

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ

Ф.Х. Бурумкулов, С.А. Величко, В.В. Власкин, В.И. Иванов, П.А. Ионов, С.А. Понизяйкин

## ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПАР ТРЕНИЯ С ПОВЕРХНОСТЯМИ, ЛЕГИРОВАННЫМИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ

*Всероссийский научно-исследовательский технологический институт ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка РАСХН, Россия, 1-й институтский проезд, 1, г. Москва, 109428, Россия*

### Введение

В настоящее время существуют различные точки зрения на износостойкость и антифрикционность пар трения, рабочие поверхности которых легированы электроискровой обработкой (ЭИО). В гидродинамическом режиме трения, а также при граничной смазке твердые частицы (абразивы) могут снизить несущую способность соединений и привести к их схватыванию в случае перегрузки, или оказывать смазывающие эффекты (графит, дисульфид молибдена и др.), или вызывать восстанавливающий эффект поврежденных поверхностей (порошки меди, свинца, полимеры и др.) [1–7].

Механическое воздействие незакрепленных абразивных частиц на изнашиваемый материал в большей мере зависит от их формы и соотношения механических свойств абразивной частицы и изнашиваемой поверхности, действующих нагрузок.

Если усилия нагружения частицы в более мягкий материал меньше, чем разрушающие, то в этом случае износостойкость будет определяться условиями шаржирования абразива и свойствами более твердого материала, который будет изнашиваться уже закрепленным абразивом.

Так, например, М.М. Тененбаум [5] лабораторно-стендовыми испытаниями на машине трения М-1 по схеме ролик–колодка показал, что скорость изнашивания пары трения с бронзовой колодкой после введения в смазку абразивных частиц выросла в 66,625 раза, чем при изнашивании в чистом масле (табл. 1).

*Таблица 1. Триботехнические показатели пар трения при режиме испытания: давление 1,25 МПа, линейная скорость скольжения 0,42 м/с, путь трения 7500 м*

Колодка			Ролик			Коэффициент трения $f$
Материал	HV, МПа	W, мг	Материал	HV, МПа	W, мг	
Чистое масло – автол 6						
БрАЖ9-4	1380	1,7	Сталь 45	2750	0,7	-
В автол 6 введен 7,7% по массе кварцевый песок размерами частиц 0,1–0,2 мм						
БрАЖ9-4	1380	112,0	Сталь 45	2750	45,5	0,015–0,02
Сталь 20Х цементованная	6400	4,9	Сталь 45	2920	4,3	0,015–0,017
Сталь 20Х	4150	41,8	Сталь 45	3200	53,4	–

В первом и втором случаях бронзовая колодка изнашивается больше стального ролика, то есть шаржирование абразивных частиц играет меньшую роль, чем их раздробление при входе в контакт.

При увеличении удельных давлений до 5,0 МПа относительная износостойкость сопряжения сталь–бронза снизилась с 17 до 3 раз. Это объясняется тем, что с увеличением удельного давления повышается тепловая напряженность контакта трущихся тел и появляется преимущество бронзы перед сталью, имеющей меньшую теплопроводность.

При замене колодки на сталь 20Х скорость изнашивания пары трения снизилась в 1,65 раза, а на сталь 20Х цементованную – в 17 раз, то есть с ростом твердости колодок относительная износостойкость пары трения растет.

В связи с этим представляет интерес, как изменится интенсивность изнашивания сопряжения ролик – колодка при упрочнении рабочей поверхности ролика и колодки из бронзы электроискровым легированием.

### Методика и теория эксперимента

Надежность трущегося соединения зависит не только от твердости поверхностей, но и от расположения в ней материалов по твердости и площади трения. Соединения, образованные скользящими поверхностями, имеющими разные твердости и размеры площадей трения, условно различают на прямые –  $H_1 > H_2$ ;  $F_1 < F_2$  и обратные –  $H_1 < H_2$ ;  $F_1 < F_2$ , где  $H_1, H_2$  – твердости поверхностей трения;  $F_1, F_2$  – соответствующие площади поверхностей.

Обратные пары трения более стойки против заедания. Они дают при заедании меньшие силу трения и повреждение поверхностей. Различие в работе прямых и обратных пар трения состоит в том, что при перегрузке пластическая деформация образца с меньшей твердостью препятствует нормальной работе пары, в результате чего возрастают силы трения, увеличивается повреждение поверхности, и пара быстро выходит из строя. В обратных парах трения при перегрузке пластическая деформация образца с меньшей твердостью не препятствует работе пары вследствие пластического течения поверхностного слоя материала.

