

В. А. Авроров, д-р техн. наук, проф.,

В. В. Ловцева, аспирант,

М. А. Польшяева, аспирант.

Пензенский государственный технологический университет, Россия

Тел./Факс. (8 841 2)49-56-99; E-mail v_avrorov@bk.ru

О МЕТОДИКЕ ВЫБОРА АНТИФРИКЦИОННЫХ ОБРАБОТОК КОНТАКТИРУЮЩИХ ПАР В УЗЛАХ СУХОГО ТРЕНИЯ

В статье приведены результаты экспериментальных исследований по выбору оптимального сочетания антифрикционных обработок контактирующих пар в узлах сухого трения технологического оборудования пищевых производств.

Ключевые слова: антифрикционные обработки, экспресс-испытания, момент силы трения.

V. A. Avrorov, V. V. Lovzeva, M. A. Poldjaeva

METHOD OF THE CHOICE OF THE ANTIFRICTION PROCESSING CONTACT PAIR IN MECHANISM OF THE DRY FRICTION

In the article consider results experimental research of the choice optimal combination antifriction processing of contact pair in mechanism of dry friction of technological equipment of food production

Key words: *antifriction processing, express test, torque force of friction.*

1. Введение

Для исследования износостойкости контактирующих пар в узлах сухого трения используются лабораторные установки различной степени сложности и эффективности. Однако, как правило, испытания материалов на таких установках занимают длительное время. Кроме того, большинство установок предназначено для фиксирования линейных параметров износа, что требует для достоверной оценки характера и величины износа использования образцов достаточно больших размеров.

Как отмечается в [1,2,3], динамика процесса трения и износа деталей машин неразрывно связана со свойствами материалов пары трения и зависит от скоростного, нагрузочного и температурного режимов на фрикционном контакте пары.

Основная задача, возникающая при разработке методики исследований узлов трения машин, состоит не только в получении оценки с высокой доверительной вероятностью, но и что не менее важно, в интенсификации процесса испытаний, т.е. в сокращении его длительности и объема.

Интенсификации процесса в узле трения можно добиться созданием постоянных условий по нагрузке при существенном увеличении скорости относительного перемещения контактирующих элементов.

Целью исследований являлся выбор оптимального сочетания антифрикционных обработок элементов контактирующих пар в узлах трения технологического оборудования пищевых производств с помощью созданной лабораторной экспресс-установки, позволяющей существенно сократить время испытаний.

Задачи исследования заключались:

- в выборе варианта исполнения узла трения для экспериментальных исследований;
- в оценке влияния отклонений формы несущей поверхности на момент силы трения контактирующего с ней подвижного элемента;

- в установлении параметров износа подвижного элемента в условиях сухого трения;
- в оценке влияния вида антифрикционной обработки элементов контактирующей пары; и выборе их оптимального сочетания по критериям минимального момента силы трения и величины износа подвижного элемента.

2. Основное содержание и результаты работы

Предмет исследования – кольцо-скоба с различными видами обработок и покрытий контактирующих поверхностей. На рис. 1 приведен общий вид одного из вариантов пары «кольцо-скоба».



Рис. 1. Общий вид пары «кольцо-скоба» для исследований момента силы трения и износа скобы (вариант А)

Внутренняя поверхность кольца (вариант А) разработки ВНИИЛТЕКмаш (г. Москва) представляет собой часть однополостного гиперboloида вращения, который относится к линейчатым фигурам, образуемым при вращении прямой наклонной линии, смещенной от оси вращения на определенную величину. Прямая линия является образующей, а направляющей служит окружность. Кривая, образованная вращением множества точек образующей и соединяющая верхнюю и нижнюю направляющие окружности представляет собой гиперболу (рис. 2а).

