

Суранов О.О.

Український державний університет  
залізничного транспорту,  
м. Харків, Україна,  
E-mail: lhornet.hneu@gmail.com

ПІДВИЩЕННЯ МАСТИЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ  
ІНДУСТРІАЛЬНИХ ОЛИВ ШЛЯХОМ  
ДОДАВАННЯ В НИХ ПРОДУКТІВ  
ЕЛЕКТРОДУГОВОГО ВИПАРОВУВАННЯ  
ГРАФІТУ

УДК 621.891

*В роботі виконаний аналітичний огляд досліджень за темою роботи, розглянуті загальні підходи до зменшення тертя та зношування і трібосистемах при граничному мащенні. Огляд досліджень по застосуванню наночастинок вуглецю в якості функціональних добавок до мастильних матеріалів показав ефективність їх використання. На підставі огляду та аналізу патентної літератури з методів та конструкцій приладів для отримання наночастинок вуглецю була розроблена та виготовлена нова конструкція реактору для випаровування графіту.*

**Ключові слова:** наночастинок вуглецю, електродуговий метод, фізичні властивості наночастинок, пристрій для отримання наночастинок вуглецю, вплив наночастинок на протизношувальні властивості гідравлічної рідини.

**Актуальність теми.** Досвід експлуатації транспортно-технологічних та енергетичних машин показав, що їх ресурс обмежується інтенсивністю зношування деталей, які працюють при граничному мащенні. Одною з головних причин зношування є недостатня мастильна здатність оливи. Ця проблема має місце при експлуатації гідравлічних приводів колійних машин, будівельної та автотранспортної техніки, де використовуються індустриальні оливи без присадок. Вирішення вказаної задачі лежить у площині пошуку та застосування протизношувальних присадок, які б при малих концентраціях мали високу мастильну здатність та сприяли розширенню діапазону нормального тертя та зношування до меж діючих навантажень. Вказаним вимогам відповідають речовини, які за малих концентрацій змінюють структуру поверхневого шару металу поділяють поверхні тертя. Граничні плівки, утворені з таких агрегатів, мають значну несучу здатність та низький опір тангенційному зсуву [1-3]. Одним із перспективних напрямків рішення цієї актуальної задачі є використання наночастинок вуглецю (НЧВ) [4-6] з метою поліпшення якості мастильних матеріалів та підвищення довговічності трібосистем.

Для реалізації нанотехнологій в машинобудуванні та хімотології при використанні НЧВ в якості присадок до мастильних матеріалів актуальними завданнями трібології постають:

- розробка методів та засобів отримання НЧВ;
- дослідження параметрів та властивостей отриманих наночастинок;
- встановлення взаємозв'язку між присадкою у неполярному розчині та характеристиками процесу її фізичної адсорбції, трібологічними властивостями граничної плівки, процесами тертя та зношування;

Деякі з цих завдань вже мають часткове вирішення [7], однак, сьогодні не існує трібофізичних основ забезпечення максимальної мастильної здатності наноприсадок при граничному мащенні деталей транспортно-технологічних машин.

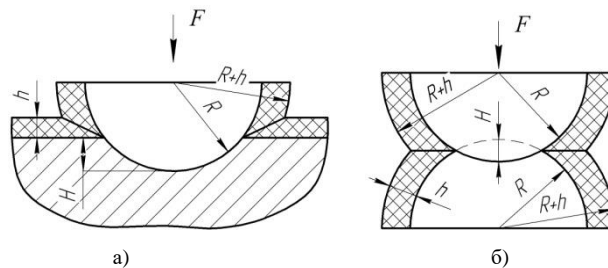
**Математична модель впливу вуглецевої сажі на зношування трібосистем ковзання.** Для уявлення загальної картини впливу вуглецевої сажі (ВС) на зношування трібосистем ковзання слід врахувати абразивну дію частинок ВС як таких, що мають високу, порівняно із металами міцність. Тоді сумарну інтенсивність зношування трібосистем ковзання при додаванні в базову оливу мікро- та наночастинок ВС в загальному вигляді запишемо як

$$I_{\Sigma} = I_H + I_A, \quad (1)$$

де  $I_A$  – інтенсивність абразивного зношування;  $I_H$  – інтенсивність абразивного зношування при пружньому контакті поверхонь за формулою І.В. Крагельського.

