

УДК 669.056.9

**АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ НАНЕСЕННЯ
ЗНОСОСТІЙКОГО ПОКРИТТЯ**

Д-р техн. наук Л. А. Тимофеева, асист. Л. В. Волошина, П. М. Гордієнко

**АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ
ИЗНОСОСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ**

Д-р техн. наук Л. А. Тимофеева, ассист. Л. В. Волошина, П. М. Гордиенко

**ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF PROCESS WEARPOOF OF
COVERAGE**

Doct. of techn. sciences L. Timofeeva, assist. L. Voloshyna, P. Gordienko

Проведено аналіз технологічних параметрів процесу нанесення зносостійкого покриття. Виконано металографічні, лабораторні дослідження на знос, рентгеноспектральний та фазовий аналіз покриття, яке наноситься із водних розчинів солей на залізовуглецеві сплави, що працюють в умовах тертя. Встановлено залежності між технологічними параметрами процесу та експлуатаційними властивостями утвореного покриття.

Ключові слова: моделювання технологічних параметрів, експлуатаційні властивості, зносостійкі покриття, паротермічна обробка сплавів, зносостійкість, мікроструктура сплавів.

Проведен анализ технологических параметров процесса нанесения износостойкого покрытия. Выполнены металлографические, лабораторные исследования на износ, рентгеноспектральный и фазовый анализ покрытия, которое наносится из водных растворов солей на железоуглеродистые сплавы, работающие в условиях трения. Установлены зависимости между технологическими параметрами процесса и эксплуатационными свойствами образованного покрытия.

Ключевые слова: моделирование технологических параметров, эксплуатационные свойства, износостойкие покрытия, паротермическая обработка сплавов, износостойкость, микроструктура сплавов.

The work carried out analysis of technological parameters of process formed of wearpoof of coverage. Completed metallographic, laboratory tests for wear, and X-ray phase analysis coating that is applied to water solutions of salts ironcarbon alloys, working in conditions of friction. The established dependens between technological parameters of process and operation properties formed coverage.

Thus, the carried-out analysis allows to predict changes of quality of a surface depending on change of parameters of new technological process.

Keywords: modeling process parameters, operating properties, wearpoof of coverage, vapourthermal treatment of alloys, wear resistance, microstructure alloys.

Вступ. У наш час у світовій практиці розроблено ряд методів підвищення трибо-

технічних властивостей матеріалів [1]. Особливу увагу приділяють тим методам та

способам, які забезпечують не тільки досягнення заданих властивостей, але й гарантують екологічну чистоту технологічного процесу [2, 3].

Перспективним напрямком підвищення зносостійкості пар тертя є метод хіміко-термічної обробки залізвуглецевих сплавів з використанням водних розчинів солей [4].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У більшості випадків техніка виходить з ладу внаслідок зносу вузлів тертя: руйнується тільки робоча поверхня деталі, яку можна захистити нанесенням шару матеріалу зі спеціальними властивостями. Аналіз методів [5], що використовуються для покращення експлуатаційних властивостей робочої поверхні, показує, що вони трудомісткі, тривалі, вимагають застосування шкідливих, дефіцитних хімікатів і складного обладнання. У дослідженні пропонується застосування водного розчину алюмохромфосфатної солі (АХФС) [6] з використанням технології обробки деталей у парогазовому середовищі для підвищення триботехнічних властивостей пари тертя шестірня – корпус, що веде до подовження строку служби масляного насоса системи змащення двигунів внутрішнього згоряння [5].

Визначення мети та задачі дослідження. Дані дослідження спрямовані на визначення оптимальних параметрів технологічного процесу нанесення покриттів та визначення їх впливу на триботехнічні властивості пар тертя. Досягти цього пропонується за рахунок виконання моделювання показників: концентрації діючої речовини, часу витримки та температури обробки. Визначено провести металографічне дослідження утворених після обробки покриттів для визначення наявності елементів та фаз і дослідити їх вплив на триботехнічні властивості пари тертя. Після нанесення покриття провести дослідження впливу утвореного

поверхневого шару на триботехнічні властивості пари тертя, а саме зносостійкість, значення коефіцієнта тертя, припрацьовуваність.

