

УДК 620.181.4:53.096

С. С. Затуловский, Б. Р. Тракшинский*, В. А. Щерецкий

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

*ОАО «Ильичевский рудоремонтный завод», Стаханов

МЕЖФАЗНЫЕ КОНТАКТНЫЕ ПРОЦЕССЫ КАК ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ ЛИТЫХ БИМЕТАЛЛОВ

Приведены результаты изучения межфазного натяжения в биметаллических системах твердое (сталь) – расплав (медный сплав) в процессе твердо-жидкофазного совмещения компонентов типа: сталь – литой композиционный материал (ЛКМ) на медной основе, армированный стальными гранулами, а также биметалла; сталь – медный сплав. На основании полученных результатов сформулированы рекомендации по усовершенствованию технологии получения заготовок из антифрикционных биметаллов методом печной плавки.

Наведені результати вивчення міжфазного натягу в системах тверде (сталь) – розплав (мідний сплав) в процесі твердо-рідиннофазного суміщення біметалів типу: сталь – литий композиційний матеріал (ЛКМ) на мідній основі, армований стальними гранулами, а також біметалу; сталь – мідний сплав. На основі одержаних результатів сформульовано рекомендації по удосконаленню технології одержання заготовок з антифрикційних біметалів методом пічної плавки.

There are investigation results of interfacial tension into the systems solid (steel) – liquid (copper alloy) while acting solid-liquid consolidation processes of the bimetals: steel – cast composition material (CCM) on the base of copper armed by steel pellets; steel – copper alloy. The recommendations for improving production technology of billets from antifriction bimetal materials by furnace melting were stated.

Ключевые слова: биметалл, композит, смачивание.

Одними из эффективных способов получения требуемых высоких эксплуатационных свойств материалов, а также экономии дефицитных металлов являются разработка и использование биметаллических изделий – ступок, прутков и других изделий [1-6]. Особенно актуально применение биметаллов в качестве высокостойких подшипниковых материалов типа «сталь+антифрикционный материал». Однако, перспективный вариант биметалла «сталь+антифрикционный композит на медной основе» (рис. 1) в указанных работах не изучался. Вместе с тем, качество изделий из биметаллов, полученных с помощью литейных технологий или твердожидкого совмещения компонентов, зависит от взаимодействия твердой основы (стали) с жидким плакирующим антифрикционным медным сплавом или гетерофазным матричным расплавом ЛКМ. В результате этого взаимодействия происходит сцепление (схватывание)

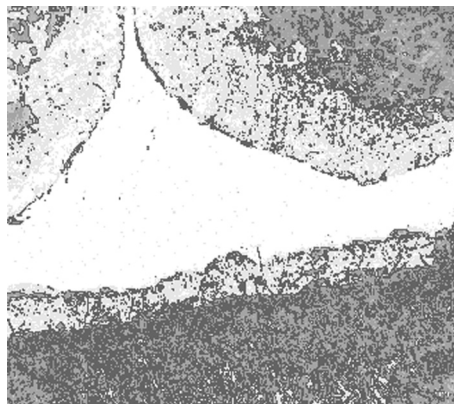


Рис. 1. Микроструктура биметалла типа сталь + антифрикционный ЛКМ типа медный сплав, армированный стальной дробью

слоев металлов, то есть образование биметаллического изделия с повышенными эксплуатационными характеристиками. Прочность сцепления слоев и уровень свойств биметалла зависят от смачивания, растекания, работы адгезии, а также таких литейных свойств, как жидкотекучесть и вязкость расплава. На свойства биметаллической отливки существенное влияние оказывают характер физико-химического взаимодействия твердого металла с расплавом и структура образующейся переходной зоны схватывания, которые определяются соответствующими бинарными диаграммами состояния $\text{Cu}+\text{Me}$, составами сплавов и режимами литья. Однако влияние этих определяющих факторов на свойства биметаллических отливок изучены недостаточно. В связи с этим изучение межфазного взаимодействия в системе твердое тело – расплав при печной наплавке биметалла системы сталь + ЛКМ представляет научный и практический интерес. Для изучения поверхностного натяжения металлических расплавов наибольшее применение получил метод лежащей капли [7-8], который положен в основу методики и специального оборудования, разработанных в ФТИМС НАН Украины [9]. Основное преимущество разработанных метода и аппаратуры по сравнению с известными заключается в том, что при измерениях используется значительно большее количество точек профиля капли, сокращается время обработки экспериментальных данных, повышается точность и уменьшается влияние субъективного фактора.

