. / Н. Ф. Дмитриченко, О. Н. Билякович, О. В. Руденко, А. А. Глухонец // Международный научный журнал «ТРЕНИЕ И ИЗНОС»: Гомель ИММС НАН Беларуси 2016, Том 37, No 3, С. 374-378 (Scopus).

2. Дмитриченко М. Ф. Using Mathematical, Experimental and Statistical Modeling to Predict the Lubricant Layer Thickness in Tribosystems / M. Dmytrychenko, V. Khrutba, A. Savchuk, A. Hlukhonets. Mathematical Modeling and Simulation of Systems/ Springer Nature Switzerland AG / 2019, P.39-49. (Scopus).

Публікації у наукових фахових виданнях України:

3. Дмитриченко М. Ф. Дослідження кінетики зміни товщини мастильного шару в залежності від матеріалу пар тертя / Дмитриченко М. Ф., Білякович О. М., Глухонець А. О., Міняйло К. М. // Технологический аудит и резервы производства — № 6/6(26-), 2015. С. 39-41.

4. Дмитриченко М. Ф. Динамика формирования толщины смазочного слоя в условиях локального контакта / Дмитриченко М.Ф., Білякович О.М., Глухонець А.О., // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. – К.: НТУ, 2017. – Вип. 1 (37), С. 109-115.

Публікації у наукових періодичних виданнях іноземних держав:

5. Дмитриченко М. Ф. Моніторинг стану поверхневих шарів трибосполучень в умовах тривалої експлуатації мастильних матеріалів Дмитриченко Микола, Білякович Олег, Савчук Анатолій, Міланенко Олександр, Туриця Юлія, Глухонець Андрій / Systemy i Srodki Transportu Samochodowego. Wybrane Zagadnienia : Monografia // pod redakcja naukowa

Kazimierza Lejdy. – Seria Transport № 14. – Rzeszów: Politehnika Rzeszowska, 2015. – С. 227-232 ISBN 978-83-7934-007-1.

Публікації апробаційного характеру

6. Дмитриченко М.Ф. Динаміка формування товщини мастильного шару в умовах точкового контакту / Дмитриченко М.Ф., Глухонець А.О., Богданова О.І., Глухонець О.О // Матеріали LXXI наукової конференції професорсько-викладацького складу аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету – К.: НТУ, 2015. – С.6.

7. Дмитриченко Н.Ф. Эффективная вязкость смазочного материала в зоне контакта при масляном голодании / Дмитриченко Н.Ф., Глухонец А.А., Богданова О.И., Глухонец О.А. // Материалы 14-й Международной научно-технической конференции (69-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов БНТУ), Минск БНТУ, 2016 В 4 томах. Том 2, – С.100.

8. Богданова О.І. Ефективна в'язкість мастильного матеріалу в точковому контакті / Богданова О.І., Глухонець О.О., Глухонець А.О., Симоненко Б.А. // Матеріали LXXIII наукової конференції професорсько-викладацького складу аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету – К.: НТУ, 2017. – С. 12-13.

9. Глухонец А.А. Влияние параметра скорости качения на кинетику формирования толщины смазочного слоя в условиях эластогидродинамического режима смазки/ Глухонец А.А. // Материалы 15-й Международной научно-технической конференции (70-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов БНТУ), Минск БНТУ, 2017 В 4 томах. Том 2, С. 98.

10. Дмитриченко М.Ф. Математичне моделювання процесу зміни товщини мастильного шару в точковому контакті / Дмитриченко М.Ф., Глухонець А.О., Богданова О.І., Глухонець О.О., Бондарчук В.В.// Матеріали LXXIV наукової конференції професорсько-викладацького складу аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету – К.: НТУ, 2018. – С. 6-7.

11. Дмитриченко М.Ф. Моделювання процесу зміни ширини змащувального шару у локальному контакті / Дмитриченко М.Ф., Савчук А.М., Глухонець А.О. Шевченко О.О. // III-я Всеукраїнська науково-практична конференція «Новітні шляхи створення, експлуатації, ремонту і сервісу автомобілів» – Миколаїв: ТОВ «МІПРО», 2018. – С. 26-28.

SUMMARY

Andrii Hlukhonets Elastohydrodynamic aspects of lubrication in conditions of local friction contacts – Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences in the specialty 05.02.04 – "Friction and wears in machines". – National Transport University, Kyiv, 2021.

The urgency of the work is related to solving the problems of increasing the reliability of various machines and mechanisms, which today is not declining, but steadily increasing.

This is due not only to the strengthening of operating modes of equipment and machinery of various types, but also to the lack in many cases of calculation methods of reasonable choice of wear-resistant, structural and lubricants, protective coatings, and effective methods of optimizing modes operation of equipment leading parts.

Analysis of the current situation with the problem of increasing the durability of tribomechanical systems shows that lubrication is one of the most common and effective means of energy transfer processes and materials in

tribomechanical systems, reducing friction and reducing the intensity of wear. Any violation of the established lubrication regime has negative consequences for the performance of tribomechanical systems.

The work presents the processes and phenomena that cover the local contact of friction. The complexity, variety and ephemerality of heterogeneous mechano-physico-chemical phenomena occurring in the contact of friction have determined the priority of researches of the state of elastohydrodynamic (EHD) - the layer and structure of the boundary layers that characterize the lubricity of oils.

The dissertation is devoted to solving an important scientific and applied problem of extending the service life of tribomechanical systems with a local contact by improving their tribotechnical characteristics by optimal selection of lubricants and establishing the dynamics of lubricating layer formation with abundant and limited lubrication.

For research the tribotechnical properties of lubricants, comprehensive laboratory tests were performed on a tribometer CSM Instruments SA

To measure the thickness of the lubricating layer in a wide range of parameters friction node with the possibility of a real view of the supply and distribution of lubricant in local contact, an upgraded working stand is used to determine the thickness of the lubricating layer by interference.

The optimal choice of friction modifiers for modern motor oils that lubricating engines details of the class EURO-5 and EURO-6 has been established.

During laboratory researches it was found that with increasing rolling speed, for all investigated lubricants there is increase in the thickness of the lubricating layer in the central contact zone, both in pure rolling and rolling with sliding at abundant lubrication, thus providing a transition from extreme to hydrodynamic lubrication modes.

According to the results of experimental researches, the regularities of the kinetics of changes in the rheological characteristics of oils for different operational purposes were determined, which are as follows:

- the dependence of the effective viscosity in contact on the shear rate gradient is revealed, so oils acquire the properties of non-Newtonian fluids. The effective viscosity in contact is greatest at the lowest total rolling speed under the conditions of the initial formation of the thickness of the lubricating layer;

- the thickness of the lubricating layer in the initial period of formation of the lubricating layer, regardless of the type of oil, is 6 - 8% higher than the thickness of the lubricating layer, determined by the formulas of Dawson and Hamrock. When calculating the constant thickness of the lubricating layer, which is established experimentally, and calculated by these formulas, the discrepancy is 4%. In our opinion, this is due to the fact that when restoring the Newtonian properties of oils η_{ef} in contact decreases for TEMOL CLASSIC 15w40 by 77%, for EMT-8 by 77%; for I-40A by 74%, for M8G2K by 86%; for M10G2K by 79% and for PROTEK EMT-8 by 72%; under conditions of increasing the thickness of the lubricating layer, a decrease in the coefficient of friction and shear stress of this layer was recorded: for TEMOL CLASSIC 15w40 f_T (coefficient of friction) and τ (tangential shear stress of the lubricating layer) decreased by 50%, EMT-8 - by 49%, I-40A - by 52%, M8G2K - by 55%, M10G2K - by 49%, PROTEK EMT-8 by 38%.

According to the results of the dissertation, the following is established:

1. Conditions of formation elastohydrodynamic layer of lubricant, in which the pressure significantly affects the deformation of the contacting bodies, ie the shape of the lubricant layer and the viscosity of the lubricant is of great importance when lubricating loaded non-conformal nodes friction.

2. The usage method of optical interferometry to determine the thickness of the lubricating layer in the local contact of friction made it possible to most accurately differentiate lubricants by their rheological features, as well as to

establish the dependence of the process of lubricating layer thickness on the influence of the following factors: rolling speed and rolling with sliding, temperature of lubricant and physico-chemical composition of the researched lubricant.

3. Tribotechnical measurements of volume wear and friction coefficient on the CSM Instruments SA tribometer made it possible to establish the best oil sample with improved anti-wear and antifriction properties at different temperatures - 20 and 70 ° C.

4. Increase of bearing capacity for TEMOL CLASSIC 15w40 motor oil at $\sigma_{\max} = 362.7$ MPa, which is due to the slowdown in the reduction of the effective viscosity in contact when the lubricant restores Newtonian properties.

5. Shear rate gradient reversal with increasing load for TEMOL CLASSIC 15w40, EMT-8 and I-40A oils. In our opinion, this phenomenon is due to the delay in the restoration of Newtonian characteristics of oils, due to the activation of destructive processes in the initial formation of the thickness of the lubricating layer.

6. When changing the lubrication regime from abundant to limited lubrication, there is a delay in the formation of the initial thickness of the lubricating layer for all investigated lubricants.

7. When the contact load increases from 251.5 to 362.7 MPa, the shear rate gradient for TEMOL CLASSIC 15w40, M8G2K, M10G2K, I-40A, EMT-8 and PROTEK EMT-8 oils is reduced by 12%, 19%, 26 %, 25%, 12%, 10%.

8. For all investigated lubricants, both with abundant and limited lubrication, the rate of initial formation of the thickness of lubricating layer in contact increases with decreasing viscosity of the lubricant, due to decrease in the amount of lubricant at the entrance to the contact.

9. Kinetics of change of antifriction properties of lubricants at different lubrication modes: both in the conditions of boundary lubrication and at limited

lubrication with increase of contact loading of increase of shear stresses leads to correlation increase coefficient of friction for all investigated lubricants.

10. The results of the research were implemented in KSM Protek LLC (Klavdiyevo-Tarasovo, Kyiv region) in the manufacture and optimization of the structural composition of lubricants and the branch of ME "Kyivpastrans" Bus fleet №6 (Kyiv) in forecasting the frequency of maintenance and replacement of universal motor-transmission oils in caterpillar transmission units and in the educational process of the National Transport University.

Scientific novelty of the obtained results.

Mechanisms for the formation of the initial thickness of the lubricating layer in contact and its growth with increasing total rolling speed depending on the acquisition of lubricants non-Newtonian properties in contact on the moment of start, the presence of different base oils, the quantitative concentration of activated hydrocarbon components and the probability relaxation of lubricant.

The practical significance of the obtained results.

Methods for predicting the durability of non-conformal nodes friction with a point form of contact based on the assessment of the main operational factors have been developed.

An analytical model of lubrication efficiency is created, which allows to determine the degree of influence of operational factors, and as a consequence, the ability to predict the durability of non-conformal nodes friction.

Keywords: tribotechnical system, elastohydrodynamics, non-conformal nodes friction, local contact, abundant lubrication, limited lubrication.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	17
ВСТУП.....	18
РОЗДІЛ 1 ВПЛИВ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ФАКТОРІВ ТА ТРИБОТЕХНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ ТРИБОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ.....	24
1.1 Сучасні уявлення про режими мащення в трибомеханічних системах.....	25
1.1.1 Гідродинамічний режим мащення	26
1.1.2 Еластогідродинамічний режим мащення	27
1.1.3 Режим змішаного мащення	28
1.1.4 Граничний режим мащення.....	30
1.2 Концепція застосування гідродинамічної теорії мащення в сучасних умовах тертя	32
1.2.1 Шорсткість поверхні в гідродинамічній теорії мащення.....	33
1.2.2 Явище кавітації в гідродинамічній теорії мащення.....	34
1.2.3 Підшипники, що працюють в умовах обмеженого мащення.....	35
1.2.4 Розвиток термопружногідродинамічного мащення.....	37
1.3 Концепція застосування еластогідродинамічної теорії мащення в сучасних умовах тертя	41
1.3.1 Шорсткість поверхні в еластогідродинамічній теорії мащення.....	45
1.3.2 Задири та тиск в еластогідродинамічній теорії мащення	46
1.3.3 Вплив обмеженого мащення на утворення еластогідродинамічного змащувального шару.....	48

1.3.4 Розвиток мікроконтактногідродинамічної теорії змащення.....	49
Висновки до розділу 1.....	53
РОЗДІЛ 2 ОСНОВНІ МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ.....	54
2.1 Вимірювання об'ємного зносу в трибомеханічних системах....	55
2.2 Вимірювання реологічних та триботехнічних характеристик методом оптичної інтерферометрії.....	58
2.2.1 Загальні відомості про метод оптичної інтерференції....	58
2.2.2 Кольорова інтерференція та її особливості	63
2.2.3 Тарування оптичної товщини мастильного шару.....	65
2.3 Експериментальне устаткування для визначення об'ємного зносу, коефіцієнту тертя, реологічних та триботехнічних показників в умовах локальних контактів.....	69
Висновки до розділу 2.....	75
РОЗДІЛ 3 КІНЕТИКА ТРИБОТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ В УМОВАХ РЯСНОГО МАЩЕННЯ.....	77
3.1 Концепція оптимального вибору модифікаторів тертя для сучасних мастильних матеріалів.....	77
3.1.1 Визначення протизношувальних характеристик модифікаторів тертя.....	79
3.1.2 Визначення антифрикційних характеристик модифікаторів тертя.....	81
3.2 Особливості формування товщини мастильного шару в контакті.....	83
3.2.1 Динаміка формування товщини мастильного шару в умовах чистого кочення.....	84
3.2.2 Динаміка формування товщини мастильного шару в контакті тертя в умовах кочення із проковзуванням.....	89

3.3 Вплив швидкості кочення на реологічні характеристики мастильних матеріалів в контакті тертя.....	96
3.4 Залежність реологічних та антифрикційних властивостей мастильних матеріалів від контактного навантаження.....	104
Висновки до розділу 3.....	119
РОЗДІЛ 4 ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ТРИБОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНОГО МАЩЕННЯ.....	123
4.1 Кінетика зміни товщини мастильного шару в умовах обмеженого мащення.....	125
4.1.1 Вплив швидкості кочення на формування товщини мастильного шару в контакті в умовах чистого кочення.....	125
4.1.2 Вплив швидкості кочення із проковзуванням на формування товщини мастильного шару в контакті.....	130
4.2 Кінетика зміни реологічних характеристик мастильних матеріалів при збільшенні швидкості кочення в умовах обмеженого мащення.....	136
4.3 Кінетика зміни реологічних та антифрикційних властивостей оливи від навантаження в контакті при обмеженому мащенні.....	140
4.4 Розробка аналітичної моделі еластогідродинамічного режиму мащення в локальному контакті.....	147
4.4.1 Теоретичні аспекти математичної обробки пасивного експерименту.....	147
4.4.2 Результати розрахунків однофакторної моделі.....	151
4.4.3 Результати розрахунків багатофакторної моделі.....	162
Висновки до розділу 4.....	172
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	176
Література.....	179
Додатки.....	192

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ЕГД	– еластогідродинаміка
УМТО	– універсальна моторно-трансмісійна олива
ТС	– трибоспряження
ТТС	– триботехнічна система
ТГД	– термогідродинаміка
ПГД	– пружногідродинамічне мащення
ТПГД	– термопружногідродинамічне мащення
ЕГД ТМ	– еластогідродинамічна теорія мащення
ДВЗ	– двигун внутрішнього згорання
ПАР	– поверхнево – активні речовини

ВСТУП

Актуальність теми. Розвиток сучасних машин направлено на підвищення їх продуктивності, надійності, конкурентоспроможності та ефективності, зниження матеріалоємності, енергоспоживання, шкідливого впливу на людину і природу.

Як показує світовий досвід, досягнення заданого рівня надійності більшості машин і механізмів неможливо без забезпечення необхідних експлуатаційних властивостей вузлів тертя. Це вимагає проведення теоретичних досліджень і великого обсягу всебічних досліджень триботехнічних показників матеріалів і рухомих сполучень.

Актуальність проблеми підвищення надійності різних машин і механізмів з плином часу не тільки не знижується, а навпаки неухильно зростає. На роботи по відновленню зношених деталей, забезпечення працездатності рухомих сполук у важких умовах експлуатації, зниження інтенсивності різних видів зношування обладнання в технічно розвинених країнах щорічно витрачається до 5% доходу країни.

Таке положення пов'язане не тільки з посиленням режимів експлуатації різного устаткування і машин, але також з відсутністю в багатьох випадках розрахункових методів обґрунтованого вибору зносостійких конструкційних і мастильних матеріалів, захисних покриттів і наплавлень, а також способів хіміко-термічної обробки по досить об'єктивними критеріями для конкретних умов роботи ТС; ефективних методик оптимізації режимів експлуатації обладнання, що забезпечують найбільшу довговічність провідних деталей.

Процес зношування спряжених поверхонь призводить до зміни довговічності та працездатності трибомеханічних систем, від яких в багатьох випадках залежить їхня надійність. Отже виявлення основних

показників працездатності, які залежать від ступеня зношуваності пар тертя, і визначення допустимих величин зміни цих показників є необхідною умовою для прогнозування технічного стану ТС.

Виходячи із загальних досліджень випливає, що для подальшого підвищення надійності, довговічності і навантажувальної здатності трибомеханічних систем вкрай необхідно розкриття механізму мастильної дії мастильних середовищ в умовах рясного мащення і обмеженого мащення на етапі припрацювання (самопристосування), сталого стану і катастрофічного пошкодження (вичерпання ресурсу) при стаціонарному навантаженні.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана відповідно до договорів Міністерства освіти і науки України в напрямку «Енергетика та енергоефективність» науково – дослідної роботи за рахунок державного бюджету за темою №19 «Дослідження закономірностей формування граничних мастильних шарів у оливах з різним якісним станом з метою оптимізації ресурсу елементів трибосистем» (№ РК 0113U000296 в період 01.01.2013 р. - 31.12.2014 р.); та науково – дослідної роботи за рахунок державного бюджету за темою № 34 «Збільшення ресурсу використання універсальної моторно-трансмісійної оливи у вітчизняних гусеничних машинах за рахунок оптимізації структурного складу оливи» (№РК 0115U002289 в період 01.01.2015 р. – 31.12.2016 р.).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є подовження ресурсу роботи трибомеханічних систем з локальною формою контакту за рахунок удосконалення їх триботехнічних характеристик шляхом оптимального підбору мастильних матеріалів та встановлення динаміки формування змащувальної плівки при рясному та обмеженому мащенні.

Об'єкт дослідження – динаміка формування змащувальної плівки в локальному контакті тертя в залежності від фізико-хімічних властивостей мастильного матеріалу та умов мащення.

Предмет дослідження – вплив сумарної швидкості кочення пар тертя та навантаження в контакті на формування товщини змащувальної плівки.

Методи дослідження – експериментальне визначення динаміки товщини мастильного шару в точковому контакті та визначення антифрикційних і реологічних характеристик олив різного експлуатаційного призначення; аналітичне моделювання умов експлуатації трибомеханічних систем.

Відповідно до мети в роботі поставлені та вирішуються наступні задачі:

1) визначення кращого зразка оливи з поліпшеними протизношувальними та антифрикційними властивостями при різних температурах – 20 та 70°C за рахунок проведених триботехнічних вимірювань об'ємного зносу та коефіцієнту тертя на трибометрі CSM Instruments SA;

2) встановлення ефективності мащення oliвами різного експлуатаційного призначення при різних видах тертя (умова чистого кочення та кочення з проковзуванням);

3) дослідження кінетики зміни товщини змащувального шару в контакті тертя в умовах рясного та обмеженого мащення;

4) визначення реологічних та антифрикційних властивостей змащувальних матеріалів в залежності від режимів мащення в контакті;

5) визначення ступеня впливу основних експлуатаційних чинників, які впливають на динаміку формування товщини змащувального шару в контакті.

6) створення аналітичної моделі ефективності мащення на основі методу найменших квадратів, яка дозволяє визначити ступінь впливу

експлуатаційних чинників і, як наслідок можливість, прогнозувати довговічність неконформних вузлів тертя.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1. Запропоновано комплексний метод оптимального вибору модифікаторів тертя з поліпшеними протизношувальними і антифрикційними властивостями, який дозволяє створювати моторно-трансмісійні оливи з поліпшеними триботехнічними властивостями.

2. Встановлені механізми формування початкової товщини змащувального шару в контакті та її зростання при збільшенні сумарної швидкості кочення в залежності від набуття змащувальними матеріалами неньютонівських властивостей в контакті в момент пуску, наявності різних базових олив, кількісної концентрації активованих вуглеводневих компонентів та імовірності релаксації мастильного матеріалу.

3. Встановлено вплив ефективної в'язкості олив в контакті на кінетику зміни антифрикційних та реологічних властивостей мастильних матеріалів від інтенсивності деструкційних змін поліальфаолефінової складової в умовах рясного та обмеженого мащення та типу структуризації граничних мастильних шарів.

Практичне значення результатів досліджень складають:

– закономірності щодо впливу тривалості використання модифікованих універсальних моторно-трансмісійних олив (УМТО) на їх реологічні характеристики в умовах кочення з проковзуванням;

– кращі протизношувальні, протизадирні й антифрикційні властивості моторно-трансмісійної оливи ПРОТЕК ЄМТ-8 в нестаціонарних умовах тертя в порівнянні з моторно-трансмісійною оливою ЄМТ-8, що визначені на основі експериментальних даних;

– аналітична модель мащення точкового контакту при використанні на основі оцінки розподілу товщини мастильного шару в центральній зоні контакту в залежності від експлуатаційних чинників (навантаження,

швидкість, температура) та реологічних властивостей мастильних матеріалів, що дозволяє визначити оптимальні умови експлуатації неконформних вузлів тертя при явному та обмеженому мащенні.

Результати досліджень впроваджено у ТОВ «КСМ Протек», філії КП «Київпаstrанс» Автобусний парк № 6 та в навчальний процес Національного транспортного університету (додатки Б).

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати, що виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно. В роботах у співавторстві здобувачу належать: [1] – аналіз впливу залишкового ресурсу мастильних матеріалів на структурний стан поверхневих шарів трибосполучень; [2] – аналіз закономірностей утворення граничних мастильних плівок в залежності від матеріалу пар тертя; [3] – встановлений вплив терміну служби мастильних матеріалів на деформаційні та витривалісні характеристики поверхневих слоїв трибоспряжень; [4] – визначення основних фізико-хімічних характеристик досліджуваного спектру мастильних матеріалів; [5] – запропоновано аналітичну модель мащення локального контакту на основі оцінки розподілу товщини мастильного шару в центральній зоні контакту при врахуванні кореляційного зв'язку між експлуатаційними (швидкісні та навантажувальні), температурними чинниками та реологічними властивостями змащувального матеріалу; [6] – встановлено динаміку формування товщини мастильного шару в умовах точкового контакту; [7,8] – досліджено ефективну в'язкість мастильного матеріалу в зоні контакту при масляному голодуванні в точковому контакті; [9] – встановлено вплив параметру швидкості кочення на кінетику формування товщини змащувального шару; [10,11] – розроблена аналітична модель процесу зміни товщини мастильного шару в точковому контакті;

Дослідження, які були виконані в співавторстві і містяться в дисертаційній роботі, проведені при безпосередній участі автора на всіх

етапах роботи. В цілому автору належить теоретичне обґрунтування, вибір і розробка методики дослідження, обґрунтування і узагальнення отриманих результатів, практичні рекомендації, впровадження розробок в діяльність.

Публікації. Основні положення дисертації опубліковано у 2 друкованих роботах у фахових виданнях України. Також 3 статті у міжнародних виданнях, 2 з яких входять у реферативну базу даних SCOPUS.

Апробація результатів роботи. Результати роботи доповідались та обговорювались на наукових конференціях професорсько – викладацького складу і студентів НТУ (Київ 2015, 2016, 2018,2019), науковій конференції «Rozwoj systemow i srodkow transportu samochodowego – SAKON 2015» (Польща, Жешув 2015), III-ій Всеукраїнській науково-практичній конференції «НОВІТНІ ШЛЯХИ СТВОРЕННЯ, ЕКСПЛУАТАЦІЇ, РЕМОНТУ І СЕРВІСУ АВТОМОБІЛІВ» (Миколаїв, 2017), 15-й Международной научно-технической конференции (70-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов БНТУ), (Мінськ, Білорусь, 2017) та міжнародній конференції «INTERNATIONAL SCIENTIFIC-PRACTICAL CONFERENCE MODS'2019» (Чернігів 2019).

РОЗДІЛ 1

ВПЛИВ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ФАКТОРІВ ТА ТРИБОТЕХНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ ТРИБОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

Проблеми тертя, зносу і змащувальних матеріалів в процесі взаємодії контактуючих поверхонь при їх взаємному переміщенні в машинах вивчає наука трибологія. Тому з позиції науки трибології варто зазначити наступні визначення:

Трибоспряження (ТС) - дві функціонально пов'язані деталі (вал-втулка, два зубчастих колеса та ін.). ТС відповідно до Єдиної системи конструкторської документації (ЄСКД) може бути віднесено до складальної одиниці або виробу, що складається з двох складових частин.

Триботехнічна система (ТТС) - складна термодинамічна система, утворена з декількох трибоспоряджень і вузлів тертя, а також проміжного середовища та частини навколишнього середовища, в якій відбувається перетворення механічної енергії (механічного руху) в інші види (тепло, коливання та ін.) і передача перетвореної енергії тепла. ТТС згідно ЄСКД відноситься до виробу. ТТС і ТС - вироби, які при використанні витрачають свій ресурс (фізичний знос). Процес використання виробу позначається терміном «експлуатація». До виробів відносяться машини, верстати, апарати, прилади, їх вузли [12].

В цілому трибологія охоплює теоретичні і експериментальні дослідження фізичних, хімічних, біологічних та ін. явищ, пов'язаних з тертям. Однією з найважливіших проблем трибології є проблема підвищення зносостійкості конструкційних матеріалів, з яких складаються трибоспряження та вузли тертя, саме тому поряд з поліпшенням антифрикційних характеристик, зниження зносу належить до пріоритетних інженерних завдань.

1.1 Сучасні уявлення про режими мащення в трибомеханічних системах

Трибологічні процеси, тобто процеси контакту, тертя і зношування, як правило, пов'язані з безпосередніми фізичними взаємодіями між здійснюючими відносний рух поверхнями. На всі ці процеси впливає змащувальний матеріал, призначення якого полягає в поділі рухомих відносно одна одної поверхонь плівкою матеріалу, здатного піддаватися зсуву з малим опором і без будь-яких ушкоджень поверхонь.

Характер і товщина змащувального шару визначає вид мащення і тим самим, тертя. У залежності від товщини плівки мащення (від десятих часток міліметра до декількох нанометрів), розподілу висот нерівностей у плівці мащення і ступеня геометричного прилягання можна виявити різні режими мащення, що зручно обговорити, розглядаючи криву Штрибека. Г. Штрибек провів численні експерименти з тертям підшипників ковзання і кочення. Він виміряв коефіцієнт тертя в залежності від навантаження N , швидкості V і температури T . Щоб виключити вплив на результати залежності в'язкості від температури, Штрибек перерахував і виміряв коефіцієнт тертя у функції навантаження і швидкості при постійній об'ємній температурі оливи 25°C .

Точні виміри Штрибека послужили основою для теоретичних досліджень гідродинамічних підшипників Зомерфельда, Гюмбеля та їхніх послідовників.

Тепер загальноновизнано, що крива Штрибека являє собою загальну характеристику змазаних поверхонь, що рухаються, у залежності від в'язкості оливи η , швидкості V і нормального навантаження N (або тиску p). На рис. 1.1 показана крива Штрибека в спрощеному вигляді як функція параметру $\eta \cdot V/N$. Цей параметр пов'язаний з величиною, зворотною числу Зомерфельда S_0 .

У залежності від форми поверхонь тертя, матеріалів, робочих умов і проміжку h між поверхнями можна виділити три головних режими мащення: I. Гідродинамічне мащення (або еластогідродинамічне (ЕГД) мащення). II. Змішане мащення. III. Граничне мащення.

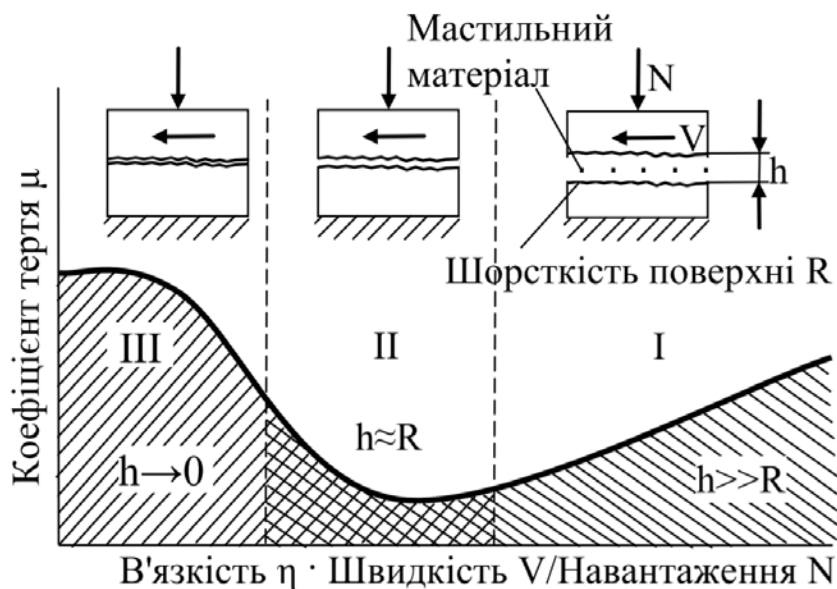


Рисунок 1.1 – Крива Штрибека і режими мащення [2]

1.1.1 Гідродинамічний режим мащення. Вид змащувальної дії, при якому здійснюється повне розділення поверхонь тертя змащувальним матеріалом в результаті тиску, який виникає в шарі рідини при відносному русі поверхонь, що обмежують змащувальний шар [13].

Гідродинамічне мащення має місце в радіальних і упорних підшипниках ковзання різноманітного призначення, в циліндро-поршневій групі двигунів внутрішнього згорання, в швидкохідних навантажених та добре припрацьованих зубчастих передачах і інших вузлах тертя.

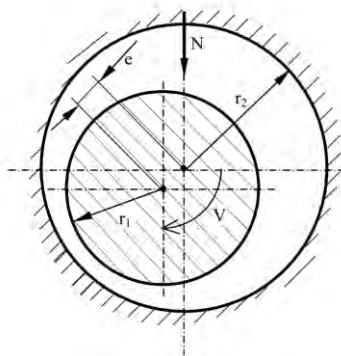


Рисунок 1.2 – Схематичне зображення геометрії радіального підшипника [13]: N – навантаження; V – швидкість ковзання; e – ексцентриситет; r_1 – радіус вала; r_2 – радіус втулки; $C_r = r_2 - r_1$ – радіальний зазор

Трибологічна поведінка гідродинамічної системи в основному визначається двома особливостями:

- опір руху задається "внутрішнім тертям" рідини, тобто опором зрушенню або "в'язкістю" рідкої плівки;
- зношування виключається, якщо форма поверхонь така, що призводить до повного поділу поверхонь.

1.1.2 Еластогідродинамічний режим мащення. Гідродинамічний режим мащення розглядався в основному для систем з високим "геометричним приляганням", наприклад, для опор ковзання зі самовстановлюваними вкладишами. Поверхні цих систем вважаються абсолютно твердими в процесі роботи. При поганому геометричному приляганні, наприклад, у випадках зосереджених контактів Герца, варто враховувати вплив пружної деформації поверхонь. Необхідно також мати на увазі вплив тиску на в'язкість рідини, оскільки в контактах Герца з мащенням є високі тиски. Усе це призводить до встановлення поняття еластогідродинамічного (ЕГД) режиму мащення.

У якості вихідної розглянемо змащувальну систему "циліндр–площина", пружнодеформовану під дією навантаження (рис. 1.3):

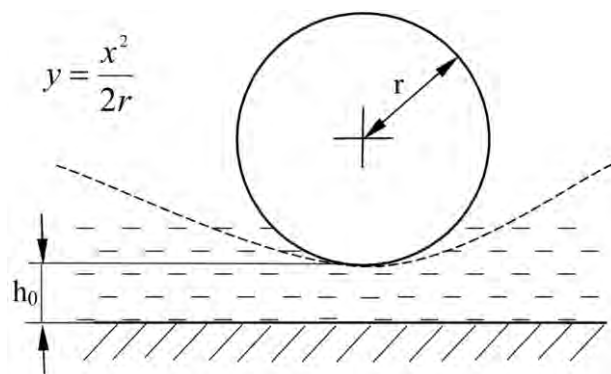


Рисунок 1.3 – Пружнодинамічний контакт циліндра з площиною [13]

Обґрунтованість експонентної залежності підтверджується значним збільшенням в'язкості зі збільшенням тиску. Наприклад, при тиску за Герцем 1 ГН/м^2 в'язкість мінеральної оливи зростає в 10 разів у порівнянні з її значенням при атмосферному тиску.

Розв'язання задачі ЕГД-режиму полягає у відшуванні функцій $p(x)$, $h(x)$ ітераційним методом. У спрощеному описі ітераційний метод полягає в наступному. Задаючи початковий розподіл товщини плівки, що підставляється в рівняння Рейнольдса, знаходять розподіл тиску. Він у свою чергу підставляється в рівняння пружності, що дозволяє оцінити пружні переміщення, які порівнюються з початковим розподілом товщини плівки. Ітерації продовжуються до досягнення достатнього ступеня збігу двох послідовних розподілів товщини плівки.

Вплив викликаних тертям температур на в'язкість оливи призводить до зниження товщини плівки. Отже, в ЕГД-режимі не можна знехтувати впливом шорсткості поверхні і можливістю контактів нерівностей. Урахування цих явищ призводить до поняття часткового ЕГД-режиму або змішаного режиму мащення.

1.1.3 Режим змішаного мащення. Якщо режим гідродинамічного мащення стає неможливим, поява граничного мащення часто супроводжується змішаним режимом мащення, коли виникає частковий контакт виступаючих вершин мікронерівностей при наявності відносно

великої кількості їх в западинах. В цих умовах одні ділянки поверхні контактуючих тіл розділені гідродинамічним шаром, а другі граничним. При змішаному мащенні велике значення мають як об'ємна характеристика змащувального матеріалу – його в'язкість, так і здатність змащувального матеріалу утворювати на поверхнях тертя міцні граничні шари. Звичайно, чим триваліший період гідродинамічного режиму мащення, тим коефіцієнт тертя при змішаному мащенні нижче.

Просте і витончене пояснення режиму змішаного мащення засноване на припущенні, що повне прикладене навантаження сприймається частково гідродинамічною дією плівки рідини і частково контактами нерівностей. Отже, повна сила тертя складається з в'язкого тертя рідини і тертя в контактах нерівностей [13].

Якщо кількість змащувального матеріалу така, що окрім витрати на утворення граничної плівки є його надмірна кількість, яка у вигляді рідини частково заповнює западини, то вони служать резервуаром для відновлення зношувальної граничної плівки. Зі збільшенням кількості оливи до необхідного для утворення гідродинамічного ефекту на мікроклінах шорсткості сполучених тіл граничне мащення переходить в режим змішаного мащення. Цей режим поза залежністю від швидкості і в'язкості і властивий кожній трибосистемі при наявності достатньої кількості змащувального матеріалу.

Процеси, що виникають при змішаному мащенні, дуже складні, так як усі види тертя побічно впливають один на одного, приймаючи участь у створенні підйомної сили, а деякі з них впливають безпосередньо, наприклад, на еласто-гідродинамічні плівки.

Змішаний стан гідродинамічного і граничного мащення можливий в двох варіантах:

- якщо поверхні тертя не мають відхилень від заданої геометрії внаслідок перекосів, деформацій, хвилястості і т. п. і контактують по усій

номінальній площині. Тоді контакт між поверхнями здійснюється по вершинах нерівностей (звичайно більш-менш рівномірно розподілених по площині), що виступають з шару оливи;

– якщо поверхні тертя мають відхилення від заданої геометричної форми, в результаті чого граничне мащення зосереджене на порівняно великих виступаючих ділянках поверхні. Ці ділянки сприймають основне навантаження і внаслідок цього вони пружно деформовані та термічно напружені. В той же час на іншій частині поверхні може мати місце гідродинамічне мащення.

В обох випадках частка гідродинамічного мащення збільшується в результаті припрацьовування, яке відбувається при ковзанні поверхонь.

1.1.4 Граничний режим мащення. Якщо змащувальна плівка на поверхнях тертя достатньо товста, так що розділенні нею поверхні, по суті, не торкаються одна до одної, то коефіцієнт тертя відповідає умовам гідродинамічного режиму мащення і залежить в основному від в'язкості. В цих умовах специфічна природа поверхонь твердих тіл не виявляється і закон Амонтона не діє. По мірі збільшення навантаження і зменшення в'язкості, або зниження відносної швидкості руху плівка між двома поверхнями стає тоншою і контакт між ними збільшується. При цьому товщина плівки може зменшитись до такої величини, коли закони гідродинаміки не діють і впливом поверхневих або граничних сил вже неможливо знехтувати. При подальшому зменшенні товщини плівки настає момент, коли поверхні деталей тертя приходять до зіткнення.

Між гідродинамічним і граничним режимами мащення немає різкого переходу, але існує проміжний перехід, в якому проявляються обидва види мащення. Цю зону зазвичай називають режимом змішаного мащення.

Під час зміни товщини плівки з переходу від одного режиму мащення до іншого помітної зміни зазнає коефіцієнт тертя. Він збільшується від дуже низьких значень, що відповідають гідродинамічному режиму тертя, до

певної величини, але яка значно менша, ніж коефіцієнт тертя при терті без змащувального матеріалу. Такий тип мащення, де важливу роль відіграє природа поверхневого шару, знаходиться в лівій частині діаграми Штрибека і називається граничним мащенням.

Відповідно до міжнародного стандарту ISO 4348/3 і ДСТУ 2823-94 під граничним мащенням розуміється такий вид мащення, якому не можуть бути приписані об'ємні властивості в'язкості змащувального матеріалу і який визначається властивостями граничних шарів, що виникають при взаємодії поверхонь тертя і змащувального матеріалу в результаті фізичної адсорбції або хімічної реакції.

При граничному режимі мащення характеристики тертя і зношування визначаються властивостями матеріалу контактуючих тіл і змащувальними властивостями оливи. Можливість реалізації граничного мащення залежить також від шорсткості поверхонь тертя і характеризується питомою товщиною λ змащувальної плівки, яка представляє собою відношення товщини плівки оливи h між поверхнями тертя до суми середніх квадратичних значень висот мікровиступів шорсткості на цих поверхнях σ [13]:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{\sigma_1^2 \cdot \sigma_2^2}} \quad (1.1)$$

При гідродинамічному режимі $\lambda > 4$, при еластогідродинамічному $\lambda = 3 \dots 4$, при граничному $\lambda < 1$ та при $1 < \lambda < 3$ – режим змішаного мащення.

Можливі дві межі граничного мащення: одна з них відповідає переходу від тертя без мащення до тертя з використанням змащувальних матеріалів; друга – переходу від граничного режиму до еластогідродинамічного.

Механізм дії граничних мащень визначається створенням між тертьовими поверхнями плівки, здатної зменшувати число прямих взаємодій твердих тіл з малим опором зсуву. Найкраще ця задача вирішується за допомогою проміжної плівки з довгих молекулярних ланцюгів.

При граничному мащенні поверхні сполучених тіл розділені шаром змащувального матеріалу товщиною до 0,1 мкм. Коефіцієнт тертя при цьому залежить від наявності в оливі поверхнево-активних речовин та їхньої ефективності. За наявності таких плівок сила тертя знижується у порівнянні з тертям без оливи у кілька разів, а зношування поверхонь тертя зменшується у сотні разів.

1.2 Концепція застосування гідродинамічної теорії мащення в сучасних умовах тертя

Гідродинамічне мащення (ГДМ) – вид змащувальної дії, при якій здійснюється повне розділення поверхонь тертя змащувальним матеріалом під дією тиску, що самовиникає в шарі рідини при відносному русі поверхонь, що обмежують змащувальний шар.

Так як гідродинамічна теорія мащення (ГДТМ) базується на достатньо суворому фундаменті гідромеханіки суцільних середовищ, то цей розділ до певного часу розвивався дуже інтенсивно та в значній мірі самостійно від інших розділів трибології.

Етапи розвитку ГДТМ можна умовно розділити на 5 етапів (хоча воно досить умовне) [14]:

I Етап (1883–1900) – формування класичної гідродинамічної теорії мащення.

II Етап (1900–1925) – врахування ряду факторів ,що відображають умови роботи реальних підшипників.

III Етап (1925–1959) – створення методів розрахунку для вирішення актуальних задач, що пов’язані в основному з важкою (оборонною) технікою.

IV Етап (1950–1975) – розвиток ГДТМ та виділення її різноманітних розділів, які називають «теоріями».

V Етап (1975–2000) – підвищення складності задач, що вирішуються, з одночасним закріпленням етапів у формі стандартизації методів розрахунку, а також створення підручників, довідників і комп’ютерних програм для розрахунку.

Етапи розвитку та коротка історія ГДТМ були представлені О. Пінкусом в статті, що була опублікована в 1988р [5]. А більш детальний опис етапів встановлення та розвитку ГДТМ представлено в обзорі М.К. Ускова та В.А. Максимова, що було опубліковано в 1985р.

1.2.1 Шорсткість поверхні в гідродинамічній теорії мащення.

Стохастичний метод аналізу підшипників кінцевої ширини при наявності поперечної або поздовжньої шорсткості запропонували Крістенсен і Тодер (1971) [16]. Рівняння Рейнольдса, яке вони отримали, представляє стохастичне диференціальне рівняння в частинних похідних з випадковими коефіцієнтами.

Метод багатомасштабних розкладів для аналізу бороздчатої шорсткості на одній з двох поверхонь підшипника запропонував у 1973 році Елрод [17]. У цій роботі передбачається, що шорсткість задовольняє умови «шорсткості Рейнольдса», тобто такої, при якій рівняння Рейнольдса залишається справедливим локально в будь-якій точці. Те, що це припущення залишається справедливим, якщо мікронерівності, що представляють профілі двох поверхонь, є випадковими функціями поздовжньої координати з швидко згасаючим статичним зв'язком, а довжина підшипника велика в порівнянні з лінійним масштабом (довжиною) коефіцієнта кореляції мікронеровностей, показали Чжоу і Сейбел [18].

Опис різних методів теоретичного аналізу підшипників з шорсткими поверхнями є в оглядовій доповіді Уїлкока [19]. Розрахунки, перевірені за різними методами, показують, що якщо шорсткість поверхні, що визначається як різниця максимальної і мінімальної висот нерівностей поверхні, стає менша мінімальної товщини плівки, яка вимірюється між вершинами нерівностей, то вплив шорсткості зникає. Поперечна складова шорсткості на нерухомій поверхні тертя призводить до підвищення несучої спроможності, втрат на тертя і бічного витoku. Поздовжня складова збільшує тертя і витрату в напрямку ковзання, але зменшує бічний витік. Поперечна складова на рухомій поверхні забезпечує додаткове збільшення несучої здатності, котре має бути особливо сприятливо для вузьких підшипників.

Уїлкок показав, що шорсткість поверхні може призводити до зростання ефективної в'язкості змащувального шару, якщо відношення її товщини до шорсткості ~ 100 , а число Рейнольдса вище $\sim 10\,000$, тобто в турбулентному режимі вплив шорсткості може виявитися навіть більше.

1.2.2 Явище кавітації в гідродинамічній теорії мащення. Досліди проведені В.А. Агафоновим у 1962р [20] на підшипниках зі швидкістю до 35м/с, показали, що при швидкості 11–15 м/с в змащувальному шарі утворюються зони розрядження до 200-300 мм. рт. ст., що зі збільшенням швидкості обертів вала – підвищуються. Величина тиску подачі змащувального матеріалу в деяких межах не впливає на довжину змащувального шару. Д. Коул та к. Х'юз встановили це явище при дослідженні формування змащувального шару на прозорих вкладнях (рис.1.4) [14].

В період 60-х років продовжували з'являтися роботи по дослідженню границь змащувального шару, наприклад в роботі А.І. Петрунічева [21].

В 1972р. С.І. Сергєєв запропонував спосіб розрахунку підшипників з не суцільним рідинним мащенням, з визначенням витрат на основі рівняння

Рейнольдса та представлення кавітаційної зони у вигляді однієї каверни. Дослідження явища кавітації запропоноване Пжном та Ібрагімом у 1981 році відносно до коротких підшипників, у тому числі і для підшипників з торцевим підведенням змащувального матеріалу.

Досліджуючи підшипники в яких змащувальний матеріал підводиться з торців («затоплений» підшипник), Етсіон і Людвиг (1983р) [14], виявили зворотні течії, що впливають на області кавітації.

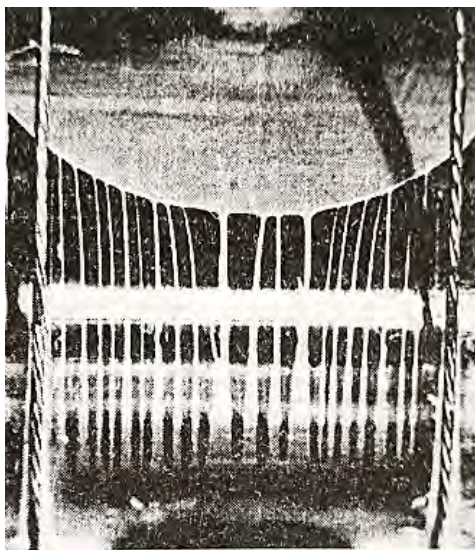


Рисунок 1.4 – Зона кавітаційної течії змащувального шару, отримана на прозорих підшипниках[14]

1.2.3 Підшипники, що працюють в умовах обмеженого мащення.

Оскільки деякі вузли тертя, зокрема підшипники ковзання, можуть працювати в умовах обмеженого мащення, в 60-70-х рр. XX століття почали з'являтися результати дослідження підшипників в умовах обмеженого мащення. О. Пінкус зі співавторами опублікував ряд робіт у цій області [22], де розглядав зміну зон початку й закінчення змащувального шару при зміні витрати змащувального матеріалу, що подається до підшипника, і одержав характеристики підшипників для цих умов.

У роботі І.Я. Токаря, В.І. Дьякова, В.В. Гладкого (1971) [23] ефект недостатнього мащення моделювався зменшенням торцевих витрат змащувального матеріалу, у результаті чого збільшується середня температура змащувального шару, зменшується його мінімальна товщина. Для розрахунку використовувалися характеристики, які отримані для підшипників, що працюють у звичайному режимі, але витрата змащувального матеріалу і розрахунок середніх температур проводиться з використанням емпіричних залежностей.

Пізніше І.Я. Токарем в основу рішення завдань про обмежене мащення був покладений принцип, відповідно до якого несуча частина шару займає таке положення, що втрати тертя мають мінімальне значення. Застосування запропонованого підходу було проілюстровано на сегментному підшипнику, осьових і радіальних підшипниках для неізотермічних умов і стаціонарного режиму. Результати розрахунків по відносному ексцентриситеті й максимальній температурі рівнялися з дослідними даними.

У вісімдесятих роках з'явилося багато робіт з аналізу цього режиму мащення чисельними методами. Зокрема, у роботах Хешмата й Пінкуса, а також Атіллеса (1985–1988 роки) описаний метод аналізу режиму обмеженого мащення в упорному підшипнику кінцевої довжини. Для розрахунку двовимірних полів температури і тиску, які засновані на рішенні рівняння Рейнольдса, використана сітка зі змінним кроком. Встановлено, що вплив обмеженого мащення відносно невеликий при малих ступенях обмеженого мащення, але при ступенях обмеженого мащення більше 50% цей вплив суттєво зростає. Положення початку змащувального шару залежить головним чином від ступеня обмеженого мащення й практично не залежить від геометричних і режимних параметрів або товщини змащувальної плівки. При проведенні аналізу приймалося, що мастильний шар не передає тепло поверхням підшипника.

1.2.4 Розвиток термопружногідродинамічного мащення. Останній етап розвитку для стаціонарних завдань характеризується розвитком термопружногідродинамічного (ТПГД) мащення, що зв'язаний з вирішенням задач гідродинаміки, термопружності та теплопровідності. Для торцевих ущільнень ця задача вирішувалась А.І. Голубєвим і В.А. Коротковим [24].

Пласка неізотермічна задача з урахуванням деформації поверхні до опорного підшипника була вирішена П.П. Усовим, І.А. Тодером та Є.С. Кренделєвим в 1982 році [25], а також М.А. Галаховим, Є.Д. Терентьєвим та П.П. Усовим у 1984 році [26]. На основі проведених досліджень, П.П. Усовим було встановлено, що навантажувальна здатність підшипника істотно залежить від параметра (числа твердості), що характеризує ступінь деформації тіл, і ця залежність має максимум, який створює умови для оптимального проектування. Був зроблений висновок, що при розрахунку важконавантажених гідродинамічних опор ковзання деформованість поверхні тертя й теплові процеси не можна розглядати окремо [14].

Пізніше І.А. Тодером й Є.С. Кренделєвим (1990 – 1993 роки) була розроблена уточнена методика розрахунку підшипника ковзання на базі розв'язання неізотермічної тривимірної задачі з урахуванням деформації по гіпотезі Вінклера, залежності в'язкості змащувального матеріалу від температури та тиску, а також перекосів у підшипниках [27]. На рис. 1.5 наведені графіки навантажувальної здатності, які показують, що нехтування деформаціями дає значну похибку у порівнянні із графіками, у яких враховані деформації та теплові явища, в результаті чого виходить більше близьке узгодження з експериментальними даними.

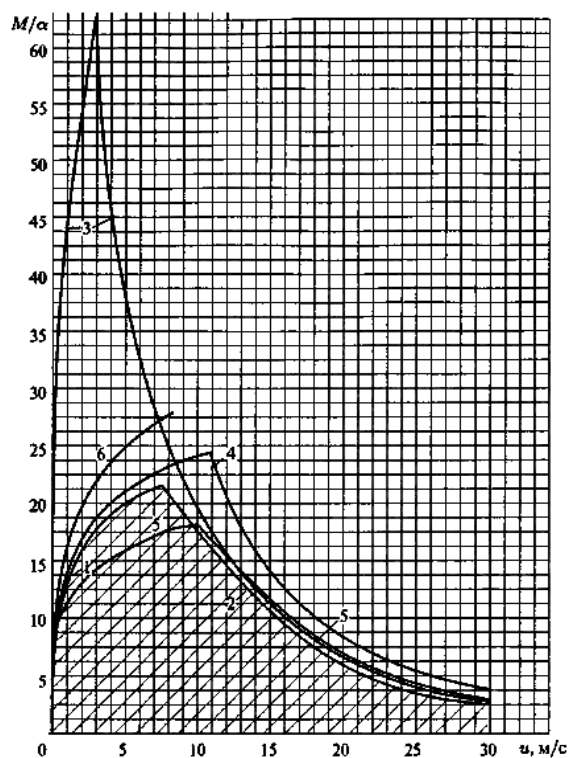


Рисунок 1.5 – Результати розрахунків і експериментів по визначенню навантажувальної здатності підшипника ковзання прокатного стана при різних розрахункових схемах ($L/D = 0,75$) [14]:

1. Розрахункова крива ($h_{min} = h_{кр} = 1-2$ мкм).
2. Розрахункова крива ($T_{max} = T_{кр} = 100^{\circ}C$).
3. Розрахункові криві 1 й 2 при знехтуванні деформаціями.
4. Розрахунковий графік, у якому криві 1 й 2 розраховані при припущенні, що температура вала дорівнює середній температурі в підшипнику T_c .
5. Розрахунковий графік нехтування впливу тиску на в'язкість змащувального матеріалу.
6. Розрахункова крива 1 при рішенні ізотермічної задачі $T = T_c$

Проблемі ТПГД присвячені роботи Дж. Феррона, М. Филона, Дж. Френе і Бонкомпейна (у різному сполученні авторів) (1983 – 1995 роки) [28,29]. У них розглядалося рівняння Рейнольдса для підшипника кінцевої довжини, тривимірне рівняння енергії, тривимірне рівняння для поширення

тепла в підшипнику, двомірне для вала; враховувалася також термопружна деформація вала і підшипника [14].

