

Г.О. Сіренко¹, В.П. Свідерський², Л.М. Солтис¹, І.І. Новіков³, В.П. Захаренко³

Вплив сталих та динамічних навантажень на процеси зношування, тертя та зміну шорсткості поверхонь полімерних композитів

¹Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,
вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, 76025, Україна
Тел. (0342) 77.64.15; (096) 813.93.53, e-mail: sirenkog@rambler.ru

²Хмельницький національний університет,
вул. Інститутська, 11, м. Хмельницький, 29016, Україна

³Науково-дослідний та конструкторський інститут хімічного машинобудування,
вул. Невського, 9; ЗАТ «Барренс», м. Санкт-Петербург, Російська Федерація

Виявлено та вивчено явище впливу сталих та динамічних навантажень на процеси зношування, тертя та зміну розподілу висот вершин та середньої кривини у вершинах мікронерівностей поверхонь термотривких полімерів, наповнених сферичними та волокнистими дисперсними матеріалами, під час випробувань у компресорах без мащення високого тиску. Провідна роль у цих явищах належить: геометричній формі наповнювача полімерних композитів, природі газового середовища, тиску газу та температурі поверхні спряжених пар тертя.

Ключові слова: полімер, кокс, вуглецеве волокно, композит, зразки тертя, ущільнювальні кільця, поршень, циліндр, шорсткість, моменти спектральної щільності.

Стаття поступила до редакції 15.08.2011; прийнята до друку 15.09.2011.

Вступ

1. Відомо [1-7], що процеси тертя, зношування та мащення твердих тіл визначаються параметрами цих процесів: питомим та нормальним навантаженням; коливанням цих параметрів; швидкістю ковзання; температурою спряжених поверхонь; видом фрикційного контакту; шляхом тертя; наявністю, природою та кількістю мастильного середовища; вакуумом та природою зовнішнього середовища; утворенням проміжних плівок на поверхнях тертя, так званого третього тіла, тощо.

Динамічні навантаження характерні для нормальних умов роботи ущільнювальних пар. Динамічна складова навантаження коливається в межах $\pm 5 \dots \pm 60\%$ від середніх величин, а частота навантаження – від 0,02 до 300 с^{-1} [8].

Інтенсивність зношування під час амплітудного коливання навантаження близько певного середнього значення у процесі випробування матеріалів на лабораторних машинах тертя вище у порівнянні з тим випадком, коли навантаження підтримується сталим на рівні середнього значення [9].

Причому знайдено, що збільшення інтенсивності зношування у режимі помірних навантажень тим більше, чим ширший інтервал зміни амплітуди і

більша частота навантаження. Так, дослідження впливу режиму навантаження на тертя та зношування ПТФЕ, наповненого дисперсними матеріалами, показали [10], що зношування в умовах амплітудного прикладення навантаження в 1,3-1,7 рази вище, ніж під час стаціонарного режиму навантаження [9].

2. Встановлено [11, 12], що температура газу, в якому відбувається тертя полімерів при зворотньо-поступальному русі та нестационарному навантаженні, підвищувалася на 8-12 К у порівнянні з випадком стаціонарного навантаження, а підвищення температури поверхонь тертя в значній мірі залежить від амплітуди коливань навантаження. Дане явище пояснюють [11] так званим ефектом післядії – тимчасовим запізнюванням зміни внутрішніх параметрів у залежності від зовнішніх. Внутрішні параметри не тільки являються функціями зовнішніх, але явно залежать і від часу, оскільки продовжують змінюватися і тоді, коли зовнішні параметри вже сталі. Крім того, зміна термічного і механічного стану контакту під час динамічного навантаження пари тертя викликає пришвидшення трибохімічних реакцій, адсорбційних, дифузійних та багато інших процесів.

3. Динамічні навантаження, створюючи змінні деформації у контакті ущільнювальних пар, порушують рівновагу переносу захисних плівок, що змінює співвідношення між втомним і адгезійним механізма-

ми зношування на користь першого. Вивчення впливу нестационарних навантажень на зношування полімерних матеріалів ущільнень компресорів без машення має важливе значення, так як у цих умовах режими навантаження відрзняються від амплітудного, утруднено утворення плівок переносу, а також суттєва роль впливу на зношування природи стиснутого середовища.

4. У значній мірі характеристики шорсткості спряжених поверхонь полімерного зразка та контртіла, як вихідних, так і утворених під час тертя та зношування, також визначають інтенсивність зношування та коефіцієнт тертя. Найбільш продуктивним виявився математичний опис шорсткості поверхні виконаний за допомогою теорії випадкового поля [1]. Для опису ізотропних шорстких поверхонь використовують моменти спектральної щільності (СЩ): нульового порядку m_0 , пов'язаного з висотним параметром; другого порядку m_2 , пов'язаного з градієнтом поверхні; четвертого порядку m_4 , пов'язаного з кривиною висот вершин поверхні [1-3].

У [5-7] досліджено залежність інтенсивності зношування полімерного композитного матеріалу на основі політетрафторетилену та вуглецевого волокна від моментів спектральної щільності під час тертя по шорсткій ізотропній металевій поверхні без машення та в середовищі дистильованої води.

Мета роботи полягала у тому, щоби дослідити зношування, тертя та зміну шорсткості поверхонь карбопластиків на основі термостійких полімерів та сферичних і волокнистих дисперсійних матеріалів, отриманих за хемо-механо-активаційною (ХМА) технологією, та промислових зразків, під час дослідження на експериментальному стенді-компресорі та компресорах і детандерах в умовах промислового виробництва, виявити при цьому вплив тиску газу (робочого тіла), температури поверхні та природи газу, що стискується, на ці процеси.

I. Експериментальна частина

1. Матеріали для досліджень.

Ущільнювальні поршневі кільця та зразки тертя були виготовлені [13-36]:

А. Із промислових виробів:

1) металів: чавуна, спижа (бронзи) [13];

2) спечених графітів: АО-1500 – вуглецевий обпалений за 1573 К; 2П-1000; хіманіта-С (на основі нафтового коксу, графіту, BN, MoS₂, отриманого за СПВ-технологією – сумісного пресування та відпалу) [14-16];

3) полімеру: капролона-В (продукту полімеризації ε-капролактаму під час дії лужних каталізаторів [17];

4) композитів на основі терморезистивних смол: АМС-1 (на основі епоксикремнійорганічного зв'язуючого + кокс) [15, 16]; текстоліт-Ш (на основі шарів бавовняної тканини та фенолоформальдегідного зв'язуючого) [17, 18];

5) графітофоропластів на основі порошку політетрафторетилену (ПТФЕ) + порошки наповнювачів: 20% термообробленого нафтового коксу (НК) (матеріал Ф4К20, пресований); 20% коксу НК (Ф4К20-IV,

екструзований); 35% графіту + 15% MoS₂ (АФГМ, холодного та гарячого пресування); 20% графіту (АФГ-80ВС); 15% скловолокна (Ф4С15) (матеріал «рулон» фірми «Діксон» США) [14-16].

Б. Із нових розробок:

1) композиту на основі порошку ароматичного поліаміду фенілон С-2 (продукта поліконденсації метафенілендіаміну та суміші дихлорангідридів ізофталевої (60%) і терефталевої (40%) кислот) + 20% дисперсії вуглецевого волокна ТГН-2м, отриманого із графітованої за 2673 К в середовищі N₂ вуглецевої тканини УТМ-8 {матеріал графелон-20 [20-24]};

2) композитів на основі порошку ПТФЕ + наповнювачів: 20% дисперсії вуглецевого волокна, отриманого із карбонізованої за 1123 К в середовищі СН₄ гідратцелюлозної тканини (ГЦ), попередньо обробленої сумішшю (NH₄)₂HPO₄ + Na₂B₄O₇·10H₂O (1:1), (вуглецеве волокно УТМ-8) (матеріал флубон-15/20); 12,5% порошку MoS₂ + 12,5% дисперсії вуглецевого волокна УТМ-8 (флубон-ДМ-1); 15% порошку коксу НК + 5% дисперсії вуглецевого волокна УТМ-8 (флубон-К15ВВ5); 15% дисперсії вуглецевого волокна УТМ-8 (флубон-15/15); 30% дисперсії вуглецевого волокна УТМ-8 (флубон-15/30); 12,8% дисперсії вуглецевого волокна УТМ-8 + 1,2% дисперсії графітованого волокна ТГН-2м + 8% порошку MoS₂ (флубон-ДМА); 12,8% дисперсії вуглецевого волокна УТМ-8 + 1,2% дисперсії графітованого волокна ТГН-2м + 8% порошку графіту С-1 (флубон-ГС-1); 12% дисперсії вуглецевого волокна УТМ-8 + 1,5% дисперсії графітованого волокна ТГН-2м + 4% порошку графіту С-1 + 5% порошку MoS₂ (флубон-ДМГ-С-1); 12,5% дисперсії графітованого волокна ТГН-2м + 12,5% порошку MoS₂ (флубон-ДМ-2); 15% дисперсії графітованого волокна ТГН-2м + 10% порошку MoS₂ (флубон-ДМБ); 10% порошку кокса + 10% дисперсії вуглецевого волокна УТМ-8 (флубон-К10ВВ10); 5% порошку кокса + 15% дисперсії вуглецевого волокна УТМ-8 (флубон-К5ВВ15); 11,2% дисперсії вуглецевого волокна УТМ-8 + 4% дисперсії графітованого волокна ТГН-2м, покритого 12% піровуглецю (волокно ТМП-3) + 4,8% порошку пірографіту (флубон-ПВ-1); 15% дисперсії вуглецевого волокна УТМ-8, покритого 42% Cu⁰ до маси волокна (флубон-15М) [25-33].

Волоконні наповнювачі, полімерні композиції та композити були отримані за ХМА-технологією [34-36] в лабораторних умовах.

2. Експериментальна устава.

2.1. Для визначення працездатності та зношування матеріалів у реальних умовах експлуатації та встановлення залежності між зносостійкістю під час сталого і динамічного навантаження полімерних зразків та поршневих кілець (рис. 1) використана експериментальна установка на базі III ступеня автоматизованого кисневого компресора 2РК-1,5/220БС [37, 38] (стенд), який працював без змащування циліндрів при стисканні атмосферного повітря. Середня швидкість поршня дорівнювала 1,2 м/с; «мертва зона» S_М = 15 мм; хід поршня S_і = 150 мм; матеріал циліндра – сталь 30Х13 (НВ 3 ГПа; Ra₀ = 0,25±0,05 мкм). Експериментальний поршень (2) (рис. 2) мав порожнистий контршток (1). У ковпаку, який був встановлений на головці циліндру,

створювався постійний тиск повітря, який передавався по порожнині контрштока на ту частину зразків, яка працювала при постійному навантаженні. Контршток у головці циліндра мав сальникове ущільнення, яке розділяло тиск газу в циліндрі та ковпаку. В тілі поршня був виконаний канал, по якому газ при тиску з порожнини стиснення проникав під зразки, які працювали при динамічному навантаженні.

