

УДК 621.74.046:62-419

Затуловский С. С., Затуловский А. С., Косинская А. В., Тракшинский Б. Р.

**БИМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ
АНТИФРИКЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Эффективным направлением создания новых подшипниковых материалов, с заданными улучшенными эксплуатационными характеристиками, при одновременной существенной экономии дефицитных цветных и др. металлов и сплавов, является изготовление и использование биметаллических слоистых композитов. В биметаллическом материале сочетаются эксплуатационные свойства, которые невозможно получить в отдельной составляющей композита: например, высокая прочность металла основного слоя с повышенной антифрикционностью, износостойкостью и (или) др. полезными специальными свойствами материала плакирующего слоя [1–12]. Биметаллы применяются в различных отраслях промышленности: в качестве подшипников скольжения, плунжеров, дозирующих устройствах, в аппаратах, установках, работающих в условиях агрессивных сред при высокой температуре и давлении, в трубопроводах для гидротранспортировки жидкостей и сыпучих материалов, во многих др. агрегатах и конструкциях [1, 5, 9, 10]. Антифрикционные биметаллические изделия применяются для изготовления подшипников, используемых в двигателях внутреннего сгорания, насосах высокого давления гидросистем и др. системах. Повышение нагрузок и скоростей в узлах двигателей обусловило необходимость замены дефицитных свинцовистых бронз, применяемых в виде литых вкладышей втулок (что снижало их прочность и стойкость), на биметаллические. Основной слой биметаллических слоистых композитов состоит из стали, придающий подшипнику достаточную механическую прочность, а плакирующий слой – из антифрикционного сплава. Плакирующий антифрикционный металл должен иметь хорошую прирабатываемость, низкий коэффициент трения в условиях недостаточной смазки, высокие износостойкость, теплопроводность, сопротивление сжатию и ползучести при температуре работы подшипника, достаточно высокую усталостную прочность при рабочих температурах, высокую стойкость против коррозии в маслах. При этом должно быть исключено схватывание и задиранье вала рабочим слоем втулки. Антифрикционный плакирующий слой, по возможности, не должен содержать дорогих и дефицитных легирующих компонентов. Несмотря на очевидные преимущества, многие вопросы структурообразования, технологии получения и свойств, изучены недостаточно.

Целью работы является создание и внедрение биметаллов с плакирующим слоем из высокоизносостойких экономнолегированных макроготерогенных литых композиционных материалов (ЛКМ) на основе медных сплавов, армированных стальными гранулами (дробью) [2, 3, 4] взамен, серийно применяемых, литейных свинцовистых бронз (сложных в получении однородного материала) деформируемых бронз, например марки Бр05С5Ц5, БрК3Мц1, или алюминиевых бронз типа БрА9Ж4. ЛКМ – самосмазывающиеся материалы, которые могут воспринимать высокую нагрузку, имеют низкий коэффициент трения, высокую усталостную прочность и хорошую теплопроводность [2, 3, 4]. Кроме того, гетерофазный рабочий слой ЛКМ под действием местных перегрузок деформируются, перераспределяя нагрузку на большую площадь, и в связи с дифференцированным износом в объемах между выступающими гранулами на трущихся поверхностях сохраняется масляная пленка. Структура биметаллических композитов и изделия из них приведены на рис. 1.

Определяющими факторами получения качественных биметаллических заготовок являются смачивание, и растекание матричного расплава по поверхности твердых элементов, физико-химическое взаимодействие компонентов с точки зрения растворо-диффузионных процессов на границах раздела фаз, обеспечивающих прочное сцепление слоев, температурно-

кинетические режимы нагрева, затвердевания и охлаждения заготовок, обеспечивающих получение оптимальной микроструктуры слоев, стабильность свойств компонентов и минимум литейных дефектов в готовом изделии.

