

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ХИМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ПРИСАДОК ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

С. В. КОРОТКЕВИЧ, Н. Ф. СОЛОВЕЙ, С. М. МАРТЫНЕНКО, Н. Б. ГАЙДУК, О. Ю. КОМКОВ

Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАНБ, г. Гомель, Беларусь
ГСКБ ПО "Гомсельмаш", г. Гомель, Беларусь

Введение. В настоящее время наименее изученным объектом, определяющим процессы трения и износа узлов машин, является структура и триботехнические свойства граничных смазочных (ГС) слоев. Центральным в проблеме граничной смазки является вопрос о толщине и свойствах эффективного граничного смазочного слоя [1]. Метод электрофизического зондирования позволяет исследовать толщину и сплошность ГС смазочных сред [2]. При трении на поверхности металлов, представленных оксидными пленками, могут формироваться слои трех типов:

- а) слой физически адсорбированных молекул смазки в результате действия ван-дер-ваальсовых сил (*A*-слой);
- б) слой хемосорбируемых молекул смазки (*D*-слой);
- в) химически модифицированный слой, который образуется в результате разложения и прямого взаимодействия элементов присадок с поверхностью металла (*M*-слой) [3–5].

С повышением требований к смазочным материалам, применяемым в тяжело нагруженных узлах трения, наиболее актуально исследование структуры, а также триботехнических свойств *D* и *M* слоев. Изучение перечисленных выше свойств имеет и чисто прикладное значение, связанное с оценкой эффективности смазочных сред.

В качестве базового масла использовалось инактивное вазелиновое масло (ВМ), формирующее *A* и *D* – слои [5]. В качестве объекта исследования, формирующего *A*, *D* и, возможно, *M*-слои использовалось трансмиссионное масло ТАП-15В, применяемое для смазывания тяжело нагруженных цилиндрочных, конических и спирально-конических передач, с добавками наиболее широко известных антифрикционных присадок: Фриктол-НП, МКФ-18 производства СНГ и metal conditioner Militec производства Militec Incorporated (США).

Изучение физико-механических, антифрикционных и противоизносных свойств *A*, *D* и *M* слоев производилось моделированием температурных режимов, которые могут иметь место в практике. Для этого использовались следующие методы: электрофизического зондирования, рентгенофотозлектронной спектроскопии (РФЭС) и атомно-силовой микроскопии (АСМ). Регистрация электрической проводимости и фрикционных характеристик в случае номинально точечного контакта позволяет количественно оценивать толщину и несущую способность *A*, *D* и *M*-слоев с одновременным изучением их антифрикционных и противозадирных свойств [5]. Метод РФЭС позволяет определить наличие химических элементов и их связей в процессе взаимодействия элементов смазочных сред с поверхностью металла при нагревании [6]. Метод АСМ позволяет изучать топографию и фазовую структуру поверхности [7].

Методика эксперимента. Исследования проводились на микротрибометре ММТ по схеме зонд-плоскость [8]. Диапазон прилагаемых нагрузок от 0.2 Н до 3 Н. Скорость возвратно-поступательного движения ползуна составляла порядка 12 мкм/с при исследовании антифрикционных свойств и 300 мкм/с при изучении противоизносных свойств. Измерение контактного сопротивления осуществлялось по четырех проводной схеме при напряжении на разомкнутом контакте 50 мВ [9]. Регистрация контактного сопротивления и коэффициента трения осуществлялась одновременно. В качестве сферы использовались шарики диаметром 4 мм из стали ШХ-15. В качестве плоского образца использовались полированные пластинки (12–13 класс шероховатости) из стали

65Г ($H_T = 2.5$ ГПа, $R_n = 0.015-0.03$ мкм, $\rho = 3 \cdot 10^{-7}$ Ом*м). Химический состав стали 65Г следующий: С-0.62-0.70%, Si-0.17-0.37%, Mn-0.9-1.2%, Cr < 0.25%, S < 0.04%, P < 0.035% [10].

В экспериментах использовалось масло ТАП-15В, содержащее противозадирную и депрессорную присадки, включающие химически активные элементы — серу и фосфор [ГОСТ 23652-79]. Для улучшения антифрикционных и противозадириных свойств трансмиссионного масла в него добавляли присадки с концентрацией 2 % от объема. Присадка "Фриктал-НП" — молибденсодержащий препарат [ТУ 385901200-90], присадка "МКФ-18" — металлоплакирующая присадка, содержащая поверхностно активное вещество (ПАВ) — олеат меди [ТУ 38.101.1127-87]. Химический состав присадки "Militec" исследовался методами рентгенофотозлектронной спектроскопии (РФЭС) и представлен в таблице. Известно, что действие присадки Militec основано на формировании прочных углерод-водородных связей с поверхностью металла. Масло наносилось на пластинки с последующим легким втиранием в поверхность и выдержкой ($t = 7,2$ кс) на воздухе при комнатной температуре, а также температурах 100 и 200 °С в термощкафу. Тем самым моделировался соответственно мягкий и умеренный режимы теплового воздействия на масло [5].

Наличие D-слоев на поверхности контролировалось методом рентгено-фотозлектронной спектроскопии (РФЭС) с использованием электронного спектрометра ЭС 2401.

Сформированные слои исследовались при комнатной температуре методами электрофизического зондирования [11]. О механических свойствах слоев делалось заключение по изменению зависимости контактного сопротивления от среднего контактного давления $R_c(P)$ при статическом положении образцов. Об антифрикционных свойствах ГС — по уровню силы сдвига и контактного сопротивления при переходе от покоя к движению, об износостойкости слоев — по изменению зависимостей $f(n)$ и $R_c(n)$ при заданной нагрузке N . Аналогичные эксперименты проводились также с пластинками после смывания слоя масла органическими растворителями. По наблюдаемому эффекту "последствия" фиксировали наличие отложений на поверхности стали.