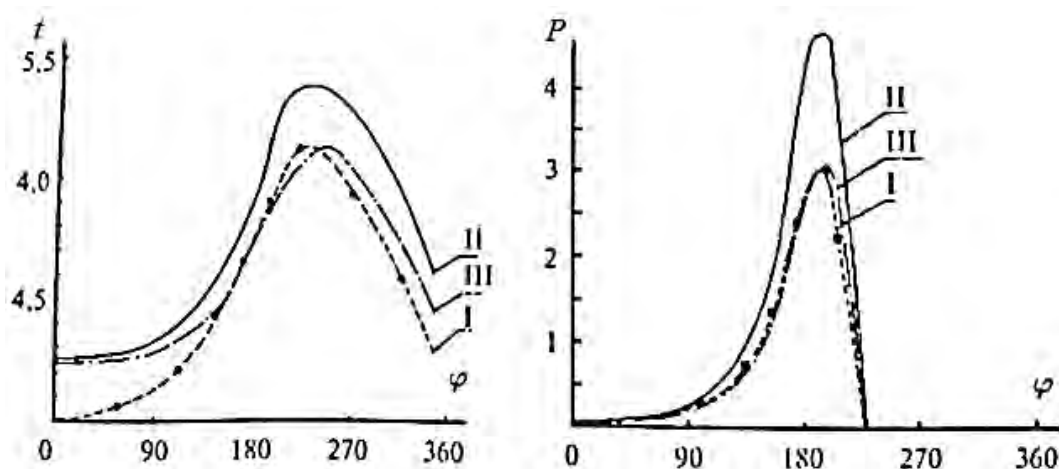


Рисунок 1.6 – Зміна температури (а) і тиску (б) у змащувальному шарі в центральному перерізі підшипника по коловій координаті φ [14]: I - експериментальні дані; II - ТГД дані без обліку деформації; III - результати ТПГД розрахунку

У роботі Ферне зі співавторами [30] було проведено порівняння результатів розрахунків з експериментом по вимірюванню температури та гідродинамічного тиску (рис. 1.6). З результатів ми можемо бачити, що деформація з урахуванням температурних ефектів найбільш наближена до експерименту. Вирішення тільки ТГД задачі не дає якісного наближення до реальних даних.

Виходячи з важче написаного, можемо зробити висновок, що базуючись на послідовному рішенні ТГД, упругогідродинамічних (УГД) та ТПГД для упорних та опорних підшипників ковзання – результат, що добре узгоджується з експериментальними даними, виходить тоді, коли вирішується задача деформації сумісно з ТГД задачею.

Гідродинамічна теорія мащення може бути застосована для вирішення дуже широкого кола завдань в різних областях техніки: від підшипників

ковзання, що застосовуються в двигунах внутрішнього згоряння, опорах турбін, прокатних станів і багатьох інших вузлів тертя, до вирішення завдань при обробці матеріалів тиском; від мащення вузлів тертя ньютонівськими рідинами до мащення мікрополярними рідинами і синовіальною рідиною в суглобах.

Ми можемо очікувати послідовне фіксування досягнень розвитку методів розрахунку вузлів тертя, що працюють в умовах гідродинамічного мащення, як в міжнародних стандартах ISO, так і в державних стандартах України (ДСТУ), за такими напрямками:

1. Високошвидкісні опори проковзування;
2. Підшипники ковзання (як радіальні так і осьові), що працюють в стаціонарному режимі, з урахуванням ТПГД режима мащення;
3. Осьові та радіальні підшипники ковзання з самовстановлюваними подушками (кільцями), з урахуванням теплових потоків (що потрапляють в елементи підшипника), а також змішування змащувального матеріалу, що відбувається в просторі між колодками для осьових підшипників.

Також в подальшому розвиток гідродинамічної теорії мащення та її практичних додатках надалі може проходити по наступним напрямках:

1. Вирішення задач гідродинамічного, змішаного та комбінованого мащення вузлів тертя в машинах, що працюють в перехідних режимах (пуск, зупинка, перехід з режиму на режим), що якнайближче до роботи реальних вузлів тертя в машинах.
2. Розвиток методів, що враховують найновітніші вирішення по конструкції опор ковзання.
3. Розвиток методів розрахунку вузлів тертя, що працюють в умовах змішаного мащення при одночасній дії гідродинамічних властивостей рідини і негідродинамічних поверхневих явищ.

1.3 Концепція застосування еластогідродинамічної теорії мащення в сучасних умовах тертя

Проблема підвищення зносостійкості деталей трибомеханічних систем стає все більш актуальною у зв'язку з безперервним підвищенням швидкісних, навантажувальних і температурних умов у контакті тертя [31]. Олива є найбільш важливим засобом впливу на процеси переносу енергії і матеріалів у трибомеханічних системах, зниження тертя та зменшення зношування. Останнє, мабуть, є важливою обставиною, тому що зношування визначається умовами мащення.

Основні види відмов, що пов'язані зі змащенням, є втомлена довговічність та задир (заїдання, схоплювання). Як явище поверхневої утомленості, утомлена довговічність [32,33] визначається повторними циклічними навантаженнями поверхонь вище межі утомленої витривалості матеріалу. Для його розвитку потрібен деякий час, протягом якого утворюються поверхневі або підповерхневі тріщини і насамкінець – відділення часток металу з утворенням осередку утомленої довговічності на одній або обох поверхнях. Як і всі поверхневі утомлені явища, утомлена довговічність виникає, навіть якщо поверхні повністю розділені мастильним шаром, оскільки його наявність просто пом'якшує інтенсивність циклічних поверхневих напруг, але не виключає їх зовсім. В умовах застосування оливи утомлена довговічність значною мірою залежить від співвідношення товщини мастильного шару і шорсткості поверхонь. Як вказує автор [32], утомлене руйнування елементів підшипників у більшості випадків починається з поверхні, де в результаті контакту вершин нерівностей поверхонь тертя виникають значні дотичні напруження. Опір утомленості поверхневого шару залежить від зредукованих напруг, які є функцією як нормальних, так і дотичних напружень. Звідси випливає, що зі зменшенням товщини мастильного шару

збільшується кількість контактів нерівностей і тривалість їхнього контактування, зростають сили тертя, зредуковані напруги та знижується довговічність. Експериментальні й теоретичні дослідження показали, що зі зміною в'язкості можна змінити контактну витривалість і розвиток утомлених тріщин поверхонь тертя. У роботі [34] було встановлено, що при зміні коефіцієнта тертя з 0,05 до 0,1 і з 0,05 до 0,2, відповідна довговічність зменшувалася в 4,5 і навіть 77 разів.

ЕГД-теорія з'явилася як узагальнення класичної теорії гідродинаміки при обліку умов контакту, що впливають на властивості мастильного матеріалу і деформацію контактуючих деталей. При цьому визначаються форма й товщина мастильного шару та її несуча здатність.

Перші теоретичні дослідження в цій області були виконані авторами [35 – 38], які запропонували відповідні методики розрахунку.

На даний момент ЕГД-теорія тертя вивчається в численних закордонних і вітчизняних теоретичних роботах, а також в експериментальних працях, переважна кількість яких у розглянутій нами ділянці кочення поки ще відносно невелика.

До основних на тему ЕГД-тертя при коченні можна віднести роботи [34, 39-50].

Першими роботами з еластогідродинаміки локального контакту були дослідження, проведені автором [36, 37], який уточнив умови утворення рідинної плівки між поверхнями ковзання і кочення та розподіл тиску в мастильному шарі в цих умовах.

Режими мащення пропонують розглядати за допомогою параметра мастильного шару [51]:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}} \quad (1.2)$$

де h – товщина мастильного шару в контактi тертя; Ra_1, Ra_2 – середньоарифметичне відхилення профілю шорсткості від середньої лінії для кожної поверхні тертя.

На рис. 1.7 показана залежність зміни коефіцієнта тертя f_T від параметра мастильного шару λ . Весь робочий діапазон складається із чотирьох режимів: граничного, змішаного, еластогідродинамічного (ЕГД) і гідродинамічного (рідинного). В умовах змішаного і ЕГД-режиму мащення спостерігається зменшення значень коефіцієнта тертя, а в умовах гідродинамічного мащення – їх збільшення.

Враховуючи те, що шорсткість поверхонь тертя приблизно однакова при всіх режимах мащення, значення коефіцієнта тертя залежатиме від товщини мастильного шару в контактi тертя. У звичайних умовах коефіцієнт тертя визначають за формулою:

$$f = \frac{F}{N} \quad (1.3)$$

де F – сила тертя (тангенціальна складова), Н; N – сила, спрямована по нормалі (нормальна сила), Н.

В умовах гідродинамічного режиму тертя величина нормальної складової сили залежить від товщини мастильного шару $N \approx \frac{1}{h^2}$ [52]. При ЕГД-мащенні нормальна сила має незначний вплив на товщину мастильного шару. Сила тертя в умовах ЕГД- і гідродинамічного режимів мащення залежить від товщини мастильного шару $F \approx \frac{1}{h}$. На підставі викладеного з використанням формули (1.2), можна одержати наступні співвідношення:

$$f_{ГД} \approx h \quad \text{і} \quad f_{ЕГД} \approx \frac{1}{h}; \quad (1.4)$$

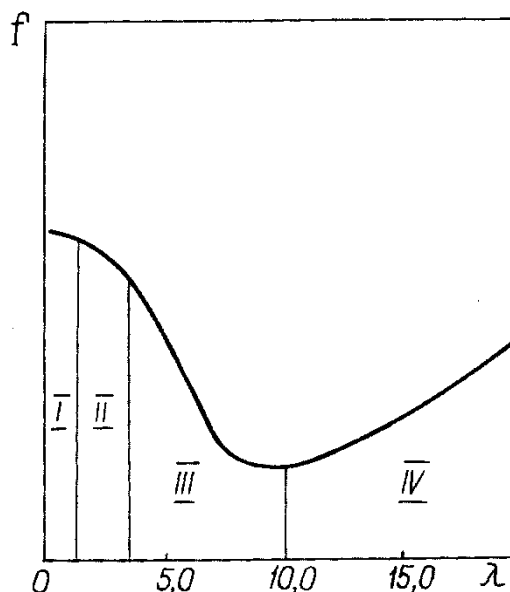


Рисунок 1.7 – Режими мащення деталей трибомеханічних систем:
 I - граничний; II - змішаний; III - еластогідродинамічний;
 IV - гідродинамічний

Таким чином, гідродинамічне мащення утворюється, коли поверхні кочення (кульки, ролики) і доріжки тертя (обойми підшипників) розділені відносно товстим мастильним шаром. Товщина його визначається в'язкістю оливи. У таких умовах забезпечується низьке тертя та високий опір зношуванню. Це пояснюється тим, що товщина мастильного шару в контакті тертя у багато разів перевищує шорсткість поверхонь тертя, величина якої перевищує 10^{-6} м, а параметр мастильного шару змінюється в межах $10 \leq \lambda < 100$.

ЕГД-мащення є, по суті, гідродинамічним з урахуванням пружних деформацій поверхонь тертя та зміни в'язкості під дією тиску. Товщина мастильного шару значно менша, ніж при гідродинамічному мащенні, і становить $10^{-7} \leq h \leq 10^{-6}$ м. Параметр мастильного шару змінюється в межах $3 \leq \lambda < 10$.

Для граничного мащення характерна взаємодія граничних шарів оливи та окремих ділянок шорсткості поверхонь тертя. Мащення контакту тертя в цих умовах визначається фізичними і хімічними властивостями поверхонь та мастильного середовища. Параметр мастильного шару $\lambda < 1$.

Для змішаного режиму мащення характерна сукупність одночасно діючих гідродинамічних (рідинних), ЕГД- і граничних ефектів, тобто мають місце як об'ємні властивості оливи (в'язкість, густина тощо), так і фізико-хімічні взаємодії граничних (адсорбційних, хемосорбційних та хімічно модифікованих) мастильних шарів і поверхонь тертя. Товщина мастильного шару в цьому режимі мащення змінюється в межах $10^{-8} < h < 10^{-6}$ м, а значення λ , $1 < \lambda < 4$.

1.3.1 Шорсткість поверхні в еластогідродинамічній теорії мащення. У більшості теоретичних робіт, присвячених визначенню основних властивостей ЕГД змащувального шару, викладено припущення про ідеальну гладкість контактуючих поверхонь. Тому в експериментальних дослідженнях, спрямованих на підтвердження теоретичних даних, використовувалася мінімально можлива шорсткість відносно товщини мастильного шару або радіусу кривини контактуючих поверхонь.

Реальні поверхні тертя завжди мають шорсткість, а товщина ЕГД-шару мащення дорівнює висоті мікронерівностей взаємодіючих поверхонь.

Шорсткість поверхонь тертя деталей машин може в певних межах саморегулюватися. Поверхні з високою початковою шорсткістю вигладжуються і набувають так званої експлуатаційної рівноважної шорсткості [21], яка зберігається протягом іншого періоду роботи, аж до початку руйнування поверхні. Поверхні тертя з мінімальною шорсткістю після деякого періоду роботи набувають підвищеної експлуатаційної шорсткості, але її рівень за інших однакових умов, як правило, нижчий, ніж експлуатаційної шорсткості, одержаної у першому випадку.

Рівень шорсткості поверхонь впливає на характер тертя навіть при рясному мащенні. Це відображено в роботі [53], в якій показано, що якщо порівнювати товщину мастильного шару між робочими поверхнями із сумою квадратичних характеристик нерівностей обох поверхонь, то лише при чотирикратному перевищенні товщини мастильного шару над величиною зредукованої шорсткості можна чекати практично повного рідинного тертя (відзначимо, що для забезпечення повного ЕГД-мастильного шару досить трикратного збільшення товщини над шорсткістю).

При рівних величинах товщини мастильного шару і зредукованої шорсткості поверхонь рідинне тертя може виникати тільки в короткі проміжки часу, загальна тривалість яких становить близько 0,2 % усього робочого часу. При двократному співвідношенні зазначених величин рідинне тертя має місце протягом 55 %, при трикратному – 90 %, а при чотирикратному протягом 99,5 % усього робочого часу [34].

Слід зазначити, що поліпшення якості виготовлення підшипників, зубчастих передач тощо, насамперед шляхом підвищення класу і розряду чистоти поверхні впливає на довговічність деталей трибомеханічних систем і на параметр мастильного шару λ .

Параметр λ важливий не тільки для встановлення критеріїв прогнозування довговічності деталей, він також може використовуватися в описі зміни повного ЕГД-мащення, змішаним, а потім граничним мащенням.

1.3.2 Задири та тиск в еластогідродинамічній теорії мащення.

Задир (заїдання) – ще один із видів ушкодження поверхонь тертя, який є результатом сильного адгезійного зношування, яке не виникає, якщо поверхні розділені мастильним шаром достатньої товщини. На відміну від утомленої довговічності, яка поступово розвивається в часі, задир може

розвиватися стрімко, збільшуючи схильність поверхонь тертя до заїдання [43 – 45].

Для забезпечення повного ЕГД-мастильного шару робочі умови варто вибирати так, щоб у заданій системі співвідношення λ (за формулою 1.2) дорівнювало трьом (правило трьох сигм). Як вказується в роботі [57], відмова систем з повним ЕГД-мастильним шаром настає, коли виконуються:

- 1) необхідна умова розриву ЕГД-мастильного шару;
- 2) додаткова умова розриву поверхневих шарів.

Необхідність забезпечення повноцінних умов рідинного мащення з метою уникнення зношування поверхонь тертя спонукало до проведення дослідження з позицій дотримання необхідної умови розриву ЕГД-мастильного шару. Що ж стосується додаткової умови розриву поверхневих шарів, то її вивченню присвячена багато робіт [58 – 62].

Важливе значення в технології мащення навантажених деталей мають умови утворення ЕГД-мастильного шару, при яких тиск істотно впливає на деформації контактуючих тіл, тобто на форму мастильного шару і в'язкість мастильного матеріалу. Зміни пружних деформацій і в'язкості зі збільшенням тиску дозволяють застосувати гідродинамічну теорію до пояснення механізму мащення підшипників кочення, зубчастих передач тощо, де має місце зосереджений контакт тертя.

При вивченні умов утворення ЕГД-мастильного шару в точковому контакті кулі із площиною значну роль відіграли роботи [63–65], в яких розроблені нові оптичні методи дослідження для цього випадку. При порівнянні результатів вимірювань з вимірюваннями, проведеними іншими методами, а також із результатами розрахунків, виконаними авторами [40, 41, 47–50], було отримано безпосереднє підтвердження існування мастильної гідродинамічної плівки при "точковому" контакті деталей трибомеханічних систем.

Було встановлено, що максимальний тиск у центральній частині мало відрізняється від розрахованого по Герцу, але на виході утворюється різкий пік тиску, що іноді значно перевищує тиск у центральній частині контакту. Існування цього піку підтверджено в [66 – 68], експериментально в [69, 70] тощо. Було встановлено, що утворення піку тиску на виході з контакту спричинило різке зменшення нормальної деформації на виході із контакту у зв'язку з відсутністю "підтримуючого" тиску за межами контакту. Причому даний пік створює різко виражену концентрацію напруг у поверхнях тертя, що позначається на виникненні та характері розвитку утомлених тріщин.

1.3.3 Вплив обмеженого мащення на утворення еластогідродинамічного змащувального шару. Сучасний стан ЕГД-мащення показує, що процес утворення ЕГД-мастильного шару вивчений досить добре, і товщини таких шарів можуть бути розраховані з великою точністю. У цей час проводяться дослідження окремих питань еластогідродинаміки і пошуки пояснення розбіжностей між теорією та експериментом. Значна увага приділена застосуванню принципів еластогідродинаміки до встановлення найбільш сприятливих умов роботи елементів машин.

Однак на практиці умови роботи часто далекі від ідеальних, які передбачаються в більшості теоретичних та експериментальних дослідженнях. Нерідко ігнорується важливий практичний фактор, а саме подача й розподіл оливи в межах контакту. Режим мастильного голодування, що часто існує на практиці (наприклад, при змащуванні мастильним туманом [33]), але не завжди передбачений у теорії, може вплинути на товщину мастильного шару – основну характеристику ЕГД-контакту, що визначає мастильну здатність мастильних матеріалів, і таким чином на зносостійкість поверхонь тертя.

Серед перших явище обмеженого мащення було досліджено в роботі [45]. Автор [60] назвав це явище «плівковим» голодуванням. У результаті

досліджень, представлених в [71], встановлено, що на практиці у режимі мастильного голодування товщина мастильного шару зменшувалася у випадку чистого кочення до величини не меншої 70 % товщини при рясному мащенні, а при чистому ковзанні – до 48 %.

Автор [32] у мастильному голодуванні вважав головним зниження опору коченню після деякого максимуму. Причини обмеженої подачі були виражені скиданням оливи відцентровими силами, і частково – зниженням в'язкості оливи у зв'язку з підвищенням температури в мастильному шарі оливи. З'ясувалося, що в результаті мастильного голодування оливи і зменшення товщини мастильного шару рідинне тертя плавно переходило в змішане, а потім у граничне з відповідним зниженням опору коченню. Крім того, було встановлено, що мастильне голодування знижує тепловідведення і цим підсилює збільшення температури в зоні контакту, що також сприяє зниженню в'язкості оливи.

Значний внесок у вивчення цього явища зробили праці автора [72, 73], який з використанням інтерференційного методу вимірювання тонких мастильних шарів одержав достовірну картину розвитку цього процесу, що дозволило обґрунтовано підійти до дослідження механізму мастильного голодування.

1.3.4 Розвиток мікроконтактної гідродинамічної теорії змащення.

При збільшенні кількості оливи, що потрапляє в зону тертя, процес кочення та пов'язаний з ним процес мікроковзання на шорсткуватій поверхні контакту відбувається в основному в умовах граничного тертя, але вже утворюються окремі дискретні ділянки рідинного тертя. При цьому створюються нові умови для розподілу в районі контакту, які повинні визначатися, за пропозицією автора [74], на основі так званої мікроконтактно-гідродинамічної (МКГД) теорії мащення.

Поява МКГД (змішаного) режиму мащення обумовлена тим, що на поверхнях тертя, залежно від ступеня їхнього зближення, на різних ділянках контакту може виникати граничне або рідинне тертя.

Піднімальна сила рідинного тертя виникає в звуженому контакті і, залежно від умов тертя, може виникати гідродинамічне або ЕГД-тертя. Ця сила може виникати у мікроклинах (рис. 1.8, *а*), утворених мікронерівностями поверхонь тертя. У зоні контакту мікронерівностей (рис. 1.8, *б*) може виникати сухе тертя, під час якого можна виділити зони тертя оголених при зсуві чистих ювенільних металевих поверхонь (1), шарів окислів і адсорбованих плівок (2). Навколо зон сухого тертя виникає граничне тертя в адсорбованих молекулярних шарах мастильного матеріалу.

Процеси при змішаному терті дуже складні, тому що всі види тертя побічно впливають один на одного, беручи участь у створенні піднімальної сили, а деякі з них мають взаємний вплив, як, наприклад, ЕГД- і МEGД-плівки.

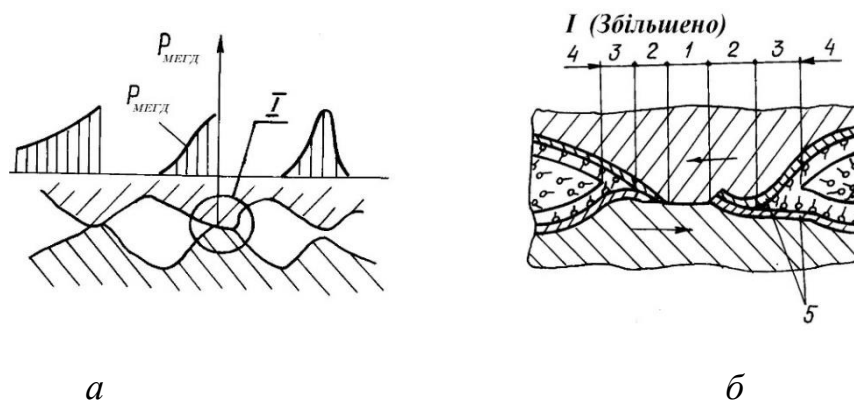


Рисунок 1.8 – Модель змішаного тертя: *а* – гідродинамічні мікроклини між нерівностями та розподіл тиску; *б* – види тертя між нерівностями поверхонь: 1 - фізично сухе; 2 - технічно сухе; 3 - граничне; 4 - рідинне; 5 - шар окислів і адсорбованих плівок

Змішане тертя зустрічається досить часто, особливо при пуску і зупинці машин, а також у тихохідних вузлах, у яких неможливе виникнення рідинного тертя.

Протягом багатьох років проводяться дослідження змішаного тертя, у результаті яких створено ряд моделей, деякі з них представлені в роботах [75 – 77]. Однак ці моделі мало реалістичні, оскільки не враховують усіх явищ, і тому майже не придатні до використання в інженерній практиці. Головними труднощами, на наш погляд, є недостатність знань, особливо про явища, що відбуваються в мікронах контакту в умовах МEGД-тертя.

В умовах EГД-режиму час проходження мастильного матеріалу через зону контакту дуже малий, до того ж процес супроводжується великими змінами градієнтів тиску, температури, напружень і швидкості зсуву. При такому режимі тертя навіть мастильні матеріали мінерального походження, що традиційно вважаються ньютонівськими, можуть показувати відхилення від цієї моделі. Одночасно з різних причин широкого застосування набувають синтетичні мастильні матеріали, які значно відрізняються від моделі ньютонівської рідини, проявляючи ознаки пружнов'язкої рідини з нелінійною залежністю від швидкості зсуву.

Неньютонівська рідина характеризується тим, що напруга зсуву між шарами не пов'язана прямо пропорційно зі швидкістю зсуву. Також може характеризуватися граничною напругою зсуву і залежати, крім градієнта швидкості в потоці оливи, від температури, тиску тощо.

На думку автора [34], реологічна поведінка рідин, і в тому числі олив, значною мірою залежить від частоти навантажень, тому що при короткочасних, але високочастотних навантаженнях, що відповідають, наприклад, підшипникам кочення, обмірювана в зоні тиску рідина не встигає релаксувати і набувати вхідних властивостей.

Однак, інші джерела [78] показують, що в умовах високого контактного тиску олива взагалі втрачає ньютонівські властивості незалежно від циклічності навантажень.

У роботі [23] відзначено, що при розрахунку товщини мастильного шару неньютонівські властивості оливи майже не впливають на результати розрахунку. Тільки іноді, для деяких видів олив або при надмірних тисках і швидкостях відчутний вплив в'язкопружності на товщину мастильного шару. Неньютонівські властивості, що впливають на нормальні й дотичні напруження, істотно впливають на силу тертя і мало впливають на товщину мастильного шару.

Таким чином, бувають випадки, коли деякі оливи, що у звичайних умовах діють за законами ньютонівської рідини, в окремих випадках, зокрема в швидкісних, високо навантажувальних і високо температурних умовах, можуть поводитися як неньютонівські рідини, спотворюючи результати, отримані теоретично. При цьому змінюються товщини мастильних шарів між притирними деталями. Отже, варто провести більш ретельні експериментальні дослідження для підтвердження обґрунтованості прояву в'язкопружних властивостей мастильних матеріалів у деяких діапазонах робочих умов.

Аналіз показав, що вивчаючи механізм мастильної дії мастильних матеріалів ми повинні базуватись на позиціях дотримання необхідних умов розриву ЕГД-мастильного шару в режимі рясного мащення і мастильного голодування, тому що це дозволить не тільки довести існування на деяких режимах кочення деталей стійкого рідинного тертя в умовах локального (точкового або еліптичного) контакту, але також визначати для ряду випадків форму й розміри мастильного шару, а також його несучу здатність із урахуванням впливу зовнішніх факторів і особливих умов мащення.

Висновки до розділу 1:

1. Розвиток гідродинамічної теорії мащення суттєво вплинув на подальше створення наближених методів розрахунку вузлів тертя машин при виконанні досліджень з реалізацією реальних граничних умов мащення та враховуючи теплові ефекти, які відбуваються в контакті тертя.

2. Дослідження умов утворення ЕГД-плівки мастильного матеріалу, при яких тиск істотно впливає на деформації контактуючих тіл, тобто на форму мастильного шару і на в'язкість мастильного матеріалу для сучасної техніки має велике значення при змащуванні навантажених неконформних вузлів тертя.

3. Товщина мастильного шару є основною ЕГД – характеристикою мастильної дії змащувальних матеріалів. Завдяки вивченню її поведінки є можливість встановити режим мащення від гідродинамічного до граничного (від рясного мащення до обмеженого мащення), а також структуру мастильного шару та умови змін даних режимів.

4. Застосування різного виду випробувальної техніки в поєднанні з розрахунково-експериментальними методами визначення температури в елементах пари тертя і змащувальному матеріалі з урахуванням масштабного фактора при моделюванні тертя і зношування, а також критеріїв порівняння результатів експериментів дозволяє істотно скоротити терміни проектування вузлів тертя та в рази зменшити збільшити їх довговічність та надійність.

РОЗДІЛ 2

ОСНОВНІ МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ

Можливості методів та засобів експериментальних досліджень і установок попередніх поколінь значно відстають від сучасних вимог, особливо, до методів досліджень, що суттєво ускладнює процес обробки і визначення основних експериментальних показників.

Так в експериментальних установках попередніх років, одним із параметрів які визначалися, був момент сил тертя, який реєструвався в основному за допомогою досить складних механічних приладів із вторинною апаратурою. Наприклад, знайшла застосування — гідравлічна месдоза, що перетворювала зміни сили (тангенціального навантаження) в тиск у замкненій системі. Під впливом цього тиску за допомогою трубки Бурдона (основного робочого елемента манометрів) пропорційно тиску реалізовувалося випрямлення (переміщення) трубки, пов'язаної з пером самописного приладу. Кожне являло собою капіляр, по якому чорнило подавалося на поверхню паперу. У кінці цього періоду вперше в Інституті машинознавства, були застосовані методи тензометрії. Ці методи дозволили широко використовувати тензодинамометричні динамометри.

Досвід застосування такого роду приладів для вимірювання механічних величин електричними методами був описаний А.М. Туричином [79], В цей час значна увага приділялася дослідженню причин і аналітичній оцінці похибки вимірів різними методами та приладами [80].

При випробуваннях на тертя та зношування використовувалися термопари для оцінки теплового режиму вузла тертя. Однак, методи оцінки впливу інерційності цих приладів на результати виміру температури з'явилися пізніше.

З іменами дослідників Е.С. Берковича, П.Е. Дьяченко та М.М. Хрущова пов'язане створення, приладів і методу для виміру мікротвердості на поверхнях елементів пари тертя. Це дозволило перейти до обґрунтованої інтерпретації природи контактування твердих тіл.

Основним підсумком щодо використання машин тертя є визнання необхідності проведення випробувань, розвитку та обґрунтування методів випробування, проведення спеціальних трибологічних досліджень.

Сучасне обладнання для проведення досліджень на тертя та зношування має високу точність та удосконалений рівень обробки отриманих результатів наукових досліджень.

2.1 Вимірювання об'ємного зносу в трибомеханічних системах.

Різні стандарти (наприклад стандарт ASTM) визначають величину зносу, вимірюючи відповідний лінійний розмір обох зразків (кульки і диска) до і після дослідження.

Стандартна схема установки куля-диск показана на рис. 2.1 з параметрами, необхідними для обчислення зносу [81].

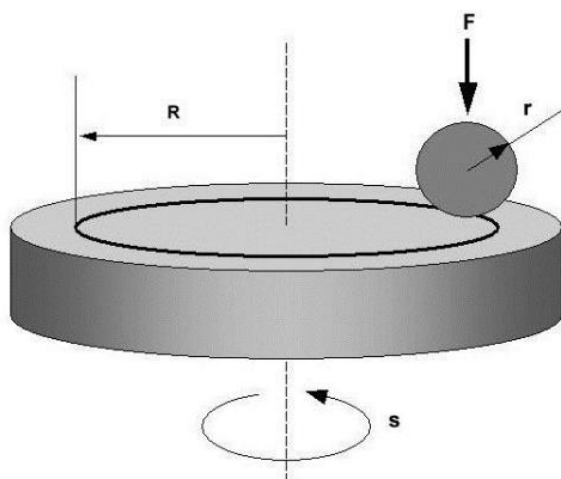


Рисунок 2.1 – Схема установки куля-диск, де: F – нормальне навантаження на кульку, r – діаметр кульки, R – радіус сліду зносу; s – число обертів диска

Залежно від матеріалів пари тертя по різному відбувається процес зносу. Існує 3 можливих ситуації для різної зносостійкості зразків: кульки і плоского диска. Приклади зносу показані на рис. 2.2, які наведено нижче.

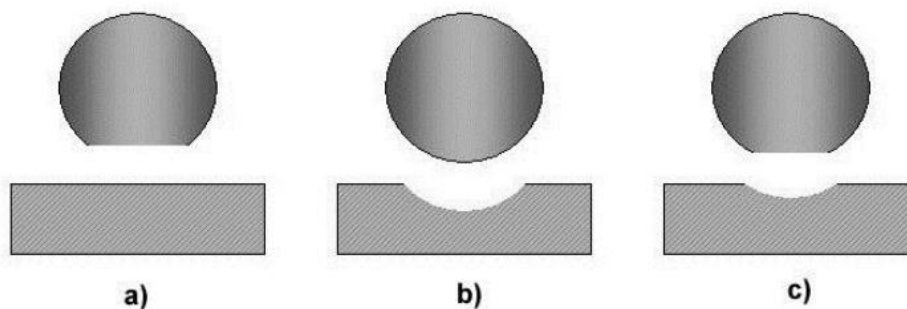


Рисунок 2.2 – а) тільки знос кульки, б) тільки знос диска, с) знос кульки і диска

Щоб розрахувати об'ємний знос зразка і контртіла (кульки), потрібно виконати кілька додаткових вимірів зразка і контртіла.

На практиці втрата матеріалу може бути визначена з використанням профілометра по сліду зношування. Варіації навколо сліду зношування можуть бути викликані деформацією частинок зношування або пластику. Таким чином, має бути отримано достатню кількість результатів, щоб досягти задовільного значення. Більшість встановленого на сучасні трибометри профілометричного програмного забезпечення може легко обчислити площу сліду.

За умови, що знос кульки або штифта не суттєвий, знос диска (V_{disk}) визначається за формулою 2.1:

$$V_{\text{disk}} = 2\pi R \left[r^2 \sin^{-1} \left(\frac{d}{2r} \right) - \left(\frac{d}{4} \right) \cdot (4r^2 - d^2)^{1/2} \right], \quad (2.1)$$

де R – радіусу сліду зношування; d – ширина сліду зношування

Програмне забезпечення трибометра може обчислювати знос, перемножаючи профіль зони на значення окружності сліду зношування для визначення загального об'єму зносу диска.

Профіль сліду зносу може надати важливу інформацію про механізм зношування системи. Так, наприклад, профілі, що отримані з двох різних зразків з покриттям, показують різну шорсткість. Звідси можна зробити висновок, що частинки зняті з поверхні відрізняються у різних зразків.

З використанням трибометра CSM Instruments SA та його програмного забезпечення можуть бути отримані наступні результати:

- за умови, що знос диска є несуттєвим, втрата об'єму кульки (або штифта зі сферичним торцем) визначається за формулою:

$$V_{Ball} = \left(\frac{\pi h}{6} \right) \left[\frac{3d^2}{4 + h^2} \right], \quad (2.2)$$

де $h = \left[r^2 - \frac{d^2}{4} \right]^{\frac{1}{2}}$, величина матеріалу, який було видалено; d – діаметр

кульки; r – радіус кульки

За допомогою програмного забезпечення розраховується знос кульки.

При випробуванні сипучих матеріалів можливо виконати такі вимірювання:

1. Сила тертя і коефіцієнт тертя безпосередньо записуються і наносяться на графік за допомогою приладу.

2. Знос диска може бути визначений шляхом вимірювання зони сліду зносу профілю, а швидкість зношування диска визначається за допомогою програмного забезпечення.

3. Знос кульки може бути визначений вимірюванням діаметра зносу плоскої поверхні на кульці при використанні мікроскопу (рис. 2.2).

При випробуванні зразків з покриттям, крім перерахованих вище параметрів, можна визначати також час зносу покриття – це кількість

виконаних обертів або метрів до пошкодження поверхні. Час зносу не може бути обчислено на частково зношених покриттях.

Швидкість зносу диска. Швидкість зносу диска (w_d) визначається з використанням об'ємного зносу (V), і розраховується за допомогою програмного забезпечення трибометра. Виходячи з цього швидкість зносу може бути розрахована за наступною формулою:

$$w^d = \frac{V}{F_n l}, \quad (2.3)$$

Швидкість зносу кульки. Знос кульки визначається за формулою (2.3) шляхом вимірювання діаметра сферичного зносу кульки при використанні мікроскопу (рис. 2.3).

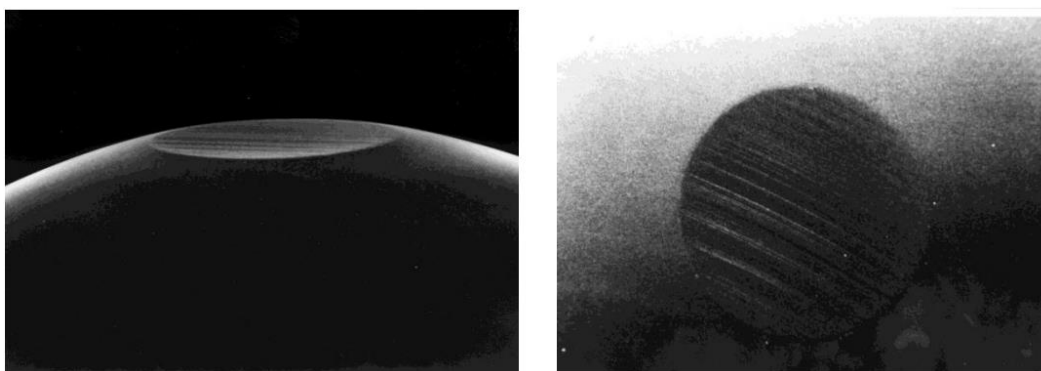


Рисунок 2.3 – Зона зносу кульки [81]

Відмінності в характеристиках зносу можуть забезпечити цінні результати про те, як матеріал буде вести себе в реальному застосуванні.

2.2 Вимірювання реологічних та триботехнічних характеристик методом оптичної інтерферометрії

2.2.1 Загальні відомості про метод оптичної інтерференції та його сутність. В основу інтерференції світла входить один з головних її проявів, який полягає в послабленні або посиленні інтенсивності

взаємнопроникаючих світлових хвиль. Принципи методу оптичної інтерферометрії, в основі якого лежить явище інтерференції світла, обговорюються в багатьох джерелах, які присвячені питанням оптики [82].

Для деталізації даного методу розглянемо плоскопаралельну прозору плівку товщиною h (рис.2.4), яка є тонким мастильним шаром мастильного матеріалу з показником заломлення n_m . По обидві сторони від плівки знаходяться фрагмент скляного диска з показником заломлення n_c і поверхня сталеві кульки. Причому $n_c > n_m$, оскільки матеріал скла щільніший, що позначається на показнику заломлення середовища.

Промінь монохроматичного світла ($\lambda = 546 \pm 10\text{нм}$), падаючи на плоску поверхню скляного диска проходить через нього і частково відображається, потім частково проходить через шар мастильного матеріалу і знову частково відображається, і нарешті, відображається від поверхні кульки. Причому, останнім відображенням променем, інтенсивність якого дуже мала ($\approx 2,5\%$), можна знехтувати. Два відображені промені BF і EF' когерентні.

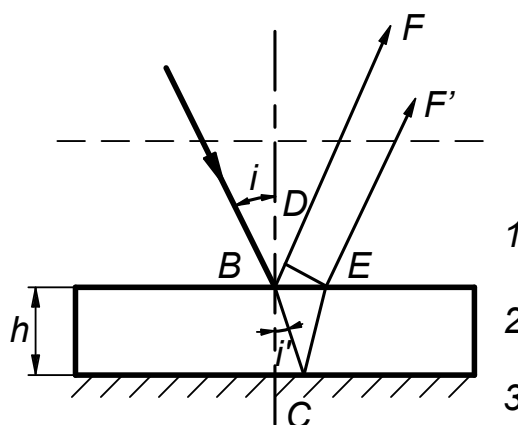


Рисунок 2.4 – Падаючі і відображені промені. 1 - плоска поверхня скляного диска; 2 - плівка мастильного матеріалу; 3 - поверхня кульки

Результат їх інтерференції залежить від різниці фаз $\Delta\psi$ коливань, які збуджуються цими хвилями відповідно в точках D і E площини DE, яка

проведена перпендикулярно промінню BF і EF'. Коливання, що викликані в точці E хвилею, яка відображається від нижньої поверхні плівки, відстають по фазі від коливань в точці B на величину:

$$\Delta\Psi_1 = \frac{2\pi \cdot (|BC| + |CE|)}{\lambda_m} + \pi, \quad (2.4)$$

де λ_m - довжина хвилі світла в плівці мастильного матеріалу.

По аналогії, відставання по фазі коливань в точці D, що викликані хвилею, яка відображається від верхньої поверхні плівки, дорівнює:

$$\Delta\Psi_2 = 2\pi \cdot |BD| \cdot \lambda_c, \quad (2.5)$$

де λ_c - довжина хвилі світла в площині скла.

Зсув по фазі на π при віддзеркаленні еквівалентний додатковому шляху світла в плівці оливи, що дорівнює $\lambda_m/2$. В результаті два промені зводяться, інтерферуючи у фокальній площині за допомогою об'єктиву. Результатом інтерференції є різниця ходу S променів:

$$S = 2n_m \cdot h \cdot \cos i' - \frac{\lambda}{2}, \quad (2.6)$$

де $\lambda = \lambda_m \cdot n_m$ - довжина хвилі світла тієї ж частоти, що розповсюджується у вакуумі; i' - кут заломлення в плівці мастильного матеріалу.

Результат інтерференції у відображеному від плівки світлі, залежить від числових значень h , i' , n_m і λ . Для максимуму віддзеркалення, коли:

$$S = m \cdot \lambda, \quad (2.7)$$

де m - будь-яке ціле число, рівняння (2.4) прийме вигляд:

$$2n_m \cdot h \cdot \cos i' = (2m + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}. \quad (2.8)$$

Отже, для мінімуму віддзеркалення, коли:

$$S = (2m - 1) \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (2.9)$$

справедлива рівність:

$$2n_m \cdot h \cdot \cos i' = m \cdot \lambda.$$

Зважаючи на симетричне положення плівки мастильного матеріалу щодо точки дотику А кульки з площиною (рис. 2.5), інтерференційна картина прийме вид концентричних кілець (поперемінно світлих і темних кілець для монохроматичного світла). Паралельний пучок світла падає під прямим кутом (тобто $i'=0^\circ$) на плоску поверхню скляного диска і, частково відображається від верхньої і нижньої поверхні плівки мастильного матеріалу між диском і кулькою, радіусом R кривизни. При накладенні відображених хвиль виникають інтерференційні кільця рівної товщини. Оптична різниця ходу S між промінням, яке відображається від верхньої і нижньої поверхні плівки мастильного матеріалу, матиме наступний вигляд:

$$S = 2h \cdot n_m + \frac{\lambda}{2} \quad (2.10)$$

Причому $\frac{\lambda}{2}$ обумовлений зсувом по фазі на π при віддзеркаленні світла від поверхні скляного диска.

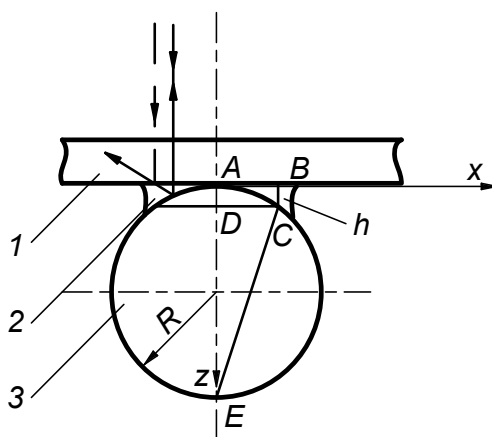


Рисунок 2.5 – Схема взаємодії контактуючих тіл куля – площина
1 – скляний диск; 2 – мастильний матеріал; 3 – сталева кулька

Радіус даного інтерференційного кільця позначимо через $r = |DC|$ (див. рис. 2.5). Тоді з трикутника ACE витікає, що:

$$DC^2 = |ED| \cdot |DA|, \quad (2.11)$$

Або

$$r^2 = (2R-h) \cdot h. \quad (2.12)$$

Величиною в дужках можна знехтувати, оскільки величина h дуже мала в порівнянні з $2R$ ($h \ll 2R$) і, тоді одержимо наступний вираз:

$$h = \frac{r^2}{2R} \quad (2.13)$$

Отже, рівняння (2.10) прийме наступну форму:

$$S = \frac{r^2}{R} \cdot n_M + \frac{\lambda}{2} \quad (2.14)$$

Коли оптична різниця ходу по формулі (2.14) дорівнює непарному числу напівхвиль світла, утворюється темне кільце радіусом r_d :

$$\frac{r_d^2}{R} \cdot n_M + \frac{\lambda}{2} = (2m+1) \cdot \frac{\lambda}{2}. \quad (2.15)$$

Звідки одержуємо, що:

$$\frac{r_d^2}{R} \cdot n_M = m \cdot \lambda, \quad (2.16)$$

яке можна зпівставити для мінімуму віддзеркалення. Таким чином, радіус темних кілець r_d задовольняє рівнянню:

$$r_d = \sqrt{\frac{m \cdot R \cdot \lambda}{n_M}}, \quad (2.17)$$

де m - порядковий номер темного кільця ($m = 0, 1, 2, \dots$).

Умову виникнення світлих кілець r_b можна записати у вигляді:

$$\frac{r_b^2}{R} \cdot n_M + \frac{\lambda}{2} = m \cdot \lambda \quad (2.18)$$

Звідки:

$$\frac{r_b^2}{R} \cdot n_M = (2m-1) \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (2.19)$$

і зпівставляємо з максимумом віддзеркалення двох інтерферуючих променів. Радіус світлих кілець r_b в цьому випадку буде дорівнювати:

$$r_b = \sqrt{\frac{R}{n_m} \cdot (2m - 1) \cdot \frac{\lambda}{2}}, \quad (2.20)$$

де m - порядковий номер світлого кільця ($m = 1, 2, 3 \dots$).

2.2.2 Кольорова інтерференція та її особливості. Для отримання чіткої кольорової інтерференційної картини необхідно використання білого джерела світла на відміну від монохроматичного, причому, кожен колір інтерферує при певній довжині хвилі, тоді для певної товщини мастильного шару в контакті тертя відповідатиме свій колір.

Принципова схема інтерференційної системи представлена на рис. 2.6. Щоб покращити видимість, на поверхню скляного диска, методом випаровування у вакуумі, наносять напівпрозоре покриття хрому, завтовшки $170 \text{ \AA}$, що дозволяє забезпечити оптимальну відбивну спроможність порядку 18 % (при поглинальній здатності близько 25 %).

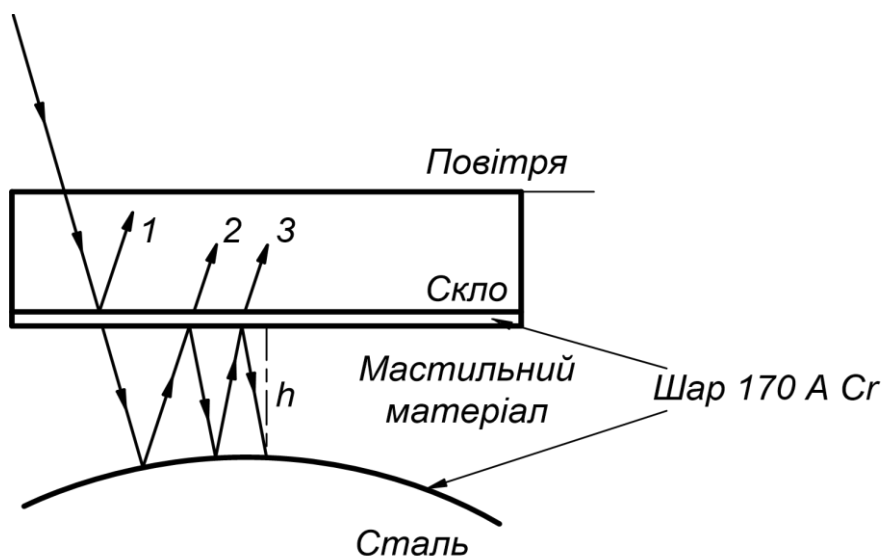


Рисунок 2.6 – Принципова схема інтерференційної системи

Для ЕГД – цілей, покриття хрому є, мабуть, одним з найвдаліших покриттів через його чудову силу зчеплення. Крім того, матеріал кульки виконаний з хромової сталі, що дозволяє наблизити умови модельних випробувань до реальних умов в контакті тертя. Відбивна здатність кульки складає порядку 60% при поглинальній – 40%.

Застосування кольорової інтерференції дозволяє виключити отримання досить широких світлих кілець, які характерні для монохроматичного світла, що ускладнює точне визначення розподілу товщини мастильного шару. Кольорова інтерференція дозволяє забезпечити точні вимірювання товщини мастильного шару до $h=1,5$ мкм і виміряти ультратонкі мастильні шари до $0,02$ мкм.

Проте існують методи вимірювання товщини більше $1,5$ мкм [73], якщо використовувати джерело білого світла із спеціальними фільтрами.

В цьому випадку, спостерігається компроміс між монохроматичним і білим джерелом світла, що дає спектральний склад, обмежений двома дискретними діапазонами хвиль. Це дає можливість мати гарну граничну видимість в ширшому діапазоні товщини плівок. Типова мікроінтерферограма ЕГД – точкового контакту представлена на рис. 2.7.

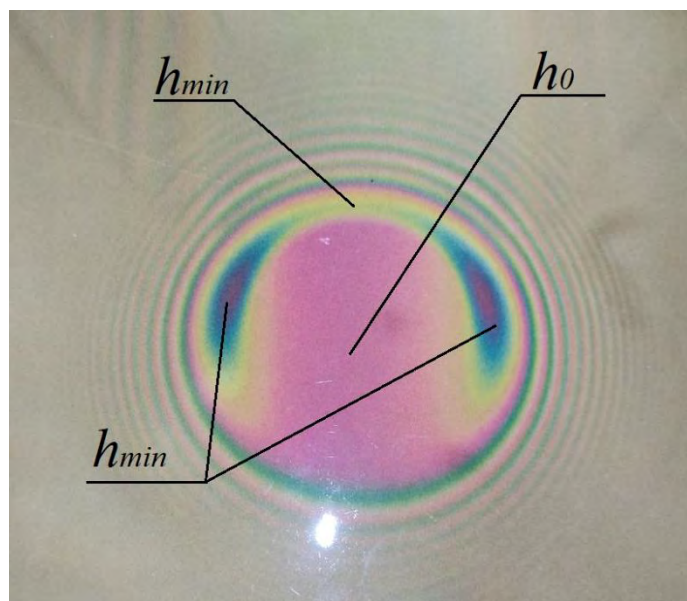


Рисунок 2.7 – Мікроінтерферограма точкового ЕГД – контакту.

де h_0 – товщина мастильного шару в центральній зоні контакту;
 h_{min} – мінімальна товщина мастильного шару на виході із контакту;
 h'_{min} – мінімальна товщина мастильного шару на кінцевих ділянках

Таким чином необхідно зазначити, що методом оптичної інтерферометрії визначається оптичне значення товщини мастильного шару. Для отримання дійсних значень товщини виконується спеціальне тарування.

2.2.3 Тарування оптичної товщини мастильного шару. Певній товщині мастильного шару відповідає інтерференційне кільце певного кольору оскільки кожен колір інтерферує при своїй довжині хвилі, тому необхідно спочатку провести тарування, а потім встановити залежності між відповідним кольором і товщиною змащувального шару.

Першим способом тарування є метод Ньютона [83]. Якщо між елементом кочення (кулькою) і диском, на внутрішню поверхню якого нанесене напівпрозоре покриття хрому, ввести мастильний матеріал, то поблизу точки зіткнення А утворюється прошарок (плівка) мастильного матеріалу, товщина h якої поступово зростає у міру віддалення останньої від точки А. Паралельний пучок світла, падаючи перпендикулярно на плоску поверхню скляного диска, утворює систему концентричних кілець, радіусом $r = |DC|$. Знаючи радіус R кривизни кульки і радіус відповідного інтерференційного кільця r , можна визначити оптичне значення товщини h змащувального шару за формулою (2.21).

Необхідно звернути увагу на те, що пружна деформація дотичних поверхонь не допускається, інакше, можуть спостерігатися значні похибки у вимірюваннях.

Іншим способом тарування є тарування за допомогою рівняння Герца [84], принципова схема якого представлена на рис. 2.8, дозволяє уникнути вказаних вище недоліків.

Метод полягає у визначенні товщини мастильного шару за формулою Герца в умовах навантаження точкового контакту:

$$h = \frac{\alpha \cdot P_{\max}}{E'} \left[- \left(2 - \frac{r^2}{\alpha^2} \right) \cdot \cos^{-1} \left(\frac{\alpha}{r} \right) + \left(\frac{r^2}{\alpha^2} - 1 \right)^{\frac{1}{2}} \right], \quad (2.21)$$

де r - радіус інтерференційного кільця; α - радіус площі контакту;

E' - приведений модуль пружності;

$P_{\max} = \frac{3 \cdot F}{2 \cdot \pi \cdot \alpha^2}$ - максимальний герцівський тиск; F - навантаження.

Задовільні тарувальні залежності представлені в роботі [85].

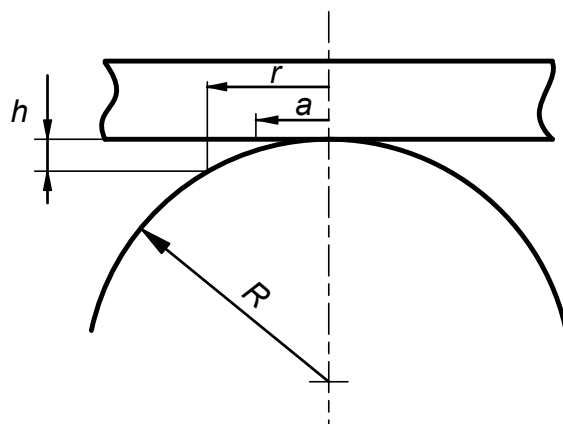


Рисунок 2.8 – Принципова схема тарувальної системи за методом Герца

Для знаходження дійсної товщини мастильного шару, яка відповідає кожному інтерференційному кільцю, необхідно розділити калібровані значення за формулою (2.7) для кілець на показник заломлення середовища:

$$h = \frac{h_{\text{опт}}}{n_{(P,T)}}, \quad (2.22)$$

де $h_{\text{опт}}$ - оптичне (каліброване) значення товщини; $n_{(P,T)}$ - показник заломлення середовища при тиску P і температурі T .