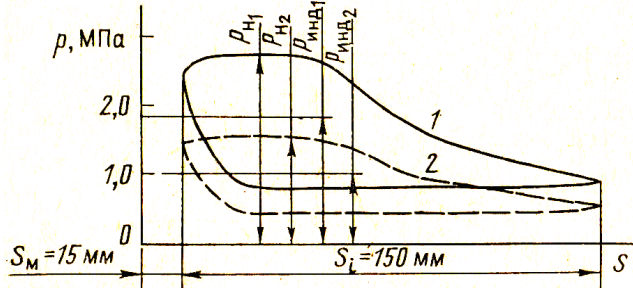


Рис. 1. Режими навантаження зразків змінним тиском у компресорі без мащення: 1 – $X_2^{(3)} = 0$ ($p_3 = 1,9$ МПа); 2 – $X_2^{(3)} = -1$ ($p_3 = 1$ МПа); $p(H_1) = 2,8$ МПа; $p(H_2) = 1,6$ МПа; $p(\text{инд}_1) = 1,9$ МПа; $p(\text{инд}_2) = 1,0$ МПа.

2.2. Поршневе ущільнення циліндра, що навантажувалося змінним тиском повітря, складалося з двох кілець: верхнього поршневого кільця (3), яке сприймало увесь перепад тиску під час стиснення повітря в III ступені компресора; нижнього поршневого кільця (10), яке встановлене для того, щоб виключити вплив на експериментальні зразки тиску газу суміжного ступеня. Розміри ущільнювального поршня кільця, встановленого у верхній частині

поршня, вибрані згідно [37, 39]: внутрішній діаметр $d_B = 62$ мм; зовнішній діаметр $d_3 = 70$ мм; висота $h = 12$ мм. Між верхніми і нижніми поршневими кільцями в поршневих канавках розміщувалися дослідні зразки матеріалу (6). Конструкція поршня експериментального ступеня компресора 2РК-1,5/220БС показана на рис. 2. Зразок з полімерного матеріалу був виконаний сегментальної форми (рис. 3).

2.3. Дослідження зносостійкості полімерних зразків проводили в умовах статичного навантаження їх постійним тиском повітря, який подавався від ресивера (вісім зразків) і динамічного навантаження змінним тиском повітря, яке стискалося дослідним ступенем компресора (вісім зразків).

Температура робочої поверхні циліндра визначалася термопарами, які розміщувалися на відстані $\sim 1,5$ мм від поверхні тертя. Охолодження втулки циліндра здійснювалося холодною водою. Проведені розрахунки показали, що температура робочої поверхні циліндра перевищує температуру, яка визначена на відстані $\sim 1,5$ мм, на $3 \pm 0,5$ К. Ця поправка враховувалася при проведенні експерименту.

За даними [38] температура газу при нагнітанні дорівнювала 395-405, 407-423 та 378-398 К для компресорів 2РК-1,5/220БС, 2ГП-1,5/220 та 2ГП-5/220 відповідно. Розрахунки температури циліндрів цих компресорів за методом [37, 38] показали, що середня температура останніх ступенів складає 342-360 К. Виходячи з цих даних, температура циліндра компресора 2РК-1,5/220БС для експериментів була вибрана в межах 318-358 К.

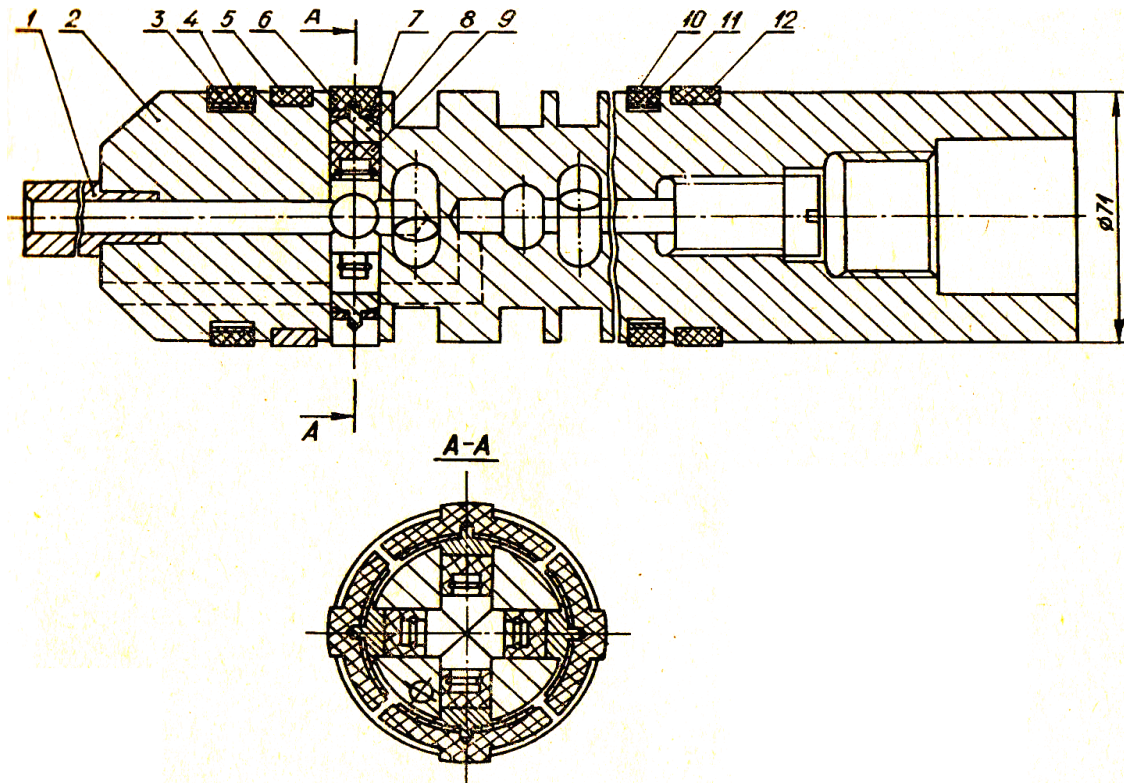


Рис. 2. Конструкція поршня експериментального ступеня компресора 2РК-1,5/220БС без мащення: 1 – контршток; 2 – тіло поршня; 3, 10 – верхнє і нижнє поршневі кільця; 4, 11 – експандери; 5, 12 – спрямовуючі кільця; 6 – полімерний сегментальний зразок; 7 – стальна підкладка; 8 – штифт; 9 – манжета.

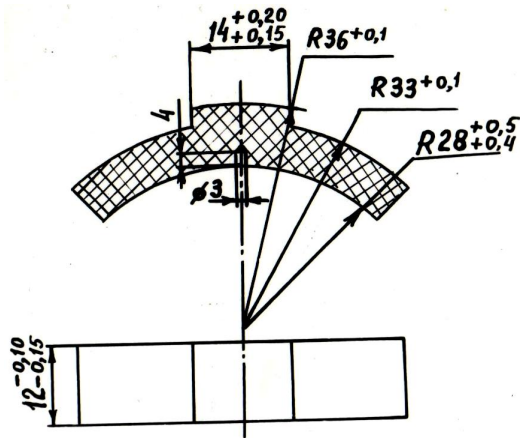


Рис. 3. Зразок тертя з полімерного композиту.

Розрахунки розподілу тиску по поршневому ущільненню для III ступеня компресора 2РК-1,5/220БС за методом [37, 38] показали, що максимальний перепад тиску на поршневе кільце складає 0,7 МПа. На VI ступені компресора 2ШЛК-1420 з кінцевим тиском 32 МПа максимальний перепад тиску на першому та останньому кільцях складає відповідно 1,8 і 3,4 МПа [38]. Виходячи з величин цих перепадів тиску, дослідження зносостійкості поршневого ущільнення в

системі III ступеня компресора 2РК-1,5/220БС проводили в інтервалі тиску повітря 1,0-2,8 МПа.

Порівняльні випробування зносостійкості полімерних зразків тертя в умовах стаціонарного навантаження проводили в інтервалі питомих навантажень 1-3 МПа.

2.4. Антифрикційні випробування на стенді-компресорі проводили із застосуванням рототабельного симплекс-сумованого плану другого порядку (табл. 1) [40]. Функція відгуку – інтенсивність зношування поршневого ущільнювального елемента або полімерних зразків y_i , вихідні змінні – середня температура циліндра ступеня компресора X_1 і перепад тиску на поршневий ущільнювальний елемент (кільце) $X_2^{(3)}$, питоме навантаження на полімерний зразок при сталому $X_2^{(1)}$ та змінному $X_2^{(2)}$ тисках.

Порядок реалізації дослідів був рандомізований у часі за таблицею випадкових чисел [41]. Досліди при заданих величинах тиску і середньої температури циліндра повторювали двічі, тому що при зміні режиму роботи компресора з'являється вторинне припрацювання, яке необхідно було враховувати при оцінці величини зносу. Шлях тертя для одного дослідів дорівнював 150 км.

Таблиця 1

Симплекс-сумований план другого порядку

Матриця планування			Робоча матриця			
i	X_1	X_2	T, K (X_1)	P, МПа [$X_2^{(1)}$]	P, МПа [$X_2^{(2)}$]	P, МПа [$X_2^{(3)}$]
1	+0,866	+0,5	358	2,50	1,75 $\begin{pmatrix} +0,89 \\ -0,92 \end{pmatrix}$	2,35 $\begin{pmatrix} +1,19 \\ -1,23 \end{pmatrix}$
2	-0,866	+0,5	318	2,50	1,75 $\begin{pmatrix} +0,89 \\ -0,92 \end{pmatrix}$	2,35 $\begin{pmatrix} +1,19 \\ -1,23 \end{pmatrix}$
3	0	-1	338	1,00	0,70 $\begin{pmatrix} +0,41 \\ -0,40 \end{pmatrix}$	1,00 $\begin{pmatrix} +0,58 \\ -0,57 \end{pmatrix}$
4	0	+1	338	3,00	2,10 $\begin{pmatrix} +1,20 \\ -1,20 \end{pmatrix}$	2,80 $\begin{pmatrix} +1,60 \\ -1,60 \end{pmatrix}$
5	+0,866	-0,5	358	1,50	1,05 $\begin{pmatrix} +0,58 \\ -0,54 \end{pmatrix}$	1,45 $\begin{pmatrix} +0,80 \\ -0,75 \end{pmatrix}$
6	-0,866	-0,5	318	1,50	1,05 $\begin{pmatrix} +0,58 \\ -0,54 \end{pmatrix}$	1,45 $\begin{pmatrix} +0,80 \\ -0,75 \end{pmatrix}$
7	0	0	338	2,00	1,40 $\begin{pmatrix} +0,66 \\ -0,77 \end{pmatrix}$	1,90 $\begin{pmatrix} +0,90 \\ -1,04 \end{pmatrix}$
8	0	0	338	2,00	1,40 $\begin{pmatrix} +0,66 \\ -0,77 \end{pmatrix}$	1,90 $\begin{pmatrix} +0,90 \\ -1,04 \end{pmatrix}$
9	0	0	338	2,00	1,40 $\begin{pmatrix} +0,66 \\ -0,77 \end{pmatrix}$	1,90 $\begin{pmatrix} +0,90 \\ -1,04 \end{pmatrix}$

3. Методика експериментального дослідження шорсткої поверхні тертя.