Для получения зависимостей $R_c(P)$ на каждой ступени нагрузки регистрировали R_c в различных точках плоскости с последующей статобработкой данных. Расчет по известным формулам показал, что в применяемом диапазоне нагрузок ($N = 0,1...3$ Н) сохраняется преимущественно упругий характер деформирования. Параметры контакта: $a = 11-35$ мкм, $S = (3,8-37,4) \cdot 10^{-10}$ м², $P = 260-800$ МПа, $R_s = 13,5...4,0$ МОм. Большинство экспериментов по оценке антифрикционных и противозадириных свойств исследуемых поверхностей проведены при постоянной нагрузке $N = 0,5$ Н, дающей первоначально герцевский контакт с параметрами: $a \approx 19$ мкм, $P \approx 440$ МПа, $R_s \approx 8$ МОм.

Результаты и обсуждение. Несмазанный контакт.

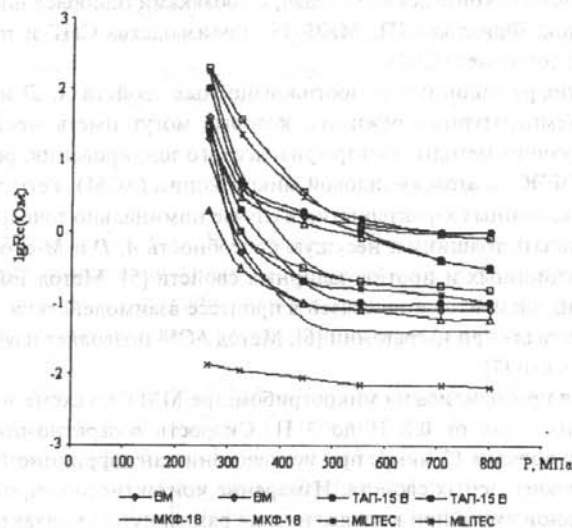


Рис. 1. Зависимость контактного сопротивления от давления со смазочными средами после термообработки при 20°С

Прочностные свойства. Как известно, при неразрывной смазочной прослойке R_c определяется из последовательно включенных сопротивлений стягивания, оксидной пленки и туннельного сопротивления контактного зазора со смазкой [11]. Так как абсолютная величина сопротивления стягивания очень мала (рис. 1), то ею можно пренебречь. Ранее нами установлено, что при комнатной температуре оксидная пленка стали 65Г представляет собой неразрывный полупроводник, представленный γ модификацией Fe_2O_3 , толщиной 7,2 нм и $\rho \approx 0,1$ Ом*м [12]. Полученные экспериментальные зависимости $R_c(P)$, подтверждают неразрывность оксидной пленки на стали (рис. 1).

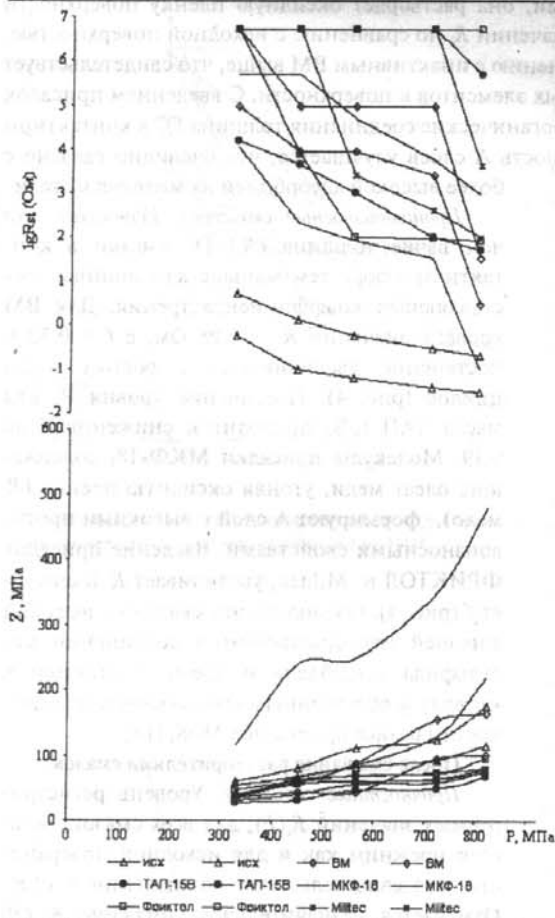


Рис. 2. Зависимость силы сдвига и контактного сопротивления при переходе от покоя к движению для исходной поверхности и после смыывания слоев смазки термообработанных при 200 °С

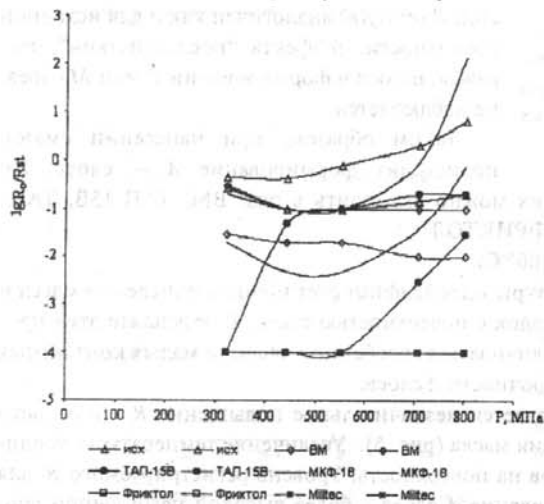


Рис. 3. Зависимость отношений контактных сопротивлений от давления при переходе от состояния покоя к движению после смыывания слоев смазки термообработанных при 200 °С.

Антифрикционные свойства. Как известно, прочность на сдвиг определяется соотношением $Z = F/S$, где F определяется экспериментально, а S рассчитывается исходя из классической теории Герца для упругой деформации. В работе [12] приведены расчетные значения площади контакта для γ модификации Fe_2O_3 . Абсолютные значения Z несколько выше значений, приведенных в работе [12] (рис. 2), что объясняется более высоким классом шероховатости поверхности. Увеличение фактической площади контакта приводит к снижению значений R_c и росту адгезионной составляющей прочности на срез. Экспериментальные данные свидетельствуют, что переход к разрушению оксидной пленки и образованию микропятен, т. е. когда выполняется условие $(R_o/R_n) > 1$, наблюдается при меньших значениях нагрузки $N = 2$ Н (рис. 3) и среднем контурном давлении 710 МПа.