Показник заломлення середовища і його роль при визначенні товщини мастильного шару. Інтерференційні кільця спостерігаються тим краще, чим більше різниця між коефіцієнтом заломлення матеріалу диска n_1 і мастильним матеріалом n_2 . Згідно формули Френеля, коефіцієнт віддзеркалення γ дорівнює:

$$\gamma = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}. \quad (2.23)$$

Дана формула вказує на те, що слід використовувати прозорий матеріал з великим показником заломлення, наприклад скло ($n_1=1,97$) або сапфір ($n_1=1,77$). Коефіцієнт заломлення скла можна прийняти постійним, а коефіцієнт заломлення мастильного матеріалу змінюється разом з тиском і температурою. Із збільшенням тиску, коефіцієнт заломлення звичайно зростає і, падає із зростанням температури. Дійсний коефіцієнт заломлення n змінюватиметься з густиною ρ середовища відповідно до співвідношення Лоренц–Лоренца [86]:

$$\left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 1} \right) \cdot \frac{1}{\rho} = \text{constant}, \quad (2.24)$$

і може бути розрахований таким чином:

$$n = \left(\frac{1 + 2 \cdot A}{1 - A} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.25)$$

де $A = \frac{\rho}{\rho_0} \cdot \left(\frac{n_0^2 - 1}{n_0^2 + 2} \right)$, а n_0 і ρ_0 – коефіцієнт заломлення і густина при атмосферному тиску. Поултер, Рітчі і Бенц [87] визначили, що співвідношення Лоренц-Лоренца виконується з точністю до 0,6% для мінеральних олив в межах від 0 до 1,38 ГПа, що дало похибку знаходження коефіцієнта заломлення близько 1,5 %.

Зміна густини ρ у функції температури і тиск для мінеральних олив визначається наступною залежністю [88]:

$$\rho_p = \rho_0 \cdot \exp[(p - p_0) - \eta \cdot (t - t_0)], \quad (2.26)$$

або емпіричною залежністю:

$$\rho_p = \rho_0 \cdot \left(1 + \frac{0,592 \cdot p}{1 + 1,74 \cdot p} \right), \quad (2.27)$$

де p - тиск, ГПа.

Для синтетичних олив, відношення густини ρ/ρ_0 можна визначити за допомогою емпіричного співвідношення Хартунга, яке приводиться в роботі [89]:

$$\rho_p = \rho_0 \cdot \left(1 + \frac{42,8 \cdot 10^{-6}}{(v_{100})^{0,0385}} \cdot p^{0,35} \right), \quad (2.25)$$

де v_{100} - кінематична в'язкість при 100°F (38°C), сСт.

Коефіцієнт заломлення при атмосферному тиску n_0 замірявся за допомогою рефрактометра, типа УРЛ [90], загальний вид якого представлений на рис. 2.9. Вимірювання n_0 проводилося по граничному куту заломлення при температурі $20 \pm 0,1^\circ\text{C}$.



Рис. 2.9. – Загальний вигляд рефрактометра УРЛ

У таблиці 2.1 приведені тарувальні значення оптичної (каліброваної) і дійсної товщини змащувального шару для різних мастильних матеріалів.

Таблиця 2.1 – Тарувальні залежності значень оптичної і дійсної товщини змащувального шару моторної оливи для бензинових двигунів TEMOL CLASSIC 15w40, універсальної моторно–трансмісійної оливи ЄМТ–8, базової оливи І-40А, моторних олив для дизельних двигунів М8Г2К і М10Г2К та модифікованої універсальної моторно–трансмісійної оливи ПРОТЕК ЄМТ-8.

Колір	Оптична товщина $h_o \times 10^{-6}, \text{м}$	Дійсна товщина мастильного шару, $h_d \times 10^{-6}, \text{м}$					
		TEMOL CLASSIC 15w40	ЄМТ-8	І-40А	М8Г2К	М10Г2К	ПРОТЕК ЄМТ-8
1-й жовтий	0,192	0,12307	0,12715	0,128	0,12387	0,122293	0,127152
оранжевий	0,203	0,12980	0,13410	0,135	0,13064	0,128981	0,134106
фіолетовий	0,288	0,18173	0,18774	0,189	0,18290	0,180573	0,187748
синій	0,3540	0,22692	0,23443	0,236	0,22838	0,225478	0,234437
зелений	0,398	0,25480	0,26324	0,265	0,25645	0,253185	0,263245
2-й жовтий	0,411	0,26346	0,27218	0,274	0,26516	0,261783	0,272185
червоний	0,465	0,29807	0,30794	0,31	0,3	0,296178	0,307947
пурпурний	0,534	0,38076	0,39337	0,396	0,38322	0,378344	0,393377
індиго	0,561	0,40865	0,42218	0,425	0,41129	0,406051	0,422185
синій	0,594	0,44230	0,45695	0,46	0,44516	0,43949	0,456954
зелений	0,636	0,47115	0,48675	0,49	0,47419	0,468153	0,486755
3-й жовтий	0,690	0,57692	0,59602	0,6	0,58064	0,573248	-
червоний	0,735	0,12307	0,12715	0,128	0,12387	0,122293	-
зелений	0,90	0,12980	0,13410	0,135	0,13064	0,128981	-

2.3 Експериментальне устаткування для визначення об'ємного зносу, коефіцієнту тертя, реологічних та триботехнічних показників в умовах локальних контактів.

Для дослідження об'ємного зносу та коефіцієнту тертя був використаний трибометр CSM Instruments SA (Рис.2.10).

Трибометр є першим етапом у вивченні трибологічної поведінки матеріалів що досліджуються.

Два основні стандарти що використовуються на штифт-диск трибометрах – це DIN 50324 [91] та ASTM G 99 - 95a [92].

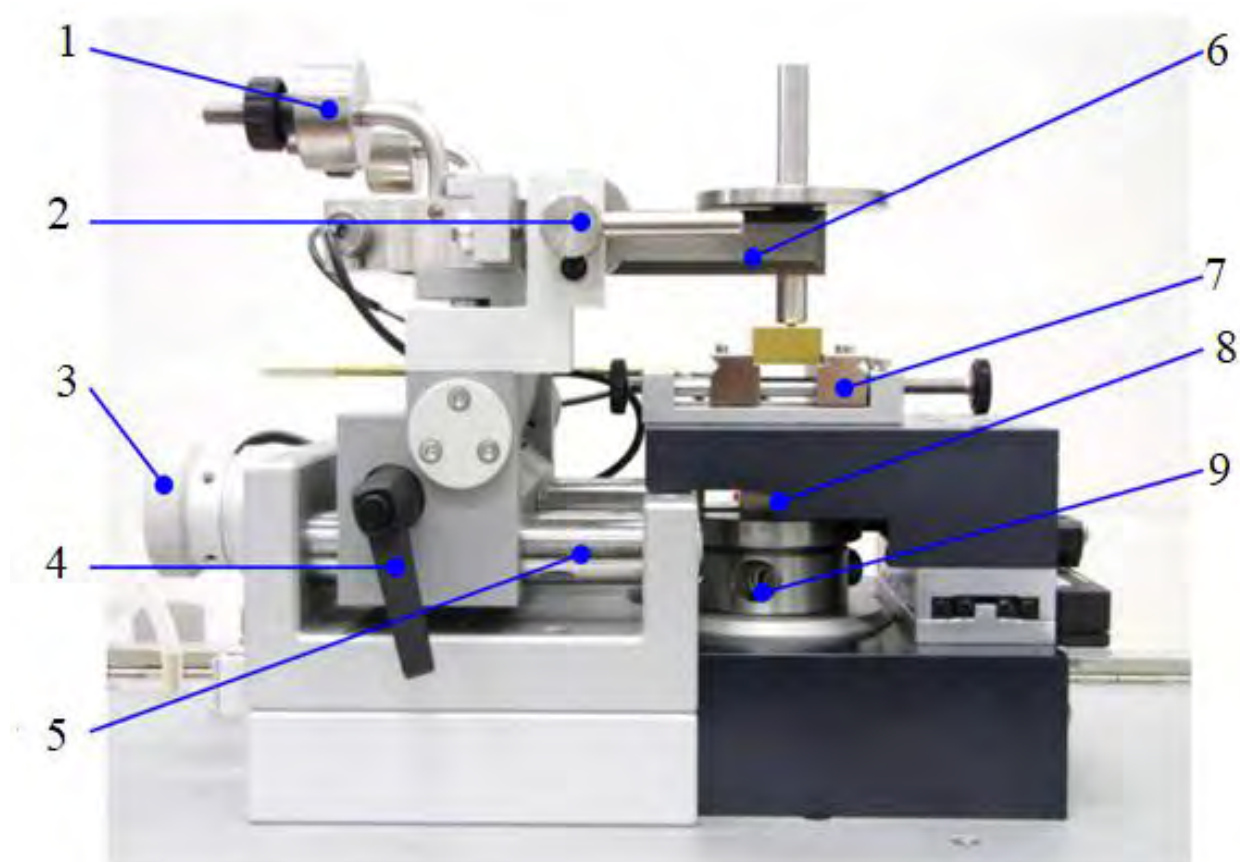


Рисунок 2.10 - Загальний вигляд трибометра «CSM Instruments» [81]:

1 - протизвага; 2 - внецентровий затвор; 3 – кнопка для регулювання радіуса (з тонким градуюванням); 4 – стопорна рукоятка; 5 – міліметрова шкала; 6 – ручка; 7 – тримач зразка; 8 – стержень вала; 9 – гвинт блоку вала

Технічна специфікація

Датчики	
Тип	Діапазон
Номінальне навантаження [N]	до 10 (Опційно до 6014)
Сила тертя [N]	10 (Опційно до 20)

Вимірювання продуктивності	
Тип	Максимальне значення
Штифт на диску: Швидкість [об/хв]	500 (Опційно до 1500)
Лінійний: Швидкість [мм/сек]	100
Лінійний: Довжина ходу [мм]	60

З метою проведення подальших експериментальних досліджень реологічних та триботехнічних показників був модернізований існуючий стенд, що дозволило вимірювати, методом оптичної інтерферометрії, ультратонку товщину мастильного шару з урахуванням картини підведення і розподілу мастильного матеріалу в околицях точкового контакту тертя і фактичної площі контакту з використанням відеотелевізійної записуючої техніки. Загальний вид стенду, що використовується для створення умов, аналогічних, що виникають в контактах поверхонь для тіл кочення із зовнішнім кільцем самовстановлюючого упорного шарикопідшипника, представлений на рис. 2.11. Контактуюча пара стальна кулька – скляний диск представлена на рис. 2.12.



Рисунок 2.11 – Загальний вигляд установки з допоміжним обладнанням



Рисунок 2.12 – Контактуюча пара стальна кулька-скляний диск

Об'єктом дослідження (рис.2.10) є зона контакту між скляним диском 1 і, стандартною сталевую кулькою 10, діаметром 25,4 мм з чистотою обробки поверхні $Ra < 0,025$ мкм, що притискується до диску вантажем.

Поверхня тертя диска покривалася, методом випаровування у вакуумі, тонким шаром хрому (товщиною приблизно 170Å), що дозволяє досягти поліпшення видимості інтерференційних кілець. Кулька встановлювалася на опори 8, що вільно обертаються від фрикційного тертя, змонтовані в стакані 2 і виготовлені як єдине ціле з ванною 9 для досліджуваного мастильного матеріалу. Ця схема дозволила забезпечити умову майже чистого кочення (з невеликою часткою ковзання). Чисте кочення необхідне для того, щоб уникнути підвищення температури мастильного матеріалу і подальшого зниження в'язкості на вході в контакт, внаслідок, пов'язаного з ковзанням, розсіюванням енергії за рахунок в'язкого тертя.

Обертання диска забезпечується двигуном 7 за допомогою одноступінчатої передачі 6. Навантаження в контакті задавалося через важільну систему за допомогою рухомого підшипника 3, який розташований на валу 4. Електронний безконтактний тахометр 5 фіксував

кількість обертів. Температура мастильного матеріалу вимірювалася за допомогою спеціальної термопари, розташованої в безпосередній близькості до контакту тертя.

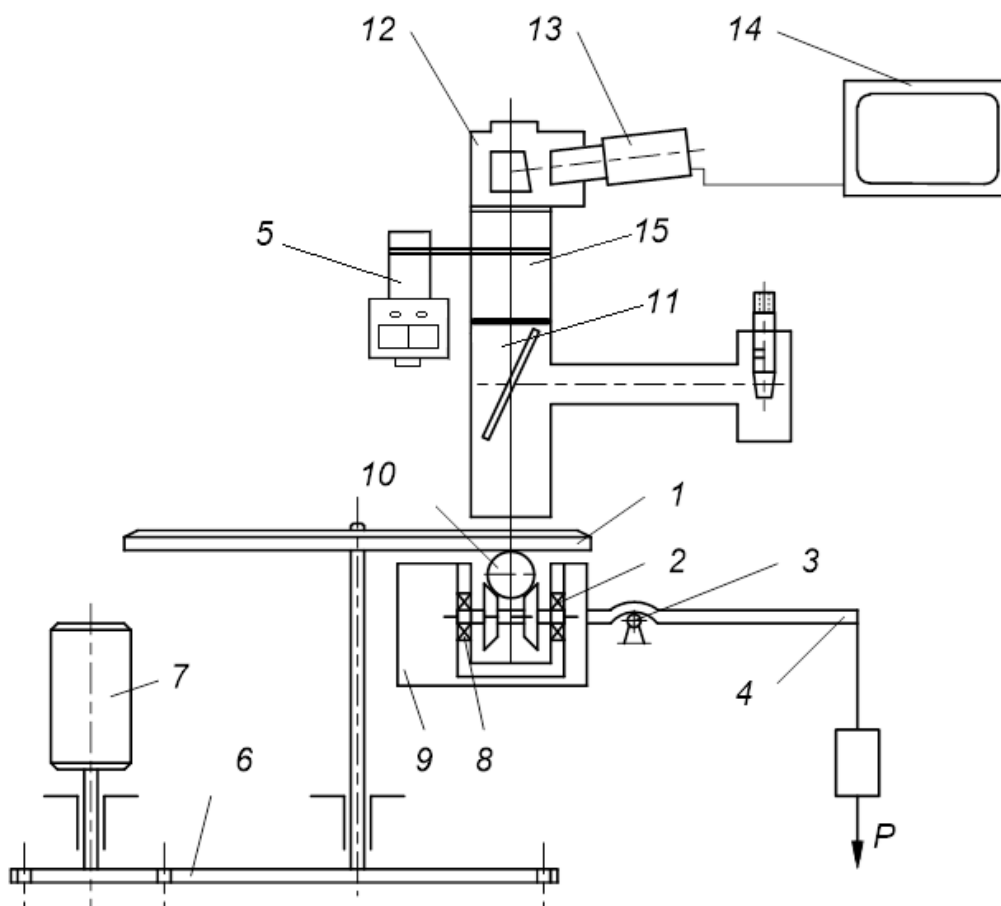


Рисунок 2.13 – Схема вузла тертя

Спостереження контактної зони (куля–площина) здійснюється через об'єктив мікроскопа 11. Для візуального спостереження інтерференційної картини в контакті тертя, використовується відео – телевізійна записуюча апаратура, що складається з перехідного тубуса 15, мікрофотонасадки 12, відеокамери 13 і телевізора 14.

Оптична система дозволяє проводити як візуальне дослідження, так і здійснювати реєстрацію спостережуваного зображення з використанням професійного фотоапарата "Canon" з можливістю відеозйомки.

Всі досліді, які будуть проводитись, реалізуються за схемою, що наведено на рис. 2.14.

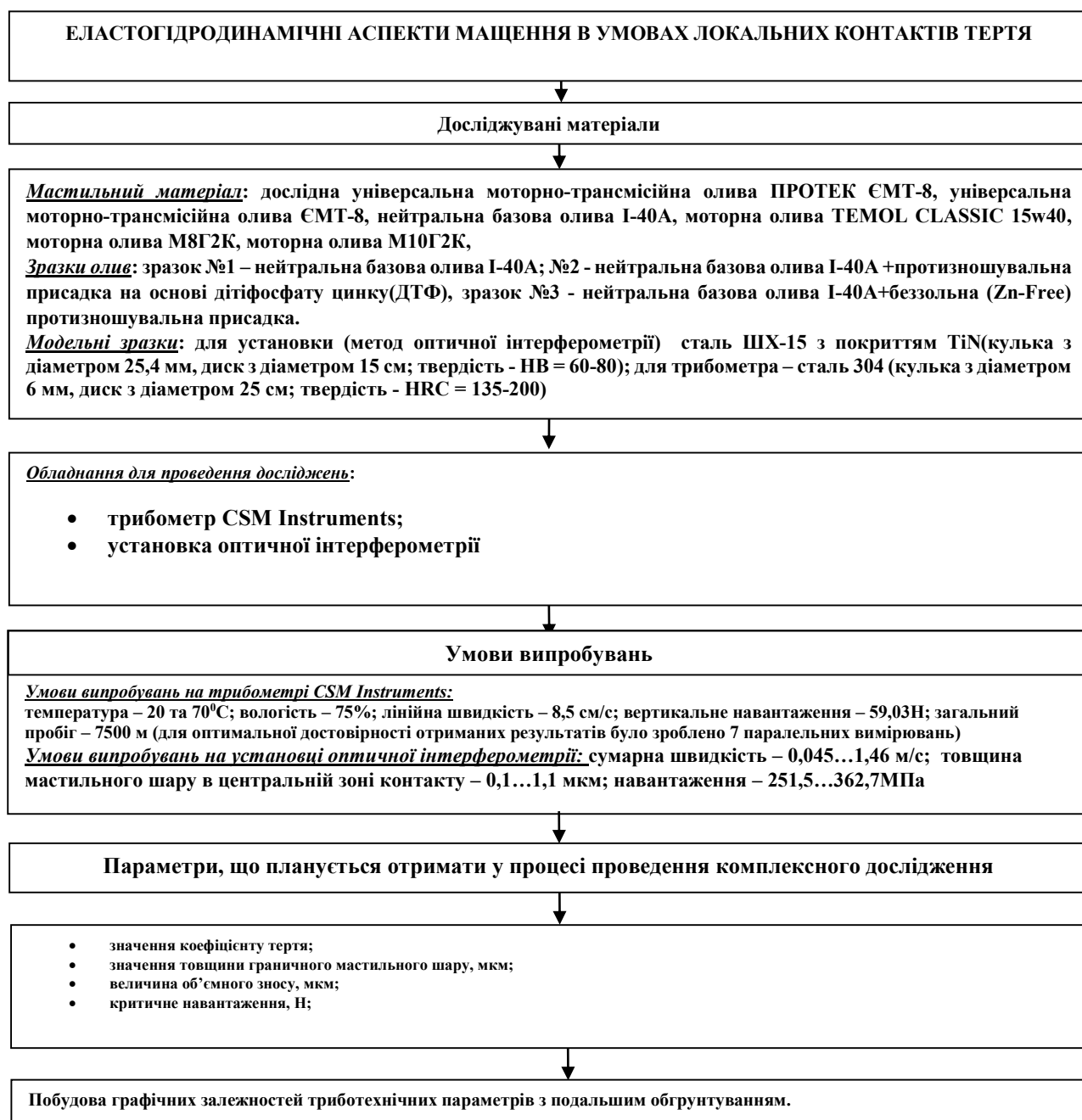


Рисунок 2.14 – Схема проведення досліджень

Висновки до розділу 2:

1. Недостатній розвиток методів теорій подібності, процесів моделювання тертя, зношування та мащення при розв'язанні завдань різних галузей машинобудування значною мірою обумовлено складністю процесів, що призвело до зростання потреб нових типів машин тертя, як правило в одиничних екземплярах, які призначені для розв'язання конкретних завдань.
2. Використання трибометра CSM Instruments SA дає можливість отримати експериментальні результати з високим ступенем точності до реальних умов роботи трибомеханічних систем.
3. Для вимірювання товщини мастильного шару в широкому діапазоні параметрів вузла тертя з можливістю реального огляду картини підведення і розподілу мастильного матеріалу в локальному контакті використовується модернізований робочий стенд для визначення товщини мастильного шару інтерферометричним методом.
4. На сучасному етапі розвитку трибології існує багато методів вимірювання товщини мастильної плівки, класифікація яких засновується на якісній відмінності фізичних процесів при визначенні даного параметру. При проведенні досліджень для найбільш точного визначення товщини мастильного шару використовується метод оптичної інтерферометрії.
5. Використання методу оптичної інтерферометрії для визначення товщини мастильного шару в локальному контакті тертя дало можливість найбільш точно диференціювати змащувальні матеріали за їх реологічними ознаками, а також встановити залежність процесу формування товщини мастильного шару від впливу наступних факторів: швидкість кочення та кочення з проковзуванням, навантаження в контакті, температура змащувального матеріалу та фізико-хімічний склад досліджуваного мастильного матеріалу.

6. З метою розширення можливостей проведення досліджень при формуванні мастильної плівки з метою вимірювання її товщини була використана сучасна техніка для фіксації частоти обертання тіл кочення, а також температури мастильного матеріалу в контакті тертя при різних режимах мащення (рясного мащення та обмеженого мащення).

РОЗДІЛ 3

КІНЕТИКА ТРИБОТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ В УМОВАХ РЯСНОГО МАЩЕННЯ

Сучасні машини та механізми являють собою сукупність трибосистем. Сила тертя, інтенсивність зношування трибоповерхонь, шум, вібрація – це ті фактори, які впливають на експлуатаційні показники і, як наслідок, на довговічність роботи трибовузлів. Основні експлуатаційні характеристики будь-якої трибосистеми значною мірою залежать від правильного підбору, якості та властивостей конструкційних і мастильних матеріалів, шорсткості поверхонь (зокрема об'ємної просторової конфігурації) та макрогеометричних показників. Усі підняті вище питання повинні вирішуватись на стадії проектування трибовузла необхідними конструкторськими розрахунками (які, нажаль, є недостатньо точними та повними в триботехніці) та методами і засобами лабораторних досліджень[93].

Безпосереднє дослідження перебігу процесів у трибомеханічному контакті зокрема, закономірностей утворення поверхневих мікроструктур і перенесення речовини в контактній зоні пар тертя забезпечує визначення механізмів їх припрацювання, тривалості періоду оптимального функціонування, що в свою чергу надає повну інформацію, необхідну для підвищення ресурсу вузлів тертя в цілому [94].

3.1 Концепція оптимального вибору модифікаторів тертя для сучасних мастильних матеріалів.

Важливим чинником підвищення техніко-економічних показників транспортних засобів є покращення триботехнічних параметрів пар,

зокрема, покращення антифрикційних та протизношувальних властивостей трибосполучень.

Цілком очевидним є вплив якісного стану мастильних матеріалів на ресурс контактних поверхонь пар тертя. Структурно, більшість сучасних марок моторних та трансмісійних олів, окрім базової основи (мінеральної або синтетичної), включають пакети присадок різного функціонального призначення. Комплексне вирішення задач щодо оптимізації періоду раціонального використання мастильних матеріалів, покращення їх експлуатаційних властивостей при залученні відповідних модифікаторів тертя дозволить підвищити надійність вузлів та агрегатів транспортних засобів[94].

Отже концепція полягає в оптимальному виборі триботехнічних властивостей мастильних матеріалів які використовуються в сучасних механізмах.

Для дослідження триботехнічних властивостей мастильних матеріалів проведено комплексні лабораторні випробування на трибометрі CSM Instruments SA, при цьому, були використані наступні зразки:

зразок №1 – I-40A – нейтральна базова олива мінерального походження;

зразок №2 – I-40A+0,6% модифікатора тертя на основі дітіофосфату цинку (ДФЦ);

зразок №3 – I-40A+0,05% беззольного (Zn-Free) модифікатора тертя на основі фосфідно-сульфідних сполук.

В якості досліджуваного матеріалу було обрано кульку діаметром $D=6$ мм зі сталі 304 (HRC – 135-200, HV10). Температура дослідження t – 20°C та 70°C. Вертикальне навантаження = 59,03 Н. Вологість повітря – 75%.

Кількість надходження елементів зношування (об'ємний знос) визначається за різницею (ΔH) середніх значень.

Антифрикційні властивості (коефіцієнт тертя) визначається за числовим значенням f .

Експеримент проводився з метою визначення об'ємного зносу та коефіцієнту тертя в залежності від пробігу впродовж 7500м. Для оптимальної достовірності отриманих результатів було зроблено 7 паралельних вимірювань. За середніми значеннями проводилася відповідна вибірка результатів.

3.1.1 Визначення протизношувальних характеристик модифікаторів тертя. Для комплексного підвищення триботехнічних властивостей мастильних матеріалів використовуються модифікатори тертя для покращення протизношувальних і антифрикційних властивостей мастильних матеріалів.

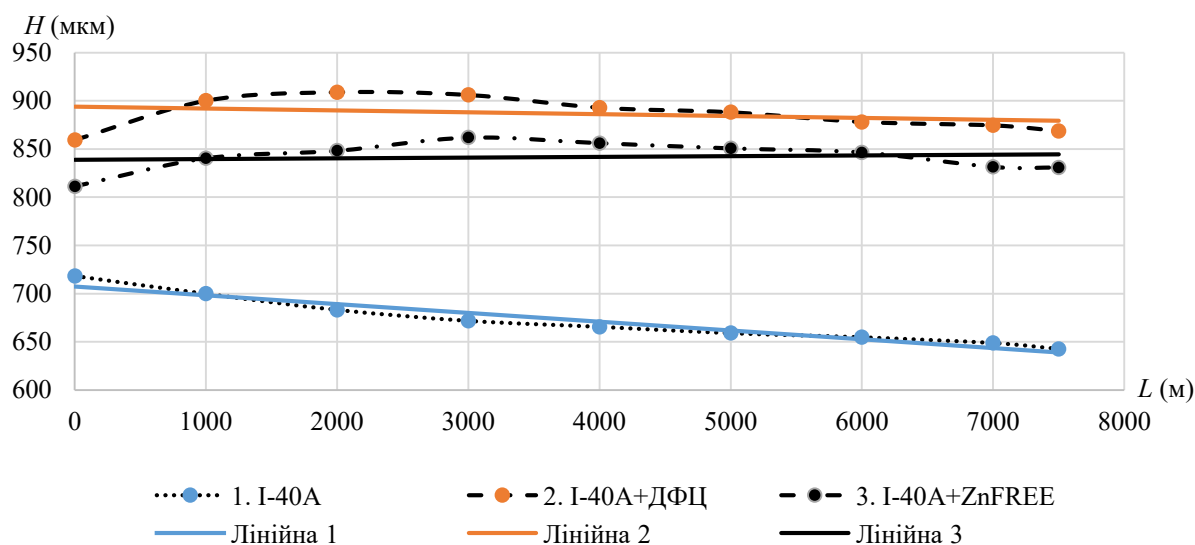


Рисунок 3.1– Залежність об'ємного зносу від пробігу при $t = 20^{\circ}\text{C}$ для досліджуваних зразків

З трьох зразків найбільша інтенсивність надходження елементів зношування (об'ємний знос) характерно для базової оливи I-40A (рис 3.1, крива 1), що є закономірним процесом, оскільки базова олива не містить протизношувальних і антифрикційних присадок.

Крива 3 має більш пологі характеристики по надходженню елементів зношування в порівнянні з кривою 2, що пояснює кращі протизношувальні властивості беззолної присадки, що не містить цинк.

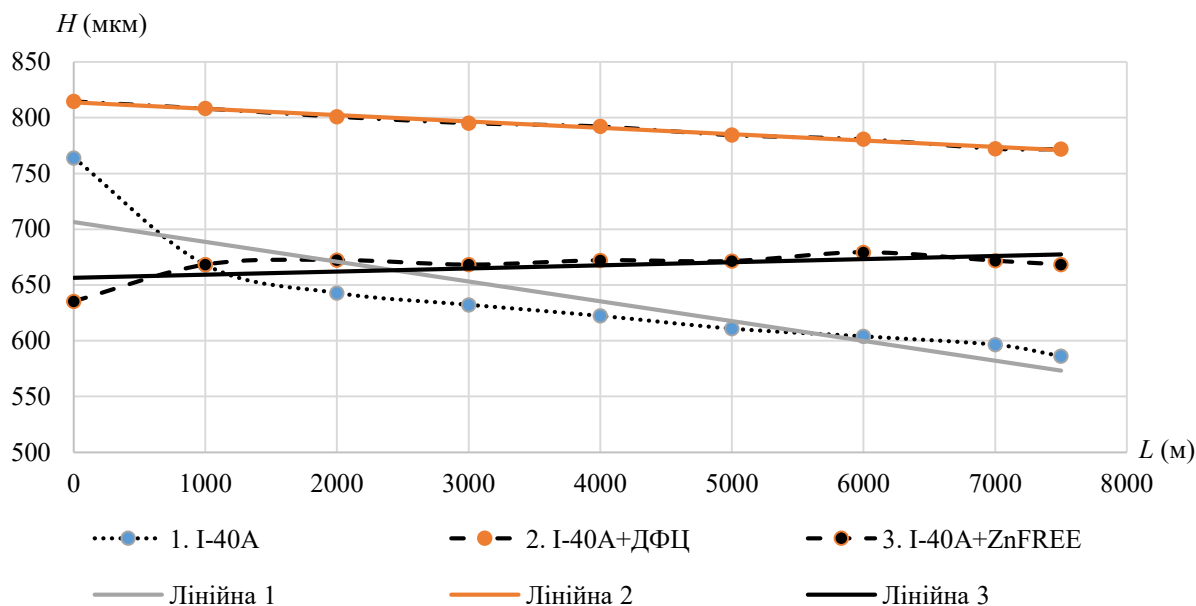


Рисунок 3.2– Залежність об'ємного зносу від пробігу при $t=70^{\circ}\text{C}$ для досліджуваних зразків

З трьох зразків найбільша інтенсивність надходження елементів зношування (об'ємний знос) при локальному нагріві оливи до 70°C (робоча температура важконавантажених трансмісій) характерно для базової оливи I-40A (рис. 3.2 крива 1). При локальному нагріві до 70°C інтенсивність надходження елементів зношування значно збільшується в порівнянні з температурою при 20°C , що пояснюється відсутністю захисних плівок в базовій оливі I-40A (див. рис. 3.1).

Крива 3 має більш пологі характеристики надходження елементів зношування в порівнянні з кривою 2, що пояснює кращі протизношувальні властивості беззолної присадки, що не містить цинк, в умовах локального нагріву до 70°C .

Результати дослідження є важливими, оскільки органічні сполуки на основі сульфідів та фосфідів проявляють кращі протизношувальні властивості як при $t = 20^{\circ}\text{C}$, так і при локальному нагріві оливи до 70°C (робоча температура важконавантажених трансмісій), не зважаючи на те, що дані присадки містять мінімальну кількість фосфору й сірки, не містять металовмісні сполуки і, тому, можуть бути рекомендовані для змащування вузлів ЦПГ ДВЗ, що відповідають вимогам EURO5 і EURO6. Дані двигуни оснащені системою рециркуляції відпрацьованих газів EGR, селективними каталізаторами SCR та сажевими фільтрами, тому отримані результати поліпшених протизношувальних властивостей є доречними щодо створення моторних олив типу LowSaps.

3.1.2 Визначення антифрикційних характеристик модифікаторів тертя. З трьох зразків найбільший початковий коефіцієнт тертя характерний для базової оливи I-40A (рис. 3.3 крива 1) та зразка 2 з ДФЦ (рис. 3.3 крива 2). Тобто, антифрикційні властивості зразка 3 (рис. 3.3) має найменший початковий коефіцієнт тертя, що пояснює кращі антифрикційні властивості при $t=20^{\circ}\text{C}$.

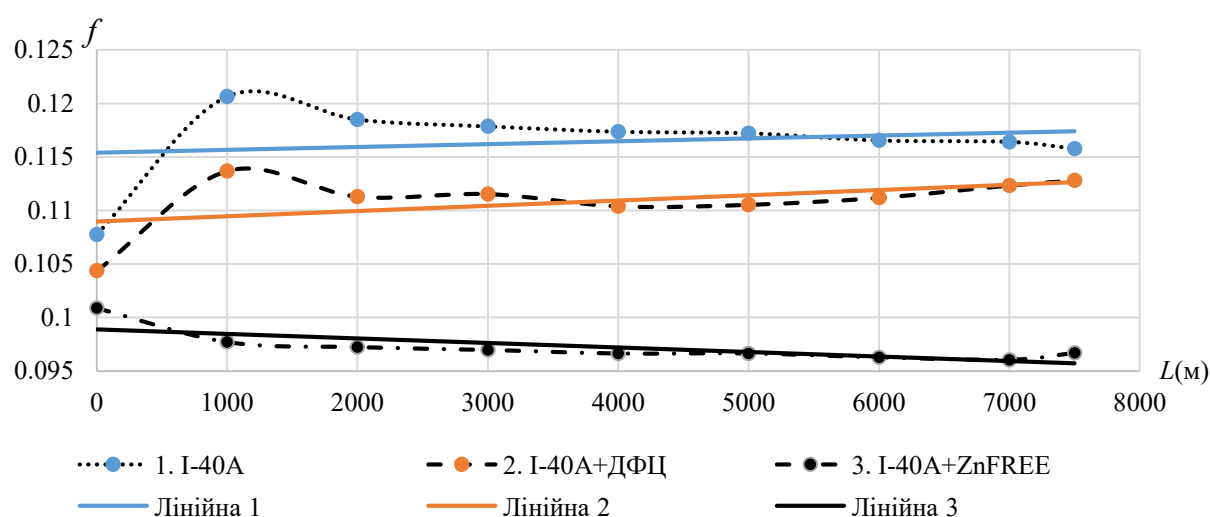


Рисунок 3.3 – Залежність коефіцієнту тертя від пробігу при $t=20^{\circ}\text{C}$ для досліджуваних зразків

Крім того, спостерігається поступове зменшення коефіцієнту тертя впродовж пробігу 7500м для зразка 3, на відміну від зразків 1 та 2, де спостерігається поступове збільшення коефіцієнту тертя. Таким чином, можна зробити висновок про те, що зразок 3 з беззольною присадкою має кращі антифрикційні властивості при $t=20^{\circ}\text{C}$ не тільки в початковий період, а й впродовж всього часу пробігу.

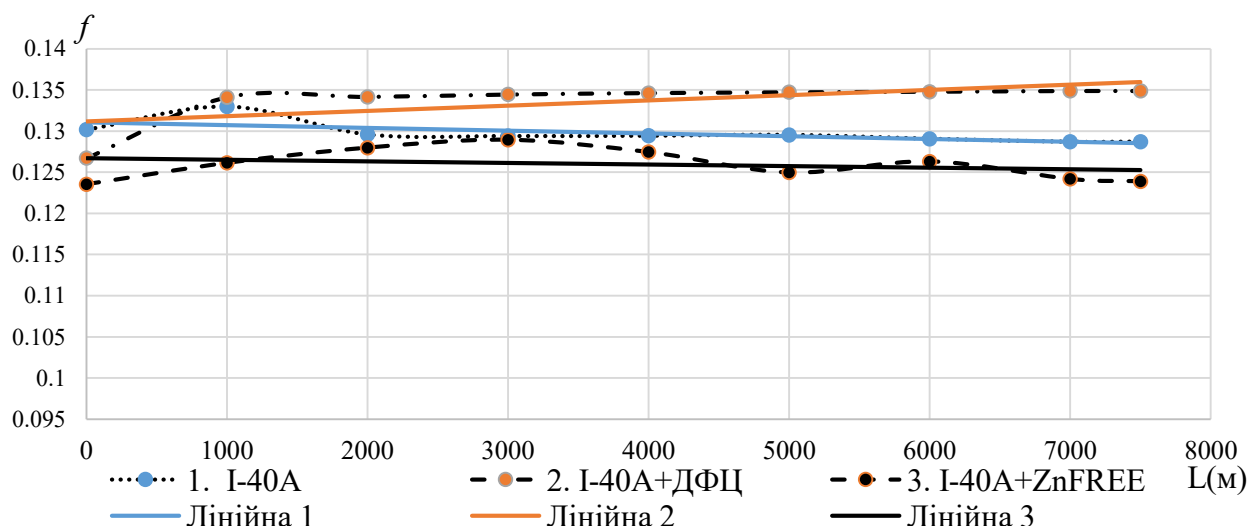


Рисунок 3.4 – Залежність коефіцієнту тертя від пробігу при $t=70^{\circ}\text{C}$ для досліджуваних зразків

З трьох зразків найбільший початковий коефіцієнт тертя характерний для базової оливи I-40A (рис. 3.4 крива 1) при локальному нагріві оливи до 70°C (робоча температура важконавантажених трансмісій), що пояснюється відсутністю антифрикційних присадок. Мінімальний початковий коефіцієнт тертя спостерігається для зразку №3, який містить беззольний (Zn-Free) модифікатор тертя, що пояснюється кращими антифрикційними властивостями.

В подальшому, при локальному нагріві оливи до 70°C (робоча температура важконавантажених трансмісій) впродовж всього часу пробігу, спостерігається стабілізація антифрикційних властивостей.

Головним чинником стабілізації коефіцієнту тертя для усіх зразків при локальному нагріві оливи до 70°C (робоча температура важконавантажених трансмісій) впродовж всього часу пробігу, є створення, при таких умовах, оптимальної еластогідродинамічної плівки, яка позитивно впливає на антифрикційні властивості.

За результатами проведених експериментальних досліджень був відібраний кращий за протизношувальними та антифрикційними властивостями зразок №3 – I-40A+0,05% беззолного (Zn-Free) модифікатора тертя на основі фосфідно-сульфідних сполук, для виготовлення універсальної моторно-трансмісійної оливи ПРОТЕК ЄМТ-8.

3.2 Особливості формування товщини мастильного шару в контакті

Експлуатаційні показники вузлів транспортних засобів суттєво впливають на динаміку формування товщини змащувального шару, яка є основною характеристикою режиму мащення, який обумовлює змащувальну здатність сучасних мастильних матеріалів і як наслідок впливає на зносостійкість поверхонь тертя. Визначення центральної та мінімальної товщини мастильного шару є найбільш важливою практичною стороною еластогідродинамічної (ЕГД) – задачі для точкового контакту, оскільки величина плівки в контакті має вагоме значення для прогнозування довговічності деталей вузлів та механізмів [93].

З метою отримання більшого масиву даних для визначення ступеню впливу експлуатаційних чинників і як наслідок створення аналітичної моделі ефективності мащення, були проведені комплексні експериментальні дослідження при використанні наступних олив: 1) моторна олива TEMOL CLASSIC 15w40 (Додаток А1); 2) моторна олива М8Г2К; 3) моторна олива М10Г2К; 4) базова олива I-40А; 5) олива

універсальна моторно–трансмісійна ЄМТ-8, 6) олива універсальна моторно–трансмісійна ПРОТЕК ЄМТ-8 (Додаток А2).

3.2.1 Динаміка формування товщини мастильного шару в умовах чистого кочення. Явища, які протікають в тонкому мастильному шарі, відрізняються складністю та багатогранністю. По товщині мастильного шару можна встановити режим мащення від рясного мащення до обмеженого мащення [52] Одним із головних аспектів ЕГД – мащення точкового контакту являється вплив швидкості кочення на товщину мастильного шару. За зміною товщини мастильного шару в залежності від швидкості кочення дозволяє виявити вплив реологічних особливостей широкого спектру мастильних матеріалів на працездатність підшипників кочення.

Згідно [93] умова чистого кочення необхідна для того, щоб уникнути підвищення температури мастильного матеріалу і подальшого зниження в'язкості на вході внаслідок проковзування, розсіювання енергії за рахунок в'язкого тертя. Щоб гарантувати умови чистого кочення (коли швидкості поверхонь рівні), для контакту кулька-диск, повинно виконуватись наступне співвідношення $V_1=V_2$ у виразі:

$$V_1 - V_2 = \frac{2\pi}{60} \cdot (\omega_1 \cdot r_1 - \omega_2 \cdot r_2), \quad (3.1)$$

де V_1, V_2 – лінійні швидкості кульки і диска; r_1, r_2 – радіуси кульки і диска; ω_1 і ω_2 – кутові швидкості кульки і диска.

Для того, щоб виконувалась умова чистого кочення, необхідно виконання умови $\omega_1 = 3\omega_2$, тобто необхідно щоб кутова швидкість кульки перевищувала кутову швидкість диска в 3 рази, тоді вираз 3.1 прийме вигляд:

$$r_2 = 3r_1. \quad (3.2)$$

Таким чином умова чистого кочення була забезпечена шляхом зміщення кульки від центру обертання диска на відстань, яка втричі більше власного радіусу.

Основною задачею дослідження являється встановлення впливу експлуатаційного параметру пар тертя – швидкості кочення (умова чистого кочення) на динаміку процесу формування товщини мастильного шару в центральній зоні контакту. При дослідженні використовувалися 6 марок олив. Діапазон зміни швидкостей складав від 0 до 1,8 м/с; температура олив впродовж експерименту становила 20°C; контактна напруга складала 251,5 МПа. Товщина мастильного шару в контакті визначалась методом оптичної інтерферометрії.

Для характеристики процесу мащення існує безрозмірний параметр λ , який характеризує режим мащення, що визначається за формулою:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}}, \quad (3.3)$$

де h – товщина мастильного шару, мкм

R_{a1} – середньоарифметичне відхилення профілю скляного диска, мкм

R_{a2} – середньоарифметичне відхилення профілю сталюї кульки (ролика), мкм.

Класифікація режимів мащення згідно значення λ наступна:

$\lambda = 0 - 1$ – напівсухий;

$\lambda = 1 - 1,5$ – граничний;

$\lambda = 1,5 - 3$ – змішаний з переважанням граничного;

$\lambda = 3 - 4$ – еластогідродинамічний;

$\lambda \geq 4$ – гідродинамічний.

При використанні в якості мастильного матеріалу оливи TEMOL CLASSIC 15w40 встановлено, що формування товщини

мастильного шару відбувається при швидкості $V_{\Sigma k}=0,064$ м/с, дійсна товщина мастильного шару склала $h_d=0,123 \times 10^{-6}$ м (рис.3.5), при цьому реалізується граничний режим мащення $\lambda = 1,2$ (рис.3.6). Із ростом швидкості товщина мастильного шару зростає і при швидкості $V_{\Sigma k}=0,404$ м/с вона складає $h_d=0,409 \times 10^{-6}$ м, при цьому реалізується гідродинамічний режим мащення $\lambda=4,087$ (рис.3.2), який домінує до $V_{\Sigma k}=0,724$ м/с.

Використовуючи в якості мастильного матеріалу моторну оливу М8Г2К встановлено, що при сумарній швидкості кочення $V_{\Sigma k}=0,06$ м/с відбувається формування товщини масляної плівки, яка складає $h_d=0,124 \times 10^{-6}$ м (рис.3.5), при цьому реалізується граничний режим мащення $\lambda=1,24$ (рис.3.6). Досягнувши $V_{\Sigma k}=0,636$ м/с товщина мастильного шару складає $h_d=0,411 \times 10^{-6}$ м (рис.3.5), при цьому встановлюється гідродинамічний режим мащення $\lambda=4,113$ (рис.3.6), характерний до $V_{\Sigma k} > 0,9304$ м/с.

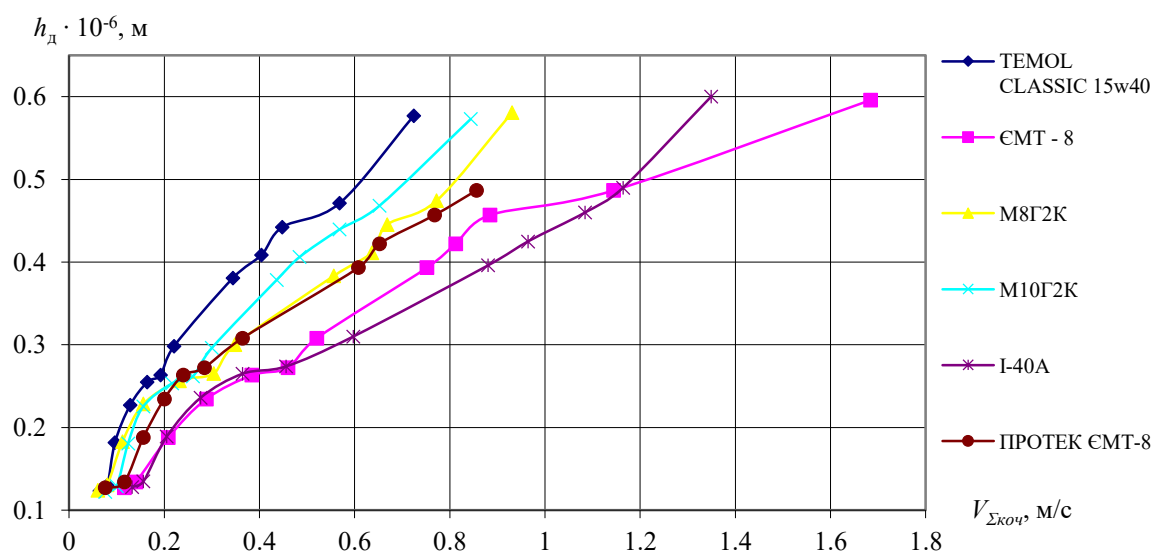


Рисунок 3.5 – Вплив сумарної швидкості кочення $V_{\Sigma k}$ на формування товщини мастильного шару h_d в контакті при чистому коченні

При виконанні порівняльного аналізу щодо властивостей дослідженої оливи з вище описаною необхідно відмітити, що даний мастильний матеріал

TEMOL CLASSIC 15w40 в період пуску формує майже аналогічні товщини масляної плівки (у відповідності до інтерференційного методу) з оливою М8Г2К (різниця 1,2-2,2%), але при менших швидкостях кочення (6%), що можна пояснити наявністю іншого комплексу присадок при практично однаковій в'язкості.

Використовуючи в якості мастильного матеріалу моторну оливу М10Г2К встановлено, що при сумарній швидкості кочення $V_{\Sigma k}=0,076$ м/с відбувається формування товщини масляної плівки, яка складає $h_d=0,122 \times 10^{-6}$ м (рис.3.5), при цьому реалізується граничний режим мащення $\lambda=1,223$ (рис.3.6). Досягнувши $V_{\Sigma k}=0,484$ м/с товщина мастильного шару складає $h_d=0,406 \times 10^{-6}$ м (рис.3.5), при цьому встановлюється гідродинамічний режим мащення $\lambda=4,061$ (рис.3.6).

Використовуючи в якості мастильного матеріалу оливу ЄМТ-8 встановлено, що при $V_{\Sigma k}=0,116$ м/с відбувається формування товщини масляної плівки, яка складає $h_d=0,127 \times 10^{-6}$ м (рис.3.5), при цьому реалізується граничний режим мащення $\lambda=1,272$ (рис.3.6). Досягнувши швидкості $V_{\Sigma k}=0,812$ м/с товщина мастильного шару складає $h_d=0,422 \times 10^{-6}$ м (рис.3.5), при цьому встановлюється гідродинамічний режим мащення $\lambda=4,222$ (рис.3.6), який домінує до $V_{\Sigma k} = 1,684$ м/с.

Застосовуючи в якості мастильного матеріалу оливу І-40А встановлено, що товщина масляної плівки формується при сумарній швидкості кочення $V_{\Sigma k}=0,132$ м/с і становить $h_d=0,128 \times 10^{-6}$ м (рис.3.5), при цьому реалізується граничний режим мащення $\lambda=1,28$ (рис.3.6). Досягнувши швидкості кочення $V_{\Sigma k}=0,964$ м/с товщина мастильного шару складає $h_d=0,425 \times 10^{-6}$ м (рис.3.5), при цьому встановлюється гідродинамічний режим мащення $\lambda=4,25$ (рис.3.6), який характерний до $V_{\Sigma k} = 1,349$ м/с.

При застосуванні оливи ПРОТЕК ЄМТ-8 в якості мастильного матеріалу встановлено, що товщина масляної плівки формується при сумарній швидкості кочення $V_{\Sigma k}=0,076$ м/с і становить $h_d=0,127 \times 10^{-6}$ м

(рис.3.5), при цьому реалізується граничний режим мащення $\lambda=1,27$ (рис.3.6). Досягнувши швидкості кочення $V_{\Sigma k}=0,652$ м/с товщина мастильного шару складає $h_d=0,422 \times 10^{-6}$ м (рис.3.5), при цьому встановлюється гідродинамічний режим мащення $\lambda=4,22$ (рис.3.6), який характерний до $V_{\Sigma k}=0,856$ м/с.

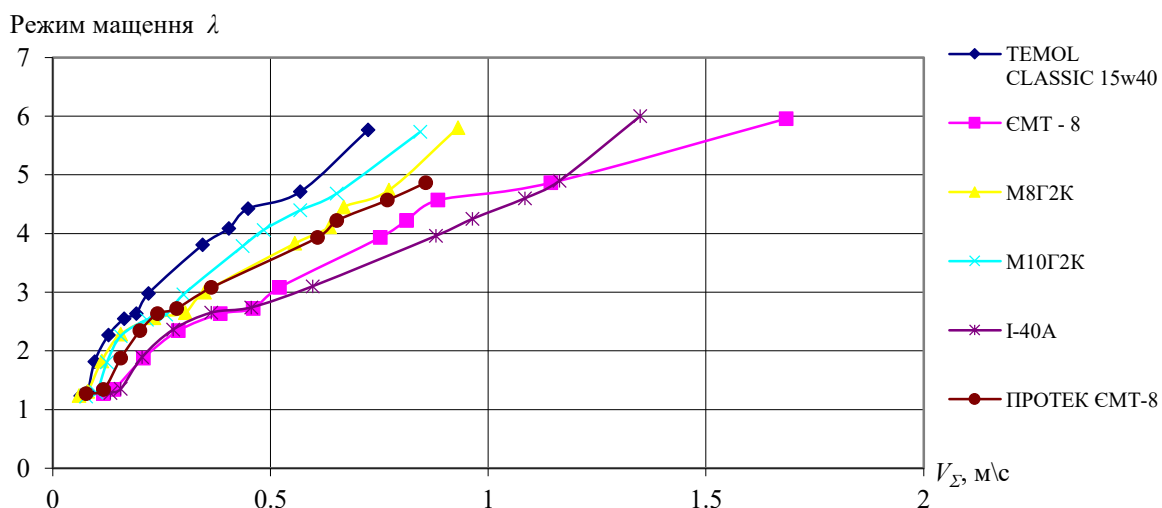


Рисунок – 3.6 Вплив сумарної швидкості кочення контактуючої пари $V_{\Sigma \text{коч.}}$ на встановлення режимів мащення λ

Виходячи з отриманих експериментальних даних впливає, що олива ПРОТЕК EMT-8 перевищує швидкість початку формування мастильної плівки оливи EMT-8 на 35%, але поступається за швидкістю створення еластогідродинамічної плівки таким мастильним матеріалам як: TEMOL CLASSIC 15w40 – 3%; M8Г2К – 3%; M10Г2К – 5%.

За результатами проведених експериментальних досліджень щодо визначення змащувальної дії олив різного складу та експлуатаційного призначення було встановлено, що в період пуску в парі тертя кінетика формування товщини мастильного шару залежить від швидкості кочення – при зростанні якої відбувається підвищення товщини мастильного шару в центральній зоні контакту, що призводить до встановлення відповідних режимів мащення (від граничного до гідродинамічного). Визначальну роль

відіграє кінематична в'язкість мастильного матеріалу, яка, в основному, залежить від базової основи олив та кількісного вмісту присадок [95]. При виконанні аналізу щодо динаміки формування товщини мастильного шару модифікованою оливою ПРОТЕК ЄМТ-8, необхідно зазначити, що на відміну від експериментальних показників оливою ЄМТ-8, модифікована олива забезпечує більш ефективне та надійне мащення контактних поверхонь в дослідженому діапазоні швидкостей та навантаження за рахунок наявної у базовій основі оптимальної в'язкості, який забезпечує задовільну товщину мастильного шару. На ряду з цим необхідно зазначити, що ефективність мастильної дії олив ПРОТЕК ЄМТ-8 та ЄМТ-8 мають певні відмінності від загальноприйнятих залежностей щодо кращого формування мастильним матеріалом розділяючого шару в контакті про що свідчать показники ефективного формування товщини мастильного шару моторними оливами TEMOL CLASSIC 15w40; M8Г2К; M10Г2К. Отримані результати можливо пояснити лише з позиції обраних пар тертя експериментальної установки сталь–скло. Аналогічні результати були зафіксовані у роботі [96].

Товщина мастильного шару для досліджених мастильних матеріалів зведена в таблицю 2.1.

Виходячи з отриманих експериментальних даних можна стверджувати, що ефективність змащувальної дії в контакті повинна визначатися виходячи зі знань про реологію мастильного матеріалу та матеріалу контактних поверхонь, а також ґрунтуватися на підборі оливи з певною динамічною в'язкістю. Всі ці параметри в сукупності зможуть забезпечити відповідність робочим та експлуатаційним вимогам до вузлів та механізмів.

3.2.2 Динаміка формування товщини мастильного шару в контакті тертя в умовах кочення із проковзуванням. Для забезпечення проковзування 20% між контактуючими поверхнями пар тертя було

здійснено зміщення зони контакту шарика з диском на відстань 38,8мм від центру обертання, що дало можливість вимірювати швидкість кочення із проковзуванням.

При виконанні даного експериментального дослідження метою являлося встановлення впливу швидкості кочення (сумарної) на формування товщини мастильного шару в центральній зоні контакту між експериментальними контактуючими поверхнями: «сталена кулька – скляний диск». При дослідженні використовувалися 6 марок мастильних матеріалів: 1) моторна олива TEMOL CLASSIC 15w40; 2) моторна олива М8Г2К; 3) моторна олива М10Г2К; 4) олива І-40А; 5) олива універсальна моторно–трансмісійна ЄМТ-8, 6) олива ПРОТЕК ЄМТ-8.

