

ВЛИЯНИЕ ПРИСАДОК К МОТОРНЫМ МАСЛАМ НА МОРФОЛОГИЮ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ЦИЛИНДРО-ПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ

IMPACT OF THE ADDITIVES TO THE MOTOR OIL ON THE MORPHOLOGY FRICTION SURFACES OF PARTS CYLINDER-PISTON

зав. кафедрой ТЭАРП СПбГУВК Ежов Ю., засл. деятель науки РФ, д. т. н., проф. Погодаев Л.,
зав. кафедрой ТМиМ СПбГУВК Кузьмин А.

Санкт-Петербургский университет водных коммуникаций, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Приведены результаты анализа по выявлению влияния присадок различного функционального назначения к базовому моторному маслу Shell X100 на комплекс противоизносных свойств и триботехнических характеристик трибосопряжения СЧ-Сг гальванический, работающего в условиях граничной смазки по схеме ролик-ролик. Приводится подробный анализ влияния шероховатости поверхности трения на износ сопряженных деталей, температуру, коэффициент трения и другие характеристики трибосопряжения.

Ключевые слова: структура, коэффициент трения, трибосопряжение, смазочные композиции, износостойкость.

The following analysis results are given: impact detection of the various functional purpose additives to the base motor oil Shell X100 towards the antiwear properties complex and tribo adjunction СЧ-Cr galvanic tribotechnical characteristics working in the nonviscous lubrication conditions upon the scheme insulator – insulator. Carried is the detailed roughness influence wear surface analysis to the wear of the conjugated details, temperature, wear coefficient and other characteristics of the triboconjugation.

Keywords: structure, surface properties, wear coefficient, bearing area, wear resistance

Смазочные композиции (СК) состояли из базового минерального масла Shell X100 и 14 различных присадок. Содержание добавок в СК соответствовало рекомендациям фирм изготовителей. Для сравнения испытали трибосопряжение при смазке синтетическим маслом Shell Herlix Ultra (табл. 1).

Пару трения составили из низколегированного (втулочного) серого чугуна (СЧ) с $HВ = (215 \dots 225) \times 10^{-1}$ МПа и плотного гальванического хромового покрытия с микротвердостью $H_{50} = 11000$ МПа. Испытания проводили на машине трения ИИ-5018 по схеме ролик - ролик. Подвижный ролик диаметром 50 мм и шириной 12 мм изготавливали из СЧ ($R_a = 0,36$ мкм), а неподвижный, аналогичных размеров, из чугуна с гальваническим хромовым покрытием толщиной 400 мкм и с исходной шероховатостью $R_a = 0,54$ мкм. Шероховатость измеряли профилографом фирмы Hommel. Выбор пар трения был обусловлен тем, что в настоящее время трибосопряжение СЧ-Сг гальванический является достаточно распространенным в судовых, тепловозных и автотракторных двигателях при изготовлении втулок цилиндров и хромированных поршневых колец.

Температуру в зоне трения, на расстоянии 1,7 ... 2,0 мм от поверхности трения, измеряли с помощью термопары и потенциометра КСП-4. Момент трения определялся штатным моментомером и трибометром. Нагрузку на трибосопряжение в основных опытах изменяли в пределах от 10 до 50 МПа. В период приработки образцов удельная нагрузка достигала 70 МПа. Сравнительные испытания проводились в течение 5 и 10 ч. По истечении каждого часа, определяли весовой износ чугунного ролика и площадь пятна износа на хромированном образце. Смазку трибосопряжения осуществляли капельным способом (4-6 капель в минуту).

Рассмотрим достоинства и недостатки работоспособности трибосопряжений СЧ-Сг гальванический по результатам их испытаний по схеме ролик-ролик в присутствии 18 вариантов СК [1-5].

