

ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ ЖЕЛЕЗА ТЯЖЕЛЫМИ ЛЕГКОПЛАВКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

И. Б. Руденко

В статье показана возможность получения сплавов несмешивающихся компонентов с равномерным распределением структурных составляющих по объему на примере систем железо–свинец, железо–медь–свинец. Такая особая микроструктура сплавов была получена методом контактного легирования с помощью концентрированных потоков энергии.

Ключевые слова: системы, несмешивающиеся компоненты, контактное легирование, концентрированные потоки энергии

Введение

Проблема получения сплавов на основе систем с расслоением несмешивающихся компонентов (НК) в жидком состоянии с равномерным распределением структурных составляющих по объему остается актуальной до настоящего времени. Такое положение дел объясняется двумя причинами.

Первая из них связана с перспективностью рассматриваемых систем для получения большого числа новых уникальных материалов специального назначения. Среди многочисленных вариантов бинарных сочетаний НК обращают на себя внимание, в первую очередь, такие как Fe–Pb, Fe–Bi, Fe–Sn, Fe–S, Al–Pb, Al–Cd, Al–Bi, Al–Sn, Al–In, а также Cu–W, Cu–Pb, Cu–Bi, Cu–S. Моделирование свойств материалов из различных систем данного класса показало [1], что на их основе могут быть получены материалы с очень высокими антифрикционными свойствами, электротехнические и магнитные материалы, сплавы с высоким уровнем демпфирования, радиационно-защитные материалы, «потеющие» сплавы для ракетно-космической техники. Главным условием получения высокого уровня перечисленных выше свойств является равномерное распределение структурных составляющих по объему в данных материалах.

Вторая причина состоит в том, что в силу физико-химических особенностей систем несмешивающихся компонентов традиционные технологии сплавления и спекания не позволяют получить равномерное распределение структурных составляющих по объему сплавов. Основные особенности систем НК, обуславливающие данную трудность, сводятся к следующему:

- большая разница удельных масс и точек плавления;
- сильная тенденция сплавов НК к расслоению в жидком состоянии в широком интервале температур и концентраций.

В силу названных причин в отдельных системах НК, таких, как например, железо–свинец, до недавнего времени вообще не удавалось получить сплавы.

Актуальность и сложность рассматриваемой проблемы видна даже из простого перечисления некоторых методов получения сплавов НК, которые разрабатывались с начала прошлого столетия:

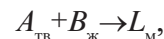
- методы порошковой металлургии;
- способ нагрева расплава до области однофазного однородного жидкого раствора (в тех системах, где это возможно) и ускоренное охлаждение расплава;

- способ кристаллизации под давлением;
- повышение эффективной вязкости расплава с помощью поверхностно-активных добавок;
- механическое перемешивание двухфазного расплава в процессе кристаллизации и ускоренное охлаждение;
- ультразвуковое перемешивание и ускоренное охлаждение;
- кристаллизация в условиях микрогравитации;
- кристаллизация в условиях квазиневесомости под действием скрещивающихся электрического и магнитного полей и ускоренное охлаждение;
- способ направленной кристаллизации.

Новые методы получения сплавов на основе систем НК

Еще одной особенностью систем НК является наличие у них монотектического превращения. В 2001 г. Международной академией авторов научных открытий и изобретений было зарегистрировано открытие – «Явление увеличения скорости массопереноса жидкофазной системы через твердофазную при монотектическом превращении» (авторы: Ю.С. Авраамов, К.Н. Шамшев и А.Д. Шляпин) [2]. Наблюдаемый эффект был положен в основу специального технологического приема, получившего название «контактное легирование» (далее КЛ). В процессе КЛ создаются такие условия, при которых легкоплавкий элемент из распла-

ва мигрирует в объем твердого тугоплавкого реагента. При этом скорость миграции может достигать нескольких сантиметров в минуту. Главным условием такой миграции является инициирование обратной монотектической реакции



где $A_{\text{ТВ}}$ – твердый тугоплавкий компонент; $B_{\text{Ж}}$ – жидкий легкоплавкий компонент; $L_{\text{М}}$ – жидкость монотектического состава.

Разработанная технология достигалась путем нагрева до температуры монотектического превращения.

Методом КЛ с помощью монотектической реакции, а также разработанными позднее методами КЛ с помощью элементов-лидеров и КЛ по жидким прослойкам [3, 4] впервые удалось получить многие сплавы НК, что ранее было невозможно или затруднительно [3]. Особенно важным является то, что этим методом можно получать не только объемно-, но также и поверхностнолегированные сплавы. Микроструктуры некоторых таких сплавов, взятые из [3], приведены на рис. 1.

