

УДК 621.89

DOI: 10.15587/1729-4061.2019.161951

Встановлення впливу вуглецевої сажі в оливі на зносостійкість елементів трібологічної системи «сталь-олива-бронза»

С. В. Воронін, О. В. Суранов, Д. В. Онопрейчук, В. О. Стефанов,
С. І. Кривоногов, В. В. Пашенко, Г. О. Радіонов, Р. О. Гончар,
Л. В. Сафошкіна, М. В. Горбачов

Наведені результати експериментальних досліджень впливу концентрації вуглецевої сажі в індустріальній оливі І-30А на зносостійкість трібологічної системи «сталь-олива-бронза». Припускається, що вуглецева сажа, отримана електродуговим методом в лабораторних умовах, складається з конгломератів мікро- та наночастинок вуглецю, розміри яких знаходяться у широкому діапазоні - від нанометрів до десятих часток міліметрів.

Наведена методика, матеріали та обладнання для проведення експериментальних досліджень зносостійкості деталей трібосистеми «сталь-бронза» на машині тертя СМЦ-2. Методика досліджень передбачала варіювання двома незалежними факторами: концентрація вуглецевої сажі в індустріальній оливі І-30А та зовнішнє навантаження. Незмінними факторами залишились швидкість ковзання, контурна площа контакту та початкова температура трібосистеми.

Отриманні експериментальні данні дозволили встановити дві головні закономірності, що характеризують процес тертя та зношування в досліджуваній трібологічній системі. Перша закономірність розкриває вплив концентрації вуглецевої сажі в індустріальній оливі І-30А та зовнішнього навантаження на момент тертя в парі «сталь-бронза». Друга закономірність розкриває вплив тих самих факторів на зносостійкість деталей, що піддавались випробуванням на машині тертя. Отриманні закономірності корелюють між собою та визначають область раціональної концентрації вуглецевої сажі в індустріальній оливі І-30А, яка була застосована як мастильний матеріал у трібологічній системі, що піддавалась випробуванням.

На завершальному етапі роботи наведені дослідження поверхонь деталей тертя на атомно-силовому мікроскопі "Solver P47-Pro" фірми виробника NT-MDT. Такі дослідження дозволили розкрити механізм модифікації поверхневого шару сталі та бронзи наночастинами вуглецю при їх взаємодії в трібологічній системі під час тертя

Ключові слова: конгломерат вуглецю, наночастинка вуглецю, пара тертя, трібологічна система, індустріальна олива

1. Вступ

Досвід експлуатації транспортно-технологічних та енергетичних машин (ТТЕМ) показав, що їх ресурс обмежується інтенсивністю зношування деталей, які працюють при граничному навантаженні. Одною з головних причин зношування є

недостатня мастильна здатність олив. Ця проблема має місце при експлуатації гідравлічних приводів колійних машин, будівельної та автотранспортної техніки, де використовуються індустріальні оливи без присадок. Зокрема, аналіз, що був проведений в роботах [1, 2] показує, що 70 відсотків всіх відмов засобів залізничного транспорту припадають на елементи гідроприводів. Це пов'язано з поточним станом гідравлічної оливи [2], а також низькою її мастильною здатністю.

Вирішення цієї проблеми лежить у площині пошуку та застосування протизносних 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. Тобто є концентраторами та переносниками молекул поверхнево-активних речовин на поверхню тертя, та проникають у більш м'яку поверхню, зміцнюючи її поверхневі шари. До таких речовин відносяться: мікро- та наночастинки вуглецю, що є складовими вуглецевої сажі.

В більшості гідравлічних систем ТТЕМ використовуються гідравлічні оливи, які в своїй більшості не містять присадок. Внаслідок цього підвищення їх мастильної здатності полягає у пошуку економічно-обґрунтованих методів покращення протизносних та антифрикційних властивостей. Таким методом є додавання недорогої, але високоякісної, з точки зору тертя та зношування, вуглецевої сажі, яка містить конгломерати мікро- та наночастинок вуглецю. Собівартість вуглецевої сажі на порядок менша, ніж собівартість чистої складової – фулеренів та нанотрубок.

Саме тому, пошук закономірностей впливу концентрації в гідравлічній оливі конгломератів частинок випаровування графіту на процеси тертя та зношування в ТТЕМ є актуальним напрямком.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Доцільності використання наночастинок вуглецю в якості добавок до трибологічних систем з метою підвищення їх зносостійкості присвячено багато робіт [3–9]. Так, в роботі [3] пропонується створювати наноконпозиційні покриття метал–вуглецева нанотрубка на парах тертя, що в свою чергу значно підвищує їх зносостійкість. Але дану технологію можливо використовувати лише на етапі конструювання та виготовлення нових трібосистем, а не під час експлуатації. Також в роботі не розглянуто взаємодію вуглецевих наноконпозиційних покриттів з мастильним середовищем. Створення нанопокриття на поверхні тертя пропонується з фулеренів C_{60} , що є нанодисперсною добавкою до трансмісійної оливи ТАД-17 [4]. Отриманні результати полягають у встановленні зміни кінетики мікротвердості поверхневих шарів металу від наявності в оливі фулеренів, що призвело до зниження інтенсивності зношування пари тертя «сталь-сталь» на 45 % при напрацюванні. Але в дослідженні моделювалась виключно пара тертя кочення, та не розкрито вплив концентрації C_{60} на трибологічні властивості трансмісійної оливи. Тертя ковзання реалізоване при дослідженні зносостійкості контактних поверхонь в нестационарних умовах тертя при введенні в

товарну моторну оливу ESSO SAE 10w40 наночастинок вуглецю C_{60} [5]. Однак товарна моторна олива передбачає наявність базового пакету протизношувальних присадок, а значить не можливо встановити «чистий» вплив нанодисперсного компоненту—фулерена C_{60} на процес тертя в дослідній парі «сталь-чавун».

Вплив наночастинок графіту на трибологічні характеристики трансмісійних оливок досліджувався у роботі [6]. Але не була встановлена залежність цих характеристик від концентрації наночастинок графіту, а також не була змодельована реальна пара тертя.

Дослідженнями трибологічних характеристик індустріальної оливи з добавкою конгломерату наночастинок вуглецю встановлено зменшення показника зносу на 11 % [7]. Показник зносу визначався на чотирикульковій машині тертя де реалізовувався точковий контакт металевих кульок. Тобто не моделювалась реальна пара тертя, а також не було встановлено закономірностей зміни показника зносу від концентрації конгломерату наночастинок вуглецю.