Таблица 1

Название СК	№ СК на рис.	K _{CT}	K _{сч}	T _{кв} , °C	f _{тр}	Для ролика (СЧ)		d _{шлит} (ГОСТ), мм/отн.ед	F _{CT} износ, мм ² [227]	d _л , мм	F _{CT} =I _{нрп} d мм ²	F _{CT} ^{отн}	h _л , мм	V _л , мм ³	k _{V,л}	S _{0,2} , мм ²	S ₀ ^{отн}
						R _а , мкм	R _z , мкм										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
ShellX 100	1	1	1	200	0,091	0,16	1,16	0,36/1,0	6,67	1,45	6,2	1,0	0,021	0,065	1	230/(0,65)	
Shell HelixUltra	2	1,45	0,76	198	0,096	0,18	1,46	0,25	5,85	1,13	5,1	1,21	0,013	0,032	2,03	209/0,56	
Унимет	3	0,92	0,98	202	0,084	0,13	1,15	-	6,89	1,45	7,25	0,86	0,022	0,077	0,84	221/0,60	
СУРМ	4	1,26	0,57	210	0,094	0,16	1,25	0,26/1,38	5,54	1,45	5,85	1,06	0,022	0,062	1,05	202/0,55	
Хало	5	0,87	1,53	195	0,088	0,14	1,21	0,73/0,49	6,89	1,53	6,91	0,90	0,024	0,80	0,81	236/0,64	
Ауторлус	6	2,92	2,44	119	0,042	0,17	1,53	0,36/1,0	4,68	1,05	4,65	1,33	0,01	0,022	2,95	235/0,91	
Униплак	7	1,84	1,67	215	0,80	0,22	1,70	0,39/0,92	5,29	1,21	5,46	1,13	0,015	0,040	1,63	289/0,78	
E3000	8	0,84	0,56	219	0,106	0,20	1,37	0,29/1,24	7,53	1,58	7,25	0,86	0,026	0,091	0,71	197/0,53	
Lubrifilm Diamond	9	0,88	2,32	220	0,097	0,12	1,03	0,36/1,0	6,55	1,69	7,51	0,83	0,029	0,106	0,61	201/0,54	
XER ₂	10	2,63	2,77	117	0,057	0,19	1,059	0,36/1,0	4,62	1,21	5,0	1,24	0,015	0,038	1,71	299/0,81	
Херамис РМ	11	0,54	1,95	233	0,105	0,11	0,90	0,42/0,86	8,34	1,69	7,78	0,80	0,029	0,109	0,60	165/0,45	
ABRO	12	0,96	0,14	190	0,095	0,19	1,34	0,31/1,24	6,71	1,45	6,32	0,98	0,022	0,067	0,97	155/0,42	
Mannol	13	0,92	0,14	218	0,096	0,17	1,53	0,28/0,38 1,29/0,95	6,93	1,60	7,54	0,82	0,026	0,095	0,68	210/0,57	
PBX ²	14	1,31	0,57	180	0,067	0,18	1,55	0,29/1,24	5,84	1,37	5,54	1,12	0,019	0,051	1,27	256/0,69	
ER	15	0,49	0,86	164	0,058	0,17	1,46	0,30/1,2	6,55	1,60	7,02	0,88	0,026	0,088	0,74	226/0,61	
Феном	16	0,35	0,93	217	0,083	0,12	1,08	0,33/1,09	9,47	1,85	8,67	0,72	0,034	0,142	0,46	197/0,53	

Для СК (№ 13) 0,28/0,38 - для СК с присадкой Mannol в кол-ве 10%/5%; I_{нрп} - фактическая длина пятна износа, мм.

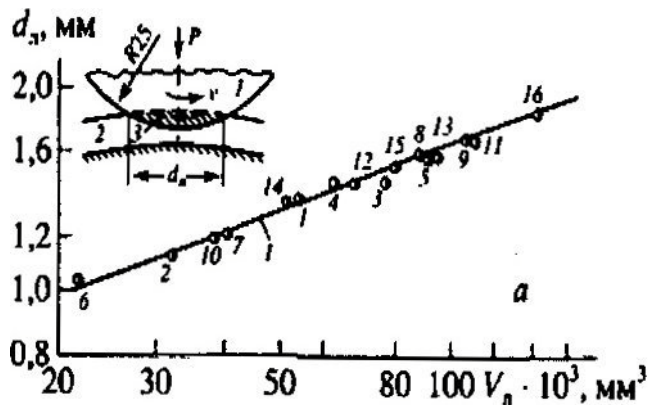


Рис. 1. а - Зависимость $d_{л} = 3,63 V_{л}^{0,33}$ (I) после пятчасовых испытаний пары трения СЧ-Сг гальванической при смазке СК с добавками (таблица): 1 - ролик (СЧ), 2 - кольцо (Сг), 3 - износ (пл. F)