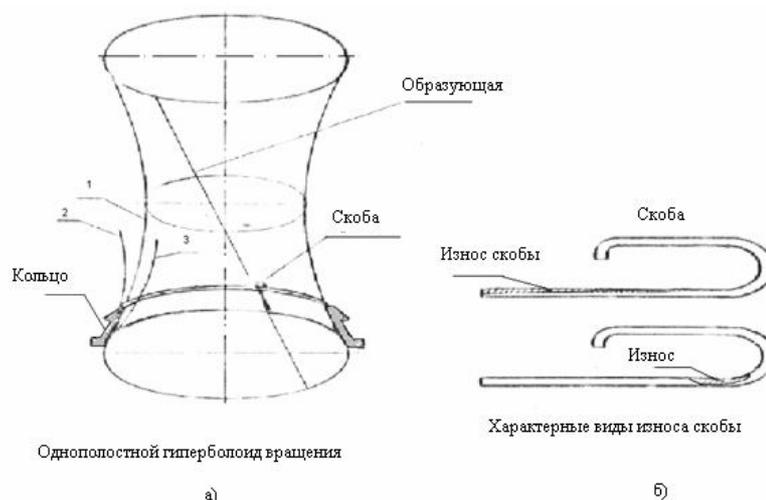


Рис.2. Схема образования внутренней гиперболической контактирующей поверхности кольца:

1,2,3 – положения скобы на кольце, обуславливающие места ее износа

При совпадении теоретического профиля кольца с положением ножки скобы в пространстве, занимаемой ею под действием приложенных к ней сил, износ при условии, что точность обработки контактирующей поверхности кольца обеспечена, будет распределяться по длине вращающейся ножки относительно равномерно, благодаря чему обеспечивается требуемая долговечность трущейся пары. В противном случае износ будет локализован в одном месте (рис.2б).

Второй вариант (рис.3) представляет собой конструкцию по своему профилю аналогичную конфигурации прядильного кольца, применяемого на кольцевых хлопкопрядильных машинах в текстильной промышленности. Скоба, надеваемая на фланец кольца, имеет овальную форму.

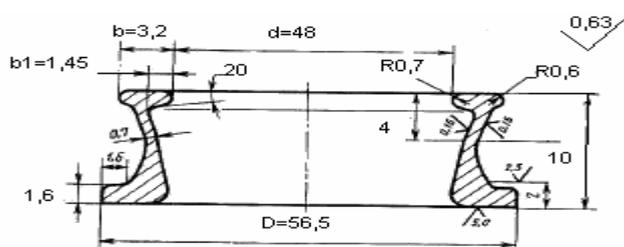


Рис. 3 Кольцо с т-образным фланцем (вариант Б)

Экспресс-установка для исследования момента силы трения. Определение параметров контактирующих пар, работающих в реальных условиях, занимает длительное время. Поэтому сокращение времени наблюдений и получение при этом достоверных результатов имеет большое практическое значение. Особенно это важно, когда речь идет о проведении сравнительных лабораторных исследований по выбору оптимального сочетания антифрикционных покрытий или обработок трущихся пар. Для измерения момента силы трения вращающегося элемента пары и определения величины его износа разработана конструкция компактной экспресс – установки (рис.4).

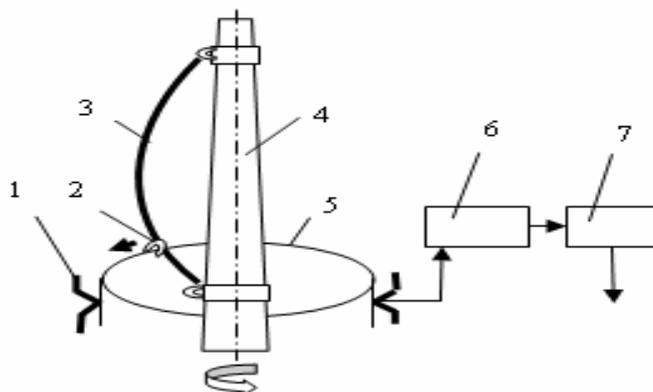


Рис.4. Схема экспресс – установки для измерения момента силы трения на деталях вращения

