

УДК 621.891.2

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПАР ТРЕНИЯ  
ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ****В.И. ЖОРНИК, В.А. КУКАРЕКО***(Институт механики и надежности машин НАН Беларуси, Минск),***А.С. КАЛИНИЧЕНКО, В.Я. КЕЗИК***(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

*Изложены результаты исследования триботехнических свойств литых композиционных материалов с макрогетерогенной структурой, работающих в условиях сухого и граничного трения. Показано, что литые композиты с матрицей на основе высоколегированных бронз с быстрозакаленными чугунами упрочняющими гранулами обладают высокими триботехническими характеристиками в широком диапазоне нагрузок и скоростей скольжения. Модифицирование смазочных материалов добавками, содержащими ультрадисперсные алмазы, расширяет диапазон рабочих температур для литых композитов, эксплуатирующихся в условиях граничного трения.*

**Введение.** Литые композиционные материалы с макрогетерогенной структурой (ЛМКМ) находят все более широкое применение в узлах трения. При этом выбор различных компонентов, формирующих эти композиты, регламентируется эксплуатационными и технологическими требованиями. Данные композиционные материалы получают методом жидкофазного совмещения компонентов, что позволяет использовать литейную технологию и изготавливать изделия практически любой формы и размеров при меньших затратах по сравнению с композитами, получаемыми порошковой металлургией.

Узлы трения, в которых в настоящее время используются разработанные ЛМКМ, работают при высоких удельных нагрузках (до 10 МПа) и невысоких скоростях скольжения (до 0,5 м/с) с применением как пластичных, так и жидких смазок [1]. При этих условиях наиболее вероятно проявление граничного режима трения. Проведенные ранее исследования [2] показали, что для указанных параметров эксплуатации хорошими триботехническими свойствами обладают ЛМКМ с чугунами упрочняющими гранулами и матрицей из бронзовых сплавов. Однако взаимосвязь химического состава матрицы и режимов термообработки упрочняющих гранул с триботехническими характеристиками ЛМКМ не установлена, при этом важное влияние имеют также режим смазки и состав смазочного материала.

Значительная часть подшипников скольжения с использованием ЛМКМ может применяться только с пластичной смазкой, причем во многих случаях невозможно пополнять смазку во время работы или создавать ее запасы конструктивно. Поэтому важно изучить поведение ЛМКМ как при наличии смазки, так и при ее отсутствии (аварийный режим).

**Цель работы** – изучение влияния материала матрицы и характера термообработки армирующих элементов ЛМКМ, а также модифицирования смазочных материалов ультрадисперсными частицами синтетического углерода на триботехнические свойства пар трения из литых композиционных материалов с макрогетерогенной структурой в условиях сухого и граничного трения.

**Методика исследований.** Исследование триботехнических свойств проводилось на образцах, изготовленных из ЛМКМ с бронзовой матрицей различного состава и термообработанных чугунами гранул ДЧЛ или гранул износостойкого чугуна ИЧХ22 и ЛМКМ на основе литой бронзы с антифрикционной фазой, выделяющейся при затвердевании и последующем охлаждении. Для сравнения испытывались образцы из закаленной стали 45, чугуна СЧ-20, литых бронз БрОЦС5-5-5 и БрОФ10-1. Триботехнические испытания проводились на модернизированном лабораторном трибометре МТВП-9м, работающем по схеме возвратно-поступательного перемещения образца и оснащенном специальным устройством для подогрева испытываемой пары трения. Испытываемые образцы изготавливались в форме призм с размерами 5×6×10 мм. Контртело изготавливалось из закаленной стали 45 (твердость HRC 47) и имело форму пластины с размерами 2×20×90 мм. Испытания проводились при нагрузках от  $P = 0,8$  МПа до  $P = 8$  МПа с максимальной скоростью 0,1 м/с в режиме сухого трения. В режиме граничного трения испытания проводились при тех же давлениях и скоростях скольжения, при этом дополнительно исследовалось влияние температурного режима при изменении температуры в зоне трения в диапазоне от 20 до 90 °С.