Полімерні зразки та поршневі кільця після токарної обробки припрацьовували в компресорі та металевому контргтілі. Металево контргтіло із сталі 30X13 шліфували та полірували до середнього арифметичного відхилення профілю поверхні $Ra_0 = 0,25 \pm 0,05$ мкм.

Профілограми мікрошорсткості поверхонь знімали після 300 км шляху тертя за допомогою профілометра-профілографа ВЭИ «Калибр» моделі «201» та моделі «252». Для одного напрямку знімали 50-60 базових довжин пофілограм для полімерного зразка та поршневого кільця. Для ізотропної поверхні профілограму знімали під кутом $\sim 45^\circ$ до напрямку ковзання. Ділянки зйомки поверхні були рівнорозподілені за слідом тертя. Статистичні характеристики різних ділянок поверхні були однаковими в статистичному відношенні.

Профілограми оброблялися за методом МНК: знаходили середньоарифметичне відхилення профілю поверхні Ra , щільність нулів D_0 і щільність екстремумів D_{extr} . Виміряна Ra і розрахункова за профілограмами D_0 (для моделі «252» D_0 виміряна) були статистично рівні.

Великий об'єм виборки і рівномірний розподіл її по поверхні зразка забезпечили рівень вмісту довгохвильових компонентів спектру, і, таким чином, показність моментів спектральної щільності. Границя дрібномасштабних мікронерівностей у ділянці малих довжин хвиль спектру була обмежена величиною, яка не перебільшувала у 2-3 рази похибку вимірювань. Параметр широкосмугастості α був більше 1,8, тобто тієї величини, яка характерна для «білого шуму».

II. Результати та обговорення

1. Вплив сталих та динамічних навантажень на процеси зношування.

1.1. Математична модель:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2. \quad (1)$$

У реалізації симплекс-сумованого плану другого порядку і обробки експериментальних даних отримані адекватні рівняння (рівень значущості $1 - p = \alpha = 0,05$, де p – ймовірність прийняття нульової гіпотези H_0 адекватності математичної моделі, α – ймовірність ризику того, що прийнята гіпотеза H_0 насправді неправдива):

1) для поршневих ущільнювальних елементів (кілець) (змінний тиск) із матеріалів:

а) графелон-20

$$y_1 = [3,71 + 2,79x_1 + 2,40x_2^{(3)} + 2,08x_1x_2^{(3)}] \cdot 10^{-10} \quad (2)$$

$$[S_{ад}^2 = 2,457; S_b^2 = 0,156; F_p = 15,75; F_T = 19,25];$$

б) Ф4К20

$$y_2 = [3,72 + 1,104x_1 + 1,0x_2^{(3)} + 0,594x_1^{(2)}] \cdot 10^{-10} \quad (3)$$

$$[S_{ад}^2 = 0,054; S_b^2 = 0,016; F_p = 3,38; F_T = 19,16];$$

в) Флубон-15/20

$$y_3 = [0,857 + 0,288x_1 + 0,35x_2^{(3)}] \cdot 10^{-10} \quad (4)$$

$$[S_{ад}^2 = 0,011; S_b^2 = 0,008; F_p = 1,38; F_T = 19,25],$$

де F_p – розрахункова статистика Фішера;

F_T – табличне (теоретичне) значення критерію Фішера;

$S_{ад}^2$ – дисперсія адекватності;

S_b^2 – дисперсія відтворення;

2) для зразків тертя в умовах динамічного прикладання навантаження (змінний тиск) із матеріалів:

а) графелон-20

$$y_1 = [3,8 + 2,74x_1 + 2,24x_2^{(2)} + 2,14x_1x_2^{(2)}] \cdot 10^{-10} \quad (5)$$

$$[S_{ад}^2 = 1,684; S_b^2 = 0,090; F_p = 18,71; F_T = 19,16];$$

б) Ф4К20

$$y_2 = [3,61 + 1,145x_1 + 1,004x_2^{(2)} + 0,689x_1^{(2)}] \cdot 10^{-10} \quad (6)$$

$$[S_{ад}^2 = 0,162; S_b^2 = 0,012; F_p = 13,50; F_T = 19,16];$$

в) Флубон-15/20

$$y_3 = [1,08 + 0,361x_1 + 0,471x_2^{(2)}] \cdot 10^{-10} \quad (7)$$

$$[S_{ад}^2 = 0,014; S_b^2 = 0,012; F_p = 1,17; F_T = 19,25];$$

3) для зразків тертя в умовах сталого прикладання навантаження (змінний тиск) із матеріалів:

а) графелон-20

$$y_1 = [5,53 + 4,67x_1 + 3,34x_2^{(1)} + 3,16x_1x_2^{(1)}] \cdot 10^{-10} \quad (8)$$

$$[S_{ад}^2 = 3,211; S_b^2 = 0,240; F_p = 13,38; F_T = 19,16];$$

б) Ф4К20

$$y_2 = [4,13 + 1,125x_1 + 1,152x_2^{(1)} + 0,81x_1^{(2)}] \cdot 10^{-10} \quad (9)$$

$$[S_{ад}^2 = 0,124; S_b^2 = 0,016; F_p = 7,75; F_T = 19,16];$$

в) Флубон-15/20

$$y_3 = [1,385 + 0,478x_1 + 0,745x_2^{(1)}] \cdot 10^{-10} \quad (10)$$

$$[S_{ад}^2 = 0,0266; S_b^2 = 0,016; F_p = 1,66; F_T = 19,25].$$

1.2. Порівнюючи дисперсії відтворення дослідів S_b^2 , які отримали в стендовому експерименті, можна зробити висновок, що ущільнювальні елементи з флубону-15/20 ($S_b^2 = 0,008$) і Ф4К20 ($S_b^2 = 0,016$) мають більш стабільну відтворювальну працездатність порівняно з матеріалом графелон-20 ($S_b^2 = 0,156$). Для всіх матеріалів дисперсія відтворення для зразків тертя, які працювали при сталому тиску більша, ніж при змінному тиску для матеріалів (табл. 2).

Таблиця 2

Вплив змінного та сталого тиску на дисперсію відтворення інтенсивності зношування матеріалів зразків тертя під час випробування на стенді компресора 2PK-1,5/220БС

Матеріал зразка	Тиск	
	$p = \text{var}(X_2^{(2)})$	$p = \text{const}(X_2^{(1)})$
графелон-20	0,090	0,240
Ф4К20	0,012	0,016
флубон-15/20	0,012	0,016

1.3. У табл. 3 зведені ступені адекватності:

$$x_1(F) = \frac{F_T}{F_p} \quad (11)$$

та ступені неадекватності:

$$x_2(F) = \frac{F_p}{F_T} \quad (12)$$

рівнянь (2) – (10) для 3-х матеріалів поршневого елемента та зразків.

Як видно з табл. 3, ступені адекватності рівнянь (2)–(10) для матеріалів становить: 1,02-1,43 (для графелона-20); 1,42-5,67 (для Ф4К20); 11,60-16,45 (для флубон-15/20), що підтверджує високу надійність роботи та відтворюваність поверхні флубон-15/20.

1.4. Аналіз отриманих залежностей за допомогою двомірних перерізів (рис. 4) вказує на те, що процес зношування матеріалів описується різними регресійними моделями (для певного матеріалу вид математичної моделі не залежить від умов навантаження). Для матеріалу на основі ПТФЕ і дисперсного наповнювача – кокса (Ф4К20) рівняння містять квадратичний ефект X_1 від температури. Для матеріалу ПТФЕ + карбонізоване волокно УТМ-8 (флубон-15/20) значущі тільки лінійні ефекти, а для матеріалу на основі АПА + графітоване волокно ТГН-2м (графелон-20) значущим є ефект взаємодії першого порядку X_1X_2 . Для всіх видів зразків матеріалів на основі АПА + ТГН-2м і ПТФЕ + кокс для дослідженого інтервалу варіювання змінних X_1 і X_2 ефект від температури більший, ніж від тиску $|b_1(X_1)| > |b_2(X_2)|$. Виняток складає зношування зразків тертя ПТФЕ + кокс при сталому тиску, коли $|b_2(X_2)| > |b_1(X_1)|$. Для матеріалу на основі ПТФЕ + УТМ-8 ефект від тиску більший, ніж від температури $|b_2(X_2)| > |b_1(X_1)|$. Це підтверджує, що механізм зношування матеріалу флубон-15/20 відрізняється від інших матеріалів, що підтверджується дослідженнями поверхонь тертя, продуктів зношування і газовиділення при терті [42, 43]. Знайдено, що для всіх матеріалів вплив тиску на зношування зразків тертя при сталому тиску більший, ніж при змінному. Така ж закономірність спостерігається для матеріалів з вуглецевими волокнами і різними матрицями від температури, в той же час для матеріалу з дисперсними наповнювачами цей ефект при змінному тиску більший, ніж при сталому.

1.5. Аналіз залежностей зношування зразків і поршневого ущільнювального елемента від температури показав (рис. 5), що з підвищенням температури циліндра інтенсивність зношування зростає. Для низького тиску, як і для високого, при низьких температурах, спостерігається співвідношення по залежності зношування матеріалів від температури: Ф4К20 > графелон-20 > флубон-15/20. При високих

температурах і підвищених тисках різко зростає залежність інтенсивності зношування від температури для матеріалу графелон-20: графелон-20 > Ф4К20 > флубон-15/20. Матеріали за двома факторами (тиск і температура) можна проранжувати за максимальним впливом на зношування таким чином: (АПА + ТГН-2м) > (ПТФЕ + кокс) > (ПТФЕ + УТМ-8).

Аналіз рівняння регресії, яке описує процес зношування поршневого ущільнення із матеріалу Ф4К20, дозволяє зробити висновок, що інтенсивність зношування поршневого кільця із матеріалу на основі дисперсного наповнювача більш суттєво змінюється із зростанням температури циліндра порівняно з інтенсивністю зношування поршневих ущільнень із матеріалу на основі вуглецевого волокнистого наповнювача.

Аналіз залежностей зношування зразків тертя і поршневого ущільнювального елемента від тиску показав (рис. 6), що інтенсивність зношування полімерних зразків тертя в умовах динамічного навантаження перевищує в 1,2 рази інтенсивність зношування зразків, навантажених сталим тиском.

2. Вплив динамічного навантаження та природи газу на процеси зношування.

Вплив динамічного навантаження та природи стисненого газу на зношування полімерів, наповнених дисперсними та волокнистими матеріалами, досліджували в компресорах без мащення (табл. 4). Встановлено, що швидкість зношування поршневих ущільнень із матеріалу на основі волокнистого наповнювача (флубон-20) під час стискання повітря і сухого гелію відповідно в 3 і 6 раз менше в порівнянні зі швидкістю зношування ущільнення із матеріалу на основі дисперсного наповнювача (Ф4К20). В аргоні при близьких перепадах тиску підвищення температури на 150 К в 4,3 рази збільшує швидкість зношування ущільнювальних елементів із флубону-20. Під час тертя в сухому азоті введення молібден дисульфід у композицію на основі ПТФЕ та УТМ-8 (флубон-ДМ) ефективніше (швидкість зношування знижується у 7 раз), ніж введення його в композицію на основі ПТФЕ і графіту (АФГМ). У тому ж середовищі заміна 5% коксу в композиції Ф4К20 на волокно УТМ-8 (флубон-К15УВ5) знижує швидкість зношування у 8,6 раз.