1 – пластинчатая пружина с тензодатчиком, 2– деталь – скоба, 3– нить, 4 – шпindelь, 5 – деталь – кольцо, 6 –тензоусилитель, 7 – самопишущее устройство или ПК

Установка содержит вертикально установленный в подшипниках быстро вращающийся шпиндель 4, вокруг которого концентрично на трех упругих пластинчатых пружинах 1 устанавливается испытываемая деталь в виде кольца 5 с фланцем, служащим опорной поверхностью для вращения второй детали, выполненной в виде скобы 2. На шпинделе прикрепляются два хомута с закрепленной гибкой прочной нитью 3, заправленной под скобу и служащей для передачи ей вращения от шпинделя. Возникающий при вращении момент силы трения в зоне фактического касания скобы и кольца воздействует на тензодатчик одной из плоских пружин. Сигнал с тензодатчика передается на усилитель сигнала 6 и самописцем 7 записывается на ленте или выводится на монитор ПК. Тарировка устройства проводится с помощью груза, воздействующего на тензобалочку, перед каждым циклом измерения.

Привод установки осуществляется от электродвигателя через ременную передачу. Частота вращения шпинделя может быть установлена с помощью сменных шкивов в пределах 9-15 тыс. мин⁻¹.

Оценка отклонений от правильности формы рабочей поверхности опорных колец трущейся пары. Отклонения от правильности формы рабочей поверхности кольца, такие как нецилиндричность, некруглость и овальность, могут оказать негативное влияние на величину момента силы трения и износ вращающегося на нем элемента [4].

Для оценки влияния отклонений на инструментальном микроскопе определялись размеры внутреннего диаметра рабочей поверхности колец с построением профилограмм.

Для измерения отклонений были отобраны два варианта обработки:

- I вариант – ручное полирование рабочей поверхности с помощью притира;
- II вариант – гидрополирование рабочей поверхности.

Для колец I варианта характерна большая по величине некруглость (рис.5а), чем для колец II варианта, которые имеют отклонения в основном в виде небольшой овальности (рис.5б). Это можно объяснить различием в технологии доводки рабочей поверхности колец после чистового точения. В первом варианте ручной прижим притира с полирующим составом осуществляется оператором, что в большей степени искажает форму профиля по сравнению с гидрополированием, осуществляемым в жидкой среде со свободным абразивом.

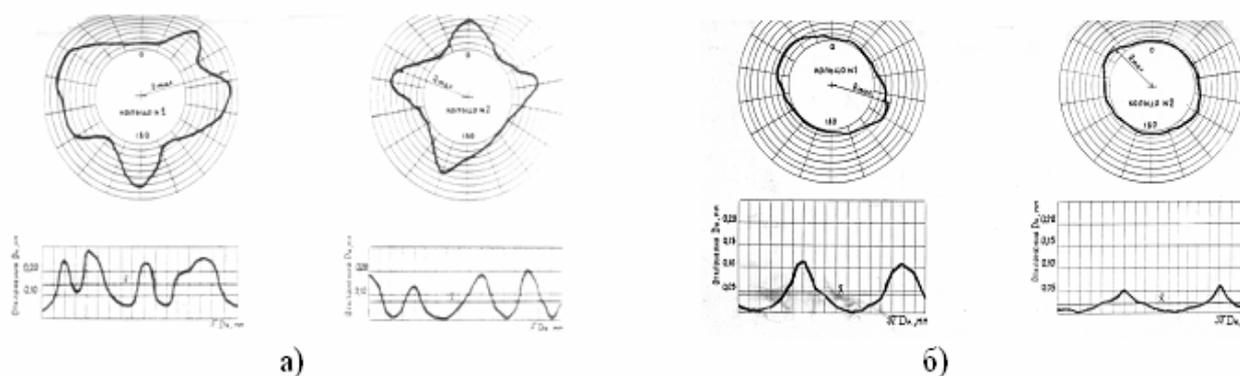


Рис. 5. Профилограммы внутренней поверхности колец (вариант I) – некруглость (а), (вариант II) – овальность (б)