В роботі [8] наведенні результати дослідження впливу присадок з вмістом фулерену C_{60} в індустріальній оливі на оптимізацію процесів зношування при граничному терті металів. В даній роботі вводиться параметр, що характеризує процес припрацювання пар тертя. Показано, що величина цього параметру зменшується в 4 рази для оливок з добавками фулерену C_{60} з концентрацією 5 % в порівнянні з чистою оливою. Тобто, процес припрацювання відбувається більш інтенсивно. Цей результат відноситься виключно до пари тертя «сталь-сталь». Також даний параметр не розкриває процес тертя в припрацьованих парах. Отже, не розкритими залишаються питання впливу різних наночастинок вуглецю за різних концентрацій на припрацьовану пару тертя «сталь-бронза», що найбільш характерна для вузлів тертя гідروприводів. Частково ці питання були вирішені в роботі [9] зокрема встановлені залежності коефіцієнта тертя, моменту тертя, інтенсивності зношування для припрацьованих пар тертя «сталь-сталь» та «сталь-мідь» від зовнішнього навантаження та різних вуглецевмісних добавок до індустріальної оливи. Вуглецевмісні добавки в оливі мали концентрацію 5 % і склались з фулеренів C_{60} та C_{70} , фулеренова сажа, графіт та фулерен C_{60} з полістиролом. Але в роботі залишився не висвітленим вплив різних концентрацій та суміш різних наночастинок вуглецю на процес тертя пар, зокрема «сталь-бронза». Також слід відзначити, що в роботі увага приділялась високим контактним тискам, тобто досліджувались процеси в режимі напіврідного, напівсухого та сухого тертя. А це значить, що не розкритим залишилось дослідження впливу вище перелічених факторів при граничному терті. Адже саме при такому виді тертя в елементах трібосистем гідроприводу, що складаються з пар тертя «сталь-бронза», відбувається найінтенсивніший знос. Отже, це дозволяє стверджувати, що доцільним є проведення досліджень впливу концентрації вуглецевої сажі в індустріальних оливах, на процеси тертя в парі «сталь-бронза».

3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є встановлення закономірності впливу концентрації вуглецевої сажі на трибологічні властивості гідравлічних олив при їх використанні в парі тертя "сталь-бронза".

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- визначити зміну моменту тертя в залежності від концентрації вуглецевої сажі та зовнішнього навантаження;
- визначити зміну зносу пари тертя «колодка-ролик» в залежності від концентрації вуглецевої сажі та зовнішнього навантаження;
- дослідити поверхні тертя "сталь-бронза" на атомно-силовому мікроскопі після використання індустріальної оливи з вуглецевою сажею.

4. Матеріали та методи дослідження впливу концентрації вуглецевої сажі на трибологічні властивості індустріальних олив

4. 1. Досліджувані матеріали та обладнання, що використовувались в експерименті

Для досліджень була обрана індустріальна олива підгрупи А марки И-30А за ГОСТ 20799-88.

Дана олива є найбільш чистою з точки зору наявності «присадок» та часто використовується в гідроприводах різного технологічного обладнання та машинах. Вуглецева сажа виготовлялась шляхом спалювання графітових стержнів електродуговим способом в спеціально розробленій установці [10–13]. Випаровування графіту відбувалось в інертному газі під тиском 0,05 МПа при силі струму на стержнях 90 А. Саме за такого режиму, як показує аналіз наукових робіт [14–17], вихідним продуктом є фулерени різного гомологічного ряду, однак багатошарові вуглецеві нанотрубки, мікро- та наночастинки графіту, що утворюють вуглецеву сажу. Концентрація вуглецевої сажі в дослідних зразках оливи знаходилась в межах 0–0,2 % [7].

Пара тертя "колодка-ролик" була обрана тому, що реалізує процес тертя ковзання з контактом поверхні по площині, який наявний у підшипниках ковзання технічних систем, плунжерних парах гідравлічних насосів і моторів. Колодка і ролик були виготовлені з аналогічних матеріалів, що використовуються для виготовлення плунжерних пар насоса. Тобто, ролик – легована сталь 38Х2МЮА, а колодка – багатокомпонентна бронза Бр.АЖ 9–4.

Для випробування зразків використовувалась модернізована лабораторна установка (рис. 1), що складається з машини тертя СМЦ-2 та удосконаленою електронною системою забезпечення умов проведення досліджень і реєстрації показань, зокрема, крутного моменту.

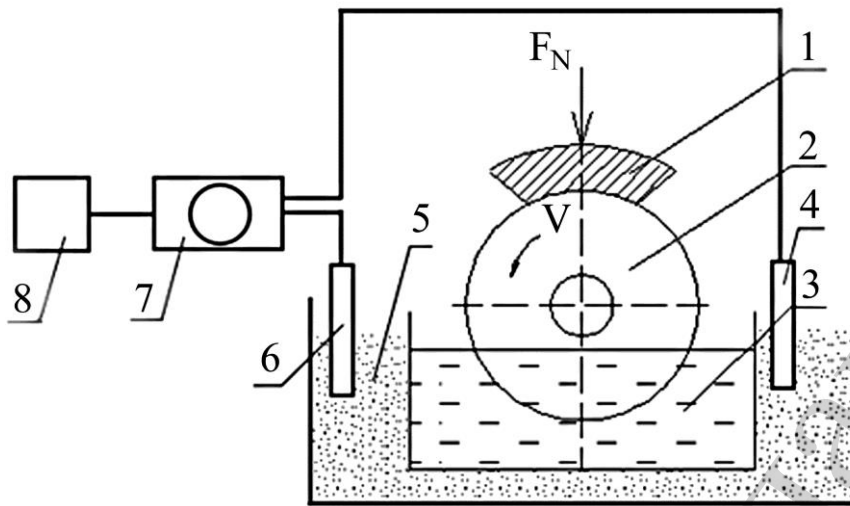


Рис. 1. Схема випробувань на тертя та зношування СМЦ-2: 1 – колодка; 2 – ролик; 3 – олива, що досліджується; 4 – нагрівач (термоелемент); 5 – резервуар з оливою; 6 – термодатчик; 7 – електронний термостат; 8 – блок живлення

В резервуар 5 з дослідною оливою 3 занурюється ролик приблизно на $1/3$ діаметра до якого з відповідною силою притискається колодка 1. Частота обертання ролика 2 і зусилля притиснення колодки 1 регулюються і підтримуються елементами управління машини тертя. Для підтримки постійної заданої температури досліджуваної оливи 3, що надходить в пару тертя, установка оснащена термостатом 7, включеним в ланцюг живлення нагрівального елемента 4, при цьому керуючий сигнал виробляється термодатчиком 6.