Таблиця 3

Ступені адекватності $[\xi_1(F)]$ та неадекватності рівнянь (2) – (10)

Матеріал	$\xi(F)$	Поршневий ущільнювальний елемент $p = \text{var}(X_2^{(3)})$	Зразок	
			$p = \text{var}(X_2^{(2)})$	$p = \text{const}(X_2^{(1)})$
графелон-20	$\xi_1(F)$	1,22	1,02	1,43
	$\xi_2(F)$	0,82	0,98	0,70
Ф4К20	$\xi_1(F)$	5,67	1,42	2,47
	$\xi_2(F)$	0,18	0,71	0,40
флубон-15/20	$\xi_1(F)$	13,95	16,45	11,60
	$\xi_2(F)$	0,07	0,06	0,09

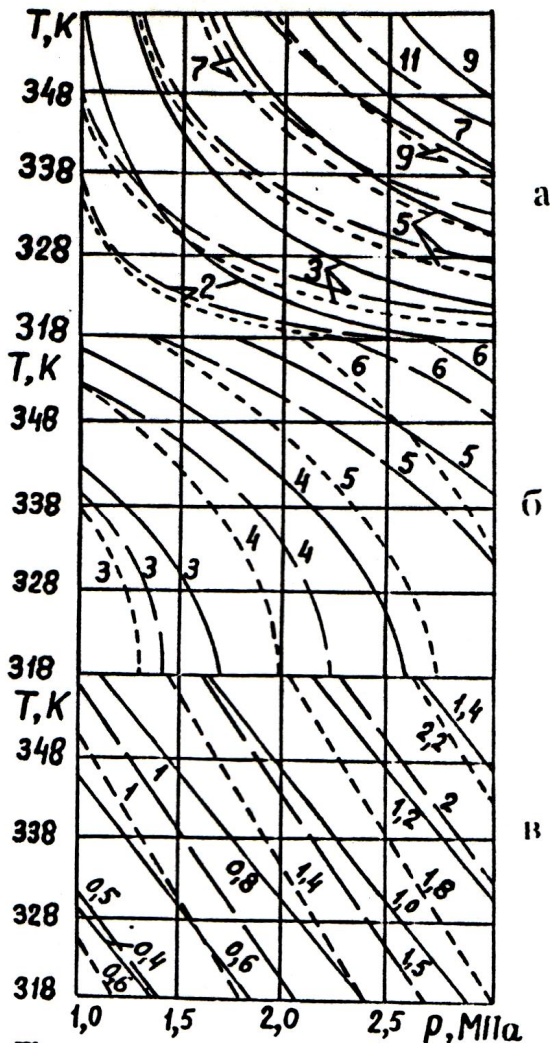


Рис. 4. Лінії рівної інтенсивності зношування кільця поршневого ущільнення (суцільні лінії), зразків тертя (крисковані лінії) з матеріалів графелон-20 (а), Ф4К20 (б) і флуобон-15/20 (в) в залежності від середнього індикаторного тиску (суцільні лінії), сталого (довгі крисковані лінії) і змінного (короткі крисковані лінії) тиску на зразки тертя і температури поверхні циліндра III ступеня компресора 2РК-1,5/220БС (на лініях рівних значень показані величини інтенсивності зношування).

Швидкість зношування сальникових ущільнень V ступеня із матеріалу з волокнистим наповнювачем, які працюють в азотно-водневому середовищі, зменшується у 2,4 рази при збільшенні перепаду тиску в порівнянні зі швидкістю зношування ущільнень із матеріалу з дисперсним наповнювачем, який працює на менш навантаженому штоці IV ступеня компресора 2ШЛК-1420.

Таким чином, в умовах нестационарного навантаження і різних газових середовищах матеріали з волокнистими наповнювачами більш зносостійкі, ніж з дисперсними, причому величина ефекту залежить від природи газового середовища.

3. Вплив природи наповнювачів полімерних композитів на тертя ущільнювальних елементів в умовах динамічних навантажень.

Розглянемо вплив наповнювачів на тертя поршневих кілець в умовах нестационарного навантаження.

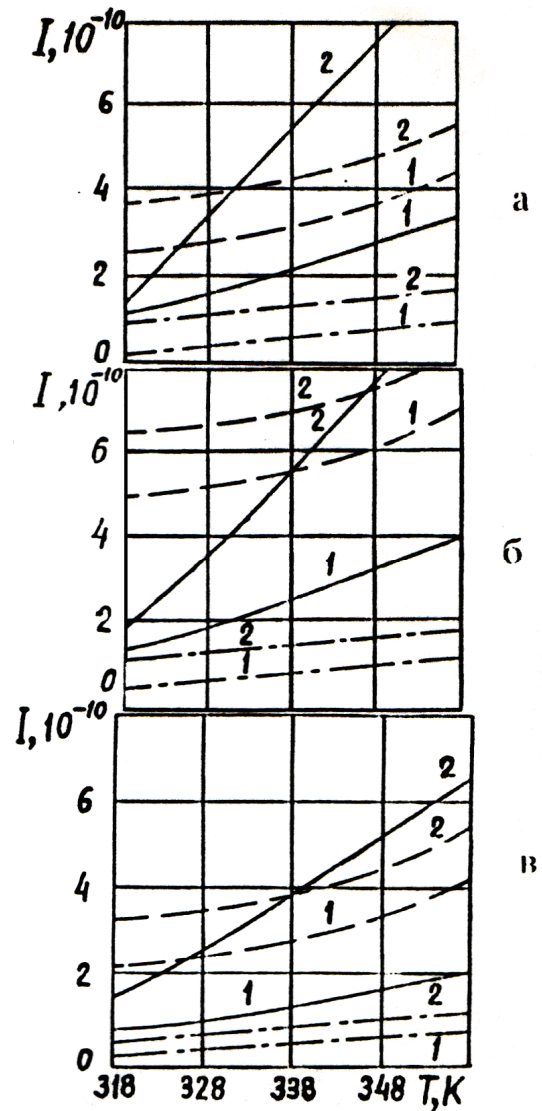


Рис. 5. Залежність інтенсивності зношування зразків тертя при сталому (а) і змінному (б) тисках і середніх перепадах тиску газу на поршневі ущільнювальні елементи (в) із матеріалів графелон-20 (суцільні лінії), Ф4К20 (крисковані лінії), флуобон-15/20 (штрих-крисковані лінії) від температури циліндра: 1 – 1 МПа; 2 – 2 МПа.

Коефіцієнт тертя поршневого кільця μ визначаємо через миттєву силу радіального (нормального) тиску кільця на дзеркало циліндра p' з формули:

$$F'_{\text{тpи}} = \mu p', \quad (13)$$

де μ – коефіцієнт тертя.

З врахуванням даних роботи [37] миттєву силу тертя поршневого кільця $F'_{\text{тpи}}$ знаходили за формулою:

$$F'_{\text{тpи}} = m \left[\frac{p}{2} Dh_k (p_1 - p_2) - \frac{p}{8} m_k (D^2 - d_s^2) (p_1 - p_2) + p Dh_k p_y \right], \quad (14)$$

де D – діаметр циліндра;

h_k – висота поршневого кільця;

μ_k – коефіцієнт тертя кільця по торцю канавки;

d_s – внутрішній діаметр втулки і поршневого кільця;

p_y – тиск пружини по зовнішньому діаметру кільця.

Швидкість зношування термостійких полімерів, наповнених сферичними та волокнистими дисперсними матеріалами, під час випробувань у поршневих компресорах та детандерах без мащення високого тиску

Ущільнення поршневої групи	Газ, що стискається	Матеріал ущільнення	Час випробувань, год.	Робочі параметри					J, мкм/год.	Ресурс роботи, год.
				тиск газу, МПа			T _н , К	\bar{v} , м/с		
				p _в	p _н	Δp_{\max}				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Компресор 2РК-1,5/220БС (НВО «ЛенНХіммаш», м. Санкт-Петербург)										
Поршень IV східця	повітря	Ф4К20	200	7	20	18,4	393	1,2	1,30	1150
		графелон-20	200	7	20	18,4	393	1,2	0,68	2200
		флубон-15/20	200	7	20	18,4	393	1,2	0,19	8330
Компресор СД-1,6/2,0 (м. Санкт-Петербург)										
Поршень III східця	вуглекислий газ	АО-1500	2450	–	7,5	6,0	373	1,2	0,17	8000
		АФГ-80ВС	1065	–	7,5	6,0	373	1,2	0,12	11000
		2П-1000	7903	–	7,5	6,0	373	1,2	0,10	14000
		Ф4К20	6550	–	7,5	6,0	373	1,2	0,08	17000
		АФГМ	1650	–	7,5	6,0	373	1,2	0,07	21000
		АМС-1	4162	–	7,5	6,0	373	1,2	0,06	23000
флубон-15/20	1020	–	7,5	6,0	373	1,2	0,02	70000		
Компресор TG3S_p-100/150 (Юрковецький спиртзавод, Вінницька обл.)										
Поршень III східця	вуглекислий газ	Ф4С15	4000	–	8,0	7,0	373	1,9	(а)	4000
		флубон-15/20	3766	–	8,0	7,0	373	1,9	0,17	12000
Компресор 2ШЛК-1420 (ВО «Азот», м. Новомосковськ)										
Шток IV східця	азото-воднева суміш	Ф4К20	2830	2,7	6,4	–	379	4,2	0,43	4000
		флубон-15/20	2830	2,7	6,4	–	379	4,2	0,04	40000
Шток V східця	азото-воднева суміш	флубон-15/20	2830	6,4	15,0	–	409	4,2	0,18	7000
Поршень VI східця	азото-воднева суміш	Ф4К20	(в)	15	32	26	381	4,2	(в)	–
		текстоліт-Ш	(в)	15	32	26	381	4,2	(в)	–
		флубон-15/20	2830	15	32	26	381	4,2	0,18	7000
Компресор 6ГМ16-140/200 (ВО «Лентехгаз», м. Санкт-Петербург)										
Поршень VI східця	кисень	флубон-15/20	1200	–	19	–	381	4	0,23	4000
		Ф4К20	250	–	19	–	381	4	(а)	250
Компресор 2ГМ4-1,3/12-250 (ВО «Лентрансгаз», м. Санкт-Петербург)										
Поршень I східця	природний газ	флубон-15/20 (ущільнювальні кільця)	2030	1	3	–	373	1,88	0,05	20000
		текстоліт-Ш (направляючі кільця)	2030	1	3	–	373	1,88	0,12	4000
Поршень II східця	природний газ	флубон-15/20 (ущільнювальні кільця)	2030	3	5,8	–	343	1,88	0,04	20000
		текстоліт-Ш (направляючі кільця)	2030	3	5,8	–	343	1,88	0,07	4000