Статистические оценки отклонений внутреннего диаметра приведены в табл. 1
Таблица 1 – Отклонения диаметра колец и их статистические оценки

| Оценка | Величина отклонений, мм | | | |
|--|-------------------------|--------|------------|--------|
| | Вариант I | | Вариант II | |
| | 1 | 2 | 1 | 2 |
| \bar{x} Среднее арифметическое значение | 0,14 | 0,07 | 0,04 | 0,02 |
| S^2 Дисперсия | 0,0096 | 0,0049 | 0,0014 | 0,0003 |
| $CV, \%$ Коэффициент вариации | 7,084 | 10,16 | 10,05 | 8,56 |

Оценка характера и вида износа подвижного элемента контактирующей пары. Для получения достоверной оценки были учтены следующие факторы:

- факторы, характеризующие физико-механические свойства материалов и геометрию контактирующих поверхностей.

Для обеспечения одинаковости условий были приняты:

- Материал опорной поверхности колец – сталь 45, твердость HRC_Э 56-62, шероховатость рабочей поверхности R_a 0,8.

- Материал подвижного элемента (скобы) – сталь У8А, твердость HRC_Э 52-54, шероховатость рабочей поверхности R_a 0,8.

- эксплуатационные факторы (режим работы и окружающая среда).

В качестве эксплуатационных факторов приняты:

- Частота вращения подвижного элемента скобы 10000 об/мин.

- Нормальные температурно-влажностные условия.

- факторы, отражающие особенности узла трения:

- Постоянный контакт подвижного элемента с рабочей поверхностью опорного кольца, обеспечиваемый постоянной длиной вращающейся нити, приводит к постоянным температурам зоны контакта, опорному давлению подвижного элемента и неизменным условиям теплоотвода.

Для определения характера и величины износа подвижного элемента использовались следующие методы:

- *метод визуальной оценки линейного износа скоб.* Приведенная на рис. 6 иллюстрация характера износа получена с помощью сканирующего микроскопа с 50-кратным увеличением зоны контакта пары трения.

- *весовой метод* заключался в определении массы подвижного элемента до и после испытания.

Предварительные исследования изменения момента силы трения в зависимости от вида отклонений правильности формы колец. Предварительный эксперимент по исследованию момента силы трения проводился на экспресс-установке на вариантах I и II. Для этого поочередно устанавливали кольца на упругих балочках установки, проводили тарировку с помощью грузика и затем в течение одной минуты вели запись изменения момента силы трения, возникающего при вращении скобы по кольцу.

