

T. A. Bogdanova, G. A. Merkulova, **A. A. Pereboeva**, T. A. Orelkina, A. Yu. Kopeikin

OPTIMIZATION OF CAST STRUCTURE OF ALLOY OF Mg–Zn–Zr SYSTEM BEFORE HOT DEFORMATION

The article presents studies of the structure and phase composition of ZK60A alloy (Russian analogue of alloy MA14) of Mg–Zn–Zr system after casting, homogenization and deformation with the use of macro- and microscopical analyses.

Keywords: magnesium alloy, structure, casting, homogenizational annealing, deformation.

© Богданова Т. А., Меркулова Г. А., **Перебоева А. А.**, Орелкина Т. А., Копейкин А. Ю., 2011

УДК 621.892

Б. И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов, Н. Н. Малышева, С. Б. Ковальский, Е. Г. Мальцева

ИЗМЕНЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ СТАЛИ ШХ15 ПРИ ТЕРМОСТАТИРОВАНИИ ЕЕ В СРЕДЕ МИНЕРАЛЬНОГО МАСЛА М10-Г_{2к}

Приведены результаты исследования изменения износостойкости стали ШХ15 при ее термостатировании в среде минерального моторного масла М10-Г_{2к} и механохимические процессы при граничном трении скольжения.

Ключевые слова: термостатирование смазочного масла, относительный износ, показатель противоизносных свойств, ток фрикционного контакта, пластическая и упругопластическая деформация, диаметр пятна износа, покрытие.

Подшипники качения работают как в жидких смазочных материалах различного назначения, так и в пластичных смазках. Выбор подшипников основан на расчетах долговечности, условной нагрузки, коэффициента работоспособности и расчетной грузоподъемности [1–3]. Недостаточно изучены механохимические процессы, протекающие в контакте тел качения, и влияние температуры на эти процессы.

Цель работы – исследовать влияние температуры на противоизносные свойства смазочного масла, износостойкость подшипниковой стали ШХ15 и механохимические процессы при граничном трении скольжения.

Методика исследования. При работе подшипников качения на поверхностях трения реализуются процессы самоорганизации [4–6] как защитная функция от избыточной тепловой энергии. При этом на поверхности трения образуются вторичные структуры, а в смазочном материале под влиянием механохимических, тепловых и химических процессов происходит деструкция базовой основы и присадок, а также его окисление, т. е. происходит обмен лигандов между металлом и смазочным маслом. Для исследования механизма самоорганизации методика практически исключала окислительные процессы и моделировала процессы самоорганизации путем термостатирования обоймы подшипника в смазочном масле. При этом на поверхности обоймы образовались химические соединения, а в смазочном материале протекали процессы деструкции. Испытания обоймы с покрытием и без него в термостатированном масле позволили выявить влияние деструкции масла на его противоиз-

носные свойства и изменение износостойкости стали при наличии на ее поверхности комплексных химических соединений (покрытий).

Исследования проводились на приборе для определения температурной стойкости смазочных материалов в диапазоне температуры от 140 до 240 °С. Температурная стойкость оценивалась по изменению коэффициентов поглощения светового потока, вязкости и летучести. Для этого проба масла массой 100 г испытывалась при температурах от 140 до 240 °С в течение 7 ч при атмосферном давлении, температура масла в процессе испытания поддерживалась автоматически терморегулятором ТР101 с точностью ±1 °С. В качестве датчика использовалась термопара «хромель–капель».

Для оценки противоизносных свойств термостатированных масел они испытывались на трехшариковой машине трения со схемой трения «шар–цилиндр» [7]. Причем через один из шариков при изнашивании пропускался постоянный ток (100 мкА) от стабилизированного источника питания (3В) для исследования механохимических процессов, протекающих на фрикционном контакте [8]. В качестве испытательных образцов применялись шары диаметром 9,5 мм от подшипника № 204 и верхняя обойма роликоподшипника 7208 диаметром 80 мм. Параметры трения следующие: нагрузка 13 Н, скорость скольжения 0,68 м/с, температура испытания 80 ± 0,1 °С.

Влияние продуктов деструкции на износостойкость стали ШХ15 оценивалось сопоставлением результатов износа двух обойм подшипника, одна из которых термостатировалась в масле для получения по-

крытия. Обе обоймы испытывались в термостатированном масле. Износостойкость сталей оценивались по диаметру пятна износа и величине тока, протекающего через фрикционный контакт [9].