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Поршень III східця	природний газ	флубон-15/20 (ущільнювальні кільця) чавун (б) (ущільнювальні кільця)	2030	5,8	11,8	–	353	1,88	0,05	20000
		текстоліт-III (направляючі кільця)	2030	5,8	11,8	–	353	1,88	0,13	3000
Поршень IV східця	природний газ	флубон-15/20 (ущільнювальні кільця) чавун (б) (ущільнювальні кільця)	2030	11,8	23,0	–	363	1,88	0,11	8000
		текстоліт-III (направляючі кільця)	2030	11,8	23,0	–	363	1,88	0,09	3000
Компресор 2ГМ4-1,3/12-250 (ВО «Уралтрансгаз», м. Єкатеринбург)										
Поршень I східця (1) II східця (1) III східця(1) IV східця(1)	природний газ	флубон-ДМ-1	2778							2778
		флубон-ДМА	2778	1,15	3,7	–	393	3,7	(а)	2778
		флубон-ДМБ	2778	3,7	7,2	–	253	3,7	(а)	2778
		флубон-ГС-1 флубон-ДМГ-С-1	2778	7,2	13,0	–	348	3,7	(а)	2778
		флубон-К15ВВ5	2778	13	24,0	–	373	3,7	(а)	2778
Поршень I східця (1) II східця (1) III східця(1) IV східця(1)	природний газ	флубон-15/15	3533						<0,5	10000
		флубон-15/20	3533						<0,5	10000
		флубон-15/30	3533	1,15	3,7	–	393	3,7	<0,5	10000
		флубон-15/20	3533	3,7	7,2	–	253	3,7	<0,5	10000
		флубон-ПВ	3533	7,2	13,0	–	348	3,7	<0,5	10000
		флубон-К5ВВ15	3533	13	24,0	–	373	3,7	<0,5	10000
		флубон-К10ВВ10 флубон-К15ВВ5	3533						<0,5	10000
Поршень I східця II східця III східця III східця	природний газ	флубон-15М	3200	1,15	3,7	–	393	3,7	0,002	>25000
		флубон-15М	3200	3,7	7,2	–	253	3,7	0,002	>25000
		флубон-15М	3200	7,2	13,0	–	348	3,7	0,002	>25000
		Ф4К20 (б)	2700	7,2	13,0	–	348	3,7	(а)	2700
Поршень III східця III східця IV східця IV східця IV східця IV східця	природний газ	спиж (б)	330	7,2	13,0	–	348	3,7	(а)	330
		чавун (б)	150	7,2	13,0	–	348	3,7	(а)	150
		флубон-15М	3200	13	24,0	–	373	3,7	0,002	>25000
		Ф4К20 (б)	2700	13	24,0	–	373	3,7	(а)	2700
		спиж (б)	300	13	24,0	–	373	3,7	(а)	300
		чавун (б)	50	13	24,0	–	373	3,7	(а)	50
Компресор 4М10-40/70 (Гелієвий завод, м. Оренбург)										
Поршень IV східця	сухий азот (T _р =200К)	флубон-ДМ	8000	3,5	7	–	333	3,9	0,06	>20000
		АФГМ	24	3,5	7	–	423	3,9	(а)	24
		Ф4К20	6	3,5	7	–	433	3,9	(а)	6
Детандер ДСД 82/180 (Завод синтетичних речовин, м. Новочеркаськ)										
Поршень	повітря	флубон-ДМА	1500	7,0	0,6	–	143	1,1	0,8	>2500
		АФГМ (холодне пресування)	150	7,0	0,6	–	143	1,1	(а)	150
		АФГМ (гаряче пресування)	300	7,0	0,6	–	143	1,1	(а)	300
		АФГ-80-ВС	150	7,0	0,6	–	143	1,1	(а)	150

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Компресор 3ГП-12/35 (Завод синтетичних речовин, м. Новочеркаськ)										
Поршень III східця	сухий азот	флубон-ДМА АФГМ АФГ-80ВС	600 700 250	1,2 1,2 1,2	3,5 3,5 3,5	– – –	373 373 373	3,0 3,0 3,0	0,63 (а) (а)	4000 700 250
Компресор для стискування повітря (Комбінат харчових концентратів, м. Дніпропетровськ)										
Поршень II східця	вологе повітря	флубон-15/20 рулон	1500 300	0,1 0,1	1,1 1,1	– –	368 368	3,0 3,0	0,208 (а)	15000 300
Повітряно-гідравлічний компресор (Комбінат харчових концентратів, м. Дніпропетровськ)										
Поршень	вологе повітря	флубон-15/20 рулон	600 200	0,1 0,1	0,8 0,8	– –	433 433	– –	0,146 (а)	6000 200
Компресор 4М40-680/22-320 (ВО «Азот», м. Рівне)										
Шток II східця	азото- воднева суміш	флубон-15/20 (ущільнювальні кільця)	21300	4,5	9,0	–	348	4,5	0,0043	40000
		капролон-В (б) (ущільнювальні кільця)	10000	4,5	9,0	–	348	4,5	(а)	10000
		текстоліт-III (протиєкструзійні кільця)	21300	4,5	9,0	–	348	4,5	0,027	6400
Шток III східця	азото- воднева суміш	флубон-15/20	6536	9,0	16,5	–	388	4,5	0,015	8000
Циркуляційний компресор 2ГМ16-20/42-60СМ2 (м. Санкт-Петербург)										
Шток	водень	флубон-15/20	6500	3,0	4,0	–	353	3,1	0,15	19800
		Ф4К20	8000	3,0	4,0	–	353	3,1	0,33	9000
Компресор 3ГП-5/220 (ВО «Лентехгаз», м. Санкт-Петербург)										
Поршень V східця	сухий азот	хіманіт-С	800	–	–	10	393	2	0,32	5800
Поршень VI східця	сухий азот	АФГМ	442	7	22	14,4	378	2	2,53	740
		Ф4К20	803	7	22	14,4	378	2	1,88	1000
		флубон-ДМ-2	784	7	22	14,4	378	2	0,37	5000
		флубон-К15ВВ5	803	7	22	14,4	378	2	0,22	8400
Компресор 3С2СГП-6/30 (ВНДІ «Гелітехніка», м. Москва)										
Поршень III східця	сухий гелій	Ф4К20 (ущільнювальні кільця)	683	0,7	1,6	1,0	418	3	0,72	2000
		Ф4К20 (направляючі кільця)	683	0,7	1,6	1,0	418	3	0,39	4200
		флубон-15/20 (ущільнювальні кільця)	915	0,7	1,6	1,0	418	3	0,27	6000
		флубон-15/20 (направляючі кільця)	915	0,7	1,6	1,0	418	3	0,22	7400
Компресор 2РВ-3/220 (ВО «Азот», м. Новомосковськ)										
Поршень III східця	аргон (насиче- ний газ)	флубон-15/20	1294	1,2	5,8	5,8	523	2	0,23	20000
		Ф4К20	400	1,2	5,8	5,8	523	2	(а)	400
Поршень IV східця	аргон (насиче- ний газ)	флубон-15/20	1294	5,8	7,0	5,5	373	2	0,054	9000
		Ф4К20	400	5,8	7,0	5,5	373	2	(а)	400

(а) – повний ресурс роботи; (б) – при повному змашуванні; (в) – нероботоздатний; (1) на кожному східці досліджені всі матеріали, що приведені в колонці 3; цифри в колонках 5-9 відносяться до параметрів східців; цифри в колонках 10-11 відносяться до певного східця для всіх матеріалів.

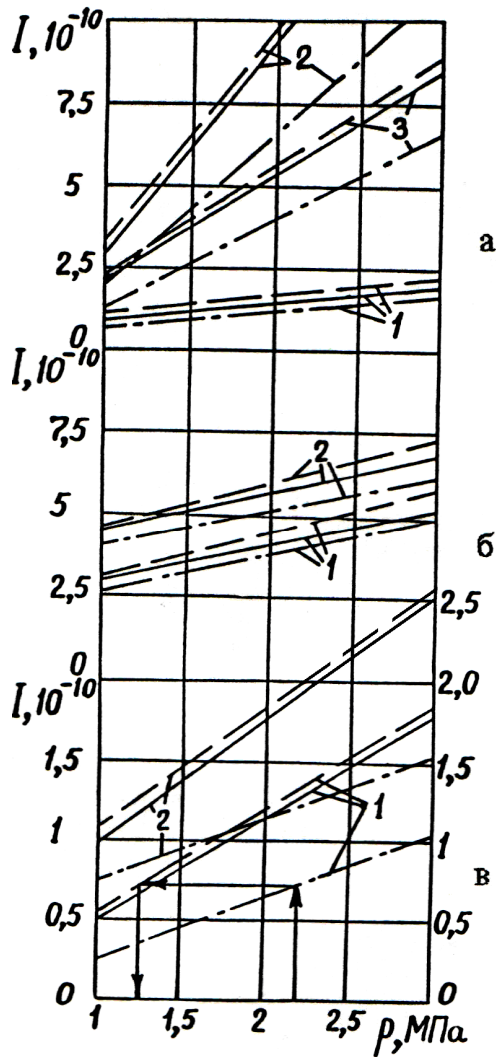


Рис. 6. Вплив сталого (зразки; суцільні лінії) і змінного (зразки; крисковані лінії) тисків, середнього перепаду індикаторного тиску (поршневе ущільнення; штрих-крисковані лінії) на інтенсивність зношування полімерного матеріалу: а – графелон-20; б – Ф4К20; в – флубон-15/20 (1 – температура 318 К; 2 – 358 К; 3 – 338 К).

Прийнято [37], що тиск газу на кільце зі сторони циліндра і по торцю кільця падає від p_1 до p_2 за лінійним законом (рис. 7а).

Приймаючи тиски перед кільцями рівними відповідно тискам під кільцями і сумуючи сили тертя для всіх z кілець, знайдемо силу тертя всього поршневого ущільнення:

$$F'_{тр} = \sum_{i=1}^z F'_{три} = m \left[\frac{p}{2} Dh_k (p_u - p_k) - \frac{p}{8} m_k (D^2 - d_g^2) (p_u - p_k) + zp Dh_k p_y \right], \quad (15)$$

де p_u – миттєвий тиск у циліндрі;
 p_k – кінцеве питоме навантаження.