За умови, що контакт поверхонь реалізується через адсорбційні шари молекул оливи, глибина занурення буде залежати від товщини таких шарів. Якщо припустити, що контактуючі поверхні мають напівсферичні нерівності однакового радіусу  $R$ , розташовані із однакою кроком  $t_R$ , та вкриті граничною плівкою товщиною  $h$ , тоді величина занурення  $H$  залежить від зовнішнього навантаження  $F$  і визначає фактичну площу дискретного контакту [2-4], як показано на рис. 1.

$$I_H = \frac{0,3}{\pi n} \sqrt{\frac{H}{R+h}} \cdot \frac{R^2}{(R+h)^2} \cdot \arccos\left(\frac{R-H/2}{R}\right). \quad (2)$$



а – контакт «тверда напівсфера – м'яка площина»; б – контакт «тверда напівсфера – м'яка напівсфера»

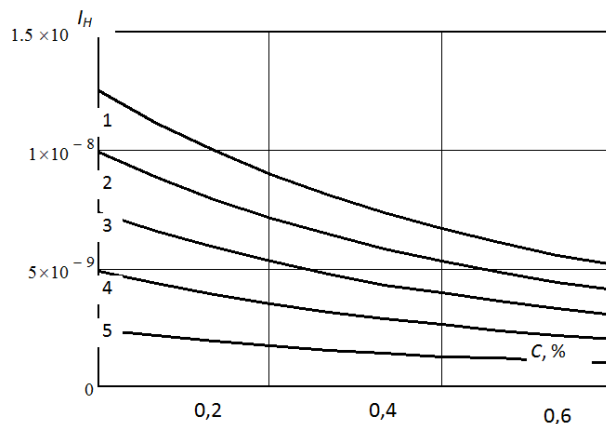
Рис. 1 – Схема до визначення фактичної площі дискретного контакту

Як видно з отриманої математичної моделі, інтенсивність зношування нелінійно залежить як від товщини граничної плівки, так й від глибини занурення. Залежність товщини граничної плівки від концентрації полярної фази в базовій оливі.

$$h = K_C \cdot C^n, \quad (3)$$

де  $C$  – об'ємна концентрація полярної фази;  $n$  – показник ступеня, приблизно дорівнює 2;  $K_C$  – розмірний коефіцієнт, м.

По залежностях (2) в якості прикладу закономірності зміни  $I_H$  від концентрації частинок ВС в даній роботі були проведені розрахунки для граничної плівки, що складається з шарів індустріальної оливи, які формуються на металевій поверхні тертя та поверхнях частинок ВС. За величину  $h$  приймали сумарну товщину граничної плівки, а глибина занурення  $H$  дорівнювала  $1/4$  від  $h$ . Таким чином, розрахунки велись для контакту по граничному шару при різних концентраціях ВС для схеми на рис. 1 А), їх результати наведені на рис. 2.



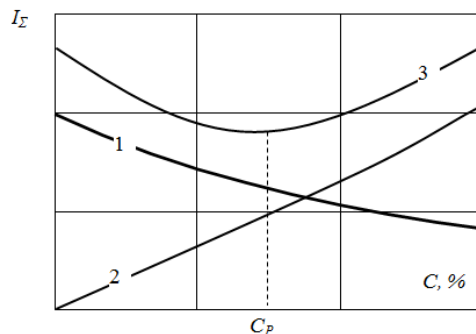
1 –  $H/R = 0,5$ ; 2 –  $H/R = 0,4$ ; 3 –  $H/R = 0,3$ ; 4 –  $H/R = 0,2$ ; 5 –  $H/R = 0,1$   
 Рис. 2 – Зміна інтенсивності зношування при  $R = 10^{-6}$  м та  $n = 0,5 \cdot 10^7$

Друга складова рівняння (1) відображує абразивний вплив частинок ВС на процес зношування в трібосистемах ковзання. Вона залежить від співвідношення твердості металу та абразиву, а також від концентрації абразиву. Якщо зношуванню підлягає лише м'яке тіло, запишемо її у вигляді

$$I_A = K_A \cdot \left( \frac{HB_{\text{ч}}}{HB_M} \right)^p \cdot C^m, \quad (4)$$

де  $p, m$  – показники ступеня;  $HB_{\text{ч}}, HB_M$  – відповідно, твердість частинки ВС та «м'якого» металу.  $K_A$  – коефіцієнт пропорційності.