В процессе исследований было замечено, что процессы КЛ могут быть инициированы не только путем нагрева, но также и другими видами энергии, например электрическим разрядом в зоне контакта жидкого и твердого металлов, радиацией, ударно-волновым нагружением, механическими деформациями и т.п. [4]. В частности было показано, что с помощью

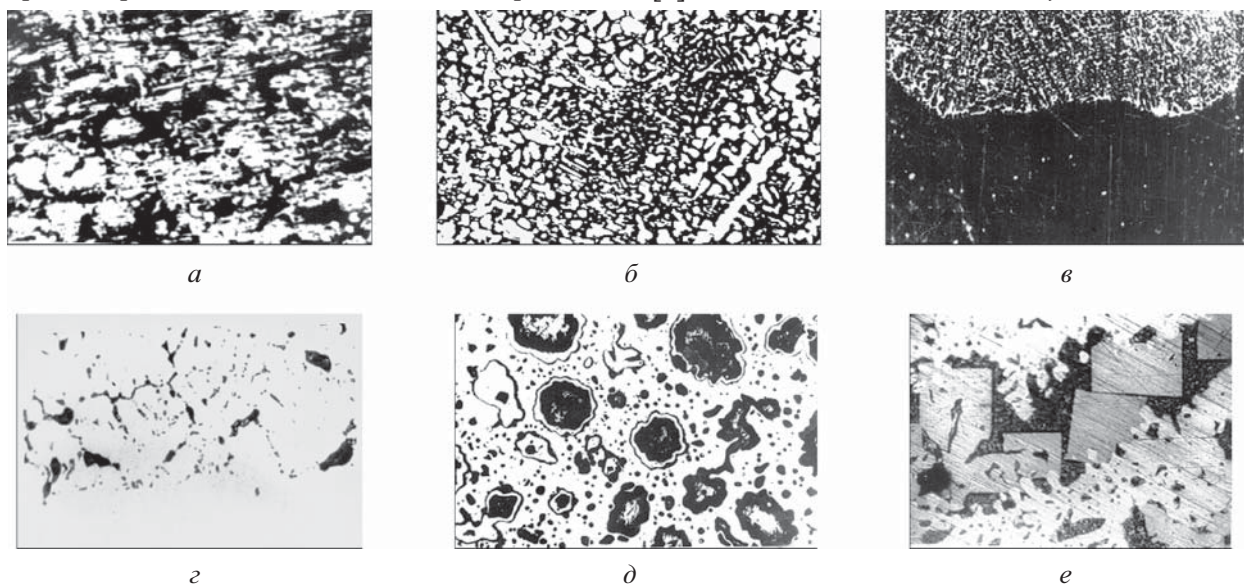


Рис. 1. Микроструктуры сплавов, полученных методом КЛ ($\times 400$):

а – железо–медь–свинец; б – железо–свинец; в – медь–свинец; г – алюминий–магний–свинец; д – медь–свинец–алюминий при 873 К; е – медь–свинец–висмут

одиночных электрических импульсов можно за доли секунды получать достаточно большие слои сплавов железо–свинец и железо–медь–свинец на поверхности любых сталей [5]. Следует отметить, что в данном случае мы тоже имеем дело со своеобразным КЛ, поскольку концентрированные потоки энергии протекают через контакт двух или более металлов – легирующих и легируемых. Однако очевидно, что данный вид КЛ является предпочтительным.

В ходе эксперимента с помощью трех электрических импульсов был получен сплав НК железо–свинец в верхней зоне (рис. 2). Для выявления структуры образец был подвергнут травлению.

Следует обратить особое внимание, что в этом сплаве свинец проникает на несколько миллиметров вглубь твердого железа, не нарушая его сплошности и не оставляя каких-бы то ни было «каналов».

Механизм такого проникания несомненно заслуживает дальнейшего детального исследования.

Не менее интересная микроструктура (рис. 3) получается при воздействии электрического импульса на три контактирующих металла – железо, свинец и медь. В данном случае железо

является легируемым объектом, а медь и свинец – легирующими элементами.

В результате воздействия на эти металлы нескольких одиночных импульсов произошло не только совместное проникание меди и свинца в объем монолитного железа, но и обратное проникание мелких частиц железа в объем, занимаемый смесью порошков меди и свинца.

Подтверждением этого обратного процесса проникания являются результаты микрорентгеноспектрального анализа (см. рис. 3, б).

