

УДК: 678.743+621.9.039

Оптимизация состава металлофторопластового антифрикционного материала на стальной подложке

В. Н. КОРНОПОЛЬЦЕВ, Н. В. КОРНОПОЛЬЦЕВ, Д. М. МОГНОНОВ, И. А. ФАРИОН

*Байкальский институт природопользования Сибирского отделения РАН,
ул. Сахьяновой, 6, Улан-Удэ 670047 (Россия)**E-mail: kopro@mail.ru*

Аннотация

Описаны принцип создания и триботехнические испытания листового металлофторопластового материала на стальной подложке. Выбраны оптимальный состав его рабочего слоя и способ легирования поверхности стальной обратной пары. Испытания показали, что разработанный материал превосходит отечественные промышленные аналоги. Так, при содержании в рабочем слое нового материала 20–25 % (по объему) медных сплавов, 50–55 % (по объему) Ф-4 и 25–30 % (по объему) Pb фактор pV для 1000 ч непрерывной работы в условиях сухого трения по диффузионно-борированной стали 45 с допустимым износом 200 мкм достигает 2 МПа · 1 м/с.

ВВЕДЕНИЕ

За последние годы проблема снижения затрат на ремонт и приобретение запасных частей в транспортной, топливно-энергетической, аграрно-промышленной, горнодобывающей, авиационной и других отраслях промышленности обостряется в связи с интенсивным старением производственных фондов. Так, при расчетах себестоимости промышленной продукции доля расходов на эксплуатацию и ремонт оборудования достигает 40 %, что приводит к нарушению технологических процессов, уменьшению объема производства, снижению конкурентоспособности.

Создание новых объектов техники с высокой надежностью и производительностью требует использования новых материалов и покрытий при конструировании подвижных сопряжений машин и агрегатов. Один из путей повышения долговечности узлов трения – это использование в их конструкциях металлополимерных подшипников скольжения с модификацией поверхности обратной пары.

Комбинированные биметаллические металлофторопластовые материалы (МФМ) на стальной подложке могут найти применение в узлах трения машин и механизмов (подшипники, опоры скольжения и направляющие в

различных областях промышленности). Листовой МФМ обладает высокими антифрикционными свойствами, позволяющими применять его в широком диапазоне температур и нагрузок в условиях сухого трения и в средах, не обладающих смазочными свойствами. Он также отличается высокой конструкционной прочностью и успешно противостоит вибрационным нагрузкам, благодаря чему может найти широкое применение в многочисленных, в том числе, тяжело нагруженных и ответственных узлах трения машин и механизмов различных типов [1].

Среди существующих методов упрочнения поверхностных слоев наиболее глубоко изучена химико-термическая обработка (ХТО) [2]. В процессе ХТО изменяются структура и свойства поверхностных слоев металлических материалов, что обеспечивает повышение долговечности деталей машин и инструмента, работающих в условиях повышенных температурно-силовых циклических воздействиях. Благодаря образованию на поверхности диффузионных, более твердых и устойчивых при нагреве соединений (карбидов, нитридов, боридов), ХТО позволяет повысить срок службы стальных деталей.

Настоящая работа посвящена исследованию метода получения и триботехническим

испытаниям МФМ по легированной термо-диффузионным способом стали 45.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Комбинированный МФМ состоит из основы из низкоуглеродистой стали (Ст20), бронзолатунной сетки № 16 (БЛС), по типу простой (ГОСТ 3583–73) для формирования пористого слоя, политетрафторэтилена марки ПН (ГОСТ 10067–86) (Ф-4), порошка свинца марки ПСА (ГОСТ 16138–78) с размером частиц до 80 мкм.

Листовой материал изготавливали в следующей последовательности. Сначала к стальным листам в пакете в прижатом при помощи рамок состоянии припекалась сетка, потом на гидравлическом прессе в поры припеченной сетки впрессовывали композиционную шихту на основе Ф-4 со свинцом и затем спекали Ф-4 в печи с воздушной атмосферой под аутогенным давлением, создаваемым за счет расширения Ф-4.

Прочность при отрыве припеченной сетки от стальной основы определяли на разрывной машине Р-0.5.

Триботехнические испытания проводились на машине трения СМТ-1 по схеме “вал – частичный вкладыш”. Для получения вкладыша заготовку калибровали путем опрессовки в оправках. Площадь контакта при трении составляла $(2 \pm 0.1) \text{ см}^2$, отношение длины контакта к длине окружности равнялось 1/6. Контртел перед испытанием нового образца шлифовались наждачной бумагой № 1000. Перед сборкой узла трения рабочие поверхности подшипника и сопряженной детали промывали этиловым спиртом для обеспечения условий сухого трения. Оптимизацию состава рабочего слоя проводили с применением метода центрального ортогонального планирования второго порядка.