Результаты исследований и их обсуждение. Для определения стали испытания на машине трения проводились с обоймой без покрытия и с покрытием (табл. 1). Установлено, что износостойкость стали с покрытием уменьшается. Для оценки влияния покрытия на износостойкость стали предложен коэффициент относительного износа $K_{ОИ}$ определяемый отношением

$$K_{ОИ} = I/I_{п}, \quad (1)$$

где I – износ при испытании обоймы без покрытия в термостатированном масле; $I_{п}$ – износ при испытании обоймы с покрытием в термостатированном масле.

Зависимость коэффициента относительного износа от температуры испытания представлена на рис. 1, а. Установлено, что при температуре испытания 140 °С

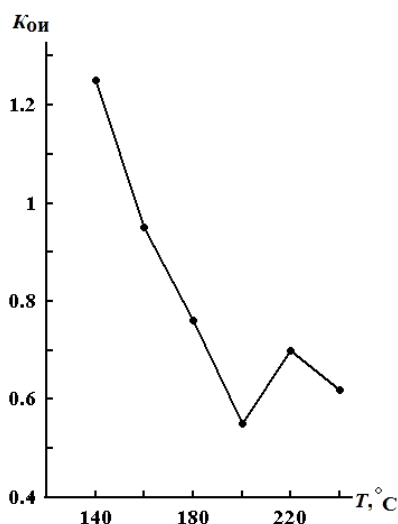
износ обоймы с покрытием меньше износа обоймы без покрытия. Зависимость $K_{ОИ} = f(T)$ линейно уменьшается до температуры испытания 200 °С, а при температурах 220 и 240 °С значение коэффициента $K_{ОИ}$ колеблется, т. е. можно полагать, что предельной температурой работоспособности стали ШХ15 является температура 160 °С, так как при ней коэффициент $K_{ОИ}$ равен единице, т. е. $U = U_{п}$.

Влияние продуктов деструкции, образующихся при термостатировании минерального масла, исследовалось зависимостью коэффициента относительного износа $K_{ОИ}$ от коэффициента поглощения светового потока $K_{П}$ (рис. 1, б). С увеличением коэффициента $K_{П}$ до значения 0,3 ед. коэффициент относительного износа $K_{ОИ}$ уменьшается за счет увеличения обоймы с покрытием. При значениях коэффициента $K_{П}$ от 0,3 до 0,7 ед. коэффициент $K_{ОИ}$ изменяется незначительно, т. е. противоизносные свойства масла практически не зависят от наличия покрытия на поверхности обоймы.

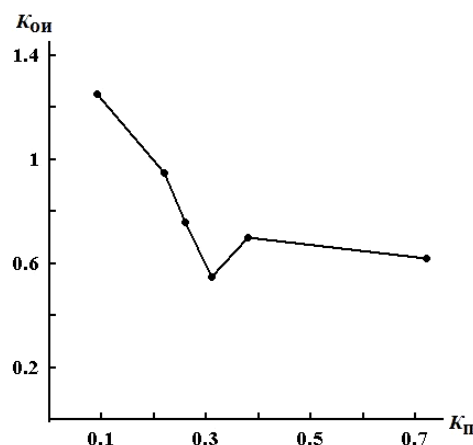
Таблица 1

Результаты исследования термостатирования минерального масла М10-Г_{2к} и износостойкости стали ШХ15

Температура испытания, °С	Коэффициент поглощения светового потока, $K_{П}$	Износ стали ШХ15		Удельная плотность продуктов деструкции		Коэффициент относительного износа	Коэффициент относительной удельной плотности
		без покрытия	с покрытием	без покрытия $K_{П}/S_1$	с покрытием $K_{П}/S_2$		
140	0,09	00,33	0,27	1,06	1,58	1,25	0,67
160	0,22	0,27	0,29	3,86	3,33	0,95	1,16
180	0,26	0,34	0,45	2,86	1,64	0,76	1,74
200	0,31	0,26	0,47	5,85	1,79	0,55	3,27
220	0,387	0,32	0,45	4,75	2,39	0,70	1,99
240	0,72	0,33	0,54	8,47	3,14	0,62	2,7