Діапазон зміни швидкостей складав від 0 до 1,2 м/с; температура оливо впродовж експерименту знаходилася в діапазоні 18-20°C при контактній напрузі 251,5 МПа. Товщина мастильного шару в контакті визначалась методом оптичної інтерферометрії.

При використанні в якості мастильного матеріалу оливи TEMOL CLASSIC 15w40 встановлено, що формування товщини мастильного шару відбувається при швидкості $V_{\Sigma k}=0,068\text{м/с}$, дійсна товщина мастильного шару склала $h_d=0,123\times 10^{-6}\text{м}$ (рис.3.7), при цьому реалізується граничний режим мащення $\lambda =1,231$ (рис.3.8). Із ростом швидкості товщина мастильного шару зростає і при швидкості $V_{\Sigma k}=0,365\text{м/с}$ вона складає $h_d=0,409\times 10^{-6}\text{м}$, при цьому реалізується гідродинамічний режим мащення $\lambda=4,087$ (рис.3.8), який домінує до $V_{\Sigma k}=0,675\text{м/с}$.

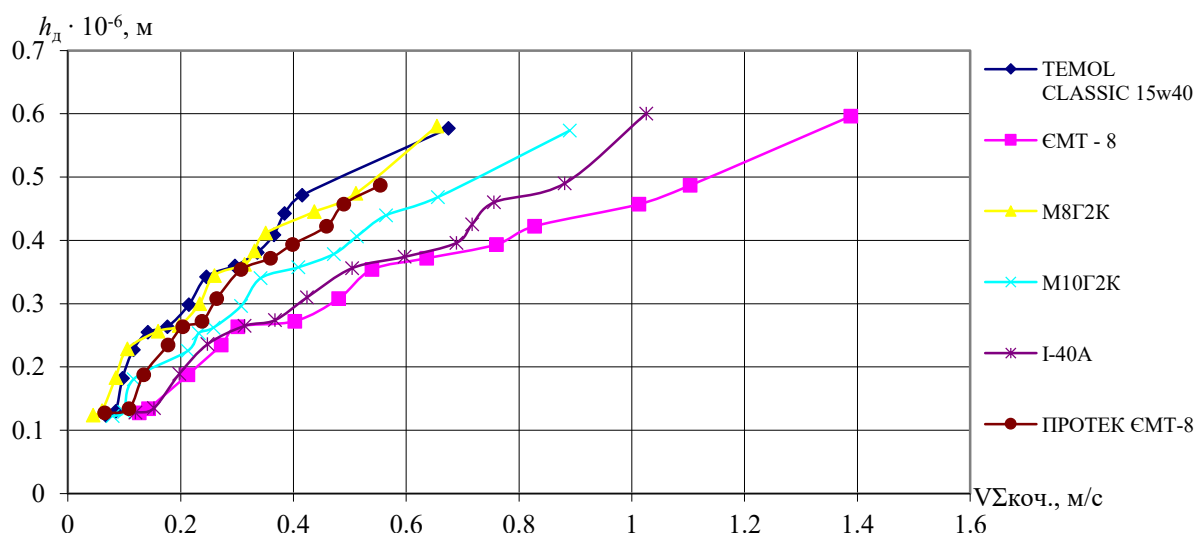


Рисунок 3.7 – Вплив сумарної швидкості кочення $V_{\Sigma\text{коч}}$ на формування товщини мастильного шару h_d в контактi при коченні з проковзуванням (20%)

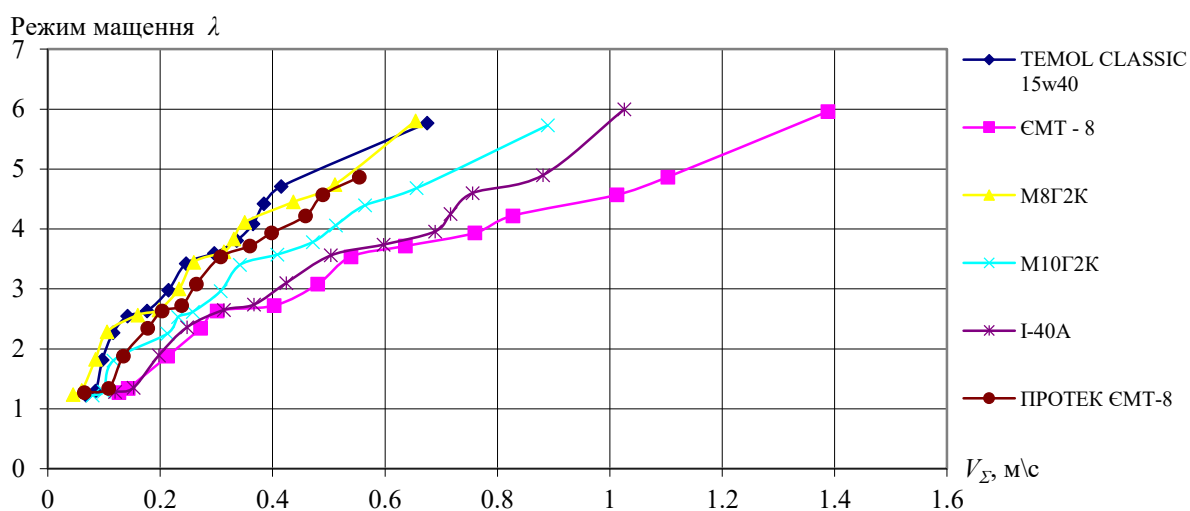


Рисунок 3.8 – Вплив сумарної швидкості кочення контактуючої пари $V_{\Sigma\text{коч}}$ на встановлення режимів мащення λ

Застосовуючи моторну оливу M8Г2К встановлено, що при сумарній швидкості кочення $V_{\Sigma\text{коч}}=0,045$ м/с відбувається формування товщини масляної плівки, яка складає $h_d=0,124 \times 10^{-6}$ м (рис.3.7), при цьому реалізується граничний режим мащення $\lambda=1,24$ (рис.3.8). Досягнувши $V_{\Sigma\text{коч}}=0,351$ м/с товщина мастильного шару складає $h_d=0,411 \times 10^{-6}$ м (рис.3.7),

при цьому встановлюється гідродинамічний режим мащення $\lambda=4,113$ (рис.3.8), характерний до $V_{\Sigma\text{коч}} > 0,654 \text{ м/с}$.

Застосовуючи моторну оливу М10Г2К встановлено, що при сумарній швидкості кочення $V_{\Sigma\text{к}}=0,079 \text{ м/с}$ відбувається формування товщини масляної плівки, яка складає $h_d=0,122 \times 10^{-6} \text{ м}$ (рис.3.7), при цьому реалізується граничний режим мащення $\lambda=1,223$ (рис.3.8). Досягнувши $V_{\Sigma\text{к}}=0,512 \text{ м/с}$ товщина мастильного шару складає $h_d=0,406 \times 10^{-6} \text{ м}$ (рис.3.7), при цьому встановлюється гідродинамічний режим мащення $\lambda=4,061$ (рис.3.8).

Застосовуючи оливу ЄМТ-8 встановлено, що при $V_{\Sigma\text{к}}=0,126 \text{ м/с}$ відбувається формування товщини масляної плівки, яка складає $h_d=0,127 \times 10^{-6} \text{ м}$ (рис.3.7), при цьому реалізується граничний режим мащення $\lambda=1,272$ (рис.3.8). Досягнувши швидкості $V_{\Sigma\text{к}}=0,827 \text{ м/с}$ товщина мастильного шару складає $h_d=0,422 \times 10^{-6} \text{ м}$ (рис.3.7), при цьому встановлюється гідродинамічний режим мащення $\lambda=4,222$ (рис.3.8), який домінує до $V_{\Sigma\text{к}} = 1,388 \text{ м/с}$.

Застосовуючи оливу І-40А встановлено, що товщина масляної плівки формується при сумарній швидкості кочення $V_{\Sigma\text{к}}=0,119 \text{ м/с}$ і становить $h_d=0,128 \times 10^{-6} \text{ м}$ (рис.3.7), при цьому реалізується граничний режим мащення $\lambda=1,28$ (рис.3.8). Досягнувши швидкості кочення $V_{\Sigma\text{к}}=0,717 \text{ м/с}$ товщина мастильного шару складає $h_d=0,425 \times 10^{-6} \text{ м}$ (рис.3.7), при цьому встановлюється гідродинамічний режим мащення $\lambda=4,25$ (рис.3.8), який характерний до $V_{\Sigma\text{к}} = 1,026 \text{ м/с}$.

Застосовуючи в якості мастильного матеріалу оливу ПРОТЕК ЄМТ-8 встановлено, що товщина масляної плівки формується при сумарній швидкості кочення $V_{\Sigma\text{к}}=0,065 \text{ м/с}$ і становить $h_d=0,127 \times 10^{-6} \text{ м}$ (рис.3.7), при цьому реалізується граничний режим мащення $\lambda=1,27$ (рис.3.8). Досягнувши швидкості кочення $V_{\Sigma\text{к}}=0,458 \text{ м/с}$ товщина мастильного шару складає

$h_d=0,422 \times 10^{-6} \text{ м}$ (рис.3.7), при цьому встановлюється гідродинамічний режим мащення $\lambda=4,22$ (рис.3.8), який характерний до $V_{\Sigma k}=0,554 \text{ м/с}$.

За результатами отриманих експериментальних даних можна стверджувати, що для всіх досліджених марок мастильних матеріалів спостерігається поступове зростання товщини мастильного шару в контакт при збільшенні швидкості кочення (проковзування в контакт становить 20%).

Оскільки трибологічний стан системи при граничному мащенні визначається процесами на поверхнях розділення тверде тіло–мастильний матеріал–тверде тіло, то в умовах проковзування в початковий період формування (реалізується граничний режим мащення) товщини мастильного шару було зафіксовано дві тенденції:

- збільшення сумарної швидкості кочення для олив TEMOL CLASSIC 15w40, M10Г2К та ЄМТ-8;
- зменшення сумарної швидкості кочення для олив М8Г2К, І-40А, ПРОТЕК ЄМТ-8.

Наприклад, для оливи М8Г2К встановлена найменша швидкість кочення, при якій спостерігається початкове формування граничного мастильного шару – $0,045 \text{ м/с}$, яка на 25% менша, ніж при чистому коченні. Оливи І-40А, ПРОТЕК ЄМТ-8 здатні формувати початкову (мінімальну) товщину граничного шару швидше відповідно на 10% та 14%, ніж в умовах кочення без проковзування. Ми вважаємо, що властивості граничних плівок, в даному випадку, залежать не від в'язкості мастильного матеріалу, а від наявності і ефективності ПАР, які мають полярні молекули.

Виходячи із отриманих експериментальних даних в умовах кочення з проковзуванням, на нашу думку, реалізуються сприятливі умови для зменшення початкової швидкості кочення зі встановленням граничного режиму мащення при використанні мастильних матеріалів, які містять ПАР, що мають полярні молекули.

В умовах проведеного експерименту для моторної оливи TEMOL CLASSIC 15w40 встановлено, що початкове формування товщини мастильного шару відбувається із запізненням на 4% ($V_{\Sigma\text{коч}}=0,00675\text{м/с}$), але досягнувши змішаного режиму мащення ($\lambda=2,27$) сумарна швидкість кочення перевищує аналогічний параметр при чистому коченні на 9%, що в свою чергу сприяло прискоренню реалізації гідродинамічного режиму мащення ($\lambda=4,08$) також на 9%. На нашу думку, в умовах проковзування для моторної оливи TEMOL CLASSIC 15w40 наявність в'язкісної присадки поліметакрилатного типу є основним чинником, який сприяє ефективному формуванню товщини мастильного шару. Таким чином, при зростанні швидкості ковзання сформована плівка забезпечується структурною в'язкістю мастильного матеріалу, яка формується за рахунок наявності полімолекулярних компонентів присадки.

В умовах формування початкової товщини мастильної плівки при коченні з проковзуванням для олив М8Г2К, І-40А та ПРОТЕК ЄМТ-8 було зафіксовано ріст динаміки утворення мастильного шару, в порівнянні з чистим коченням. Ми вважаємо, що в умовах реалізації граничного режиму мащення при коченні з проковзуванням із використанням вищезазначених мастильних матеріалів відбувається більш ефективно формування мономолекулярних шарів (метод Ленгмюра-Блоджет), які при послідовному об'єднанні утворюють полімолекулярні плівки з високим ступенем впорядкованості, впливаючи, таким чином, на ефективність формування розділяючого шару між поверхнями тертя.

Враховуючи те, що олива М10Г2К має високий ступінь легування можна зазначити: даний мастильний матеріал володіє хорошими протизношувальними характеристиками. Тому на етапі формування товщини мастильного шару в умовах кочення з проковзуванням даний мастильний матеріал ефективніше реалізує себе при граничному режимі

мащення, що у відсотковому відношенні, у порівнянні із чистим коченням, становить 14%.

При досягненні гідродинамічного режиму мащення при 0,5 м/с сформована мастильна плівка лише на 4% менше, що характеризує стійкість компонентів мастильного матеріалу до зростання градієнту швидкості зсуву.

В результаті проведених експериментальних досліджень щодо ефективності мащення розглянутих мастильних матеріалів можна стверджувати, що при виборі оливи для вузла тертя в умовах кочення з проковзуванням, в першу чергу, при виборі мастильного матеріалу необхідно враховувати його фізико-хімічний склад та динамічну в'язкість. Використання сучасних присадок та добавок в композиції існуючих мастильних матеріалів призводить до зростання ефективності мащення в контакті, що значно підвищує надійність вузла тертя за рахунок здатності формувати даними компонентами стійкий до градієнту швидкості зсуву в контакті мастильний розділяючий шар. При виконанні компаундування необхідно враховувати той факт, що кількісний вміст та структура добавок і присадок має значний вплив на фізико-хімічні властивості мастильного матеріалу [95]. До створення структурної в'язкості можуть призводити введені в базові оливи присадки, які представляють собою ньютонівські рідини [96]. З одного боку, оливи, які містять високомолекулярні присадки, покращують в'язкісно-температурні властивості олив (індекс в'язкості), а з іншого боку, введення в'язкісних присадок, що характерно для високов'язких олив, може сприяти підвищенню ефективної в'язкості і, отже, п'єзокоефіцієнта в'язкості. Результатом є збільшення товщини мастильного шару, що є позитивним ефектом, наприклад, при мащенні поверхонь пар тертя в тихохідних редукторах.

Проте, завдяки меншій в'язкості в універсальних оливах ЄМТ-8 та ПРОТЕК ЄМТ-8 знижуються втрати на власне тертя при низьких

температурах, покращуючи їхні експлуатаційні характеристики і досягаючи при цьому економії енергії рушіїв системи.

Таким чином, в умовах поступового збільшення сумарної швидкості кочення отримані експериментальні залежності щодо формування товщини мастильного шару дослідженими оливами, узгоджуються з ЕГДТМ: приріст товщини мастильного шару оливи можливий при підвищенні сумарної швидкості кочення тільки до 10–15 м/с [97]. Одержані нами експериментальні дані підтверджують трактування ЕГДТМ, щодо утворення мастильної плівки більшої товщини при збільшенні в'язкості оливи [98, 99].

3.3 Вплив швидкості кочення на реологічні характеристики мастильних матеріалів в контакті тертя

Для того, щоб характеризувати властивості мастильних матеріалів, які використовуються для мащення поверхонь тертя, необхідно досліджувати їх реологічні параметри в зоні контакту. Одночасна зміна товщини мастильного шару і сили тертя дозволяє визначити реологічні характеристики і в'язкість безпосередньо в контакті тертя. [95, 100].

Згідно ЕГД теорії мащення – в'язкість є важливим фактором при дослідженні мастильних матеріалів, оскільки саме вона є одним із головних показників фізичних властивостей олив. Від в'язкості мастильного матеріалу залежить технічний стан триботехнічної системи, витрати палива, електроенергії рушіїв системи (ДВЗ, електродвигуни). За в'язкісними показниками підбирається мастильний матеріал для відповідного вузла тертя в залежності від його конструкції, технічного стану, умов експлуатації, сезону та інших факторів.

Реологічні криві представляють собою залежність дотичної напруги зсуву мастильного шару τ від градієнта швидкості зсуву γ [95, 100]. Градієнт

швидкості зсуву представляє собою відношення різниці швидкостей контактних поверхонь до товщини мастильного шару.

Середнє значення градієнта швидкості зсуву в мастильному шарі для кожної експериментальної точки реологічної кривої визначається за формулою:

$$\gamma_i = \frac{V_{\text{ковз}}}{h_d}, \quad (3.4)$$

де $V_{\text{ковз}} = V_d - V_{\text{ш}}$ — швидкість ковзання контактуючих тіл, м/с;

V_d — швидкість кочення диска, м/с;

$V_{\text{ш}}$ — швидкість кочення кульки, м/с;

h_d — дійсна товщина мастильного шару, м.

Середнє значення дотичного напруження в контакті визначається за формулою:

$$\tau_i = \frac{2M_i}{D \cdot S}, \quad (3.5)$$

де M_i — момент тертя, Нмм;

D — діаметр експериментальної кульки, мм;

S — площа зони тиску в мастильному шарі, прийнята рівною площі контакту по Герцу, мм².

Ефективна в'язкість мастильного матеріалу в зоні контакту визначалася за формулою:

$$\eta_{\text{еф}} = \frac{\tau_i}{\gamma_i}, \quad (3.6)$$

Враховуючи складність процесів, які протікають в трибомеханічних системах були проведені дослідження з метою визначення кінетики зміни реологічних характеристик мастильних матеріалів в динаміці. Для реалізації відтворення реального контакту, в умовах експерименту, відносно проковзування в парі тертя складало 20%. В якості мастильних матеріалів були використані аналогічні оливи, що і в попередніх дослідженнях;

температурний діапазон олив впродовж експериментів коливався в межах 19-20 °С; визначення реологічних характеристик виконували за формулами 3.4 – 3.6.

При використанні моторної оливи TEMOL CLASSIC 15w40 встановлено, що при формуванні товщини масляної плівки ($V_{\Sigma\text{коч}}=0,0675$ м/с), ефективна в'язкість є найбільшою і становить $\eta_{\text{еф}}=6,98$ Па·с. Із збільшенням швидкості кочення, на проміжку швидкостей $V_{\Sigma\text{коч}}=0,0675$ – $0,0415$ м/с, ефективна в'язкість зменшується суттєво і нелінійно, і при $V_{\Sigma\text{коч}} = 0,0415$ м/с становить $\eta_{\text{еф}}= 2,2$ Па·с. З подальшим ростом $V_{\Sigma\text{коч}}$ ефективна в'язкість $\eta_{\text{еф}}$ змінюється майже лінійно і досягнувши швидкості кочення $V_{\Sigma\text{коч}}= 0,67$ м/с, ефективна в'язкість становить $\eta_{\text{еф}}=1,63$ Па·с при товщині мастильного шару $h_{\text{д}}=0,577 \times 10^{-6}$ м.

Використовуючи моторну оливу М8Г2К встановлено, що при формуванні товщини масляної плівки ($V_{\Sigma\text{коч}}=0,045$ м/с), початкова ефективна в'язкість є найбільшою і становить $\eta_{\text{еф}} = 11,18$ Па·с. Збільшення швидкості призводить до зменшення $\eta_{\text{еф}}$, як і для масла TEMOL CLASSIC 15w40. На проміжку швидкостей $V_{\Sigma\text{коч}}=0,045$ – $0,51$ м/с, ефективна в'язкість зменшується суттєво і нелінійно. Досягнувши швидкості кочення $V_{\Sigma\text{коч}}=0,51$ м/с, ефективна в'язкість становить $\eta_{\text{еф}}=1,79$ Па·с, з подальшим ростом $V_{\Sigma\text{коч}}$ ефективна в'язкість $\eta_{\text{еф}}$ змінюється майже лінійно і досягнувши швидкості кочення $V_{\Sigma\text{коч}}=0,65$ м/с, ефективна в'язкість становить $\eta_{\text{еф}} = 1,61$ Па·с при товщині мастильного шару $h_{\text{д}}=0,58 \times 10^{-6}$ м.

Застосовуючи моторну оливу М10Г2К встановлено, що при формуванні початкової товщини масляної плівки ($V_{\Sigma\text{коч}}=0,0796$ м/с) ефективна в'язкість є найбільшою, і становить $\eta_{\text{еф}}=5,85$ Па·с. На проміжку зміни швидкостей $V_{\Sigma\text{коч}}=0,0796$ – $0,66$ м/с, ефективна в'язкість зменшується нелінійно, і досягнувши швидкості $V_{\Sigma\text{коч}}=0,66$ м/с $\eta_{\text{еф}}=1,45$ Па·с. Із подальшим зростанням сумарної швидкості кочення ефективна в'язкість змінюється (зменшується) майже лінійно. Досягнувши швидкості

$V_{\Sigma\text{коч}}=0,89\text{ м/с}$ ефективна в'язкість становить $\eta_{\text{еф}}=1,25\text{ Па}\cdot\text{с}$ при товщині мастильного шару $h_{\text{д}}=0,573\times 10^{-6}\text{ м}$.

При використанні оливи I-40A встановлено, що при формуванні товщини масляної плівки ($V_{\Sigma\text{коч}}=0,119\text{ м/с}$) ефективна в'язкість $\eta_{\text{еф}} = 4,33\text{ Па}\cdot\text{с}$. На проміжку зміни швидкостей $V_{\Sigma\text{коч}}= 0,119\text{--}0,597\text{ м/с}$ відбувається суттєве зменшення ефективної в'язкості $\eta_{\text{еф}}$ і крива зменшення має нелінійний характер. При досягненні швидкості $V_{\Sigma\text{коч}} > 0,597\text{ м/с}$ зміна $\eta_{\text{еф}}$ набуває майже лінійного характеру. При швидкості кочення $V_{\Sigma\text{коч}}=1,02\text{ м/с}$ ефективна в'язкість становить $\eta_{\text{еф}}=1,14\text{ Па}\cdot\text{с}$ при товщині мастильного шару $h_{\text{д}}=0,6\times 10^{-6}\text{ м}$.

Застосовуючи універсальну моторно-трансмісійну оливу ЄМТ-8 встановлено, що при формуванні товщини масляної плівки ($V_{\Sigma\text{коч}}=0,13\text{ м/с}$) початкова ефективна в'язкість $\eta_{\text{еф}}$, як і для всіх попередніх досліджених мастильних матеріалів, є найбільшою і становить $\eta_{\text{еф}}= 3,88\text{ Па}\cdot\text{с}$. На проміжку зміни швидкостей $V_{\Sigma\text{коч}}= 0,13\text{--}0,402\text{ м/с}$ відбувається нелінійне зменшення ефективної в'язкості $\eta_{\text{еф}}$. Із збільшенням швидкості кочення $V_{\Sigma\text{коч}} > 0,402\text{ м/с}$ зменшення ефективної в'язкості $\eta_{\text{еф}}$ набуває майже лінійного характеру. При досягненні швидкості кочення $V_{\Sigma\text{коч}}=1,38\text{ м/с}$ ефективна в'язкість становить $\eta_{\text{еф}}=0,85\text{ Па}\cdot\text{с}$ при товщині мастильного шару $h_{\text{д}}=0,596\times 10^{-6}\text{ м}$.

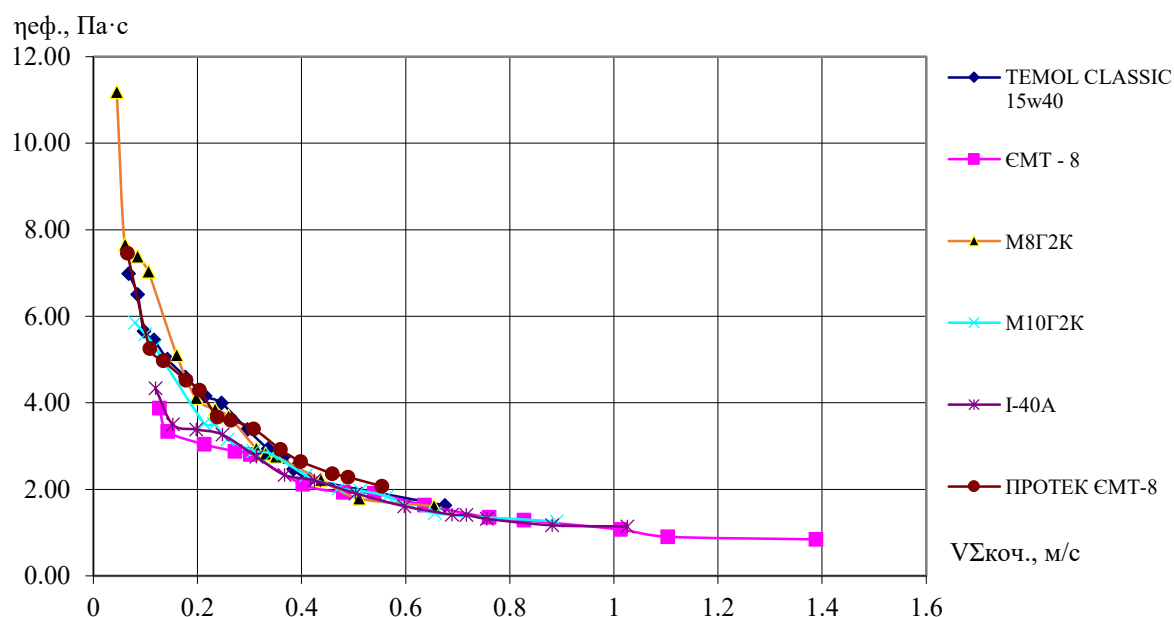


Рисунок 3.9 – Залежність ефективної в'язкості $\eta_{\text{эф}}$ від сумарної швидкості кочення $V_{\Sigma\text{коч}}$ при 20 °C

За результатами проведених досліджень було встановлено загальну закономірність щодо зміни ефективної в'язкості в контакті олив різного експлуатаційного призначення, а саме в початковий період формування товщини мастильного шару при пуску ефективна в'язкість в контакті зменшується нелінійно, в подальшому її зміна із збільшенням швидкості кочення складає, в середньому, 5%. Згідно отриманих експериментальних даних можна стверджувати, що олива в контакті набуває властивостей неньютонівських рідин, оскільки чітко прослідковується залежність ефективної в'язкості від градієнту швидкості зсуву, нажаль даний факт не враховується в розрахункових формулах ЕГД ТМ. Для підтвердження даного трактування є фактична товщина мастильного шару, яка згідно експериментальних досліджень в початковий період формування мастильної плівки, незалежно від типу оливи, на 7–11 % перевищує товщину мастильної плівки, яка розрахована за формулами Даусона та Хемрока [101]. За проведеними розрахунками, які виконувалися за вищезазначеними формулами і визначеної експериментально товщини

мастильного шару, було встановлено розбіжність в межах 3-х %, що корелює з діапазоном розбіжностей при розрахунках (рис.3.9).

Для М8Г2К встановлена максимальна ефективна в'язкість в контакті, в порівнянні з іншими оливами. На нашу думку, механізм цього явища полягає в наступному. Саме при контактній напрузі 251,5МПа, яка є мінімальною в умовах експлуатаційного застосування даної оливи, структура в мастильному матеріалі створює додатковий опір зсуву, що обумовлює її стабільність до градієнта швидкості зсуву та призводить до підвищення ефективної в'язкості [98]. Зростання сумарної швидкості кочення до $V_{\Sigma\text{коч}}=0,06\text{м/с}$ призводить до збільшення градієнта швидкості зсуву в 1,28 рази, що в свою чергу призводить до деструктуризації сформованого мастильного шару, перехід молекул в об'ємну смектичну фазу, зниження напруги зсуву масляного шару на 12,5%, що і призводить до зниження ефективної в'язкості на 32% та відновлення ньютонівських властивостей оливи (табл. 3.1). Ми вважаємо, що в даному випадку зміна реологічних характеристик оливи М8Г2К обумовлена взаємозв'язком контактної напруги та сумарної швидкості кочення. Значний приріст ефективної в'язкості, в порівнянні з іншими дослідженими оливами, при $\sigma_{\text{max}}=251,5\text{МПа}$ пов'язаний також порівняно з низькою швидкістю кочення при якій відбувається початкове формування товщини мастильного шару. За таких умов градієнт швидкості зсуву незначний ($2,8 \times 10^4 \text{с}^{-1}$), а це щонайменше в 1,4 рази менше, ніж встановлено для інших досліджених моторних олив) та не перешкоджає структуризації компонентів мастильного матеріалу, яка підвищує ефективну в'язкість в контакті.

Таблиця 3.1 – Триботехнічні показники мастильних матеріалів при напрацюванні

Показники	Мастильні матеріали					
	M8Г2К	M10Г2К	TEMOL CLASSIC 15w40	I-40A	ПРОТЕК ЄМТ-8	ЄМТ-8
$V_{\Sigma \text{ст}}, \text{ м/с}$	0,6	0,9	0,7	1,0	0,6	1,4
$V_{\Sigma \text{поч}}, \text{ м/с}$	0,045	0,08	0,07	0,11	0,06	0,1
$\eta_{\text{еф. поч.}}, \text{ Па}\cdot\text{с}$	11,2	5,85	6,98	4,33	7,46	3,88
$\eta_{\text{еф. ст.}}, \text{ Па}\cdot\text{с}$	1,61	1,25	1,63	1,14	1,77	0,85
$\gamma_{\text{поч.}} \times 10^4 \text{ с}^{-1}$	2,8	5,1	4,3	7,3	4,0	7,8
$\gamma_{\text{ст.}} \times 10^4 \text{ с}^{-1}$	8,8	12,2	9,2	13,4	8,9	18,3
$\tau_{\text{поч.}}, \text{ МПа}$	0,319	0,299	0,3	0,317	0,299	0,302
$\tau_{\text{ст.}}, \text{ МПа}$	0,143	0,153	0,149	0,153	0,158	0,154
$f_{\text{поч.}}$	0,0019	0,00178	0,00179	0,00189	0,00168	0,0018
$f_{\text{ст.}}$	0,00085	0,00091	0,00092	0,00091	0,00087	0,00092

Для досліджених моторних олив M10Г2К та TEMOL CLASSIC 15w40 кінетика зміни ефективної в'язкості при зростанні швидкості кочення аналогічна – ефективна в'язкість $\eta_{\text{еф}}$ при сформованій товщині мастильного шару ($V_{\Sigma \text{коч}}=0,07-0,08 \text{ м/с}$) зменшується, в середньому на 77%, в порівнянні з початковою $\eta_{\text{еф}}$. Підвищення $\eta_{\text{еф}}$ при зростанні тиску відбувається за рахунок зменшення «вільного об'єму» між молекулами. Аналогічний факт був встановлений в роботі [102]. Оскільки більша частина молекул даної оливи неактивна, то слабкі когезійні зв'язки швидко розриваються при зростанні градієнту швидкості зсуву для олив M10Г2К та TEMOL CLASSIC 15w40 в процесі напрацювання відповідно в 2,39 та 2,14 рази, що і призводить до розрідження олив та відновлення ньютонівських властивостей. В таких умовах напруга зсуву мастильного шару для обох

мастильних матеріалів знижується відповідно на 49% та 50%, яка корелюється з коефіцієнтом тертя (табл.3.1).

Універсальна моторно-трансмісійна олива характеризується найменшою ефективною в'язкістю в контакті, в порівнянні зі всіма дослідженими мастильними матеріалами. За результатами експериментальних досліджень встановлена загальна тенденція щодо підвищення ефективної в'язкості в контакті – чим менша сумарна швидкість кочення (аналогічно – чим менший градієнт швидкості зсуву), при якій відбувається початкове формування товщини мастильного шару при пуску, тим більша ефективна в'язкість в контакті (табл. 3.1). Для оливи ЄМТ–8 ефективна в'язкість в контакті (η_{ef}) становить 3,88 Па·с при $V_{\Sigma\text{коч.}}=0,1\text{ м/с}$. В першу чергу це пов'язано з тим, що в'язкість даної оливи за атмосферних умов є найнижчою, а тому несуча здатність мастильного шару за умов проковзування знижується. Період адаптації та стабілізації товщини мастильної плівки до постійно зростаючої швидкості кочення відповідає періоду, коли градієнт швидкості зсуву досягає $2,11 \times 10^5 \text{ с}^{-1}$. При такому значенні γ відбувається часткова деструкція молекул поліметакрилатів, яка теж обумовлює зниження ефективної в'язкості в контакті. Однак і за таких умов олива набуває властивостей неньютонівських рідин при початковому формуванні товщини мастильного шару – при відновленні ньютонівських властивостей, що відповідає $V_{\Sigma\text{коч.}}=1,4 \text{ м/с}$, ефективна в'язкість в контакті зменшується на 78%. Про відновлення ньютонівських властивостей даним мастильним матеріалом свідчить і зменшення напруги зсуву мастильного шару на 49%, що обумовлює підвищення антифрикційних властивостей оливи (коефіцієнт тертя зменшується на 48%).

Тенденція відновлення ньютонівських властивостей оливою ПРОТЕК ЄМТ-8 аналогічна ЄМТ–8. Часткова деструкція молекул при зростанні градієнту швидкості зсуву в 2,2 рази по мірі напрацювання до $V_{\Sigma\text{коч.}}=0,6\text{ м/с}$ обумовлює зниження ефективної в'язкості в контакті на 76 %. Так як дана

олива не містить в'язкісної присадки, не відбувається додаткова структуризація активованих молекул – напруга зсуву мастильного шару зменшується на 47% (табл.3.1).

За результатами виконаних експериментальних досліджень ми встановили загальні закономірності кінетики зміни реологічних характеристик олив різного експлуатаційного призначення, які свідчать про надбання олівами неньютонівських властивостей в контакті при початковому формуванні товщини мастильного шару та відновлення неньютонівських властивостей по мірі підвищення градієнту швидкості зсуву. Саме в цей час відбувається найбільший приріст товщини мастильного шару в контакті, зменшення напруги зсуву мастильного шару та коефіцієнта тертя, що забезпечує ефективне мащення. Та в подальшому підвищує довговічність контактних поверхонь.

3.4 Залежність реологічних та антифрикційних властивостей мастильних матеріалів від контактного навантаження

В даний час досліджуються і вивчаються процеси утворення при терті, під навантаженням на контактуючих поверхнях деталей машин, плівок різного роду [101, 102]. Наукову цінність представляють явища самовільного утворення на поверхнях тертя під навантаженням різних за своєю структурою і природою плівок–металевих, металополімерних і полімерних [103–111 та ін.].

Завдяки утворенню таких плівок може бути в значній мірі підвищена зносостійкість і, відповідно, довговічність деталей машин.

Для правильного застосування олив з плівкоутворюючими властивостями необхідно ретельно досліджувати механізм утворення плівок на поверхнях тертя, їх довговічність і ступінь деструкції. Відомі методи дослідження плівок, які застосовуються після проведення випробувань і

розбирання досліджуваних зразків, характеризуються наступними недоліками. Дослідженню піддаються плівки, що залишаються на поверхні зразків після їх розбирання, а на контактуючих поверхнях під навантаженням при терті відбувається динамічний процес утворення і зношування плівок, причому товщина плівок і їх характер визначаються часом і умовами роботи (навантаження, швидкість, температура і т.д.). В зв'язку з цим, виникає сумнів відносно ідентичності по товщині і характеру утворення плівок [112].

На сучасному етапі встановлено, що неньютонівські властивості мастильних матеріалів суттєво впливають на триботехнічні характеристики еластогідродинамічного контакту [113]. Наприклад, тільки неньютонівськими властивостями мастильних матеріалів можливо пояснити такі експериментальні факти, як існування деякого граничного значення для коефіцієнту тертя, залежність ефективної в'язкості від швидкості кочення тощо. Тому для реального описування процесів в еластогідродинамічному контакті необхідно вибирати реологічну модель, що враховує неньютонівські властивості рідин.

Особливо важливим є встановити взаємозв'язки між несучою здатністю олив, їх реологічними і антифрикційними властивостями. Під час проведення експериментів, в якості мастильних матеріалів використовувалися вищезазначені оливи (розд. 3.1.). Дослідження проводились при контактних напругах 251,5; 316,9; 362,7 МПа в умовах поступового збільшення сумарної швидкості кочення (від 0 до 3,2 м/с) з проковзуванням 20%. Об'ємна температура олив складала 20°C.

Для моторної оливи М10Г2К зростання контактної напруги обумовлює збільшення сталої товщини мастильного шару – в діапазоні $\sigma_{\max}$ від 251,5 до 362,7 МПа, сформована товщина мастильної плівки збільшується на 12% (рис.3.10).

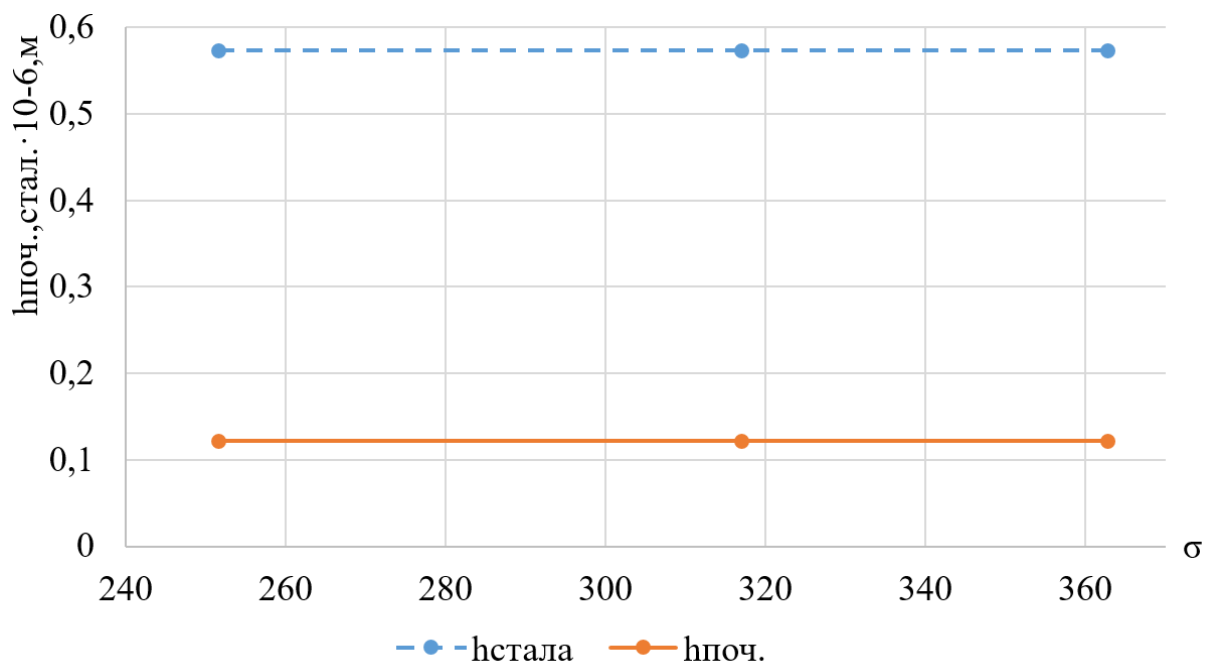


Рисунок 3.10 – Залежність початкової $h_{\text{поч.}}$ та сталої $h_{\text{стала}}$ товщини мастильного шару від контактної напруги σ_{max} для М10Г2К

Початкова товщина мастильного шару 0,122 мкм зафіксована при $\sigma_{\text{max}}=251,5\text{МПа}$; 316,9МПа відповідає швидкості кочення 0,0796 м/с, а при $\sigma_{\text{max}}=362,7\text{МПа}$ початкова товщина формується при швидкості кочення 0,0822м/с, яка на 3% менша, ніж при вищезазначених напругах. Зміна швидкості початкового формування товщини мастильного шару призводить до зміни реологічних характеристики оливи в контакті. Із зростанням контактного навантаження напруга зсуву мастильного шару зростає на 25% та 32% відповідно при збільшенні σ_{max} до 316,9МПа та 362,7МПа.

Однак підвищення контактного навантаження до $\sigma_{\text{max}}=316,9\text{МПа}$ не призводить до змін градієнту швидкості зсуву, даний параметр залишається сталим – $\gamma = 5,1 \times 10^4 \text{с}^{-1}$, подальше підвищення σ_{max} до 362,7МПа призводить до кореляційних змін – зростання γ на 3% та ефективної в'язкості $\eta_{\text{еф}}$ на 20% (рис.3.11).

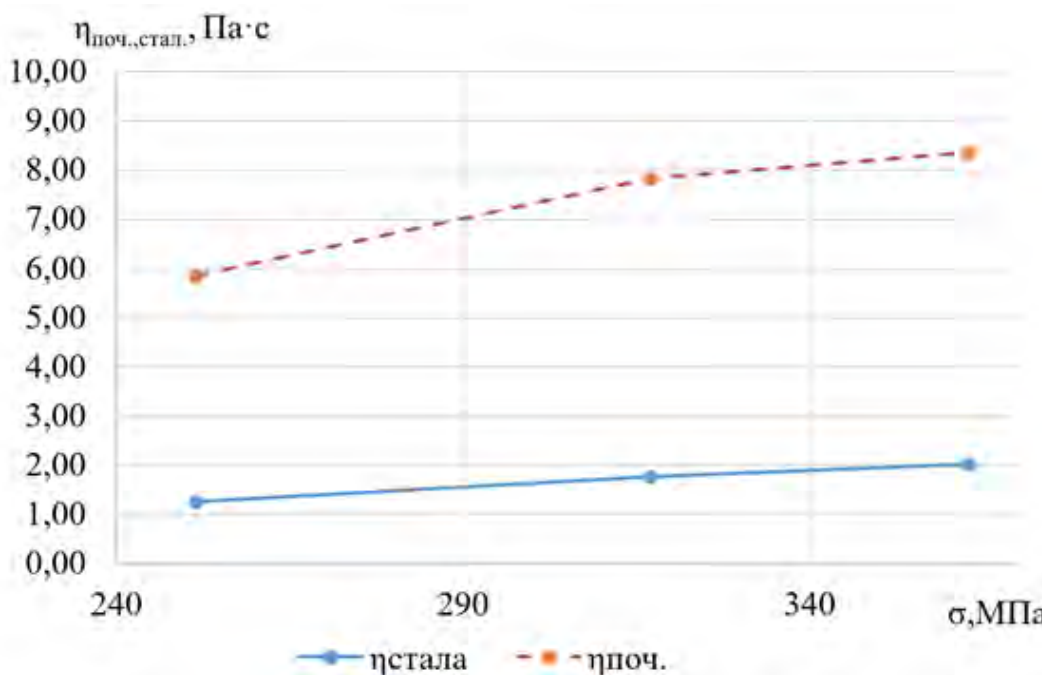


Рисунок 3.11 – Залежність початкової $\eta_{\text{еф поч.}}$ та сталої $\eta_{\text{еф стал.}}$ ефективної вязкості від контактної напруги σ_{max} для М10Г2К

Причому, зміни реологічних характеристик із збільшенням контактної напруги не впливають на динаміку формування товщини мастильного шару – інтенсифікується зростання змащувальної плівки в умовах збільшення сумарної швидкості кочення.

Зростання контактного навантаження для модифікованої універсальної моторно–трансмісійної оливи ПРОТЕК ЄМТ-8 призводить до зниження несучої здатності при збільшенні навантаження до 362,7МПа – товщина змащувального шару зменшується на 21% відповідно. Згідно експериментальних даних щодо реологічних показників даної оливи необхідно зазначити, що відновлення ньютонівських властивостей із збільшенням швидкості кочення обумовлено зниженням ефективної в'язкості в контакті на 72%; 72% і 60% та зростанням градієнту швидкості зсуву в 2,23; 2,16 та 1,57 рази при досліджуваних контактних навантаженнях відповідно (рис.3.12).

При підвищенні контактного навантаження напруга зсуву масляного шару зростає – на 28% та 35 % відповідно при збільшенні $\sigma_{\max}$ до 316,9МПа та 362,7МПа. Варто також зазначити, що зміни початкової $\eta_{\text{еф}}$ – зростання на 28% та 17% відповідно при $\sigma_{\max}=316,9$ та 362,7МПа не впливає на динаміку формування товщини мастильного шару – приріст товщини мастильної плівки, як і при $\sigma_{\max}=251,5$ МПа становить 75% із збільшенням швидкості кочення.

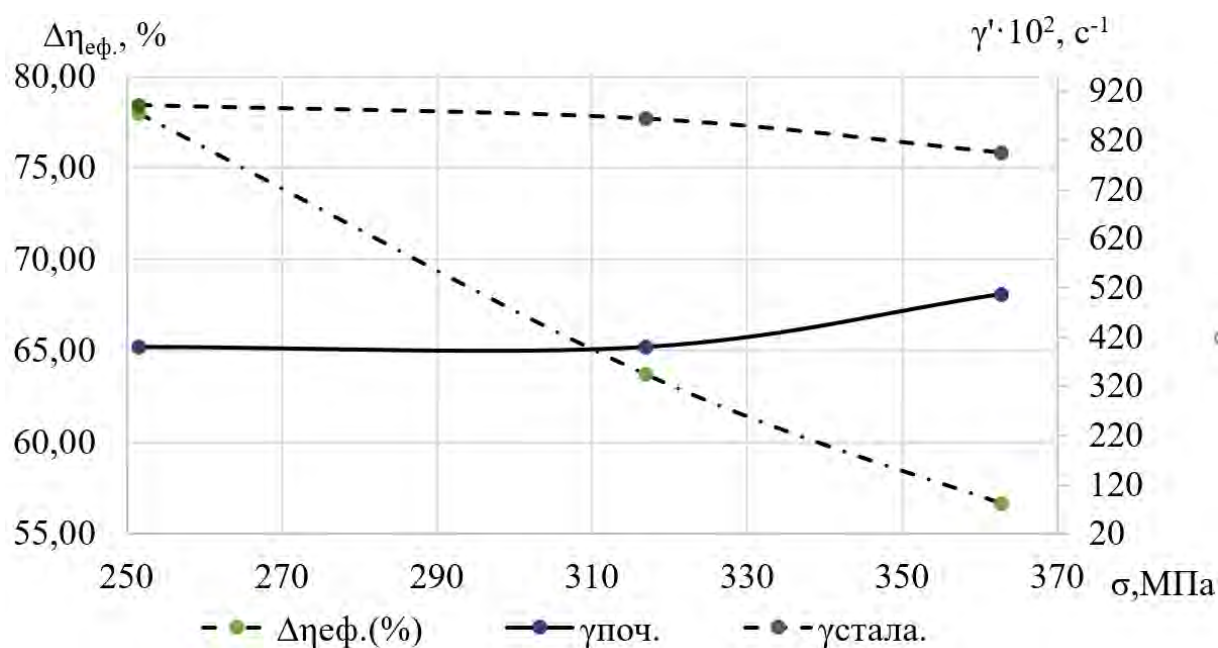


Рисунок 3.12 – Залежність ефективної в'язкості $\eta_{\text{еф}}$, початкового $\gamma_{\text{поч.}}$ і сталого $\gamma_{\text{стал.}}$ градієнта швидкості зсуву від контактної напруги $\sigma_{\max}$ для ПРОТЕК ЄМТ-8

При дослідженні мастильних властивостей моторної оливи TEMOL CLASSIC 15w40 зафіксовано прискорення формування початкової товщини мастильного шару при збільшенні навантаження, в середньому, в 1,04 рази по сумарній швидкості кочення. Зростання товщини мастильної плівки до $V_{\Sigma\text{коч}}=0,7\text{м/с}$ (складає 81% ; 85,6% та 88,8% відповідно при $\sigma_{\max}=251,5$; 316,9 та 362,7 МПа. Найбільше зростання товщини мастильного шару при $\sigma_{\max}=362,7\text{МПа}$ обумовлене реологічними властивостями оливи. За

експериментальними даними було встановлено, що при відновленні ефективна в'язкість зменшується на 60%, а напруга зсуву мастильного шару на 35% (при $\sigma_{\max}$ 251,5 та 316,9 МПа η_{ef} зменшується на 64%, а τ – в середньому на 37%) (рис.3.13).

Таким чином, можна зазначити, що особливості зміни реологічних характеристик, зокрема сповільнення (зменшення) η_{ef} в контакті при відновленні мастильним матеріалом ньютонівських властивостей при $\sigma_{\max}=362,7\text{МПа}$ обумовлює підвищення його несучої здатності в контакті.

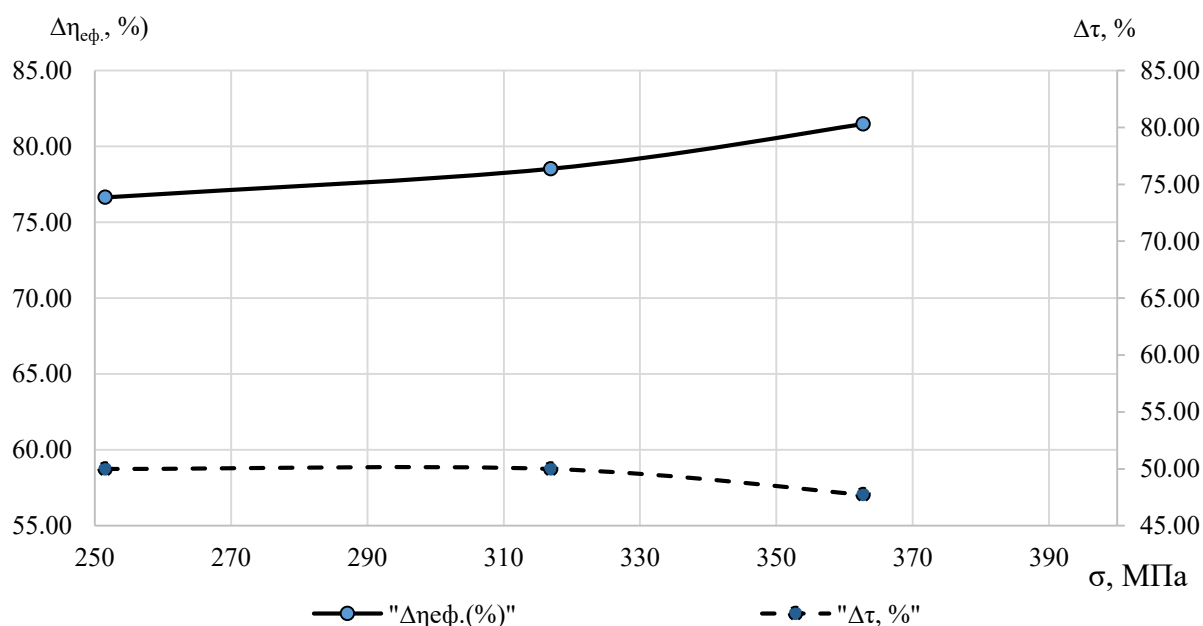


Рисунок 3.13 – Залежність ефективної в'язкості $\Delta\eta_{\text{ef}}$ та напруги зсуву мастильного шару $\Delta\tau$ від контактної напруги $\sigma_{\max}$ для TEMOL CLASSIC 15w40

На відміну від моторної оливи TEMOL CLASSIC 15w40, для оливи М8Г2К встановлено запізнення формування товщини мастильної плівки із збільшенням навантаження в 1,24 та 1,14 рази відповідно при зростанні навантаження до 316,9 та 362,7МПа (рис.3.14).

При дослідженні цієї оливи приріст товщини мастильного шару до $V_{\Sigma\text{коч}}=0,6\text{м/с}$ складає 76% при $\sigma_{\max}=251,5$, складає 77% ; 362,7 МПа та 79%

при $\sigma_{\max}=316,9$ МПа. Виходячи з цих результатів можна сказати, що для досліджуваних моторних олив існує різний механізм відновлення ньютонівських властивостей, який впливає безпосередньо на ефективність мащення.

Перш за все під впливом навантаження зростання ефективної в'язкості становить 53% для TEMOL CLASSIC 15w40 та 10% для оливи М8Г2К (рис.3.14). На нашу думку, підвищення η_{ef} для даних олив із збільшенням тиску обумовлено зростання когезійних зв'язків між неактивними компонентами мастильного матеріалу та інтенсифікацією структуризаційних процесів під впливом контактних поверхонь.

Підтвердженням є, насамперед, кінетика зміни напруги зсуву мастильного шару. Для TEMOL CLASSIC 15w40 – при підвищенні контактної напруги η_{ef} та τ зростають на 53% і 33% відповідно (рис.3.14). Для М8Г2К при підвищенні η_{ef} на 10% із збільшенням тиску τ зростає на 37%. Дані моторні оливи характеризуються низьким значенням τ , оскільки для них характерна нематична природа ущільнення.

Для моторної оливи TEMOL CLASSIC 15w40 при зростанні контактної напруги ($\sigma_{\max}$) з 251,5 до 362,7МПа встановлено зниження значення градієнту швидкості зсуву при початковому формуванні товщини мастильного шару на 31%, а для оливи М8Г2К навпаки, градієнт швидкості зсуву кореляційно зростає із підвищенням навантаження на 31%, що призводить до інтенсифікації процесів. Ми вважаємо, що даний ефект для оливи М8Г2К обумовлений запізненням відновлення ньютонівських характеристик внаслідок активації деструкційних процесів при початковому формуванні товщини мастильного шару, що призводить до утворення структурного каркасу, який характеризується високою напругою зсуву мастильного шару та стійкістю до змін градієнту швидкості зсуву.