Испытания проводили при комнатной температуре. Температуру образца определяли с обратной стороны вкладыша хромель-копелевой термопарой. С помощью образцового потенциометра П-63 фиксировали э. д. с. термопары.

Линейный износ измеряли на оптиметре со сферическими губками в 3–5 точках по линии и рассчитывали по разности в показани-

ях толщины вкладыша до и после очередного испытания. Скорость скольжения вычисляли по частоте вращения вала, контролируемой тахометром ТЧ10-Р. Статическая нагрузка определялась с помощью динамометра ДПЦ–0.1/2 (ГОСТ 13837–68).

В качестве контртел использовались стальные втулки с внутренним и наружным диаметрами 22 и 38 мм соответственно, шириной 35 мм, с различной термообработкой: сталь 45 с диффузионно-хромированным и диффузионно-борированным покрытием.

Исследования поверхности МФМ проводились на электронном микроскопе LEO 1430VP с энергодисперсионным анализатором INCA Energy 300 в режиме регулируемого давления (pV), рабочее давление в камере образцов составляло 30 Па. При сканировании поверхности МФМ в режиме pV на количественный состав элементов оказывают влияние вакуум и рельеф поверхности образцов. Кроме того, в системе Cu–Fe область генерации электронного пучка ($d = 0.1$ мкм) составляет от 1 до 3 мкм, а полимерную основу электронный пучок может пробить на глубину до 10 мкм и отразиться от металла, заключенного под слоем фторопласта [3]. Перед исследованием поверхности новых материалов необходима калибровка по эталону, но проведение ее было невозможно. В связи с этим приведенные данные о количественном составе присутствующих элементов при сканировании поверхности образцов МФМ нормированы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Формирование на стальной подложке пористого слоя из сетки в пакете имеет ряд преимуществ перед известными аналогами, в которых пористый слой состоит из сферической порошковой бронзы. Стальные заготовки могут быть различной толщины и заданных геометрических размеров, кратных размерам будущих изделий. Варьирование числа слоев и типа сеток позволяет регулировать толщину рабочего слоя и несущую способность материала. Пористый слой из сетки занимает меньший объем в рабочем слое. Для сеток простого типа занимаемый объем

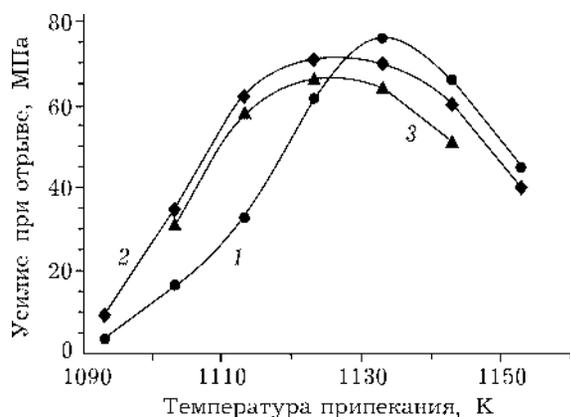


Рис. 1. Зависимость прочности сцепления бронзолатунной сетки с низкоуглеродистой стальной подложкой от температуры припекания: 1 – необработанная сталь 20; 2, 3 – бронзированная сталь 20 с толщиной бронзового слоя до 50–70 (2) и более 300–350 мкм (3).

может составлять от 16 до 25 %, для саржевых или полусаржевых – от 20 до 35 % [4], благодаря чему их применение для разработки самосмазывающихся материалов становится перспективным. Кассетный способ получения материалов позволяет проводить припекание металлического антифрикционного слоя и спекание фторопластовой композиции под избыточным давлением, что позволяет улучшить физико-механические свойства МФМ.

Как видно из рис. 1, при определенном температурном режиме сетка прочно припекается к низкоуглеродистой стали с сохранением целостности пористого слоя. Вследствие испарения цинка лагунный уток не подплавляется, не сплавляется с бронзовой основой и находится в подвешенном состоянии. Сетка прочно припекается к стальной подложке (предел прочности при растяжении $\sigma_p = 74\text{--}77$ МПа) более изогнутой основой из фосфористой бронзы. В результате образуется пористо-ячеистый слой с пространственной структурой с сообщающимися каналами, занимающий по объему 20–25 %. Качественное припекание с максимальной прочностью сцепления возможно при температуре 1120–1140 К. Предварительное бронзирование стальной основы снижает температуру припекания по сравнению с необработанной на 15–20 К и прочность сцепления на 3–7 %.