Как известно [4], для того чтобы снизить коэффициент трения, необходимо создать условие, при котором прочность возникающих молекулярных связей на поверхности трения была меньше прочности нижележащих слоев. Это достигается введением на поверхность трения металлических пленок из олова, меди, бронзы, алюминия, свинца и их сплавов, полимерных материалов.

Цель работы заключается в создании пары трения применительно к ротору (сталь 40Х, HV445-452,  $R_a 0,320$ ), который вращается с частотой до 28000 об/мин в бронзовом подшипнике (БрОС10-10, HV170-180,  $R_a 0,32$ ) с периодическим режимом «пуск-остановка». Анализ причин отказа исследуемого сопряжения турбокомпрессора показал [1], что износ пары трения происходит из-за наличия абразивных частиц в контакте.

В реальных условиях эксплуатации турбокомпрессоров интенсивность изнашивания бронзового подшипника в 3,5 раза превышает интенсивность изнашивания вала ротора. Следовательно, абразив практически не шаржируется на поверхности подшипника, разрушаясь у входной кромки или перекатываясь по поверхности трения, уносится маслом из зоны трения.

Расчетно-экспериментальным способом установлено [1], что легирование рабочих поверхностей пар трения вал ротора–подшипник будет эффективно, если соотношения их интенсивностей изнашивания, в режиме трения без абразива в масле, будет соответствовать условию

$$I_n = 3,82 \cdot E_{np}^{3,93} \cdot \Delta_{np}^{1,63} \cdot \left( \frac{H_B}{R_B} \right)^{0,326} \cdot \left( \frac{k_1 f}{\sigma_0} \right)^{t_y} \leq 0,33 \cdot I_n, \quad (1)$$

где  $I_n, I_n$  – интенсивности изнашивания легированных и новых сопряжений,  $E_{np}$  – приведенный модуль упругости контактирующих материалов;  $\Delta_{np}$  – приведенный комплексный параметр шероховатости исследуемых поверхностей;  $H_B$  – высота волны твердого материала;  $R_B$  – радиус вершины волны твердого материала;  $k_1$  – коэффициент, характеризующий напряженное состояние на контакте, зависящий от природы материала;  $f$  – коэффициент трения;  $\sigma_0$  – параметр фрикционной усталости;  $t_y$  – показатель кривой фрикционной усталости при упругом контакте.

Анализ зависимости (1) показывает, что снизить интенсивность изнашивания пары трения можно за счет уменьшения приведенного комплексного параметра шероховатости исследуемых поверхностей, который определяется по формуле

$$\Delta_{np} = \frac{R_{\max}}{r \cdot b^v}, \quad (2)$$

где  $R_{\max}$  – расстояние между наибольшим выступом и наименьшей впадиной;  $b, v$  – параметры кривой опорной поверхности;  $r$  – радиус закругления выступа профиля твердого материала.

Из формулы (2) следует, что для уменьшения комплексного параметра шероховатости необходимо увеличение радиуса кривизны вершин микронеровностей, что в наибольшей степени достигается при электроискровой обработке поверхностей [1].

Известно, что профили с «масляными карманами» лучше удерживают смазку на поверхностях пары трения.

В работе за критерий несущей способности шероховатой поверхности с масляными карманами принят параметр [1]:

$$\Omega = \frac{\bar{R}_{\text{МК}}(Y)}{3} \left\{ \exp \left[ -b \left( \frac{Y}{R_{\text{исх}}^{\text{max}}} \right)^v \right] \right\}^2, \quad (3)$$

где  $\bar{R}_{\text{МК}}$  – глубина масляных каналов;  $\left( \frac{Y}{R_{\text{исх}}^{\text{max}}} \right)$  – отношение текущего сечения к максимальной высоте шероховатости профиля.

Установлено [1], что условная толщина «масляных карманов»  $\Omega$  у восстановленных поверхностей в 2,61–12,9 раза больше, чем у новых. Следовательно, поверхности, обработанные методом ЭИО, должны обладать лучшей работоспособностью по сравнению с новыми поверхностями.

При трении двух твердых тел в смазочной среде с незакрепленным абразивом существует оптимальное значение твердости мягкого материала, ниже которого наблюдается возрастающая зависимость износа контртела от твердости мягкого тела, а выше его – падающая зависимость [4–7]. Как правило, расчетными методами не удастся определить значение оптимальной твердости.