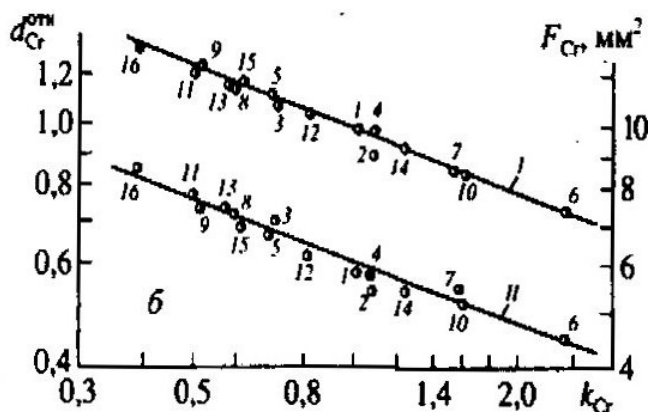


Рис. 1. б - соотношения между $d_{Cr}^{отн}$ и k_{Cr} (I - $d_{Cr}^{отн} = 0,97/k_{Cr}^{0,33}$) и между площадью пятна износа F_{Cr} и относительной износостойкостью хромированных образцов (II - $F_{Cr} = 6,1/k_{Cr}^{0,33}$)

К достоинствам можно отнести сравнительную легкость реализации на трибоконтакте достаточно жестких силовых и температурных условий внешнего нагружения, а также сравнительно простой визуальный и инструментальный (измерительный) доступ к поверхностям трения, в том числе к изнашиваемой поверхности хромированного образца в виде сегмента, вырезанного из натурального поршневого кольца двигателя внутреннего сгорания (ДВС). К недостаткам следует отнести следующие обстоятельства: неопределенность контактных давлений, уменьшающихся по мере увеличения пятна износа на хромированном образце; непрерывность трибоконтакта и его ограниченность по площади, что не соответствует условиям работы деталей ЦПГ ДВС (пары трения поршневое кольцо - цилиндровая втулка); возможные погрешности в оценке износостойкости трибосопряжений, связанные с измерением пятна износа лупой Бринелля, а также с возможными перекосами при периодической переустановке образцов (пятно износа может иметь форму

прямоугольника и эллипса); неучет отдельного вклада упругой и пластической деформации в формообразовании пятна износа. Упругое восстановление пятна контакта после снятия нагрузки, различное при разных СК, может существенно исказить истинную картину контактного взаимодействия образцов и привести к дополнительным погрешностям при оценке их износостойкости. Эти замечания в той или иной степени свойственны любым трибологическим испытаниям материалов и СК, проводимым по схеме ролик - ролик. Повышение достоверности результатов возможно путем привлечения дополнительных методов исследований: микрорентгеноспектрального анализа, метода измерения микротвердости по глубине изнашиваемого слоя с учетом упругого восстановления отпечатка микротвердомера и т. п.

Схема испытаний трибосопряжения показана на рис. 1. а, из которой следуют упрощенные геометрические построения последовательного измерения увеличивающейся площади износа на боковой поверхности хромированного образца.

График зависимости диаметра лунки износа $d_{л}$ от объемного износа $V_{л}$ убедительно указывает на существование кубической зависимости между объемом $V_{л}$ и основным линейным параметром $d_{л}$, характеризующим износостойкость трибосопряжений при ширине образца $b = const = 12$ мм. Это – геометрическая зависимость, она имеет вид

$$(d_{л})_r = const_1 \sqrt[3]{F} \cong 0,6\sqrt{F}, \quad (1)$$

где: F – заштрихованная площадь износа на боковой поверхности хромированных образцов (рис. 1. а).

При ширине ролика $b = 12$ мм выражение (1) перепишем в виде

$$(d_{л})_r = 2,6\sqrt{(V_{л})_r}, \quad (2)$$

Аналогичные зависимости, полученные при испытаниях образцов на машинах трения, имеют вид

$$(d_{л})_{опыт} = 3,63\sqrt[3]{(V_{л})_{опыт}} \text{ и } (F_{Cr})_{опыт} = 6,1/\sqrt[3]{k_{Cr}} \quad (3)$$

Из (2) и первой зависимости (3) вытекает соотношение

$$(d_{л})_{опыт} \cong 1,37(d_{л})_r, \quad (4)$$

а вторая зависимость (3) легко преобразуется в

$$(d_{л})_{опыт} = 0,97/\sqrt[3]{k_{V_{л}}}, \quad (5)$$

где: $(d_{л})_{опыт}$ и $k_{V_{л}}$ – относительные значения пятна износа и износостойкости, равной $V_{лЭ}/V_{л}$ (табл. [1] рис. 1).