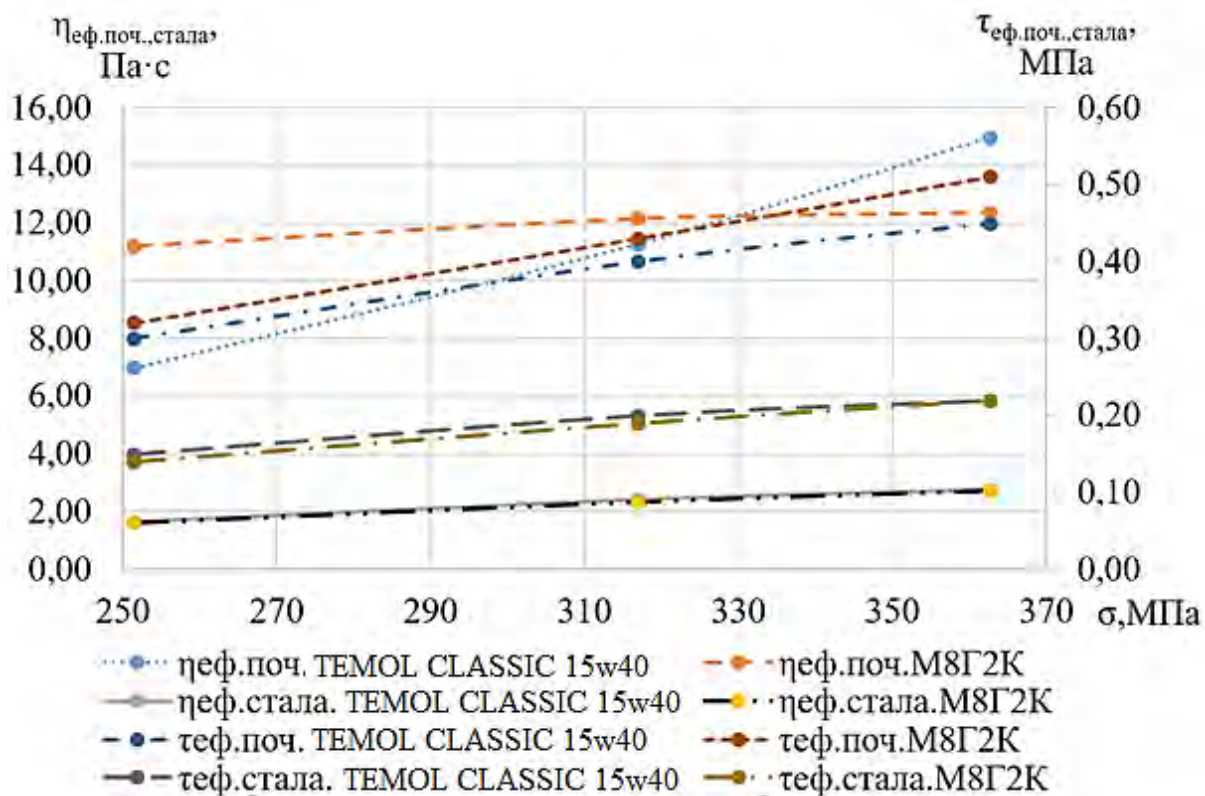


Рисунок 3.14 – Залежність ефективної в'язкості $\eta_{\text{еф}}$ та напруги зсуву τ від контактної напруги σ_{max} для TEMOL CLASSIC 15w40, M8Г2К

При відновленні ньютонівських властивостей градієнт швидкості зсуву (γ) при $\sigma_{\text{max}}=362,7\text{МПа}$ для олив TEMOL CLASSIC 15w40 та M8Г2К на 11% перевищує аналогічне значення при $\sigma_{\text{max}}=251,5\text{МПа}$ (рис.3.15). Це пов'язано з тим, що когезійні зв'язки між молекулами нематичної природи швидше руйнуються та дезорієнтуються, а з підвищенням навантаження несуча здатність такої структури зменшується, не досягається ефективного приросту товщини мастильної плівки, тому градієнт швидкості зсуву при збільшенні частки швидкості ковзання зростає.

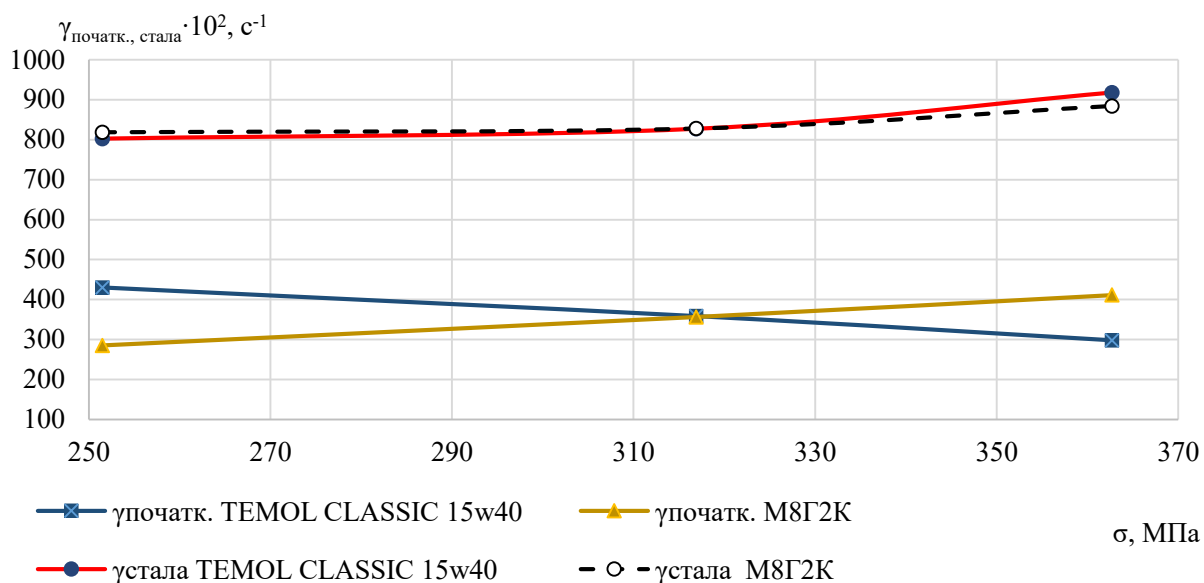


Рисунок 3.15 – Залежність градієнта швидкості зсуву γ від контактної напруги σ_{max} для TEMOL CLASSIC 15w40, M8Г2К

Також при відновленні ньютонівських властивостей оливою TEMOL CLASSIC 15w40 напруга зсуву мастильного шару створює додатковий опір зсуву. Так, τ при напрацюванні зменшується на 36%; 35% та 35,5% при досліджуваних контактних напругах, а для M8Г2К зниження даного параметру становить відповідно 43%; 42% та 45%. На нашу думку, зниження напруги зсуву мастильного шару забезпечується локалізацією дотичних напруг в об'ємній смектичній фазі, яка утворюється по мірі формування та адаптації мастильного шару в умовах поступового збільшення швидкості. Для двох досліджуваних моторних оли найефективніше значення τ спостерігається при $\sigma_{\text{max}}=251,5\text{МПа}$, що відповідає найбільшій сформованій товщині мастильного шару в контакті (рис.3.16).

В умовах зростання контактної напруги кінетика формування товщини мастильної плівки для моторних оли із збільшенням швидкості кочення залежить від реологічних особливостей оли, які обумовлені фізико-хімічними характеристиками базової основи та в'язкісної присадки.

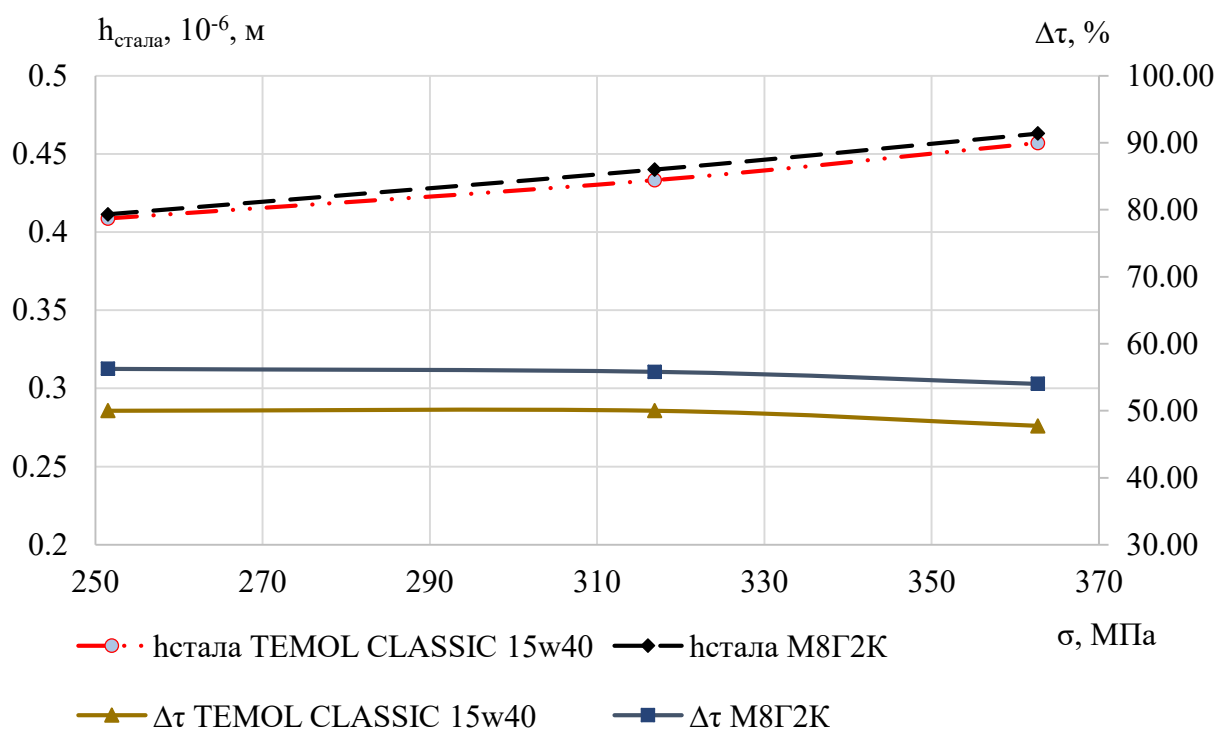


Рисунок 3.16 – Залежність сталої товщини $h_{\text{стал}}$ та напруги зсуву мастильного шару τ від контактної напруги σ_{max} для TEMOL CLASSIC 15w40, M8Г2K

Для універсальної моторно–трансмісійної оливи ЄМТ–8, на відміну від всіх досліджених олив, встановлено підвищення несучої здатності при збільшенні навантаження – товщина мастильного шару до $V_{\Sigma\text{коч}}=1\text{м/с}$ зростає на 71%; 73% та 74,5% відповідно при $\sigma_{\text{max}}=251,5$; 316,9 та 362,7 МПа. Згідно експериментальних даних щодо реологічних показників даної оливи необхідно зазначити, що відновлення ньютонівських властивостей із збільшенням швидкості кочення обумовлено зниженням ефективної в'язкості в контакті на 72%; 74% і 76% та зростанням градієнту швидкості зсуву в 2,23; 1,88 та 2,22 рази при досліджуваних контактних навантаженнях відповідно (рис.3.17).

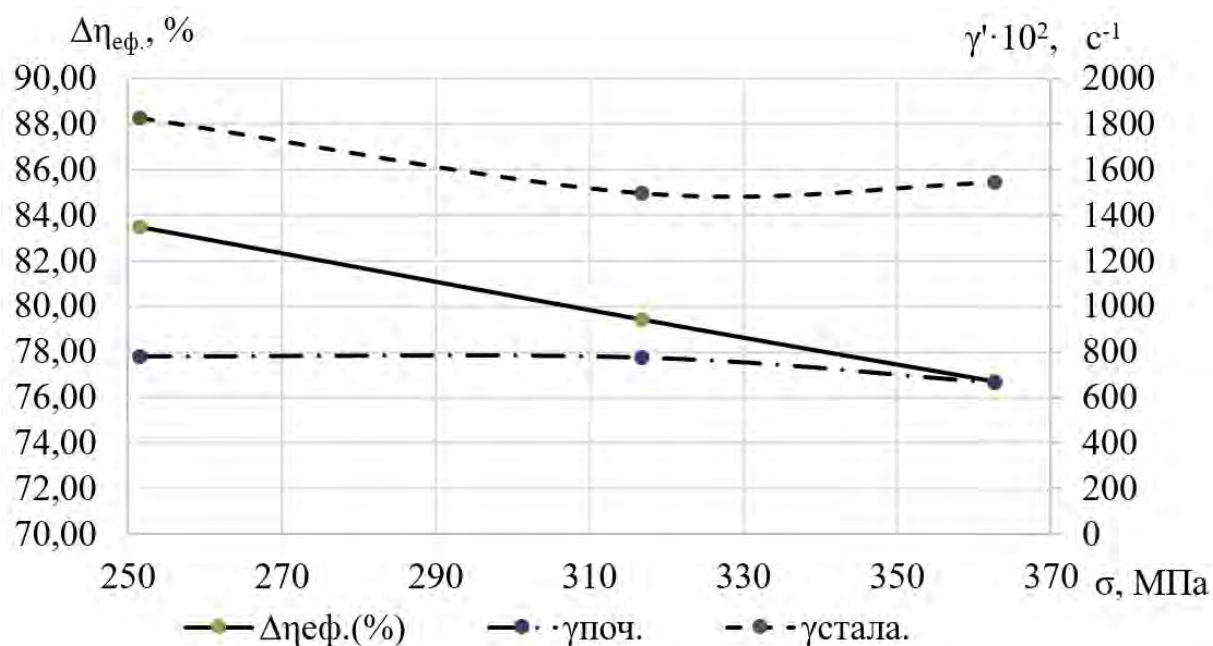


Рисунок 3.17 – Залежність ефективної в'язкості $\eta_{\text{эф}}$, початкового $\gamma_{\text{поч.}}$ і сталого $\gamma_{\text{стал.}}$ градієнта швидкості зсуву від контактної напруги σ_{max} для ЄМТ – 8

Також варто зазначити, що саме для цієї оливи при контактній нарузі $\sigma_{\text{max}}=362,7\text{МПа}$, початкове формування мастильного шару реалізується при найнижчому градієнті швидкості зсуву і невеликій сумарній швидкості, якому і відповідає найбільше значення $\eta_{\text{эф}}$, в порівнянні з реологічними властивостями оливи при $\sigma_{\text{max}}=251,5$ та $316,9$ МПа. Згідно отриманих експериментальних даних встановлено, що напруга зсуву масляного шару для універсальної моторно- трансмісійної оливи ЄМТ – 8 аналогічна даному параметру, встановленому для М10Г2К.

На рисунку 3.18 представлені значення ефективної в'язкості в контакті та напруги зсуву для олив ЄМТ–8, М10Г2К, ПРОТЕК ЄМТ-8, які відповідають сформованій товщині мастильного шару.

За атмосферних умов вищезазначені оливи характеризуються різними динамічними в'язкостями – η_{20} відповідно складає 0,076; 0,095 та 0,22 Па·с. При сформованій товщині мастильного шару, $\eta_{\text{эф.ст}}$, яке встановлене для

модифікованої оливи ПРОТЕК ЄМТ-8, перевищує даний параметр, визначений для універсальної моторно-трансмісійної оливи ЄМТ-8 на 52%. При цьому, різниця в напрузі зсуву мастильного шару, за таких умов становить 3%. В даному випадку саме прояв властивостей в'язкісних присадок впливає на реологічні характеристики в контакті.

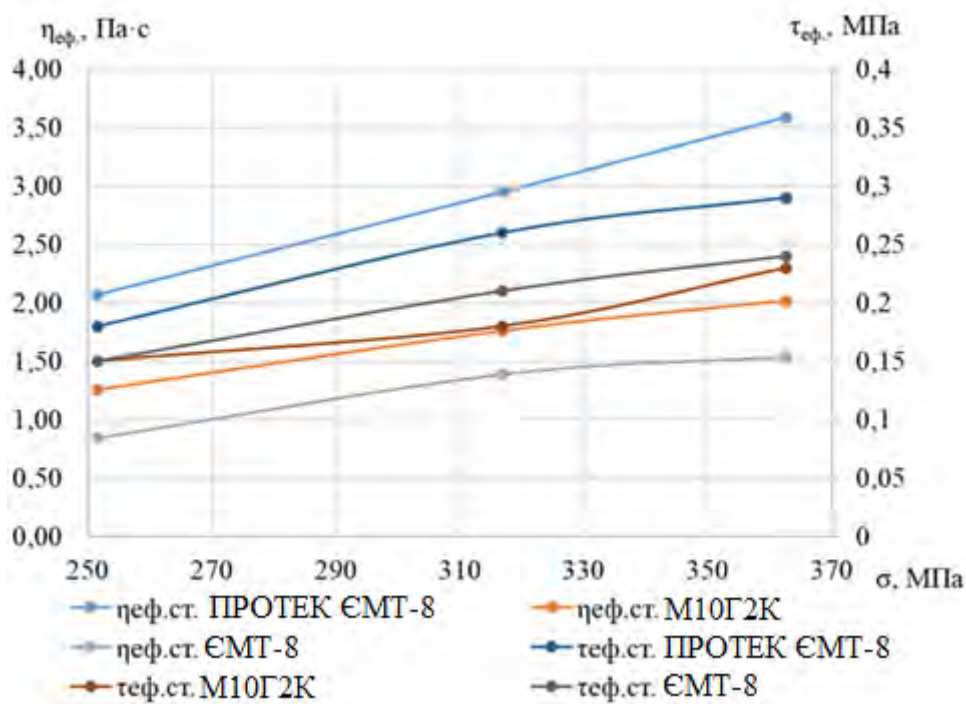


Рисунок 3.18 – Залежність ефективної в'язкості $\eta_{\text{эф.}}$ та сталої напруги зсуву мастильного шару $\tau_{\text{ст.}}$ від контактної напруги σ_{max} для ЄМТ– 8, М10Г2К, ПРОТЕК ЄМТ-8

Для моторної оливи М10Г2К встановлено, що напруга зсуву при $\sigma_{\text{max}}=251,5; 316,9$ та $362,7$ МПа на 1%; 2% та 3% нижче напруги зсуву мастильного шару для універсальної моторно–трансмісійної оливи ЄМТ-8, при цьому ефективна в'язкість в контакті моторної оливи М10Г2К на 23%; 21% та 32% більше $\eta_{\text{эф.}}$, ніж у ЄМТ-8. Нематична структура масляного шару моторної оливи М10Г2К характеризується низькими значеннями τ , та відносно невеликими значеннями градієнту швидкості зсуву, що призводить до динамічного приросту товщини мастильного шару в контакті в умовах

збільшення сумарної швидкості кочення, незалежно від контактного навантаження.

В умовах збільшення контактного навантаження мінеральна базова олива І-40А характеризується зростанням ефективності мащення в контакті, про що свідчить динаміка формування товщини мастильного шару. Так, при збільшенні швидкості кочення до 1 м/с товщина мастильного шару зростає на 56%; 58% та 58% відповідно при $\sigma_{\max}=251,5$; 316,9 та 362,7 МПа. Збільшення несучої здатності оливи І-40А обумовлено рядом факторів. Для даної оливи адаптація мастильного шару до зміни швидкості кочення відбувається із прискоренням – початкове формування мастильного шару зі збільшенням навантаження становить 0,128мкм при $V_{\Sigma\text{коч}}=0,119$; 0,108 та 0,108м/с. Що, в свою чергу, призводить до того, що в умовах початкового формування товщини мастильного шару в контакті створюються найнижчі градієнти швидкості зсуву, які сприяють приросту товщини мастильної плівки. А зменшення градієнту швидкості обумовлює зростання ефективної в'язкості в контакті. При початковому формуванні товщини мастильного шару оливою І-40А градієнт швидкості зсуву на 6% менший за γ , який зафіксований для ЄМТ–8. Зменшення γ призводить до інтенсифікації відновлення мастильної здатності оливи в контакті. При цьому в умовах початкового формування мастильної плівки, значення ефективної в'язкості оливи І 40 на 10%; 39% та 29% більше за $\eta_{\text{еф}}$, в контакті, що встановлена для ЄМТ–8, відповідно при $\sigma_{\max}=251,5$; 316,9 та 362,7 МПа, а при сформованій товщині, на 25%; 56% та 56% перевищує значення $\eta_{\text{еф}}$ оливи ЄМТ–8 при $\sigma_{\max}=251,5$; 316,9 та 362,7 МПа (рис.3.19).

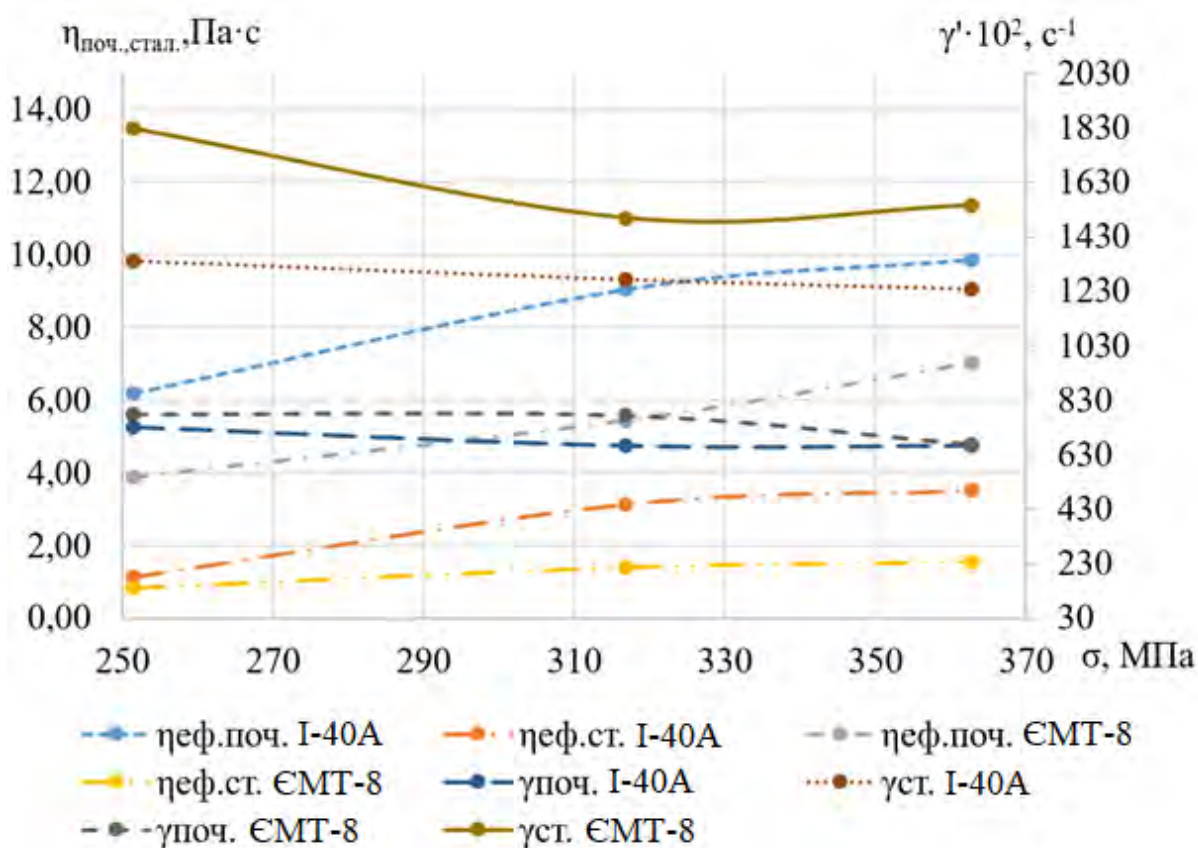


Рисунок 3.19 – Залежність початкової $\eta_{\text{эф.поч.}}$ та сталої $\eta_{\text{эф.ст.}}$ ефективної в'язкості, початкового $\gamma'_{\text{поч.}}$ і сталою $\gamma'_{\text{ст.}}$ градієнта швидкості зсуву від контактної напруги σ_{max} для EMT-8, I-40A

Якщо характеризувати залежність коефіцієнта тертя при коченні з проковзуванням, то у відповідності з ЕГДТМ, характер її визначається, в основному, ефективною в'язкістю оливи в контакті [114]. В умовах зростання контактного навантаження з 251,5 до 362,7 МПа для всіх оливи, що досліджуються, антифрикційні властивості змінювалися за наступною схемою: встановлено збільшення коефіцієнту тертя на 3% для моторної оливи TEMOL CLASSIC 15w40 і для I-40A – $f_{\text{т}}$ збільшується на 5%, для M10Г2К – $f_{\text{т}}$ збільшується на 2%, для оливи M8Г2К, EMT-8 – $f_{\text{т}}$ зростає на 9%, для оливи ПРОТЕК EMT-8 – $f_{\text{т}}$ збільшується на 6%. Таким чином була отримана чітка кореляційна залежність коефіцієнта тертя та напруги зсуву мастильного шару для всіх мастильних матеріалів. Збільшення контактного

навантаження призводить до зростання показників коефіцієнта тертя та напруги зсуву.

В умовах зростання швидкості кочення інтенсифікується формування товщини мастильного шару в контактi, що в свою чергу забезпечує локалізацію дотичних напруг зсуву в об'ємній фазі мастильного матеріалу та призводить до підвищення товщини цього шару, що вимірювали інтерференційним методом [114]. На рисунку 3.120 і рисунку 3.21 представлені залежності коефіцієнта тертя від швидкості кочення, що є аналогічними кінетиці зміни коефіцієнта тертя f_T від дійсної товщини мастильного шару.

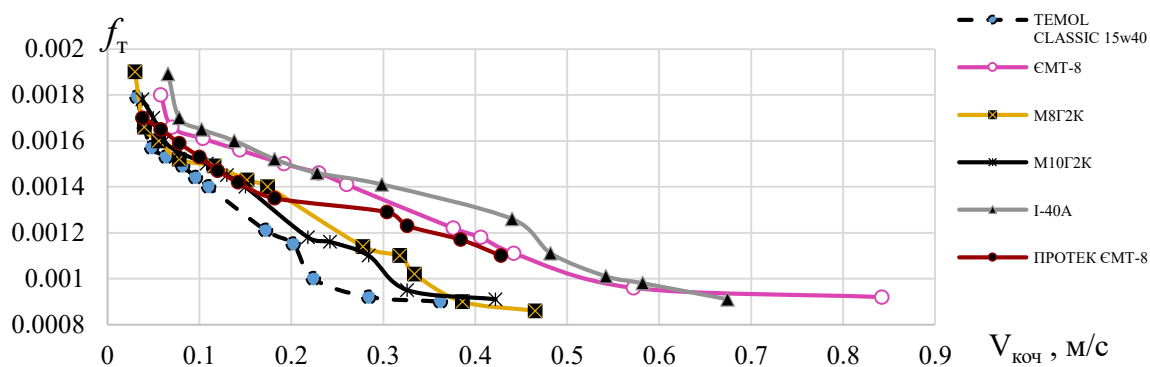


Рисунок 3.20 – Залежність коефіцієнту тертя (f_T) від швидкості кочення $V_{коч}$. ($\sigma_{max} = 251,5 \text{ МПа}$)

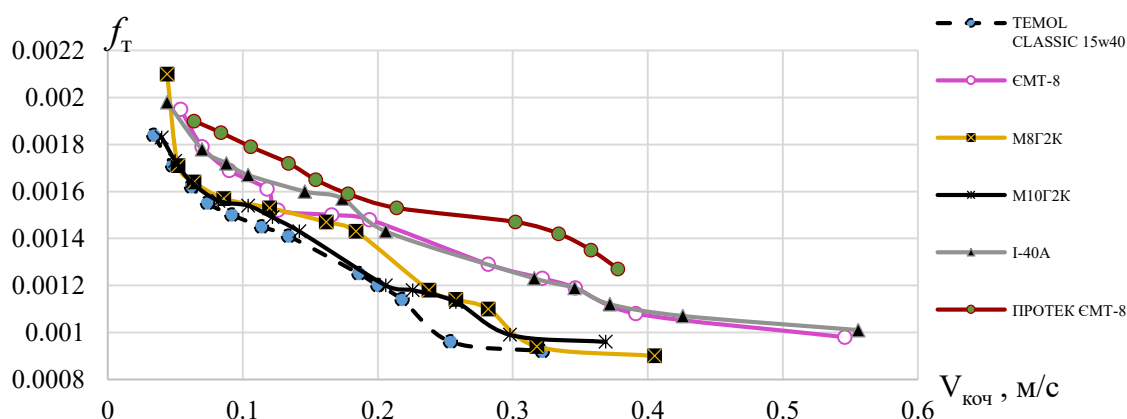


Рисунок 3.21 – Залежність коефіцієнту тертя (f_T) від швидкості кочення $V_{коч}$. ($\sigma_{max} = 362,7 \text{ МПа}$)

При цьому було зафіксовано зменшення ефективної в'язкості в контакті та напруги зсуву змащувального шару і у відповідності до отриманих експериментальних даних. Це обумовлено збільшенням градієнту швидкості зсуву внаслідок зростання швидкості ковзання. А зростання градієнту швидкості зсуву, в даних умовах, призводить до видалення компонентів структурованих граничних шарів в об'ємну смектичну фазу, відбувається локалізація дотичних напруг зсуву, а це в свою чергу забезпечує в контакті умови для домінування ЕГД та гідродинамічного режиму мащення (розрахунковий параметр мащення $\lambda \approx 5,7-6,0$). Саме при таких показниках досліджені мастильні матеріали характеризуються найефективнішими антифрикційними властивостями.

Висновки до розділу 3:

1. Триботехнічні вимірювання об'ємного зносу та початкового коефіцієнту тертя в залежності від пробігу впродовж 7500 м на трибометрі CSM Instruments SA дали можливість встановити кращий зразок моторної оливи, що містить 0,05% беззольного (Zn-Free) модифікатора тертя, з поліпшеними протизношувальними властивостями при різних температурах - 20 та 70°C.

2. Встановлена стабілізація коефіцієнту тертя для усіх зразків при локальному нагріві оливи до 70°C (робоча температура важконавантажених трансмісій) впродовж всього часу пробігу, що пояснює створення оптимальної еластогідродинамічної плівки, яка позитивно впливає на антифрикційні властивості.

3. При зростанні швидкості кочення, для всіх досліджених мастильних матеріалів відбувається підвищення товщини мастильного шару в центральній зоні контакту, як в умовах чистого кочення так і кочення

з проковзуванням при рясному мащенні, тим самим забезпечується перехід від граничного до ЕГД режимів мащення.

4. Динаміка формування товщини мастильного шару в умовах чистого кочення залежить як від в'язкості базової основи мастильного матеріалу, в'язкісних присадок, а також від типу контактних поверхонь:

- для моторної оливи М8Г2К було зафіксовано підвищення індукційного періоду зростання товщини мастильного шару;

- щодо динаміки формування товщини мастильного шару модифікованою оливою ПРОТЕК ЄМТ-8, необхідно зазначити, що на відміну від експериментальних показників оливою ЄМТ-8, модифікована олива забезпечує більш ефективне та надійне мащення контактних поверхонь в дослідженому діапазоні швидкостей та навантаження за рахунок наявної оптимальної в'язкості, що забезпечує низький коефіцієнт тертя.

5. В умовах кочення з проковзуванням для олив І-40А, М8Г2К та ПРОТЕК ЄМТ-8 зменшується початковий етап формування мастильної плівки в 1,1, 1,33, 1,17 рази відповідно, для олив TEMOL CLASSIC 15w40, ЄМТ-8 та М10Г2К – навпаки збільшується період початку формування мастильної плівки в 1,05, 1,09 та 1,04 рази відповідно, що призводить до реалізації в контакті змішаного режиму мащення в період пуску.

6. В умовах кочення з проковзуванням процес формування мастильної плівки залежить від стійкості компонентів оливи до градієнту швидкості зсуву, який має тенденцію до постійного зростання:

- для всіх досліджених мастильних матеріалів збільшується період встановлення сталої товщини мастильного шару – 1,15; 2,3; 1,72; 1,12; 1,58; 1,17 відповідно для олив TEMOL CLASSIC 15w40; ЄМТ-8; І-40А; М8Г2К; М10Г2К; ПРОТЕК ЄМТ-8;

7. За результатами експериментальних досліджень були встановлені закономірності кінетики зміни реологічних характеристик олив різного експлуатаційного призначення, які полягають в наступному:

- виявлена залежність ефективної в'язкості в контакті від градієнту швидкості зсуву, отже оливи набувають властивостей неньютонівських рідин. Ефективна в'язкість в контакті є найбільшою при найменшій сумарній швидкості кочення в умовах початкового формування товщини мастильного шару;

- товщина мастильного шару в початковий період формування мастильної плівки, незалежно від типу оливи, на 6 – 8% перевищує товщину мастильної плівки, визначену за формулами Даусона та Хемрока. При розрахунку сталої товщини мастильного шару, яка встановлена експериментальним шляхом, та обчисленої за даними формулами, розбіжність становить 4%. Це обумовлено тим, що при відновленні ньютонівських властивостей олив η_{ef} в контакті зменшується для TEMOL CLASSIC 15w40 на 77%, для ЄМТ-8 на 77%; для І-40А на 74%, для М8Г2К на 86%; для М10Г2К на 79% та для ПРОТЕК ЄМТ-8 на 72%; в умовах зростання товщини мастильного шару зафіксовано зниження коефіцієнту тертя та напруги зсуву цього шару: для TEMOL CLASSIC 15w40 f та τ знижуються на 50%, ЄМТ-8 – на 49%, І-40А – на 52%, М8Г2К – на 55%, М10Г2К – на 49%, ПРОТЕК ЄМТ-8 на 38%.

8. Встановлено підвищення несучої здатності для моторної оливи TEMOL CLASSIC 15w40 при $\sigma_{\text{max}}=362,7\text{МПа}$, що обумовлено сповільненням в зменшенні ефективної в'язкості в контакті при відновленні мастильним матеріалом ньютонівських властивостей.

9. Встановлена реверсія градієнту швидкості зсуву із збільшенням навантаження для олив TEMOL CLASSIC 15w40, ЄМТ-8 та І-40А. Що обумовлено запізненням відновлення ньютонівських характеристик олив,

внаслідок активації деструкційних процесів в умовах початкового формування товщини мастильного шару.

10. Зафіксовано залежність коефіцієнта тертя та напруги зсуву мастильного шару при зростанні навантаження від 251,5МПа до 362,7МПа: для олив TEMOL CLASSIC 15w40 f зростає на 3%, для ЄМТ-8 – на 7%, І-40А – на 30%, М8Г2К – на 10%, М10Г2К – на 2% та ЄМТ ПРОТЕК ЄМТ-8 – на 6%, при цьому τ зростає для олив TEMOL CLASSIC 15w40 – на 33%, для ЄМТ-8 – на 36%, І-40А – на 51%, М8Г2К – на 37%, М10Г2К – на 32% та ПРОТЕК ЄМТ-8 – на 35%.

РОЗДІЛ 4

ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ТРИБОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНОГО МАЩЕННЯ

Велика кількість наукових робіт пов'язана з дослідженнями у системі мащення, починаючи з оцінки впливу їх конструктивних особливостей на режими навантажень у вузлах її приладів до відповідного впливу на подачу та розподіл потоків оливи до пар тертя безпосередньо механізмів. Також досліджуються питання діагностування та виявлення різних несправностей, ефективності утворення масляних шарів у трибоз'єднаннях та виникнення режимів, що пов'язані зі створенням переходів між різними видами тертя і проявів обмеженого мащення [115 – 119].

Аналіз сучасного стану проблеми підвищення довговічності трибомеханічних систем показує, що мащення є одним із найбільш поширених і ефективних засобів впливу на процеси перенесення енергії і матеріалів у трибомеханічних системах, зниження тертя та зменшення інтенсивності зношування деталей. Будь яке порушення встановленого режиму мащення має негативні наслідки для працездатності трибомеханічних систем. Для встановлення найбільш сприятливих умов роботи трибомеханічних систем надзвичайно висока увага приділяється застосуванню принципів контактної гідродинаміки [115]. Достатньо часто умови роботи на практиці суттєво відрізняються від тих ідеальних умов, які приймаються чи забезпечуються в більшості теоретичних і експериментальних дослідженнях.

Руйнування мастильного шару породжує виникнення і розвиток процесу заїдання та схоплювання [98 – 102]. Якщо поверхні тертя розділені мастильним шаром достатньої товщини, то заїдання і схоплювання не може з'явитися, як відмічено в [102, 103, 120]. Виходячи з цього можна зазначити,

що відмова трибомеханічної системи, яка експлуатується в режимі ЕГД-мащення, виникає при виконанні двох умов:

1. Необхідна умова – руйнування ЕГД мастильного шару.
2. Допоміжна умова – руйнування поверхневих шарів поверхонь тертя.

Якщо допоміжна умова – руйнування поверхневих шарів поверхонь тертя вивчена достатньо об'ємно [114, 121, 122], необхідна умова – руйнування ЕГД мастильного шару, як вказує Ю.М. Дроздов [97], майже не досліджена.

Це в свою чергу підтверджує визначну роль основного ЕГД показника – товщини мастильного шару, як критерію розвитку обмеженого мащення, що безпосередньо породжує розвиток заїдання і схоплювання. Досить часто випускається із уваги практичний фактор при роботі трибомеханічної системи, а саме, подача і розподіл мастильного матеріалу в околицях контакту, що може призвести у випадку недостатнього мащення до виникнення обмеженого мащення. Аналіз вхідної зони ЕГД – контакту в умовах обмеженого мащення дуже важливий. Необхідно відмітити, що якщо вхідна зона контакту достатньо заповнена мастильним матеріалом, то у відповідності з рівнянням Рейнольдса, тиск, що зростає, сприяє утворенню стійкої товщини мастильного шару в контакті тертя, яка не чутлива до подальшого збільшення подачі мастильного матеріалу. Це підтверджує наявність в контакті тертя ясного мащення. У випадку недостатнього заповнення вхідної зони, ріст тиску спізнюється і товщина мастильного шару зменшується – це характеризує виникнення обмеженого мащення. Таким чином детальне розкриття механізму обмеженого мащення буде сприяти підвищенню довговічності і надійності деталей трибомеханічних систем. Особливо важливим є той факт, що виникнення режиму обмеженого мащення можливе навіть в умовах ясного мащення. Але на практиці дуже важко визначити межу між режимом ясного мащення та обмеженим

мащенням. Як відмічено в [123], набутий досвід в триботехніці дозволяє розрізняти два механізми обмеженого мащення: мастильне та плівкове. Причому обмежене мащення спостерігається при гідродинамічному, ЕГД і змішаному режимах мащення, а плівкове – при граничному мащенні. Необхідно відмітити, що сучасні методи вимірювання товщини мастильного шару дають точні результати при великих її значеннях, порядку декілька мікрометрів. Сам же процес обмеженого мащення протікає при досить малих (ультратонких) значеннях товщини мастильного шару (менше, ніж 1мкм). Саме поведінка цих шарів, що визначають весь комплекс процесів, які присутні в контакті тертя, і викликають безпосередній інтерес. Зокрема, розробка інтерференційного метода вимірювання ультратонких мастильних шарів дозволила більш обґрунтовано підійти до дослідження механізму змащувальної дії в умовах обмеженого мащення, що дозволяє отримати достовірну картину розвитку цього процесу [97, 124].

4.1 Кінетика зміни товщини мастильного шару в умовах обмеженого мащення

4.1.1 Вплив швидкості кочення на формування товщини мастильного шару в контакті в умовах чистого кочення. Для встановлення впливу параметру швидкості кочення (умова чистого кочення) на формування товщини мастильного шару в центральній зоні контакту були використані ті ж мастильні матеріали, що і в попередньому розділі. Регулювання швидкості кочення в умовах експерименту відбувалося в діапазоні від 0 до 1,15м/с, при цьому об'ємна температура олив впродовж експерименту становила 20° С; контактна напруга складала 251,5МПа.

Проведені дослідження в даному розділі обмежувалися критичною швидкістю, після якої відбувалося зменшення товщини мастильного шару до мінімальної.

При дослідженні оливи TEMOL CLASSIC 15w40 встановлено, що формування товщини мастильного шару відбувається при швидкості $V_{\Sigma k}=0,08\text{ м/с}$, дійсна товщина мастильного шару склала $h_d=0,123\times 10^{-6}\text{ м}$ (рис. 4.1), при цьому реалізується змішаний режим мащення $\lambda=1,2$ (рис. 4.2). Із ростом швидкості товщина мастильного шару зростає і при швидкості $V_{\Sigma k}=0,404\text{ м/с}$ вона складає $h_d=0,409\times 10^{-6}\text{ м}$, при цьому реалізується гідродинамічний режим мащення $\lambda=4,09$ (рис. 4.2), який домінує до $V_{\Sigma k}=0,54\text{ м/с}$.

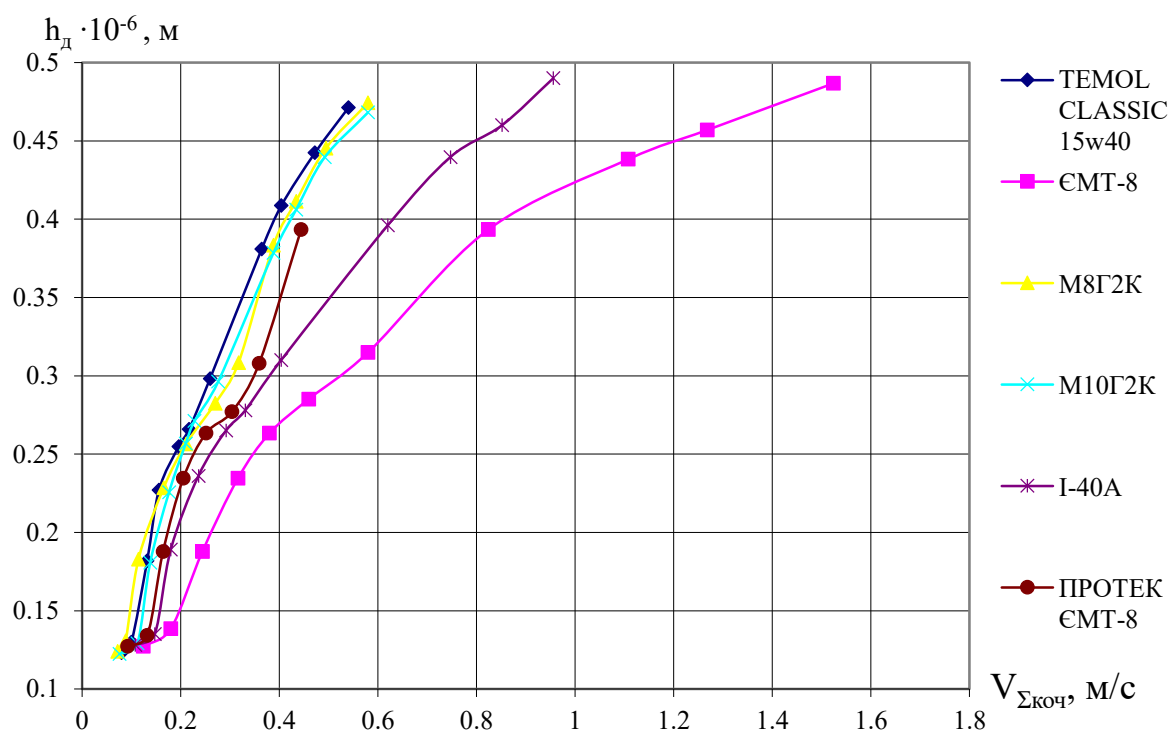


Рисунок 4.1 – Формування товщини мастильного шару h_d в контакті в умовах чистого кочення при зростанні швидкості $V_{\Sigma k}$.

Використовуючи моторну оливу М8Г2К встановлено, що при сумарній швидкості кочення $V_{\Sigma k}=0,072\text{ м/с}$ відбувається формування товщини масляної плівки, яка складає $h_d=0,124\times 10^{-6}\text{ м}$ (рис. 4.1), при цьому встановлюється змішаний режим мащення $\lambda=1,24$ (рис. 4.2). Досягнувши $V_{\Sigma k}=0,444\text{ м/с}$ товщина мастильного шару складає $h_d=0,411\times 10^{-6}\text{ м}$ (рис. 4.1), при цьому реалізується гідродинамічний режим мащення $\lambda=4,11$ (рис. 4.2), характерний до $V_{\Sigma k}=0,58\text{ м/с}$.

Порівняльний аналіз щодо властивостей досліджених олив TEMOL CLASSIC 15w40 та М8Г2К показав, що в даних умовах дослідження обидва мастильні матеріали формують майже аналогічні товщини масляної плівки (згідно інтерференційного методу, (різниця 1,2-2,2%)) при і майже аналогічних швидкостях кочення (різниця 7-10%), що також можна пояснити вмістом іншого комплексу присадок.

Застовуючи моторну оливу М10Г2К встановлено, що при сумарній швидкості кочення $V_{\Sigma k}=0,076\text{ м/с}$ відбувається формування товщини масляної плівки, яка складає $h_d=0,122\times 10^{-6}\text{ м}$ (рис.4.1), при цьому реалізується змішаний режим мащення $\lambda=1,223$ (рис.4.2). Досягнувши $V_{\Sigma k}=0,452\text{ м/с}$ товщина мастильного шару складає $h_d=0,406\times 10^{-6}\text{ м}$ (рис.4.1), при цьому встановлюється ЕГД режим мащення $\lambda=4,061$ (рис.4.2).

Встановлено що олива ЄМТ-8 при $V_{\Sigma k}=0,124\text{ м/с}$ формує товщину масляної плівки, яка складає $h_d=0,127\times 10^{-6}\text{ м}$ (рис. 4.1), при цьому реалізується змішаний режим мащення $\lambda=1,27$ (рис. 4.2). Досягнувши швидкості $V_{\Sigma k}=1,108\text{ м/с}$ товщина мастильного шару складає $h_d=0,422\times 10^{-6}\text{ м}$ (рис. 4.1), при цьому реалізується ЕГД режим мащення $\lambda=4,22$ (рис. 4.2), який домінує до $V_{\Sigma k} = 1,524\text{ м/с}$.

Досліджуючи оливу І-40А встановлено, що товщина масляної плівки формується при сумарній швидкості кочення $V_{\Sigma k}=0,108\text{ м/с}$ і становить $h_d=0,128\times 10^{-6}\text{ м}$ (рис. 4.1), при цьому реалізується змішаний режим мащення $\lambda=1,28$ (рис. 4.2). Досягнувши швидкості кочення $V_{\Sigma k}=0,796\text{ м/с}$ товщина

мастильного шару складає $h_d=0,425 \times 10^{-6} \text{ м}$ (рис. 4.1), при цьому встановлюється ЕГД режим мащення $\lambda=4,25$ (рис. 4.2), який характерний до $V_{\Sigma k} = 0,956 \text{ м/с}$.

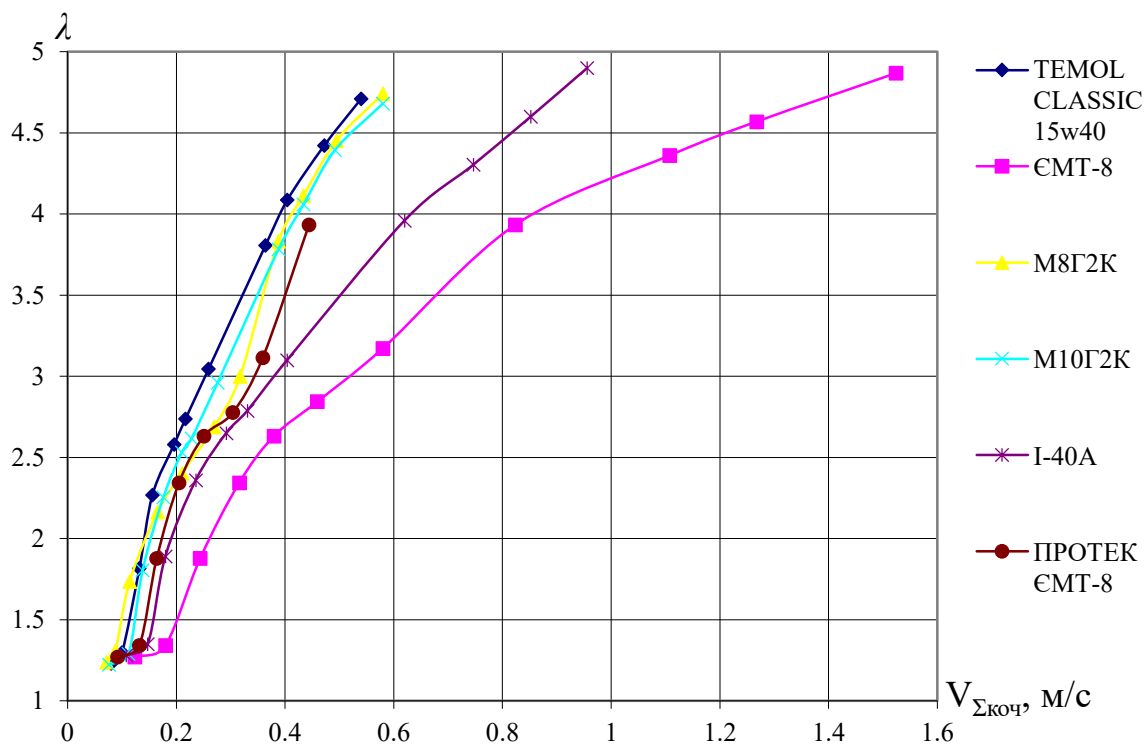


Рисунок 4.2 – Зміна режимів мащення λ при збільшенні сумарної швидкості кочення контактуючої пари $V_{\Sigma \text{коч.}}$

При застосуванні оливи ПРОТЕК ЄМТ-8 встановлено, що товщина масляної плівки формується при сумарній швидкості кочення $V_{\Sigma k}=0,092 \text{ м/с}$ і становить $h_d=0,127 \times 10^{-6} \text{ м}$ (рис. 4.1), при цьому реалізується змішаний режим мащення $\lambda=1,27$ (рис. 4.2). Досягнувши швидкості кочення $V_{\Sigma k}=0,444 \text{ м/с}$ товщина мастильного шару складає $h_d=0,393 \times 10^{-6} \text{ м}$ (рис. 4.1), при цьому встановлюється еластогідродинамічний режим мащення $\lambda=3,932$ (рис. 4.2), який не змінювався при подальшому збільшенні швидкості кочення.

За результатами проведених експериментальних досліджень можна зазначити, що в умовах обмеженого мащення для всіх мастильних матеріалів була встановлена аналогічна закономірність зміни приросту

товщини мастильного шару в умовах чистого кочення, що і при рясному мащенні, тобто було зафіксовано, що по мірі зростання швидкості кочення прискорюється формування товщини мастильного шару в контакті, в центральній зоні контакту двох тіл. Приріст товщини мастильної плівки призводить до переходу від змішаного до гідродинамічного режиму мащення для досліджених мастильних матеріалів, окрім оливи ПРОТЕК ЄМТ-8, для якої вдалося досягнути лише еластогідродинамічного режиму.

Для оливи І-40А встановлене прискорення швидкості початкового формування товщини мастильного шару на 18%. На нашу думку це спричинено тим, що дана олива найбільше розріджується, при цьому збільшується кінетична енергія молекул, інтенсифікуються адсорбційні процеси на межі метал–мастильний матеріал та скло–мастильний матеріал. Оскільки контактні напруги, які діють в центральній зоні контакту, не обумовлюють відтиснення молекулярних компонентів мастильного матеріалу на периферійні зони, то в умовах формування початкової товщини мастильного шару при низькій швидкості цей матеріал із прискоренням релаксує в центральну зону контакту, що зменшує час адаптації компонентів оливи до швидкості.

Моторна олива М10Г2К формує товщину мастильного шару, яка забезпечує реалізацію змішаного режиму мащення, при сумарній швидкості кочення ($V_{\Sigma k}=0,076\text{ м/с}$). Цей показник є аналогічним, як і при рясному мащенні, що можливо пояснити саме зі збільшенням кінетичної енергії молекул та інтенсифікації адсорбційних процесів при використанні обраної пари тертя в даних умовах експерименту.

Моторні оливи TEMOL CLASSIC 15w40, М8Г2К та універсальні оливи ЄМТ–8 і ПРОТЕК ЄМТ-8 характеризуються запізненням у формуванні початкової товщини мастильного шару – $V_{\Sigma k}$ при обмеженому мащенні зростає в 1,25; 1,2; 1,07; 1,21 рази, в порівнянні з умовами рясного мащення. В умовах наших експериментів було зафіксовано незначне

підвищення температури в зоні контакту, в середньому, 3-5°C, але фактично вона не впливає на кінетичну енергію молекул. Основним чинником при формуванні масляної плівки є зростання вектора швидкості кочення, в результаті дії останнього відбувається інтенсивніше втягування мастильного матеріалу в зону контакту та зростання товщини мастильного шару. Аналогічні результати було отримано в роботі [95]. Також в роботах [97, 125] було зазначено, що компоненти мастильного матеріалу здатні мігрувати до ділянок контактних поверхонь з підвищеними температурами та забезпечувати прискорення формування масляної розділяючої плівки.