Перший і третій члени рівняння (15) визначають сили тертя, які викликані відповідно тиском газу і пружною силою пружини. Другий член вносить поправку на тертя кільця об стінку канавки і має сенс у тому випадку, якщо кільце за кожним ходом поршня ковзає по стінці в радіальному напрямку, що буває

тільки при неправильній геометричній формі циліндра в результаті зношування металевими кільцями. У випадку графітових або пластмасових кілець зношування циліндра під час експлуатації практично відсутнє. Враховуючи це і виключаючи з рівняння (15) другий член, який має співмножник $z p_y$ другого порядку, отримаємо:

$$F_{тр} = mp Dh_k [(p_u - p_k) / 2 + zp_y]. \quad (16)$$

Як видно з рівняння (16), миттєва сила тертя залежить тільки від повного перепаду тиску ($p_u - p_k$) і не залежить від розподілу тиску за кільцями. Очевидно, що середня сила тертя всього циклу визначається середнім перепадом тиску за цикл і для двох ходів циклу $2S_1$ дорівнює:

$$\bar{F}_{тр} = \frac{1}{2S_1} mp Dh_k \int_0^{2S_1} [(p_u - p_k) / 2 + zp_y] dS_1. \quad (17)$$

Враховуючи, що тиск у циліндрі є функцією ходу $p_u = F(S_1)$ і $p_k = f(S_1)$ [37], після інтегрування виразу (17) отримаємо:

$$\begin{aligned} \bar{F}_{тр} &= mp Dh_k [(\bar{p}_u - \bar{p}_k) / 2 + zp_y] = \\ &= A(\bar{p}_u - \bar{p}_k) + B, \end{aligned} \quad (18)$$

де \bar{p}_u, \bar{p}_k – середні індикаторні тиски у циліндрі і за поршнем.

Експериментально встановлено [37], що залежність кінетичної і статичної сил тертя поршневих кілець із графітів від тиску має лінійний характер і незалежно від кількості кілець і величини тиску, який встановлюється між кільцями, спостерігається стале збільшення сили тертя на одиницю перепаду тиску газу:

$$tg \gamma = \frac{\Delta \bar{F}_{тр}}{\Delta \bar{p}} = const. \quad (19)$$

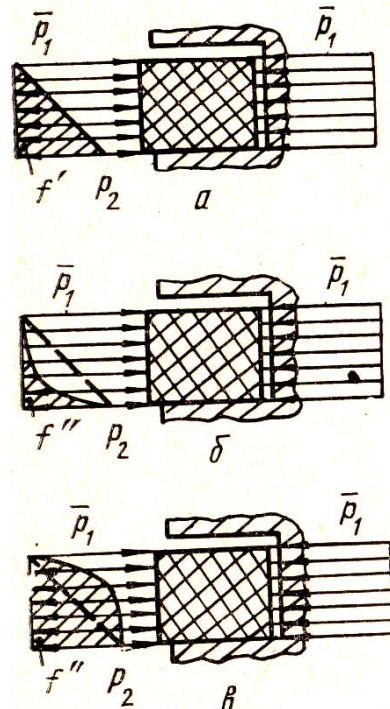


Рис. 7. Епюри тиску газу за висотою кільця: а – $\beta=1$; б – $\beta<1$; в – $\beta>1$.

Експериментальні значення кутових коефіцієнтів прямих $tg\psi$ відрізняються від розрахункових A за формулою (18):

$$\frac{mpDh_k}{2} = A \leq tg\psi = A \geq tg\psi. \quad (20)$$

Введемо поправочний коефіцієнт β у рівняння (18):

$$\bar{F}_{\text{тр}} = mpDh_k \{ [b(\bar{p}_u - \bar{p}_k)] / 2 + zp_y \}. \quad (21)$$

На рис. 7 показані схеми сил, які діють на кільце в радіальному напрямку (за виключенням сили пружності кільця, що пружинить – експандера). Площі f' і f'' являють собою нормальні сили, які діють на одиницю довжини поверхні тертя кільця ($\mu f'$ і $\mu f''$ – сили тертя, які викликані ними). Якщо не враховувати сили пружності, то сила тертя для всього кільця за схемою a дорівнює:

$$\bar{F}'_{\text{три}} = mpDf' = mpDh_k(p_1 - p_2) / 2, \quad (22)$$

а сили тертя за схемами $b, в$ мають вигляд:

$$\bar{F}''_{\text{три}} = mpDf'' = mpDh_k b(p_1 - p_2) / 2. \quad (23)$$

Можна записати:

$$f' = h_k(p_1 - p_2) / 2;$$

$$f'' = bh_k(p_1 - p_2) / 2,$$

звідки:

$$b = \frac{f''}{f'} = \frac{tg\psi}{\frac{mpDh_k}{2}}, \quad (24)$$

причому $\beta_{\text{max}} = 2$ і при змінному тиску β більша, ніж при сталому. Цей коефіцієнт характеризує вплив протитиску в контакті поршневого кільця з робочою поверхнею циліндра на величину сили тертя. Оскільки сила тертя ущільнення пропорційна коефіцієнту β , то з його збільшенням вона буде зростати. Знаючи величину коефіцієнта β і розподіл перепадів тиску на окремих елементах тиску, можна визначити діючі на них фактичні питомі навантаження.

З приведених на рис. 6 залежностей можна визначити питоме навантаження, з яким ущільнюючий елемент (поршневе кільце) притискується до робочої поверхні втулки циліндра. Для цього при певному перепаді тиску необхідно провести лінію рівної інтенсивності зношування, паралельну вісі абсцис, до перетину з лінією, яка відноситься до зношування під час динамічного навантаження (рис. 6в). Тиск, який відповідає точці перетину, є дійсним тиском поршневого кільця на стінку циліндра. Знаючи тиск на дзеркало циліндра і перепад тиску на кільце, можна визначити коефіцієнт β як відношення подвійного питомого навантаження на зразки тертя, які працюють в умовах динамічного навантаження, до перепаду тиску на ущільнювальний елемент за однакової інтенсивності зношування.

За допомогою експериментальних даних (рис. 6в) можна визначити фактичне навантаження на поршневе ущільнювальне кільце та розрахувати величину β за [37]. Для поршневих ущільнень із матеріалів АО-1500, графелон-20, Ф4К20, флубон-15/20 знайдено, що коефіцієнт β дорівнює $0,32 \pm 0,03$; $1,45 \pm 0,05$; $1,51 \pm 0,03$; $1,12 \pm 0,02$ відповідно. Як видно з цих даних, для

графітів $\beta < 1$, для полімерних матеріалів $\beta > 1$, тобто полімерні матеріали, краще пристосовуючись до геометрії циліндра, щільніше прилягають до поверхні тертя, що утруднює течію газу по контактних шпарилах поверхні. Заміна в ПТФЕ дисперсного наповнювача – кокса (Ф4К20) на волокнистий (флубон-15/20) приводить до зменшення β (зменшення сили тертя ущільнення). Значний внесок у величину β вносить природа матриці кільця. Так, для матеріалів з вуглецевими волокнами перехід від м'якої матриці (ПТФЕ)–флубон-15/20 до твердої (АПА)–графелон-20 приводить до збільшення β і, відповідно, до зростання сил тертя ущільнення.

Таким чином, різні за природою та формою частинок наповнювачі і матриці чинять вплив на розподіл тиску величин питомих навантажень та сил тертя на ущільнювальні елементи при нестационарному навантаженні.

4. Дослідження шорсткості поверхонь.

Досліджено розподіл висот вершин та кривин поверхонь зразків полімерних матеріалів при сталому і змінному навантаженні в ступені компресора 2РК-1,5/220 БС високого тиску, без мащення циліндра, коли утворення перенесених шарів на поверхні контртіла утруднено (рис. 8).

У ролі матеріалів зразків та ущільнювального кільця використовували композити на основі ароматичного поліаміду фенілон С-2 + 20% графітованого волокна ТГН-2м, ПТФЕ + 20% нафтового коксу, ПТФЕ + 20% карбонізованого волокна УТМ-8.

Мікрогеометрія робочої поверхні зразків і поршневих кілець, навантажених сталим і змінним тиском, у процесі тертя зазнає різних змін (рис. 8). Дослідження розподілу середньої кривини поверхонь у вершинах мікронерівностей та висот вершин показало, що після 200 год. роботи компресора для всіх матеріалів кривини змінюються більшою мірою при змінному тиску, ніж при сталому. При цьому максимальні зміни спостерігаються при змінному тиску для композиту на основі ПТФЕ + 20% коксу, потім для композиту на основі АПА + 20% ТГН-2м і у 5-6 разів менші зміни для композиту ПТФЕ + 20% УТМ-8. При сталому тиску максимальні зміни спостерігаються для композиту на основі АПА + 20% ТГН-2м, потім ПТФЕ + кокс і у 3-8 разів менші для ПТФЕ + 20% УТМ-8. Все це дозволяє передбачити меншу газощільність по робочій поверхні ущільнювальних елементів з матеріалів на основі АПА + 20% ТГН-2м, ПТФЕ + 20% коксу, ніж ПТФЕ + 20% УТМ-8. Разом з тим для всіх елементів і матеріалів характерна закономірність: середні кривини поверхні у вершині мікронерівностей в процесі тертя зменшуються.

Шорсткість поверхні ущільнювальних кілець у процесі роботи компресора зменшується більшою мірою, ніж зразків тертя, навантажених як сталим, так і змінним тиском, що можна пояснити більш повним виведенням продуктів зношування із зони тертя кільця, ніж зразків.

Безрозмірна кривина ущільнювальних кілець і зразків з композиту ПТФЕ + 20% УТМ-8 і АПА + 20% ТГН-2м після 200 год. роботи компресора зменшилася у 1,3-1,5 та 6,5-7,5 рази відповідно композитам.