Превышение в (4) опытных значений $(d_{л})_0$ на 37% над $(d_{л})_r$, измеренными по геометрической схеме контакта, может быть связано с вибрационной активностью трибосопряжений и соответствующим «размазыванием» пятна контакта (износа) по поверхности хромированного образца. В то же время, при значительном увеличении $(d_{л})_{\text{опыт}}$ от вибраций будет соответственно возрастать глубина лунки $h_{л}$, определяемая расчетным путем по значениям $(d_{л})_{\text{опыт}}$, и может превысить невосстановленное (т. е. с участием упругих деформаций) значение $h_{л}$. Это в итоге приведет к погрешностям при определении невосстановленного объема $V_{л}(d_{л}, h_{л})_{\text{опыт}}$ и оценке относительной износостойкости трибосопряжений.

В связи с этим целесообразно перейти к относительным значениям износных характеристик, формуле (5), согласно которой относительная износостойкость трибосопряжений пропорциональна относительному пятну износа в кубе, т. е.

$$k_{V_{л}} \cong (d_{л})_{\text{отн}}^3.$$

Рассмотрим влияние параметров шероховатости поверхностей трения на триботехнические характеристики и износостойкость трибосопряжений.

Для оценки параметров шероховатости R_a и R_z будем руководствоваться ГОСТ 2789-73. Для измерения R_a , R_z и построения опорных кривых использовался профилограф Hommel W Tester T-500 фирмы Hommel Werke (Германия). На первом этапе исследований были сопоставлены значения R_a и R_z (рис. 2). На рис. 2 отчетливо проявилась основная линия I с линейной зависимостью между R_z и R_a (т. 11, 9, 16, 3, 5) и два нелинейных ответвления: линия II (т. 1, 4, 12, 8) и III (т. 15, 13, 6, 2, 14, 10, 7). Линии II и III соответствуют квадратичным зависимостям. В общем случае имеем $R_z = \text{const}_{I,II,III} R_a^n$, где $n = 1,0$ для линии I и $n = 0,5$ для линий II и III.

Важно отметить, что только при трех СК (т. 11, 9 и 16) исходная шероховатость поверхности ролика из СЧ $R_a = 0,13$ мкм уменьшилась до 0,11, ... 0,12 мкм. В остальных случаях – увеличилась от 0,13 до 0,22 мкм.

Анализ зависимостей I-III (рис. 2) указывает на существование оптимальной эксплуатационной шероховатости и масштабных уровней изнашивания, зависящих в большей степени от R_z чем от R_a , а также от формы выступов шероховатости, определяющей фактическую площадь контакта A_r , коэффициента заполнения

профиля k_v и несущую способность поверхности трения.

Для проверки этого предположения были проанализированы кривые опорной поверхности для всех вариантов СК с присадками (рис. 3).

Кривая опорной поверхности характеризует распределение материала в шероховатом слое. Она строится по профилограммам поверхности: по оси абсцисс откладывается отношение суммы сечений микронеровностей в виде отрезков на прямой линии, проведенной на некотором расстоянии от основания, а по оси ординат – расстояние от основания профиля до выбранного сечения.

Для каждого варианта была графически определена интегральная площадь под опорной кривой в пределах $\xi=1$ и $\xi=1$ по горизонтальной и вертикальной осям соответственно; η и параметры опорной кривой $\eta(\xi)$ при $\xi = 0 \dots 1,0$. При этом максимально возможная площадь, под опорной кривой, равная произведению $(\eta\xi)^{\max}$, обозначенная S_0 , принята за единицу и реальные значения S , взятые в долях от S_0 (от 0,91 для кривой 6 до 0,42 для кривой 12; столбец 17 в таблице 1).

Аппроксимация начальных участков кривых опорной поверхности (рис. 3) степенными зависимостями в виде $\eta = b \xi^v$ позволила определить значения b и v для трех групп СК: $b = 11,3$ и $v = 1,85$ – для СК под № 6, 7, 10 (I группа); $b = 3,06$ и $v = 2,12$ – для СК под № 1-5, 8, 9, 13 и 15 (II группа); $b = 1,17$ и $v = 2,56$ – для СК под № 11, 12 и 16 (III группа).