Основна частина дослідження. Відомо, що технологічні параметри впливають на формування поверхневого шару при хіміко-термічній обробці [1]. Для визначення оптимальних параметрів нового способу нанесення покриття, залежно від експлуатаційних умов роботи пари шестірня - корпус масляного шестеренного насоса двигунів внутрішнього згоряння, були змодельовані дані властивостей покриття залежно від параметрів технологічного процесу.

Як було виявлено за попередніми лабораторними дослідженнями, коли концентрація солі у водному розчині наближається до нуля, зносостійкість зменшується, в той самий час концентрація солі більша за 20 % призводить до відшарування покриття.

Тривалість витримки при обробці є дуже важливою, оскільки недостатній час на обробку не дає можливості повноцінно утворитися дифузійному шару, від якого залежать властивості поверхні контакту пар тертя, а також утворити необхідну товщину покриття для збільшення зносостійкості. При надмірному часі витримки утворюється занадто товстий шар покриття, погіршується адгезія покриття з основним металом, і зменшення коефіцієнта лінійного розширення покриття призводить до відшарування останнього при підвищенні температури в зоні контакту.

Таким чином, було прийнято, що технологічні параметри процесу обробки деталей мають варіюватися в таких межах: концентрація АХФС в насичувальному середовищі в межах 2 – 20 %; час витримки деталей у насичувальному середовищі – від 10 до 100 хв; температура насичувального середовища змінювалася від 250 до 700 °С.

Моделювання дасть змогу визначити діапазон значень параметрів технологічного процесу, за рахунок зміни яких можна

досягти найкращих експлуатаційних і триботехнічних властивостей, а саме утворення оптимальної товщини покриття, мінімальних значень зносу, оптимального часу припрацювання, витримки максимального навантаження до утворення задирів.

Для встановлення залежностей між параметрами технології нанесення покриттів із парогазового середовища та експлуатаційними властивостями покриття (зносом, коефіцієнтом тертя, товщиною покриття) було виконано множинний регресійний аналіз [7] за допомогою програми Statistica. Технологічні параметри процесу обробки деталей варіювалися в таких межах: концентрація (C) АХФС у насичувальному середовищі – в межах 2-20 %; час витримки деталей (τ) в насичувальному середовищі – від 10 до 100 хв; температура (t) насичувального середовища змінювалася від 250 до 700 °С.

Аналізуючи одержані в ході моделювання залежності, визначили, що оптимальні експлуатаційні властивості поверхні (рис. 1, 2) пари тертя шестірня – корпус масляного шестеренного насоса системи змащення двигунів внутрішнього згоряння забезпечуються застосуванням запропонованої технології поверхневої обробки, коли технологічні параметри перебувають у межах: температура обробки в насичувальному середовищі t – від 550 до 650 °С, час витримки в насичувальному середовищі τ – від 30 до 40 хв, концентрація $CrAl_3(H_2PO_4)_{8,8-9,6}$ у водному розчині C – від 8 до 14 %.

Для проведення металографічних та лабораторних досліджень на знос хіміко-термічна обробка виконувалася на зразках, виготовлених із сірого чавуну, і сталі 40Х, що використовуються для виготовлення пари тертя шестірня – корпус масляного шестеренного насоса. Основними параметрами технологічного процесу нанесення покриттів із парогазового середовища є температура обробки деталей, концентрація солі у водному

розчині та час витримки в насичувальному середовищі. Від цих параметрів залежить формування поверхневого шару, а також його експлуатаційні властивості.

Обробка поверхні матеріалів здійснювалася перегрітою парою водного розчину АХФС концентрацією 10 % при температурі 600 ± 20 °С, час витримки в насичувальному середовищі склав 40 хв, з наступним охолодженням у маслі.