Противоизносные свойства. Первый цикл скольжения характеризуется относительно низким f и R_c (рис. 4). При $n = 10-20$ циклов скольжения отмечается резкое увеличение f и R_c , что связано с разрушением оксидной пленки. Таким образом, $n_{ст} = 10-20$ циклов является количественной оценкой перехода системы в режим интенсивного адгезионного изнашивания.

Смазывание маслами без их термообработки.

Прочностные свойства. Известно, что при наличии А слоев смазки на поверхности значения R_c определяются преимущественно туннельным эффектом, т. е. толщиной смазочной прослойки в контактом зазоре [10]. Анализируя изменение зависимостей $R_c(P)$ делают заключение о механической прочности ГС смазочных сред.

Из анализа зависимостей $R_c(P)$, представленных на рис. 1, видно, что по мере увеличения механической прочности ГС изучаемых смазок можно расположить в ряд: ВМ, ТАП-15В, ТАП-15В+МКФ-18, ТАП-15В+МИЛТЕС, ТАП-15В + ФРИКТОЛ. Толщина А слоя смазок составляет 0,9 нм при $P = 260$ МПа и снижается до 0,5 нм и менее при $P = 800$ МПа. Поскольку исследуемая присадка МКФ-18 в соответствии с ее химической структурой обладает в

определенной степени кислотными свойствами, она растворяет оксидную пленку поверхности [13], что выражается в некотором снижении значений R_c по сравнению с исходной поверхностью. Прочностные свойства масла ТАП-15В по сравнению с инактивным ВМ выше, что свидетельствует о более высокой адсорбции химически активных элементов к поверхности. С введением присадок содержащих дисульфид молибдена и кремнийорганические соединения толщина ГС в контактном зазоре несколько выше. Нагрузочная способность А слоев улучшается, что очевидно связано с более высокой адсорбцией их молекул к стали.

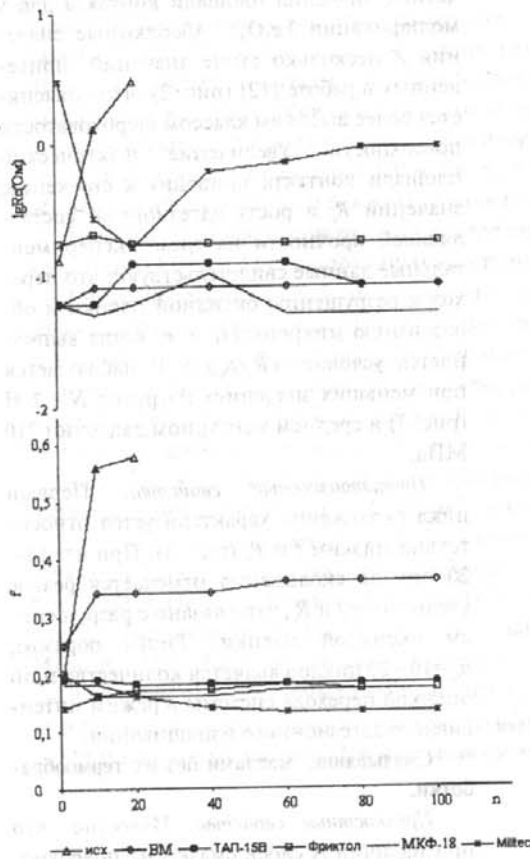


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения и контактного сопротивления от числа циклов скольжения для смазочных сред термообработки при 20°C.

прочностным и противоизносным свойствам их можно выстроить в ряд: ВМ, ТАП-15В, ТАП-15В+МКФ-18, ТАП-15В+МИЛИТЕС, ТАП-15В+ФРИКТОЛ.

Смазывание маслами с их термообработкой (100 °С).

Прочностные свойства. Повышение температуры интенсифицирует процесс окисления масел и протекание химических реакций молекул присадок с поверхностью стали. В результате этих процессов толщина контактного зазора должна увеличиваться, особенно в области малых контактных давлений, что приведет к росту механической прочности А слоев.

Действительно, для инактивного ВМ отмечается незначительное повышение R_c в области малых нагрузок, что связано с началом окисления масла (рис. 5). Увеличение температуры усиливает адсорбцию химически активных элементов на поверхность. Уровень регистрируемого R_c для масла ТАП-15В несколько возрастает. Формирование А слоев с более высокой нагрузочной способностью отмечается для присадок: Фриктол и Милитес (рис. 5). Толщина А слоя сформированного с участием присадки Милитес увеличивается до 0,6 нм при $P = 800$ МПа. С увеличением температу-

Противоизносные свойства. Известно, что чем выше толщина (R_c) ГС смазки в контактном зазоре тем меньше адгезионная составляющая коэффициента трения. Для ВМ уровень значений $R_c = 0,08$ Ом, а $f = 0,33$ и постепенно увеличивается с ростом числа циклов (рис. 4). Повышение уровня R_c для масла ТАП-15В, приводит к снижению f до 0,19. Молекулы присадки МКФ-18, содержащие олеат меди, утоня оксидную пленку (R_c мало), формируют А слой с высокими противоизносными свойствами. Введение присадок ФРИКТОЛ и Милитес, увеличивает R_c и снижает f (рис. 4). Очевидно, это связано с высокой адгезией маслорастворимых соединений дисульфида молибдена и кремнийорганики к металлу и облегченным скольжением по плоскостям базиса кристаллов MoS_2 [14].

После смывания растворителями смазок.

Прочностные свойства. Уровень регистрируемых значений $R_c(P)$, для всех смазок, остается прежним как и для исходной поверхности, что свидетельствует об удалении А слоя. Отмечается незначительное снижение $R_c(P)$ для присадки МКФ-18.