В качестве смазочного материала использовались солидол УС-2 (ГОСТ 1033-76), масло турбинное Тп-22 (ГОСТ 9972-74) и масло моторное МС-20С (ГОСТ 9320-60). Смазочные материалы применялись как в чистом виде, так и с их модифицированием алмазографитовой шихтой УДАГ-СП (ТУ РБ 28619110.001-95). При использовании пластичной смазки ее нанесение осуществлялось однократно. При испытаниях определялись коэффициент трения и интенсивность изнашивания образцов. При этом коэффициент трения измерялся в процессе испытаний с помощью имеющегося на МТВП-9м специального устройства для регистрации коэффициента трения, а интенсивность изнашивания определялась по убыванию массы образцов с помощью аналитических весов АДВ-200М.

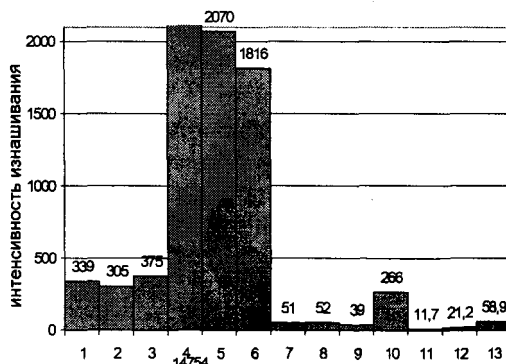
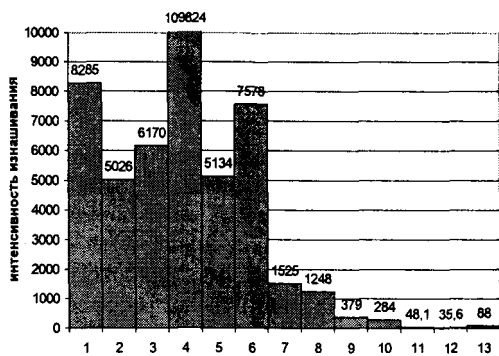
**Результаты и их обсуждение.** Для анализа полученных результатов разработанные композиционные материалы с макрогетерогенной структурой можно разбить на четыре группы:

1. ЛМКМ с быстрозакаленными чугунами упрочняющими гранулами ДЧЛ и матрицей из низколегированных бронз БрКЗМц, БрК5,5, БрКЗМц5 (образцы № 1, 2, 3);
2. ЛМКМ с быстрозакаленными чугунами упрочняющими гранулами ДЧЛ и матрицей на основе высоколегированных или сложнелегированных бронз БрК5,5Мц7Ж4, БрКЗМц10, БрК5,5Мц14 (образцы № 7, 8, 9);
3. ЛМКМ с термообработанными (закалка и отжиг) чугунами упрочняющими гранулами ДЧЛ или износостойкими чугунами упрочняющими гранулами ИЧХ22 с матрицей из бронзы БрКЗМц (образцы № 11, 12);
4. ЛМКМ на основе литой бронзы, содержащей до 20 об. % антифрикционной фазы, которая выделяется при затвердевании и последующем охлаждении (образец № 13).

Образцы из чугуна и бронз (образцы № 4...6) характеризуются значительной величиной интенсивности изнашивания для выбранных режимов испытаний (рисунок). Для бронз она составляет примерно 5,1...7,5 мм/км при нагрузке  $P = 8$  МПа и 1,8...2,0 мм/км при нагрузке  $P = 0,8$  МПа, для чугуна СЧ-20 эта величина соответственно равна 109,8 и 14,7 мм/км. При нагрузке  $P = 8$  МПа интенсивность изнашивания ЛМКМ 1-й группы соответствует интенсивности изнашивания литых бронз БрОЦС5-5-5 и БрОФ10-1 и находится в пределах 5,0...8,2 мм/км (рисунок, а). С увеличением концентрации легирующих элементов в матрице (образцы № 7, 8, 9) интенсивность изнашивания ЛМКМ уменьшается ( $\epsilon = 5,0...8,2$  мм/км) за счет образования интерметаллидов на границе контакта фаз. Литые композиционные материалы, упрочненные термообработанными или износостойкими чугунами гранулами, (образцы № 11, 12) при этих режимах испытаний имеют интенсивность изнашивания  $\epsilon = 0,035...0,048$  мм/км и в 6...7 раз превосходят по износостойкости закаленную сталь. Отдельно выделяется ЛМКМ на основе специально легированной бронзы (образец № 13) с антифрикционными включениями, дающей пленку меди на поверхности трения. Интенсивность изнашивания этого материала находится на уровне ЛМКМ с износостойкими гранулами.