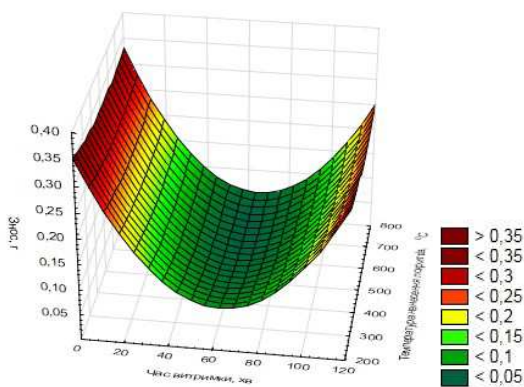
Металографічні дослідження зразків проводилися за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3 та мікроскопа „НЕОРНОТ 2” на прямих та косих шліфах до травлення поверхні і після. Рентгеноспектральний аналіз зразків проводився на сканувальному вакуумному кристал-дифракційному спектрометрі „Спрут”-В у діапазоні довжин хвиль $0,4 \div 11$ Å. Дослідження фазового складу зразків виконувалося на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-4.

Результати аналізу показали, що після нанесення покриття на поверхні зразків виявили наявність таких хімічних елементів як алюміній $Al=0,5$ %; фосфор $P=1,37$ %; хром $Cr=0,47$ %.

Як показали результати фазового дослідження, основними фазами (кристалічними) на сталевих і на чавунних зразках є Fe_2O_3 та Fe_3O_4 . Насамперед потрібно звернути увагу на фон, який збільшується із зростанням кута дифракції, що є характерним для матеріалів, які мають у своєму складі значний відсоток аморфної складової.

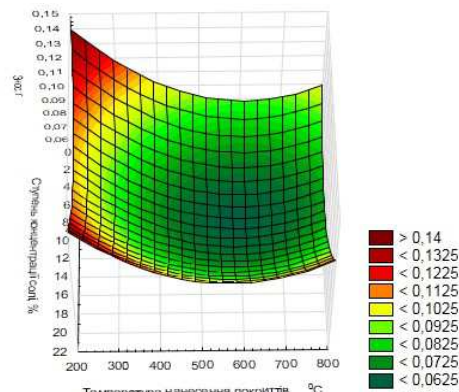
Після нанесення покриття були проведені дослідження впливу утвореного поверхневого шару на триботехнічні властивості пари тертя, а саме зносостійкість, значення коефіцієнта тертя, припрацьовуваність.

Дослідження проводилися на машині тертя МІ-1 у маслі М10Г2, зі зміною навантаження від 490 Н до 1961 Н, при фіксованому значенні часу випробування.



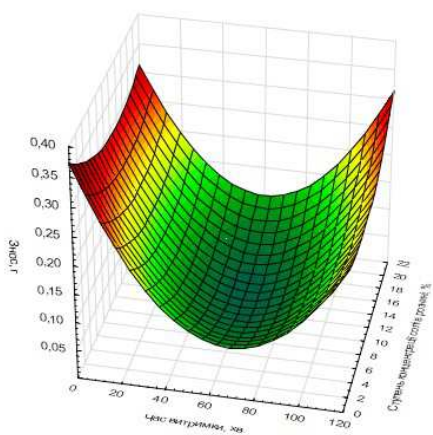
$$J(\tau, t) = 0,3936 - 0,0083 \cdot \tau - 0,0003 \cdot t + 6,5483 \cdot 10^{-5} \cdot \tau^2 - 2,6835 \cdot 10^{-7} \cdot \tau \cdot t + 2,154 \cdot 10^{-7} \cdot t^2$$

а)



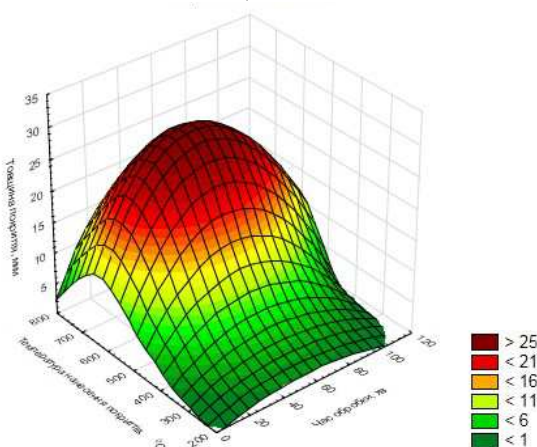
$$J(t, C) = 0,2017 - 0,0064 \cdot t - 0,0004 \cdot C + 0,0003 \cdot t^2 + 1,3129 \cdot 10^{-6} \cdot t \cdot C + 3,0182 \cdot 10^{-7} \cdot C^2$$