Противоизносные свойства. Вид зависимости $R_c(n)$ и $f(n)$ аналогичен как и для исходной поверхности. Эффекта "последствия", выражающегося в формировании D или M слоев, не наблюдается.

Таким образом, при нанесении смазок происходит формирование А — слоев. По

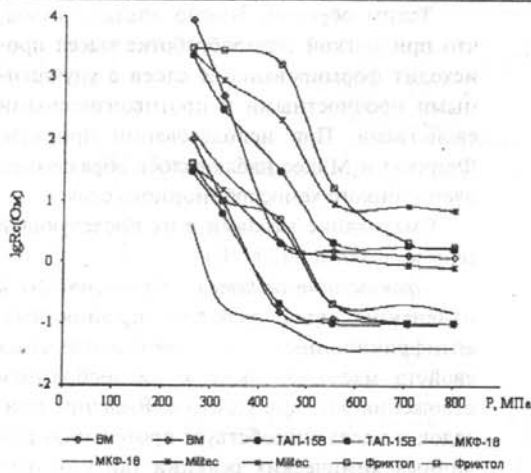


Рис. 5. Зависимость контактного сопротивления от давления со смазочными средами после термообработки при 100°C

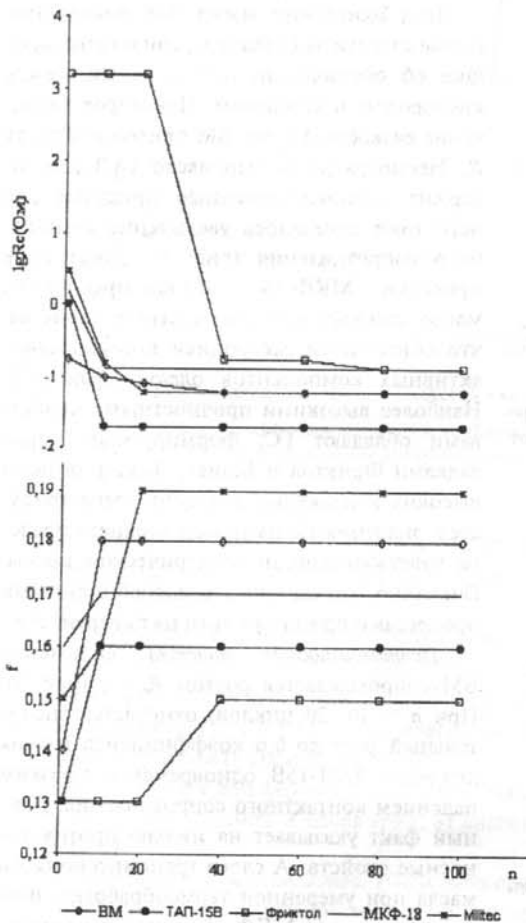


Рис. 6. Зависимость коэффициента трения и контактного сопротивления от числа циклов скольжения для смазочных сред термообработки при 100°C.

ры кислотные свойства присадки МКФ-18 проявляются более полно. Очевидно, произошло утонение оксидной пленки, что выражается в небольшом снижении R_c (рис. 5).

Противоизносные свойства. Формирование более прочных по механической прочности A слоев приводит к увеличению R_c и снижению f для всех смазок (рис. 6). Особенно отчетливо наблюдается это явление при первых циклах ($n = 10-20$) скольжения. По мере увеличения механического воздействия на A слои их толщина уменьшается, что приводит к росту коэффициента трения.

Незначительное окисление ВМ приводит к росту R_c и снижению f (рис. 6). Интересно отметить, что по мере износа A слоя масла ТАП-15В ($n = 10$) регистрируется снижение R_c почти до уровня сопротивления стягивания, а коэффициент трения снижается до 0,16. В результате термообработки химические соединения содержащие серу и фосфор взаимодействуя с оксидной пленкой утоняют ее. Роста f при этом не наблюдается. Добавление присадки МКФ-18 к трансмиссионному маслу незначительно увеличивает уровень R_c , что связано с адсорбцией поверхностно-активных компонентов масла. Значительный рост R_c наблюдался при введении в масло присадки Фриктола. Известно, что MoS_2 является адсорбционно активным веществом, причем скорость адсорбции зависит от чистоты исходного дисульфида молибдена и его дисперсности [14]. При $n=20$ циклов несущая способность A слоя резко снижается, а коэффициент трения возрастает (рис. 6).

После смывания растворителями смазок.

Прочностные свойства. Уровень регистрируемых значений $R_c(P)$, остается прежним как и для исходной поверхности. Отмечается незначительное увеличение R_c для смазок с присадками Фриктал и ММес.

Противоизносные свойства. При первом цикле скольжения, для смазок с присадками Фриктал и ММес, уровень регистрируемых значений $R_c = 0,5$ Ом (рис. 7), что несколько выше чем для исходной поверхности (рис. 4). Регистрируется незначительное снижение f по сравнению с исходной поверхностью стали. Произошло формирование очень тонкого по толщине D слоя, износ которого наблюдается при $n = 3$.