На первом этапе для определения рационального варианта комбинации материалов подшипниковых биметаллов и температурно-временных параметров технологии совмещения были изучены характер смачивания, определены контактный угол смачивания и адгезия меди и антифрикционных сплавов БрА9Ж4, БрКЗМц1, Бр01Ф1 металлических подложек из стали и антифрикционного чугуна типа 44Х12Г5. Комбинации этих систем отвечают возможным перспективным вариантам экономно легированных подшипниковых биметаллов. В работе [10] было установлено, что контактные углы смачивания при растекании расплавов на основе меди по чугуну переходят в область стабильного смачивания лишь в зоне относительно больших перегревов расплава – 1200 °С, чем по стали.

В биметаллах антифрикционный слой (ЛКМ, медный сплав) наносят на более прочную составляющую – углеродистую сталь [1-3]. Разработанный биметалл (сталь + медный сплав, армированный стальными гранулами) имеет значительные преимущества по прочности и трибохарактеристикам. Однако технология производства литых заготовок из такого материала несколько усложняется, так как при твердо-жидкофазном совмещении увеличивается площадь диффузионных контактных слоев в объеме гетерофазной отливки, что еще в большей степени требует знания механизмов и кинетических особенностей смачивания и растекания в системе сталь + ЛКМ. Как было отмечено, медные сплавы лучше смачивают стальную подложку, чем чугунную. Поэтому выбор стали в качестве внешней несущей компоненты (основного слоя) гетерогенной втулки является оправданным, тем более учитывая значительные преимущества стали в уровне механических свойств. Были проведены исследования смачивания стальной подложки (сталь марки Ст3) с наиболее широко распространенными марками подшипниковых медных сплавов (алюминиевой бронзой БрА9Ж4 (ГОСТ 497-79) и оловянной бронзой Бр05Ц5С5 (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.

Результаты исследования показали, что параметры смачивания стальной подложки матричными сплавами гетерогенных дискретно армированных материалов, состоящих из стальной дроби и бронзовой основы, незначительно отличаются от параметров смачивания соответствующими медными сплавами, рис. 2-3. Гетерофазный композиционный расплав показал незначительно худшее смачивание стальной подложки по сравнению с расплавом матричной бронзы для обоих вариантов ЛКМ. Отличием в значениях контактных углов смачивания в сравниваемых системах можно было бы пренебречь, особенно учитывая разницу в условиях формирования капли и неизменность характера их температурной