Умови проведення експерименту:

- стабілізована температура резервуара з оливам, $t=40\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- частота обертання шпинделя, $n=300\text{ об/хв.}$;
- діаметр ролика 25 мм, товщина – 16 мм;
- площа поверхні тертя колодки $1,56\text{ см}^2$;
- час проведення одного випробування, $t=20$ годин.

Знос зразків визначався методом встановлення втрати їх маси за час випробувань, який становив 20 годин. Зважування зразків проводилося аналітичними вагами ВЛА-200г-М з точністю 0,0005 г.

Дослідження поверхні тертя сталі та бронзи проводились на атомно-силовому мікроскопі "Solver P47-Pro" фірми виробника NT-MDT (м. Зеленоград, Росія).

4. 2. Методика визначення впливу концентрації конгломерату вуглецю на трібологічні властивості індустриальних олив

Оскільки основний знос поверхонь тертя протікає в режимі граничного мащення, то першочерговим завданням було визначення значень контактного тиску в моделі пари тертя "колодка-ролик".

З метою визначення точки переходу пари тертя в режим граничного змащення до зразків, після їх електричної ізоляції від «землі», підключався омметр, за допомогою якого визначався електричний опір рухомого контакту зразків. Враховуючи той факт, що гідродинамічний мастильний шар виключає безпосередній контакт поверхонь і є діелектриком, в такому режимі змащення електричний опір рухомого контакту зразків мав значення більше 1 МОм. При руйнуванні гідродинамічного мастильного шару пара тертя переходить в режим граничного змащення, а опір контакту різко падає і досягає значень 0,2–1 Ом, що відповідає сухому контакту зразків.

Таким чином були встановлені значення контактного тиску та швидкості ковзання в парі тертя "ролик-колодка" при яких відбувається перехід з гідродинамічного мащення в граничне. Це відбувається для обраних моделей зразків тертя в діапазоні 800–1200 Н та швидкості 0,393 м/с. Тому зовнішнє навантаження було прийняте в діапазоні від 800 до 1200 Н (5,16 МПа – 7,74 МПа). Діапазон коливань незалежних факторів наведений в табл. 1.

Таблиця 1
Діапазон коливань значень незалежних факторів

Назва фактору	Діапазон
Концентрації вуглецевої сажі, %	0–0,2
Зовнішнє навантаження, Н (МПа)	800–1200 (5,16–7,74)

З метою визначення мінімально необхідної повторюваності дослідів, попередньо було проведено десять вимірювань моменту тертя та зносу пари «колодка-ролик». При вимірюваннях використовувалась індустріальна олива И-30А без додавання вуглецевої сажі. Температура оливи під час вимірювань складала 40 °С, зовнішнє навантаження на пару тертя 1000 Н (6,45 МПа), а швидкість ковзання 0,393 м/с. Результати попередніх випробувань наведені в табл. 2.

Таблиця 2
Результати попередніх випробувань для визначення мінімально необхідної кількості дослідів

№ досліду	1	2	3	4	5
Момент тертя, Н·м	1,083	1,099	1,081	1,084	1,099
Знос колодки, мг	4,51	4,69	4,62	4,53	4,53
Знос ролика, мг	0,75	0,77	0,76	0,74	0,76
№ досліду	6	7	8	9	10
Момент тертя, Н·м	1,096	1,084	1,067	1,115	1,097
Знос колодки, мг	4,58	4,63	4,63	4,49	4,61
Знос ролика, мг	0,74	0,77	0,76	0,77	0,75

Базуючись на теорії планування експерименту та методів статистичної обробки результатів механічних вимірювань [18, 19], був проведений

розрахунок необхідної мінімальної кількості дослідів, результати якого наведені в табл. 3.

Мінімальна необхідна повторність дослідів визначалась за залежністю:

$$n_{\min} \geq \frac{\sigma^2 \cdot t_{kp}^2}{\Delta^2 \cdot m_{cp}^2}, \quad (1)$$

де σ – середнє арифметичне відхилення вимірів; t_{kp} – табличне значення коефіцієнта Стюдента при заданій надійності результатів виміру $P=0,9$ та кількості дослідів $n=10$, $t_{kp}=1,81$ [18]; Δ – допустима відносна похибка виміру ($\Delta=0,02$ [19]); m_{cp} – середнє арифметичне значення результатів виміру.

Таблиця 3

Результати розрахунку мінімальної кількості дослідів на машині тертя СМЦ-2

	Середнє квадратичне відхилення вимірів, σ	Середнє арифметичне значення результатів виміру, m_{cp}	Мінімальна необхідна повторність дослідів, n_{\min}
Момент тертя	0,0133354	1,0905	1,22
Знос колодки	0,0646013	4,582	1,63
Знос ролика	0,0115758	0,757	1,92

Отже, мінімальна повторність дослідів, $n_{\min}=2$.

Програмою проведення експериментальних досліджень передбачалась реалізація двох 2-х факторних експериментів, де функцією відгуку були момент тертя та знос в парах "колодка-ролик" (табл. 4).

Для отримання залежностей у вигляді рівнянь регресії був вибраний ортогональний план експерименту, який дозволив з мінімальною кількістю дослідів визначити коефіцієнти рівнянь при заданій довірчій ймовірності.

Таблиця 4

Програма проведення експериментальних досліджень зміни моменту тертя та зносу пари тертя «колодка-ролик» на машині тертя СМЦ-2

№ експерименту	Функція відгуку	Марка оливи	Присадка, %	Зовнішнє навантаження
1	Момент тертя, Нм	И-30А	Концентрація вуглецевої сажі (0–0,2%) в оліві	800–1200Н
2	Знос колодки та ролика, мг			

Згідно рекомендацій [18], були вибрані рівні варіювання факторів (табл. 5) та був сформований ортогональний план двох-факторного експерименту, табл. 6.