а



б

Рис. 1. Зависимость коэффициента относительного износа $K_{ОИ}$ стали ШХ15: а – от температуры испытания минерального масла М10-Г_{2к}; б – от коэффициента поглощения светового потока

На основании изложенного (рис. 1) предложен показатель $\Pi_{\text{д}}$, названный показателем удельной плотности продуктов деструкции на площади фрикционного контакта, определяемый отношением:

$$\Pi_{\text{д}} = K_{\text{П}} / S, \quad (2)$$

где $K_{\text{П}}$ – коэффициент поглощения светового потока при термостатировании минерального масла; S – площадь пятна износа обоймы с покрытием и без покрытия.

Зависимость данного показателя представлена на рис. 2, из которого видно, что при испытании обоймы с покрытием в термостатированном масле удельная плотность продуктов деструкции (кривая 2) увеличивается с ростом температуры испытания от 180 до 240 °С, иная тенденция наблюдается при испытании обоймы без покрытия в термостатированном масле (кривая 1). В диапазоне температур от 140 до 240 °С наблюдаются колебания показателя $\Pi_{\text{д}}$ за счет колебания диаметра пятна износа.

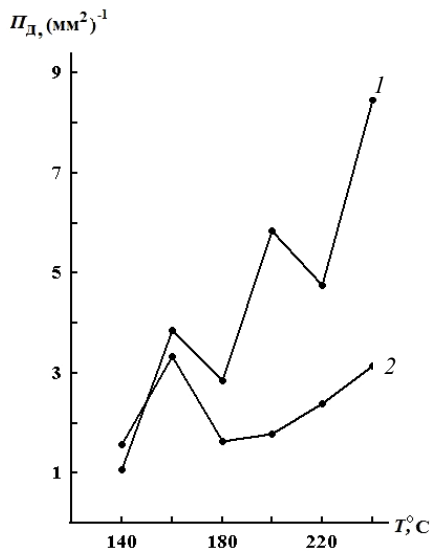


Рис. 2. Зависимость удельной плотности продуктов деструкции на площади фрикционного контакта от температуры испытания минерального моторного масла М10-Г_{2К}: 1 – обойма без покрытия; 2 – обойма с покрытием

Однако удельная плотность продуктов деструкции базовой основы и присадок на фрикционном контакте выше при испытании обоймы без покрытия, чем при испытании ее с покрытием за счет меньшей площади контакта, что видно из зависимости относительной удельной плотности продуктов деструкции (рис. 3), определяемой коэффициентом $K_{\text{отн}}$:

$$K_{\text{отн}} = \Pi_{\text{д1}} / \Pi_{\text{д2}}, \quad (3)$$

где $\Pi_{\text{д1}}$ и $\Pi_{\text{д2}}$ – соответственно, показатели удельной плотности продуктов деструкции при испытании обоймы без покрытия и с покрытием.

Согласно данным (рис. 3), коэффициент относительной удельной плотности продуктов деструкции минерального масла М10-Г_{2К} увеличивается до тем-

пературы 200 °С за счет увеличения показателя $\Pi_{\text{д1}}$, а колебания коэффициента $K_{\text{отн}}$ вызваны неоднозначным влиянием концентрации продуктов деструкции на износ обоймы с покрытием.

Относительная удельная плотность продуктов деструкции одинакова при испытании обойм без покрытия и с покрытием при температуре менее 160 °С ($K_{\text{отн}} \approx 1,0$), поэтому температура работоспособности подшипниковой стали не должна превышать это значение.

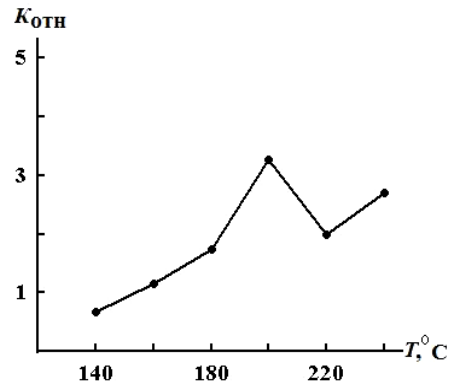


Рис. 3. Зависимость коэффициента относительной удельной плотности продуктов деструкции от температуры испытания