б)



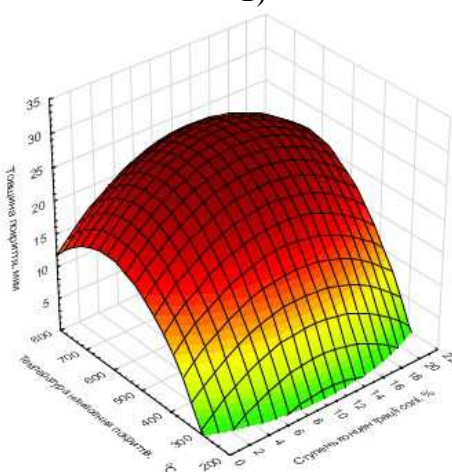
$$J(\tau, C) = 0,3732 - 0,0082 \cdot \tau - 0,0124 \cdot C + 5,9566 \cdot 10^{-5} \cdot \tau^2 + 4,9533 \cdot 10^{-5} \cdot \tau \cdot C + 0,0004 \cdot C^2$$

в)



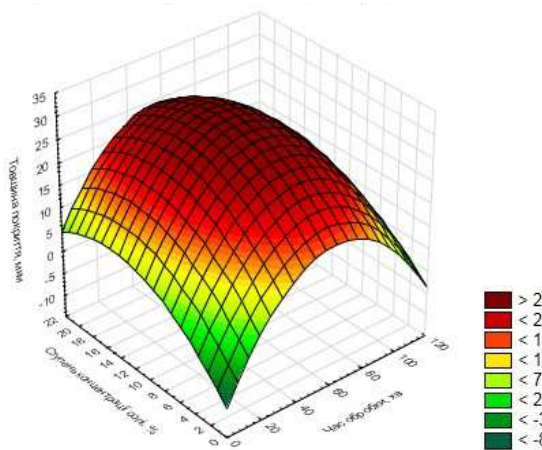
$$h(\tau, t) = -30,0767 + 0,3457 \cdot \tau + 0,1056 \cdot t - 0,0034 \cdot \tau^2 + 6,2222 \cdot 10^{-5} \cdot \tau \cdot t - 5,3939 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$$

г)



$$h(C, t) = -43,8522 + 1,268 \cdot C + 0,1991 \cdot t - 0,0647 \cdot C^2 + 0,0006 \cdot C \cdot t - 0,0002 \cdot t^2$$

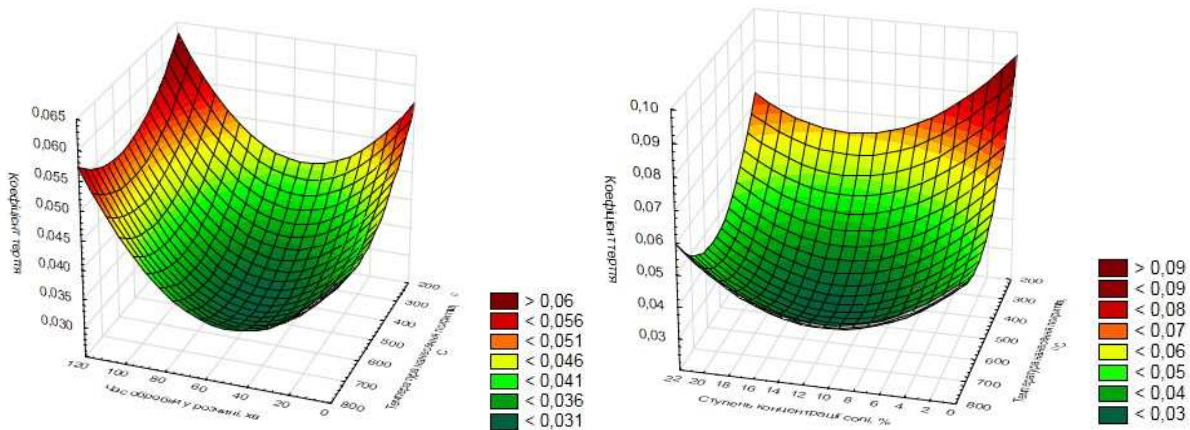
д)



$$h(\tau, C) = -873944 + 0,7727 \cdot \tau + 2,3086 \cdot C - 0,0061 \cdot \tau^2 - 0,0035 \cdot \tau \cdot C - 0,078 \cdot C^2$$