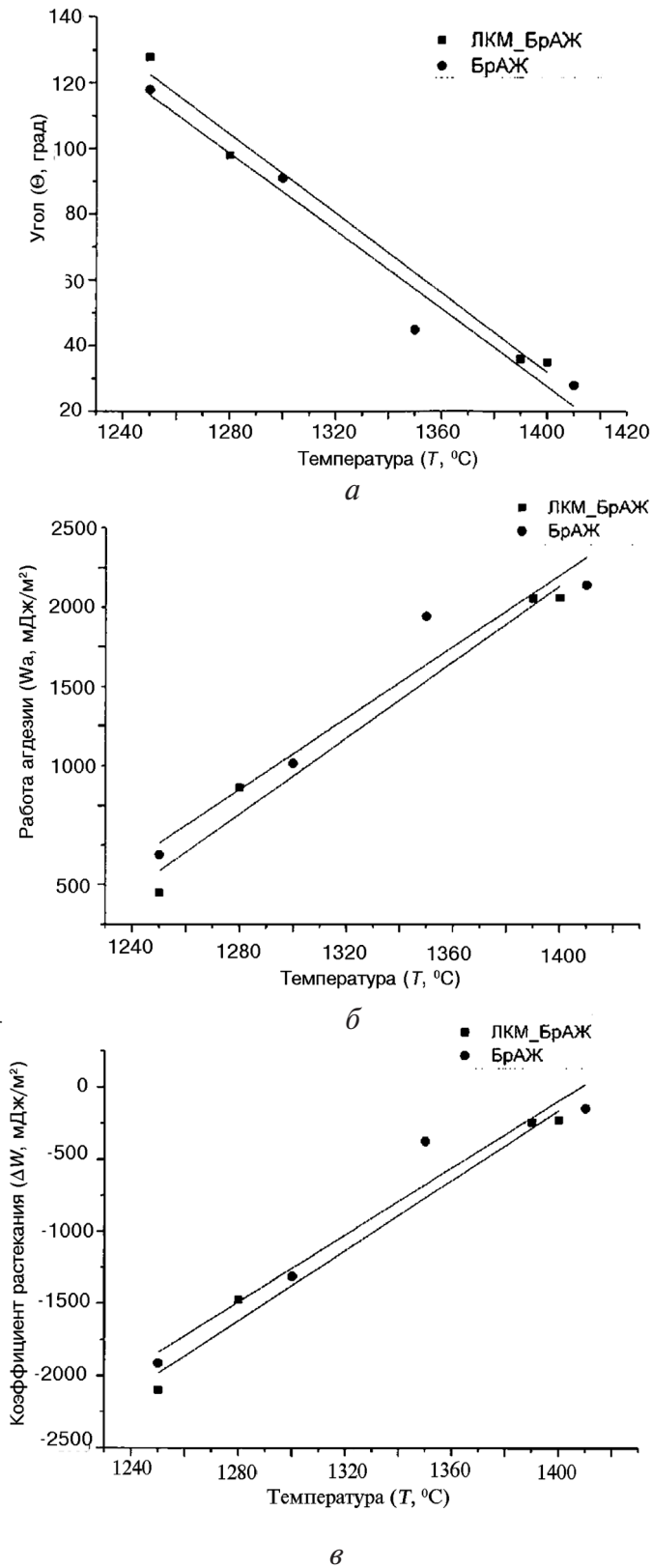


Рис. 2. Параметры смачивания в системах БрАЖ 9-4 – Ст3 и ЛКМ (стальная дробь – БрАЖ 9-4) – Ст3: а – угол смачивания; б – работа адгезии; в – коэффициент растекания

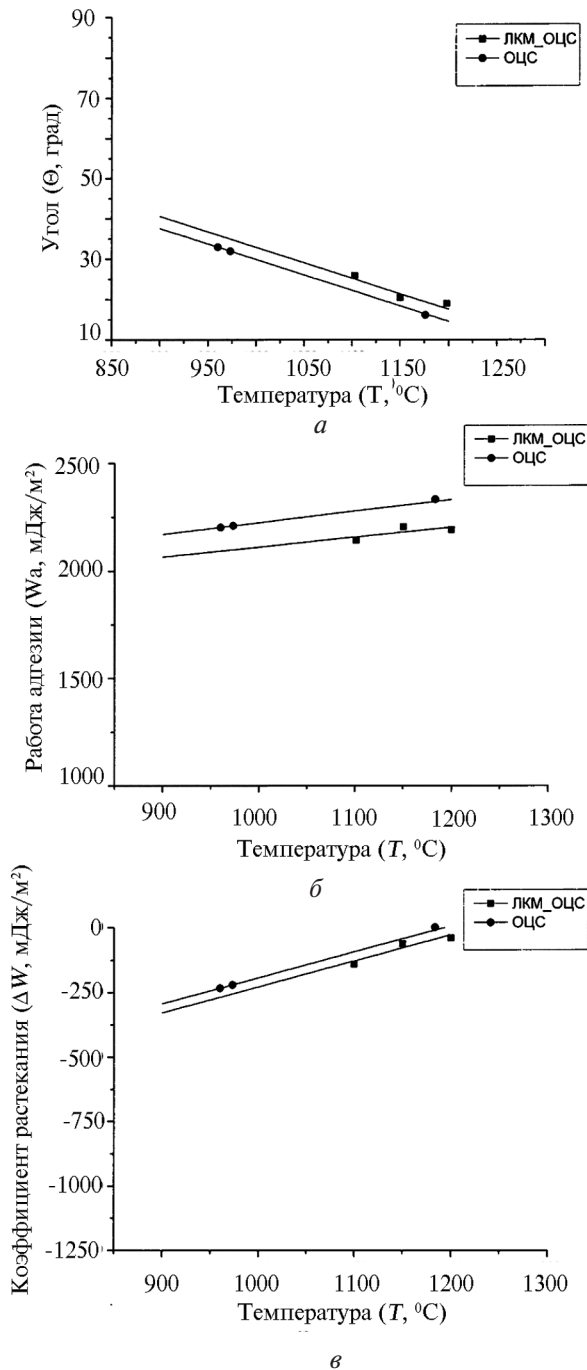


Рис. 3. Параметры смачивания в системах БрОЦС 5-5-5 – Ст3 и ЛКМ (стальная дробь – БрОЦС 5-5-5) – Ст3: *а* – угол смачивания; *б* – работа адгезии; *в* – коэффициент растекания