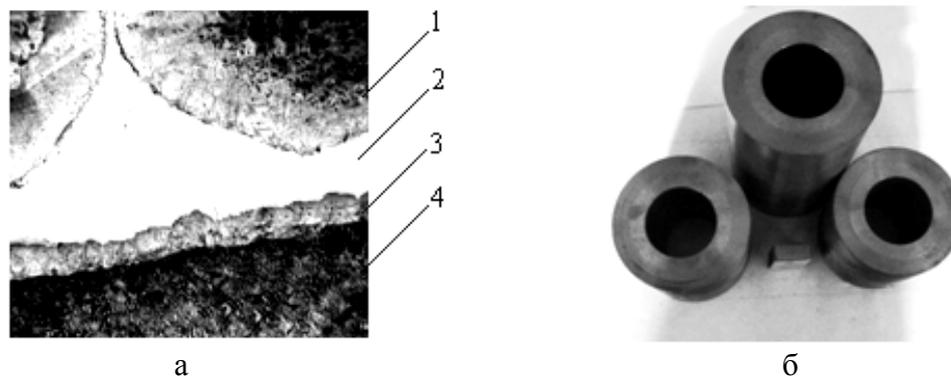


Рис. 1. Микроструктура биметалла типа сталь + антифрикционный ЛКМ типа медный сплав, армированный стальной дробью (а) и биметаллические детали (б):

1 – армирующие гранулы; 2 – медный сплав; 3 – переходный слой; 4 – основной стальной слой

Изучение процесса смачивания основного слоя материалом плакирующего слоя проводили методом лежащей капли [13, 14] на установке, разработанной в ФТИМС НАНУ. Были проведены исследования смачивания стальной подложки (сталь Ст 3) с наиболее широко распространенными марками подшипниковых медных сплавов (алюминиевой бронзой БрА9Ж4 (ГОСТ 497-79), и оловянной бронзой БрО5Ц5С5 (ГОСТ 613-79). Эти сплавы использовались в качестве матричного сплава ЛКМ и плакирующего монослоя. Биметаллические отливки изготавливали методом печной наплавки в герметичных металлических формах с восстановительной атмосферой. Из литых заготовок были вырезаны образцы ЛКМ и бронз, которые служили объектом для определения смачивания стальной подложки по методу лежащей капли. Гетерофазный композиционный расплав показал незначительно худшее смачивание стальной подложки, по сравнению с расплавом матричной бронзы для обоих вариантов ЛКМ. Эти небольшие различия не имеют существенного значения, т. к. температурный интервал смачивания не изменяется. Различия в параметрах смачивания стальной подложки между медным сплавом и ЛКМ, можно объяснить изменением химического состава расплава в процессе соединения основного слоя и плакирующего из ЛКМ. Необходимо также отметить некоторую затрудненность вытекания матричного металла из армирующего каркаса стальной дроби. Поэтому для бездефектной консолидации плакирующего слоя из ЛКМ и основного стального слоя можно порекомендовать некоторое увеличение температуры процесса или времени контакта при печной биметаллической наплавки.

Впервые изучены механические и триботехнические свойства экономнолегированных антифрикционных биметаллов «сталь + композит (ЛКМ)», «сталь + медный сплав» в зависимости от параметров армирования в сравнении с известными мономатериалами типа антифрикционных бронз, латуней.

Механические испытания биметаллических антифрикционных материалов «сталь + ЛКМ», «сталь + медный сплав» и мономатериалов проводили по стандартным методикам, на стандартном испытательном оборудовании, что позволило получить достоверные данные, пригодные для сравнения. Образцы биметалла подвергались удару со стороны основы – стали или плакирующего слоя. В качестве плакирующего композиционного материала применялся литой композит (ЛКМ), состоящий из бронзы или латуни и стальной дроби. Дробь использовали круглую диаметром 0,6–1,2 мм и колотую. Для сравнения были изготовлены образцы из ЛКМ, латуни марки ЛС59-1 и бронзы БрА9Ж4.