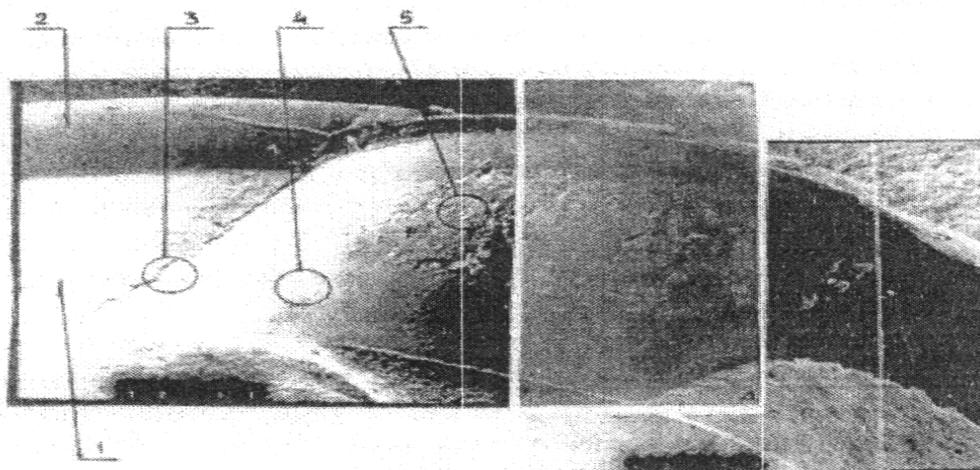
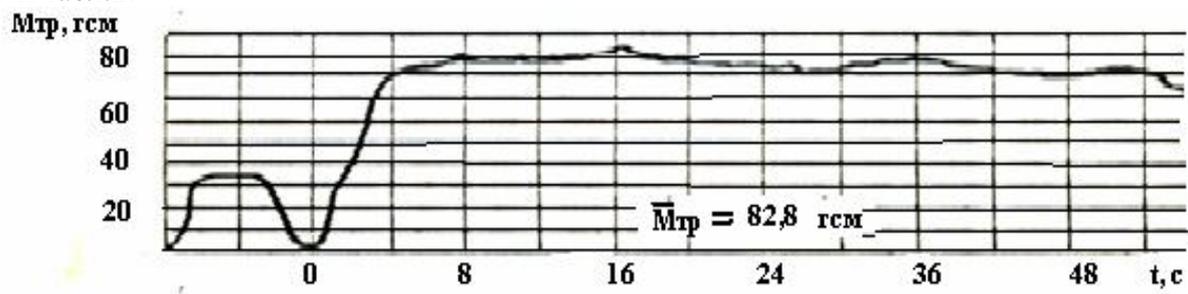


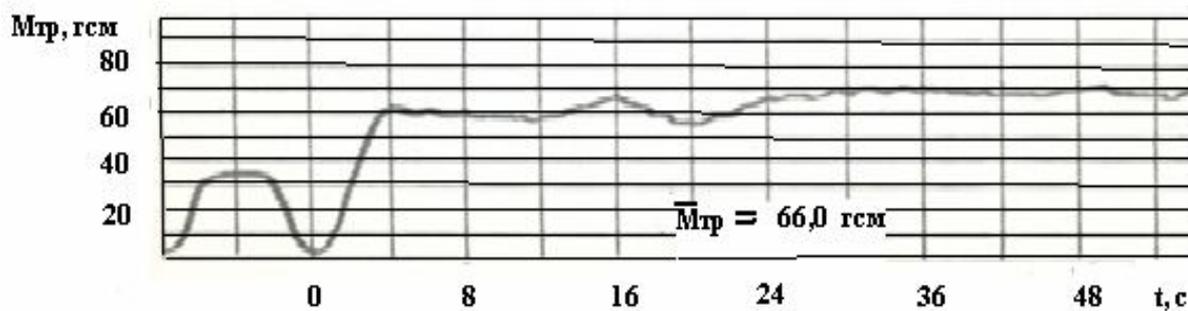
Рис. 6. Характер износа подвижного элемента контактирующей пары «кольцо-скоба» в условиях сухого трения

1 – внутренняя исходная поверхность скобы, 2 - грань скобы, 3 – граница износа, 4 – зона абразивного износа, 5 – следы схватывания металла пары

Пример изменения момента трения в зависимости от варианта приведен на рис. 7 и табл.2.



а)



б)

Рис. 9. Изменение момента силы трения по вариантам обработки контактирующих пар

а) - вариант обработки I, б) – вариант обработки II

Таблица 2 – Статистическая оценка момента силы трения в зависимости от точности обработки колец

| Оценка | Значения величины момента силы трения, гсм | | | |
|--|--|-------|-------------------------|-------|
| | Вариант II (овальность) | | Вариант I (некруглость) | |
| | 1 (а) | 2 (б) | 1 (в) | 2 (г) |
| Средняя величина момента силы трения \bar{M}_{TP} | 66,5 | 74,6 | 82,78 | 66,01 |
| Дисперсия S^2 | 15,25 | 11,06 | 27,61 | 21,45 |
| Коэффициент вариации CV, % | 5,86 | 4,45 | 6,34 | 7,01 |

Можно видеть, что точность обработки зон фактического касания колец оказывает существенное влияние на характер изменения и величину момента сил трения скоб. На кольцах (вариант I) с большей некруглостью рабочей поверхности кольца отмечена большая величина момента силы трения по сравнению с вариантом II.