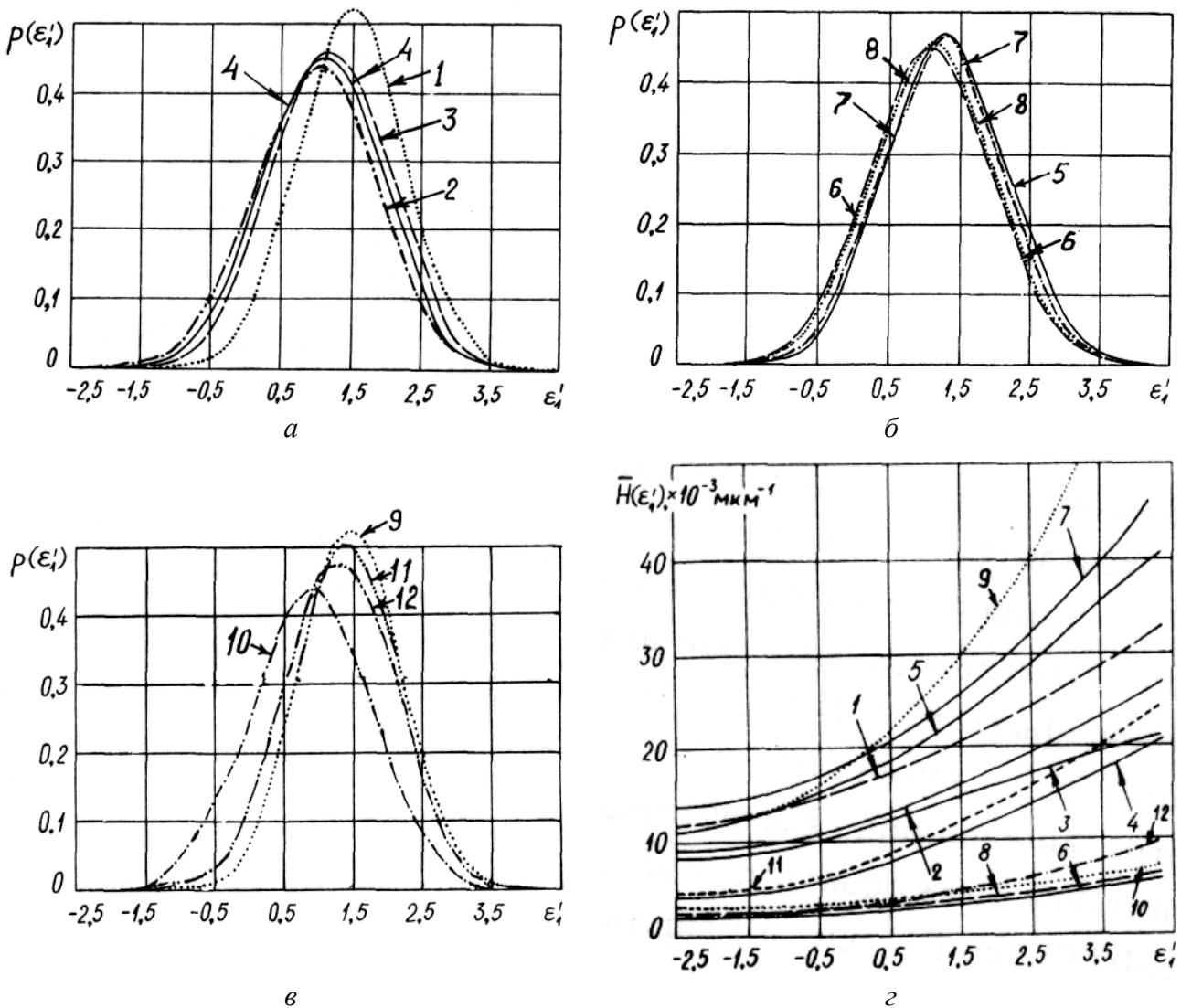


Рис. 8. Щільність ймовірностей висот вершин поверхні (а, б, в) та середня кривина поверхні у вершині мікронерівностей (г) ущільненого кільця, навантаженого змінним тиском (1, 2, 5, 6, 9, 10) та зразка, навантаженого сталим тиском (3, 4, 7, 8, 11, 12) до (1, 3, 5, 7, 9, 11) і після 200 год. тертя (2, 4, 6, 8, 10, 12) в компресорі 2РК-1,5/220 БС по сталі 30Х13, $V = 1,2$ м/с; $T = 338$ К; $P = 2,8$ МПа (кільця); $P = 3$ МПа (зразки) при стисканні вологого повітря; матеріали кільця і зразків: 1-4 – ПТФЕ + 20% УТМ-8; 5-8 – АПА + 20% ТГН-2м; 9-12 – ПТФЕ + 20% коксу.

Гradient поверхні елементів з композиту на основі ПТФЕ + 20% УТМ-8 зменшився у 2,5-4, а АПА + 20% ТГН-2м у 8-8,5 разів.

Таким чином, робоча поверхня ущільнень з композиту ПТФЕ + 20% УТМ-8 внаслідок більшої еластичності полімерної матриці в процесі роботи компресора високого тиску формується з мікронерівностей з малою кривиною, мілким кроком і малим градієнтом поверхні порівняно з вихідною поверхнею.

Тому ущільнення з цього матеріалу спроможні облягати мікронерівності контртіла, забезпечуючи високу газоцильність. Поверхні тертя сталь-карбопластик, отриманого за ХМА-технологією, сильно анізотропні і навіть при тривалому ковзанні не досягається рівновагова шорсткість, що, відповідно, впливає на інтенсивність зношування.

Так, для торцевих ущільнень і опорної вальниці інтенсивність зношування постійно знижується (навіть

після 12960 км (14400 год.) і 25920 км (7200 год.) ковзання відповідно) (рис. 9).

Таким чином, у натурних торцевих ущільненнях рівновагова інтенсивність зношування флубона-20 (і, відповідно, рівновагова шорсткість поверхні полімерного зразка та металевого контртіла) не досягається при довготривалому ковзанні в хімічно-активному середовищі.

Аналогічно, для ущільнювальних кілець, виготовлених з матеріалу флубон-15/20 (на відміну від Ф4К20 і графелон-20), при випробуванні в компресорах без мащення в фізично-активному середовищі теж за 700-40000 год. не досягається рівновагова інтенсивність зношування (і, відповідно, рівновагова шорсткість поверхні полімерного зразка та металевого контртіла) (рис. 10), що підтверджує особливий механізм тертя та зношування матеріалів флубон на основі ПТФЕ і вуглецевих волокон.

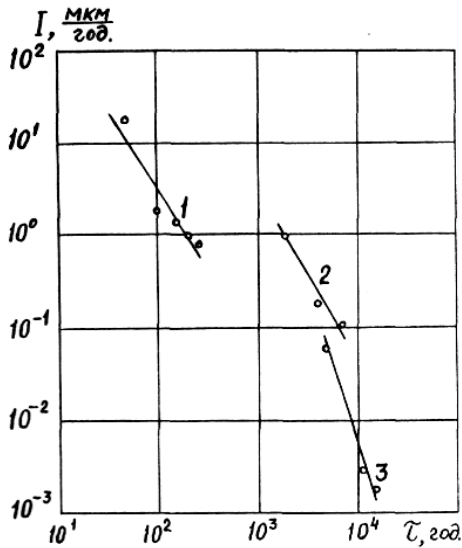


Рис. 9. Залежність швидкості зношування кілець торцевих ущільнень з матеріалу на основі ПТФЕ + 20% ВВ УТМ-8 (1, 3) і ПТФЕ + 15% ВВ УТМ-8 (2) від часу випробувань в торцевому ущільненні ТС-152 (1, 2) та опорній вальниці мішалки апаратів: 1 – стенд (дистильована вода, $P = 3$ МПа; $\bar{V} = 1,1$ м/с; $T = 310 \pm 5$ К; сталь 10X17H13M3T); 2 – шлюзова камера реактора окиснення *n*-кілолу (робоче середовище – вода, розчин і пара оцтової кислоти; *n*-кілол; замикаюча рідина – 40%-вий водний розчин гліцерину; $P = 0,5 - 3,5$ МПа; $\bar{V} = 1,0$ м/с; $T = 333-383$ К; сталь 10X17H13M3T); 3 – кристалізатор УНТ-110 (робоче середовище – суспензія сирого диметилтерефталату в метанолі; замикаюча рідина – 40%-вий водний розчин гліцерину; $P = 0,5$ МПа; $\bar{V} = 0,25$ м/с; $T = 313-373$ К; сталь 12X18H10T).

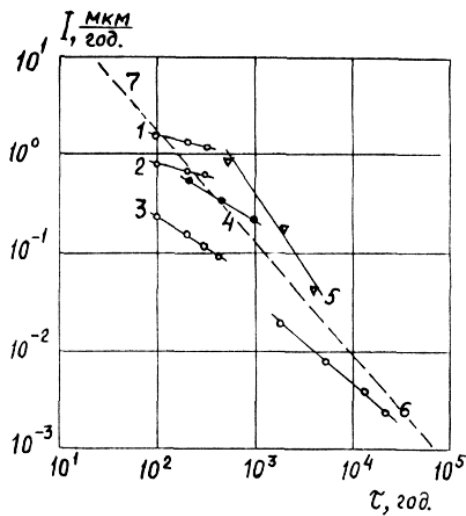


Рис. 10. Залежність швидкості зношування ущільнювальних кілець карбопластиків Ф4К20 (1), графелон-20 (2), флубон-15/20 (3-6) від часу випробувань в компресорах без мащення: 1-3 – 2РК-1,5/220 БС (вологе повітря; $P_H = 22$ МПа); 4 – 3С2СГП-6/30 (сухий гелій, $P_H = 1,6$ МПа); 5 – ТГ3S_p-100/150 (вологий вуглекислий газ; $P_H = 8$ МПа); 6 – 4М40 – 680 22-320 (азотноводнева суміш; $P_H = 9$ МПа); 7 – узагальнена крива.

Висновки

Провідна роль у явищах впливу сталих та динамічних навантажень на процеси зношування, тертя та зміну розподілу висот вершин та середньої кривини у вершинах мікронерівностей поверхонь термотривких полімерів, наповнених сферичними та волокнистими дисперсними матеріалами, під час випробувань у компресорах без мащення високого тиску належить: геометричній формі наповнювача полімерних композитів, природі газового середовища, тиску газу та температурі поверхні спряжених пар тертя.

- [1] Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис. Моделі нанометричної та мікрометричної шорсткості поверхні твердих тіл (Огляд) // *Фізика і хімія твердого тіла*, **11** (2), сс. 423-446 (2010).
- [2] Г.О. Сіренко, М.Ф. Семенюк, Л.М. Солтис. Щільність ймовірностей розподілу висот шорстких поверхонь твердих тіл, змодельованих випадковим полем // *Фізика і хімія твердого тіла*, **11** (3), сс. 768-779 (2010).
- [3] Г.О. Сіренко, М.Ф. Семенюк, Л.М. Солтис. Розподіл кривин у вершинах мікро- та нанонерівностей шорстких поверхонь твердих тіл, змодельованих випадковим полем // *Фізика і хімія твердого тіла*, **11** (4), сс. 914-927 (2010).
- [4] Г.О. Сіренко. Створення антифрикційних матеріалів на основі порошоків термотривких полімерів та вуглецевих волокон: Дис. ... докт. техн. наук: спец. 05.16.06 – порошкова металургія та композиційні матеріали, Хмельницький технологічний ін-т. – Ін-т проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАНУ; Київ, 537 с. (1997): іл., табл. – Бібліогр.: с. 432-451 (275 назв).

Сіренко Г.О. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри неорганічної та фізичної хімії;
Свідерський В.П. – кандидат технічних наук, доцент кафедри зносостійкості та надійності машин;
Солтис Л.М. – провідний інженер кафедри неорганічної та фізичної хімії;
Новіков І.І. – доктор технічних наук, консультант ЗАТ «Барренс»;
Захаренко В.П. – доктор технічних наук, технічний директор ЗАТ «Барренс».