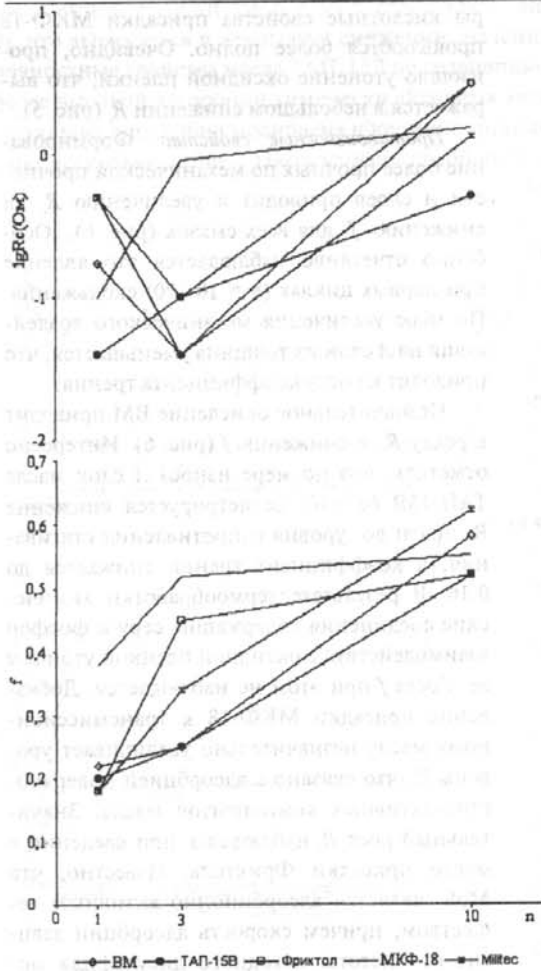


Рис. 7. Зависимость коэффициента трения и контактного сопротивления от числа циклов скольжения после смывания смазочных сред термообработанных при 100°C

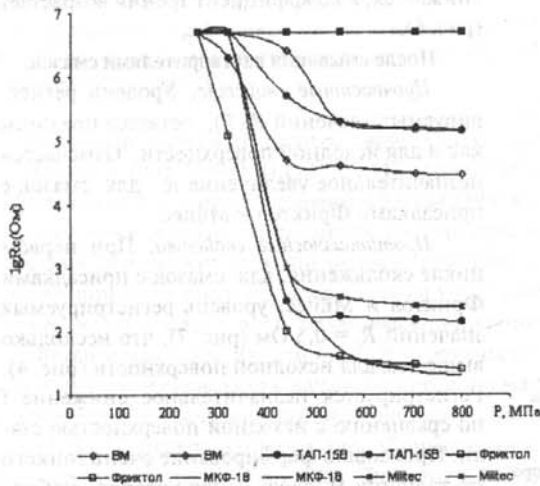


Рис. 8. Зависимость контактного сопротивления от давления со смазочными средами после термообработки при 200°C

Таким образом, можно сделать вывод, что при мягкой термообработке масел происходит формирование А слоев с улучшенными прочностными и противоизносными свойствами. При использовании присадок Фриктал и Militec наблюдалось образование очень тонкого хемосорбционного слоя.

Смазывание маслами с их последующей термообработкой (200 °С).

Прочностные свойства. Это приводит к изменению цвета, вязкости, прочностных, антифрикционных и противоизносных свойств масла, а также к смолообразным отложениям на поверхности. Введение присадок в масла способствует протеканию различных химических реакций (антиокислительных, трибополимеризующих и т. д.) их с поверхностью. В результате несущая А слоев смазок возрастает (рис. 8).

При окислении масел VM появляются новые сателлиты (Таблица), свидетельствующие об образовании новых связей между кислородом и углеродом. Некоторое увеличение вязкости А слоев VM приводит к росту R_c . Несмотря на то, что масло ТАП-15В содержит антиокислительные присадки для него тоже отмечалось увеличение контактного сопротивления (рис. 8). Добавление присадки МКФ-18 в трансмиссионное масло снижает его прочностные свойства, что объясняется десорбцией поверхностно-активных компонентов олеата меди [13]. Наиболее высокими прочностными свойствами обладают ГС, формируемые присадками Фриктал и Militec. Даже в области высоких контактных давлений, регистрируются значения R_c на уровне верхнего предела чувствительности электрической схемы. Очевидно, это связано с хемосорбционными процессами протекающими на поверхности.

Противоизносные свойства. Окисление VM сопровождается ростом R_c и f (рис. 9). При $n = 10-20$ циклов, отмечается значительный рост до 0,6 коэффициента трения для масла ТАП-15В, одновременно с резким падением контактного сопротивления. Данный факт указывает на низкие противоизносные свойства А слоев трансмиссионного масла при умеренной термообработке. Введение присадки МКФ-18 в масло незначительно улучшает его противоизносные свойства. Увеличение f и снижение R_c регистри-

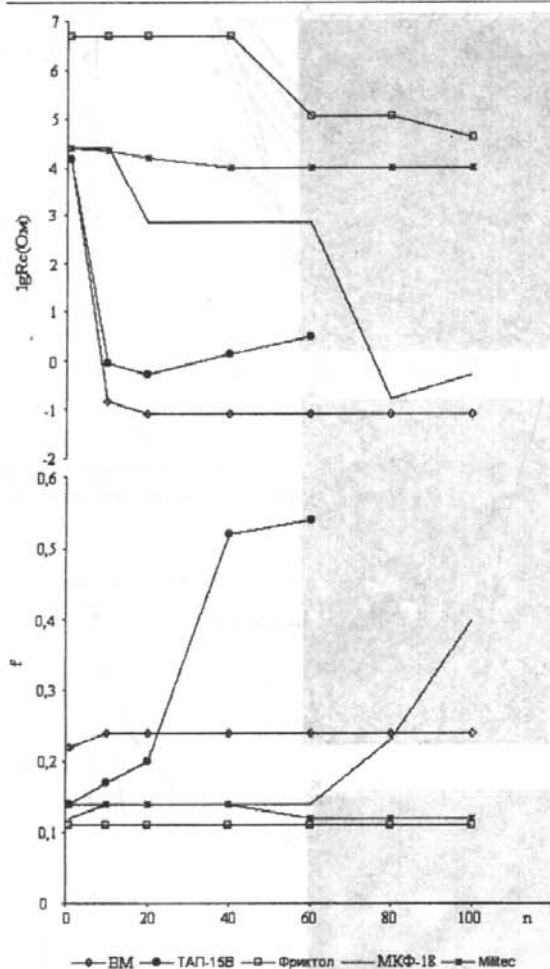


Рис. 9. Зависимость коэффициента трения и контактного сопротивления от числа циклов скольжения для смазочных сред термообработанных при 200°C

5,5 мкм по ширине и 270-1000 нм по высоте. Таким образом, ультрадисперсность частиц образованных при термообработке присадки Фриктол выше, чем присадки Militec.