При схеме трения «шар–цилиндр» диаметр пятна износа зависит от параметров трения и противоизносных свойств смазочного материала. Процессы, протекающие на фрикционном контакте, исследовались электрометрическим методом. Диаметр пятна износа зависит от продолжительности пластической деформации, при которой формируется площадь контакта, и упругопластической, при которой на площади контакта образуются защитные граничные слои, поэтому величина тока, протекающего через фрикционный контакт, будет зависеть от вида деформации. При пластической деформации ток равен заданному (100 мкА), а при упругопластической – его величина зависит от скорости формирования защитных слоев, представляющих химические соединения продуктов деструкции с металлом. Диаграммы записи тока представлены на рис. 4, а результаты исследования износостойкости стали ШХ15 приведены в табл. 2.

На диаграммах записи тока видны участки, где ток максимальный и равен 100 мкА, и участки, где ток либо уменьшается до нуля, либо устанавливается на определенной величине. В процессе трения ток колеблется в определенном диапазоне, а амплитуда колебаний зависит от прочности защитного граничного слоя.

Для характеристики механохимических процессов, протекающих на фрикционном контакте, принят коэффициент электропроводности фрикционного контакта $K_{\text{э}}$ определяемый отношением тока фрикционного контакта к заданному току (100 мкА).

Результаты износостойкости стали ШХ15 при термостатировании минерального моторного масла М10-Г_{2К}

Температура испытания °С	Время общей деформации $t_{д}$, мин		Диаметр пятна износа, мм		Коэффициент электропроводности $K_э$		Критерий противозносных свойств масла $П_к$	
	без покрытия	с покрытием	без покрытия	с покрытием	без покрытия	с покрытием	без покрытия	с покрытием
140	14,2	23,6	0,3	0,26	0,50	0,05	7,1	1,3
160	28,3	14,3	0,28	0,26	0,20	0,10	5,7	1,4
180	38,5	33,3	0,36	0,44	0,35	0,50	13,5	16,7
200	9,3	31,5	0,24	0,46	0,15	0,55	1,4	17,3
220	36,9	15,0	0,3	0,38	0,20	0,60	7,4	9
240	23,1	35,8	0,3	0,48	0,30	0,65	6,9	23,3