Благодаря значительному свободному объему пористого слоя, фторопласт легко затекает в межсеточное пространство, поэтому для

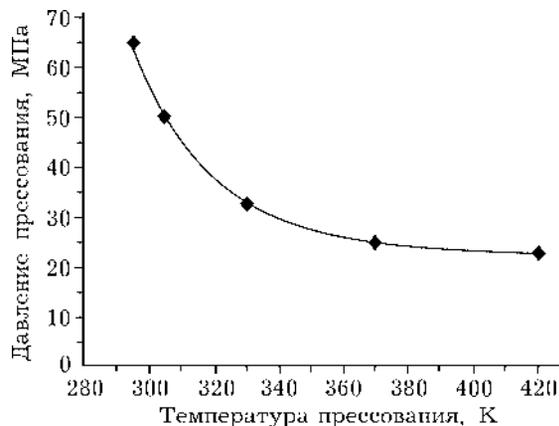


Рис. 2. Зависимость давления прессования композиционной шихты (массовые доли Ф-4, Pb – по 35 %) в поры припеченной к стальному листу сетки от температуры.

заполнения рабочего пористого слоя использовали неориентированную композиционную пленку на основе Ф-4 [5]. Основным недостатком предложенного метода заключается в том, что трудно получить высоконаполненную фторопластовую заготовку для нарезания пленок (массовая доля свинецсодержащих соединений не более 30 %).

Наиболее приемлемым является способ заполнения пор припеченной к стальной основе сетки порошковой шихтой на основе сырого Ф-4, применение которого позволило отказаться от относительно дефицитных водных суспензий фторопласта и использовать композиционную шихту с любым наполнителем в широком интервале наполнения.

По данным работы [6], для создания МФМ с повышенными триботехническими свойствами в качестве наполнителя фторопластовой матрицы выбран свинец. Как видно из рис. 2, при использовании шихты на основе Ф-4 и свинца оптимальное давление холодного прессования составляет 60–65 МПа. При увеличении температуры до 320–330 К давление прессования снижается в два раза, однако дальнейший прогрев до 370–380 К обеспечивает полную пропрессовку композиционной шихты в поры припеченной сетки при давлении не ниже 22–25 МПа. При давлении свыше 80 МПа происходит деформация сетки.

С увеличением вводимого наполнителя (Pb) антифрикционные качества материала улучшаются. Для определения оптимального количества наполнителя изготовлены пластины с массовой долей порошкового свинца во фто-

ропластовой матрице 25, 50 и 75 % и проведены триботехнические испытания при скоростях скольжения 0,5, 1 и 1,5 м/с. Испытания проводились по диффузионно-хромированной стали 45 при удельной нагрузке 1 МПа. Продолжительность непрерывного испытания одного образца составляла 10 ч. Для каждого режима устанавливался новый образец, который предварительно притирался при скорости скольжения 1 м/с и нагрузке 5 МПа в течение 5–30 мин. Определяющими параметрами служили температура и линейный износ вкладыша. Результаты испытаний использовались в качестве экспериментальных данных матрицы планирования эксперимента. Кодированные переменные X_1 и X_2 и соответствующие им массовые доли наполнения и линейной скорости скольжения приведены ниже:

X_1	Массовая доля, %	X_2	Линейная скорость, м/с
-1	25	-1	0,5
0	50	0	1
+1	75	+1	1,5

Математической обработкой получены зависимости Y_1 (температура T) и Y_2 (износ J) в кодированных переменных:

$$Y_1(T, K) = 450.3 - 24.0X_1 + 54.8X_2 - 13.75X_1X_2 + 3.0X_1^2 - 15.5X_2^2 \quad (1)$$

$$Y_2(J, \text{мкм/ч}) = 2.33 - 2.02X_1 + 1.64X_2 - 1.25X_1X_2 + 0.14X_1^2 - 0.40X_2^2 \quad (2)$$

Графические зависимости уравнений приведены на рис. 3 а, б.

Анализ коэффициентов уравнений (1), (2) и графических зависимостей (см. рис. 3) позволил сделать вывод о том, что увеличение содержания свинца способствует снижению температуры и износа материала в условиях увеличения скорости скольжения. Область оптимальной массовой доли свинца – более 60 %. При скорости скольжения 1 м/с износ МФМ-75 в 5 раз ниже по сравнению с МФМ-50 и в 10 раз – с МФМ-25.

Проведены исследования состава поверхности трения и структуры поперечных микрошлифов материалов на электронном микроскопе LEO 1430.

Обработка данных состава поверхности трения МФМ показала, что поверхностный слой по всей площади поверхности трения представляет собой сложную композицию.