Таблиця 5
Рівні варіювання факторів

Рівень	Код	Зовнішнє навантаження, Н (МПа) X_1	Концентрація вуглецевої сажі, % X_2
Нижній рівень	-1	800 (5,16)	0
Нульовий рівень	0	1000 (6,45)	0,1
Верхній рівень	+1	1200 (7,74)	0,2

Таблиця 6
Ортогональний план двох-факторного експерименту

№ п/п	Кодовані значення		Натуральні значення	
	X_1	X_2	Зовнішнє наванта- ження, Н	Концентрація вуглеце- вої сажі, %
1	0	1	1000	0,2
2	1	0	1200	0,1
3	-1	-1	800	0
4	-1	0	800	0,1
5	1	1	1200	0,2
6	0	-1	1000	0
7	1	-1	1200	0
8	-1	1	800	0,2
9	0	0	1000	0,1

Отже, для визначення впливу концентрації вуглецевої сажі та зовнішнього навантаження на зміну моменту тертя та зносу пари «колодка-ролик» було проведено 2 двох-факторних експерименти. В кожному експерименті проводилось по 9 дослідів із подвійною повторністю кожен.

Після проведення випробувань на машині тертя СМЦ-2, поверхні тертя зразків трибологічної пари «колодка-ролик», досліджувались за допомогою атомно-силової мікроскопії.

5. Результати досліджень зносу на машині тертя СМЦ-2

Результати експериментальних досліджень на машині тертя СМЦ-2 наведені в табл. 7.

Таблиця 7
Результати експериментальних досліджень визначення зміни моменту тертя та зносу пари тертя «колодка-ролик» від концентрації вуглецевої сажі в оливі И-30А та зовнішнього навантаження

№ п/п	Момент тертя, Н·м			Знос ролика, мг			Знос колодки, мг		
	$M_{TP(1)}$	$M_{TP(2)}$	$M_{TP(CP)}$	U_1	U_2	U_{CP}	U_1	U_2	U_{CP}
1	1,05	1,028	1,039	0,44	0,37	0,405	2,51	2,59	2,55

2	1,045	1,054	1,0495	0,46	0,52	0,49	3,21	3,27	3,24
3	1,081	1,065	1,073	0,67	0,63	0,65	3,58	3,64	3,61
4	0,957	0,985	0,971	0,16	0,11	0,135	1,58	1,44	1,51
5	1,084	1,097	1,0905	0,5	0,56	0,53	3,46	3,37	3,415
6	1,096	1,086	1,091	0,77	0,73	0,75	4,57	4,63	4,6
7	1,128	1,11	1,119	0,93	0,89	0,91	5,53	5,47	5,5
8	0,997	1,032	1,0145	0,18	0,22	0,2	1,78	1,87	1,825
9	0,987	1,025	1,006	0,25	0,28	0,265	2,29	2,2	2,245

За результатами проведених досліджень одержані рівняння регресії, які описують закономірність зміни моменту тертя між колодкою та роликом та зносу пари тертя «колодка – ролик» в залежності від обраних факторів із застосуванням оливи И-30А:

– момент тертя між колодкою та роликом

$$M_{\text{ТР}} = 6,2333334c^2 + 0,0000002p_H^2 - 1,8533334c - 0,0002496p_H + 0,000375c \cdot p_H + 1,149278, \quad (2)$$

– знос ролика

$$U = 27,7501c^2 + 0,0007p_H - 8,3834c + 0,0009c \cdot p_H + 0,0701, \quad (3)$$

де c – концентрації вуглецевої сажі в індустріальній оливі И-30А, %; p_H – зовнішнє навантаження, Н.

– знос колодки

$$U = 125,1667c^2 + 0,0048p_H - 31,1501c - 0,0038c \cdot p_H - 0,1467. \quad (4)$$

Перевірка відтворюваності дослідів проводилась за критерієм Кохрена [18, 19], а перевірка адекватності моделі виконувалась за допомогою критерію Фішера [18].

Результати перевірки на відтворюваність та адекватність наведені в наступних рівняннях:

– визначення моменту тертя між колодкою та роликом

$$G_K = 0,269856 \leq 0,6385, \quad F_{\Phi} = 0,710784 \leq 6,1631;$$

– визначення зносу ролика

$$G_K = 0,365672 \leq 0,6385, F_\Phi = 0,5005 \leq 6,1631;$$

– визначення зносу колодки

$$G_K = 0,275668 \leq 0,6385, F_\Phi = 3,067873 \leq 6,1631.$$

Отримані рівняння регресії адекватні отриманим результатам експериментальних досліджень, тому їх можливо використовувати для аналізу досліджень.

Графічне зображення результатів випробувань пари "колодка-ролик" на машині тертя СМЦ-2, щодо зміни моменту тертя від концентрації вуглецевої сажі та зовнішнього навантаження при температурі оливи 40 °С наведені на рис. 2, 3.

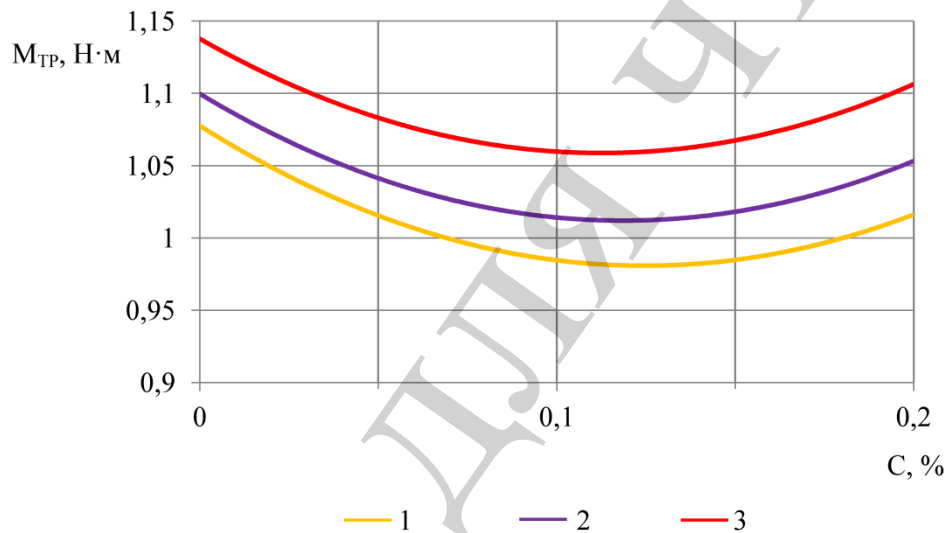


Рис. 2. Зміна моменту тертя між роликом та колодкою в залежності від концентрації вуглецевої сажі в індустріальній оливі И-30А: 1 – зовнішнє навантаження $P_H=800$ Н (5,16 МПа); 2 – $P_H=1000$ Н (6,45 МПа); 3 – $P_H=1200$ Н (7,74 МПа)