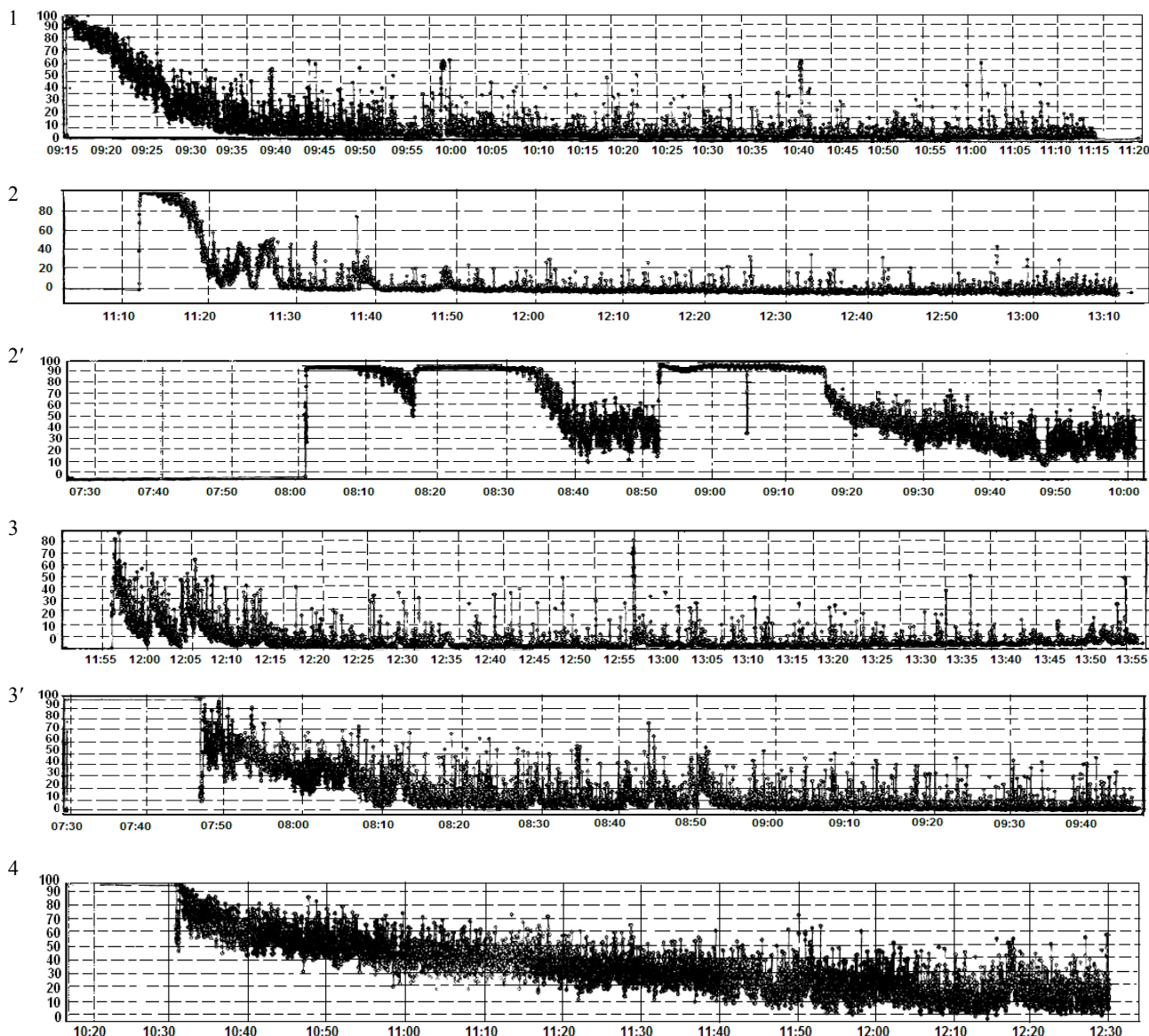


Рис. 4. Диаграммы записи тока, протекающего через фрикционный контакт при испытании минерального масла М10-Г_{2К} (начало)