Метод электромеханического легирования

Одной из модификаций метода электроимпульсного легирования является метод электромеханического легирования (рис. 4).

Электромеханическое легирование достигается механической обработкой металла и одновременным воздействием импульсами тока, прикладываемого к обрабатываемой заготовке в зоне деформации. Суть метода состоит в том, что при этой электроимпульсной деформации добавляется шликер, представляющий

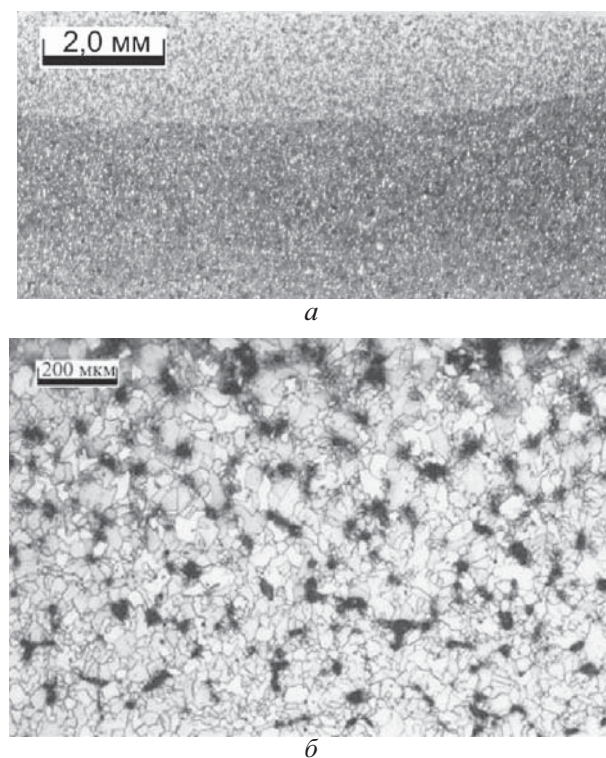
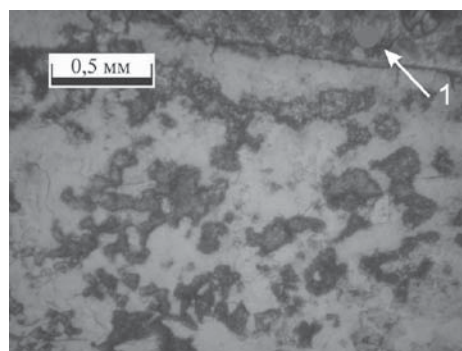
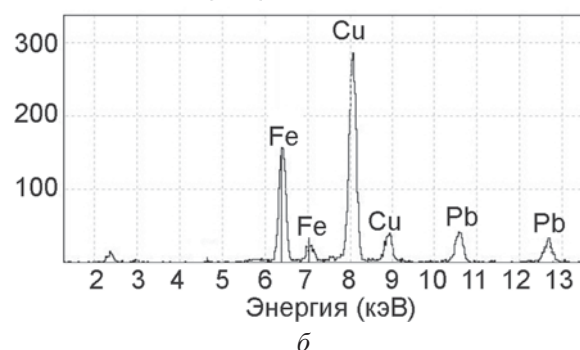


Рис. 2. Макроструктура (а) и микроструктура верхней зоны (б) сплава НК железо–свинец, полученного электроимпульсным КЛ



а

Интенсивность (имп)



б

Рис. 3. Микроструктура композиционного материала, полученного электроимпульсным КЛ железа медью и свинцом (а); результаты микрорентгеноспектрального анализа (б) в точке 1, где содержание элементов составляет: Fe – 15%, Cu – 39%, Pb – 46%