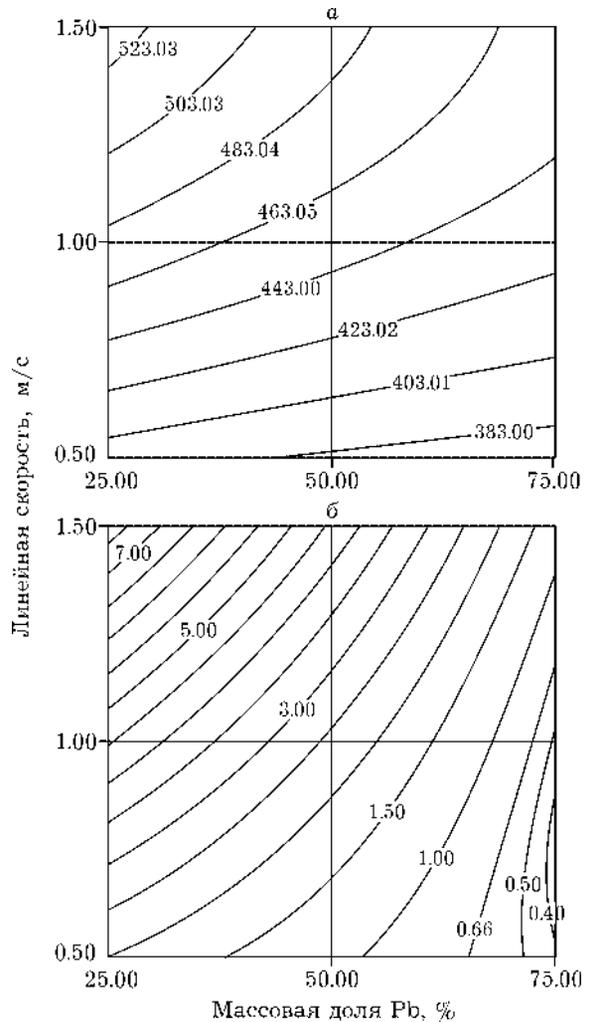


Рис. 3. Графические зависимости температуры (а) и линейного износа (б) при работе МФМ по диффузионно хромированному контртелу от содержания свинца и скорости скольжения при удельном давлении 2 МПа (цифры у кривых – значения температуры в рассматриваемом режиме испытания, К).

На поверхности трения МФМ-75 можно наблюдать образование капель с высоким содержанием свинца (более светлые участки) (рис. 4). Поверхность бронзового утка полностью покрыта свинецсодержащей пленкой. Размер пятна бронзового утка находится в пределах 300–600 мкм, занимаемая бронзовыми утками площадь после 20 ч трения в режимах притирки и испытания составляет 13–15 % от общей площади контакта. Четко проявляется эффект самосмазывания вкладыша и образования во время трения “жидкой фазы”. В составе “третьего тела” обнаружено незначительное количество продуктов износа контртела (см. рис. 4).

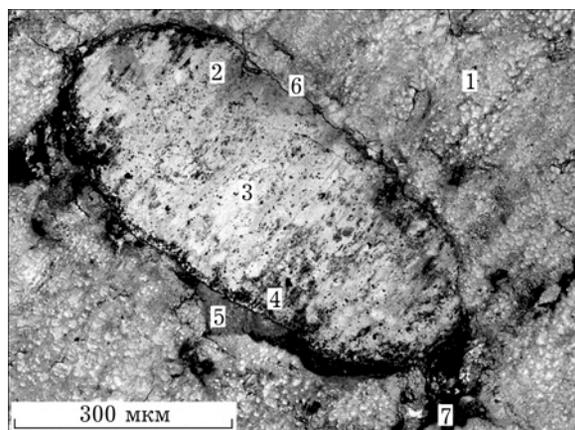


Рис. 4. Поверхность трения МФМ-75 после испытания в режиме $pV = 2 \text{ МПа} \cdot 1 \text{ м/с}$ (цифрами обозначены области сканирования). Элементный состав (массовая доля), %:

Область	C	O	F	Cr	Fe	Cu	Zn	Sn	Pb
1	7.36	9.38	7.94			0.75			74.38
2	7.11	7.61	7.49			7.4	0.91		69.36
3	6.19	8.72	4.47			6.67			74.29
4	8.17	6.57	8.19	0.75	0.67	18.21	2.01	0.9	55.34
5	8.75	7.38	13.21			1.47			69.39
6	6.99	8.76	7.62			2.18			74.72
7	23.67	1.63	56.65			0.57			17.86