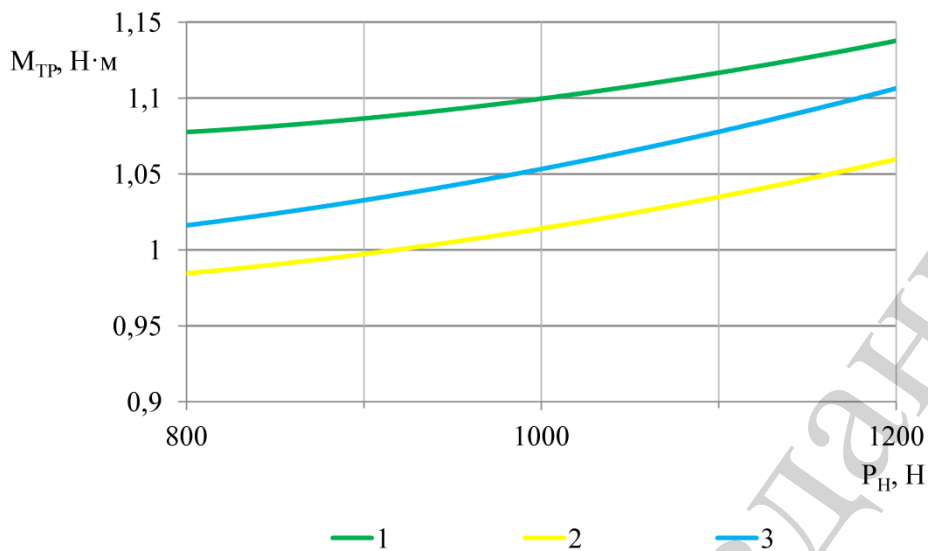


Рис. 3. Зміна моменту тертя між колодкою та роликом в залежності від зовнішнього навантаження при різних концентраціях вуглецевої сажі в оливі: 1 – індустріальна олива И-30А без застосування вуглецевої сажі; 2 – концентрація вуглецевої сажі 0,1 % в оливі; 3 – концентрація вуглецевої сажі 0,2 % в оливі

Згідно отриманих результатів по впливу концентрації вуглецевої сажі на зміну моменту тертя в парі "колодка-ролик" (рис. 2, 3), з ростом концентрації від 0 до 0,1 % спостерігається зменшення моменту тертя на 7–8,4 % при зовнішньому навантаженні від 800 Н до 1200 Н. При подальшому збільшенні значення концентрації момент тертя починає зростати.

Результати випробувань встановлення впливу концентрації вуглецевої сажі на зміну зносу пари тертя "колодка-ролик" при зовнішньому навантаженні (800–1200 Н) на машині СМЦ-2 зображені на рис. 4, 7.

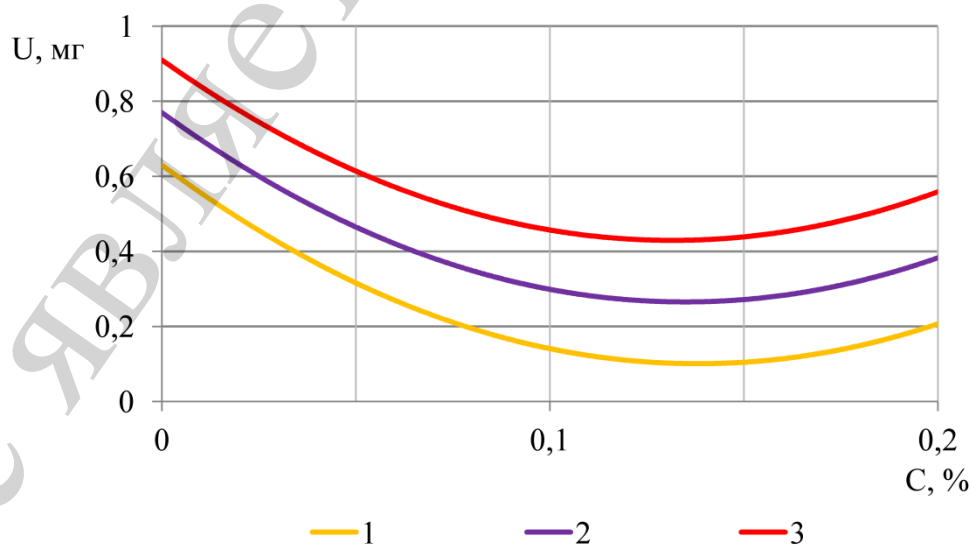


Рис. 4. Зміна величини зношування ролика в залежності від концентрації вуглецевої сажі в індустріальній оливі И-30А: 1 – зовнішнє навантаження $P_H=800$ Н (5,16 МПа); 2 – $P_H=1000$ Н (6,45 МПа); 3 – $P_H=1200$ Н (7,74 МПа)

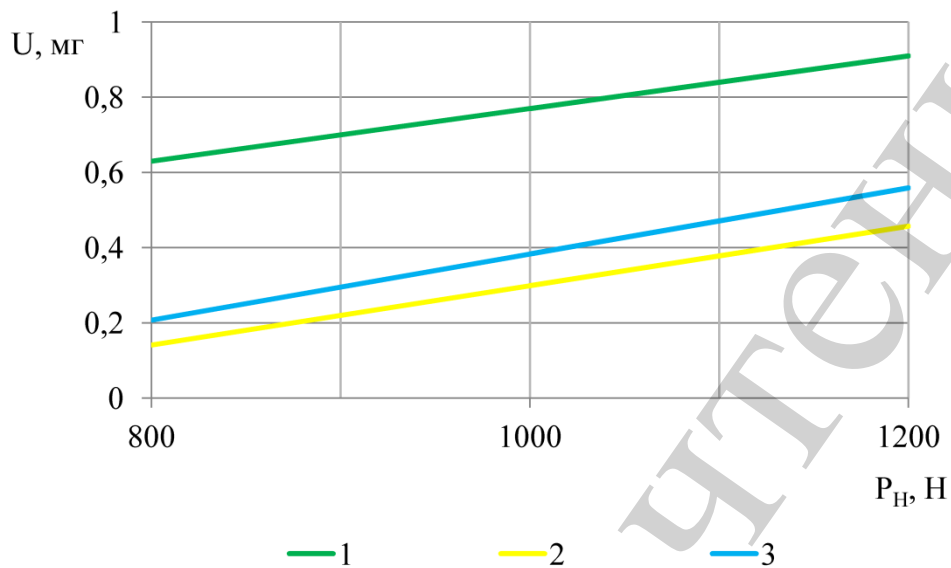


Рис. 5. Зміна величини зношування ролика в залежності від зовнішнього навантаження при різних концентраціях вуглецевої сажі в оливі: 1 – індустріальна олива И-30А без застосування вуглецевої сажі; 2 – концентрація вуглецевої сажі – 0,1 % в оливі; 3 – концентрація вуглецевої сажі – 0,2 % в оливі