Логічно припустити, що показник ступеня  $m \geq 1$ , тобто при зростанні концентрації абразиву інтенсивність зношування буде зростати. Якщо співставити одну з кривих графіку на рис. 3 із графіком зміни  $I_A$  від концентрації, то можна одержати графічну залежність сумарної інтенсивності зношування від концентрації частинок ВС в оливі. Така залежність наведена на рис. 3, однак вона відображує лише якісну картину, оскільки невідомими є показники ступеня, що входять до залежності (4).



1 – крива № 2 на рис. 10; 2 – крива зміни  $I_A$  відповідно до залежності (4); 3 – крива сумарної інтенсивності зношування.  
 Рис. 3 – Якісна залежність зміни сумарної інтенсивності зношування від концентрації частинок ВС в оливі

Як видно з рис. 3, при додаванні частинок ВС до базової оливи існує область раціональних значень концентрації –  $C_P$ , вище якої переважає абразивне зношування металу.

Сили, що діють на агрегат присадки при її фізичній адсорбції, можна записати рівняння руху в загальному вигляді

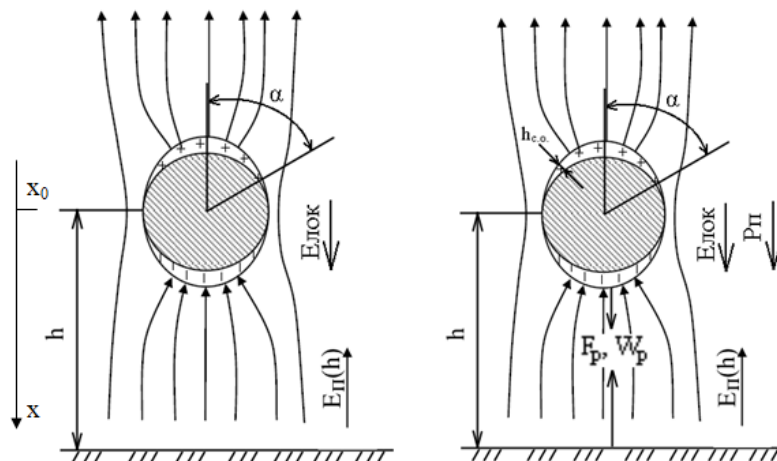
$$m\ddot{x} = F_E - F_C. \quad (5)$$

За причини малих розмірів частинок, а також рівно вірогідним їх розташуванням у просторі, можна знехтувати силою тяжіння. Граничними умовами при вирішенні рівняння (4) будуть відстань частинки до поверхні, діапазон зміни розмірів частинки, встановлений в розділі 2, в'язкість оливи та початкова швидкість частинки.

Для побудови моделі фізичної адсорбції частинок ВС була розроблена розрахункова схема сил, що діють на частинку, рис. 4. Якщо на частинку діють лише сили  $F_E$  і  $F_C$ , а силою тяжіння та архимедовою силою знехтувати, то рівняння руху елемента буде мати вигляд залежності (4). Сила електростатичної взаємодії частинки із поверхнею залежить від двох основних факторів, а саме, від ступеня її поверхневої активності та величини силового поля поверхні тертя. Згідно рис. 4,  $h = x_0 - x$ .