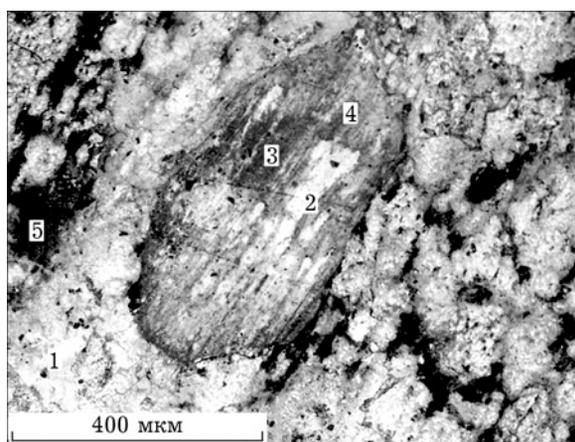


Рис. 5. Поверхность трения МФМ-50 после испытания в режиме $pV = 2 \text{ МПа} \cdot 1 \text{ м/с}$ (цифрами обозначены области сканирования). Элементный состав (массовая доля), %:

Область	C	O	F	Cr	Fe	Cu	Zn	Sn	Pb
1	7.48	7.45	12.87			1.51			70.99
2	6.86	7.61	8.23	0.77		10.87	1.08		64.89
3	6.81	5.87	4.72	0.74	1.23	46.99	4.26	4.46	25.13
4	8.69	7.33	6.68	0.65	0.37	39.85	2.99	1.91	40.31
5	25.48	1.52	57.54			1.47			14.56

Установлено, что в процессе трения продукты износа приобретают более дисперсную структуру, а их состав обогащается свинцом преимущественно за счет уменьшения фторопластовой составляющей. Концентрация кислорода остается практически неизменной. Исходя из этого, можно сделать предположение о том, что образующийся слой представляет собой “третье тело” сложного химического состава и состоит из оксидов металлов, частиц фторопласта и мелкодисперсного свинца. Авторы [7] с помощью методов электронной микроскопии и ИК-спектроскопии установили, что при трении металлофторопластового композита по металлу поверхностные слои в зоне трения состоят из антифрикционного самосмазывающегося полимера и низкомолекулярных продуктов деструкции фторопласта. Проведенный в работе [8] рентгеноструктурный анализ поверхности трения материала КВН-3, содержащего бронзу и графито-свинцовый наполнитель, после работы по стали 12Х18Н9Т показал, что с течением времени поверхностный слой обогащается медью, образуя CuF_2 , а после 6 ч трения появляется пик, соответствующий PbF_2 . При дальнейшем трении (в течение 12.5 ч) количество этих продуктов не изменяется.

На рис. 5 изображена поверхность трения МФМ-50. Образец испытывали в режиме $pV = 2 \text{ МПа} \cdot 1 \text{ м/с}$. Поверхность трения имеет рыхлую структуру с включениями “третьего тела”. Видно, что занимаемая полимерной составляющей площадь трения МФМ-50 еще достаточно велика, и продукты износа при трении постепенно выносятся из зоны трения, проскальзывая по фторопластовому слою. Поверхность бронзового утка неполностью покрывается свинцово-фторопластовым композитом, что и определяет сравнительно большую температуру при трении. Состав поверхности бронзового утка свидетельствует о том, что при контакте со стальным контртелом уток подвергается большему износу.

Установлено, что при спекании фторопласта из пластин МФМ-75 происходит вытеснение свинца, который собирается в виде капель по краям пакета. Приготовлены пластины с массовой долей свинца в полимерной матрице 60, 65, 70 и 80 %. Спекание проводили в одном пакете по 10–15 пластин каж-

ТАБЛИЦА 1

Характеристики материалов, полученных при различной степени наполнения фторопласта свинцом для длительных испытаний на износ

Материал*	Степень наполнения фторопластовой композиции**, %	Потеря массы свинца, %
МФМ-25	25/6	Нет вытеснения
МФМ-50	50/16	« «
МФМ-75	75/34	Вытеснение наполнителя
МФМ-60	60/22	0
МФМ-65	65/26	0,5–1
МФМ-70	70/29,5	3–4
МФМ-80	80/40	22–24

*МФМ-25 – МФМ-75 – первая партия, МФМ-60 – МФМ-80 – вторая партия.

**Первое значение – массовая доля, второе – объемная доля.

дого материала. В табл. 1 представлены характеристики изготовленных методом прессования материалов с различной степенью наполнения фторопластовой шихты свинцом.

Из рис. 6 видно, что пороговое значение массовой доли вводимого наполнителя составляет 63–64 %, после чего он вытесняется из полимерного объема при термическом расширении Ф-4.

Технологический прием спекания кассеты в сжатом состоянии позволяет обеспечить повышенную плотность материала. Как видно из рис. 7, а–в, фторопластовая композиция полностью заполняет межсеточное пространство, проникая под утки сетки, что обеспечивает достаточно большую силу сцепления наполненного Ф-4 с бронзолатунным каркасом.