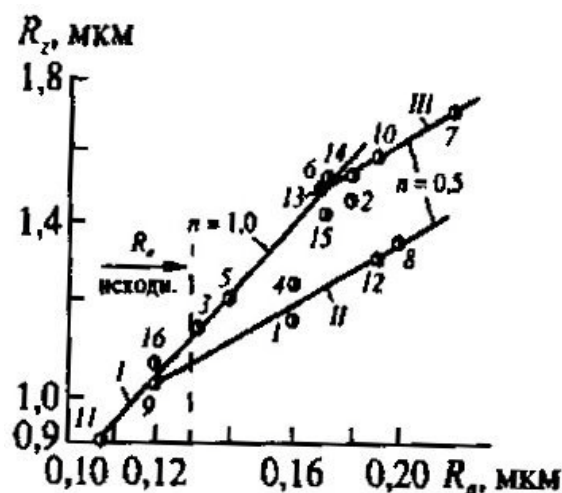


Рис. 2. Соотношение между параметрами шероховатости на поверхности ролика из СЧ при трении в паре с гальваническим Сг в присутствии СК с присадками

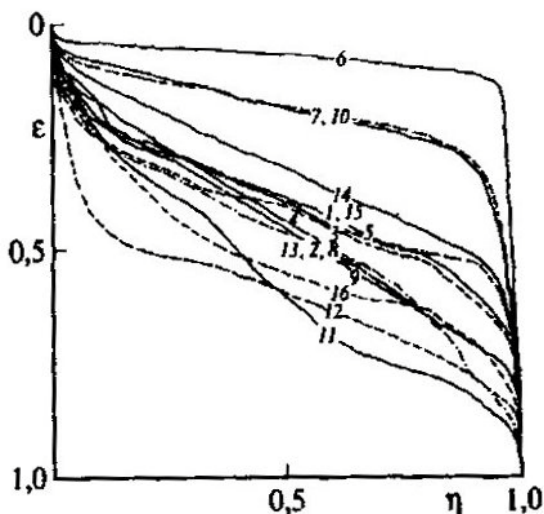


Рис. 3. Кривые опорной поверхности чугунного ролика при граничном трении в течение 5 часов и смазке минеральным маслом Shell X100 с добавками: $R_z = \text{const } R_a^n$, $R_z^{\text{max}} = 3,2 \text{ мкм}$, $R_a^{\text{max}} = 0,8 \text{ мкм}$.

По значениям b , и шероховатости R_a микрогеометрия изнашиваемых поверхностей соответствует 5-6 квалитетам точности (ГОСТ 24643-81), реализуемым при финишных операциях механической обработки деталей - полировании ($b_{\text{cp}} = 2,67$, $v_{\text{cp}} = 1,6$) и доводке ($b_{\text{cp}} = 3,0$, $v_{\text{cp}} = 1,2$). Значениям b_{cp} и v_{cp} при механической обработке поверхностей лучше других соответствуют b и v опорных кривых профиля поверхностей износа для II группы СК ($S_0 = 0,58$). Для I группы СК характерно наиболее благоприятное наполнение материалом тончайшего изнашиваемого слоя ($b = 11,3$ и $S_0^{\text{cp}} = 0,8$). Высокие значения b и S_0^{cp} указывают на относительное равенство высот микронеровностей и небольшой шаг между выступами шероховатости. Низкие значения $b = 1,17$ и $S_0^{\text{cp}} = 0,43$ для III группы СК характеризуют большую неупорядоченность микрорельефа поверхностей: разновысотность выступов шероховатости и неравномерность шага между ними. Повышенное значение $v = 2,56$ указывает на большую разрыхленность изнашиваемого слоя, который способен уплотняться лишь после значительной упругопластической деформации.

Очевидно, что параметры b и S_0 определяют несущую способность шероховатого слоя и, как следствие, комплекс триботехнических и противозносных характеристик. Между S_0 и b установлена степенная зависимость, близкая к кубической ($S_0 = 0,4b^{0,3}$). Дальнейшие сопоставления показали, что S_0 линейно связана с износостойкостью материалов, поэтому параметры S_0 и b можно использовать как диагностические при оценке влияния СК на работоспособность трибосопрежений.