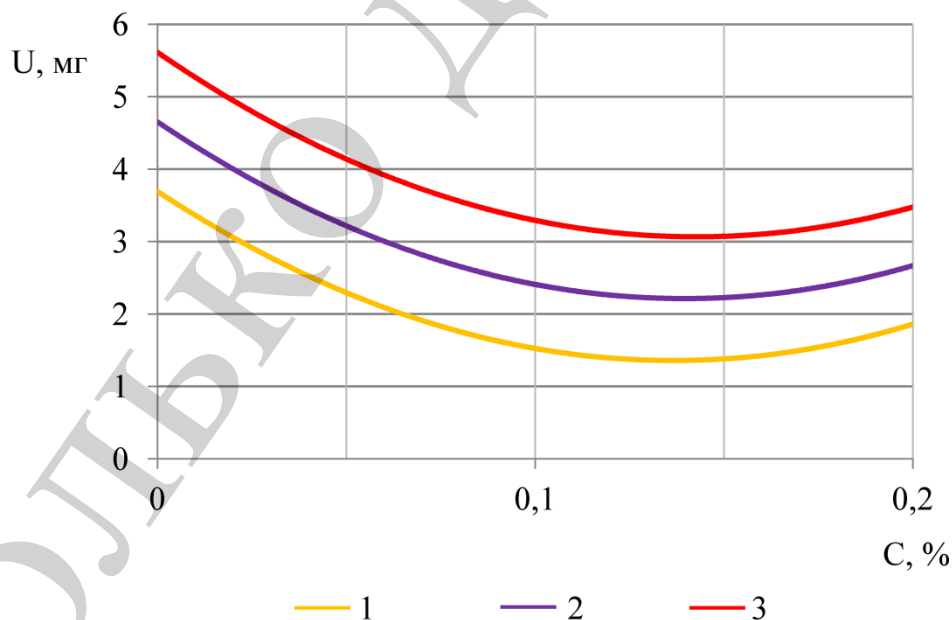


Рис. 6. Зміна величини зношування колодки в залежності від концентрації вуглецевої сажі в індустріальній оливі И-30А: 1 – зовнішнє навантаження $P_H=800$ Н (5,16 МПа); 2 – $P_H=1000$ Н (6,45 МПа); 3 – $P_H=1200$ Н (7,74 МПа)

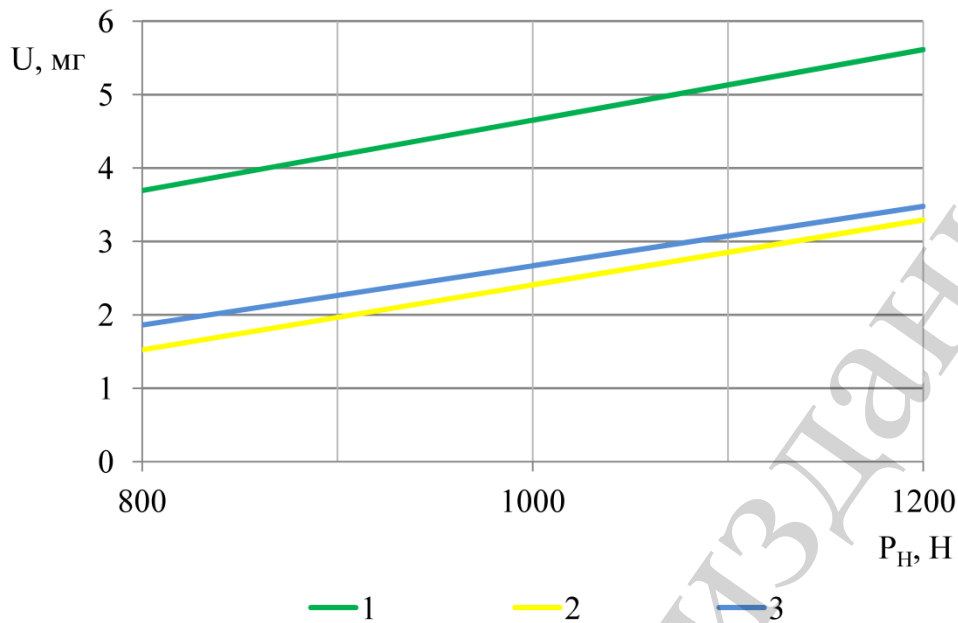


Рис. 7. Зміна величини зношування колодки в залежності від зовнішнього навантаження при різних концентраціях вуглецевої сажі в оливі: 1 – чиста індустріальна олива И-30А; 2 – концентрація вуглецевої сажі 0,1 % в оливі; 3 – концентрація вуглецевої сажі 0,2 % в оливі

За результатами досліджень (рис. 4, 5) встановлено залежність зміни зношування ролика від концентрації вуглецевої сажі в оливі та від зовнішнього навантаження. Виявлено, що при збільшенні концентрації від 0 до 0,2 % при зовнішніх навантаженнях від 800 Н до 1200 Н спостерігається зменшення зносу ролика. Рациональними значеннями мінімального зносу при цих навантаженнях є концентрація вуглецевої сажі від 0,12–0,13 %.

Результати зносу колодки (рис. 6, 7), за тих самих навантажень та досліджуваного діапазону концентрацій, показали мінімальний знос за концентрації вуглецевої сажі 0,12 – 0,13%.

Результати досліджень поверхонь тертя сталі та бронзи, на атомно-силовому мікроскопі "Solver P47-Pro" фірми виробника NT-MDT (м. Зеленоград, Росія), після випробувань індустріальної оливи з вуглецевою сажею, відображені на рис. 8 та 9.