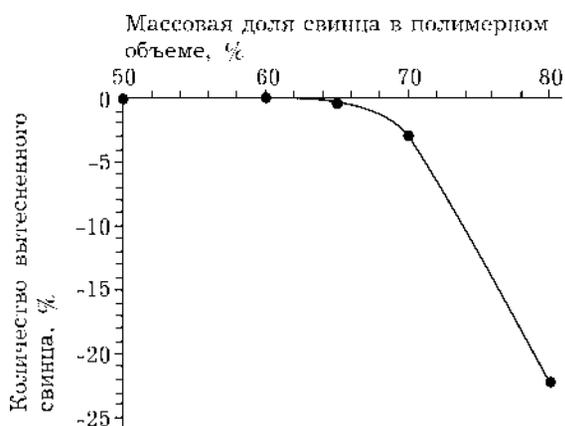


Рис 6. Потеря массы свинца листового материала при спекании и охлаждении с печью в зависимости от степени наполнения полимерной основы.

Частицы свинца равномерно распределяются по всему объему полимера. С увеличением содержания свинца рисунок свинцовистого каркаса имеет более выраженную структуру. Известно [9], что при спекании под избыточным давлением полная потеря кристаллической структуры Ф-4 наблюдается при температуре выше 600 К. При спекании в кассете переход свинца в жидкое состояние осуществляется быстрее, чем процесс полной потери кристаллической структуры фторопласта. Это способствует тому, что расплавленные частицы свинца диспергируются полимерной матрицей, образуя свинцовый каркас из разветвленных конгломератов, частично связанных между собой. Фторопластовая матрица уплотняется, макромолекулы ориентируются, что придает высокие физико-механические и триботехнические свойства рабочему слою материала.

Опробован способ охлаждения пакета под давлением (10 ± 1) МПа. Для этого после выдержки при температуре спекания пакет в горячем состоянии извлекался из печи и сжимался между холодными плитами гидравлического пресса, что приводило к дополнительному вытеснению свинца (до 5–6 % по массе) и к образованию плоских частиц наполнителя (см. рис. 7, в). Увеличение давления при охлаждении на холодных плитах до 30–35 МПа способствует вытеснению до 10–12 % (по массе) наполнителя, что свидетельствует о том, что при массовой доле наполнителя более 63–64 % его частицы образуют

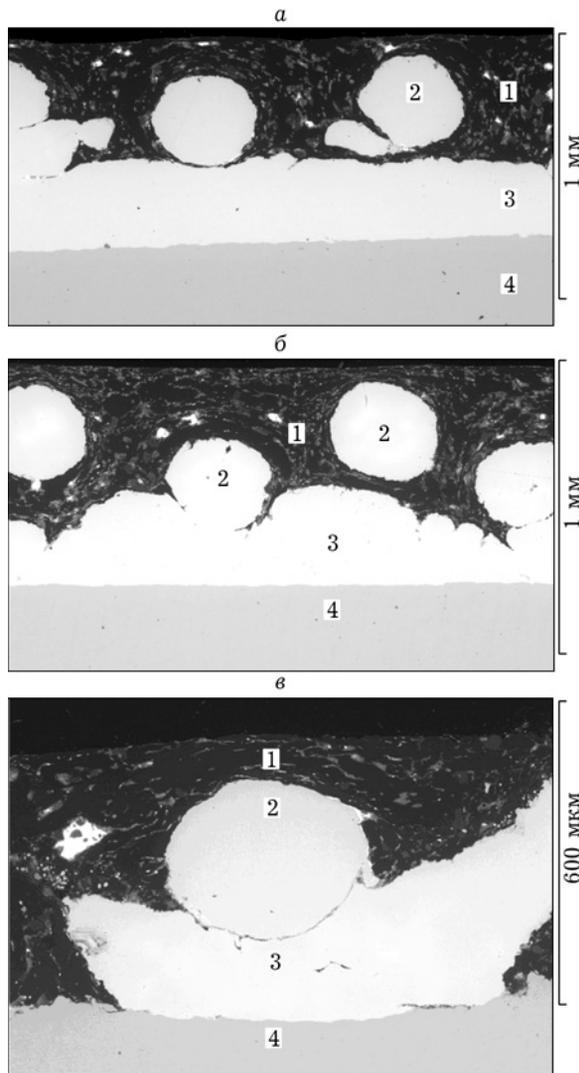


Рис. 7. Снимок поперечных шлифов: а – МФМ-70 (1 – фторопластовая композиция, 2 – уток полutomпака слоя сетки, 3 – предварительно припеченный и раскатанный на вальцах первый слой сетки, 4 – стальная основа); б – МФМ-80 (1 – фторопластовая композиция, 2 – уток фосфористой бронзы, 3 – предварительно припеченный слой сетки при температуре 1170 К, 4 – стальная основа); в – МФМ-70А (1 – фторопластовая композиция, полученная при введении в Ф-4 свинца с массовой долей 70 %, спеченного и охлажденного под плитой гидравлического пресса при давлении 10 МПа, 2 – уток полutomпака, 3 – уток фосфористой бронзы, 4 – стальная основа).

