

КОНТАКТНОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ ЛЕГКОПЛАВКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ*

А. Н. Кравченко, А. Д. Шляпин

Реферат. На примере контактного легирования меди и железо-медных сплавов из расплавов на основе свинца выполнен анализ формирования микроструктуры композиционного материала в приповерхностном затвердевшем слое легирующего расплава. Обсуждаются факторы, влияющие на микроструктуру этого композиционного материала и прочность его сцепления с базовым легируемым объектом. Показано, что подобный материал может быть получен также в процессе электроимпульсного легирования.

Ключевые слова: контактное легирование, легкоплавкий, тугоплавкий элемент, легирование электроимпульсом, композиционный материал

Введение

Метод контактного легирования (КЛ) был предложен в конце 1980 г. [1] для поверхностного легирования конструкционных материалов на основе железа, меди и алюминия тяжелыми легкоплавкими элементами, такими как олово, свинец, индий, висмут и др. Названные элементы при условии их равномерного распределения в поверхностном слое конструкционных материалов существенно (на порядок и более) снижают коэффициент трения скольжения и на порядок уменьшают износ. Способ контактного легирования позволяет отказаться от применения спеченных порошковых материалов, пропитанных тяжелыми легкоплавкими элементами. В результате резко снижается расход дефицитных и дорогих легкоплавких материалов, упрощается процедура изготовления изделий при значительном улучшении их эксплуатационных характеристик.

Получение композиционных материалов методом контактного легирования

В работах [2, 3] было уделено значительное внимание структурным и фазовым превращениям,

лежащим в основе процессов контактного легирования, и предложены модели, проясняющие механизм этого процесса. Было показано, что КЛ представляет собой сложный процесс взаимодействия расплава с твердым однофазным или многофазным объектом, результат которого зависит от состава взаимодействующих объектов, взаимного расположения и дисперсности фаз легируемого объекта, температуры, а также скорости отвода продуктов взаимодействия от границы раздела жидкой и твердой фаз.

Следует отметить, что методом КЛ были получены композиционные материалы на основе железа, меди и алюминия, и достаточно детально изучены процессы, происходящие в твердом объекте. В то же время превращения, имеющие место в расплаве, остались почти неизученными, хотя, на наш взгляд, они представляют не меньший интерес как с теоретической, так и с практической точки зрения.

В этом контексте рассмотрим более подробно некоторые выводы из ранних работ и приведем некоторые новые результаты. Классически можно считать превращения, происходящие

* Работа выполнена в рамках научно-исследовательской работы № 2.1.2/6967 Аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010)»



Рис. 1. Микроструктура начальной стадии взаимодействия жидкого свинца с медью ($\times 100$)

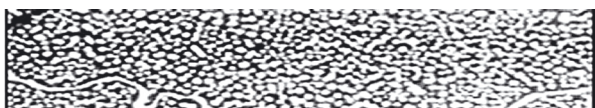


Рис. 2. Микроструктура затвердевшего расплава свинец-медь ($\times 100$)

в жидком свинце во время КЛ меди в ходе монотектической реакции (рис. 1).

Следует отметить, что микроструктуру затвердевшего расплава свинец-медь, как на рис. 2, можно получить только при некотором недостатке жидкой фазы, когда за время эксперимента может быть достигнуто необходимое насыщение расплава тугоплавким компонентом.

Полученная микроструктура отличается высокой степенью однородности, равномерным распределением структурных составляющих по объему. Похожую в некоторой степени микроструктуру удалось получить только закалкой перегретого свинцово-медного расплава в индий-галлиевую эвтектику по методике, описанной в работе [4].

Однако при более детальном сравнении данных микроструктур следует признать большую однородность в случае КЛ. Это свойство чрезвычайно важно, когда речь идет о применении сплавов Cu-Pb в микромашинах, где подшипники скольжения в диаметре не превышают нескольких мм.

Влияние легирования расплава на процесс КЛ

Переход к двухкомпонентным расплавам и двухфазным твердым реагентам сопровождается появлением ряда особенностей во взаимодействии компонентов в расплавах.