В биметаллических образцах при ударе по образцу биметалла «сталь + ЛКМ» со стороны плакирующего слоя (композита) относительная ударная вязкость существенно выше, чем при испытании со стороны стали и моносплава. Такая же закономерность установлена в случае применения для армирования колотой дроби. С целью определения уровня механических характеристик биметалла «сталь + ЛКМ» в зависимости от соотношений толщин основного (стального) и плакирующего (антифрикционного) слоя проведен комплекс механических испытаний различных вариантов биметалла. Исходя из положений, приведенных в работе [2–4, 15] и др. источниках, а также собственного практического опыта определили следующие физико-механические характеристики: прочность на сжатие и ударную вязкость. Эти характеристики ответственны за прочность и долговечность антифрикционной втулки при статических и динамических ударных нагрузках, которые возникают в практике работы высоконагруженных трибоузлов.

В табл. 1 представлены результаты испытаний на сжатие образцов из слоистых биметаллов «сталь + ЛКМ», «сталь + бронза» и отдельных компонентов, слагающих материалов.

Таблица 1

Результаты испытания на сжатие ($\sigma_{сж}$, МПа)

Значения полученных данных	Бронза типа А9Ж4	ЛКМ (бронза + стальная дробь)	Вариант биметалла «сталь + плакирующий слой»			
			$C_T + \frac{1}{4}$ бронза	$C_T + \frac{1}{2}$ бронза	$C_T + \frac{1}{4}$ ЛКМ	$C_T + \frac{1}{2}$ ЛКМ
Min–max	450–580	756–788	593–706,5	431–535,4	756–976	546–860
Среднее	513	774	638	484	866	700

Как видно из табл. 1, прочность на сжатие $\sigma_{сж}$ слоистых биметаллов «сталь + ЛКМ» характеризуется более высокой, среднем в 1,5–1,7 раз $\sigma_{сж}$, чем бронза. Из полученных данных следует, что для обоих типов слоистых композитов преимущество имеют варианты с меньшей толщиной плакирующего антифрикционного слоя ($\frac{1}{4}$ от общей толщины образца). Причем, как правило, слоистый биметалл «сталь + ЛКМ» имеет более высокие значения минимальных показателей характеристики $\sigma_{сж}$. До разрушения сжатием биметаллы прогнозировано имеют большую степень деформации чем «мономатериал» (бронза и дискретноупрочненный композит ЛКМ), что, вероятно, способствует их большей стойкости, и стабильности работы при нагружении в процессе эксплуатации.

Как показали исследования, ударная вязкость антифрикционного биметалла «сталь + ЛКМ» равна или приближается к уровню данной характеристики прочной углеродистой стали (основного слоя биметалла), т. е. слоистый биметалл «сталь + ЛКМ» имеет ударную вязкость в 3–4 раза выше, чем ЛКМ на основе бронзы, армированный стальными гранулами и существенно более высокую, чем у биметалла «сталь + бронза» и тем более выше моносплава бронзы.

По стандартным методикам были проведены триботехнические испытания двухслойных композитов с различной толщиной плакирующего слоя (ЛКМ или бронзы): 1; 2; 3; 4 и 7 мм. Для достижения оптимального соотношения твердости ($\frac{\mu_{ст}}{\mu_{бр}} \approx 3$) бронзы в биметалле по отношению к стальной фазе проводили термообработку. Определяли зависимость интенсивности изнашивания от прилагаемой нагрузки и изменяющейся скорости скольжения при варьировании величины плакирующего слоя композиционных материалов. Результаты испытаний приведены на рис. 2. Установлено, что износ биметалла с плакирующим слоем из бронзы значительно превышает износ биметалла сталь-ЛКМ.