По результатам испытаний сделан вывод, что для данных типоразмеров контактирующей пары в диапазоне частот вращения шпинделя 10 - 15 тыс. об./мин (линейная скорость скобы 35 м/с) величина некруглости опорной поверхности кольца должна быть не более 0,07...0,08 мм.

Экспериментальные исследования по выбору оптимального сочетания антифрикционных покрытий и обработок трущихся кинематических пар.

Основным свойством антифрикционной пары трения является обеспечение положительного градиента механических свойств по глубине в сочетании с упругим деформированием при минимальной работе объемного деформирования

Достижение положительного градиента при невозможности применения жидких или пластичных смазок обеспечивается выбором оптимального сочетания вида антифрикционных материалов или обработок контактирующих элементов узла трения. Обеспечение положительного градиента при пусковых режимах и перегрузке может быть достигнуто применением твердых смазок, таких как MoS_2 или $MoS_2 + PbS$ или использованием мягких металлов, пластмассовых композиций и пр. [5,6].

Во многих видах оборудования пищевых производств встречаются узлы, работающие в условиях сухого трения при скоростях скольжения до 20...35 м/с. В процессе работы эти узлы подвергаются интенсивному абразивному и тепловому износу.

Для экспериментальной проверки были отобраны следующие виды антифрикционных, химико-термических и гальванических обработок: *сульфидирование, борирование, фосфатирование, меднооловянистое гальваническое покрытие, специальные объемные физико-химические обработки поверхности трения (ОФХО)*, обеспечивающие матовую поверхность опорной детали. Виды обработок вращающегося элемента – *молибденирование, никелирование, комплексная обработка (молибденирование и свинцевание)*. Контрольный вариант – элементы без дополнительной антифрикционной обработки.

Всего было выбрано 10 вариантов антифрикционных обработок колец и 4 варианта обработок скоб. Отбор оптимального сочетания обработок осуществлялся в соответствии с двухфакторным планом 4x10 (табл.3). Для оценки использовался дисперси-

онный анализ. За параметр оптимизации принимали износ партии скоб (6 шт.) в граммах.

Таблица 3 – Двухфакторный план 4x10 и результаты эксперимента по износу в зависимости от вида антифрикционной обработки элементов пары трения

| Вид обработки колец | Вид обработки скоб | | | |
|---|------------------------------------|--|----------------------|----------------------------------|
| | B ₁ MoS ₂ | B ₂ MoS ₂ +60%PbS | B ₃ Ni | B ₄ Контр. вариант |
| A ₁ Сульфидирование | 39 47 42 41 47 40 | 21 22 22 17 16 21 | 14 9 11 18 18 22 | 14 19 16 20 24 17 |
| A ₂ Борирование | 44 41 59 41 51 39 | 36 36 18 16 36 19 | 11 18 10 17 17 14 | 27 18 22 17 29 23 |
| A ₃ ОФХО ₁ | 52 35 34 35 50 47 | 16 20 14 17 8 19 | 19 14 17 18 18 13 | 15 14 16 23 13 13 |
| A ₄ ОФХО ₂ | 63 83 76 63 67 65 | 45 43 50 55 42 42 | 18 24 22 24 17 22 | 38 35 42 37 36 25 |
| A ₅ ОФХО ₃ | 32 39 31 21 41 23 | 12 12 17 11 14 13 | 16 24 12 18 16 11 | 12 10 16 8 13 7 |
| A ₆ ОФХО ₄ | 46 43 38 31 39 21 | 19 21 16 20 18 13 | 12 15 13 20 16 19 | 14 17 20 10 16 24 |
| A ₇ Меднооловянистое гальванопокрытие | 26 45 41 45 30 51 | 14 15 19 17 23 15 | 12 13 7 10 12 17 | 9 22 6 14 19 14 |
| A ₈ Фосфатирование | 36 53 45 55 37 33 | 8 17 29 23 26 16 | 3 4 20 7 12 19 | 5 13 20 13 17 14 |
| A ₃ ОФХО ₅ | 50 35 44 41 69 46 | 35 34 28 35 25 35 | 18 20 24 29 17 24 | 29 27 19 18 19 33 |
| A ₁₀ Контрольный вариант | 25 63 34 55 69 54 | 31 17 24 26 18 23 | 17 14 15 15 17 19 | 21 22 26 15 15 22 |