Компоненты твердого реагента и его фрагменты, оказавшись в расплаве, могут, в зависимости от природы второго компонента, начать взаимодействовать с ним, а при определенных условиях – и с базовым компонентом, с кото-



Рис. 3. Микроструктура затвердевшего расплава Pb-20% Sn после взаимодействия со сплавом Fe-50%Cu ($\times 100$)

рым в однокомпонентном расплаве взаимодействия не было. Результатом этого взаимодействия может быть формирование твердых растворов или интерметаллидных соединений, которые после затвердевания расплава могут существенно изменить его свойства. Пример такого случая приведен на рис. 3, где показана микроструктура затвердевшего расплава Pb-20%Sn после завершения его взаимодействия со сплавом Fe-50%Cu при $T = +800^\circ\text{C}$ в течение 30 мин. Фазовый анализ этого сплава показал наличие в нем таких фаз, как $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$.

Ранее отмечалось, что механизм взаимодействия двухкомпонентного расплава с двухфазным твердым телом нельзя считать достаточно изученным. Так, кроме взаимного растворения компонентов в твердой и жидкой фазах, в случае названных выше компонентов вполне возможно протекание эвтектической и монотектической реакций в трех и более компонентных системах, что существенно ускоряет процессы взаимной миграции компонентов.

Дальнейшее развитие работ в части использования твердо-жидкофазного взаимодействия для создания новых композиционных материалов планируется путем целенаправленного добавления в расплав третьих компонентов, обладающих определенными свойствами по отношению ко всем участкам процесса твердо-жидкофазного взаимодействия. Такой компонент (назовем его на данном этапе компонентом С) может полностью или частично растворяться в базовом компоненте А расплава, вступать или не вступать в различные реакции; то же самое можно сказать в отношении взаимодей-

ствия компонента *C* с компонентом *B*, ранее введенном в расплав на основе *A*. Кроме того, что очень важно, в системе *A-B-C* могут иметь место моновариантные реакции, что скажется на характере взаимодействия расплава с твердым реагентом.

Элемент *C* может растворяться или почти не растворяться в фазах твердого реагента, вступать или не вступать с ними в реакции, образовывать или не образовывать интерметаллиды.

На границе раздела твердых и жидких фаз компонент *C* может существенно изменить кинетику взаимодействия и характер его продуктов, если его наличие приведет к реализации новых реакций между компонентами, которые были без него невозможны.

Один из таких компонентов был добавлен к расплаву Pb-20%Sn, который был в контакте со сплавом Fe-40%Cu при $T = +800\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 30 мин (рис. 4).

Сравнение аналогичных зон в экспериментах с элементом *C* и без такового показали следующие предварительные результаты.

В затвердевшем расплаве, кроме твердых растворов на основе меди и железа, присутствуют интерметаллиды на их основе, а также твердые растворы на основе легкоплавких ком-

понентов.

Граница раздела расплава и твердого реагента (со стороны последнего) существенно более неоднородна и рельефна, что обеспечивает более прочное сцепление поверхностного слоя с основой.

Предварительный элементный и фазовый анализ закристаллизованного слоя на основе Pb позволяет ожидать улучшения его антифрикционных свойств по отношению к базовому варианту.

Получение композиционных материалов электроимпульсным легированием

В процессе исследований были сопоставлены результаты экспериментов по КЛ из многокомпонентных расплавов с результатом электроимпульсного легирования сталей из шликерного слоя, содержащего частицы меди и свинца. Предварительно порошки меди и свинца одновременно обрабатывались в шаровой мельнице для взаимного механического легирования частиц. Дифференциальный термический анализ порошков показывает, что в результате обработки в шаровой мельнице произошло растворение свинца в меди, и образовался пересыщенный твердый раствор.

Для выполнения экспериментов по электроимпульсному легированию образцы готовили в виде следующей сборки, схема которой показана на рис. 5.