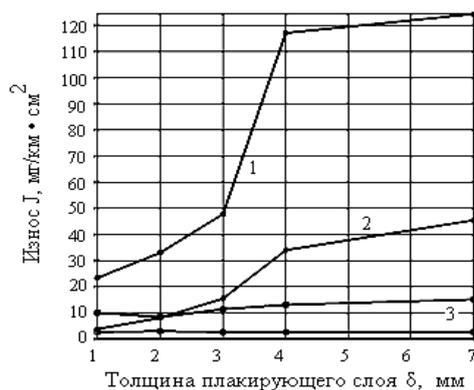


Рис. 2. Залежність інтенсивності изнашивания біметаллів при сухому трінні скольженні від величини плакуючого антифрикційного шару біметалла ($P = 50$ Н; $V = 5$ м/с):

1 – біметалл сталь-бронза Бр А9Ж4 (литее состояние); 2 – біметалл сталь-бронза Бр А9Ж4 (після термообробки); 3 – біметалл сталь-ЛКМ-матриця Бр А9Ж4 (литее состояние); 4 – біметалл сталь-ЛКМ-матриця Бр А9Ж4 (після термообробки)

Установлено, що износ біметалла композит-сталь практично не залежить від товщини плакуючого шару в отличие від біметалла сталь-бронза. Ці результати знаходяться в згоді з отриманими даними і механічними властивостями різних біметаллів. Тверді високомодульні включення наповнювача ЛКМ плакуючого шару, сприймаючи навантаження, сприяють благоприйнятному розподілу напружень в контактному шарі гетерогенного матеріалу при навантаженні трінням, тим самим покращуючи трибохарактеристики біметалла. Характер розподілу напружень вивчали методом кінцевих елементів з використанням програмного комплексу «Elcut». Так як навантаження не змінюється по довжині вздовж осі антифрикційної втулки, була розв'язана задача плосконапруженого стану при багаторазовому дискретному контакті сопряжених трущихся поверхностей. Установлено, що напруження в плакуючому шарі локалізуються, в основному, в прочних високомодульних армируючих елементах, а менш прочна матриця не відчуває великих напружень. Крім того, найбільш небезпечними з точки зору збереження міцності є дві зони підвищених напружень, одна з яких, знаходиться на значительній глибині від поверхності під армируючими елементами і між ними, друга – в вершинах контактуючих неровностей безпосередньо під площиною фактичного контакту, що і визначає процес изнашивания микронеровностей при зовнішньому трінні. Напружене стан трибосистеми визначає характер руйнування антифрикційної втулки. Трещини зароджуються в більш пластичному, але менш прочному матричному матеріалі і, проходячи до межфазної межі зі сталевими армируючими елементами, «гасяться» на межі з основним шаром (сталлю) і не отримують подальшого поширення. В плакуючому шарі з моно матеріалу, трещина, не маючи перешкоць, розповсюджується в глибину втулки і, чим більше товщина плакуючого шару, тим менше вплив основного шару на поверхнісні шари антифрикційної втулки.

З антифрикційного біметалла з плакуючим шаром з ЛКМ виготовляють підшипники скольження, вкладиші, втулки, пластини, др. трибодеталі вузлів тріння металургічного обладнання: прокатних станів, машин неперервної розливки сталі, конвеєрів перед нагрівальними печами, транспортних тележок, мелкосерийних кранів, шлеперних пристроїв, ножниць гарячої різки і др., а також трибодеталі енергетичного кузнечно-пресового, переробляючого, під'ємно-транспортного і др. обладнання [2, 3, 15].

Опытно-промислові випробування і багаторічний досвід успішної експлуатації на підприємствах України і В'єтнаму показали, що застосування антифрикційного біметалла з плакуючим шаром з ЛКМ дає значительний техніко-економічний ефект за рахунок наступних переваг:

- повышения в 1,5–5 (до 10!) раз ресурса работы узлов трения с широкой номенклатурой механизмов и агрегатов металлургического и др. оборудования, общего и специального машиностроения, бытовой техники;
- увеличения на 30–60 % межремонтного периода работы оборудования, что позволяет повысить его производительность, уменьшить простои и снизить необходимое для ремонта количество запасных частей;
- снижение расхода первичных цветных сплавов и легирующих металлов за счет использования вторичных сплавов, лома, стружки без снижения эксплуатационных показателей трибодеталей;
- отказа от импорта запчастей и комплектующих изделий триботехнического назначения.