[Размерность чисел в ячейках 0,00 . . . г].

Результаты дисперсионного анализа приведены в табл.4.

Таблица 4 – Результаты дисперсионного анализа плана эксперимента 4x10

| Источник изменчивости | Число степеней свободы | Сумма квадратов | Средний квадрат | Критерий Фишера | |
|-------------------------------|------------------------|-----------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| | | | | Расчетное значение | Табличное значение |
| Вид обработки скоб - B | 3 | 32317,48 | 10772,49 | 238,0 | 2,65 |
| Вид обработки колец - A | 9 | 11795,37 | 1310,59 | 29,0 | 1,93 |
| AxB взаимодействие | 27 | 2746,95 | 101,73 | 2,25 | 1,52 |
| Ошибка (Остаточная дисперсия) | 200 | 9027,7 | 45,13 | | |

Можно заключить, что на величину износа скоб существенное влияние оказывает как вид обработки скоб, так и вид обработки колец (доверительная вероятность 0,95). Имеет место взаимодействие между видами обработок узла.

Использование критерия Дункана для дальнейшего сравнения видов антифрикционных обработок показывает:

- расположение вариантов обработок скоб в порядке убывания величины износа следующее $B_3 < B_4 < B_2 < B_1$, т.е. наименьший износ обеспечивает никелирование скоб,

- из обработок колец наименьший износ обеспечивают обработки A_5, A_7, A_8, A_6 . Распределение средних по критерию Дункана:

$$A_5 = A_7 = A_8 = A_6 < A_{10} = A_2 < A_9 < A_4.$$

$$A_5 = A_3; \quad A_7 = A_8 = A_6 = A_3 = A_1; \quad A_1 = A_{10} = A_2$$

Учитывая взаимодействия между видами обработок, для использования в узлах трения могут быть рекомендованы следующие сочетания (табл. 5).

Таблица 5 – Антифрикционные обработки, обеспечивающие наибольшую работоспособность узла сухого трения

| Виды обработок колец | Виды обработок скоб |
|--|--|
| Фосфатирование | Никелирование |
| Меднооловянистое гальванопокрытие | Никелирование |
| Объемная физико-механическая обработка ОФХО ₃ | Дисульфид молибдена 60% сульфида свинца |
| Без покрытия | Никелирование |
| Меднооловянистое гальванопокрытие | Дисульфид молибдена 60% сульфида свинца |

Сочетание обработок «Меднооловянистое гальванопокрытие - Никелирование» наиболее эффективно в период приработки и при работе трущейся пары в диапазоне скоростей 11...13 тыс. об/мин, при дальнейшем увеличении скоростного режима происходит очевидно стирание мягкого покрытия колец и в контакт вступают основные слои металла.