В свинцовую фольгу заворачивали стальную полосу со слоем шликера для того, чтобы предотвратить разбрасывание порошка в процессе обработки. Наличие в свинцовой матрице включений меди и частиц стали (рис. 6) свидетельствует о том, что речь идет не просто о механическом слиянии мягкого свинца и более твердых частиц меди. В результате воздействия электрического

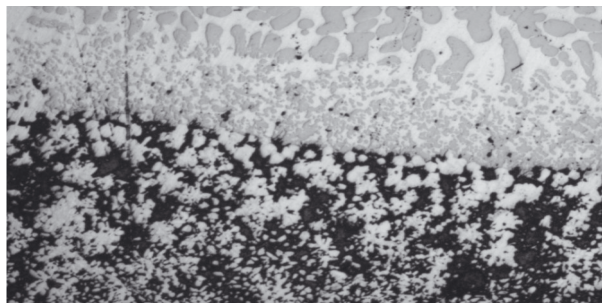


Рис. 4. Микроструктура зоны тройного расплава, образовавшаяся после его кристаллизации на границе со сплавом железо-медь ($\times 100$)

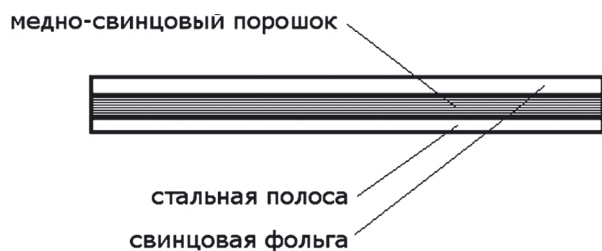


Рис. 5. Схема образца для электроимпульсной обработки

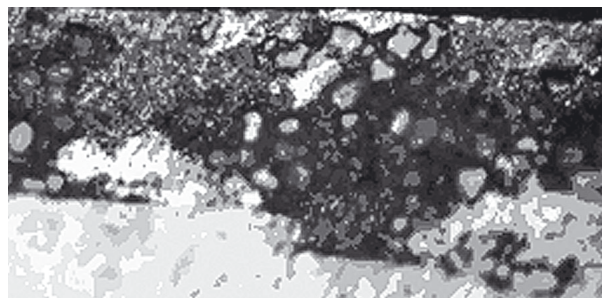


Рис. 6. Микроструктура поверхностного слоя, образовавшегося на стальной ленте после электроимпульсной прокатки ($\times 100$)

импульса произошло, как и в случае с расплавами, частичное разрушение стали с обособлением ее частичек и их переходом в свинец.

Важно также отметить, что подобного эффекта не наблюдается при изменении направления электрического тока на противоположный.

Заключение

Анализ структуры приповерхностного затвердевшего слоя на базе легкоплавкого металла, использованного для контактного легирования, показывает, что при определенных условиях этот слой может представлять самостоятельный интерес в качестве композиционного материала специального назначения.

Микроструктура и химический состав слоя, образовавшегося на базе легкоплавкого компонента, зависит от температуры и времени контактного легирования, а также исходного химического состава легкоплавкого и тугоплавкого реагентов. Варьируя химическим составом легкоплавкого реагента, можно в широких пределах изменить структуру и свойства нового ком-

позиционного материала.

Подобный композиционный материал на основе тяжелых легкоплавких компонентов может быть также получен в процессе электроимпульсного легирования.

Список литературы

1. Авраамов Ю.С., Шляпин А.Д., Алентова Т.П. Способ получения сплавов на основе железа, содержащих свинец // А. с. № 895102 (СССР), 1981.
2. Авраамов Ю.С., Шляпин А.Д. Новые композиционные материалы на основе несмешивающихся компонентов: получение, структура, свойства. – М.: Изд-во МГИУ, 1999. – 206 с.
3. Авраамов Ю.С., Шляпин А.Д., Сплавы на основе систем с ограниченной растворимостью в жидком состоянии. – М: Интернаука, 2002. – 371 с.
4. Авраамов Ю.С., Шляпин А.Д., Алиев У.Ш. Способ получения сплавов на основе систем, расслаивающихся в жидком состоянии // А. с. № 890750 (СССР), 1981.

КРАВЧЕНКОВ Антон Николаевич

Е-mail: akravchenkov64@yandex.ru
Тел. (495)677-96-70

Аспирант кафедры материаловедения и ТКМ МГИУ. Область научных интересов – металловедение и композиционные материалы. Автор(соавтор) 5 научных трудов.

ШЛЯПИН Анатолий Дмитриевич

Е-mail: ashliapin@list.ru
Тел. (495)675-61-92

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой материаловедения и ТКМ МГИУ. Область научных интересов – металловедение, физика металлов и композиционных материалов. Автор и соавтор более 130 научных работ, из них 7 монографий, 35 авторских свидетельств и патентов.

Материал поступил в редакцию 30.11.2009