Прочностные свойства. Для всех смазок уровень $R_c(P)$ остается очень высоким (рис. 11), что свидетельствует о протекании хемосорбционных процессов и формировании D слоев. Наблюдается незначительное снижение по абсолютным значениям зависимостей $R_c(P)$ по сравнению с зависимостями $R_c(P)$ для не смытых поверхностей. Этот факт указывает на большой вклад в контактную проводимость D слоя по сравнению с A слоем. Как известно, химическая связь более прочная по сравнению с ван-дер-ваальсовой. Отсюда следует, что ряд построенный по степени изменения прочностных свойств A слоев (рис. 8) аналогичен ряду по степени изменения $R_c(P)$ для D слоев (рис. 11).

Антифрикционные свойства. Нами наблюдается эффект "последствия" смазок, выражающийся в увеличении регистрируемых значений контактного сопротивления при сдвиге и в снижении прочности на срез (рис. 2). Даже инактивное ВМ, из продуктов своего окисления, образует D слой, незначительно снижающий прочность на срез, но обеспечивающий упругий контакт (рис. 3).

ровалось при $n = 60$. Наблюдается процесс разрушения A слоя. Высокие противоизносные свойства A слоев наблюдаются с использованием присадок Militec и Фриктол (рис. 9).

После смывания растворителями смазок.

Образование D слоев контролировалось методом РФЭС (Таблица). Исследовались хемосорбционные слои формируемые инактивным ВМ и присадками, обладающими наилучшими прочностными, антифрикционными и противоизносными свойствами, Фриктол и Militec. Скорость ионного травления составляет 0,8 ангстрем в минуту. По интенсивности пика железа можно делать заключение о толщине D слоя. Толщина D слоя, образуемого присадкой Фриктол, составляет 8 ангстрем. Интенсивность пика Fe, формируемого присадкой Фриктол, значительно ниже чем присадкой Militec после ионного травления в течение 10 мин. Толщина D слоя, формируемого присадкой Фриктол, больше толщины слоя, образуемого присадкой Militec.

Структура D слоев определяет их трибофизические свойства. На рис. 10 представлены изображения поверхности, полученные на АСМ. Как известно, дисперсность частиц определяется специфической процесса взаимодействия химически активных компонентов присадки с поверхностью металла. Размер частиц, образуемых при действии присадки Фриктол, составляет: 0,8–2,2 мкм по ширине и 100-150 нм по высоте. Размер частиц, образуемых при действии присадки Militec, составляет: 1,7–

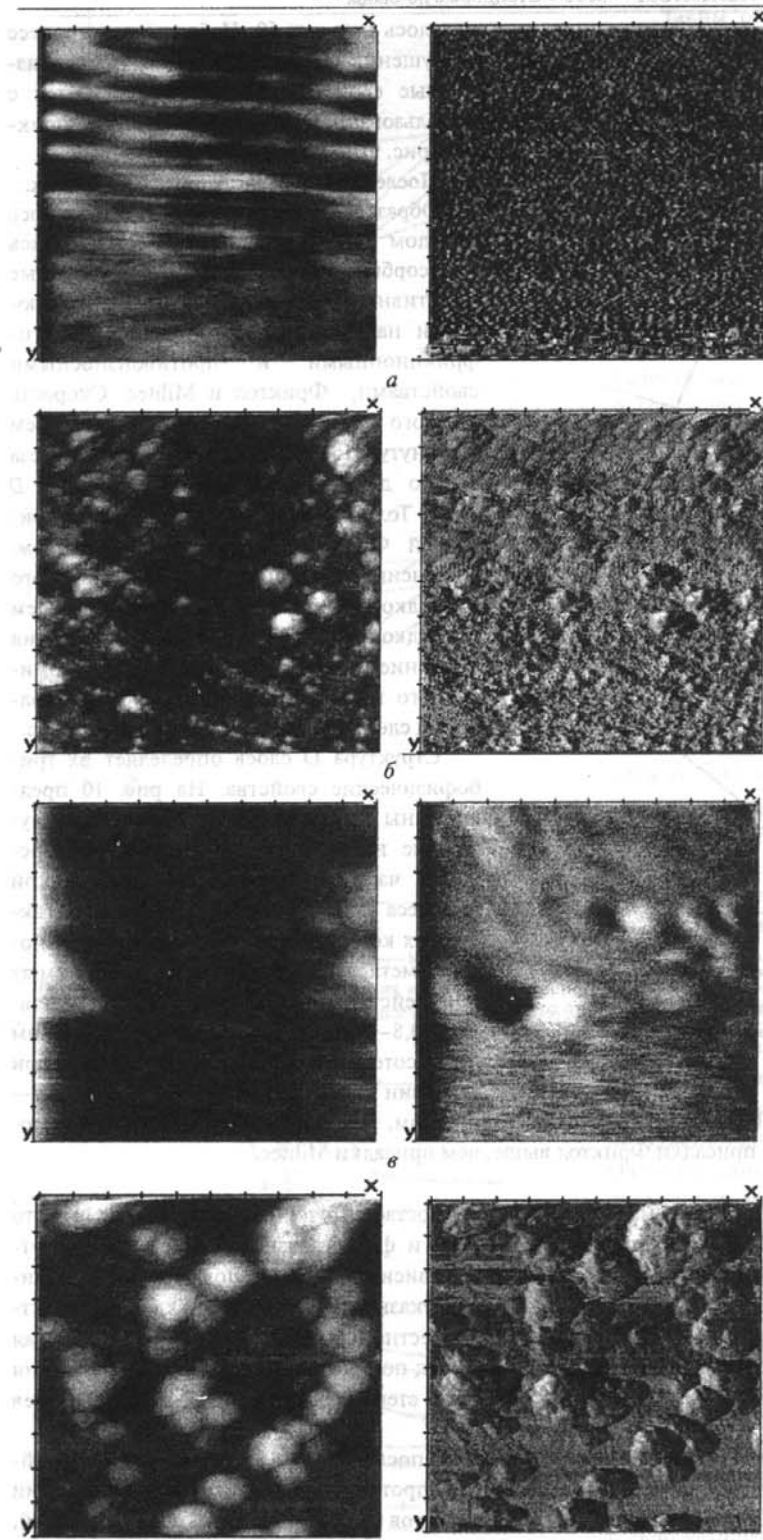


Рис. 10. АСМ-изображение а) исходной поверхности (20×20 мкм) и поверхности после смыва смазочных сред, термообработанных при 200 °С: б) Фрикол (22×22 мкм); в) Фрикол, дорожка трения (36×36 мкм); г) Militec (22×22 мкм)