Сопоставление коэффициентов трения f_{TP} с R_a , R_z и S_0^{cp} на рис. 4 подтвердило существование масштабных уровней трения и изнашивания. На рис. 4, а, б два уровня трения разделены пунктирной линией при переходном значении $f_{\text{TP}}^n = 0,08$. Выше этого значения трибосопрежения работают в условиях граничного трения, ниже – в более благоприятных условиях смешанного (полужидкостного) трения, соответствующего $f_{\text{TP}}^{\text{min}}$ на кривой $f_{\text{TP}}(z)$ Герси-Штрибека. В последнем случае контактирующие поверхности разделяют более толстые смазочные пленки, а глубина лунки износа $h_{\text{л}}$ (столбец 14 в таблице 1) не превышает 10 ... 15 мкм при скорости изнашивания не более 2 ... 3 мкм/ч. Это означает, что процессы упругопластического деформирования поверхности трения не выходят за пределы шероховатости R^{max} и R_z и соответствуют преимущественно переходному мезоскопическому уровню деформирования (т. 6, 10, 15 и 14 на рис. 4, а, б).

При $f_{\text{TP}} = 0,08 \dots 0,105$ (остальные точки на рис. 4 а, б) смазочные пленки более тонкие, поэтому условия нагружения более жесткие. При этом процессы упругопластического деформирования выходят за пределы шероховатости R^{max} и R_z и развиваются в глубинных слоях металла. Зона упругопластического деформирования в несколько раз увеличивается по глубине, а скорости изнашивания возрастают в 2 ... 3 раза. Можно считать, что такие условия соответствуют преимущественно макромасштабному уровню деформирования и изнашивания.

Макро- и мезомасштабным уровням трения на рис. 4 а, б соответствуют вполне определенные оптимальные значения параметров шероховатости:

$$R_a^{\text{опт}} \begin{cases} 0,125 \text{ мкм}, \\ 0,165 \text{ мкм}; \end{cases} R_z^{\text{опт}} \begin{cases} 1,06 \text{ мкм} - \text{ для макроуровня}, \\ 1,145 \text{ мкм} - \text{ для мезоуровня}. \end{cases}$$

Известно, что оптимальная шероховатость характеризует переход от адгезионного взаимодействия контактирующих поверхностей к механическому взаимодействию выступов шероховатости на сопряженных деталях. Ниспадающие ветви верхних кривых (рис. 4 а, б) указывают на преобладание адгезионного взаимодействия поверхностей трения. Характер верхних кривых f_{TP} , (R_a , R_z) (рис. 4 а, б) находится в соответствии с известными моделями граничного трения [1,3,4 и др.]. На более благоприятном масштабном уровне (нижняя часть рис. 4 а, б) на ниспадающей (пунктирной) ветви опытные точки отсутствуют. Это означает, что на мезоуровне адгезионное взаимодействие поверхностей трения не проявляется. Восходящая ветвь кривой указывает на увеличение роли механического фактора в зоне контакта при параметрах шероховатости, превышающих оптимальные значения.

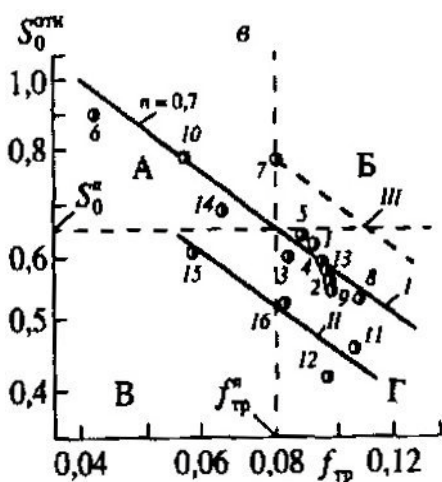
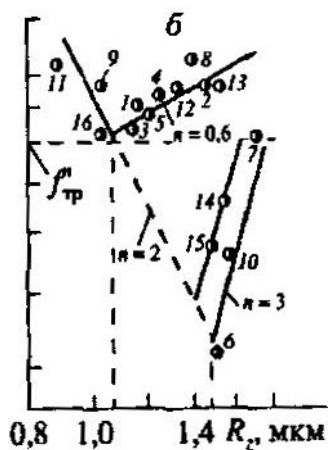
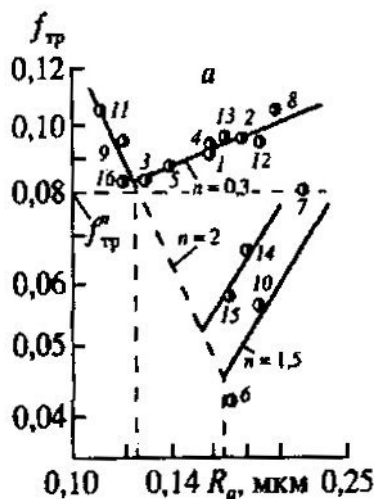