в объеме полимера взаимопроникающую структуру, и свинец вытесняется из всего объема рабочего полимерного слоя.

На рис. 8 приведены результаты сравнительных испытаний МФМ-60, МФМ-70, МФМ-80 по контртелу, выполненному из стали 45 с диффузионно-борированной поверхностью, при $V = 1$ м/с, $p = 4$ МПа после притирки для оголения верхушек сетки.

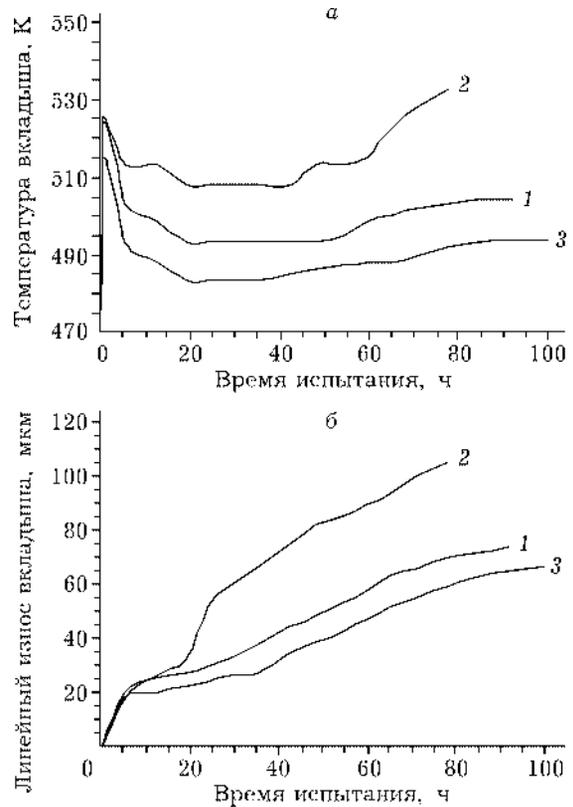


Рис. 8. График сравнительных испытаний МФ-60 (1), МФ-70 (2) и МФ-80 (3) при $p = 3$ МПа, $V = 1$ м/с: а – температура вкладыша при трении, б – износ вкладыша. Контртело – диффузионно-борированная сталь 45.

Длительные испытания показали, что во всех случаях после притирки материал продолжает интенсивно изнашиваться на глубину до 20 мкм за 12–15 ч, а температура образца снижается. Затем интенсивность износа резко сокращается, и для образцов МФМ-60 и МФМ-70 она не превышает 0.1–0.15 мкм/ч на протяжении следующих 30–40 ч работы. Между трущимися поверхностями образуется “третье тело” желтого цвета со сложным химическим составом. В дальнейшем интенсивность износа повышается. Определенные по углу наклона кривых износа при установленном режиме трения ($pV = 4$ МПа · 1 м/с) величины износостойкости МФМ-60 и МФМ-70 составляют 0.40 и 0.35 мкм/ч соответственно.

Установлено также, что интенсивность износа МФМ-80 выше по сравнению с МФМ-70. Как видно из рис. 7, б, повышенное содержание свинца в полимерном объеме при трении приводит к расслоению полимерной матрицы при вытеснении свинца.