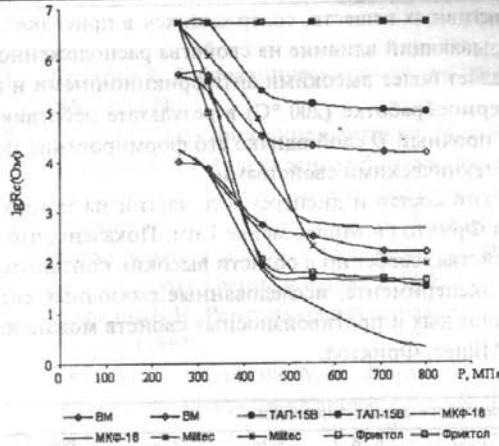


Рис. 11. Зависимость контактного сопротивления от давления после смывания смазочных сред термообработанных при 200°C.

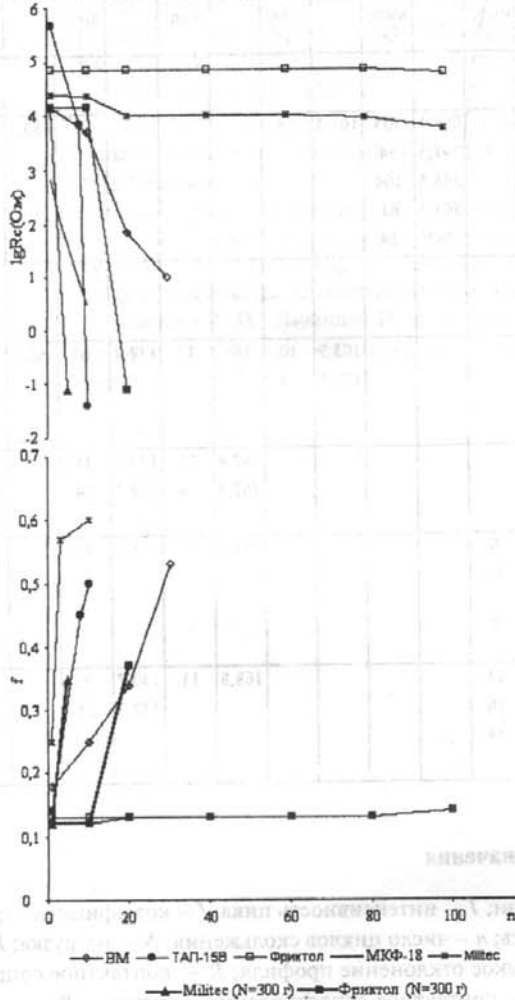


Рис. 12. Зависимость коэффициента трения и контактного сопротивления от числа циклов скольжения после смывания смазочных сред термообработанных при 200 °С

Химически активные соединения серы и фосфора, содержащиеся в ТАП-15В, разлагаются при повышенной температуре, образуют прочные химические соединения с металлом на поверхности трения [15]. Уровень значений R_c при этом увеличивается (рис. 2), а Z снижается. Отношение $R_c/R_{c0} < 1$, для всей области контактных давлений (рис. 3), что свидетельствует об упругом контакте [12]. Формируемый продуктами разложения присадки МКФ-18, D слой обладает наилучшими антифрикционными свойствами. В некоторых точках поверхности регистрировались низкие абсолютные значения R_c при $P = 800$ МПа. В области высоких контактных давлений отношение $R_c/R_{c0} > 1$, что свидетельствует об разрушении D слоя, а также оксидной пленки и образованию пятен микросварки. Наилучшими антифрикционными свойствами обладает D слой образуемый присадками Фриктол и Милитес. Даже при переходе от состояния покоя к движению, для ряда точек, контактное сопротивление оставалось на уровне верхнего предела чувствительности электрической схемы (рис. 2), что свидетельствует о сохранении D слоя.

Противоизносные свойства. Для смазочных сред представленных VM, ТАП-15В, ТАП-15В+МКФ-18, наблюдается значительный рост f и R_c (рис. 12). Проявляется эффект "stick-slip", свидетельствующий о разрушении D слоя. Хемосорбционный слой, формируемый присадками Милитес и Фриктол, обладает высокими противоизносными свойствами. Лишь с увеличением контактного давления почти в 2 раза (с 440 МПа до 800 МПа) удается разрушить D слой. Причем проявление эффекта "stick-slip" для присадки Фриктол наблюдается при $n = 15-20$ циклов, а для присадки Милитес при $n = 5-10$ циклов. Этот факт свидетельствует о более высоких противоизносных свойствах присадки Фриктол.

Заключение. Используемая методика проведения экспериментов позволяет изучать свойства A и D слоев отдельно. Установлено влияние термообработки смазок на формирование A и D слоев. При комнатных температурах (20–25 °С) наблюдалось образование A слоев. Отсутствует эффект "последствия" смазок. С уве-

личением температуры до 100 °С молекулы активных веществ, содержащихся в присадках, начинают формировать очень тонкий *D* слой, оказывающий влияние на свойства расположенного над ним *A* слоя. Образовавшаяся система ГС обладает более высокими антифрикционными и противоизносными свойствами. При умеренной термообработке (200 °С) в результате действия хемосорбционных процессов образуется довольно прочный *D* слой однако его формирование не означает, что система ГС обладает высокими триботехническими свойствами.