зависимости. Как следствие, сама разница в значениях угла смачивания для медных сплавов и ЛКМ критично не меняет температурную область стабильного смачивания – растекания в системе. Показательными в различии смачивания стальной подложки матричной бронзой и ЛКМ являются особенности формирования капли на подложке. Так, в случае испытания смачивания стали образцом ЛКМ по методу лежащей капли капля образуется расплавом бронзы, вытекающим из каркаса пористой насадки из сталь-

ной дроби, который сформировался в процессе консолидации ЛКМ в объеме биметаллической отливки. Как видно на рис. 4, в ЛКМ на границе фаз образуется переходная зона размером около 10 мкм, обогащенная железом, с температурой плавления выше температуры плавления матричной бронзы. Таким образом формируется слой, который является своего рода гарнисажем на гранулах, образуя подобие спаянного соединения между стальными гранулами. Во время испытания методом лежащей капли «спаянный» таким образом в ЛКМ каркас из дроби остается целым до значительных температур перегрева образца, в то время как расплав матричной бронзы

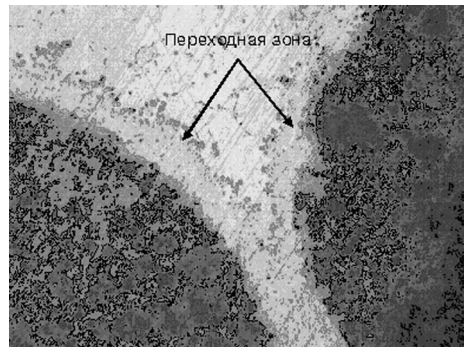


Рис. 4. Переходная зона на поверхности стальной дроби, формирующая «спаянное» соединение дроби

вытекает и формирует у основания «каркаса» каплю на поверхности стальной подложки. Таким образом, на процесс формирования стойкой связи бронза – сталь значительное влияние будут иметь параметры также пористой насадки – «каркаса», сформировавшегося в макрогетерогенном ЛКМ, а также значения вязкости (жидкотекучести) матричного расплава, которые интегрально будут определять возможность вытекания матричного сплава на подложку. В то же время в эксперимент вносится некоторая неоднозначность, связанная с изменением формы капли расплава с классической «куполообразной» на ступенчатую форму (рис. 4-5). На значения углов смачивания ЛКМ стальной подложки определенный вклад также вносят процессы массопереноса. Матричный бронзовый расплав, растекающийся у основания образца ЛКМ, уже может быть обогащен элементами, входящими в химический состав стальной дроби (например, Fe) – армирующей фазы в ЛКМ.

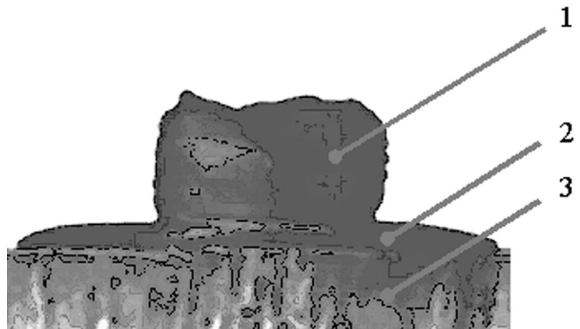


Рис. 5. Профиль капли ЛКМ (стальная дробь – БрОЦС 5-5-5) на стальной подложке: 1 – каркас ЛКМ; 2 – капля матричной бронзы; 3 – стальная подложка