е)

Рис. 1. Залежності параметрів покриття від технологічних параметрів процесу обробки: а – зносу J від ступеня концентрації розчину C ; б – зносу J від температури обробки, t ; в – зносу J від часу витримки в насичувальному середовищі τ ; г – товщини покриття h від ступеня концентрації розчину C ; д – товщини покриття h від часу витримки в насичувальному середовищі τ ; е – товщини покриття h від температури обробки t

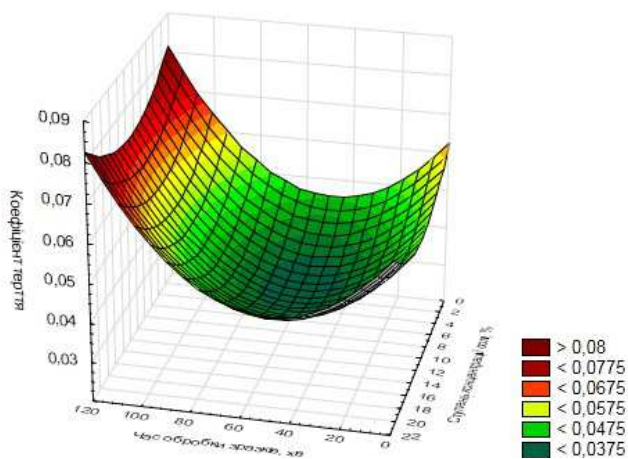


$$f_{тр}(t, \tau) = 0,0742 - 0,0005 \cdot t - 0,0001 \cdot \tau + 4,5038 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 8,6538 \cdot 10^{-8} \cdot t \cdot \tau + 8,2727 \cdot 10^{-8} \cdot \tau^2$$

а)

$$f_{тр}(t, C) = 0,1434 - 0,0046 \cdot t - 0,0003 \cdot C + 0,0002 \cdot t^2 + 1,701 \cdot 10^{-6} \cdot t \cdot C + 2,401 \cdot 10^{-7} \cdot C^2$$

б)



$$f_{тр}(\tau, C) = 0,0626 - 0,0007 \cdot \tau - 0,0019 \cdot C + 7,178 \cdot 10^{-6} \cdot \tau^2 + 3,3058 \cdot 10^{-8} \cdot \tau \cdot C + 8,6364 \cdot 10^{-5} \cdot C^2$$

в)

Рис. 2. Залежність коефіцієнта тертя від технологічних параметрів процесу обробки:
 а – зносу коефіцієнта тертя $f_{тр}$ від температури обробки t, C° , та часу витримки в насичувальному середовищі $\tau, хв$; б – коефіцієнта тертя $f_{тр}$ від температури обробки t, C° , та ступеня концентрації розчину $C, \%$; в – коефіцієнта тертя $f_{тр}$ від часу витримки в насичувальному середовищі $\tau, хв$, та ступеня концентрації розчину $C, \%$

Дослідженням було передбачено одержання характеристик зносу залежно від часу випробування, порівняння характеру і величин зносу зразків до нанесення та після нанесення покриття (а також залежно від навантаження на зразки) і вивчення поведінки при терті зразків, оброблених при різних режимах нанесення покриття, з метою встановлення оптимальних технологічних параметрів обробки.

Аналіз кривих сумарного зносу зразків від часу випробування при навантаженні 490 Н показав, що сумарний знос зразків з покриттям (крива 1, рис. 3) найменший, тобто у 5,9 разу менший, ніж сумарний знос зразків без покриття (крива 5), у 8 разів менший, ніж сумарний знос пари тертя „сталь з покриттям - чавун без покриття” (крива 8), а також, у 1,96 разу менший порівняно із сумарним зносом

пари тертя „сталь без покриття - чавун із покриттям” (крива 2).

Сумарний знос вихідних зразків (крива 5) менший у 1,4 разу, ніж сумарний знос пари тертя „сталь із покриттям - чавун без покриття” (крива 8), а також у 5,9 разу більший, ніж сумарний знос пари тертя „сталь без покриття - чавун із покриттям” (крива 2).