- [5] Л.М. Солтис, Г.О. Сіренко. Трибоповерхневі властивості карбопластика під час тертя та зношування по шорсткій ізотропній металевій поверхні без мащення та в середовищі дистильованої води // *Фізика і хімія твердого тіла*, **12** (2), сс. 508-516 (2011).
- [6] Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис. Трибоповерхневі властивості карбопластика під час тертя по шорсткій ізотропній металевій поверхні в дистильованій воді // *Вісник Прикарп. нац. ун-ту ім. В. Стефаника. Сер. Хімія*, (VIII), сс. 99-101 (2009).
- [7] Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис. Трибоповерхневі властивості карбопластика під час тертя по шорсткій ізотропній поверхні сталі 45 без мащення // *Вісник Прикарп. нац. ун-ту ім. В. Стефаника. Сер. Хімія*, (VII), сс. 104-106 (2009).
- [8] Г.А. Сиренко, В.П. Свидерский, И.И. Новиков, В.П. Захаренко, И.И. Ищенко. Влияние динамических нагрузок на изнашивание полимеров, наполненных дисперсными и волокнистыми материалами // *Трение и износ*, **7** (1), сс. 136-147 (1986).
- [9] Х.Б. Кордонский, Г.М. Харач, В.П. Артамовский, Е.Ф. Непомнящий. *Вероятностный анализ процессов изнашивания*. Наука, Москва. 54 с. (1968).
- [10] В.А. Коротков, Л.Н. Обищенко, Б.М. Гантимиров. *О влиянии нестационарных режимов трения на износ наполненных фторопластов*. – В кн.: Новые износостойкие полимерные материалы фрикционного и антифрикционного назначения и их применение в промышленности. ЛДНТП, Ленинград. Сс. 26-28 (1980).
- [11] В.И. Колесников, Г.И. Рассохин, А.И. Тетерин. Многофакторное исследование процесса изнашивания полимеров в теплонагруженном состоянии // *Механика полимеров*, (1), сс. 67-72 (1978).
- [12] Ф. Хирано. Некоторые проблемы трения поверхностей при возвратно-поступательном движении // *Фудзикоши Чихо*, **30** (1), сс. 1-10 (1974).
- [13] О.М. Бялік, В.С. Черненко, В.М. Писаренко, Ю.Н. Москаленко. *Металознавство*. ІВЦ «Видавництво «Політехніка», Київ. 384 с. (2002).
- [14] *Конструкционные материалы и изделия на основе углерода* / Составители: М.А. Авдеенко, В.Д. Белогорский, Г.Н. Багров и др. Металлургия, Москва. 64 с. (1970).
- [15] *Конструкционные материалы на основе углерода*. Сб. трудов. Вип. XIII. Металлургия, Москва. 160 с. (1978).
- [16] *Конструкционные углеродистые материалы в цветной металлургии*: Каталог-справочник / Под ред. В.П. Соседова, Г.А. Соккера / Состав. М.А. Авдеенко, Г.Н. Багров, В.С. Дергунова и др. Цветметинформация, Москва (1970).
- [17] *Справочник по пластичным массам* / Под ред. М.И. Гарбара, М.С. Акутина, Н.М. Егорова. Химия, Москва. Т.1, 463 с. (1967).
- [18] *Энциклопедия полимеров* / Под ред. В.А. Кабанова, М.С. Акутина, Н.Ф. Бекеева. Сов. энциклопед., Москва. Т.3, 1152 стб. (1977).
- [19] М.Ю. Канцельсон, Г.А. Балаев. *Полимерные материалы*. Химия, Ленинград. 317 с. (1982).
- [20] Полимерная композиция: А.с. 558518, МКИ С08L77/06/ Г.А. Сиренко, В.Д. Герасимов, И.И. Новиков, В.П. Свидерский, Н.Д. Журавлёв, Л.Б. Соколов, В.Г. Морозов, Н.М. Черненко, В.П. Захаренко, А.Т. Каверов, Г.Н. Багров. – №2037112. – Заявл. 17.06.74. – Зареестр. в Госреестре изобр. 21.01.77.
- [21] Антифрикционная самосмазывающаяся композиция "Графелон – 4ДПТ": А.с. 526252, МКИ С08L77/00; С08D5/16/ Г.А.Сиренко, И.И. Новиков, В.Д. Герасимов, В.П. Свидерский, Н.Д. Журавлёв, Д.С. Фондаминский. – №2106074. – Заявл. 18.02.75. – Зареестр. в Госреестре изобр. 28.04.76.
- [22] Антифрикционная композиция графелон – 47: А.с. 1322664, МКИ С08L77/10/ Г.А. Сиренко, Г.М. Сорокин, В.Ф. Вельбой, С.Н. Тараненко, С.С. Кононюк. – №3972560. – Заявл. 25.10.85. – Зареестр. в Госреестре изобр. 8.03.87. – Бюл. №25.
- [23] Антифрикционная композиция: А.с. 1400040, МКИ С08J5/16; С08L77/08/ Г.А. Сиренко, Г.М. Сорокин, С.Н. Тараненко. – №4050632. – Заявл. 7.04.86. – Зареестр. в Госреестре изобр. 1.02.88. – Бюл. №20.
- [24] Антифрикционная композиция: А.с. 223896, МКИ С08L77/10/ Г.А. Сиренко, Г.М. Сорокин, О.М. Хрящевская. – №3106311. – Заявл. 27.01.84. – Зареестр. в Госреестре изобр. 1.08.85.
- [25] Антифрикционная самосмазывающийся материал: А.с. 110292, МКИ С08J5/16; С08L27/18/ Г.А. Сиренко. – №2211791. – Заявл. 18.11.76. – Зареестр. в Госреестре изобр. 3.11.77.
- [26] Антифрикционная композиция: А.с. 1078907, МКИ С08L27/18; С 08J5/16/ Г.А. Сиренко, С.А. Назаров, В.Ф. Денисенков, В.П. Захаренко, И.И. Новиков, А.Ф. Будник. – №3494190. – Заявл. 25.06.82. – Зареестр. в Госреестре 8.11.83. – Оpubл. 1984. – Бюл. №9.
- [27] Композиция уплотнительного материала: А.с. 1239134, МКИ С08J5/16; С08J5/06/; Г.А. Сиренко, Б.О. Таланкин, В.П. Свидерский, А.Ф. Будник. – №3571088. – Заявл. 30.03.83. – Оpubл. 23.06.86. – Бюл. №23. – С. 78.
- [28] Антифрикционная композиция флубон – 15: А.с. 1244933, МКИ С08J5/16; С08L27/18/ Г.А. Сиренко, Н.И. Кретов, В.П. Свидерський, Б.О. Таланкин, С.С. Кононюк. – №3697338. – Заявл. 30.11.83. – Зареестр. в Госреестре изобр. 15.03.86. – Бюл. №26.
- [29] Композиция для получения антифрикционного материала флубон – ДМ: А.с. 181484, МКИ F16C33/12/ Г.А.Сиренко, И.И. Новиков, В.П. Захаренко, В.Г. Морозов, А.К. Пугачев, С.А. Назаров. – №3014392. – Заявл. 20.03.81. – Зареестр. в Госреестре изобр. 2.12.82.
- [30] Антифрикционная композиция флубон – ПУ: А.с. 194601, МКИ F16C33/12/ Г.А. Сиренко, В.Г. Морозов, А.Ф. Будник, С.А. Назаров, В.Ф. Денисенков. – №3047698. – Заявл. 2.08.82. – Зареестр. в Госреестре изобр. 1.11.83.
- [31] Антифрикционная композиция флубон – М: А.с. 1165048, МКИ С08L27/18; С08K3/04/ Г.А. Сиренко, В.П. Свидерський, И.И. Новиков, В.П. Захаренко. – №3655636. – Заявл. 24.10.83. – Зареестр. в Госреестре изобр. 1.03.85. – Оpubл. 1985. – Бюл. №24.

- [32] Антифрикционный материал: А.с. 1635523, МКИ С08J5/16; С08L27/18/ Г.А. Сиренко, А.Ф. Будник, Г.М. Сорокин, Л.М. Кириченко, В.И. Яшук. - №4607772. - Заявл. 26.09.88. - Зареестр. в Госреестре изобр. 15.11.90.
- [33] Композиция уплотнительного материала: А. с. 1584365, МКИ С08L77/10/ Г.А. Сиренко, А.Ф. Будник, В.П. Сви́дерський, С.Н. Тараненко. - №4612073. - Заявл. 28.11.88. - Зареестр. в Госреестре изобр. 8.04.90. - Опубл. 1990. - Бюл. №29.
- [34] Способ получения антифрикционной композиции "флубон": А.с. 1736171, МКИ С08J5/16; С08L27/18/ Г.А. Сиренко, А.Ф. Будник. - №4741996. - Заявл. 03.10.89. - Зареестр. в Госреестре изобр. 22.01.92.
- [35] Способ «бусико» изготовления антифрикционного материала: А.с. 1723084, МКИ С08J5/16; С08L27/18/ А.Ф. Будник, Г.А.Сиренко, С.И. Колесников. - №4779289. - Заявл. 9.01.90. - Опубл. 30.03.92. - Бюл. №12. - С. 123.
- [36] Способ химического меднения углеродных материалов: А.с. 1604862, МКИ С23С18/38; С23С18/54/ В.И. Кириченко, Г.А. Сиренко, Л.М. Кириченко. - №4465219. - Заявл. 16.05.88. - Опубл. 7.11.90. - Бюл. №41. - С. 132.
- [37] И.И. Новиков, В.П. Захаренко, Б.С. Ландо. *Бессмазочные поршневые уплотнения в компрессорах*. Машиностроение, Ленинград. 238 с. (1981).
- [38] В.П. Сви́дерський. Исследование работоспособности поршневых уплотнений из новых смазосмазывающихся материалов. Дис. ... канд. техн. наук. ЛенНИИхиммаш, Ленинград. 226 с. (1981).
- [39] Ю.А. Видякин, Е.Б. Доброклонский, Т.Ф. Кондратьева. *Оппозитные компрессоры*. Машиностроение, Ленинград. 432 с. (1979).
- [40] *Таблицы планов эксперимента для факторных полиномиальных моделей* (справочное издание) / В.З. Бродский, Л.И. Бродский, Т.И. Голиков и др. Металлургия, Москва. 752 с. (1982).
- [41] А.А. Спиридонов, Н.Г. Васильев. Планирование эксперимента. Издание Урал. политехн. ин-та, Свердловск. 150 с. (1975).
- [42] Г.А. Сиренко, В.П. Сви́дерський, В.Д. Герасимов, В.З. Никонов. *Антифрикционные термостойкие полимеры*. Техніка, Киев. 240 с. (1978).
- [43] Г.А. Сиренко. *Антифрикционные карбопластики*. Техніка, Киев. 195 с. (1985).

Н.О. Sirenko¹, V.P. Svidersky², L.M. Soltys¹, I.I. Novikov³, V.P. Zakharenko³

Influence of Constant and Dynamic Loads on the Processes of Wear, Friction and Change of Roughness Surfaces of Polymer Composites

¹Vasyl Stefanyk¹ Precarpathian National University,
57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76025, Ukraine
Tel. (0342) 77.64.15; (096) 813.93.53, e-mail: sirenkog@rambler.ru

²Khmelnytsky National University,
11, Instytutaska Str., Khmelnytsky, 29016, Ukraine

³Scientific and Research and Design Institute of Chemical Machine Building,
9, Nevsky Str.; JSC "Barrens", Saint Petersburg, Russian Federation

It has been shown and analyzed the phenomenon influence of constant and dynamic loads on the processes of wear, friction and change allocation of heights of peaks and average curvature in the peaks of microirregularities surfaces of thermo-lasting polymers, filled with spherical and fibrous dispersed materials, during tests in the compressors without lubrication of high pressure. Leading role in these phenomena there are: geometric form filler of polymer composites, the nature of the gas medium, the pressure of gas and temperature of surface of conjugated pairs of friction.

Key words: polymer, coke, carbon fiber, composite, samples of friction, sealing rings, piston, cylinder, roughness, moments of spectral density.