#### Постановка эксперимента

Исследовались пары трения: эталонная (новая) ролик - сталь 40X (HV445–452, Ra 0,320); колодка – бронза БрОС10-10 (HV170–180, Ra 0,32) и обработанные электроискровым методом: 1) ролик – сталь 40X+ сталь 85 (HV 452–494, Ra 0,80); колодка – БрОС10-10 (HV 170-180, Ra 0,32); 2) ролик – сталь 40X+ сталь 85 (HV452–494, Ra 0,80); колодка – БрОС10-10+Ni+БрОС10-10 (HV210–220, Ra 0,80); 3) ролик 40X+сталь 85 (HV452–4494, Ra 0,80); колодка – БрОС10-10+Ni+БрАЖ9-4 (HV225–235, Ra 0,80).

Ролики обрабатывались на модернизированной установке «Элитрон-22БМ» с использованием устройства КПМ–20, установленного на токарно-винторезном станке. Технологические нормы обработки: ролик (режим 4,  $d_{\text{эл}}=4$  мм, частота вращения электрода 3000 об/мин, частота вращения ролика 11,2 об/мин, подача электрода  $s=0,19$  мм/об, производительность обработки  $\Pi = 2,5$  мин/см<sup>2</sup>). Колодки обрабатывались на модернизированной установке «Элитрон-22БМ»:

– при нанесении никеля: режим 5, частота импульсов 250 Гц,  $d_{\text{эл}}=3,2$  мм, производительность наплавки 0,5 мин/см<sup>2</sup>;

– при нанесении БрОС10-10: режим 5, частота импульсов 200 Гц,  $d_{\text{эл}}=3,2$  мм, производительность наплавки 3,5 мин/см<sup>2</sup>.

Триботехнические испытания проводились в соответствии с ГОСТом 23.224–86 на машине трения 2070 СМТ-1 по методу группы А в режиме на грани заедания по схеме трения «ролик – колодка» (рис. 1) в чистой смазке (АС-8) и с добавлением в смазку 7,7% по массе кварцевого песка с размерами частиц 0,1–0,2 мм при скорости относительного скольжения 0,78 м/с. Метод смазывания – окунание в чистое масло и в масло с абразивом.

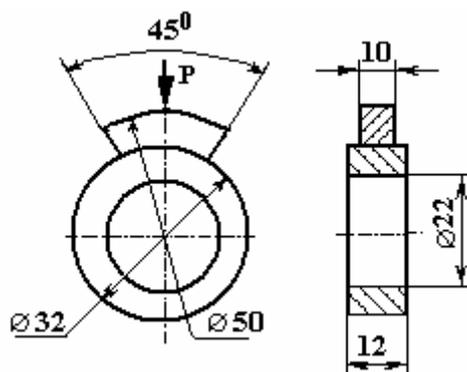


Рис. 1. Схема трения

Объем каждой партии образцов составлял 3 шт. К испытаниям допускались образцы с расхождением по микротвердости не более 15%.

Триботехнические испытания состояли из трех этапов: притирки, приработки (испытание на грани заедания) и длительных стационарных износных испытаний. Предварительная приработка пары трения проводилась непосредственно на машине трения под нагрузкой 0,5 МПа по достижении площади их взаимного прилегания не менее 90% от номинальной расчетной поверхности контакта. После обеспечения указанного прилегания образцы маркировали, промывали в бензине или ацетоне, высушивали и далее подвергали взвешиванию. Взвешивание каждого образца на аналитических весах модели ВЛР–200 с ценой деления 0,1 мг осуществляли 3 раза.

В процессе испытаний на грани заедания непрерывно регистрировались момент трения, температура масла в камере и зоне трения. По результатам обработки диаграмм определялись максимальная  $P_{м.п}$  и оптимальная  $P_{оп}$  несущие способности соединения, минимальный  $f_{min}(P_{оп})$  и максимальный  $f_{max}(P_{м.п})$  коэффициенты трения, температура масла в момент достижения нагрузки  $P_{м.п}$ . Затем, не вводя образцы в состояние задира (схватывания), нагрузку ступенчато снижали.

Стационарные износные испытания проводили в фиксированном режиме при нагрузке  $P_{оп}$ . Время стационарных испытаний составляло 100 часов.