Враховуючи вищезазначені результати можна сказати, що при переході трибомеханічної системи в умови обмеженого мащення необхідно очікувати подовження реалізації в контакті напівсухого та змішаного режимів мащення, а домінуючим чинником при формуванні оптимальної товщини мастильного шару є швидкість кочення із зростанням якої інтенсифікується утворення мастильної плівки, що забезпечує еластогідродинамічний режим мащення для оливи ПРОТЕК ЄМТ-8 та гідродинамічний режим мащення в контакті для інших досліджуваних мастильних матеріалів.

4.1.2 Вплив швидкості кочення із проковзуванням на формування товщини мастильного шару в контакті. Для встановлення впливу швидкості кочення з проковзуванням (20%) на формування мастильної плівки в центральній зоні контакту в умовах обмеженого мащення були проведені експериментальні дослідження з використанням тих же мастильних матеріалів, що і в попередньому параграфі. Швидкість кочення змінювалася від 0 до 1,52м/с; протягом експерименту температура мастильних матеріалів становила 20°C; контактна напруга складала 251,5МПа.

Досліджуючи оливу TEMOL CLASSIC 15w40 встановлено, що формування товщини мастильного шару відбувається при сумарній

швидкості кочення $V_{\Sigma\text{коч.}}=0,08\text{м/с}$, дійсна товщина мастильного шару, згідно методу оптичної інтерферометрії, складає $h_d=0,123\times 10^{-6}\text{м}$ (рис.4.3), при цьому реалізується змішаний режим мащення $\lambda=1,23$ (рис.4.4). Поступово збільшуючи швидкість, відмічено, що товщина мастильного шару також зростає. При швидкості кочення $V_{\Sigma\text{коч.}}=0,404\text{м/с}$ зафіксований ЕГД режим мащення $\lambda=4,08$ (рис.4.4) при цьому товщина мастильної плівки складає $h_d=0,408\times 10^{-6}\text{м}$ (рис.4.3), який домінує до $V_{\Sigma\text{коч.}}=0,54\text{м/с}$.

Використовуючи в якості мастильного матеріалу трансмісійну оливу М8Г2К встановлено, що при досить невеликій сумарній швидкості кочення, а саме при $V_{\Sigma\text{коч.}}=0,072\text{м/с}$ відбувається формування товщини мастильного шару, яка складає $h_d=0,124\times 10^{-6}\text{м}$ (рис.4.3), при цьому реалізується змішаний режим мащенням $\lambda=1,24$ (рис.4.4). Досягнувши швидкості кочення $V_{\Sigma\text{коч.}}=0,444\text{м/с}$ товщина мастильної плівки складає $h_d=0,411\times 10^{-6}\text{м}$ (рис.4.3), при цьому встановлюється ЕГД режим мащення $\lambda=4,11$ (рис.4.4), характерний до $V_{\Sigma\text{коч.}}=0,58\text{ м/с}$.

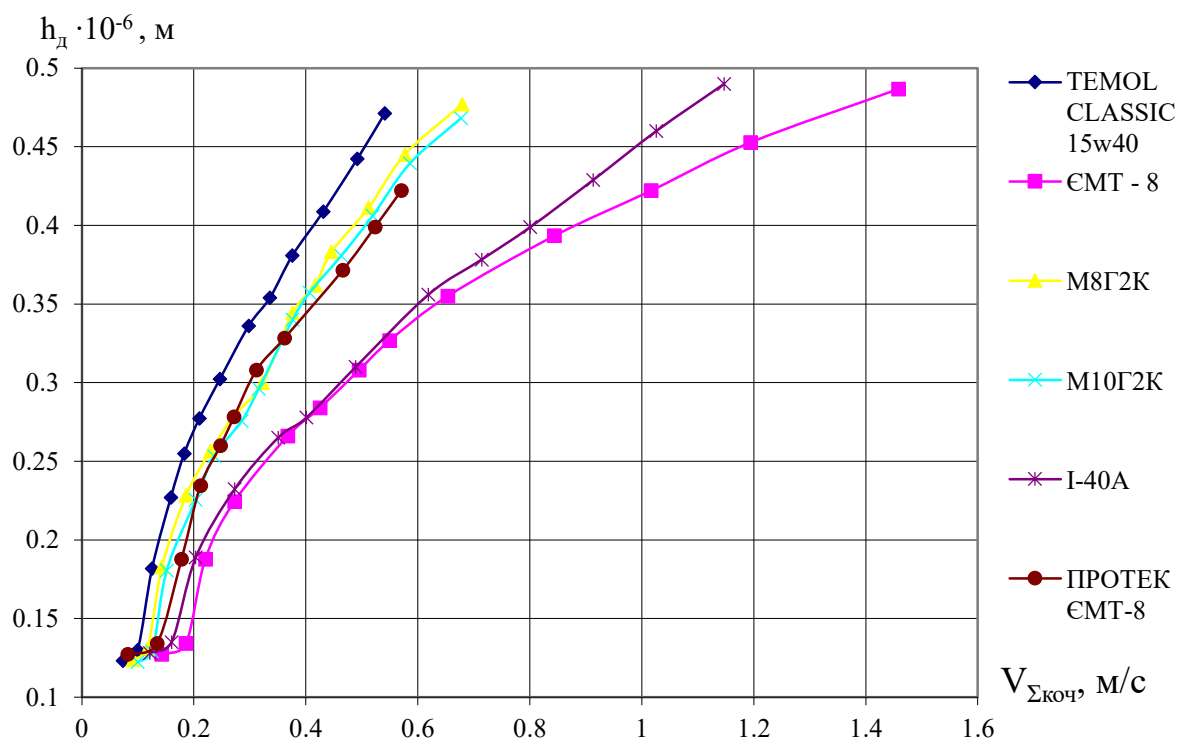


Рисунок 4.3 – Залежність дійсної товщини мастильного шару h_d від сумарної швидкості кочення $V_{\Sigma\text{коч}}$ при проковзуванні 20% (20 °С)

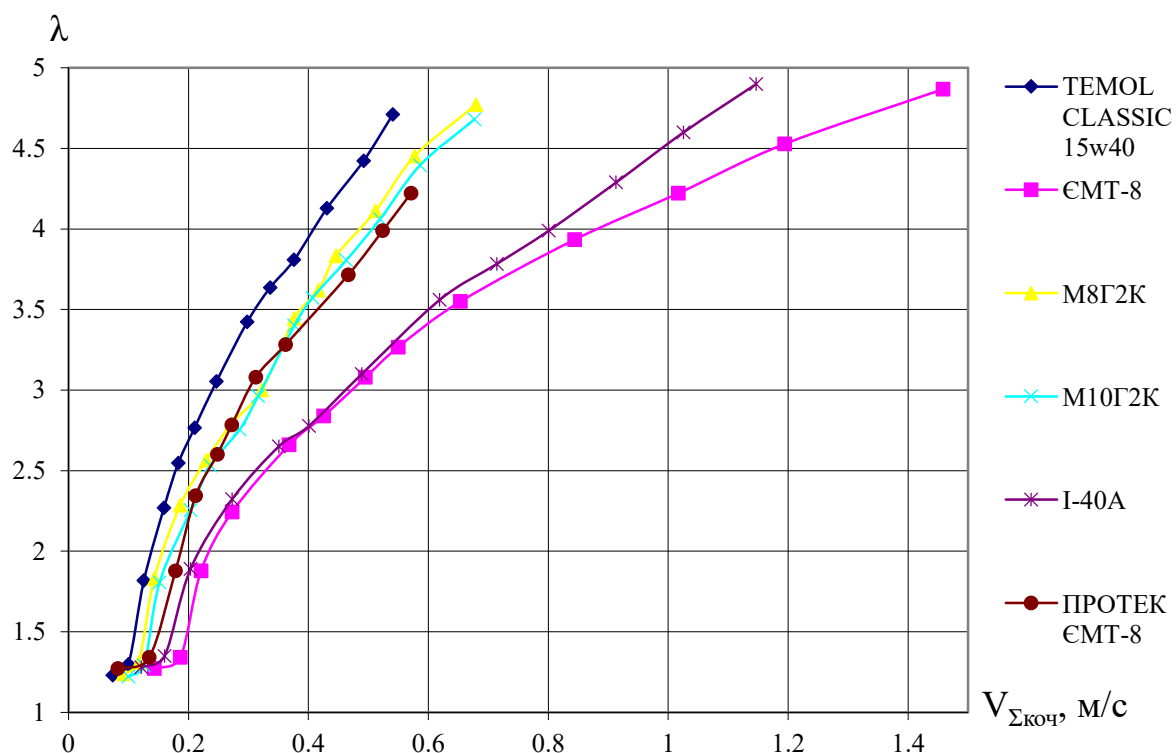


Рисунок 4.4 – Залежність режиму мащення λ від сумарної швидкості кочення $V_{\Sigma \text{коч.}}$

Досліджуючи моторну оливу SAEM10Г2К встановлено, що мастильна плівка формується при сумарній швидкості $V_{\Sigma \text{коч.}}=0,076\text{м/с}$, товщина якої складає $h_d=0,122 \times 10^{-6}\text{м}$ (рис.4.3), при цьому реалізується змішаний режим мащення $\lambda=1,22$ (рис.4.4). Товщина мастильної плівки в даному випадку також зростає із збільшенням швидкості кочення. Досягнувши швидкості кочення $V_{\Sigma \text{коч.}}=0,452\text{м/с}$ вона складає $h_d=0,406 \times 10^{-6}\text{м}$ (рис.4.3), при цьому встановлюється ЕГД режим мащення $\lambda=4,06$ (рис.4.4), який домінує до $V_{\Sigma \text{коч.}}=0,58\text{м/с}$.

При використанні універсальної моторно-трансмісійної оливи ЄМТ-8 встановлено, що товщина мастильної плівки формується при сумарній швидкості кочення $V_{\Sigma \text{коч.}}=0,142\text{м/с}$ і становить $h_d=0,127 \times 10^{-6}\text{м}$ (рис.4.3), при цьому реалізується змішаний режим мащення $\lambda=1,27$ (рис.4.4). Досягнувши швидкості кочення $V_{\Sigma \text{коч.}}=1,02\text{м/с}$ товщина мастильного шару складає

$h_d=0,422 \times 10^{-6} \text{ м}$ (рис.4.3), при цьому встановлюється ЕГД режим мащення $\lambda=4,22$ (рис.4.4), який домінує до $V_{\Sigma\text{коч.}}=1,46 \text{ м/с}$.

Застовуючи мінеральну базову оливу І-40А встановлено, що формування товщини мастильної плівки відбувається при швидкості кочення $V_{\Sigma\text{коч.}}=0,121 \text{ м/с}$, при цьому реалізується змішаний режим мащення $\lambda=1,28$ (рис.4.4), дійсна товщина мастильної плівки складає $h_d=0,128 \times 10^{-6} \text{ м}$ (рис.4.3). При досягненні швидкості кочення $V_{\Sigma\text{коч.}}=0,91 \text{ м/с}$, товщина мастильної плівки складає $h_d=0,425 \times 10^{-6} \text{ м}$ (рис.4.3), при цьому встановлюється ЕГД режим мащення $\lambda=4,25$ (рис. 4.4), який реалізується до $V_{\Sigma\text{коч.}}=1,15 \text{ м/с}$.

При використанні оливи ПРОТЕК ЄМТ-8 встановлено, що товщина масляної плівки формується при сумарній швидкості кочення $V_{\Sigma\text{коч.}}=0,08 \text{ м/с}$ і становить $h_d=0,127 \times 10^{-6} \text{ м}$ (рис.4.3), при цьому реалізується змішаний режим мащення $\lambda=1,27$ (рис. 4.4). Досягнувши швидкості кочення $V_{\Sigma\text{коч.}}=0,57 \text{ м/с}$ товщина мастильного шару складає $h_d=0,422 \times 10^{-6} \text{ м}$ (рис.4.3), при цьому встановлюється ЕГД режим мащення $\lambda=4,22$ (рис.4.4). Подальше збільшення сумарної швидкості кочення не призвело до збільшення товщини мастильної плівки в контакті.

В умовах зростання швидкості кочення (проковзування 20%) для всіх мастильних матеріалів встановлено збільшення товщини мастильного шару в контакті між поверхнями «кулька-диск». Аналогічна тенденція збільшення масляної плівки була встановлена і при рясному мащенні.

За результатами експериментальних досліджень нами зафіксовано дві тенденції щодо динаміки утворення початкової товщини мастильного шару в контакті в початковий період формування (реалізується змішаний режим мащення):

- збільшення сумарної швидкості кочення для олив М8Г2К, М10Г2К, І-40А та ЄМТ-8;

- зменшенням сумарної швидкості кочення для олив TEMOL CLASSIC 15w40, ПРОТЕК ЄМТ-8.

Наприклад, для оливи TEMOL CLASSIC 15w40 встановлена найменша швидкість кочення, при якій спостерігається початкове формування граничного мастильного шару – 0,073м/с, яка на 8,75% менша, ніж при чистому коченні. Ми вважаємо, що в умовах проковзування для моторної оливи TEMOL CLASSIC 15w40 наявність в'язкісної присадки поліметакрилатного типу є основним чинником, який сприяє ефективному формуванню товщини мастильного шару. Тому в даних умовах експерименту ми вважаємо, що сформована плівка забезпечується структурною в'язкістю мастильного матеріалу, яка формується за рахунок наявності полімолекулярних компонентів присадки.

Олива ПРОТЕК ЄМТ-8 здатна формувати початкову (мінімальну) товщину граничного шару швидше відповідно на 13%, ніж в умовах кочення без проковзування. На нашу думку, в даному випадку, як і в умовах рясного мащення, властивості граничних плівок залежать не від в'язкості мастильного матеріалу, а від наявності і ефективності ПАР, які мають полярні молекули. Таким чином, аналогічно як і при рясному мащенні, реалізуються сприятливі умови для зменшення початкової швидкості кочення зі встановленням змішаного режиму мащення при використанні мастильних матеріалів, які містять ПАР, що мають полярні молекули, відбувається більш ефективно формування мономолекулярних шарів (метод Ленгмюра-Блоджет), які при послідовному об'єднанні утворюють полімолекулярні плівки з високим ступенем упорядкованості, впливаючи таким чином на ефективність формування розділяючого шару між поверхнями тертя.

Для інших мастильних матеріалів встановлено збільшення періоду початкового формування товщини мастильного шару, який забезпечує реалізацією змішаного режиму мащення. Зокрема, сумарна швидкість

кочення, при якій зафіксовано утворення початкового розділяючого шару між контактними поверхнями, для олив М8Г2К, М10Г2К, ЄМТ-8, І-40А збільшується в 1,26, 1,30, 1,13, 1,12 рази в порівнянні з умовами чистого кочення. Таким чином, для вищезазначених олив чинник «проковзування» збільшує імовірність реалізації напівсухого режиму мащення за рахунок деструкції адсорбційних шарів фізичної природи під дією градієнту швидкості зсуву.

Порівнюючи з умовами рясного мащення встановлено відставання у формуванні початкової товщини мастильного шару для всіх досліджених мастильних матеріалів: TEMOL CLASSIC 15w40 – 9,5%, М8Г2К – 50,5%, М10Г2К – 20,2%, ЄМТ-8 – 11,9%, І-40А – 1,7% та ПРОТЕК ЄМТ-8 – 20,7%. Однак, зростання градієнту швидкості при напрацюванні в умовах обмеженого мащення обумовлює активацію та поляризацію молекул олив під дією твердої фази контактних поверхонь, концентрація активованих молекул постійно зростає. При перших проходах кульки по диску, не відбувається надходження нових порцій мастильного матеріалу, товщина плівки збільшується за рахунок підвищення адгезійних властивостей активованих компонентів мастильного середовища.

Варто зазначити, як за умов рясного, так і в умовах обмеженого мащення при зменшенні в'язкості мастильного матеріалу підвищується швидкість, при якій формується початкова товщина мастильного шару. В порівнянні з рясним мащенням, найсуттєвіше запізнєння в формуванні початкової товщини мастильної плівки (на 50,5%) встановлено для оливи М8Г2К. Дане явище обумовлено зменшенням надлишкового надходження компонентів оливи в зону контакту, так як низькі швидкості кочення ($V_{\Sigma k}$ до 0,045 м/с) не створюють достатнього накопичення мастильного матеріалу («хвилі мастильного матеріалу») перед кулькою, що переміщується по диску. В умовах збільшення швидкості кочення підвищується імовірність «затягування оливи в зазор», так як перед кулькою утворюється хвиля

оливи, яка забезпечує резерв мастильного матеріалу в даних експериментальних умовах – обмеженого мащення.

Враховуючи результати експериментальних досліджень, в умовах обмеженого мащення за наявності проковзування необхідно враховувати як в'язкість мастильного матеріалу так і фізико–хімічний склад оливи, оскільки саме від цих чинників залежить ефективність формування мастильної плівки в контакті.

4.2 Кінетика зміни реологічних характеристик мастильних матеріалів при збільшенні швидкості кочення в умовах обмеженого мащення

Для встановлення залежності ефективної в'язкості від зміни сумарної швидкості кочення були проведенні експериментальні дослідження при відносному проковзування 20% з використанням аналогічних оливи, що і в попередніх дослідженнях; температура досліджуваних оливи впродовж експериментів складала 20°C; навантаження склало – 362,7МПа; реологічні характеристики визначалися за формулами 3.3 – 3.5.

При використанні в якості досліджуваного матеріалу моторної оливи TEMOL CLASSIC 15w40 встановлено, що при формуванні товщини мастильної плівки ($V_{\Sigma\text{коч}}=0,073\text{м/с}$), ефективна в'язкість є найбільшою і становить $\eta_{\text{еф}}=6,41\text{Па}\cdot\text{с}$ (рис. 4.5). В умовах збільшення сумарної швидкості кочення, на проміжку швидкостей $V_{\Sigma\text{коч}}=0,073\text{--}0,099\text{м/с}$, ефективна в'язкість зменшується стрімко, і при $V_{\Sigma\text{коч}}=0,099\text{м/с}$ становить $\eta_{\text{еф}}=4,63\text{Па}\cdot\text{с}$. Така зміна спостерігається при переході 1-го жовтого кольору на 1-й оранжевий (див. табл. 4.1). При досягненні швидкості кочення $V_{\Sigma\text{коч}}=0,099\text{м/с}$, ефективна в'язкість $\eta_{\text{еф}}$ зі зростанням швидкості кочення $V_{\Sigma\text{коч}}$ змінюється майже лінійно. А досягнувши швидкості кочення

$V_{\Sigma\text{коч}}=0,54\text{м/с}$, ефективна в'язкість становить $\eta_{\text{еф}}=1,71\text{Па}\cdot\text{с}$ при товщині мастильного шару $h_{\text{д}}=0,471\times 10^{-6}\text{м}$.

Досліджуючи моторну оливу М8Г2К зафіксовано, що при формуванні товщини мастильної плівки ($V_{\Sigma\text{коч}}=0,091\text{м/с}$), ефективна в'язкість є найбільшою і становить $\eta_{\text{еф}} = 5,54\text{Па}\cdot\text{с}$ (рис. 4.5).

Зростання сумарної швидкості призводить до зменшення $\eta_{\text{еф}}$, як і для оливи TEMOL CLASSIC 15w40. На проміжку швидкостей $V_{\Sigma\text{коч}}=0,091-0,11\text{м/с}$, ефективна в'язкість зменшується суттєво, і при $V_{\Sigma\text{коч}}=0,11\text{м/с}$ $\eta_{\text{еф}}=3,97\text{Па}\cdot\text{с}$. Поступове зростання $V_{\Sigma\text{коч}}$ призводить до майже лінійної зміни ефективної в'язкості. Досягнувши швидкості кочення $V_{\Sigma\text{коч}}=0,67\text{м/с}$, ефективна в'язкість становить $\eta_{\text{еф}}=1,34\text{Па}\cdot\text{с}$ при товщині мастильного шару $h_{\text{д}}=0,474\times 10^{-6}\text{м}$.

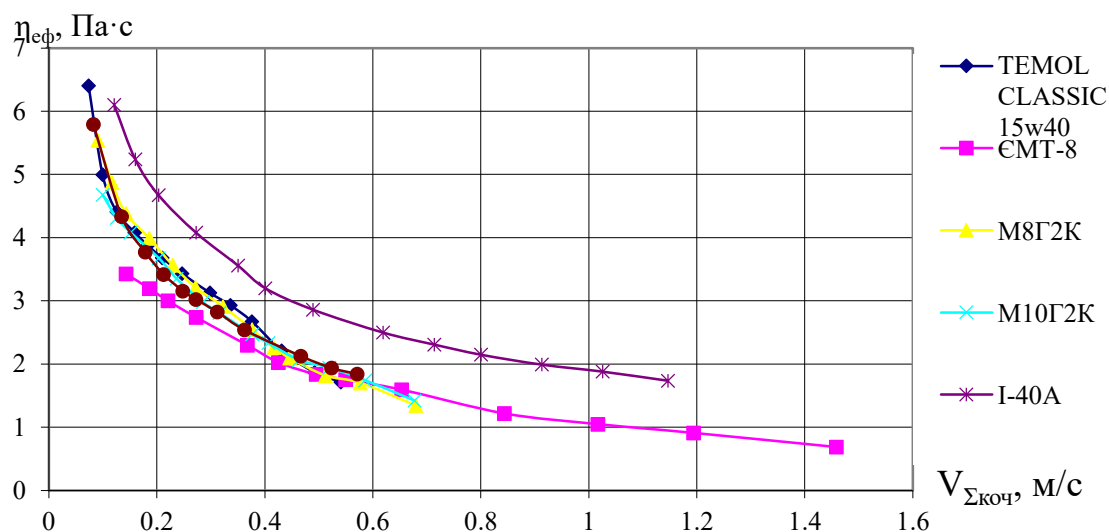


Рисунок 4.5 – Залежність ефективної в'язкості $\eta_{\text{еф}}$ від сумарної швидкості кочення $V_{\Sigma\text{коч}}$ при 20 °C

Застосовуючи моторну оливу М10Г2К зафіксовано, що при формуванні товщини мастильної плівки ($V_{\Sigma\text{коч}}=0,099\text{м/с}$) ефективна в'язкість $\eta_{\text{еф}}$ є найбільшою, і становить $\eta_{\text{еф}}=4,67\text{Па}\cdot\text{с}$ (рис. 4.5). Зростання сумарної швидкості кочення призводить до майже лінійної зміни

(зменшення) ефективної в'язкості. Досягнувши швидкості $V_{\Sigma\text{коч}}=0,67\text{м/с}$ ефективна в'язкість становить $\eta_{\text{еф}}=1,41\text{ Па}\cdot\text{с}$ при товщині мастильного шару $h_{\text{д}}=0,468\times 10^{-6}\text{ м}$.

При використанні оливи І-40А встановлено, що при формуванні товщини мастильної плівки ($V_{\Sigma\text{коч}}=0,12\text{м/с}$) ефективна в'язкість становить $\eta_{\text{еф}} = 6,10\text{ Па}\cdot\text{с}$ (рис.4.5).

На проміжку зміни швидкостей $V_{\Sigma\text{коч}}=0,12\text{--}0,16\text{м/с}$ відбувається суттєве зменшення ефективної в'язкості $\eta_{\text{еф}}$ (29%) і крива зменшення має нелінійний характер. Досягнувши швидкості кочення $V_{\Sigma\text{коч}}=1,15\text{м/с}$ ефективна в'язкість становить $\eta_{\text{еф}}=1,74\text{ Па}\cdot\text{с}$ при товщині мастильного шару $h_{\text{д}}=0,49\times 10^{-6}\text{ м}$.

Досліджуючи універсальну моторно-трансмісійну оливу ЄМТ–8 зафіксовано, що при формуванні товщини мастильної плівки ($V_{\Sigma\text{коч}}=0,14\text{м/с}$) ефективна в'язкість $\eta_{\text{еф}}$, як і для всіх попередніх досліджених мастильних матеріалів, є найбільшою і становить $\eta_{\text{еф}} = 3,43\text{ Па}\cdot\text{с}$ (рис.4.5). При досягненні швидкості кочення $V_{\Sigma\text{коч}}=1,46\text{м/с}$ ефективна в'язкість становить $\eta_{\text{еф}}=0,68\text{ Па}\cdot\text{с}$ при товщині мастильного шару $h_{\text{д}}=0,486\times 10^{-6}\text{ м}$.

Застосовуючи універсальну моторно-трансмісійну оливу ПРОТЕК ЄМТ-8 встановлено, що при формуванні товщини масляної плівки ($V_{\Sigma\text{коч}}=0,08\text{м/с}$) початкова ефективна в'язкість $\eta_{\text{еф}}$, як і для всіх попередніх досліджених мастильних матеріалів, є найбільшою і становить $\eta_{\text{еф}}=5,79\text{ Па}\cdot\text{с}$. На проміжку зміни швидкостей $V_{\Sigma\text{коч}}= 0,08\text{--}0,17\text{м/с}$ відбувається нелінійне зменшення ефективної в'язкості $\eta_{\text{еф}}$. Із збільшенням швидкості кочення $V_{\Sigma\text{коч}}>0,17\text{м/с}$ зменшення ефективної в'язкості $\eta_{\text{еф}}$ набуває майже лінійного характеру. При досягненні швидкості кочення $V_{\Sigma\text{коч}}= 0,57\text{м/с}$ ефективна в'язкість становить $\eta_{\text{еф}}=1,83\text{ Па}\cdot\text{с}$ при товщині мастильного шару $h_{\text{д}}=0,422\times 10^{-6}\text{ м}$.

Із отриманих результатів експериментальних досліджень щодо зміни ефективної в'язкості мастильних матеріалів випливає, що всі мастильні матеріали в початковий період формування мастильного шару характеризуються надбанням неньютонівських властивостей в контактi, що не враховується ЕГД ТМ. Саме про неньютонівські характеристики олив свідчить залежність ефективної в'язкості олив від градієнту швидкості зсуву, який в даному випадку зростає по мірі збільшення сумарної швидкості кочення. Зниження ефективної в'язкості η_{ef} протягом експерименту для олив TEMOL CLASSIC 15w40, М8Г2К, М10Г2К, І– 40, ЄМТ–8 та ПРОТЕК ЄМТ-8 становить 73%: 76%: 70%: 72%, 80% та 68% відповідно, при цьому градієнт швидкості зсуву зростає в 1,92: 1,95: 1,76: 2,47: 2,67 та 2,07 рази (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Динаміка триботехнічних характеристик мастильних матеріалів при напрацюванні

Показники	Мастильні матеріали					
	М8Г2К	М10Г2К	TEMOL CLASSIC 15w40	І-40А	ПРОТЕК ЄМТ-8	ЄМТ–8
$V_{\Sigma \text{ст}}, \text{ м/с}$	0,68	0,67	0,54	1,14	0,6	1,46
$V_{\Sigma \text{поч}}, \text{ м/с}$	0,091	0,099	0,073	0,12	0,08	0,14
$\eta_{\text{ef.поч}}, \text{ Па}\cdot\text{с}$	5,54	4,68	6,41	6,10	5,79	3,42
$\eta_{\text{ef. ст}}, \text{ Па}\cdot\text{с}$	1,34	1,42	1,71	1,74	1,83	0,68
$\gamma_{\text{поч}} \times 10^4 \text{ с}^{-1}$	5,7	6,4	4,6	7,4	5,1	8,8
$\gamma_{\text{ст}} \times 10^4 \text{ с}^{-1}$	11,2	11,23	9,0	18,3	10,5	23,5
$\tau_{\text{поч}}, \text{ МПа}$	0,32	0,299	0,3	0,45	0,293	0,30
$\tau_{\text{ст}}, \text{ МПа}$	0,143	0,153	0,15	0,30	0,192	0,15
$f_{\text{поч}}$	0,00192	0,00179	0,0018	0,00191	0,0017	0,00183
$f_{\text{ст}}$	0,00087	0,00095	0,00093	0,001	0,00088	0,00095

Ми вважаємо, що в умовах збільшенні швидкості кочення, зменшення ефективної в'язкості відбувається внаслідок розриву когезійних структурних зв'язків між компонентами мастильного матеріалу, які утворюються при структуризації та утворенні ретикулярних структур внаслідок надбання оливами неньютонівських властивостей в контакті. За результатами експериментальних досліджень варто зазначити, що підвищення антифрикційних властивостей, незалежно від фізико-хімічного складу оливи, обумовлено наступним механізмом. В умовах зростання швидкості кочення покращується ефективність мащення, про що свідчить зростання товщини мастильного шару, при цьому ефективна в'язкість в контакті зменшується, що призводить як до зниження напруги зсуву мастильного шару так і локалізації вектора напруги зсуву в товщині мастильного шару, де вплив твердої поверхні мінімальний. В результаті зниження контактної напруги зменшується і коефіцієнт тертя. Як наслідок, для досліджених оливи TEMOL CLASSIC 15w40, M8Г2К, M10Г2К, І-40, ЄМТ-8 та ПРОТЕК ЄМТ-8 зафіксовано підвищення антифрикційних властивостей на 48%; 47%; 47%; 48%, 48% та 48% відповідно (табл.4.1).

4.3 Кінетика зміни реологічних та антифрикційних властивостей оливи від навантаження в контакті при обмеженому мащенні

З метою встановлення взаємозв'язку між реологічними і антифрикційними властивостями мастильних матеріалів при змащуванні вузла тертя були проведені дослідження під час яких використані наступні моторні оливи TEMOL CLASSIC 15w40, M8Г2К, M10Г2К та універсальні моторно-трансмісійні оливи ЄМТ-8 і ПРОТЕК ЄМТ-8. Дослідження проводились при контактних напругах 251,5; 316,9; 362,7МПа з поступовим збільшенням сумарної швидкості кочення (від 0 до 1,46м/с) при проковзуванням в парі тертя 20%. Об'ємна температура оливи складала 20°C.

Для всіх досліджуваних мастильних матеріалів, в діапазоні навантаження від 251,5 до 362,7 МПа, як і при рясному мащенні, було зафіксовано підвищення ефективної в'язкості в контакті на 40,56%, 49,22%, 49,84%, 35,65%, 43,49%, 28,69% відповідно для TEMOL CLASSIC 15w40, M8Г2К, M10Г2К, І-40, ЄМТ-8 та ПРОТЕК ЄМТ-8. Отримані результати свідчать про структуризацію компонентів мастильного матеріалу під впливом контактної напруги (рис.4.6). Ступінь структуризації, аналогічно, як і при рясному мащенні, перш за все залежить від фізико-хімічного складу мастильного матеріалу.

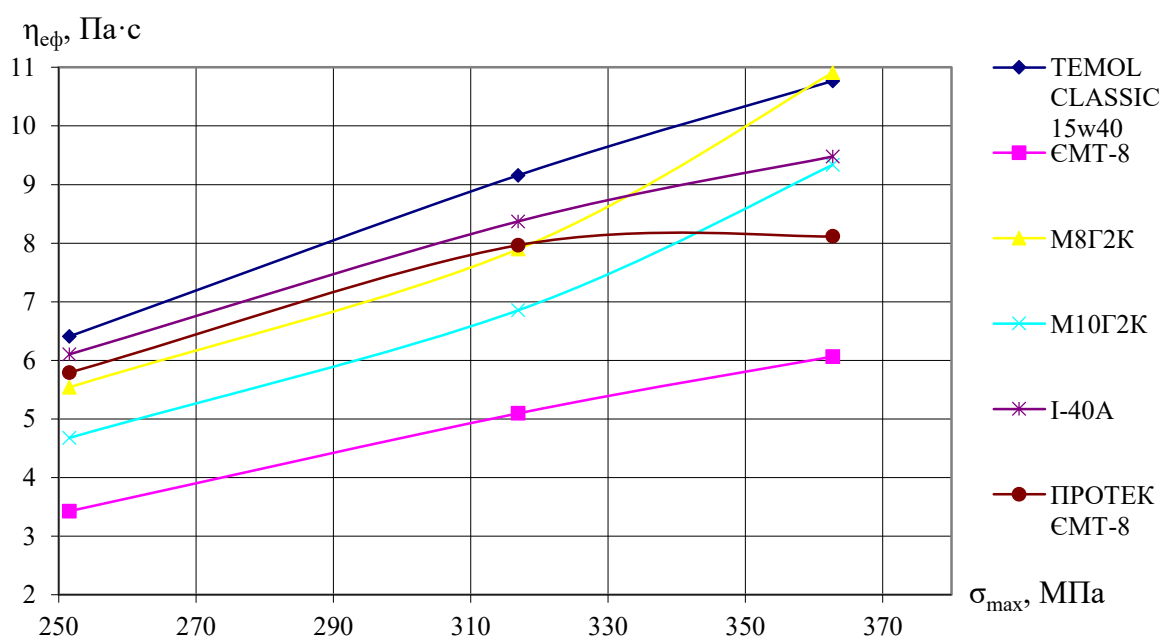


Рисунок 4.6 – Вплив контактної напруги($\sigma_{\max}$) на ефективну в'язкість $\eta_{\text{эф}}$

Виходячи з вищезазначених результатів можна зазначити, що суттєвих розбіжностей щодо впливу тиску на зростання $\eta_{\text{эф}}$ для оливи різного фракційного складу не встановлено. Початкове формування товщини мастильного шару, що забезпечує встановлення змішаного режиму мащення в контакті є головною відмінністю змащувальних матеріалів, які використовувалися в експериментальних дослідженнях.

На нашу думку, зростання ефективної в'язкості в контактi при використанні універсальних моторно-трансмiсійних олив ЄМТ-8 та ПРОТЕК ЄМТ-8 проявляється в синергiчному ефектi структуризацiї полiальфаолефiнових молекул базової основи та високомолекулярних компонентiв загущуючої присадки. Схожi результати були одержанi в роботi [126] для базової синтетичної оливи PAO-8.

Для моторних олив TEMOL CLASSIC 15w40; M8Г2К та M10Г2К, базовою основою є олива I-40A, яка мiстить понад 30% ароматичних вуглеводнiв i на нашу думку саме вони перешкоджають щiльнiй структуризацiї високомолекулярних компонентiв в'язкiсної присадки. Тому додатковий опiр зсуву створюють утворенi структурованi шари ретикулярного полiморфiчного типу. В даному випадку це пiдтверджується виявленням збiльшенням напруги зсуву мастильного шару – для всiх вищезазначених моторних олив (рис.4.7).

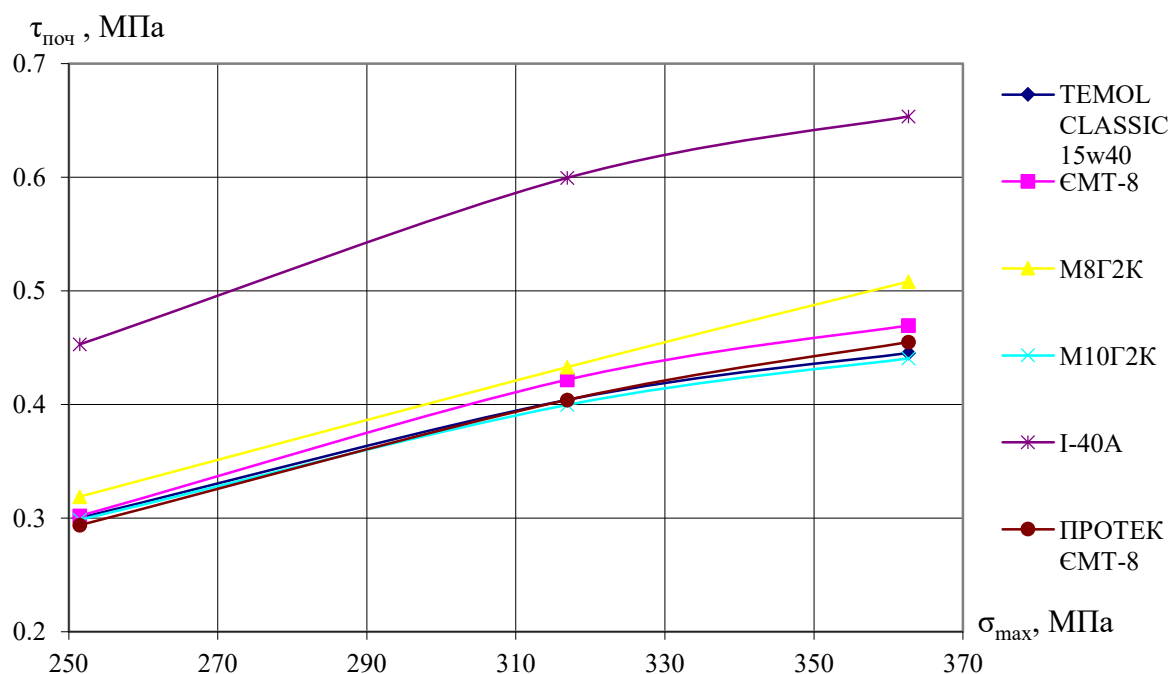


Рисунок 4.7 – Вплив контактної напруги ($\sigma_{\max}$) на напругу зсуву мастильного шару τ

Таким чином для моторних олив TEMOL CLASSIC 15w40; M8Г2К та M10Г2К напруга зсуву мастильного шару зростає в результаті утворення метастабільних адсорбційних шарів, що характеризуються додатковим опором зсуву. Для моторно-трансмісійних олив ЄМТ-8 та ПРОТЕК ЄМТ-8 зростання ефективної обумовлено інтенсифікацією структуризаційно-полімеризаційних процесів в контактi. У відповідності до стверджень Ахматова А.С. [127], в умовах підвищення навантаження, оливи характеризуються надбанням «структурної в'язкості» в контактi.

Зменшення градієнту швидкості зсуву для олив ЄМТ-8 та ПРОТЕК ЄМТ-8 при зміні контактного навантаження з 251,5 до 362,7 МПа обумовлює щільна структуризація компонентів оливи, що забезпечує підвищення сил адгезійної взаємодії з поверхневими шарами контактних поверхонь та когезійних сил взаємодії між молекулами оливи (рис.4.8).

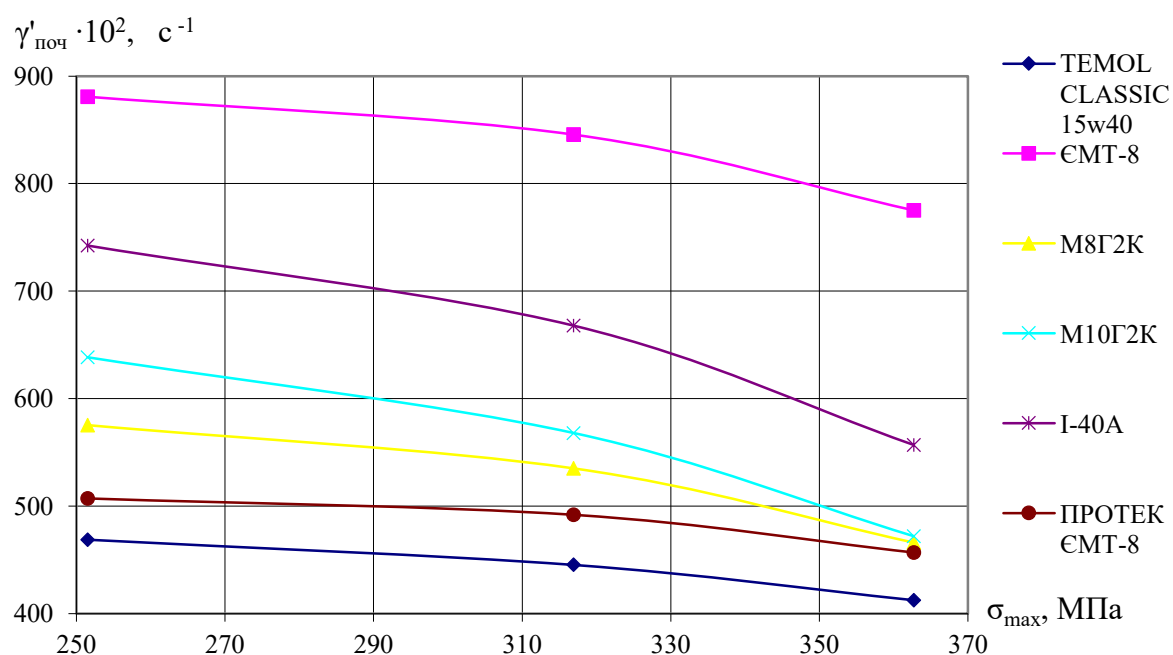


Рисунок 4.8 – Вплив контактної напруги ($\sigma_{\max}$) на градієнт швидкості зсуву (γ)

В діапазоні досліджуваних навантажень встановлено зменшення градієнту швидкості зсуву для олив TEMOL CLASSIC 15w40, M8Г2К, M10Г2К, І-40А, ЄМТ-8 та ПРОТЕК ЄМТ-8 відповідно на 12%, 19%, 26%, 25%, 12%, 10% (рис.4.8).

Оскільки структуризація компонентів мастильного матеріалу обумовлює перехід олив в нев'язкий пружно – пластичний стан, то в таких умовах оливи набувають властивостей неньютонівських рідин, що в даних умовах експерименту підтверджується встановленою залежністю ефективної в'язкості від градієнту швидкості зсуву при напрацюванні (рис.4.9).

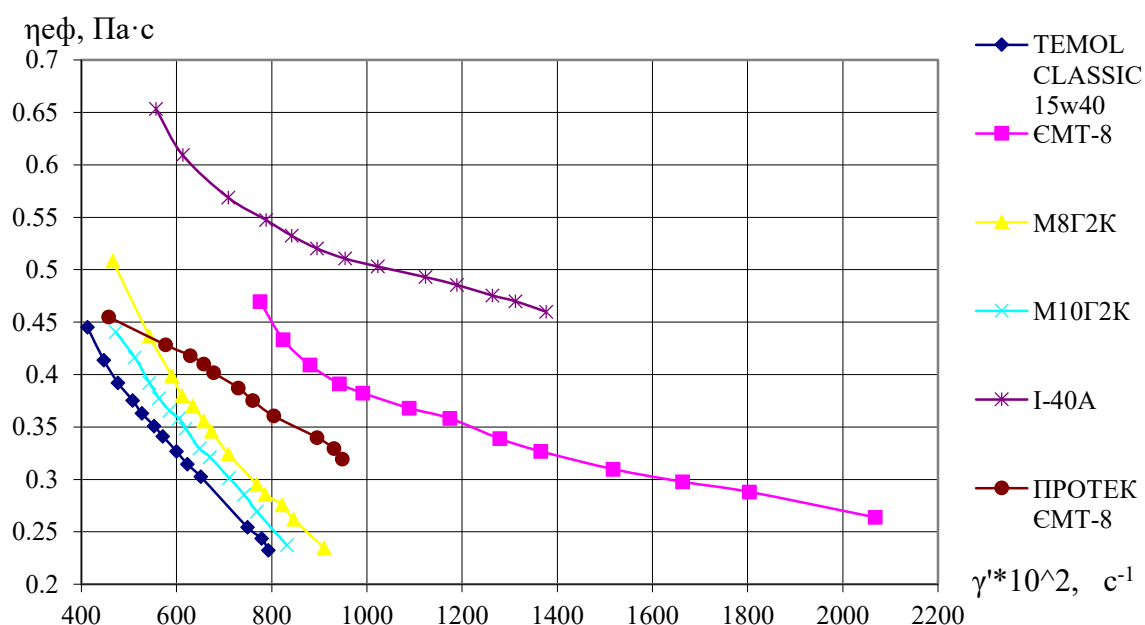


Рисунок 4.9 – Залежність ефективної в'язкості від градієнта швидкості зсуву при контактному навантаженні ($\sigma_{\text{max}} = 362,7 \text{ МПа}$)

Таким чином зафіксоване підвищення несучої здатності для всіх досліджених олив обумовлено структуризацією компонентів мастильного матеріалу під впливом контактної напруги. Ефективна в'язкість в контакті підвищується із збільшенням тиску, при напрацюванні, під дією градієнту швидкості зсуву відбувається деструкція компонентів мастильного матеріалу, що обумовлює активацію та поляризацію молекул олив під дією

твердої фази контактних поверхонь. Концентрація активованих молекул постійно зростає, внаслідок чого підвищуються адгезійні властивості оливи до контактних поверхонь.

У відповідності до ЕГДТМ, поведінка коефіцієнта тертя при коченні з проковзуванням визначається, в основному, ефективною в'язкістю мастильного матеріалу в контакті [52]. В умовах зростання контактного навантаження з 251,5 до 362,7 МПа при початковому формуванні мастильної плівки для всіх досліджених оливи встановлено збільшення коефіцієнту тертя f на 2,5%.

Початкове формування товщини мастильного шару в контакті інтенсифікується при зростанні швидкості кочення, внаслідок чого забезпечується локалізація дотичних напруг зсуву в об'ємній фазі мастильного матеріалу та призводить до підвищення антифрикційних властивостей (рис.4.10 та рис.4.11).

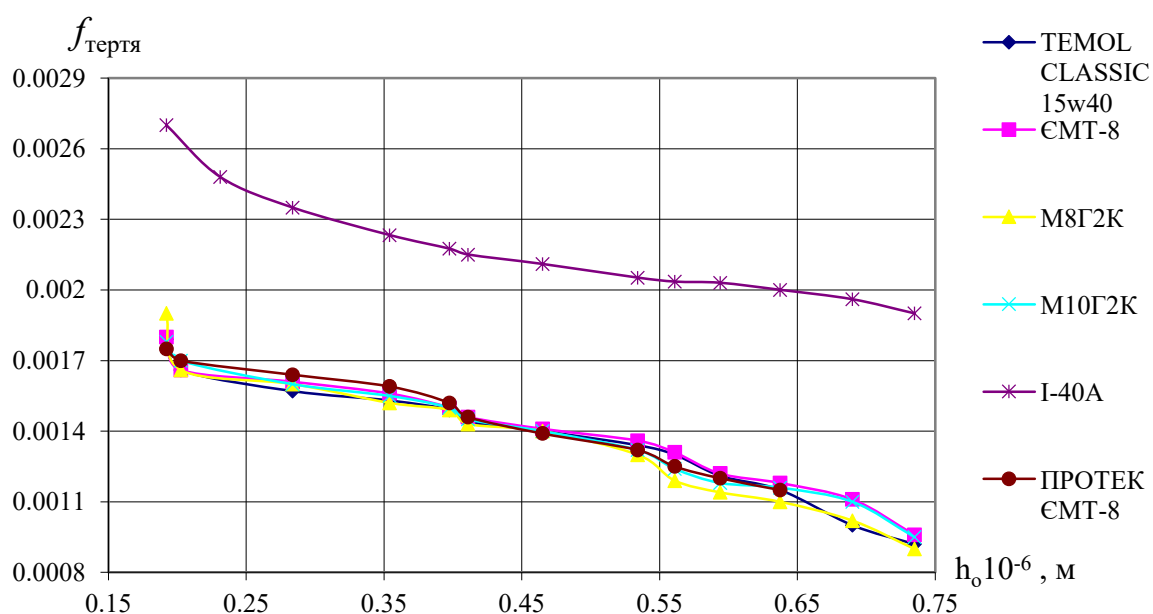


Рисунок 4.10 – Залежність коефіцієнту тертя від оптичної товщини мастильного шару при контактному навантаженні $\sigma_{\text{max}} = 251,5 \text{ МПа}$

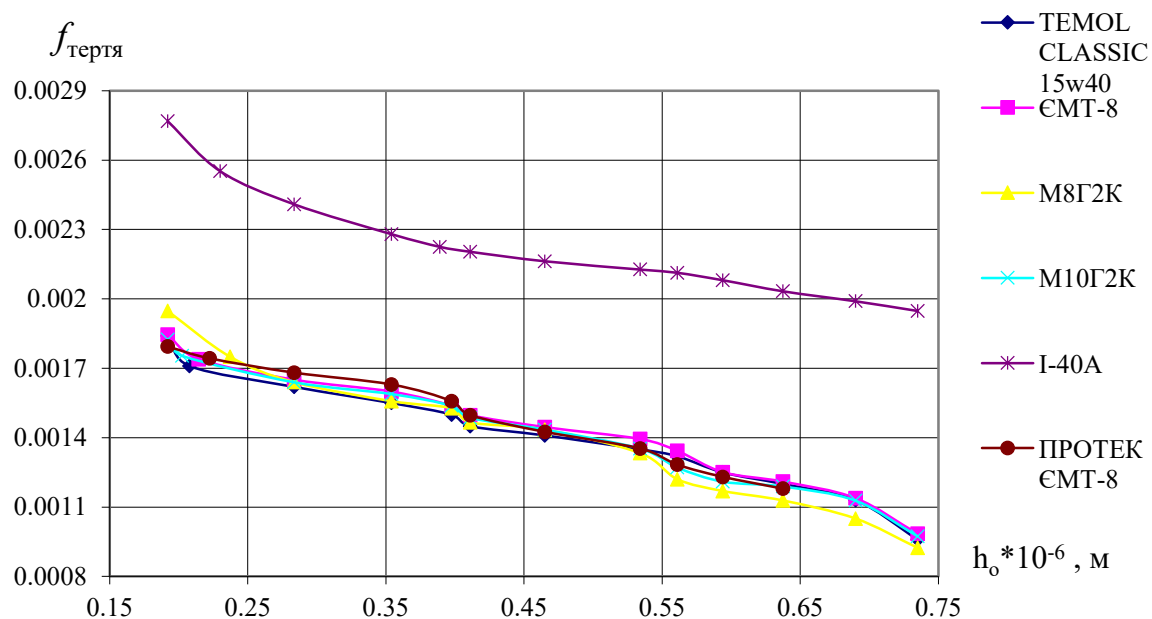


Рисунок 4.11 – Залежність коефіцієнту тертя від оптичної товщини мастильного шару при контактному навантаженні $\sigma_{\text{max}} = 362,7 \text{ МПа}$

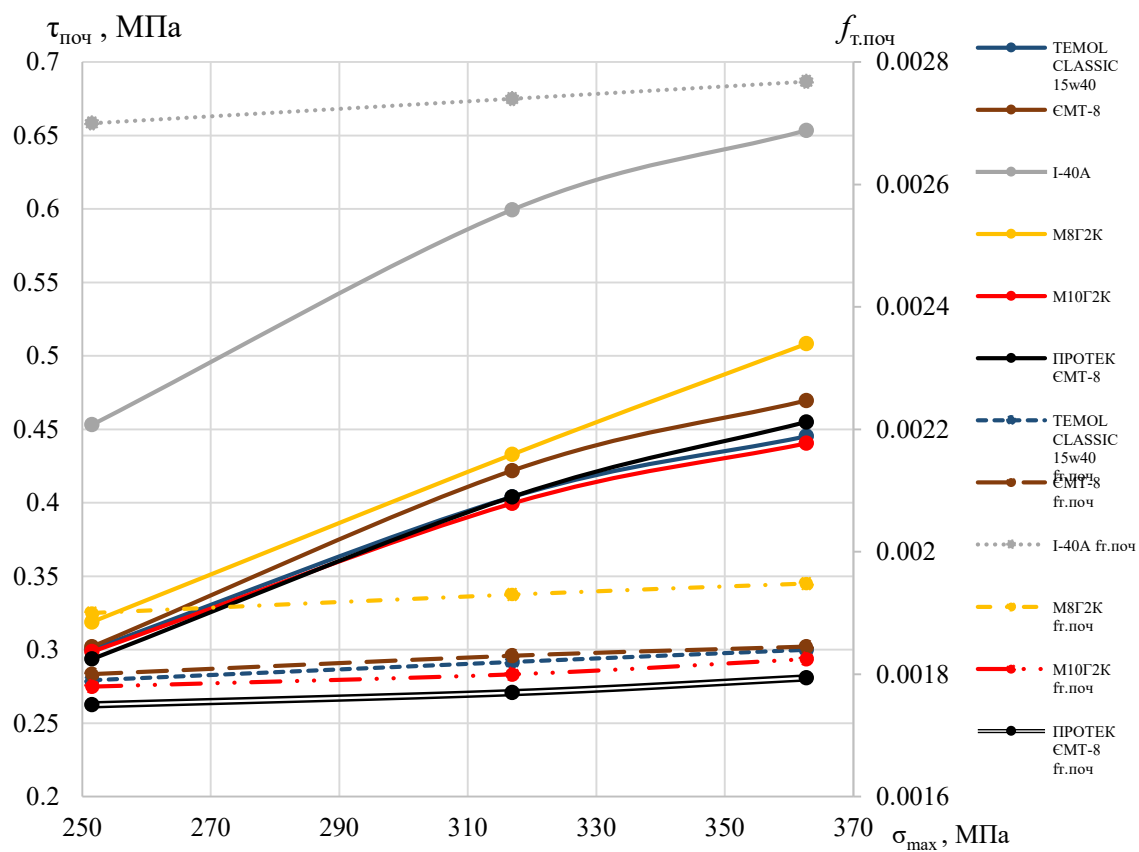


Рисунок 4.12 – Залежність коефіцієнта тертя f та напруги зсуву τ при зростанні контактного навантаження з 251,5 МПа до 362,7 МПа.