В процессе проведения исследований было обнаружено, что формирование капли на стальной подложке расплавом матричной бронзы у основания ЛКМ происходит значительно выше температуры плавления бронзы. Причиной этого является высокая вязкость матричного бронзового расплава в ЛКМ при температурах, незначительно превышающих ликвидус бронзы. Было установлено, что для свободного вытекания бронзового расплава (БрА9Ж4, БрО5Ц5С5) из «каркаса» ЛКМ и формирования у его основания капли необходимо повысить его жидкотекучесть путем увеличения температуры эксперимента до значений выше 1100 °С. Кроме того, было установлено, что в результате изотермической выдержки капли бронзы БрО5Ц5С5 на стальной подложке в течение 6 мин при температуре 960 °С наблюдается последовательное изменение уменьшения контактного угла смачивания. Вероятно, это связано с растворением в капле бронзы химических элементов, входящих в состав стальной подложки. Следовательно, при изотермической выдержке в зоне контакта жидкое – твердое образуются зоны расплава, обогащенные химическими элементами подложки, которые влияют на угол смачивания. В то же время изотермическая выдержка капли БрА9Ж4 на стальной подложке при температуре 1400 °С незначительно повлияла на контактный угол смачивания. Вероятно, поверхностные оксидные пленки (Al_2O_3) в этой системе при заданной температуре влияют на вязкость расплава и затрудняют смачивание стальной подложки.

Выводы

• В процессе изучения характера и параметров смачивания в исследованных системах типа сталь – бронза экспериментально было установлено, что медные расплавы лучше совмещаются со стальной подложкой, чем с чугуной, что подтверждает правильность выбора стали в качестве основного слоя биметаллов.

• В результате исследования смачивания методом лежащей капли для варианта сталь+ЛКМ систем (стальная дробь + БрА9Ж4) и (стальная дробь + БрО5Ц5С5) установили, что в процессе формирования плакирующего слоя показатели смачивания стальной подложки (Ст3) для ЛКМ несколько ниже, чем для бронз, на основе которых они были изготовлены. Однако выявленная разница значений углов смачивания фактически не влияет на температурную область стабильного смачивания и растекания и, вероятно, обусловлена изменением механизма формирования капли бронзы, формирующейся у основания ЛКМ.

• Изотермическая выдержка расплава бронзы БрО5Ц5С5 на стальной подложке при температуре 960 °С приводит к последовательному уменьшению значения угла смачивания, что возможно связано с насыщением капли бронзы химическими элементами стальной подложки вблизи контактной зоны капля – подложка. Изотермическая выдержка капли бронзы БрА9Ж4 на стальной подложке при температуре 1400 °С показала, что наличие поверхностных оксидных пленок в этой системе играет доминирующую роль при смачивании подложки и влияет на величину контактного угла смачивания капли.

• Для улучшения смачивания и адгезии стальной подложки и матричной бронзы БрА9Ж4 следует проводить твердожидкое совмещение основного и плакирующего слоев (печную биметаллическую наплавку) в восстановительной (нейтральной) атмосфере при несколько более высоких температурах процесса, что и реализуется при изготовлении антифрикционных биметаллических отливок типа сталь + композит ЛКМ.

Авторы выражают признание А. М. Верховлюку и А. А. Беспалому за помощь в проведении исследований и участие в обсуждении результатов работы.



Список литературы

1. Астров Е. П. Плакированные многослойные металлы. – М.: Металлургия, 1965. – 240 с.
2. Ващенко К. Л. Биметаллические отливки железо-алюминий. – М.: Машиностроение, 1966. – 260 с.
3. Чепурко М. И., Остренко В. Я. Производство биметаллический труб и прутков. – М.: Металлургия, 1986. – 240 с.
4. Лакедемонский А. В. Биметаллические отливки. – М.: Машиностроение, 1964. – 240 с.
5. Ефимов В. А. // Теория и практика процессов получения биметаллических и многословных отливок. – Киев: Ин-т пробл. литья АН УССР, 1987. – С. 4-10.
6. Костенко Г. Д., Бердниченко В. И. // Состояние и перспективы развития биметаллического и многослойного литья. – Киев: Ин-т пробл. литья АН УССР, 1991. – С. 4-15.
7. Найдич Ю. В. Контактные явления в металлических расплавах. – Киев: Наук. думка, 1972. – 230 с.
8. Иващенко Ю. Н. // Поверхностные явления в расплавах и процессах порошковой металлургии. – Киев: Наук. думка, 1963. – С. 391-417.
9. Витусевич В. Т. // Процессы литья. – 1993. – № 4. – С. 81-87.
10. Затуловский А. С., Верховлюк А. М. // Металлознавство та обробка металів. – 2007. – № 3. – С. 11-16.
11. Тракишинский Б. Р. Затуловский С. С. // «Литье–2008»: Тез. докл. - Киев: – ФТИМС НАНУ, 2008. – С. 186-188.

Поступила 22.07.2009