Сила електричної взаємодії буде мати вигляд

$$F_E = P \frac{dE_{\Pi}}{dh} = \frac{P\sigma}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \left( 1 - \frac{h}{\sqrt{r^2 + h^2}} \right) = \frac{P\sigma}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{r^2 + (x_0 - x)^2}} - \frac{x(x_0 - x)}{\sqrt{r^2 + (x_0 - x)^2}} \right) \quad (6)$$



*OX* – вісь, що вказує на напрямок руху елемента; *x<sub>0</sub>* – початкова відстань до поверхні, м;  
*F<sub>E</sub>* – сила електростатичної взаємодії (тяжіння), Н; *F<sub>C</sub>* – сила опору руху (сила Стокса), Н;  
*E<sub>П</sub>* – напруженість силового поля металеві поверхні, В/м; *E<sub>лок</sub>* – напруженість локального поля навколо частинки, В/м.  
 Рис. 4 – Розрахункова схема взаємодії частинки з поверхнею тертя

Виходячи з положень класичної електростатики, взаємодія наночастинки ВС з металевією поверхнею тертя протікає у 3 етапи, а саме: потрапляння частинки в область дії силового поля та її електризація (ліва частина рис. 4); вкриття частинки сольватною оболонкою молекул оливи із формуванням «жорсткого» електричного диполя; адсорбція «жорсткого» електричного диполя – частинки, вкритої молекулами оливи, на поверхню металу (права частина рис. 4).

Рівняння руху частинки диполя в кінцевому вигляді

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{P(q^+ - |q^-|)}{2\pi\epsilon\epsilon_0\lambda^2} \left( \frac{1}{\sqrt{r^2 + (x_0 - x)^2}} - \frac{x(x - x_0)}{\sqrt[3]{r^2 + (x_0 - x)^2}} \right) - 6\pi R\mu \frac{dx}{dt}. \quad (7)$$

Залежність (6) враховує як властивості частинок ВС – розмір та дипольний момент, так й в'язкість базової оливи та властивості металевією поверхні тертя, на якій адсорбується частинка. До таких властивостей відноситься період кристалічної решітки металу та його валентність.

Звичайно, мова йде про «ювенільну» ділянку поверхні тертя, що утворюється в процесі зношування та екранується частинками ВС та молекулами оливи. На рис. 5 наведені результати частинного рішення рівняння (6) за якими встановлена закономірність зміни часу адсорбції частинок ВС в залежності від їх радіусу та початкової відстані до поверхні.

Отримані закономірності розкривають механізм фізичної адсорбції частинок ВС у вигляді електричних диполів. Як видно з графіків, рис. 5, час адсорбції нелінійно залежить як від радіусу мікро- та наночастинок ВС, так й від початкової відстані частинок до поверхні. Наприклад, при зміні радіусу з 2 до 500 нанометрів і при початковій відстані 1 мкм, час змінюється приблизно в 40 разів, а при початковій відстані 2 мкм – приблизно в 60 разів. Час адсорбції, згідно виконаних розрахунків, складає від  $10^{-7}$  до  $10^{-4}$  секунди, залежно від радіусу, що підтверджує отримані раніше експериментальні дані інших дослідників.

В цілому, розроблена фізична та математична модель процесу фізичної адсорбції електропровідних частинок ВС дозволяють отримати практичні дані щодо їх розміру та потрібної концентрації в базовій оливі в залежності від швидкості відносного переміщення нано- та мікроскопічних ділянок зношування поверхонь тертя.