Кореляційний зв'язок коефіцієнта тертя та напруги зсуву зафіксований для всіх досліджених мастильних матеріалів при початковому формуванні товщини мастильного шару. Так при збільшенні контактної напруги $\sigma_{\max}$ з 251,5МПа до 362,7МПа відбувається зростання f на 2,5%, а τ на 40%.

4.4 Розробка аналітичної моделі еластогідродинамічного режиму мащення в локальному контакті

4.4.1 Теоретичні аспекти математичної обробки пасивного експерименту. Для побудови аналітичних моделей використовувалися результати пасивного експерименту, при якому інформація про досліджуваний об'єкт накопичується шляхом пасивного спостереження, тобто інформацію отримували в умовах звичайного функціонування об'єкта.

При пасивному експерименті існують лише фактори у вигляді вхідних контрольованих, але некерованих змінних, і експериментатор знаходиться в положенні пасивного спостерігача. Завдання планування в цьому випадку зводиться до оптимальної організації збору інформації та вирішення таких питань, як вибір кількості та частоти вимірювань, вибір методу обробки результатів вимірювань.

Метою пасивного експерименту є побудова аналітичної моделі об'єкта. Експериментальне дослідження базувалося на визначенні впливу механічних (коефіцієнт тертя - f_T) та фізичних (навантаження в точці контакту - N , температура - t) характеристик на дійсну товщину шару h_d .

В свою чергу, на величину коефіцієнту тертя впливає кількість обертів кульки (n), що дозволило також побудувати аналітичну модель на основі отриманих експериментальних даних.

Для отримання аналітичних моделей у вигляді поліномів на основі даних, зібраних при пасивному експерименті, використано методи

кореляційного і регресійного аналізу. У процесі побудови моделей цих методів вирішувалися наступні основні завдання:

- а) визначити найбільш вдалу форму рівняння регресії;
- б) розрахувати коефіцієнти регресії для обраного полінома з використанням методу найменших квадратів;
- в) визначити наявні зв'язки між вихідним параметром Y та факторами X_i ;
- г) перевірити точність розрахованих коефіцієнтів регресії та оцінити їх значущість;
- д) встановити адекватність рівняння регресії реальному процесу.

В основі кореляційного аналізу лежить передумова про те, що змінні величини Y (вихідний параметр) і X_i (фактори) є випадковими величинами і між ними може існувати зв'язок особливого роду, так званий кореляційний зв'язок, при якому зі зміною однієї величини змінюється розподіл іншої.

Регресійний аналіз пропонує зв'язок випадкової величини Y і випадкових змінних X_i . Застосування методу регресійного аналізу правомірне при виконанні наступних умов:

1) результати дослідів представляють собою незалежні нормально розподілені випадкові величини. Гіпотезу про нормальність розподілу можна перевірити стандартними методами. На жаль, часто це вимога приймається на віру;

2) фактори X_i вимірюються з малою помилкою, якою можна нехтувати, у порівнянні з помилкою у визначенні Y і некорельовані один з одним. Ця умова означає, що фіксація і підтримку кожного фактору на заданому рівні здійснюється з точністю менше помилки відтворюваності результатів.;

3) оцінки дисперсії значень вихідного параметру Y , отриманих при однакових умовах (у паралельних дослідях) повинні бути однорідними. Ця

умова перевіряється за допомогою критеріїв однорідності дисперсії в різних точках факторного простору.

Обробка експериментальних даних при використанні кореляційного і регресійного аналізу дає можливість вирішити зазначені вище завдання побудови аналітичної моделі у вигляді рівняння регресії

Найбільш розповсюдженою, вивченою і відпрацьованою, з методичної точки зору, серед усіх регресійних моделей є лінійна. Нажаль, далеко не всі соціально-економічні, природні процеси, явища та об'єкти технічного характеру можна моделювати за допомогою лінійних моделей. Їх вибір в першу чергу залежить від особливостей досліджуваного процесу (об'єкту або явища). Деякі процеси можна з певним наближенням, локально моделювати за допомогою лінійної багатofакторної моделі. Однак для повного опису процесу в межах, ширших за рамки локального наближення, як правило, необхідно використовувати нелінійні регресійні залежності.

За достатнього обсягу апріорної інформації про об'єкт дослідження та про властивості експериментально отриманих вихідних даних, зокрема, про характеристики їх шумової складової ϵ , можливе застосування широкого кола добре відпрацьованих методів і способів структурної та параметричної ідентифікації [128 – 130].

Метод найменших квадратів є одним з основних методів визначення коефіцієнтів регресійних рівнянь.

Сутність даного методу полягає в знаходженні параметрів моделі, при яких сума квадратів відхилень емпіричних (фактичних) значень результуючої ознаки від теоретичних, отриманих за обраним рівнянням регресії, тобто:

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i^{\delta} - y_i)^2 = \sum_i^n (y_i^p - a_0 - a_1 x)^2 \rightarrow \min, \quad (4.1)$$

де y_i^p – значення, обчислене за рівнянням регресії;

$(y_i^p - y_i)$ – відхилення ε (похибка, залишок); n – кількість пар вихідних даних.

Загальний вигляд багатofакторної моделі (Y) має наступний вигляд:

$$Y = a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + a_{1,2} \cdot x_1 \cdot x_2 + \\ + a_{1,3} \cdot x_1 \cdot x_3 + a_{2,3} \cdot x_2 \cdot x_3 + a_{1,1} \cdot x_1^2 + \\ + a_{2,2} \cdot x_2^2 + a_{3,3} \cdot x_3^2 \quad (4.2)$$

де $a_1 \dots a_n$ – коефіцієнти регресії,

x_1, x_2, x_3 – незалежні змінні фактори, що визначають умови існування дослідної системи.

Розрахунок коефіцієнтів поліноміальної моделі проводився методом найменших квадратів за формулою:

$$B = (X^T X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y \quad (4.3)$$

де B – вектор стовпець значень коефіцієнтів багатofакторної поліноміальної моделі;

X – матриця плану експерименту;

X^T – транспонована матриця плану експерименту;

Y – вектор стовпець значень функції відгуку.

Особливий інтерес представляє обернена матриця $(X^T X)^{-1}$. Це матриця помилок коефіцієнтів (варіаційно-коваріаційна матриця). Її діагональні елементи – це дисперсії коефіцієнтів, а інші елементи – коваріації, що визначають статистичну залежність між коефіцієнтами полінома.

Таким чином, за результатами пасивного експерименту було проведено аналітичне моделювання, яке включало наступні кроки:

- побудовано однофакторну модель впливу кількості обертів кульки на коефіцієнт тертя;
- визначено вагомість коефіцієнтів та адекватність отриманої моделі;
- сформовано двофакторну модель залежності дійсної товщини шару від коефіцієнту тертя, навантаження в точці дотику та температури;
- проведено аналіз моделі, визначивши вагомість коефіцієнтів отриманої моделі та її адекватність.

4.4.2 Результати розрахунків однофакторної моделі. На першому етапі будемо аналітичну модель залежності коефіцієнту тертя від кількості обертів кульки ($f_T = f(n)$) на основі експериментальних даних, представлених в табл. 4.2. Загальний вигляд аналітичної моделі(4.4):

$$f_T = \sum_{i=1}^k a_i \cdot n_i^i \quad (4.4)$$

де f_T – вихідний параметр незалежної змінної, коефіцієнт тертя;

i – кількість коефіцієнтів моделі або ступінь поліному, від 0 до k ;

a_i – значення коефіцієнтів моделі;

n_i^i – вхідні параметри незалежної змінної, кількість обертів кульки, об/хв.

Таблиця 4.2 – Експериментальні значення коефіцієнтів тертя

N	n, об/хв	Коефіцієнт тертя, f_T	N	n, об/хв	Коефіцієнт тертя, f_T
1.	5,4	0,00184	29.	30,2	0,00143
2.	6,5	0,00182	30.	31,4	0,00135
3.	7,5	0,00189	31.	33,0	0,00135

N	n, об/хв	Коефіцієнт тертя, f_T
4.	7,8	0,00179
5.	8,6	0,00171
6.	8,8	0,00170
7.	9,8	0,00166
8.	10,5	0,00176
9.	11,2	0,00157
10.	12,4	0,00159
11.	12,4	0,00162
12.	12,5	0,00167
13.	13,4	0,00153
14.	16,0	0,00155
15.	16,4	0,00149
16.	17,0	0,00155
17.	17,5	0,00157
18.	18,8	0,00150
19.	20,4	0,00144
20.	21,0	0,00152
21.	21,6	0,00145
22.	22,0	0,00150
23.	24,2	0,00145
24.	24,8	0,00140
25.	25,6	0,00146
26.	26,8	0,00140
27.	27,2	0,00141
28.	28,4	0,00134

N	n, об/хв	Коефіцієнт тертя, f_T
32.	34,2	0,00130
33.	35,5	0,00138
34.	35,6	0,00132
35.	38,8	0,00121
36.	40,0	0,00132
37.	40,0	0,00134
38.	40,2	0,00123
39.	42,2	0,00115
40.	43,0	0,00125
41.	44,4	0,00100
42.	44,5	0,00127
43.	45,0	0,00118
44.	47,8	0,00120
45.	48,0	0,00092
46.	50,0	0,00112
47.	50,0	0,00122
48.	51,0	0,00113
49.	54,5	0,00115
50.	55,5	0,00095
51.	60,0	0,00096
52.	60,0	0,00099
53.	67,5	0,00095
54.	68,2	0,00092
55.	70,3	0,00090
56.	78,0	0,00089

Графічно отримані експериментальні дані представлено на рис. 4.13.

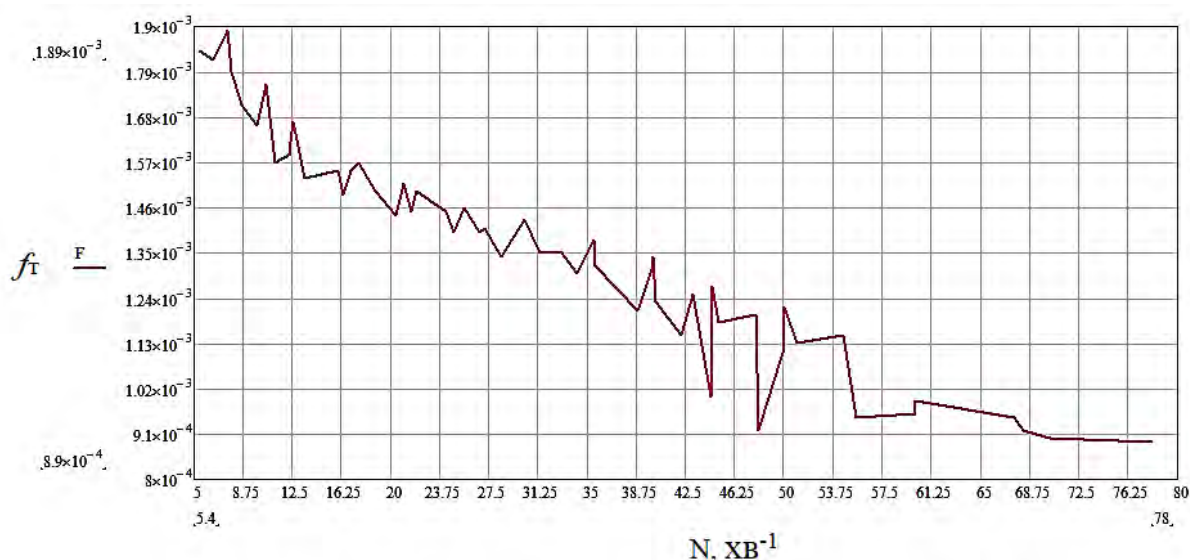


Рисунок 4.13 – Графічне представлення результатів пасивного експерименту

Для розрахунку коефіцієнтів однофакторної регресійної моделі використовували стандартні інструменти MS Excel, а саме функцію **=ЛИНЕЙН()**. У розрахунковій формулі зазначаються:

- "відомі значення Y" (f_T),
- "відомі значення X" (кількість обертів, N); для поліному n-го порядку значення X підносяться до необхідного степеню, степеня
- в константу ставимо "1",
- в статистику "0"

Таким чином, функція розрахунку має наступний вигляд:

$$= \text{ЛИНЕЙН}(\$D2:\$D57; \$C2:\$C57^{\{1;2;3;4;5\}}; \text{ИСТИНА}), \quad (4.5)$$

де $\$D2:\$D57$ – діапазон комірок із значеннями вихідного параметру;

$\$C2:\$C57$ – діапазон комірок із значеннями вхідного параметру.

На основі проведеного розрахунку були отримані коефіцієнти рівняння регресії, який є поліномом п'ятого ступеню:

$$f_T = (227,1 - 9,2982 \cdot n + 0,445071 \cdot n^2 - 0,011312 \cdot n^3 + 0,000126978 \cdot n^4 - 0,000000532998 \cdot n^5) \cdot 10^{-5} \quad (4.6)$$

Отримана модель дуже точно описує результати експериментальних досліджень, що показано на рис. 4.14.

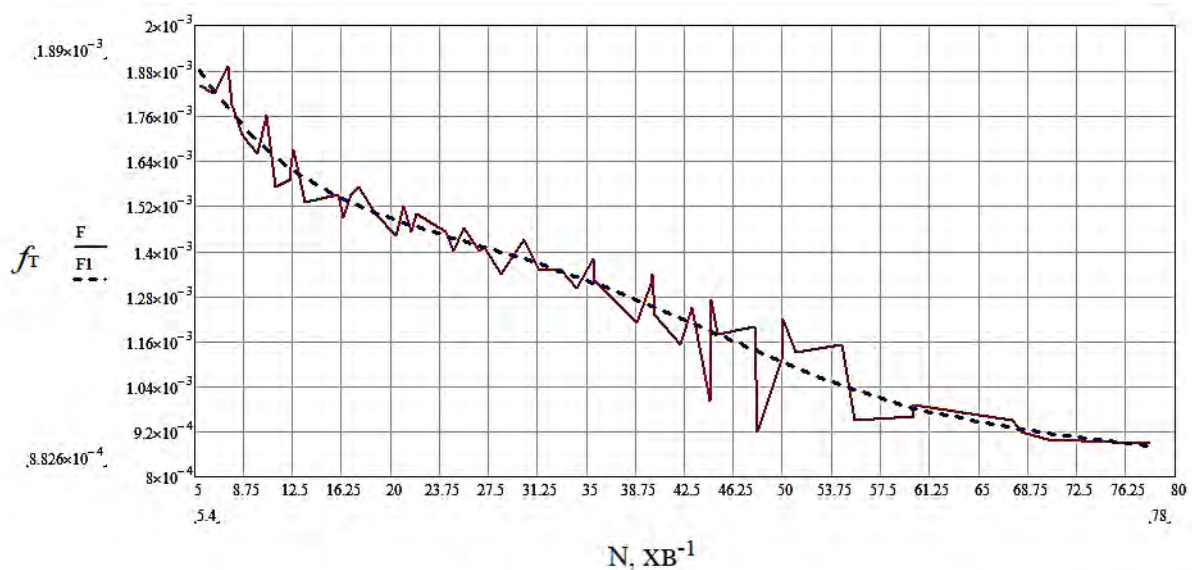


Рисунок 4.14 – Графічний опис отриманої моделі у порівнянні з експериментальними даними

Наступним етапом розрахунків є перевірка адекватності отриманої моделі.

Перевірка адекватності проведена шляхом порівняння результатів коефіцієнтів тертя, отриманих по моделі, з реальними, отриманими на підставі експериментальної інформації (табл.4.3). Для перевірки адекватності вибрано критерій Фішера. Критерій використовується для порівняння дисперсії двох вибірок з нормальним розподілом.

Таблиця 4.3 – Результати пасивного експерименту та розрахунків за моделлю.

N	n, об/хв	Коефіцієнт тертя, f_T (екс.)	Коефіцієнт тертя, f_T (мод.)	N	n, об/хв	Коефіцієнт тертя f_T (екс.)	Коефіцієнт тертя f_T (мод.)
1.	5,4	0,00184	0,00188	29.	30,2	0,00143	0,00138
2.	6,5	0,00182	0,00183	30.	31,4	0,00135	0,00136
3.	7,5	0,00189	0,00178	31.	33,0	0,00135	0,00135
4.	7,8	0,00179	0,00177	32.	34,2	0,00130	0,00133
5.	8,6	0,00171	0,00174	33.	35,5	0,00138	0,00131
6.	8,8	0,00170	0,00173	34.	35,6	0,00132	0,00131
7.	9,8	0,00166	0,00169	35.	38,8	0,00121	0,00127
8.	10,5	0,00176	0,00167	36.	40,0	0,00132	0,00125
9.	11,2	0,00157	0,00165	37.	40,0	0,00134	0,00125
10	12,4	0,00159	0,00162	38.	40,2	0,00123	0,00125
11	12,4	0,00162	0,00162	39.	42,2	0,00115	0,00122
12	12,5	0,00167	0,00162	40.	43,0	0,00125	0,00121
13	13,4	0,00153	0,00159	41.	44,4	0,00100	0,00119
14	16,0	0,00155	0,00154	42.	44,5	0,00127	0,00119
15	16,4	0,00149	0,00154	43.	45,0	0,00118	0,00118
16	17,0	0,00155	0,00153	44.	47,8	0,00120	0,00114
17	17,5	0,00157	0,00152	45.	48,0	0,00092	0,00113
18	18,8	0,00150	0,00150	46.	50,0	0,00112	0,00110
19	20,4	0,00144	0,00148	47.	50,0	0,00122	0,00110
20	21,0	0,00152	0,00148	48.	51,0	0,00113	0,00109
21	21,6	0,00145	0,00147	49.	54,5	0,00115	0,00104
22	22,0	0,00150	0,00146	50.	55,5	0,00095	0,00103
23	24,2	0,00145	0,00144	51.	60,0	0,00096	0,00098
24	24,8	0,00140	0,00143	52.	60,0	0,00099	0,00098
25	25,6	0,00146	0,00143	53.	67,5	0,00095	0,00093
26	26,8	0,00140	0,00141	54.	68,2	0,00092	0,00093
27	27,2	0,00141	0,00141	55.	70,3	0,00090	0,00092
28	28,4	0,00134	0,00140	56.	78,0	0,00089	0,00089

Спочатку була проведена перевірка гіпотези про нормальність закону розподілу коефіцієнту тертя за критерієм узгодженості Пірсона (χ -

критерій). Оптимальне число інтервалів розбиття визначимо на підставі формули Брукса і Каррузера для малих вибірок:

$$k = 4 \cdot \lg n = 4 \cdot \lg 57 = 6,993 \approx 7 \quad (4.7)$$

Отже, весь діапазон спостережуваних величин розділимо на сім інтервалів шириною $\Delta = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{k} = \frac{0,00189 - 0,00089}{7} \approx 0,000143$ (табл.5.3).

Таблиця 4.4 – Результаті перевірки гіпотези нормального закону розподілу для дослідних значень вихідного параметру.

Розрахункові значення					Теоретична частота	Кумулятивна частота		
x	f_i	$x_i - \bar{x}$	$t = \frac{x_i - \bar{x}}{\delta}$	$\phi(t)$	f'_T	Фактична $\sum f_i$	Теоретична $\sum f'_T$	$\frac{(f_i - f'_T)^2}{f'_T}$
0,00089	9	-0,00041	-1,599	0,0377	9,103	10	9,103	0,088
0,00103	4	-0,00027	-1,039	0,0665	16,057	26	25,16	0,034
0,00118	8	-0,00012	-0,480	0,0722	17,43	40	42,59	0,157
0,00132	15	0,00002	0,080	0,0493	11,9	45	54,49	1,652
0,00146	10	0,00016	0,639	0,0209	5,046	47	59,536	2,639
0,00161	5	0,00031	1,199	0,0028	0,68	48	60,216	2,478
0,00175	5	0,00045	1,759	0,0008	0,193	50	60,409	1,793

Середнє арифметичне значення вибірки розраховується за формулою

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i \cdot f_i}{\sum f_i} = \frac{0,0727}{56} = 0,00129 \quad (4.8)$$

де x_i – значення і-го результату спостереження.

Вибіркове середньоквадратичне відхилення визначається як

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot f_i}{\sum f_i}} = \sqrt{\frac{0,0000037}{56}} = 0,000256 \quad (4.9)$$

Нормоване (стандартизоване) відхилення обчислюється за формулою:

$$t = \frac{x_i - \bar{x}}{\delta}, \quad (4.10)$$

Тоді

$$\varphi(t) = \frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (4.11)$$

Теоретичні частоти обчислюються на підставі співвідношення:

$$f'_T = \varphi(t) \cdot \frac{(x_{\max} - x_{\min}) \cdot \sum f_i}{\sigma} = \frac{(0,00189 - 0,00089) \cdot 56}{0,000256} \cdot \varphi(t) = 219,12 \cdot \varphi(t) \quad (4.12)$$

Обчислимо емпіричне значення критерію Пірсона

$$\chi^2_{\text{емпір}} = \sum_{i=1}^k \frac{(f_i - f'_T)^2}{f'_T} = 8,841, \quad (4.13)$$

По таблиці критичних точок χ^2 - розподілу із заданим рівнем значущості 0,01 і числу ступенів свободи $m=k-1=6$ знаходимо $\chi^2_{\text{крит}}(0,01;6)=16,814$.

Так як $\chi_{\text{емп}}=8,841 < \chi_{\text{крит}}=16,814$, то гіпотеза про нормальний закон розподілу емпіричного коефіцієнту тертя приймається.

Аналогічно проведемо перевірку для значень коефіцієнту тертя, отриманих розрахунковим шляхом (табл. 4.5).

Таблиця 4.5 – Результати перевірки гіпотези про нормальний закон розподілу для розрахункових значень вихідного параметру по отриманій моделі.

Розрахункові значення					Теоретична частота	Кумулятивна частота		
x	f_i	$x_i - \bar{x}$	$\frac{x_i - \bar{x}}{\delta}$	$\varphi(t)$	f'_T	Фактична $\sum f_i$	Теоретична $\sum f'_T$	$\frac{(f_i - f'_T)^2}{f'_T}$
0,00089	6	-0,00042	-1,697	0,035	7,43	15	7,43	7,517
0,00103	7	-0,00028	-1,121	0,052	11,05	27	18,48	3,727
0,00117	9	-0,00013	-0,545	0,053	11,26	38	29,74	2,097
0,00131	12	0,00001	0,031	0,038	8,08	43	37,82	0,516
0,00146	10	0,00015	0,607	0,018	3,83	46	41,65	0,261
0,00160	8	0,00029	1,183	0,006	1,28	48	42,93	0,405
0,00174	4	0,00044	1,759	0,001	0,21	50	43,14	0,898

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i \cdot f_i}{\sum f_i} = \frac{0,0731}{56} = 0,00131 \quad (4.14)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot f_i}{\sum f_i}} = \sqrt{\frac{0,0000034}{56}} = 0,000247 \quad (4.15)$$

$$f'_T = \varphi(t) \cdot \frac{(x_{\max} - x_{\min}) \cdot \sum f_i}{\sigma} = \frac{(0,00188 - 0,00089) \cdot 56}{0,000247} \cdot \varphi(t) = 226,31 \cdot \varphi(t) \quad (4.16)$$

Обчислимо емпіричне значення критерію Пірсона

$$\chi^2_{\text{емп}} = \sum_{i=1}^k \frac{(f_i - f'_T)^2}{f'_T} = 15,421 \quad (4.17)$$

Так як $\chi_{\text{емп}} = 15,421 < \chi_{\text{крит}} = 16,814$, то гіпотеза про нормальний закон розподілу емпіричного коефіцієнту тертя приймається.

Далі проведемо розрахунок емпіричного критерію Фішера для рівночисельного двох вибірок. Порівняння дисперсій двох вибірок що

виконуються по відношенню більшої за величиною дисперсії до меншої. Порядок обчислення наступний:

1. Розраховуються середньоарифметичні значення $\bar{Y}_1$ і $\bar{Y}_2$ для кожної вибірки за формулою $\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i$, де x_i -значення i -го результату спостереження.

2. Розраховуються значення $D_{Y_1}^2$ та $D_{Y_2}^2$ - дисперсії для кожної вибірки за формулою:

$$D_Y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(Y_i - \bar{Y} \right)^2. \quad (4.18)$$

3. Визначається число ступенів свободи за вибірками: $df_1 = (n_1 - 1)$ - по першій вибірці і $df_2 = (n_2 - 1)$ - по другій вибірці.

4. Розраховується $F_{ЕМП}$ – емпіричне значення критерію за однією з формул: $F_{ЕМП} = \frac{D_{Y_1}^2}{D_{Y_2}^2}$, або $F_{ЕМП} = \frac{D_{Y_2}^2}{D_{Y_1}^2}$ з урахуванням того, що дисперсія в чисельнику повинна бути більше дисперсії в знаменнику.

Результати обчислень представлені в табл. 4.6

Таблиця 4.6 – Результати розрахунків критерію Фішера

№	Коефіцієнт тертя, f_T (екс.)	Коефіцієнт тертя, f_T (мод.)
	(Y_1)	(Y_2)
1	0,00184	0,00188
2	0,00182	0,00183
3	0,00189	0,00178
4	0,00179	0,00177
5	0,00171	0,00174
6	0,00170	0,00173
7	0,00166	0,00169
8	0,00176	0,00167

№	Коефіцієнт тертя, f_T (екс.)	Коефіцієнт тертя, f_T (мод.)
	(Y_1)	(Y_2)
9	0,00157	0,00165
10	0,00159	0,00162
11	0,00162	0,00162
12	0,00167	0,00162
13	0,00153	0,00159
14	0,00155	0,00154
15	0,00149	0,00154
16	0,00155	0,00153
17	0,00157	0,00152
18	0,00150	0,00150
19	0,00144	0,00148
20	0,00152	0,00148
21	0,00145	0,00147
22	0,00150	0,00146
23	0,00145	0,00144
24	0,00140	0,00143
25	0,00146	0,00143
26	0,00140	0,00141
27	0,00141	0,00141
28	0,00134	0,00140
29	0,00143	0,00138
30	0,00135	0,00136
31	0,00135	0,00135
32	0,00130	0,00133
33	0,00138	0,00131
34	0,00132	0,00131
35	0,00121	0,00127
36	0,00132	0,00125
37	0,00134	0,00125
38	0,00123	0,00125
39	0,00115	0,00122
40	0,00125	0,00121
41	0,00100	0,00119
42	0,00127	0,00119
43	0,00118	0,00118

№	Коефіцієнт тертя, f_T (екс.)	Коефіцієнт тертя, f_T (мод.)
	(Y_1)	(Y_2)
44	0,00120	0,00114
45	0,00092	0,00113
46	0,00112	0,00110
47	0,00122	0,00110
48	0,00113	0,00109
49	0,00115	0,00104
50	0,00095	0,00103
51	0,00096	0,00098
52	0,00099	0,00098
53	0,00095	0,00093
54	0,00092	0,00093
55	0,00090	0,00092
56	0,00089	0,00089
	$\bar{Y}_1 = 0,00137$	$\bar{Y}_2 = 0,00137$
	$D_{x_1}^2 = 0,0000000688$	$D_{x_2}^2 = 0,0000000649$
	$df1=55$	$df2=55$
	$F_{EMП} = \frac{D_{x_2}^2}{D_{x_1}^2} = 1,05861$	

При порівнянні емпіричного значення $f_{EMП} = 1,05961$ критерію Фішера з критичним значенням $f_{KP} = 1,607289$, визначеним по таблиці для числа ступенів свободи $df1 = df2 = 55$ і рівня значущості $\alpha = 0,05$, видно, що експериментально отримане значення $f_{EMП} < f_{KP}$, отже, гіпотеза про адекватність результатів, отриманих шляхом моделювання, результатам, отриманим шляхом натурних експериментів, підтверджується на 5% рівня значущості.

Таким чином, отримана модель описує дослідний процес з великою точністю, що дозволяє використовувати її для розрахунку коефіцієнту тертя для різної кількості обертів кульки без проведення експериментальних дослідів (досліджень).

4.4.3 Результати розрахунків багатфакторної моделі. Пасивний експеримент має інші незалежні змінні, на основі яких можемо побудувати багатфакторну аналітичну модель. Основна мета дослідження – математично отримати та дослідити регресійне рівняння залежності дійсної товщини шару від механічних та фізичних параметрів. В якості механічних параметрів розглядається коефіцієнт тертя, аналітичну модель якого було побудовано раніше. Температура процесу та навантаження у точці дотику було використано як фізичні незалежні параметри, вплив яких досліджується в роботі.

Застосовуючи формулу 4.5 та інші теоретичні аспекти побудови регресійних багатфакторних моделей, які описані вище було отримано модель:

$$h_d = f(N, f_T, t), \quad (4.19)$$

$$h_d = 0,0012 \cdot N - 609,058 \cdot f_T + 0,0667 \cdot t - 1,647 \cdot N \cdot f_T + 0,0002 \cdot N \cdot t - 0,3856 \cdot f_T \cdot t + 0,00017 \cdot N^2 + 55911,25 \cdot f_T^2 - 0,00073 \cdot t^2, \quad (4.20)$$

де h_d – вихідний параметр, як функція від багатьох факторів, та є величиною дійсної товщини, $h_d \cdot 10^{-6}$, мм;

N – навантаження в точці контакту, Н;

t – температура, °С;

f_T – коефіцієнт тертя, який визначався як функція ($f_T = f(n)$) залежності від кількості обертів кульки.

Адекватність моделі (1) перевірялась за критерієм Фішера, який визначається за формулою:

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_{\{y\}}^2} \quad (4.21)$$

де S_{ad}^2 дисперсія адекватності, що визначається за формулою:

$$S_{ad}^2 = \frac{n \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{f} \quad (4.22)$$

Значення числа ступенів вільності $f = N - (k + 1) = 8$ для $k=3$ - числа факторів.

$S_{\{y\}}^2$ – дисперсія параметра оптимізації:

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N S_j^2}{n} \quad (4.23)$$

Так як $n = 1$, то:

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N S_j^2}{n} = S_j^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}{N-1} \quad (4.24)$$

де $\bar{y}$ – середнє значення по y

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^{30} y_i}{N} \quad (4.25)$$

Розраховане значення критерію Фішера становило 2,28. Так як $f_{табл}=2,69$ і $f_{розра} < f_{табл}$, то підтверджується гіпотеза адекватності результатів експерименту побудованої моделі.

Для визначення адекватності моделей (2), (3) та (4) застосовується коефіцієнт множинної кореляції, який характеризує тісний зв'язок між двома змінними. Коефіцієнт кореляції визначаємо:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n-1) \cdot s_x \cdot s_y}, \quad (4.26)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

де

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}; s_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} - \text{вибіркові середні квадратичні}$$

відхилення.

Отже, вибіркові відхилення дорівнюють

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \\ s_x &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}; s_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \end{aligned} \quad (4.27)$$

Обчислені значення коефіцієнтів кореляції дорівнюють 0,985, що свідчить про високий рівень зв'язку між експериментальними значеннями вихідної змінної та значеннями одержаними в результаті моделювання системи. Значення відносної похибки при розрахунку за моделями приведено в таблиці 4.6 та для всіх значень не перевищує 5%.

Таким чином, отримані моделі є адекватними та можуть використовуватися для розрахунку дійсної товщини шару.

Для узагальнення результатів розрахунку проведено об'єднання отриманих моделей, що дозволило отримати складну модель та провести графічний аналіз пасивного експерименту:

$$h_d = f(N, f_T, t) \cup f_T = f(n) \Rightarrow h_d = f(N, f(n), t), \quad (4.28)$$

Для аналізу результатів за отриманими аналітичними моделями застосовувалися графічні методи з використанням спеціальних комп'ютерних програм, наприклад, програми «MathCad», що дозволяє візуалізувати рівняння регресії, в якому змінними залишаються тільки два з

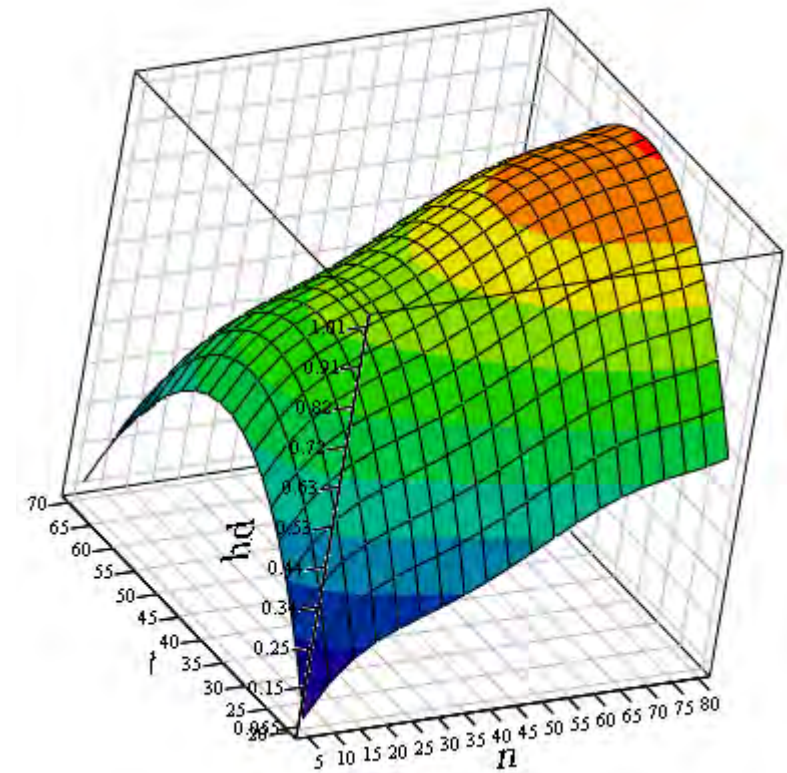
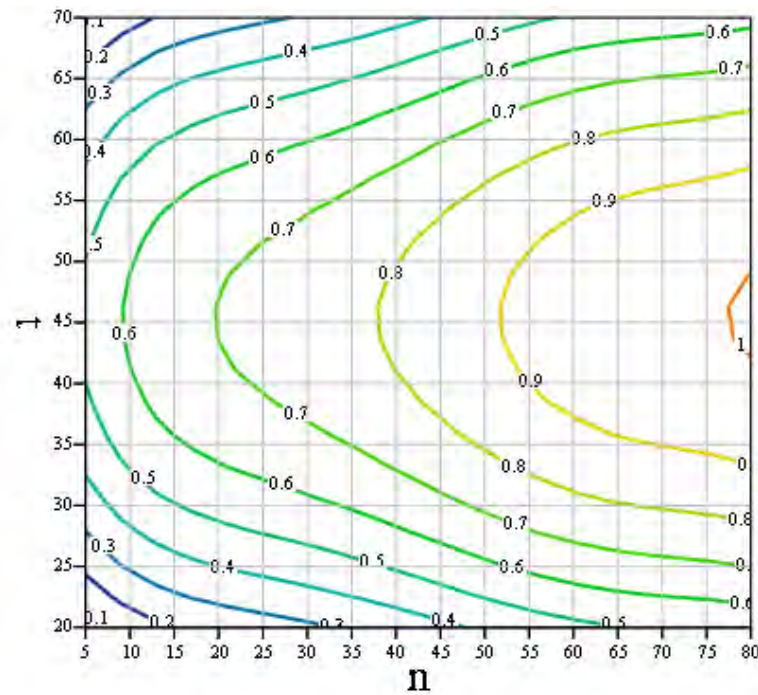
усіх факторів і їх поєднань, інші чинники рівняння фіксуються на деякому рівні.

Одною з переваг, програми «MathCad» є те, що вона візуалізує рівняння регресії, представляє поверхню відгуку в аксонометрії, а також в проекціях на координатні площині. Крім того, вона дозволяє, будувати проекцію контурних ліній поверхні відгуку в координатах факторів $X_i X_j$, що позначають парні поєднання незалежних змінних факторів в рівнянні регресії.

На рис.4.15 представлено результати моделювання для навантаження в точці дотику рівному 3,75Н. За лініями відгуку на площині та динамікою зміни поверхні можна побачити, що при середній температурі 45 °С та при зростанні кількості обертів кульки дійсна товщина збільшується. Це дозволяє стабілізувати процес для отримання необхідних результатів. Така ж тенденція притаманна і для інших навантажень, але збільшує факторний простір максимальних значень товщини при збільшенні навантаження.

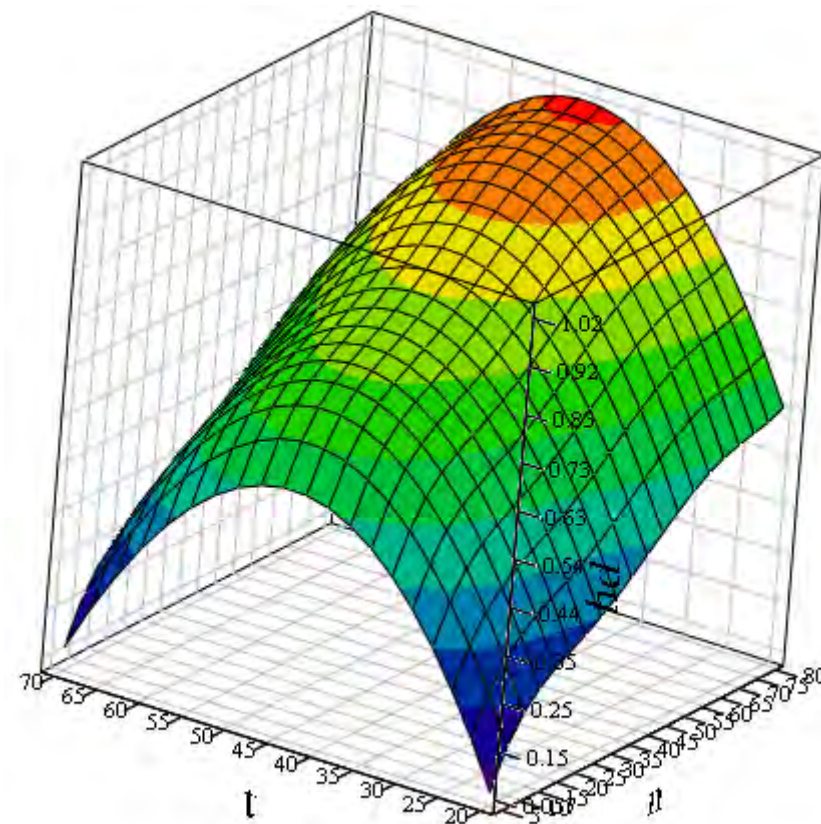
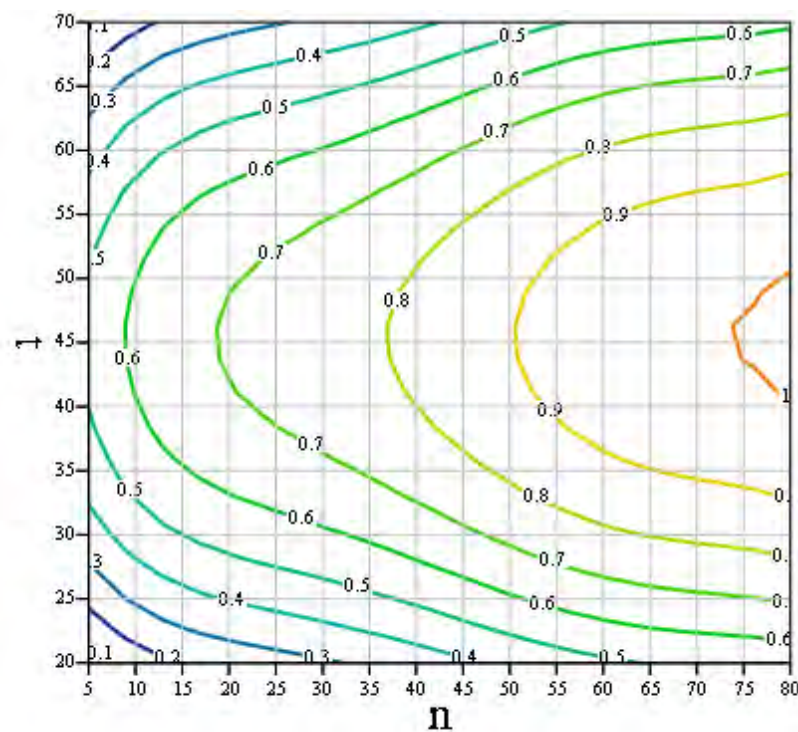
Графічна інтерпретація впливу навантаження в точці дотику та кількості обертів кульки (рис. 4.19 та рис. 4.20) вказує, що результати залежать більше від кількості обертів кульки. Зростання величини обертів прямопропорційно впливає на збільшення дійсної товщини. При цьому при зростанні температури дійсна товщина зменшується для однакових інших незалежних показників.

Таким чином, отримані аналітичні моделі та їх графічна інтерпретація дозволяють отримувати дійсну товщину без проведення пасивного експерименту та великої кількості дослідів, моделювати процес на основі регресійних рівнянь, а також простежувати динаміку зміни вихідної величини в залежності від рівня різних факторів впливу.



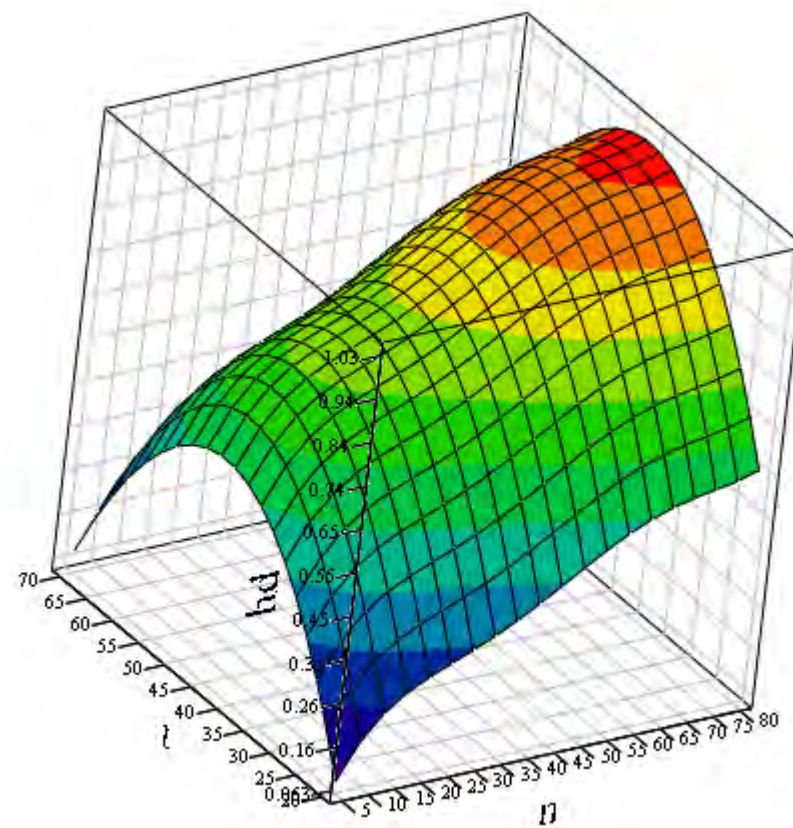
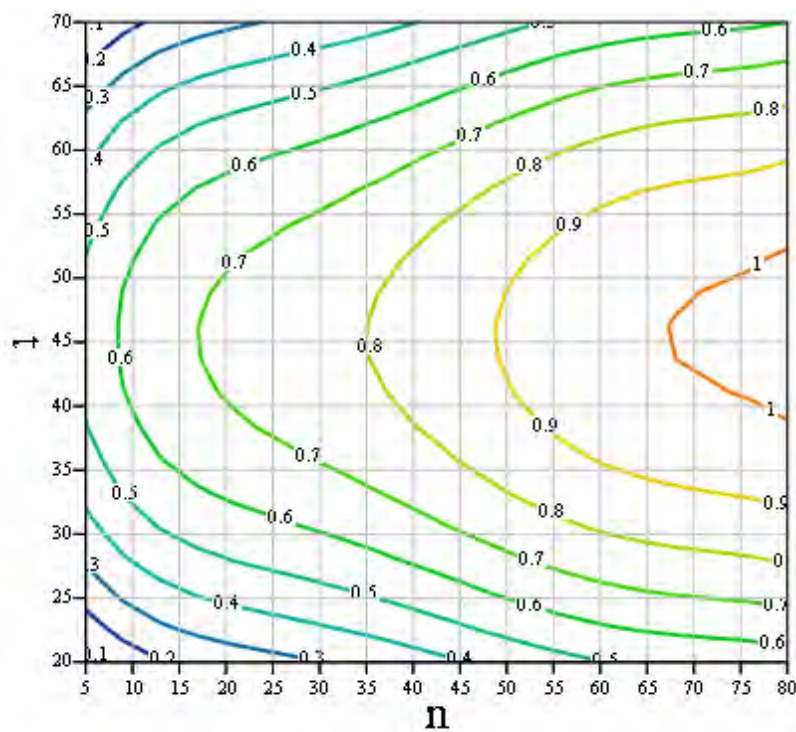
Н

Рисунок 4.15 – Поверхні відгуку значень дійсної товщини в залежності від кількості обертів і температури при навантаженні $N = 3.75$ Н



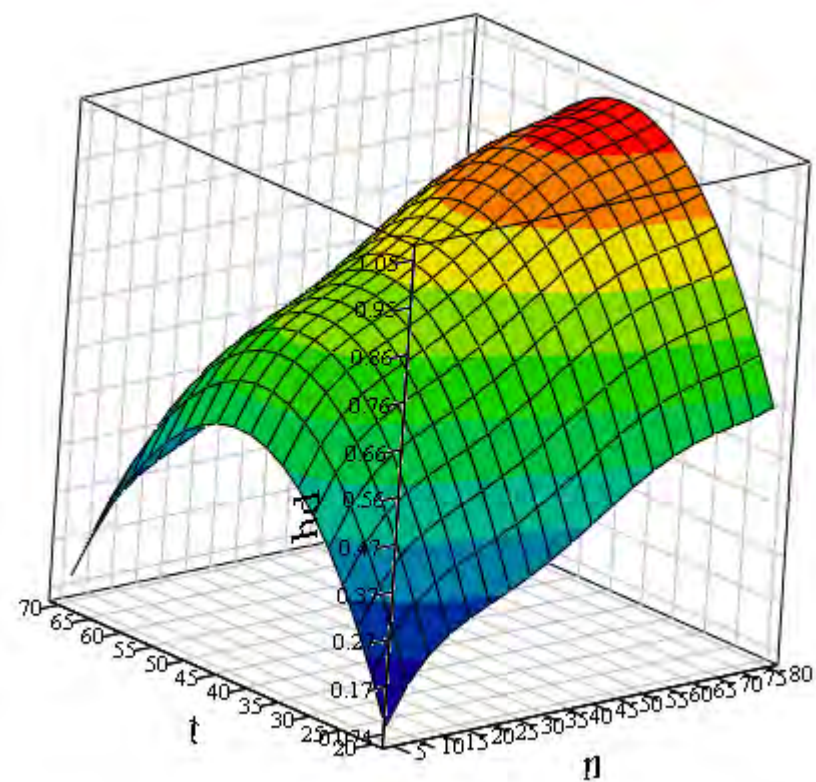
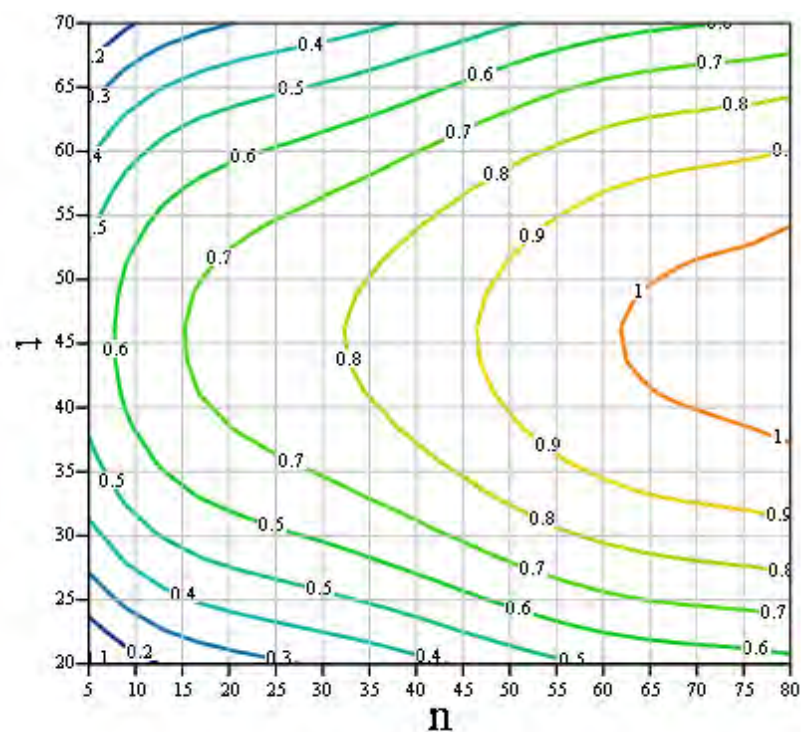
H

Рисунок 4.16 – Поверхні відгуку значень дійсної товщини в залежності від кількості обертів і температури при навантаженні $N = 7.5 \text{ Н}$



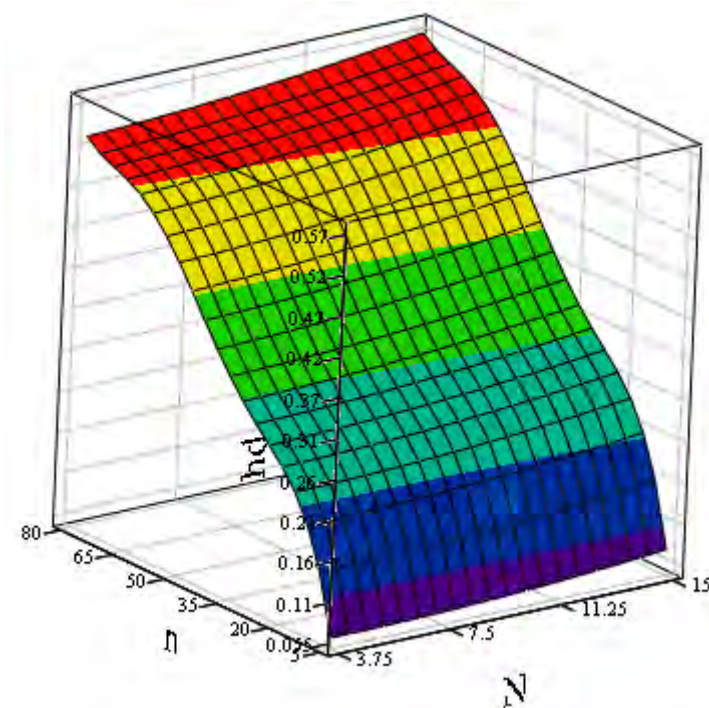
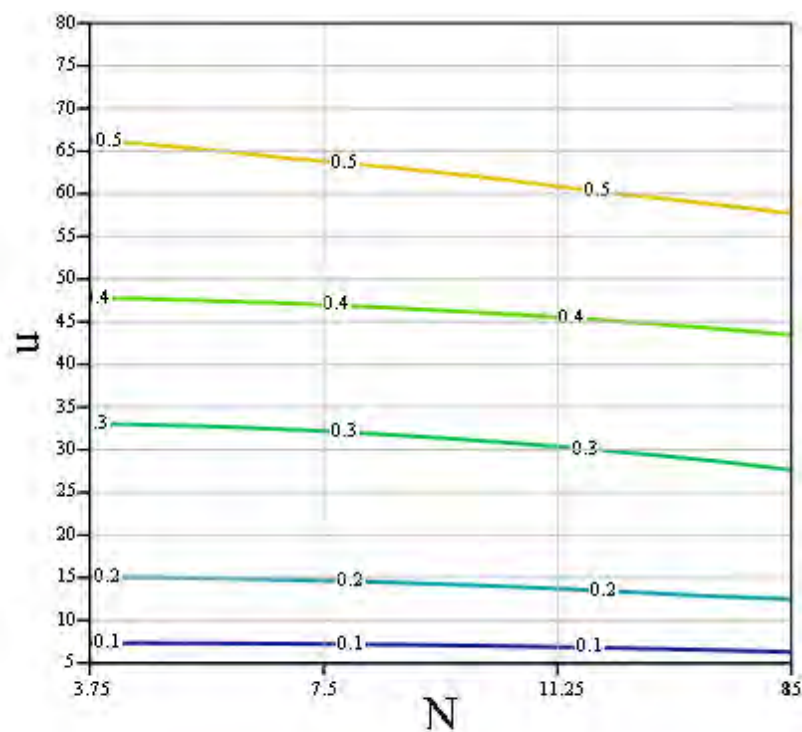
Н

Рисунок 4.17 – Поверхні відгуку значень дійсної товщини в залежності від кількості обертів і температури при навантаженні $N = 11.25$ Н

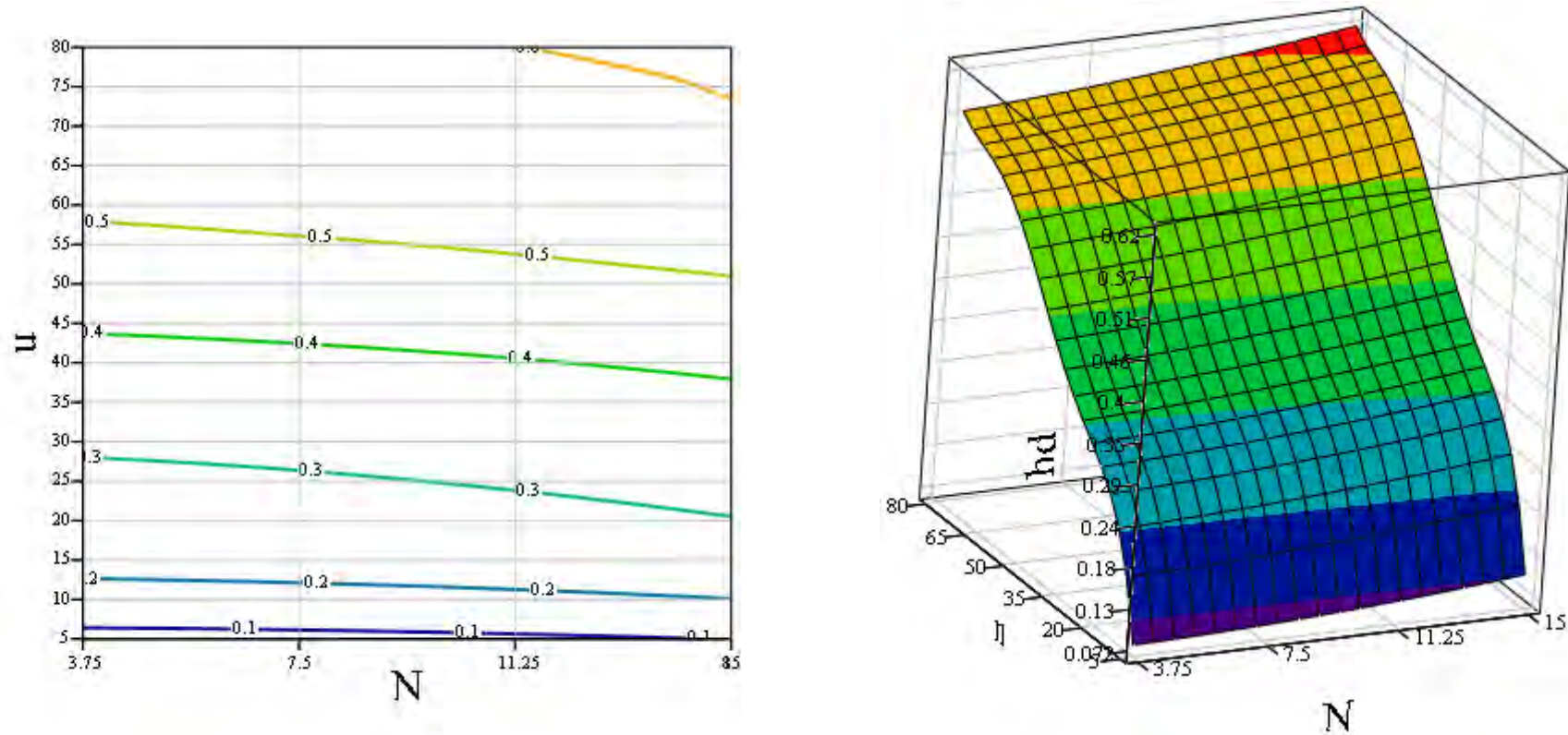


Н

Рисунок 4.18 – Поверхні відгуку значень дійсної товщини в залежності від кількості обертів і температури при навантаженні $N = 15 \text{ Н}$



Н Рисунок 4.19 – Поверхні відгуку значень дійсної товщини в залежності від навантаження в точці контакту і кількості обертів при температурі $t=20^{\circ}\text{C}$



Н

Рисунок 4.20 – Поверхні відгуку значень дійсної товщини в залежності від навантаження в точці контакту і кількості обертів при температурі $t=70^{\circ}\text{C}$

Це свідчить, що при підвищенні кількості обертів дійсна товщина збільшується, хоча збільшення навантаження в точці контакту має слабку обернену залежність.