Показники сумарного зносу зразків при навантаженні 980 Н показали, що сумарний знос зразків із покриттям (крива 3) менший у 3 рази, ніж сумарний знос зразків без покриття (крива 9), у 3,3 разу менший, ніж сумарний знос пари тертя „сталь із покриттям - чавун без покриття” (крива 10), а також у 1,4 разу менший порівняно із сумарним зносом пари тертя „сталь без покриття - чавун із покриттям” (крива 4).

Сумарний знос вихідних зразків (крива 9) менший у 1,1 разу, ніж сумарний

знос пари тертя „сталь з покриттям-чавун без покриття” (крива 10), а також у 2 рази більший, ніж сумарний знос пари тертя „сталь без покриття - чавун із покриттям” (крива 4).

При навантаженні 1961 Н зразки з покриттям (крива 6) дали сумарний знос менший у 3,8 разу, ніж сумарний знос вихідних зразків (крива 12), у 3,7 разу менший, ніж сумарний знос пари тертя „сталь з покриттям - чавун без покриття” (крива 11), а також у 1,2 разу менший порівняно із сумарним зносом пари тертя „сталь без покриття - чавун із покриттям” (крива 7). Сумарний знос вихідних зразків (крива 12) більший у 1,04 разу, ніж сумарний знос пари тертя „сталь із покриттям - чавун без покриття” (крива 11), а також у 3,1 разу більший, ніж сумарний знос пари тертя „сталь без покриття - чавун із покриттям” (крива 7).

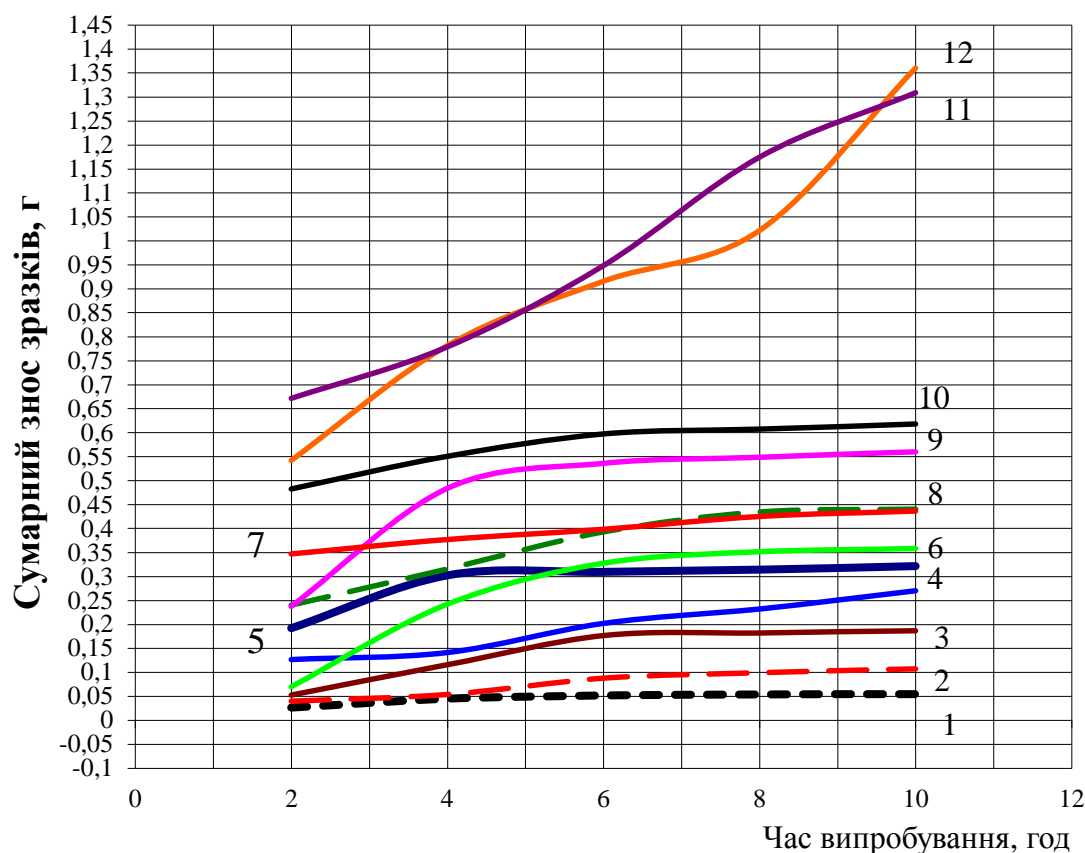


Рис. 3. Залежність сумарного зносу зразків від часу випробування при навантаженнях від 490 до 1961 Н