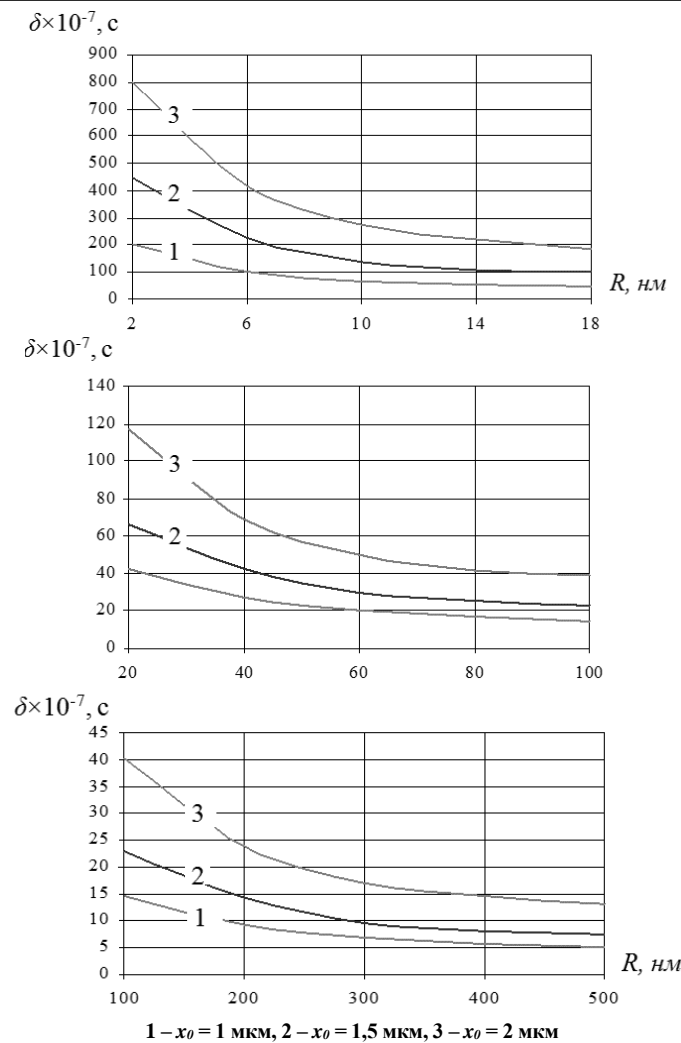


Рис. 5 – Зміна часу адсорбції частинок ВС в залежності від радіусу та початкової відстані

Слід відзначити також, що згідно експериментальних даних інших дослідників отримані дані щодо часу фізичної адсорбції окремих молекул та їх агрегатів складають близько  $10^{-9}$  до  $10^{-6}$  секунди, що підтверджує першочерговість формування сольватної оболонки, а вже потім прояв адсорбції частинок ВС.

**Висновки.** Виконані теоретичні дослідження впливу концентрації вуглецевої сажі на трибологічні характеристики індустриальних олив дозволили стверджувати наступне:

- при додаванні мікро- та наночастинок ВС до базової оливи переважними видами зношування трібосистем ковзання будуть механічний знос при пружно-пластичному контакті та абразивний знос, що виникає за причини високої твердості впорядкованих вуглецевих частинок. Тобто загальний знос буде визначатися сумою цих двох складових;

- концентрація частинок ВС в оливі по-різному впливає на вказані види зношування. Так з ростом концентрації інтенсивність механічного зношування зменшується з причини збільшення фактичної площі контакту та зростання товщини граничної мастильної плівки. Абразивне зношування, навпаки, зростає по мірі збільшення концентрації ВС в оливі. Таким чином, сумарна інтенсивність зношування, яка складається з механічного та абразивного зношування, має мінімум при концентрації  $C_p$ , яка є раціональною концентрацією частинок ВС в оливі. Пошук такої концентрації треба вести експериментальним шляхом;

– частинки ВС, розчинені в базовій оливі приймають участь в конкурентній фізичній адсорбції полярно-активних елементів оливи. Саме ці частинки внаслідок адсорбції формують на металевій поверхні граничну плівку, яка за своєю будовою відповідає варіанту двошарового мащення деталей тертя ковзання. При цьому позитивними явищами, що супроводжують таке мащення є збільшення фактичної площі контакту та зростання товщини граничної мастильної плівки;

– розроблена математична модель процесу фізичної адсорбції електропровідних частинок ВС на металевій поверхні дозволяє отримати практичні дані щодо їх розміру та потрібної концентрації в базовій оливі в залежності від швидкості відносного переміщення нано- та мікроскопічних ділянок зношування поверхонь тертя.