Уменьшение нагрузки до  $P = 2$  МПа качественно меняет характер соотношения интенсивности изнашивания образцов (рисунок, б). Образцы из разработанных ЛМКМ превосходят по износостойкости стандартные литые бронзы не менее чем в 5...6 раз для низколегированных матриц и не менее чем в 10...20 раз для высоко- и сложнелегированных матриц. Кроме того, в зависимости от уровня легирования и вида термообработки упрочняющих гранул, износостойкость образцов из ЛМКМ сопоставима или превосходит закаленную сталь в 5...20 раз.

Интересно отметить, что при нагрузке  $P = 0,8$  МПа интенсивность изнашивания ЛМКМ для первых трех групп выравнивается, и она меньше в 8...10 раз показателей для закаленной стали, и на порядок ниже данных для стандартных бронз. Однако износостойкость образцов ЛМКМ 4-й группы (образец № 13) в 4...5 раз ниже, чем в других группах ЛМКМ. Можно предположить, что для протекания восстановительных процессов в зоне трения, приводящих к образованию пленки меди, необходима повышенная температура, которая не достигается при малой нагрузке.



а) б)

Зависимость интенсивности изнашивания материала от нагрузки:

а –  $P = 8$  МПа; б –  $P = 2$  МПа;

материал образцов: № 1, 2, 3, 7, 8, 9, 11, 12, 13 – разработанные ЛМКМ;

№ 4 – серый чугун; № 5 – бронза БрО10Ф1; № 6 – бронза БрОЦС5-5-5; № 10 – сталь 45 (48HRC)

Исследования триботехнического поведения ЛМКМ в условиях граничного трения проводились при тех же нагрузках, что и при сухом трении ( $P = 8$  МПа). При использовании пластичной смазки солидола УС-2 коэффициент трения покоя ( $f_{тр.п.}$ ) составлял 0,09, а коэффициент трения движения ( $f_{тр.дв.}$ ) – 0,061. В процессе испытаний было установлено, что через 1500 циклов наступает режим трения без смазки, приводящий к появлению задира. В то же время исследования показали, что введение в смазку высокодисперсных кластеров синтетического углерода, а также присадок, дающих явление избирательного

переноса, резко снижает коэффициент трения и почти полностью исключает изнашивание трущихся поверхностей. Известно, что избирательный перенос проявляется обычно при взаимодействии стальной поверхности детали с медью или ее сплавами [3]. При этом на рабочей поверхности стальной детали образуются пленки особого строения, состоящие из чистой меди. Кроме того, возможно образование сервоитной пленки, характеризующейся аномально низким коэффициентом трения. В данном случае наличие в ЛМКМ бронзовой матрицы создает предпосылки для реализации явления избирательного переноса при вводе в смазку специальных добавок. На основе исследований была разработана пластичная смазка, содержащая добавки, способствующие проявлению избирательного переноса.

В первой серии триботехнических испытаний с жидкой смазкой было использовано маловязкое турбинное масло Тп-22, которое широко применяется в теплоэнергетическом оборудовании. При температуре испытаний 20 °С система характеризовалась коэффициентом трения покоя  $f_{тр.п.} = 0,093$  и коэффициентом трения движения  $f_{тр.дв.} = 0,077$ . Испытания показали, что масло Тп-22 не обеспечивает достаточно низкий коэффициент трения при указанных режимах испытаний и в процессе испытаний не происходит прирабатывания образца и контртела. Сила трения в испытаниях достигает значительных величин. Добавка УДАГ-СП к турбинному маслу приводит к резкому снижению силы трения в течение цикла, что проявляется в двукратном уменьшении коэффициента трения покоя и десятикратном снижении коэффициента трения движения ( $f_{тр.п.} = 0,05$ ,  $f_{тр.дв.} = 0,0063$ ). Вероятно, применение в качестве добавок высокодисперсных кластеров синтетического углерода, в частности ультрадисперсных алмазов (УДА), улучшает прирабатываемость поверхностей трения и повышает износостойкость рабочих поверхностей деталей в триботехническом сопряжении [4]. Наличие в составе модифицирующих добавок частиц графита размером 10...100 нм, в свою очередь, уменьшает коэффициент трения и улучшает смачиваемость материалов смазкой.