Висновки до розділу 4:

1. В умовах обмеженого мащення при чистому коченні зафіксовані наступні результати:

- для всіх досліджуваних мастильних матеріалів була виявлено, що по мірі зростання швидкості кочення прискорюється формування товщини мастильного шару в контакті, в центральній зоні контакту двох тіл. Приріст товщини мастильної плівки призводить до переходу від змішаного до гідродинамічного режиму мащення для досліджених мастильних матеріалів, окрім оливи ПРОТЕК ЄМТ-8, для якої вдалося досягнути лише еластогідродинамічного режиму;

- для оливи І-40А встановлене прискорення швидкості початкового формування товщини мастильного шару на 18%. Що пояснюється тим, що зменшується в'язкість оливи, при цьому збільшується кінетична енергія молекул, інтенсифікуються адсорбційні процеси на межі метал–мастильний матеріал та скло–мастильний матеріал. Оскільки контактні напруги, які діють в центральній зоні контакту, не обумовлюють відтиснення молекулярних компонентів мастильного матеріалу на периферійні зони, то в умовах формування початкової товщини мастильного шару при низькій швидкості мастильний матеріал із прискоренням релаксує в центральну зону контакту, що зменшує час адаптації компонентів оливи до швидкості;

- моторна олива М10Г2К формує товщину мастильного шару, яка забезпечує реалізацію змішаного режиму мащення, при сумарній швидкості кочення ($V_{\Sigma k} = 0,076 \text{ м/с}$). Цей показник є аналогічним, як і при рясному мащенні, що пояснюється збільшенням кінетичної енергії молекул та інтенсифікацією адсорбційних процесів;

- моторні оливи TEMOL CLASSIC 15w40, М8Г2К та універсальні оливи ЄМТ–8 і ПРОТЕК ЄМТ-8 характеризуються запізненням в формуванні початкової товщини мастильного шару – $V_{\Sigma k}$ при обмеженому мащенні зростає в 1,25; 1,2; 1,07; 1,21 рази, в порівнянні з умовами рясного мащення. В умовах

експериментів було зафіксовано незначне підвищення температури в зоні контакту, в середньому, 3–5°C, але фактично вона не впливає на кінетичну енергію молекул. Основним чинником при формуванні масляної плівки є зростання вектора швидкості кочення, в результаті дії останнього відбувається інтенсивніше втягування мастильного матеріалу в зону контакту та зростання товщини мастильного шару.

2. За результатами експериментальних досліджень в умовах обмеженого мащення при коченні з проковзуванням нами зафіксовано дві тенденції щодо динаміки утворення початкової товщини мастильного шару в контакті в початковий період формування (реалізується змішаний режим мащення):

- збільшення сумарної швидкості кочення для олив М8Г2К, М10Г2К, І-40А та ЄМТ-8 відповідно в 1,26; 1,30; 1,13; 1,12 рази;
- зменшення сумарної швидкості кочення для олив TEMOL CLASSIC 15w40, ПРОТЕК ЄМТ-8 відповідно на 8,75% та 13%.

3. При зміні режиму мащення від рясного до обмеженого мащення встановлено запізнення у формуванні початкової товщини мастильного шару для всіх досліджених мастильних матеріалів: TEMOL CLASSIC 15w40 – 9,5%, М8Г2К – 50,5%, М10Г2К – 20,2%, ЄМТ-8 – 11,9%, І-40А – 1,7% та ПРОТЕК ЄМТ-8 – 20,7%. Однак, зростання градієнту швидкості при напрацюванні в умовах обмеженого мащення обумовлює активацію та поляризацію молекул олив під дією твердої фази контактних поверхонь, концентрація активованих молекул постійно зростає. При перших проходах кульки по диску, не відбувається надходження нових порцій мастильного матеріалу, товщина плівки збільшується за рахунок підвищення адгезійних властивостей активованих компонентів мастильного середовища.

4. При переході від режиму рясного мащення до обмеженого мащення, згідно результатів експериментальних досліджень щодо зміни ефективної в'язкості мастильних матеріалів встановлено, що всі мастильні матеріали в початковий період формування мастильного шару характеризуються надбанням неньютонівських властивостей в контакті, що не враховується ЕГД

ТМ. Саме про неньютонівські характеристики олив свідчить залежність ефективної в'язкості олив від градієнту швидкості зсуву, який в даному випадку зростає по мірі збільшення сумарної швидкості кочення. Зниження ефективної в'язкості η_{ef} протягом експерименту для олив TEMOL CLASSIC 15w40, M8Г2К, M10Г2К, І-40, ЄМТ-8 та ПРОТЕК ЄМТ-8 становить 73%: 76%: 70%: 72%, 80% та 68% відповідно, при цьому градієнт швидкості зсуву зростає в 1,92; 1,95; 1,76; 2,47; 2,67 та 2,07 рази.

5. В умовах зростання швидкості кочення покращується ефективність мащення, про що свідчить зростання товщини мастильного шару, при цьому ефективна в'язкість в контакті зменшується, що призводить як до зниження напруги зсуву мастильного шару так і локалізації вектора напруги зсуву в товщині мастильного шару, де вплив твердої поверхні мінімальний. В результаті зниження контактної напруги зменшується і коефіцієнт тертя. Як наслідок, для досліджених олив TEMOL CLASSIC 15w40, M8Г2К, M10Г2К, І-40, ЄМТ-8 та ПРОТЕК ЄМТ-8 зафіксовано підвищення антифрикційних властивостей на 48%; 47%; 47%; 48%; 48% та 48% відповідно.

6. Для всіх мастильних матеріалів, що досліджуються в діапазоні навантаження від 251,5 до 362,7МПа, як і при рясному мащенні, було встановлено підвищення ефективної в'язкості в контакті на 40,56%, 49,22%, 49,84%, 35,65%, 43,49%, 28,69% відповідно для TEMOL CLASSIC 15w40, M8Г2К, M10Г2К, І-40, ЄМТ-8 та ПРОТЕК ЄМТ-8, що свідчить про структурування компонентів мастильного матеріалу під впливом контактної напруги. Ступінь структурування, аналогічно, як і при рясному мащенні, перш за все залежить від фізико-хімічного складу мастильного матеріалу.

7. Встановлено збільшення напруги зсуву мастильного шару для моторних олив TEMOL CLASSIC 15w40; M8Г2К та M10Г2К, що пояснюється з позиції наявності у їх складі понад 30% ароматичних вуглеводнів які перешкоджають щільній структуруванню високомолекулярних компонентів в'язкісної присадки. Тому додатковий опір зсуву створюють утворені структуровані шари ретикулярного поліморфічного типу.

8. При зростанні контактного навантаження з 251,5 до 362,7МПа встановлено зменшення градієнту швидкості зсуву для олив TEMOL CLASSIC 15w40, M8Г2К, M10Г2К, І-40, ЄМТ-8 та ПРОТЕК ЄМТ-8 відповідно на 12%, 19%, 26%, 25%, 12%, 10%.

9. В умовах зростання контактного навантаження з 251,5 до 362,7МПа при початковому формуванні товщини мастильного шару встановлена кореляційна залежність коефіцієнта тертя та напруги зсуву мастильного шару для олив TEMOL CLASSIC 15w40, M8Г2К, M10Г2К, І-40, ЄМТ-8 та ПРОТЕК ЄМТ-8 – f збільшується на 2,5% при зростанні τ на 40%.

10. Початкове формування товщини мастильного шару в контакті інтенсифікується при зростанні швидкості кочення, внаслідок чого забезпечується локалізація дотичних напруг зсуву в об'ємній фазі мастильного матеріалу та призводить до підвищення антифрикційних властивостей.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ:

1. Модернізовано стенд оптичної інтерферометрії для вимірювання товщини мастильного шару та реологічних параметрів олив, що дало змогу максимально наблизити умови лабораторного дослідження до реальних умов експлуатації неконформних вузлів тертя.

2. Визначений кращий за протизношувальними та антифрикційними властивостями зразок зі складом I-40A+0,05% беззолного (Zn-Free) модифікатора тертя на основі фосфідно-сульфідних сполук, з метою виготовлення універсальної моторно-трансмісійної оливи ПРОТЕК ЄМТ-8.

3. В умовах чистого кочення при дослідженні динаміки формування товщини мастильного шару встановлено, що:

- формування товщини мастильного шару для всіх досліджених олив, як при рясному так і при обмеженому мащенні залежить від швидкості кочення – при зростанні якої відбувається підвищення товщини мастильного шару в центральній зоні контакту, що призводить до встановлення відповідних режимів мащення;

- ефективність змащувальної дії моторно-трансмісійних олив ЄМТ ПРОТЕК та ЄМТ-8 при рясному мащенні мають певні відмінності від загальноприйнятих залежностей щодо кращого формування мастильним матеріалом розділяючого шару в контакті, про що свідчать показники ефективнішого формування товщини мастильного шару моторними оливами TEMOL CLASSIC 15W-40; M8Г2К; M10Г2К;

- досліджені оливи при обмеженому мащенні характеризуються відставанням в формуванні початкової товщини мастильного шару, окрім оливи I-40A, для якої встановлено прискорення швидкості початкового формування товщини змащувального шару на 18% імовірно зі збільшенням кінетичної енергії молекул при зменшенні в'язкості;

4. Визначено, що при коченні за наявності проковзування в контакті властивості граничних плівок, залежать, як від в'язкості мастильного

матеріалу, так і від наявності та ефективності поверхнево-активних речовин (ПАР). При явному мащенні реалізуються сприятливі умови для зменшення початкової швидкості кочення зі встановленням змішаного режиму мащення при використанні мастильних матеріалів, які містять ПАР, що мають полярні молекули.

5. Встановлено, що за рахунок наявної у своєму фракційному складі оптимальної комбінації фосфідно-сульфідного аддукту оливи ЄМТ ПРОТЕК-8 забезпечує динаміку ефективного та надійного мащення контактних поверхонь в дослідженому діапазоні швидкостей та навантаження, що на структурування граничних адсорбційних шарів впливають вуглеводневі компоненти базової основи. При цьому зростання напруги зсуву в контактній тертя обумовлено впливом деструкційно-полімеризаційних процесів, зростанням адгезійної та когезійної сил взаємодії компонентів оливи і контактних поверхонь пар тертя; зростанням градієнта швидкості зсуву при збільшенні швидкості кочення та контактного навантаження що залежить від кількісного впливу формування метастабільних ретикулярних шарів поліморфного типу, які характеризуються додатковим опором зсуву.

6. Для всіх досліджених мастильних матеріалів як при явному так і при обмеженому мащенні, швидкість початкового формування товщини мастильного шару в контактній тертя зростає при зменшенні в'язкості мастильного матеріалу, внаслідок зменшення кількості мастильного матеріалу на вході в контакт.

7. Кінетика зміни реологічних характеристик мастильних матеріалів в контактній: показана залежність ефективної в'язкості від градієнту швидкості зсуву, що свідчить про надбання оливами неньютонівських властивостей при початковому формуванні товщини мастильного шару, і не враховується в ЕГД ТМ. Для підтвердження даного трактування є фактична товщина мастильного шару, яка згідно досліджень в початковий період формування мастильної плівки, незалежно від типу оливи, на 7 – 11 % перевищує товщину мастильної плівки, яка розрахована за формулами Даусона та Хемрока. При явному

мащенні зниження ефективної в'язкості в контакті становить 72-86%; в умовах обмеженого мащення встановлено зниження ефективної в'язкості в контакті для всіх досліджених мастильних матеріалів на 70-80% при зростанні градієнта швидкості зсуву зростає в 1,7 - 2,7 рази.

8. Кінетика зміни антифрикційних властивостей мастильних матеріалів при різних режимах мащення: як в умовах рясного мащення так і при обмеженому мащенні при збільшенні контактного навантаження зростання напруги зсуву призводить до кореляційного збільшення коефіцієнту тертя для всіх досліджених мастильних матеріалів.

9. Збільшення градієнту швидкості зсуву внаслідок зростання швидкості ковзання призводить до видалення компонентів структурованих граничних шарів в об'ємну смектичну фазу, відбувається локалізація дотичних напруг зсуву, а це в свою чергу забезпечує в контакті умови для домінування гідродинамічного режиму мащення.

10. Створена аналітична модель ефективності мащення, що дає змогу визначити ступінь впливу експлуатаційних чинників, і як наслідок, можливість прогнозувати довговічність неконформних вузлів тертя з точковою формою контакту.

11. Результати теоретичних та експериментальних досліджень прийняті до впровадження у ТОВ «КСМ Протек» (сmt. Клавдієво-Тарасове, Київська обл.) при виготовленні та оптимізації структурного складу мастильних матеріалів та філії КП «Київпастранс» Автобусний парк №6 (м. Київ) при прогнозуванні періодичності технічного обслуговування та заміни універсальних моторно-трансмісійних олив в агрегатах трансмісій гусеничної техніки та в навчальний процес Національного транспортного університету.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дмитриченко М. Ф. Дослідження кінетики зміни товщини мастильного шару в залежності від матеріалу пар тертя / Дмитриченко М. Ф., Білякович О. М., Глухонець А. О., Міняйло К. М. // Технологический аудит и резервы производства — № 6/6(26-), 2015. С. 39-41.
2. Дмитриченко М. Ф. Динамика формирования толщины смазочного слоя в условиях локального контакта / Дмитриченко М.Ф., Білякович О.М., Глухонець А.О., // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. – К.: НТУ, 2017. – Вип. 1 (37), С. 109-115.
3. Дмитриченко М. Ф. Моніторинг стану поверхневих шарів трибосполучень в умовах тривалої експлуатації мастильних матеріалів / Дмитриченко Микола, Білякович Олег, Савчук Анатолій, Міланенко Олександр, Туриця Юлія, Глухонець Андрій / Systemy i Srodki Transportu Samochodowego. Wybrane Zagadnienia : Monografia // pod redakcja naukowa Kazimierza Lejdy. – Seria Transport № 14. – Rzeszów: Politehnika Rzeszowska, 2015. – С. 227-232 ISBN 978-83-7934-007-1.
4. Дмитриченко М. Ф. Оценка состояния трансмиссионных масел по динамическим характеристикам трения. / Н. Ф. Дмитриченко, О. Н. Билякович, О. В. Руденко, А. А. Глухонец // Международный научный журнал журнал «ТРЕНИЕ И ИЗНОС»: Гомель ИММС НАН Беларуси 2016, Том 37, No 3, С. 374-378 (Scopus).
5. Дмитриченко М. Ф. Using Mathematical, Experimental and Statistical Modeling to Predict the Lubricant Layer Thickness in Tribosystems / М. Dmytrychenko, V. Khrutba, A. Savchuk, A. Hlukhonets. Mathematical Modeling and Simulation of Systems/ Springer Nature Switzerland AG / 2019, P.39-49. (Scopus).
6. Дмитриченко М.Ф. Динаміка формування товщини мастильного шару в умовах точкового контакту / Дмитриченко М.Ф., Глухонець А.О.,

Богданова О.І., Глухонець О.О // Матеріали LXXI наукової конференції професорсько-викладацького складу аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету – К.: НТУ, 2015. – С.6.

7. Дмитриченко Н.Ф. Эффективная вязкость смазочного материала в зоне контакта при масляном голодании / Дмитриченко Н.Ф., Глухонец А.А., Богданова О.И., Глухонец О.А. // Материалы 14-й Международной научно-технической конференции (69-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов БНТУ), Минск БНТУ, 2016 В 4 томах. Том 2, – С.100.

8. Богданова О.І. Ефективна в'язкість мастильного матеріалу в точковому контакті / Богданова О.І., Глухонець О.О., Глухонець А.О., Симоненко Б.А. // Матеріали LXXIII наукової конференції професорсько-викладацького складу аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету – К.: НТУ, 2017. – С. 12-13.

9. Глухонец А.А. Влияние параметра скорости качения на кинетику формирования толщины смазочного слоя в условиях эластогидродинамического режима смазки/ Глухонец А.А. // Материалы 15-й Международной научно-технической конференции (70-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов БНТУ), Минск БНТУ, 2017 В 4 томах. Том 2, С. 98.

10. Дмитриченко М.Ф. Математичне моделювання процесу зміни товщини мастильного шару в точковому контакті / Дмитриченко М.Ф., Глухонець А.О., Богданова О.І., Глухонець О.О., Бондарчук В.В.// Матеріали LXXIV наукової конференції професорсько-викладацького складу аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету – К.: НТУ, 2018. – С. 6-7.

11. Дмитриченко М.Ф. Моделирование процесса зміни ширини змащувального шару у локальному контакті / Дмитриченко М.Ф., Савчук А.М., Глухонець А.О. Шевченко О.О. // III-я Всеукраїнська науково-практична

конференція «Новітні шляхи створення, експлуатації, ремонту і сервісу автомобілів» – Миколаїв: ТОВ «МІПРО», 2018. – С. 26-28.

12. Шорина Н.С. Триботехническое материаловедение и триботехнология: учеб. пособие// Под общей редакцией Н.Е. Денисовой. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2006. – 248 с.

13. Основи трибології: Підручник / Антипенко А.М., Бєлас О.М., Войтов В.А. та ін. // За ред.. Войтов В.А. – Харків: ХНТУСГ, 2008. – 342

14. Современная трибология: Итоги и перспективы. Отв. ред. К. В. Фролов. — М.: Издательство ЛКИ, 2008. — 480 с.

15. Пинкус. Столетие теории Рейнольдса. Краткая история гидродинамической теории смазки // Проблемы трения и смазки. 1987. № 1. С.1-20.

16. Кристенсен, Тондер. Гидродинамическая смазка подшипника конечной ширины с шероховатыми поверхностями // Пробл. трения и смазки. 1971. №3. С. 9-16; 1973. №2. С. 53; 1977. №3. С. 12-22.

17. Элрод. Алгоритм расчета кавитации // Пробл. трения и смазки. 1973. №4. С. 91; 1974. №4. С. 31; 1981. №3. С. 28-32.

18. Чжоу, Сейбел. О влиянии шероховатости при гидродинамической смазке // Пробл. трения и смазки. 1978. №2. С. 34-38.

19. Уилкок. Влияние шероховатости поверхностей на процессы смазки: Обзор докладов, представленных на IV Лидс-Лионский симпозиум (Лион, Франция, 13-16 сентября 1977 г.) // Пробл. трения и смазки. 1978. № 1. С.4.

20. Агафонов В. А. О протяженности смазочного слоя в подшипниках скольжения // Вестник машиностроения. 1962. №5. С. 29-32.

21. Петруничев А. И. О границах несущего смазочного слоя опорного подшипника скольжения // Машиностроение. 1971. №4.

22. Pinkus O., Sternlicht B. Theory of Hydrodynamic Lubrication. New York, 1961. – 465 P.

23. Токарь И. Я., Дьяков В. И., Гладкий В. В. Расчет подшипника при режимах скудной смазки / Вестник машиностроения. 1971. № 9 . С. 31 -33.
24. Голубев А. И., Коротков В. А. Расчет термоупругогидродинамических характеристик торцовых уплотнений. М.: Машиноведение, 1978. №2. С. 82-87.
25. Усов П. П., Тодер И. А., Кренделев Е. С. Плоская неизотермическая задача гидродинамической теории смазки подшипников скольжения при деформируемости поверхности, ограничивающей смазочный слой // Трение и износ. 1982. Т.3. № 1. С. 64-75.
26. Галахов М. А., Терентьев Е.Д., Усов П. П. Методы расчета подшипников скольжения. Вычислительный центр АН СССР, 1984. 56с.
27. Тодер И. А., Кренделев Е.С. Математическая модель термоэластогидродинамических процессов в тяжело нагруженных и высокоскоростных гидродинамических, гидростатических и гидростатодинамических подшипниках // Износостойкость машин. Брянск, 1994.
28. Fillon M., Frene J., Bancompain R. Historical aspects and present developmant on thermal effects in hydrodynamic bearings. Fluid film lubrication 13th Leeds-Lyon Symposium – Tribology series, 11. ElsevierScience Publishers, 1987. P. 27-47.
29. Fillon M., Frene J. Numerical simulation and experimental results on thermoelasto-hydrodynamic tilting pad journal bearings. IUTAM Symposium on Numerical Simulation of Non-isothermal Flow of Viscoelastic Liquids, Kluver Academic Publishers, 1955. P.85-99.
30. Frene J., Nicolas D., Berthe B., Godet M. Hydrodynamic Lubrication. Bearings and Thrust Bearings. Tribology Series, 33. Elsever, 1997. 470 p.
31. Дроздов Ю. Н., Павлов В. Г., Пучков В. Н. Трение и износ в экстремальных условиях. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.
32. Пинегин С.В. Трение качения в машинах и приборах. – М.: Машиностроение, 1976. – 264 с.

33. Чихос Х. Системный анализ в трибонике. - М.: Мир, 1982. - 352 с.
34. Коднир Д. С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин. – М.: Машиностроение, 1976. – 304 с.
35. Грубин А. Н. Основы гидродинамической теории смазки тяжело нагруженных криволинейных поверхностей. – М.: Машгиз., 1949. – 150с.
36. Петрусевич А. И. Качество поверхности и прочность материалов при контактных напряжениях. – М.: Изд-во АН СССР, 1946. - № 5 – 23с.
37. Петрусевич А. И. Основные выводы из контактно-гидродинамической теории смазки // Изв. АН СССР ОТН. – 1951, № 2. – С.209-223.
38. Эртель А. М. Гидродинамический расчет смазки контакта кривых поверхностей. – М.: ЦНИИТМАШ, 1945. – 68 с.
39. Коднир Д. С., Салуквадзе Р. Г., Бакашвили Д. И., Шварцман В. Ш. Толщина смазочного слоя и коэффициент трения в тяжело нагруженном точечном контакте // Труды I Всероссийской конференции по контактно-гидродинамической теории смазки и ее практическому применению. – Сб.2. – Куйбышев. – 1974. – С. 51–71.
40. Archard J. F., Gair F. C., Hirst W. The Elastohydrodynamic Lubrication of Rollers // Proc. Roy. Soc. A. – 1961. – 262 p.
41. Archard J. F., Kirk M. T. Lubrication at point contacts // Proc. Roy. Soc. A. – 1961. – 261 p.
42. Cameron A. Basic Lubrication Theory / Pergamon Press. – London, 1971. – 295 p.
43. Cameron A. The Principles of Lubrication / Longman. – London, 1966. – 591 p.
44. Cameron A., Gohar R. Theoretical and Experimental Studies of the Oil Film in Lubricated Point Contacts //Proc. Roy. Soc. – 1966. – Series A, vol. 291. – P. 520-536.

45. Crook A.W. Lubrication of rollers parts // Phil. Trans. Roy. Soc. – 1958. – Ser A., vol. 250. – P. 387-409.
46. Gohar R. Elastohydrodynamics. – Ellis Horwood Ltd., Chichester, 1988. – 320 p.
47. Hamrock B., Dowson D. Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts. – P.I. – Theoretical Formulation // Trans. ASME. – 1976. – vol. 98. – P. 223–229.
48. Hamrock B., Dowson D. Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts. – P.I. – Theoretical Formulation // Trans. ASME. – 1976. – vol. 98. – P. 375–383.
49. Hamrock B., Dowson D. Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts. – P.III –Fully Flooded Results // Trans. ASME. – 1977. – vol. 98. – P. 264–276.
50. Hamrock B., Dowson D. Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts. – P.IV. –Starvation Results // Trans. ASME. – 1977. – vol. 99. – P. 15–23.
51. Hamrock B., Dowson D. Ball Bearing Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts. – New-York: Welley Interscience Publication, 1981. — 386 p.
52. Дмитриченко Н. Ф. Эластогидродинамика. – Львов: Изд-во Национального университета «Львовская политехника», 2000. – 224 с.
53. Tallian T., Brady E., McCool I., Sibley L. Lubricant Film Thickness and Wear in Rolling Point Contact // Trans. ASLE. – 1965. – vol. 8, № 4. – P. 411–424.
54. Виноградов Г. В., Подольский Ю. Я., Корепова Н. В. Условия и виды заедания при трении закаленной стали в углеводородных смазочных средах // Машиноведение. – 1965. – № 5. – С. 109–144.
55. Дроздов Ю. Н., Арчegov В. Г., Смирнов В. И. Противозадирная стойкость трущихся тел. – М.: Наука, 1981. – 139 с.
56. Трение, изнашивание и смазка. Справочник в 2 кн. / Крагельский И.В., Алисин В.В. и др.// - М.: Машиностроение, 1978. – 1 кн. – 400 с.

57. Ku P. Gear failure modes-importance of lubrication and mechanics // Trans. ASLE. – 1976. – vol. 19. – 239 p.
58. Голего Н. Л. Схватывание в машинах и методы его устранения. – К.: Техника, 1965. – 231 с.
59. Костецкий Б. И., Носовский И. Г., Бершадский Л. И., Караулов А. К. Надежность и долговечность машин. – К.: Техника, 1975. – 408 с.
60. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
61. Семенов А. П. Схватывание металлов. – М.: Машгиз, 1958. – 280с.
62. Чичинадзе А. В., Матвеевский Р. М., Браун Э. Д. Материалы в трибонике нестационарных процессов. – М.: Наука, 1986. – 248 с.
63. Foord C., Wedeven L., Westlake F., Cameron A. Optical Elastohydrodynamics // Proc. Inst. Mech. Engrs. – 1969–1970. – Part.1, vol. 184. – P. 487–505.
64. Westlake F., Cameron A. Fluid Film Interferometry in Lubrication Studies // Nature. – 1967. – vol. 214, № 5088.
65. Westlake F., Cameron A. Interferometric study of point contact lubrication // Proc. EHD. Lub. Symp. London. – 1972. – P. 153–161.
66. Dowson D, Higginson G. Elastohydrodynamic Lubrication. – London: Pub. Pergamon Press, 1966. – 207 p.
67. Dowson D, Higginson G., Whitaker A. Elastohydrodynamic Lubrication // Mech. Engng. Soc. – 1962. – vol. 4, № 2. – P. 121–136.
68. Dowson D., Whitaker A. Isothermal lubrication of cylinders // ASLE Lub. Conf. (Washington, 1964): Trans. ASLE. – 1965. – № 4. – P. 224–234.
69. Bell Y. C., Kannel Y. W. Aspects of Lubrication Affecting Life of Rolling Bearings //Proc. ASME. – Ohio, 1967. – № 5. – P. 28–32.
70. Niemann G., Garthar F. Distribution of Hydrodynamic Pressure of Counterformel Line Contacts // Trans. ASLE. – 1965. – № 3. – P. 235–249.
71. Dowson D., Saman W., Toyoda S. A study of starved elastohydrodynamic line contacts // Proc. 5 th Leeds-Lyon Symp. – 1978. – P. 92.

72. Wedeven L. Traction and Film Thickness Measurements under Starved Elastohydrodynamic Conditions // Trans. ASLE. – 1978. – vol. 98. – P. 321–329.
73. Wedeven L. Optical Measurements in Elastohydrodynamic Rolling Contact Bearings // Wedeven L. – Ph. D. thesis: Imperial College, University of London. – 1970. 294 p.
74. Петрусевич А. И. Зубчатые и червячные передачи: Детали машин. – М.: Машиностроение. – 1970. – 471с.
75. Crook A.W. The Lubrication of rollers: III – A theoretical discussion of friction and the temperatures in the oil films // Proc. Roy. Soc. London. – 1961. – ser A, vol. 254. – P. 237–258.
76. Hamilton D., Walowit J., Allen C. A theory of lubrication by microirregularities // Trans. ASLE. J. Basing. Engng. – 1966. – Ser. D., vol. 88. – P. 177–185.
77. Patir N., Cheng H. Effect of surface roughness orientation on the central film thickness in EHD contacts // Proc. Mech. Eng. (Leeds-Lyon Symp, 1978). – publ. London. – 1979. – P. 15.
78. Johnson K., Tavaarwerk J. Shear behaviour of elastohydrodynamic oil films // Proc. Roy. Soc. – 1977. – ser. A, vol. 356. – P. 215.
79. Туричин А.М., Новицкий П.В., Левшина Е.С. и др. Электрические измерения неэлектрических величин/ Л.: Энергия, 1975. — 576 с.: ил.
80. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов: справочник / под ред. К.В. Фролова, Е.А. Марченко. – М.: Машиностроение, 2008. – 384 с.
81. CSM Instruments SA Tribometer user manual R0.1.3a (Sept. 12), 120P
82. Детлаф А.А. Курс физики: Учебник / А.А. Детлаф, Б.Н. Яворский. – т. III. – М.: Наука, 1979. – 511с.
83. Optical Elastohydrodynamics / Foord C., Wedeven L., Westlake F., [etc.] / Proc. Inst. Mech. Engrs. – 1969 – 1970. – Part.1, vol. 184. – P. 487 – 505.
84. Gentle E.R. PhD Thesis, University of London / Gentle E.R. – 1971. – 216p.

85. Hamrock B. Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts. – P.III –Fully Flooded Results / B. Hamrock, D. Dowson / Trans. ASME. – 1977. – vol. 98. – P. 264 – 276.
86. Glasstone S. Textbook of Physical Chemistry 2nd edition / Glasstone S. – Macmillan and Co., Ltd., London. – 1956. – 1320p.
87. Poulter T., The Effect of Pressure on the Index of Refraction of Paraffin Oil and Glycerine / T. Poulter, C. Ritchey, C. Benz / Phis. Review. – 1932. – vol. 41. – P. 366 – 367.
88. Dowson D. A. Numerical solution to the elastohydrodynamic problem/D. Dowson, G. Higginson // Mech. Sci. – 1959. – № 1. – P.6 – 15.
89. Chy P.S. Compressibility and Thermal Expansion of Oils / P.S Chy, A. Cameron // Journal of the Institute of Petroleum. – 1963. – vol. 49, № 473. – P. 140 – 145.
90. Рефрактометр універсальний лабораторний УРЛ: Паспорт K62.854.001.ПС. – Київський завод аналітичних приборів. – 80 с.
91. TRIBOLOGY; TESTING OF FRICTION AND WEAR MODEL TEST FOR SLIDING FRICTION OF SOLIDS (BALL ON DISC SYSTEM), German Institute for Standardisation (Deutsches Institut für Normung) Published:12-01-2013 https://infostore.saiglobal.com/en-us/Standards/DIN-50324-1992-394265_SAIG_DIN_DIN_894615/
92. ASTM G99-95a(2000)e1, Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000 www.astm.org
93. Міланенко О.А. Мастильна дія оливи у точковому контакті тертя в умовах рясного мащення та мастильного голодування: Дис. на здобуття наукового ступеня к.т.н.: 05.02.04 / Міланенко Олександр Анатолійович. – К.: НАУ, 2000. – 214 с.
94. Підвищення надійності транспортних засобів шляхом застосування модифікаторів тертя: монограф. /М.Ф.Дмитриченко, О.А. Міланенко, О.М. Білякович, А.М. Савчук, Ю.О. Туриця.– К.:НТУ, 2017.–104с.

95. Савчук А.М. Кінетика зміни змащувальних властивостей трансмісійних і моторних мастильних матеріалів в умовах рясного та обмеженого мащення: дис. канд. техн. наук : 05.02.04 / А. М. Савчук ; Нац. трансп. ун-т. — К., 2010. — 210 с.

96. Эртель А.М. Гидродинамический расчет смазки контакта кривых поверхностей / Эртель А.М. — М.: ЦНИИТМАШ, 1945. — 68 с.

97. Дроздов Ю.Н. Противозадирная стойкость трущихся тел / Дроздов Ю.Н., Арчegov В.Г., Смирнов В.И. — М.: Наука, 1981. — 275с.

98. Райко М.В. Исследование смазочного действия нефтяных масел в условиях работы зубчатых передач: Дис. на соискание ученой степени д.т.н.: 05.02.04 / Райко Мстислав Владимирович. — К.: КИИГА, 1974. — 369 с.

99. Мікосянчик О.О. Оцінка триботехнічних параметрів мастильних матеріалів при граничному мащенні в умовах локального контакту: дис. канд. техн. наук: 05.02.04 / Мікосянчик Оксана Олександрівна. — Національний транспортний ун-т. — К., 2006. — 200с.

100. Влияние неньютоновских свойств смазок на эффективную вязкость и силу трения в тяжело нагруженном упруго-гидродинамическом контакте / Д.Л. Бакашвили, Г.Р. Чхаидзе, В.Ш. Шварцман [и др.] // Трение и износ. — 1982.— том.3, № 2. — С. 265 — 273.

101. Аксенов А.Ф. Износостойкость авиационных топливо-гидравлических агрегатов / Аксенов А.Ф., Лозовский В.Н.// — Москва: Транспорт, 1986. — 240с.

102. Дмитриченко Н.Ф. Роль инактивных нефтепродуктов в обеспечении граничной смазки / Н.Ф. Дмитриченко, М.В. Райко, В.С. Белоус / Проблемы трения и изнашивания: Респ. межвед. науч. — техн. сб., 1982, вып.21. — С. 112 — 117.

103. Литвинов В.Н., Михин Н.М., Мышкин Н.К. Физико-химическая механика избирательного переноса при трении. М.: Наука, 1979. — 188с.

104. Любарский И.М., Палатник Л.С. Металлофизика трения. М.: Металлургия, 1976. — 176с.

105. Малевский С.К., Соколов И.И. Противозадирная стойкость цементованных и нитроцементованных сталей. – Металловедение и термическая обработка металлов, 1977, №4. – С.66-68.
106. Матвеевский Р.М. Температурная стойкость граничных смазочных слоев и твердых смазочных покрытий при трении металлов и сплавов. – М.: Наука, 1971. – 227с.
107. Гаркунов Д.Н., Поляков А.А., Семенов В.Я. Словременніе проблемі триботехники. – Трение и износ, 1980, т.1, №3. – С.393-402.
108. Заславский Ю.С., Заславский Р.Н. Механизм действия противоизносных присадок к маслам. – М.: Химия, 1978. – 224с.
109. Павлов В.Н. Исследование смазочного действия масел в зубчатых передачах (с разработкой методов измерения толщины масляного слоя): автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Киев: КИИГА, 1975. – 27с.
110. Повышение износостойкости на основе избирательного переноса/Под ред. Д.Н.Гаркунова. М.: Машиностроение, 1977. – 212с.
111. Райко М.В., Кадомский В.П., Белоус В.С. Образование слоя смазки при приработке контактных поверхностей. – Вестник машиностроения, 1978, №11, С.23-26.
112. Шпеньков Г.П. Физикохимия трения. Минск: БГУ, 1978. – 203 с.
113. Порохов В.С. Трибологические методы испытания масел и присадок. - М.: Машиностроение, 1983. – 183 с.
114. Dyson M.A. Film Thickness in Elastohydrodynamic Lubrication of Rollers by Greases Proc / M.A. Dyson, A.R. Wilson / Inst. Mech. Engrs. 184. 1969 – 70. P. 1 – 11.
115. Коднир Д.С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин / Коднир Д.С. – М.: Машиностроение, 1976. – 304 с.
116. Кубич В.И., Ищенко Л.И.. Износостойкость деталей ТС «шейка – вкладыш» с медьсодержащим покрытием. Проблеми трибології. Хмельницький національний університет. № 2, 2011. – С. 103 – 110.

117. Экспериментальное исследование работы подшипников скольжения с жидкостной смазкой в нештатных режимах, Ю.А. Равикович, Ю.И. Ермилов, Д.П. Холобцев, К.В. Ардатов, А.А. Напак, Д.П. Шах, Электронный журнал "Труды МАИ", Выпуск № 46. – 10 с.

118. Результаты экспериментальных исследований времени выбега ротора турбокомпрессора ТКР-11, А.М. Плаксин, А.В. Гриценко, А.Ю. Бурцев, Вестник ЧГАА. 2014, Том-70. – 5 с.

119. Кубич, В.И. Определение параметров контактного взаимодействия подшипников скольжения коленчатого вала двигателей внутреннего сгорания./ В.И. Кубич, Л.Й. Ивченко // Проблемы трибологии. – 2010. - Вып. №2 (56). – С.11-17.

120. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ /Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С.// – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.

121. Некоторые особенности смазки пластичными смазочными материалами / П.А. Головач, М.В. Райко, Н.Ф. Дмитриченко, Р.Г. Мнацаканов // Вестник машиностроения. – 1984. – № 1. – С. 28-30.

122. Сорокин Л.А. О кинетике изнашивания цилиндрической группы двигателя при пуске / Сорокин Л.А. / Автомобильная промышленность, 1974, №7. – С. 10 – 12.

123. Буше Н.А. Совместимость трущихся поверхностей / Буше Н.А., Копытько В.В. – Москва: Наука, 1961. – 128 с.

124. Гликолиз и опыт их применения в нефтяной и газовой промышленности. – Москва: ВНИИОЭНГ, 1970. – 86 с.

125. Экспериментальное исследование пленочного голодания при трении твердых тел / Н.М. Алексеев, Н.А. Буше, И.И. Карасик [и др.] / Проблемы трения и изнашивания: Респ. межвед. науч. – техн. сб., 1982, вып. 21. – С. 64 – 73.

126. Mechanism of Oils and Lubricants Action under Transient Conditions of Bearing Operation Proc. International Conf. Frontiers of Tribology / N.F.

Dmitrichenko, R.G. Mnatsakanov, M.V. Raiko, [etc.] / Stratford–upon–Avon 1991, P. 64 – 66.

127. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения / Ахматов А.С. – М.: ГИФМА, 1963. – 472 с.

128. Michael Varenberg, Yuri Kligerman, Grigory Halperin, Saad Nakad, Haytam Kasem Assessing workability of greased bearings after long-term storage /Springer Nature Switzerland AG. Friction 7. 2019. P. 489-496.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s40544-018-0255-1>

129. Евдокимов А. Н., Курзин А. В. Моделирование химико-технологических процессов (экспериментально-статистические модели): учебное пособие / ВШТЭ СПбГУПТД. — СПб. 2018. – 106 с.

130. Гартман Т.Н., Советин Ф.С., Лосев В. А. Современный подход к модернизации химических производств на основе применения пакетов моделирующих программ Химическая техника, № 12, 2008, – С. 8-10.

ДОДАТКИ

Додаток А1

ПАСПОРТ ЯКОСТІ № 360

Олива моторна TEMOL Classic 15W-40

ТУ У 23.2-30858281-007:2008 зм.1,2,3,4



Партія № 360

Резервуар №:

API SF/CD

Дата виготовлення 30.03.20

Маса нетто 7,5 т

Фізико-хімічні показники

№	Найменування показників	Норма за НТД	Фактично	Метод випробування
1	В'язкість кінематична за температури 100оС, мм ² /с, в межах	12,5 - 16,3	15,26	ДСТУ ГОСТ 33
2	Індекс в'язкості, не менше	115	115	ДСТУ ГОСТ 25371
3	Загальне лужне число, мг КОН на 1 г оливи, не менше	6,0	6,86	ДСТУ 5094
4	Зольність сульфатна, %, не більше	1,3	0,9	ДСТУ ГОСТ 12417
5	Температура спалаху у відкритому тиглі, оС, не нижче	205	238	ДСТУ ГОСТ 4333
6	Температура застигання, оС, не вище	Мінус 27	Мінус 27	ГОСТ 20287 метод Б
7	Густина за температури 20 оС, кг/м ³ , не вище	905	895	ГОСТ 3900
8	Масова частка механічних домішок, %, не більше	0,015	0,01	ГОСТ 6370 та п. 6.3
9	Масова частка води, %, не більше	Сліди	Сліди	ГОСТ 2477
10	Масова частка кальцію і магнію в перерахунку на кальцій, %, не менше	0,12	0,22	ГОСТ 13538
11	Колір з розбавленням 15:85 на колориметрі ЦНТ, од. ЦНТ, не більше	3,3	1,0	ГОСТ 20284
12*	В'язкість динамічна, мПа*с, за температури мінус 20оС, не більше	7000	6500	ГОСТ 1929
13	Корозійність на пластинках із свинцю на приладі ДК-НАМН, г/м ² , не більше	Відсутність	Відсутність	ГОСТ 20502 метод А, вар.2
14	Стабільність за індукційним періодом осадкоутворення втримук, годин	30	30	ГОСТ 11063

Цей паспорт є дійсний на фактично відвантажену партію товару та не може бути використаний як зразок у тендерній пропозиції без документального підтвердження повноважень від ТОВ "КСМ ПРОТЕК".

Виробник: ТОВ "КСМ ПРОТЕК", Україна

Висновок: за перевіреними показниками проб Олива моторна TEMOL Classic 15W-40 відповідає вимогам ТУ У 23.2-30858281-007:2008 зм.1,2,3,4

Гарантійний термін зберігання - 5 років від дати виготовлення.



Лаб. КСМ ПРОТЕК

Зав. лабораторії

Дата видачі паспорту 01.04.20р.

Додаток А2



ТОВ "КСМ ПРОТЕК", вул. Ворошилова, буд. 1, смт. Клавдієво-Тарасове, 07850, Київська обл., Україна; тел./ф.: 044 537 03 48 www.ksmprotec.com

ПАСПОРТ № 940

Олива моторно-трансмісійна ПРОТЕК СМТ- 8

ТУ У 19.2-37838186-002:2012

Партія № 940

Дата виготовлення 12.09.17 Маса нетто 3,6 т

Фізико-хімічні показники

№	Найменування показників	Норма за ІПТД	Фактично	Метод випробування
1	Вязкість кінематична, мм ² /с, за температури 100 оС, в межах	8,0 - 9,0	8,22	ДСТУ ГОСТ 33
2	Індекс в'язкості, не менше	90	121	ДСТУ ГОСТ 25371
3	Загальне лужне число, мг КОН на 1 г оливи, не менше	2,0	2,5	ГОСТ 11362
4	Зольність сульфатна, %, в межах	0,4 - 0,75	0,72	ГОСТ 12417
5	Температура спалаху у відкритому тиглі, оС, не нижче	200	236	ГОСТ 4333
6	Температура застигання, оС, не вище	Мінус 32	Мінус 36	ГОСТ 20287
7	Масова частка механічних домішок, %, не більше	0,015	Відсутність	ГОСТ 6370
8	Масова частка води, %, не більше	Следи	Відсутність	ГОСТ 2477
9	Корозійність на пластинках зі сталі марки 40 або 50 та міді М1 або М2 протягом 3 год, за температури 100 оС, не більше	Витримує	Витримує	ГОСТ 2917
10	Густина за температури 20 оС, кг/м ³ , не вище	900	867	ГОСТ 3900
11	Колір на колориметрі ЦНТ із розведенням у співвідношенні 15:85, од. ЦНТ, не більше	5,0	1,5	ГОСТ 20284
12	Змашувальна здатність на машині тертя ЧКМ за температури (20+/- 5оС): індекс задиру (Із), Н, не менше	343	550	ГОСТ 9490
13	Змашувальна здатність на машині тертя ЧКМ за температури (20+/- 5оС): критичне навантаження (Рк), Н, не менше	-	1166	ГОСТ 9490
14	Змашувальна здатність на машині тертя ЧКМ за температури (20+/- 5оС, 1 год): діаметр сліду зношування, мм, у разі навантаження на вісь 196 Н	-	0,26	ГОСТ 9490
15	Міночі властивості на установці ПЗВ, бали, не більше	1,0	1,0	ГОСТ 5726

Виробник: ТОВ "КСМ ПРОТЕК", Україна

Висновок: за фізико-хімічними показниками проби оливи моторно-трансмісійна ПРОТЕК СМТ- 8 відповідає вимогам ТУ У 19.2-37838186-002:2012

Гарантійний термін зберігання - 3 роки від дати виготовлення.



Заборант

Зав. лабораторії

Дата видачі паспорту 14.09.17 р.

Handwritten signature of the laboratory head.

Додаток Б1

ВИКОНАВЧИЙ ОРГАН КИЇВСЬКОЇ МІСЬКОЇ РАДИ (КИЇВСЬКА МІСЬКА ДЕРЖАВНА АДМІНІСТРАЦІЯ)
КОМУНАЛЬНЕ ПІДПРИЄМСТВО

КИЇВПАСТРАНС

24.04.2019 № 952/09

ДОВІДКА
про використання результатів дисертаційної роботи Глухонця А.О.
на тему «Еластогідродинамічні умови мащення в локальних контактах тертя»

Дисертаційна робота Глухонця А.О. на тему: «Еластогідродинамічні умови мащення в локальних контактах тертя» присвячена актуальній проблемі вирішенню питань надійності та довговічності, збільшення ресурсу вузлів, агрегатів транспортних засобів та спеціальних рідин, зокрема, універсальних моторно-трансмісійних олів (УМТО) за рахунок оптимізації їх структурного складу.

Автором встановлено закономірності щодо впливу тривалості використання модифікованих УМТО на їх реологічні характеристики в умовах кочення з проковзуванням.

Практична цінність результатів, отриманих в дисертаційній роботі, полягає в розробці технології збільшення ресурсу використання УМТО для підвищення надійності та довговічності трибосистем агрегатів транспортних засобів з урахуванням модифікації мастильного матеріалу та впливу процесів старіння і забруднення при їх експлуатації. Ефективність використання модифікованих УМТО підтверджена аналітичними розрахунками та результатами експериментальних досліджень.

Результати дисертаційної роботи впроваджено при коректуванні періодичності технічного обслуговування та заміни універсальних моторно-трансмісійних олів в агрегатах трансмісій транспортних засобів.

В.о. директора
КП «Київпастранс»
Філія Автобусний парк № 6

С.О. Крупка

тел./tel.: +38 (044) 254-65-52
факс/fax: +38 (044) 279-52-31

kpt.kyiv.ua
ЄДРПОУ 31725604

04070, м. Київ, Набережне шосе, 2
2 Naberezhne hwy., Kyiv, 04070, Ukraine



ТОВ «КСМ ПРОТЕК», вул. Ворошилова, буд. 1, смт. Клавдієво-Тарасове, 07850, Київська обл., Україна; тел./ф.: 044 537 03 48 www.ksmprotec.cc

ДОВІДКА

про використання результатів дисертаційної роботи Глухонця А.О.
на тему «Еластогідродинамічні умови мащення в локальних контактах тертя»

Дисертаційна робота Глухонця А.О. на тему «Еластогідродинамічні умови мащення в локальних контактах тертя» присвячена актуальній проблемі вирішенню питань надійності та довговічності, збільшення ресурсу вузлів, агрегатів транспортних засобів та спеціальних рідин, зокрема, універсальних моторно-трансмісійних олив (УМТО) за рахунок оптимізації їх структурного складу.

Отримані в дисертаційній роботі результати прийняті до використання в ТОВ «КСМ ПРОТЕК», зокрема:

- встановлено, що модифікована моторно-трансмісійна олива ПРОТЕК ЄМТ-8 може витримувати критичне навантаження приблизно на 80Н більше ніж універсальна моторно-трансмісійна олива МТ-8п;
- діаметр плями зношування оливи МТ-8п збільшений на 10% в порівнянні з модифікованою оливою ПРОТЕК ЄМТ-8 за усіма рівними умовами;
- на основі експериментальних даних визначено кращі протизношувальні, протизадирні й антифрикційні властивості оливи ПРОТЕК ЄМТ-8 в нестационарних умовах тертя в порівнянні з оливою МТ-8п.

За результатами отриманих протоколів випробувань був отриманий паспорт якості виробника на моторно-трансмісійну оливу ПРОТЕК ЄМТ-8 і надані практичні рекомендації до технічного регламенту по виробництву даної оливи.

Директор ТОВ «КСМ ПРОТЕК»



О.А. Юрчук



012760

УКРАЇНА

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, т.ф. +38 (044) 280 82 03, т. +38 (044) 280 87 65
e-mail: general@ntu.edu.ua, код ЄДРПОУ 02070915

09.12.2020 № 2001/01
на № _____

Довідка

**про використання результатів дисертаційної роботи
Глухонця Андрія Олексійовича**

Основні положення та результати дисертаційної роботи Глухонця А. О. «Еластогідродинамічні умови мащення в умовах локальних контактів тертя» на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук використовуються при підготовці фахівців за спеціальностями «Прикладна механіка», «Автомобільний транспорт», «Екологія». Зокрема, в освітньому процесі при вивченні дисциплін: «Триботехніка та основи надійності машин», «Триботехніка», «Відновлення деталей», «Екологія життєвого циклу транспортних засобів» застосовуються:

- результати експериментальних досліджень щодо встановлення закономірності впливу тривалості використання оливи на їх протизношувальні властивості;
- результати експериментальних досліджень щодо аналізу експлуатаційних чинників та реологічних характеристик оливи в умовах кочення з проковзуванням;
- технологія збільшення ресурсу використання універсальної моторно-трансмісійної оливи для підвищення надійності та довговічності трибосистем агрегатів транспортних засобів з урахуванням модифікації мастильного матеріалу та впливу процесів старіння і забруднення при їх експлуатації;
- багатофакторна регресійна математична модель для визначення товщини мастильного шару для оливи ПРОТЕК ЄМТ-8.

Проректор з навчальної
роботи, професор



О. К. Гришук