### Література:

1. Iijima S Nature (London) 354 56 (1991).
2. Лисіков Є.М. Нанотехнології на залізничному транспорті [Текст]: Навч. посібник / Лисіков Є.М., В.М. Астахов, А.О. Каграманян. – Харків.: УкрДАЗТ, 2006. – Ч. II. – 230 с.
3. Воронін С.В., Суранов А.В., Суранов А.А. Аналитический обзор технологий получения высокоструктурированных наночастиц углерода [Текст]/сб. научн трудов ХНУБА. – Харьков: ХОТВ АБУ, 2013. – Вып. 73. – С. 212 – 223.
4. Воронін С.В., Онопрейчук Д.В., Суранов О.О., Амінов Д.О. Огляд та аналіз конструкцій установок для отримання наночастинок вуглецю електродуговим методом / [Текст]/ зб. наук. праць УкрДАЗТ, 2013. – Вип. 141. – С. 253 – 258.
5. Пристрій для отримання наночастинок вуглецю електродуговим способом [Текст]: пат. 105616 Україна: МПК С01В 31/02, В82В 3/00 /Воронін С.В., Суранов О.В., Онопрейчук Д.В., Суранов О.О., Суранов Д.О., Стефанов В.О.; заявник УкрДАЗТ. – заявл. 30.09.2013; опубл. 25.05.2014, Бюл. №10. – 9 с.
6. Воронін С.В., Суранов О.О., Суранов О.В. Лабораторний стенд для отримання наночастинок вуглецю електродуговим методом / [Текст]/ Доповідь на міжнародній наук. – техн. конференції: "Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті №76 (15–17 квітня 2014 р.). – Харків: УкрДАЗТ, 2014/Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – Харків: УкрДАЗТ, 2014. – Вип. 143. – с. 267.
7. Суранов О.О. Обґрунтування параметрів пристрою для отримання наночастинок вуглецю електродуговим способом /Тези доповідей міжнародної науково–техн. конф. "Нові технології, обладнання, матеріали в будівництві і на транспорті". – Харків. – 26–28 листопада 2014 р.: матеріали конф. – Харків: "Влавке", 2014. – 86 с. (с. 25)

### Summary

**Suranov A.A.** Increasing the lastilizer capacity of industrial oils in accordance with the products of electricity disposal of graphite

*In this work an analytical review of the research on the topic of work was carried out, the general approach to reducing friction and wear and the tribosystems at the extreme mastication was solved. A review of studies on the application of carbon nanoparticles as functional additives to lubricants showed the effectiveness of their use. On the basis of the review and analysis of patent literature on methods and designs of carbon nanoparticle devices, a new design for a graphite vaporization reactor was developed and manufactured.*

**Keywords:** carbon nanoparticles, electric arc method, physical properties of nanoparticles, device for obtaining nanoparticles of carbon, influence of nanoparticles on antiwear properties of hydraulic fluid.

### References

1. Iijima S Nature (London) 354 56 (1991).
2. Lisikov Ye.M. Nanotechnology in railway transport [Text]: Teaching. manual / Lisikov Ye.M., V.M. Astakhov, A.O. Kagramanyan – Kharkiv: UkrDazT, 2006. – Part II. – 230 s.
3. Voronin S.V., Suranov A.V., Suranov AA Analytical review of technologies for obtaining highly structured carbon nanoparticles [Text] / p. scientific works of KNUBA. – Kharkiv: KOTV ABU, 2013. – Issue 73. – P. 212 – 223.
4. Voronin S.V., Onopreichuk D.V., Suranov O.O., Aminov D.O. Review and analysis of the designs of the installations for obtaining nanoparticles of carbon by the electric arc method / [Text] / ab. sciences works of UkrDazT, 2013. – Vip. 141. – pp. 253 – 258.
5. Device for obtaining nanoparticles of carbon by an electric arc method [Text]: Pate. 105616 Ukraine: IPC S01V 31/02, V82V 3/00 / Voronin SV, Suranov O.V., Onopreichuk D.V., Suranov O.O., Suranov D.O., Stefanov V.O; the applicant UkrDazt. – stated. September 30, 2013; has published May 25, 2014, Bul. No. 10 – 9 s.
6. Voronin S.V., Suranov O.O., Suranov O.V. Laboratory stand for obtaining carbon nanoparticles by the electric arc method / [Text] / Report on International Science. – Tech. conferences: "Development of Scientific and Innovative Transport Activity No. 76 (April 15–17, 2014) – Kharkiv: UkrDazT, 2014 / Scientific Papers of UkrDaZT Works – Kharkiv: UkrDazT, 2014 – Issue 143. – from 267.
7. Suranov O.O. Justification of the parameters of the device for obtaining nanoparticles of carbon by an electric arc method / Abstracts of reports of international scientific and technical. conf. "New technologies, equipment, materials in construction and transport". – Kharkiv – November 26–28, 2014: Conferences materials. – Kharkiv: "Welkom", 2014. – 86 p. (p. 25)