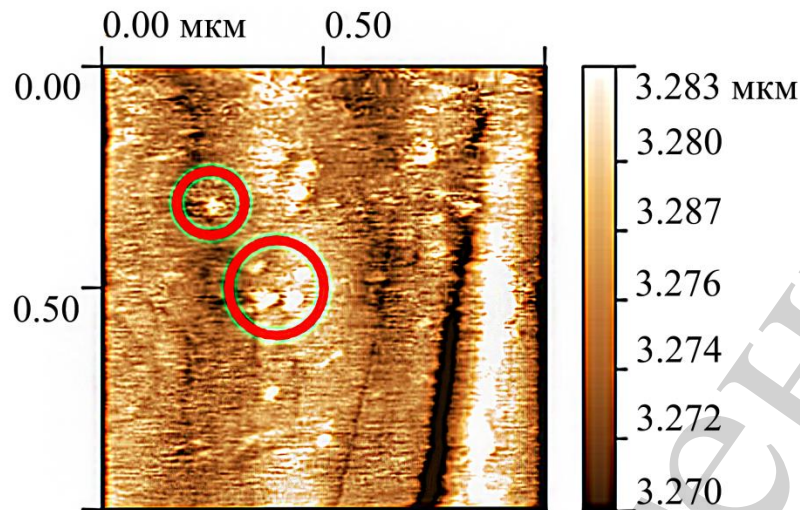


Рис. 8. Поверхня ролика після випробувань

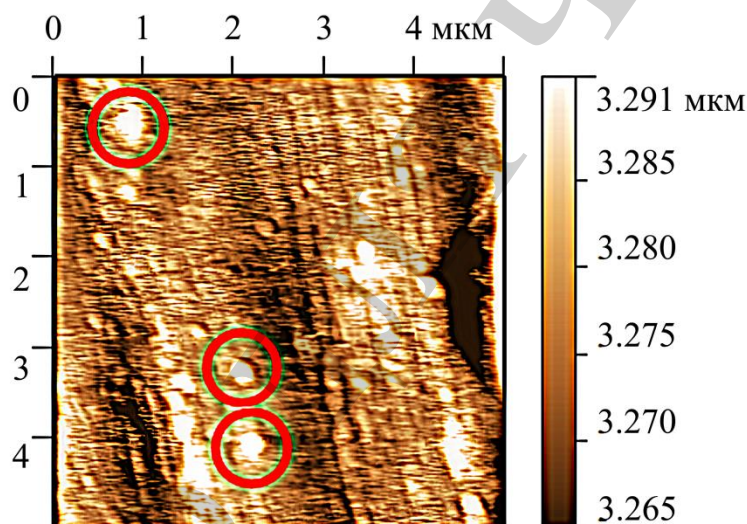


Рис. 9. Поверхня колодки після випробувань

На рис. 8, 9 показані поверхні тертя досліджених зразків після випробувань. На поверхнях ролика та колодки присутні включення розмірами від 40 нм до 250 нм.

6. Обговорення результатів дослідження впливу концентрації вуглецевої сажі на трибологічні властивості індустриальних олив

Проведенні експериментальні дослідження є частиною наукового напрямку, що вивчає вплив мікро- та наночастинок різних форм вуглецю на процеси, що відбуваються в трибологічних системах. Зокрема, зміну трибологічних характеристик індустриальних олив.

Зменшення моменту тертя в парі «сталь-бронза» при концентрації вуглецевої сажі в оливі від 0–0,13 % пов'язане з впливом абразивних частинок вуглецю

на рівноважну шорсткість поверхонь тертя, а саме на її зниження, що призводить до зменшення механічної складової тертя.

Область раціональної концентрації вуглецевої сажі в межах 0,12–0,13 %, при якому спостерігається мінімальний знос за певних навантажень, полягає в тому, що в даній парі тертя реалізується два види зношування. Перший вид це пружньо-пластичний, а другий – абразивний. При збільшенні концентрації вуглецевої сажі пружньо-пластичний вид зношування зменшується, а абразивний – збільшується. І саме при концентрації 0,12–0,13 % дані види зношування зрівнюються. При подальшому збільшенні концентрації вуглецевої сажі відбувається збільшення абразивного і подальше зменшення пружньо-пластичного зношування. Саме тому сумарний знос у встановленій області має мінімум.

Дослідження на атомно-силовому мікроскопі показали, що на поверхнях тертя є різні за розміром включення від 40 нм до 250 нм. Враховуючи той факт, що частинки вуглецю є міцнішими за сталь, з якої зроблений ролик, то на поверхні ролика включеннями є саме наночастинки вуглецю. Нанорозмірність частинок проглядається за допомогою масштабної лінійки. Що стосується бронзової колодки, то враховуючи розміри включень, можна стверджувати про наявність як вуглецевих частинок, так і продуктів зносу. Такі включення зміцнюють поверхневі шари металів та зменшують їх знос.

Результати роботи підтверджують висновки попередніх наукових досліджень [9, 20–26], щодо позитивного використання наночастинок вуглецю різної форми в якості «присадок» та модифікаторів тертя до мастильних матеріалів. Але слід зауважити, що в роботах [4, 5, 8, 25] використовувались чисті форми вуглецю, переважно фулерени, собівартість отримання яких на порядок вища за конгломерат вуглецю даного дослідження.

Щодо недоліків роботи, то необхідно зауважити, що не розкрита структура вуглецевої сажі. Тобто, в якому відсотковому складі перебувають такі форми вуглецю як фулерени, нанотрубки, мікро- та наночастинки графіту та ін. Виникає також запитання щодо впливу зміни відсоткового складу вуглецевої сажі в мастильному матеріалі на процеси тертя та зношування. Саме ці не висвітлені питання є подальшим науковим дослідженням.

7. Висновки

1. Згідно проведених експериментальних досліджень на машині тертя СМЦ-2 встановлено, що вміст вуглецевої сажі в індустріальній оливі И-30А сприяє зменшенню зносу пари тертя «колодка-ролик». Із зростанням концентрації вуглецевої сажі від 0 до 0,13 %, інтенсивність зношування бронзової колодки зменшується на 48,5–65,2 %, а сталюого ролика на 52–84 % при зовнішньому навантаженні 800–1200 Н. При подальшому збільшенні концентрації знос починає зростати, що пояснюється переважно абразивним зносом. Мінімальний знос, в усьому діапазоні зовнішніх навантажень, спостерігається при значенні концентрації вуглецевої сажі 0,12–0,13 %. Цей діапазон можна вважати раціональним для даної трібологічної системи.

2. Дослідження на атомно-силовому мікроскопі показали наявність на поверхнях тертя нанорозмірних включень елементів вуглецевої сажі, як на сталі

так і на бронзі. Це говорить про те, що наночастинки вуглецевої сажі занурюються в поверхневий шар, що призводить до його дискретного зміцнення та сприяє зменшенню зносу за певної концентрації.