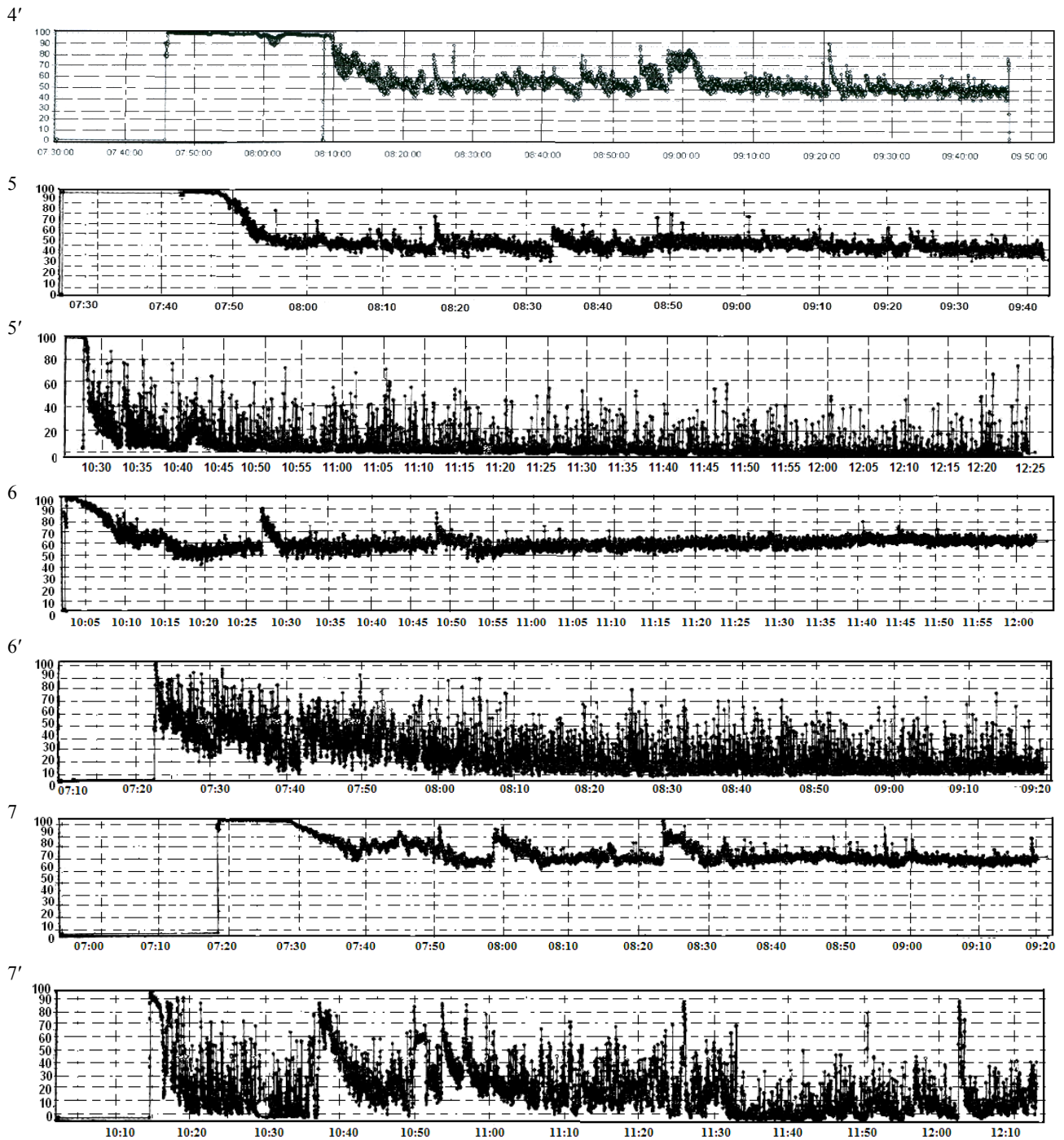


Рис. 4. Диаграммы записи тока, протекающего через фрикционный контакт при испытании минерального масла М10-Г_{2К} (окончание):
 1 – при температуре 180 °С; 2, 2' – 140 °С; 3, 3' – 160 °С; 4, 4' – 180 °С; 5, 5' – 200 °С; 6, 6' – 220 °С; 7, 7' – 240 °С;
 цифры без штриха – испытание обоймы с покрытием; цифры со штрихом – без покрытия

Анализ диаграмм показал, что четкой зависимости коэффициента электропроводности от температуры испытания и наличия покрытия на обойме не наблюдается. При температурах термостатирования масла 140 и 160 °С (диаграммы 2 и 3) коэффициент электропроводности K_3 при испытании обоймы с покрытием значительно меньше, чем без покрытия (диаграммы 2' и 3'). Дальнейшее повышение температуры термостатирования масла вызывает увеличение коэффициента K_3

при испытании обоймы с покрытием и более интенсивный износ (см. табл. 2). Для учета влияния коэффициента K_3 на величину износа предложен комплексный показатель Π_K противоизносных свойств, учитывающий продолжительность деформаций и значение коэффициента, определяемого выражением

$$\Pi_K = t_d \cdot K_3, \quad (4)$$

где t_d – суммарное время деформаций; K_3 – коэффициент электропроводности.

Зависимость диаметра пятна износа от комплексного показателя противоизносных свойств термостатированных масел представлена на рис. 5. Для обоймы без покрытия установлена линейная зависимость (кривая 1), для обоймы с покрытием – кусочно-линейная (кривая 2), при этом износ обоймы с покрытием на 15 % выше, чем без покрытия, и объясняется большими значениями коэффициента K_3 электропроводности фрикционного контакта при испытании обоймы с покрытием (рис. 6).

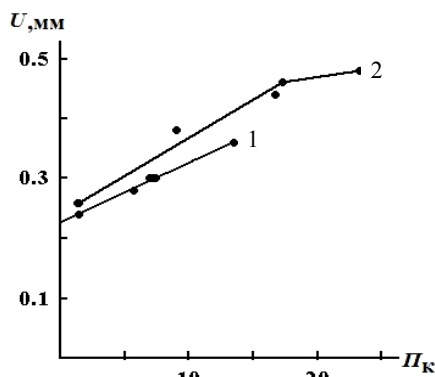


Рис. 5. Зависимость диаметра пятна износа от комплексного показателя противоизносных свойств термостатированного минерального моторного масла М10-Г_{2К}:
1 – обойма без покрытия; 2 – обойма с покрытием