После каждого вида испытаний образцы промывали, просушивали, затем взвешивали. Износ образцов определялся методом профилографирования по ГОСТу 27860-88, сущность которого заключается в том, что значение износа определяют как разницу высот профиля до и после изнашивания.

Интенсивность изнашивания пары в целом  $J_{\Sigma}$  определяли как сумму интенсивностей изнашивания элементов пары  $J_{\Sigma} = J^p + J^k$ .

#### Обсуждение результатов

Результаты испытания на грани заедания исследуемых пар трения в чистом масле представлены в табл. 2.

Таблица 2. Триботехнические характеристики пар трения на грани заедания

Подвижный образец		Неподвижный образец		$P_{оп}$ , МПа	$P_{м.п}$ , МПа	$f_{min}$
Ролик	Электрод	Колодка	Электрод			
Чистое масло АС-8						
40Х	-	БрОС10-10	-	6,33	9,6	0,0173
40Х	Сталь 85	БрОС10-10	Ni + БрОС10-10+ Ni + БрАЖ9-4	7,33	10,66	0,0143
40Х	Сталь 85	БрОС10-10	Ni + БрОС10-10	7,00	11,33	0,0127
40Х	Сталь 85	БрОС10-10	Ni + БрАЖ9-4	7,00	11,00	0,0133
В АС-8 введен 7,7% по массе кварцевый песок с размерами частиц 0,1-0,2 мм						
40Х	-	БрОС10-10	-	-	-	0,018–0,21
40Х	Сталь 85	БрОС10-10	Ni + БрОС10-10	6,00	9,1	0,014–0,018

Из табл. 2 следует, что лучшими триботехническими характеристиками обладает пара трения ролик из стали 40Х с покрытием сталью 85–колодка из бронзы БрОС10-10 с покрытием Ni + БрОС10-10.

На рис. 2 представлены значения максимальных нагрузок, характеризующих предзадириное состояние пар трения и оптимальных, при которых коэффициенты трения имеют минимальные значения.

Анализ полученных результатов показывает, что максимальные и оптимальные нагрузки, которые могут воспринимать эталонные пары трения, на 16–18% меньше, чем для обработанных методом ЭИО пар, а коэффициент трения пары ролик из стали 40Х с покрытием сталью 85–колодка из бронзы БрОС10-10 с покрытием Ni + БрОС10-10 на 36% меньше, чем у эталонной пары сталь 40Х – БрОС10-10.

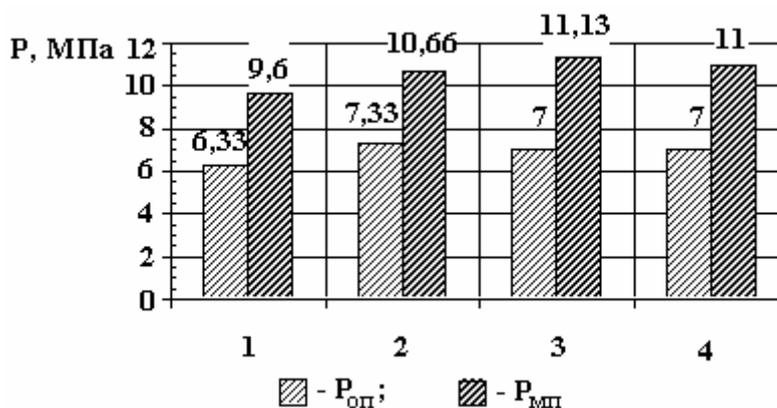
Длительные стационарные испытания по определению интенсивности изнашивания проводились при оптимальных нагрузках  $P_{оп}$  для каждой исследуемой пары. Результаты испытаний приведены в табл. 3.

Следовательно, при трении в чистом масле интенсивность изнашивания сопряжений, обработанных электроискровой наплавкой, ниже, чем у эталонной пары трения.

Таким образом, условие [1], что

$$\bar{I}_л \leq 0,33 \cdot \bar{I}_н,$$

где  $\bar{I}_л, \bar{I}_н$ , – соответственно средняя интенсивность изнашивания легированных и новых пар трения, выполняется для второй и четвертой пар трения.