Література

1. Ремарчук М. П. Методика визначення стану гідросистем будівельних і дорожніх машин в умовах експлуатації // Науковий вісник будівництва. 2013. Вип. 73. С. 306–312.
2. Аналіз властивостей робочих рідин гідроприводів колійної техніки залізниць України / Воронін С. В., Сафонюк І. Ю., Онопрейчук Д. В., Стефанов В. О., Суранов О. О. // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2016. Вип. 165. С. 90–98.
3. Creation of a Diffusion Barrier at the Interphase Surface of Composite Coatings Reinforced with Carbon Nanotubes / Panarin V. Y., Svavil'nyy M. Y., Khominych A. I., Kindrachuk M. V. // Journal of Nano- and Electronic Physics. 2017. Vol. 9, Issue 6. P. 06023-1–06023-5. doi: [https://doi.org/10.21272/jnep.9\(6\).06023](https://doi.org/10.21272/jnep.9(6).06023)
4. Мікосянчик О. О. Кінетика зміни мікротвердості поверхневих шарів металу при адаптації граничних адсорбційних шарів мастильного матеріалу в зоні контакту // Проблеми тертя та зношування. 2013. № 2. С. 56–61.
5. Wear kinetics of contact surfaces with use of C60 fullerene additive to motor oil / Dmitrichenko N. F., Mnatsakanov R. G., Mikosyanchik O. A., Kushch A. I. // Journal of Friction and Wear. 2009. Vol. 30, Issue 6. P. 399–403. doi: <https://doi.org/10.3103/s106836660906004x>
6. A study on the tribological characteristics of graphite nano lubricants / Lee C.-G., Hwang Y.-J., Choi Y.-M., Lee J.-K., Choi C., Oh J.-M. // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2009. Vol. 10, Issue 1. P. 85–90. doi: <https://doi.org/10.1007/s12541-009-0013-4>
7. The effect of carbon nanoadditives on the tribological properties of industrial oils / Voronin S. V., Suranov A. V., Suranov A. A. // Journal of Friction and Wear. 2017. Vol. 38, Issue 5. P. 359–363. doi: <https://doi.org/10.3103/s1068366617050130>
8. Точильников Д. Г., Гинзбург Б. М. Влияние C60-содержащих присадок к смазочному маслу на оптимизацию процессов изнашивания при граничном трении металлов // Журнал технической физики. 1999. Т. 69, Вып. 6. С. 102–105.
9. Влияние фуллерена C60, фуллереновых саж и других углеродных материалов на граничное трение скольжения металлов / Гинзбург Б. М., Байдакова М. В., Киреенко О. Ф., Точильников Д. Г., Шепелевский А. А. // Журнал технической физики. 2000. Т. 70, Вып. 12. С. 87–97.
10. Трибологические свойства наноуглерода, полученного электроразрядным методом / Бакларь В. Ю., Кускова Н. И., Тихонович В. В., Грипачевский А. Н. // Электронная обработка материалов. 2009. № 4. С. 30–37.

11. Rakov E. G. Methods for preparation of carbon nanotubes // Russian Chemical Reviews. 2000. Vol. 69, Issue 1. P. 35–52. doi: <https://doi.org/10.1070/rc2000v069n01abeh000531>

12. Огляд та аналіз конструкцій установок для отримання наночастинок вуглецю електродуговим методом / Воронін С. В., Онопрейчук Д. В., Суранов О. О., Амінов Д. О. // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. 2013. Вип. 141. С. 253–258.

13. Лабораторний пристрій для отримання наночастинок вуглецю / Воронін С. В., Суранов О. В., Суранов О. О., Куц В. М. // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. 2014. Вип. 148 (1). С. 74–78.

14. Грибачев В. Технология получения и сферы применения углеродных нанотрубок // Компоненты и технологии. 2008. № 12. С. 135–138.

15. Тихомирова Г. В. Углеродные наноматериалы. Екатеринбург: Уральский федеральный университет, Институт естественных наук, 2011. 70 с.

16. Касумов М. М., Покропивный В. В. Повышение выхода фуллеренов в дуговом разряде под действием потока газа в полом электроде // Журнал технической физики. 2007. Т. 77, Вып. 7. С. 136–138.

17. Фуллереновая сажа электродугового синтеза / Грузинская Е. А., Кескинов В. А., Кескинова М. В., Семенов К. Н., Чарыков Н. А. // Наносистемы: физика, химия, математика. 2012. Т. 3, № 6. С. 83–90.

18. Степнов М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: справочник. М.: Машиностроение, 1985. 232 с.

19. Винарский М. С., Лурье М. В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях. Киев: Техника, 1975. 168 с.

20. Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon // Nature. 1991. Vol. 354, Issue 6348. P. 56–58. doi: <https://doi.org/10.1038/354056a0>

21. Growing carbon nanotubes / Ando Y., Zhao X., Sugai T., Kumar M. // Materials Today. 2004. Vol. 7, Issue 10. P. 22–29. doi: [https://doi.org/10.1016/s1369-7021\(04\)00446-8](https://doi.org/10.1016/s1369-7021(04)00446-8)

22. Sublimed C60films for tribology / Bhushan B., Gupta B. K., Van Cleef G. W., Capp C., Coe J. V. // Applied Physics Letters. 1993. Vol. 62, Issue 25. P. 3253–3255. doi: <https://doi.org/10.1063/1.109090>

23. Gupta B. K., Bhushan B. Fullerene particles as an additive to liquid lubricants and greases for low friction and wear // Lubrication Engineering. 1994. Vol. 50, Issue 7. P. 524–528.

24. Influence of Hydrogen on the Wear Resistance of Materials in the Friction Couples of Braking Units / Kindrachuk M. V., Vol'chenko D. A., Vol'chenko N. A., Stebeletskaya N. M., Voznyi A. V. // Materials Science. 2017. Vol. 53, Issue 2. P. 282–288. doi: <https://doi.org/10.1007/s11003-017-0073-z>

25. Mordyuk B. M., Mikosyanchyk O. O. Influence of Shear Component of Load Under the Friction on a Structure–Phase State and Wear of Surface Layer of Steel 1045 // Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. 2017. Vol. 39, Issue 6. P. 795–813. doi: <https://doi.org/10.15407/mfint.39.06.0795>

26. Increase of wear resistance of the steel surface layer by modifiers of friction at rolling with sliding / Dmitrichenko N. F., Mnatsakanov R. G., Mikosyanchik O. A., Kushch A. I. // *Trenie i Iznos*. 2005. Vol. 26, Issue 4. P. 391–396.

Т О Л Ь К О Д Л Я Ч Т Е Н И Я