Методами РФЭС и АСМ изучен химический состав и дисперсность частиц на поверхности. Толщины *D* слоев, формируемые присадками Фриктол и Militec менее 1 нм. Показано, что структура *D* слоев определяет их фрикционные свойства, особенно в области высоких контактных давлений. При данных условиях реализуемых в эксперименте, исследованные смазочные среды по степени улучшения прочностных, антифрикционных и противоизносных свойств можно выстроить в ряд: VM, ТАП-15В, ТАП-15В+МКФ-18, Militec, Фриктол.

Обра- зец, с	Время травле- ния, мин	Спектральные характеристики																	
		C1s		O1s		Fe2p		Mo3d		K2p		Si2p		S2p		P2p		F1s	
		<i>E</i> , эВ	<i>I</i> , имп/ с	<i>E</i> , эВ	<i>I</i> , имп/ с	<i>E</i> , эВ	<i>I</i> , имп/ с	<i>E</i> , эВ	<i>I</i> , имп/ с	<i>E</i> , эВ	<i>I</i> , имп/ с	<i>E</i> , эВ	<i>I</i> , имп/ с	<i>E</i> , эВ	<i>I</i> , имп/ с	<i>E</i> , эВ	<i>I</i> , имп/ с	<i>E</i> , эВ	<i>I</i> , имп/ с
Исх.	5	284,6	41	532,1	18	712,3	495												
Militec		284,6 288,6	399 77	532 533,2	234 194					293,1 291,5 284,5 293,2 281	105 54 104 61 14	101,4	15					689,1	1937
Исх. + VM(20 0 С)	2	289,1 284,6	19 76	531,8 530,1	257 638	718,9 710,5	309 476												
Исх. + ТАП- 15В+ Militec (200 С)	1 10	284,5 284,7	451 254	533,6 532,6 531,7	72 134 174							105,2 101,5	10 14	168 12	132,7 10	682 12			
	10	284,7	254	581,7 530,7	288 199	713,8 710,5 709,6	158 220 175							167,4 162,9	11 14	133,8 132,7	24 14		
Исх. + ТАП- 15В+ Фрик- тол (200 С)	1 10	288,5 284,5	30 360	532 530,5	134 62			235 232,2 228,9	6 14 9					163,3	9	133	8		
	10	290 284,6	15 282	532,8 530,9	61 131	710,2 708,1 707 704,1	58 42 31 21	235,6 232,1 288,9	13 16 14					168,8	11	130,7 132,9	8 14		

Обозначения

a – радиус пятна контакта; *E* – энергия связи; *I* – интенсивность пика; *f* – коэффициент трения; *Z* – прочность на срез; *H_т* – микротвердость; *n* – число циклов скольжения; *N* – нагрузка; *P* – контактное давление; *R_{ср}* – среднее арифметическое отклонение профиля; *R_с* – контактное сопротивление; *R_т* – сопротивление стягивания; *R_д* – контактное сопротивление в статике; *R_и* – контактное сопротивление при переходе от состояния покоя к движению; *S* – площадь пятна контакта; *T* – температура; *t* – время; *ρ* – удельное объемное сопротивление.

Литература

1. Дерягин Б. В. Механические свойства граничного смазочного слоя// Трение и износ, 7 (1986), N5, 773-779
2. Хольм Р. Электрические контакты. М. (1961)
3. Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения. М.: Физ-мат. лит. (1963)
4. Санин П. И. Химические аспекты граничной смазки// Трение и износ, 1 (1980), N1, 45-57
5. Кончиц В. В., Короткевич С. В., Кирпиченко Ю. Е., Плаза С., Маргелевски Л. Особенности формирования и трибо-физические свойства смазочных слоев при контакте с нагретой поверхностью// Трение и износ, 2 (2000), N2, 174-182
6. Нефедов В.И. Рентгеноэлектронная спектроскопия химических соединений. Справочник. М.: Химия. (1984)
7. Chizhik S. A., Goldade A. V., Korotkevich S. V., Dubravin A. M. Friction of smooth surfaces with ultrafine particles in the clearance// WEAR, 238 (2000), 25-33
8. Кончиц В.В., Кирпиченко Ю.Е., Короткевич С.В. Температурные испытания граничных слоев с использованием метода контактного электросопротивления// Трение и износ, 17 (1996), N 4, с. 513-526
9. Кончиц В. В., Короткевич С. В. Исследование прочности граничных смазочных слоев в зазорах молекулярного масштаба// Трение и износ, 13 (1992), N 6, с. 47-54
10. Машиностроительные материалы. М., Машиностроение 1980 г. Под ред. В. М. Раскатова
11. Кончиц В.В. Электропроводность номинально точечного контакта при граничной смазке // Ч.1. Трение и износ, 12 (1991), № 2, 267-277; Ч.2. Трение и износ, 12 (1991), № 3, 465-475
12. Короткевич С. В., Мартыненко С. М., Дубравин А. М. Влияние химического состава и структуры оксидных пленок стали на их триботехнические свойства// Трение и износ, 21 (2000), N 4, (в печати)
13. Назаренко Т. И., Лознецова Н. Н., Щеголев Г. Г., Топоров Ю. П. Исследование смазочных свойств масел с добавками медьсодержащих соединений// Трение и износ, 13 (1992), N 2, 324-327
14. Трояновская Г. И., Лобова Т. А. Исследования и перспективы применения самосмазывающихся материалов на основе дихалькогенидов тугоплавких металлов// Трение и износ, 1 (1980), N 2, 293-302
15. Заславский Р. Н., Лифшиц И. А., Боршевский С. Б., Загородний Н. Г., Ребров И. Ю. О некоторых особенностях механизма действия антифрикционных присадок к маслам// Трение и износ, 8 (1987), N 4, 684-691.