При исследовании влияния температурного режима на триботехнические свойства ЛМКМ установлено, что при температуре 20 °С коэффициенты трения покоя и движения составляют соответственно  $f_{тр.п.} = 0,031$  и  $f_{тр.дв.} = 0,0085$ . При повышении температуры они начинают увеличиваться, особенно резкое их возрастание наблюдается в области температур 45...50 °С. Затем коэффициент трения несколько стабилизируется (при температуре 60 °С  $f_{тр.п.} = 0,128$ ,  $f_{тр.дв.} = 0,039$ ), а при температуре 70 °С из-за существенного уменьшения вязкости масла наблюдается задиры. Добавка УДАГ-СП к маслу МС-20 не приводит к значительному снижению коэффициента трения при температуре 20 °С, так как масло обеспечивает высокую несущую способность. При нагреве до температуры 60 °С для модифицированного УДА масла происходит последовательное снижение коэффициентов трения до  $f_{тр.п.} = 0,06$ ,  $f_{тр.дв.} = 0,007$ . Задиры появляются только при разогреве смазки свыше 90 °С.

Использование смазок с УДА при работе с антифрикционными бронзами не дает заметного эффекта из-за внедрения алмазов в мягкую матрицу, а также их абразивного воздействия.

**Выводы.** Исследование триботехнических характеристик гаммы разработанных литых композиционных материалов с применением бронзовых матриц различной степени их легирования и упрочняющих чугунных гранул с различными видами термообработки показало, что при высоких нагрузках ( $P = 8$  МПа) износостойкость отдельных видов ЛМКМ (сложнолегированная бронза + быстрозакаленные чугунные гранулы) превосходит в 6...7 раз (низколегированная бронза + термообработанные (закалка + отжиг) или износостойкие чугунные гранулы) износостойкость закаленной стали 45. При небольших нагрузках ( $P = 0,8...2,0$  МПа) износостойкость закаленной стали 45 сопоставима с износостойкостью ЛМКМ на основе низколегированных бронз и в 5...20 раз ниже износостойкости ЛМКМ на основе высоко- и сложнолегированных бронз.

Проведенные исследования показали перспективность применения в трибосопряжениях новых композиционных материалов с макрорегетерогенной структурой; эффективность применения добавок высокодисперсных кластеров синтетического углерода в жидкие и пластичные смазочные материалы в парах трения из литых композитов, позволяющих снизить коэффициент трения и повысить износостойкость; кроме того, повышается несущая способность смазочного материала при увеличении температуры, в частности, для масла МС-20С верхний уровень диапазона рабочей температуры повышается с 60 до 90 °С.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рекомендации по ремонту и реконструкции тяжело нагруженных узлов скольжения с использованием композиционных материалов / В.И. Жорник, А.С. Калинин, В.Я. Кезик и др. – Мн.: ИТК НАНБ, 2000. – 88 с.
2. Исследование физико-механических и трибологических свойств композиционных материалов для тяжело нагруженных узлов трения / А.С. Калинин, В.И. Жорник, В.А. Верещагин, Н.Е. Гильнич // Порошковая металлургия. – 1999. – Вып. 22. – С. 24 – 29
3. Избирательный перенос в тяжело нагруженных узлах трения / Под общ. ред. Д.Н. Гаркунова. – М.: Машиностроение, 1982. – 207 с.
4. Влияние материала фрикционной пары на триботехнические свойства консистентной смазки, модифицированной ультрадисперсными алмазами / П.А. Витязь, В.И. Жорник, В.А. Кукареко и др. // Трение и износ. – 2000. – Т. 21, № 5. – С. 525 – 533.