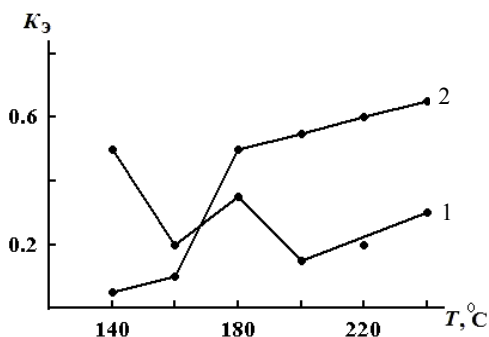


Рис. 6. Зависимость коэффициента электропроводности фрикционного контакта от температуры испытания (условные обозначения см. на рис. 5)

Коэффициент электропроводности K_3 фрикционного контакта при испытании обоймы без покрытия (кривая 1) в термостатированном масле не имеет четкой зависимости от температуры испытания и изменяется от 0,15 до 0,5 ед. При испытании обоймы с покрытием (кривая 2) коэффициент K_3 имеет малые значения при температурах 140 и 160 °С, а при температуре 180 °С наблюдается резкое его увеличение с последующим линейным изменением в диапазоне температур от 180 до 240 °С. Такое изменение коэффициента K_3 подтверждает предельный температурный диапазон работоспособности стали ШХ15 до 160 °С.

Результаты испытания стали ШХ15 без покрытия в термостатированном масле в диапазоне температур от 140 до 240 °С показывают, что ток фрикционного контакта подвержен большим колебаниям, что указывает на неудовлетворительную прочность образующихся защитных граничных слоев. При изнашивании обоймы с покрытием колебания тока уменьшаются, но величина его значительно больше по сравнению с обоймой без покрытия. Поскольку обе обоймы испытывались в одном и том же масле, то влияние на величину тока при испытании обоймы с покрытием должно оказывать следующее покрытие: комплексное химическое соединение стали с компонентами деструкции. Увеличение колебаний тока при испытании обоймы без покрытия вызвано наличием в масле комплексных химических соединений, что подтверждается результатами исследования обоймы без покрытия в товарном нетермостатированном масле (см. диаграмму 1, рис. 4).

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. На основе проведенных исследований установлено, что износостойкость стали ШХ15 с покрытием падает в температурном диапазоне от 180 до 240 °С. Предельной температурой работоспособности подшипниковой стали является температура 160 °С.

2. При повышении температуры в подшипниковом узле процессы самоорганизации протекают на поверхности трения за счет взаимодействия стали ШХ15 с продуктами деструкции и образования комплексных химических соединений, постепенно отслаиваемых от поверхности, попадающих в объем смазочного материала и изменяющих его оптические свойства.

3. Предложенный электрометрический метод исследования механохимических процессов при граничном трении скольжения позволяет количественно оценить интенсивность изнашивания по значению тока, протекающего через фрикционный контакт, определить продолжительность пластической, упруго-пластической и упругой деформаций.

4. Предложен комплексный критерий оценки противоизносных свойств смазочных масел, определяемый произведением суммарной деформации на величину коэффициента электропроводности фрикционного контакта, имеющий линейную зависимость с величиной износа, что позволяет применять его в качестве диагностического параметра при оценке процессов самоорганизации.

Библиографические ссылки

1. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1968.
2. ГОСТ 18855–94 (ИСО 281–89) Подшипники качения. Динамическая расчетная грузоподъемность и расчетный ресурс (долговечность). М. : Изд-во стандартов, 1994.
3. Ковальский Б. И., Кропачев А. В. Устройство для испытания подшипников качения // Транспортные средства Сибири : межвуз. сб. науч. тр. с меж-

дунар. участием. Вып. 6. Красноярск : КГТУ, 2000. С. 255–261.

4. Самоорганизация вторичных структур при трении / И. С. Гершман [и др.] // Трение и износ. 2003. Т. 23, № 3. С. 329–334.

5. Гершман И. С., Буше Н. А. Реализация диссипативной самоорганизации поверхностей трения в трибосистемах // Трение и износ. 1995. Т. 16, № 1. С. 61–70.

6. Молекулярные механизмы самоорганизации при трении / А. С. Кужаров [и др.] // Трение и износ. 2002. Т. 23. № 6. С. 645–651.