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку. Обробка деталей масляного насоса в парогазовому середовищі водного розчину АХФС має такі переваги: підвищення зносостійкості пар тертя за рахунок утворення на поверхні деталей аморфних структур, оксидів (Fe_2O_3) та шпінелей (Fe_3O_4); скорочення періоду припрацювання пари тертя; значне скорочення часу на обробку деталі порівняно з традиційними технологіями

ХТО; забезпечення дифузійного насичення у важкодоступних місцях; відносно невелика собівартість, ресурсозбереження і екологічна чистота завдяки низькій концентрації насичувальних елементів.

Таким чином, проведений аналіз моделювання параметрів технологічного процесу дає змогу прогнозувати зміни триботехнічних властивостей поверхні залежно від зміни параметрів нового технологічного процесу.

Список використаних джерел

1. Лахтин, Ю. М. Поверхностное упрочнение сталей и сплавов [Текст] / Ю. М. Лахтин // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1988. – № 11. – С. 14-25.
2. Тимофеева, Л. А. Научные и практические основы экологически чистой химико-термической обработки железоуглеродистых сплавов с использованием водных растворов солей [Текст]: автореф. дис... д-ра техн. наук / Л. А. Тимофеева. – К.: ИПМ, 1992. – 29 с.
3. Повышение износостойкости восстановленных деталей транспортных двигателей [Текст] / Л. А. Тимофеева, С. С. Тимофеев, I. I. Федченко [и др.] // *Трение и износ: сб. науч. трудов.* – Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2016. – Т. 37. – № 6. – С. 699-704. (Индексируется в SCOPUS).
4. Спосіб хіміко-термічної обробки деталей із металів та сплавів [Текст] : пат. України №45841А: В22F3/24 / Тимофеева Л.А., Проскурина Л.В., Тимофеев С.С., Федченко I.I.; заявник та патентовласник УкрДАЗТ. – №2001075170; заявл. 19.07.2001; опубл. 15.04.2002, Бюл. №4.
5. Тимофеева, Л. А. Повышение эксплуатационных характеристик деталей масляного насоса двигателя СМД 60 [Текст] / Л. А. Тимофеева, Л. В. Проскурина, С. С. Тимофеев // *Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць НТУ „ХПІ”.* – Харків, 2001. – Вип.1(4). – С. 263-265.
6. Огнеупорные изделия, материалы и сырье [Текст]: справочник /под ред. А. К. Каркалита. – М.: Металлургия, 1991. – 405 с.
7. Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ [Текст] / Н. Дрейпер, Г. Смит. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Вильямс, 2007. – 912 с.
8. Dyomin, A.Y. Increasing the wear resistance of reworked parts of transport engines / L.A. Timofeeva, S.S. Timofeev, I.I. Fedchenko, A.Y. Dyomin // *Journal of Friction and Wear.* – 2017. – Vol. 38. – № 1. – P. 13–16.

Тимофеева Лариса Андріївна, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри якості, стандартизації, сертифікації та технологій виготовлення матеріалів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-10-49.

Волошина Людмила Володимирівна, асистент кафедри якості, стандартизації, сертифікації та технологій виготовлення матеріалів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-10-49.
Гордієнко Павло Михайлович, студент групи 10-III-Те Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-10-49.

Timofeeva Larisa, doct. of techn. sciences, professor, department of quality, standardization, certificate and technology of production materials, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-49.

Voloshyna Liudmyla, assistant, department of quality, standardization, certificate and technology of production materials, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-49.

Pavel Gordienko, a student of 10-III-Te Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (057) 730-10-49.

Стаття прийнята 13.06.2017 р.