Незначительно уступает данной паре (на 5-10%) сочетание «Объемная физико-механическая обработка ОФХО₃ - Дисульфид молибдена с добавлением 60% сульфида свинца», но с ростом скоростей вращения свыше 13 тыс. об/мин данное сочетание обработок имеет преимущества по износостойкости. Это можно объяснить тем, что твердая смазка, которой является $MoS_2 + 60\%PbS$, легко проникает в поры, созданные объемной физико-механической обработкой на контактной поверхности кольца, надежно там удерживается, и тем самым, обеспечивает более щадящие условия взаимного контакта элементов пары трения.

Характерно, что использование $MoS_2 + 60\%PbS$ на обычных полированных поверхностях не дает должного эффекта, поскольку на поверхности трения отсутствует «пористый» слой и данная твердая смазка быстро стирается. И наоборот, использование матированных колец в паре с традиционной обработкой скоб также не дает должного эффекта, так как требуется дополнительная приработка пары из-за увеличения работы трения на полирование скобой «пористой» беговой дорожки кольца.

Таким образом, экспериментально подтверждено, что с помощью экспресс-установки можно проводить ускоренные испытания антифрикционных обработок узлов

трения и затем с помощью методов дисперсионного анализа осуществлять оценку и выбор оптимального сочетания этих обработок, которые будут способны обеспечивать наибольшую износостойкость в реальных условиях работы на технологическом оборудовании. Установлено, что одна минута испытаний на экспресс-установке соответствует примерно 200 часам работы аналогичной пары в реальных производственных условиях.

Заключение

1. Установлено, что на характер изменения момента силы трения и величину износа подвижного вращающегося элемента существенное влияние оказывают отклонения от правильности формы отверстия рабочей поверхности опорной детали (некруглость и в меньшей степени овальность). Поэтому величина этих отклонений на деталях вращающихся пар, работающих в условиях сухого трения и подвергаемых антифрикционным обработкам и покрытиям должна жестко нормироваться.
2. Подтверждена целесообразность использования метода оценки изменения момента силы трения и величины износа подвижного элемента с помощью экспресс-установки с гибкой нитью.
3. Установлено, что путем выбора оптимальной антифрикционной обработки элементов пары можно существенно снизить момент силы трения в месте контакта и повысить износостойкость пары, что способствует повышению долговечности оборудования в условиях эксплуатации.
4. Оптимальными сочетаниями антифрикционных обработок для вращающихся узлов сухого трения являются меднооловянистые гальванопокрытия несущих элементов, работающие в паре с никелированными подвижными элементами и обеспечивающие хорошую и быструю прирабатываемость узла трения, а также объемные физико-механические обработки в паре с обработкой вращающихся элементов дисульфидом молибдена с модификатором в виде 60% сульфида свинца, обеспечивающие возможность длительной работы с минимальной величиной момента силы трения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крагельский И. В., Михин Н. М. Узлы трения машин. – М: Машиностроение, 1984. – 280с.
2. Чичинадзе А. В. Основы трибологии. – М: Машиностроение, 2001. – 664с.
3. Трение и износ деталей машин. URL: – [http:// prom-info/index.php=48id=23](http://prom-info/index.php=48id=23).
4. Зеркин М. В. и др. Гидродинамический анализ подшипников скольжения. Ч.1.Учет нецилиндричности рабочих поверхностей / Трение и износ. ГНУ ИММС им. В.А.Белого НАН Беларуси, – Т.36, №5, 2014. – С.584–595.
5. Холин П. Н. Оценка антифрикционных характеристик пар трения с твердосмазочными покрытиями для различных условий функционирования / Трение и износ. ГНУ ИММС им. В.А.Белого НАН Беларуси, – Т.36, №5, 2015. – С.491–498.
6. Иванов В. В., Лебедев В. А., Пинахин И. А. Повышение износостойкости поверхности нанесением вибрационного механохимического покрытия MoS_2 / Трение и износ. ГНУ ИММС им. В.А.Белого НАН Беларуси, – Т.35, № 4, 2014. – С.510–511.

Поступила в редколлегию 01.12.2015 г