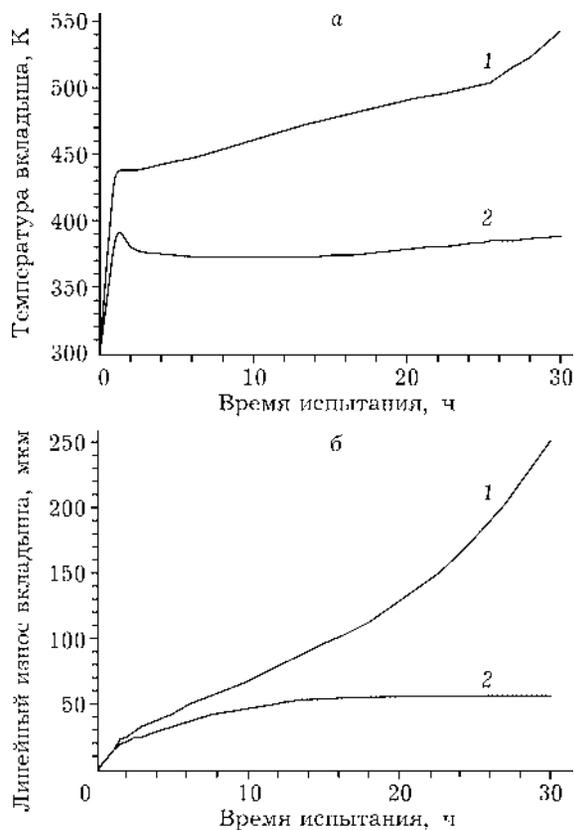


Рис. 9. Сравнительные испытания МФ-ленты Климовского завода (1) и разработанного материала МФМ-70 (2) при трении по диффузионно-борированной стали 45 при $p = 1$ МПа, $V = 1$ м/с: а – температура при трении, б – износ.

Проведены сравнительные испытания МФМ-70 с промышленным образцом МФ-ленты (МФЛ), изготовленным на “Климовском заводе текстильной машиностроения”. Сравнительные испытания проводились по контртелу, выполненному из стали 45 с диффузионно-борированной поверхностью, при $V = 1$ м/с и $p = 1$ МПа (рис. 9).

Видно, что температура и износ МФЛ Климовского завода значительно больше по сравнению с новым материалом. Продукты износа у МФЛ представляют собой мелкодисперсную пыль коричневого цвета. Поверхность трения образца МФЛ после износа 70–100 мкм практически полностью покрывается бронзой, что обусловлено большой объемной долей бронзы в рабочем слое (в МФЛ климовского производства она составляет до 74 %) [10]. Кроме того, в отечественном промышленном материале в качестве наполнителя во фторопластовой основе используется MoS_2 , который при нежестком контакте по своим анти-

фрикционным свойствам при трении в воздушной атмосфере уступает свинцу. У образца МФМ-70 после приработки с толщиной 30–4 мкм при режиме трения $pV = 1.5$ МПа · 1 м/с износ за 20 ч работы составил 1 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование сетки в качестве пористого слоя позволило ликвидировать неравномерность бронзового слоя, получаемую при припекании сферической порошковой бронзы. Прочность сцепления бронзолатунной сетки со стальной подложкой составляет 74–77 МПа, а большой свободный объем позволяет использовать для заполнения пор как пасты на основе водных суспензий, так и сухие порошковые материалы.

Методом математического планирования экспериментальных исследований установлено, что материал, полученный при заполнении пор припеченной сетки порошковой шихтой Ф-4 с массовой долей Pb 63–64 %, обладает стабильными антифрикционными и повышенными износостойкими характеристиками.

Разработанная технология изготовления МФМ позволяет получить материал, значительно превышающий по своим триботехническим показателям известные промышленные аналоги. При трении по диффузионно-борированной стали 45 без смазки ресурс работы МФМ в 1000 ч с износом 200 мкм обеспечивается при факторе $pV = 2$ МПа · 1 м/с.

Работа выполнена при финансовой поддержке правительства Республики Бурятия: “Молодежный грант-2005”, республиканская НТП “Бурятия, наука, технологии и инновации”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 А. П. Семенов, Ю. В. Савинский, Металлофторопластовые подшипники, Машиностроение, Москва, 1976, 192 с.
- 2 Л. Г. Ворошнин и др., Кавитационно-стойкие покрытия на железоуглеродистых сплавах, Под ред. М. Н. Бодяко, Наука и техника, Москва, 1987, 248 с.
- 3 Дж. Голдштейн, Д. Ньюбери, П. Эчлин, Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ: В 2 кн., Пер. с англ., Мир, Москва, 1984, 303 с.
- 4 С. Н. Иванов, Технология бумаги, Лесн. пром-сть, Москва, 1970, 696 с.
- 5 Пат. 2210723 РФ, 2002.

- 6 В. Н. Корнопольцев, Д. М. Могнонов, Н. В. Корнопольцев и др., Новый металлофторопластовый материал, II Евразийский симп., Якутск, 2004, с. 65–75.
- 7 В. В. Гузеев, Л. Р. Иванова, Е. Г. Хоробрая, *Хим. пром-сть*, 5 (2001) 50.
- 8 Г. И. Баранов, Л. Ф. Калистратова, Ю. К. Машков, Л. Н. Поцелуева, *Пласт. массы*, 2 (1990) 40.
- 9 И. Н. Черский, Полимерные материалы в современной уплотнительной технике, Якутск, 1975, 112 с.
- 10 К. С. Ахвердиев, П. А. Воронков, А. П. Семенов, Расчет и конструирование гидродинамических подшипников скольжения с металлополимерными вкладышами, изд. Рост. гос. ун-та путей сообщения, Ростов-на-Дону, 1999, 205 с.