ВЫВОДЫ

1. Биметаллические композиты с рабочим слоем из ЛКМ существенно превосходят по своим эксплуатационным характеристикам серийно применяемые в узлах трения подшипниковые мономатериалы.
2. Прочностные характеристики биметалла ЛКМ-сталь превышает прочность композита ЛКМ и серийных антифрикционных бронз и латуней.
3. Трибоиспытания показали, что более высокую износостойкость имеют биметаллические образцы с минимальным плакирующим слоем из ЛКМ.
4. Характер напряженного состояния при трении определяет биметаллические композиты с плакирующим слоем из ЛКМ как эффективную трибосистему, противостоящую развитию трещин как в поверхностном слое, так и в более глубоких слоях пластических и упругих деформаций.
5. Применение разработанных экономнолегированных биметаллических композитов дает значительный экономический эффект за счет улучшения эксплуатационных характеристик и экономии цветных сплавов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чепурко М. И. Производство биметаллических труб и прутков / М. И. Чепурко. – М. : Металлургия, 1986. – 240 с.
2. Затуловский А. С. Освоение антифрикционных композитов – решение проблемы увеличения ресурса работы оборудования / А. С. Затуловский, Б. Р. Тракинский, С. С. Затуловский // *Металл и литье Украины*. – 2004. – № 1–2. – С. 21–22.
3. Затуловский А. С. Технично-економічні передумови ефективного застосування зносостійкого металлокompозита замість антифрикційних бронз / А. С. Затуловський, Б. Р. Тракіїнський // *Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Литьє – 2007» : Запоріжжя : Торгово-промислова палата, 2007. – С. 72–75.*
4. Затуловский С. С. Литые композиционные материалы / С. С. Затуловский. – К. : - Техника, 1990. – 240 с.
5. Астров Е. И. Плакированные многослойные металлы / Е. И. Астров. – М. : Металлургия, 1965. – 230 с.
6. Разработка и совершенствование технологии производства биметаллических износостойких труб. Труды 6 конгресса прокатчиков / В. Я. Осадчий и др. – Липецк, 2005. – Т. 1. – С. 393–398.
7. Караник Ю. А. Биметаллические литые подшипники скольжения / Ю. А. Караник // *Литейные производство*. – 2006. – № 11. – С. 12–13.
8. Шпагин А. И. Антифрикционные сплавы / А. И. Шпагин. – М. : Металлургиздат, 1956. – 320 с.
9. Лакедемонский А. В. Биметаллические отливки / А. В. Лакедемонский. – М. : Машиностроение, 1964. – 180 с.
10. Ващенко К. И. Биметаллические отливки железо-алюминий / К. И. Ващенко. – М. : Машиностроение, 1966. – С. 180.
11. Болтон У. Конструкционные материалы: металлы, сплавы, полимеры, керамика композиты / У. Болтон. – Москва : Додэка – XXI, 2007. – 320 с.
12. Карпенко М. И. Металлы, сплавы и композиции / М. И. Карпенко, А. П. Мельников. – Минск : ИРХП Белавтотракторостроение, 2004. – 460 с.
13. Затуловський А. С. Контактні процеси в гетерофазній системі рідкий мідний сплав – тверді підложки з залізо-вуглецевих сплавів / А. С. Затуловський, А. М. Верховлюк // *Металознавство та обробка металів*. – 2007. – № 3. – С. 11–16.
14. Витусевич В. Т. // *Процессы литья*. – 1993. – № 4 – С. 81–87.
15. Найдек В. Л. Литые композиционные и нанокристаллические материалы – достижения, проблемы / В. Л. Найдек, С. С. Затуловский, А. С. Затуловский // *Металлургия машиностроения*. – 2005. – № 6. – С. 18–28.