7. А. с. 983522 СССР, МКИ³ G 01 № 19/02. Устройство для испытания трущихся материалов и масел / Б. И. Ковальский, М. Е. Грибанов. Оpubл. 23.12.82, Бюл. № 47.

8. А. с. 1054732 СССР, МКИ³ G 01 № 3/56. Способ определения смазывающей способности масел / Б. И. Ковальский, Г. М. Сорокин, А. П. Ефремов. Оpubл. 15.11.83, Бюл. № 42.

9. Пат. 2186386 РФ, МКИ³ G 01 № 33/30, 3/56. Способ определения смазывающей способности масел / Б. И. Ковальский, С. И. Васильев, С. Б. Ковальский, Д. Г. Барков. Оpubл. 27.07.2002, Бюл. № 21.

B. I. Kovalsky, Yu. N. Bezborodov, N. N. Malysheva, S. B. Kovalsky, E. G. Maltseva

CHANGE OF WEAR RESISTANCE OF STEEL ШХ15 AT IT'S TEMPERATURE CONTROL IN ENVIRONMENT OF MINERAL OIL M10-Г_{2К}

The article presents results of research of change of wear resistance of ШХ15 at it's temperature control in environment of mineral engine oil M10-Г_{2К} and mechanic-chemical processes at a boundary sliding friction.

Keywords: temperature control lubricant oil, relative deterioration, an indicator of antiwear properties, a current of frictional contact, plastic and elasto-plastic deformations, diameter of a stain of deterioration, a covering.

© Ковальский Б. И., Безбородов Ю. Н., Малышева Н. Н., Ковальский С. Б., Мальцева Е. Г., 2011

УДК 621.895

Б. И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов, А. В. Кузьменко, Ю. Ф. Кайзер

ВЛИЯНИЕ ТОКА, ПРОПУСКАЕМОГО ЧЕРЕЗ ФРИКЦИОННЫЙ КОНТАКТ, НА ПРОТИВОИЗНОСНЫЕ СВОЙСТВА СИНТЕТИЧЕСКОГО АВИАЦИОННОГО МАСЛА ВНИИИП 50-1-4ф

Представлен метод определения влияния постоянного тока, пропускаемого через фрикционный контакт, на противоизносные свойства авиационного моторного синтетического масла ВНИИИП 50-1-4ф. Предложен критерий оценки механохимических процессов, протекающих на фрикционном контакте.

Ключевые слова: механохимические процессы, термоокислительная стабильность, процессы самоорганизации, пластическая и упругопластическая деформации, хемосорбционный граничный слой.

Процессы самоорганизации трибосистемы при граничном трении определяются сопротивлением ее элементов температурным, механическим и химическим воздействиям путем создания на поверхностях трения защитных слоев, причем влияние смазочного материала в этих процессах является основным. Влияние смазочного материала определяется интенсивностью сорбционных процессов, протекающих на площади контакта, которая зависит от химической активности присадок и продуктов окисления, а также их концентрации, изменяющейся в процессе эксплуатации газотурбинных двигателей.

Целью настоящей работы является исследование возможности повышения активности сорбционных процессов за счет пропуска тока через фрикционный контакт от внешнего стабилизированного источника питания.

Исследования проводились на трехшариковой машине трения со схемой трения «шар–цилиндр» [1],

причем каждый из трех шаров взаимодействовал с цилиндром по индивидуальной дорожке трения. В качестве образцов были выбраны: шар (подшипник № 1210) диаметром 9,5 мм и верхняя обойма роликового подшипника № 30208 диаметром 80 мм. Оба образца изготовлены из стали ШХ15. Режимы трения были выбраны постоянными и составили: нагрузка – 13 Н, скорость скольжения – 0,68 м/с, температура масла – 80 °С, время испытания – 2 ч.

Каждый держатель шаров был электроизолирован друг от друга, а к одному из них подводился постоянный ток (100 мкА) от стабилизированного источника питания напряжением 3 В. Величина тока, протекающего через фрикционный контакт, преобразовывалась преобразователем RS-485 и регистрировалась на компьютере. Температура испытуемого масла задавалась дискретно и поддерживалась автоматически с помощью терморегулятора TP101 с точностью ± 0,5 °С. Машина трения выполнена с возможностью измене-