- 1 – 40Г – БрОС10-10 (эталонный образец);  
 2 – 40Г+сталь85 – БрОС10-10;  
 3 – 40Г+сталь85 – БрОС10-10+Ni+БрОС10-10;  
 4 – 40Г+сталь 85 – БрОС10-10+Ni+БрАЖ9-4

Рис. 2. Графики максимальных и оптимальных нагрузок новых и обработанных методом ЭИО пар трения при испытании в чистом масле

Таблица 3. Интенсивность изнашивания новых и обработанных методом ЭИО пар трения

Подвижный образец		Неподвижный образец		$\bar{I}_p$	$\bar{I}_k$	$\bar{I}_\Sigma$
Ролик	Электрод	Колодка	Электрод			
Чистое масло АС-8						
40Х	-	БрОС10-10	-	$1,90 \cdot 10^{-10}$	$6,62 \cdot 10^{-10}$	$8,52 \cdot 10^{-10}$
40Х	Сталь 85	БрОС10-10	Ni + БрОС10-10 + Ni + БрАЖ9-4	$1,70 \cdot 10^{-12}$	$2,96 \cdot 10^{-10}$	$2,98 \cdot 10^{-10}$
40Х	Сталь 85	БрОС10-10	Ni + БрОС10-10	$1,17 \cdot 10^{-12}$	$1,68 \cdot 10^{-10}$	$1,69 \cdot 10^{-10}$
40Х	Сталь 85	БрОС10-10	Ni + БрАЖ9-4	$1,83 \cdot 10^{-12}$	$4,13 \cdot 10^{-10}$	$4,15 \cdot 10^{-10}$
В АС-8 введен 7,7% по массе кварцевый песок с размерами частиц 0,1-0,2 мм						
40Х	-	БрОС10-10	-	$0,3 \cdot 10^{-9}$	$8,32 \cdot 10^{-9}$	$8,62 \cdot 10^{-9}$
40Х	Сталь 85	БрОС10-10	Ni + БрОС10-10	$0,11 \cdot 10^{-12}$	$1,48 \cdot 10^{-9}$	$1,59 \cdot 10^{-9}$

Примечание:  $I_p, I_k, I_\Sigma$  – интенсивность изнашивания ролика, колодки, пары соответственно.

Триботехнические испытания с абразивом в смазке трех пар эталонных образцов сталь 45 (ролик) – БрОС10-10 (колодка) и трех пар экспериментальных образцов, на ролик которых наплавлена методом ЭИО сталь 80, а поверхность колодки легирована никелем с последующей наплавкой на эту поверхность матричного материала БрОС10-10 толщиной 60 мкм, показали (табл. 3), что

$$\frac{\bar{I}_{\text{экспер.}}}{\bar{I}_{\text{эталон}}} = \frac{1,59 \cdot 10^{-9}}{8,62 \cdot 10^{-9}} = 0,18.$$

### **Выводы**

Электроискровая обработка изношенных рабочих поверхностей вала ротора и подшипника позволяет не только восстанавливать детали, но и значительно повышать износостойкость восстановленного соединения в режиме абразивного трения.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика) // Бурумкулов Ф.Х., Лезин П.П., Сенин П.В. и др. Саранск, 2003. 504 с.
2. Мулин Ю.И., Метлицкая Л.П., Климова Л.А. и др. Исследование износостойкости и жаростойкости титановых сплавов после электроискрового легирования // Принципы и процессы создания неорганических материалов. Хабаровск, ДОАН РФ, 2002. С. 220–221.
3. Трение и модифицирование материалов трибосистем // Машков Ю.К., Полещенко К.Н., Поворознюк С.Н., Орлов П.В. М., Наука, 2000. 280 с.
4. Гаркунов Д.Н., Поляков А.А. Повышение износостойкости деталей конструкций самолетов. Изд.2-е. М.: Машиностроение, 1974. 200 с.
5. Тененбаум М.М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин при абразивном изнашивании. М.: Машиностроение, 1966. 326 с.
6. Ямпольский Г.Я., Крагельский И.В. Исследование абразивного износа элементов пар трения. М.: Наука, 1973. 64 с.
7. Вайнштейн В.Э., Прондзинский А.М. Применение метода радиоактивных индикаторов для оценки способности подшипниковых материалов поглощать абразивные частицы, находящиеся в смазке // Трение и износ в машинах. Т..XV. М.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 47–58.

*Поступила 20.06.06*

### **Summary**

It is shown that at the friction of two solid bodies in the lubricant medium with unfixed abrasive there is the optimum value of soft antifriction material hardness. At the values lower than the optimum one a strong increase of wear intensity takes place. A possibility of friction pairs fabrication by electro-spark machining of working surfaces ensuring the optimal ratio of hardnesses and the minimum wear intensity is investigated.

---