Рис. 4. Зависимость $f_{тр}$ от R_a (а) и R_z (б) $S_0^{отн}$ от $f_{тр}$ (в: $const_{10} = 0,11$, $const_{11} = 0,085$, $S_0^{отн} = const_{1,II}/f_{тр}^n$) при граничном трении пары СЧ-Ст гальванический в присутствии СК с различными присадками

Судя по рис. 4 а, б, параметры шероховатости

оказывают существенное влияние на $f_{тр}$. Это влияние можно представить общей формулой $f_{тр} = const_{4,5,6} R_a^n$, где $const_{4,5,6}$ – опытные постоянные; $n = -2$ и $+0,3$ – для макроуровня и $n = 1,5$ – для мезоуровня; $f_{тр} = const_{7,8,9} R_z^m$, где $const_{7,8,9}$ – опытные постоянные; $m = -2$ и $+0,6$ – для микроуровня и $m = 3$ – для мезоуровня.

Большинство опытных точек на графике зависимости $S_0^{отн}$ ($f_{тр}$) (рис. 4, в) группируется около линии I, которая соответствует степенной функции

$$S_0^{отн} = const_{10}/f_{тр}^n = 0,11/f_{тр}^{0,7}. \quad (6)$$

Опытные точки 15, 16, 11 и 12, соответствующие СК с химически активными присадками, снижающими $S_0^{отн}$ и несущую способность трибосопряжений, группируются (рис. 4, в) около линии II, которая отличается от степенной зависимости (6) лишь постоянной ($const_{11} = 0,085$). Переход с мезо- на макромасштабный уровень показан на рис. 4, в двумя пунктирными линиями, пересекающимися в точке с координатами $f_{тр}^n = 0,08$ и $(S_0^{отн}) = 0,64$. Удовлетворительная корреляция между $S_0^{отн}$ и $f_{тр}$ указывает на повышенную информативность критерия $S_0^{отн}$ и перспективность его использования для оценки работоспособности трибосопряжений по комплексу важнейших характеристик.

Выводы. Установлено неоднозначное влияние СК с различными присадками на параметры шероховатости поверхностей трения: одному и тому же значению R_a для двух групп СК соответствуют различные значения R_z , различающиеся между собой в 1,22 раза.

Опорные кривые профиля поверхности трения (параметр б) и относительная площадь под опорными кривыми S_0 определяют несущую способность деталей при использовании СК с присадками. Между S_0 и б существует степенная зависимость, близкая к кубической ($S_0 = 0,4b^{0,3}$), которую можно использовать при оценке работоспособности трибосопряжений.

Установлены оптимальные значения R_a и R_z , соответствующие наименьшим потерям энергии на трение и наибольшим значениям S_0 на различных масштабных уровнях изнашивания.

Выявлена взаимосвязь параметра S_0 с коэффициентом трения $f_{тр}$ и температурой T_K на изнашиваемых поверхностях $f_{тр} \sim S_0^{-1,43} \sim T_K^{2,0}$, которая позволяет по значениям S_0 прогнозировать фрикционно-температурные условия работы трибосопряжений.

Список литературы

1. Погодаев Л. И., Кузьмин В. Н., Дудко П. П. Повышение надежности трибосопряжений. Санкт-Петербург, Академия транспорта, 2001, 304 с.
2. Погодаев Л. И., Кузьмин В. Н. и др. Структурно-энергетический подход к оценке влияния смазочных композиций на износостойкость трибосопряжений // Трение и износ. Ч. П. Т. 22, №3, 2001, с. 299-304.
3. Погодаев Л. И., Кузьмин В. Н., Чулкин С. Н. Структурно-энергетический подход к оценке влияния смазочных композиций на износостойкость трибосопряжений. Ч: 1. Структурно-энергетическая модель изнашивания // Трение и износ, т. 22, № 2, 2001, с. 168-172.
4. Погодаев Л. И. Моделирование процессов изнашивания материалов и деталей машин на основе структурно-энергетического подхода // Проблемы машиностроения и надежности машин, № 5, 1998, с. 94-103.
5. Ломухин В. Б., Ломухина Л. В., Мироненко И. Г. и др. Испытания модификатора трения «Форум» // Трение, износ, смазка, вып. 13, 2002, с. 19-24.