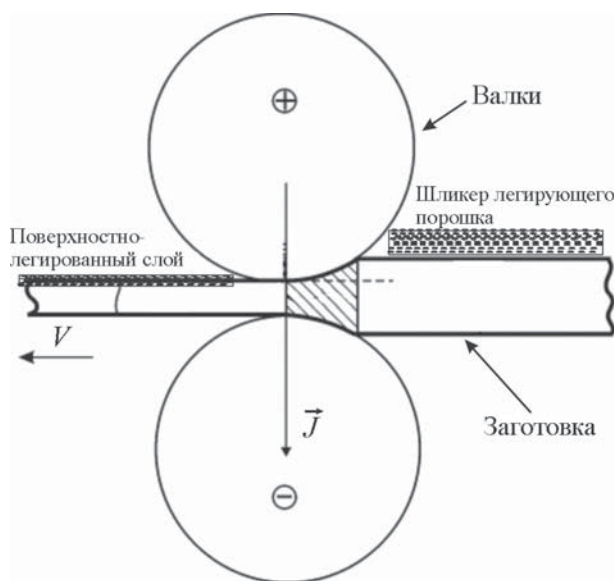


Рис. 4. Схема электрохимического легирования

собой порошковую смесь легирующих элементов, равномерно нанесенных на поверхность деформируемой (легируемой) детали. Иногда слой шликера укрывается тонкой фольгой какого-либо тяжелого легкоплавкого элемента. Каждый участок заготовки, проходя зону деформации со скоростью V , подвергается последовательному воздействию импульсов тока. Плотность импульсов тока, их длительность и частота определяются экспериментальным путем. Амплитудная плотность тока является силовым фактором его действия, которая вместе с длительностью импульсов определяет импульс силы и импульс энергии тока, действующих на заготовку в зоне деформации.

Импульсы тока прикладывают к заготовке таким образом, что направление вектора плотности тока J преимущественно совпадает с направлением развития основных пластических деформаций в заготовке в зоне между вальцами.

При электрохимическом легировании часто наблюдается эффект сквозного проникновения частиц легирующих элементов через пластину легируемого металла. На рисунке 5 показано сквозное проникновение частиц меди через стальную пластину толщиной 2 мм. Шликерный слой медного порошка толщиной около 0,5 мм был нанесен на противоположную сторону пластины.

На рисунке 6 представлена микроструктура поперечного сечения стального листа, легированного медью и вольфрамом. Как и в предыдущем примере, основная масса частиц леги-

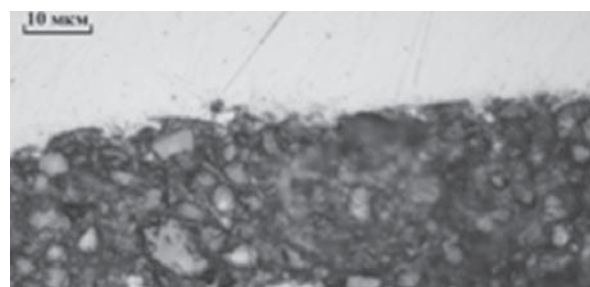


Рис. 5. Макроструктура обратной стороны стальной пластины, легированной медью с помощью электрохимического метода



Рис. 6. Микроструктура обратной стороны стальной пластины, легированной медью и вольфрамом с помощью электрохимического метода

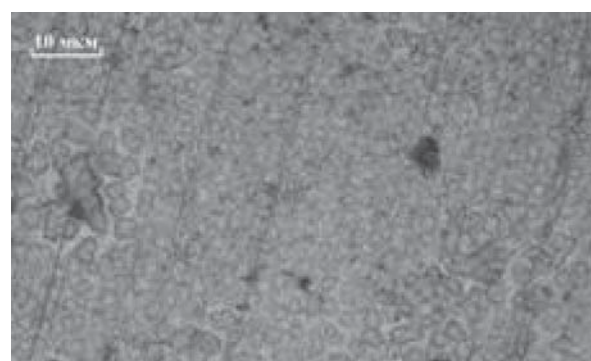


Рис. 7. Микроструктура алюминиевой пластины, легированной медью и свинцом с помощью электрохимического метода

рующих элементов достигла противоположной части пластины.

Данный метод легирования позволяет получать композиционные материалы, содержащие легкоплавкие элементы практически на основе любых металлов. Подтверждением этому служит алюминиевая лента, легированная медью и свинцом (рис. 7).

Заключение

Прохождение электрического импульса через контакт металлов, относящихся к системам с ограниченной взаимной растворимостью

в жидком состоянии (системам несмешивающихся компонентов) сопровождается взаимным прониканием частиц этих компонентов на относительно большие расстояния (до нескольких миллиметров). Этот феномен получил подтверждение на таких системах, как Fe–Pb, Fe–Bi, Al–Pb, Al–Cu–Pb, а также Fe–Pb–W, Fe–Cu–Pb и, по-видимому, является общим для систем данного класса.

Электроимпульсное легирование в системах несмешивающихся компонентов можно рассматривать как более удобную с технологической точки зрения альтернативу контактному легированию с помощью монотектической реакции и элементов-лидеров.

Вместе с тем, механизм взаимного проникания частиц и структурные особенности их расположения в матричном металле нуждаются в дополнительном исследовании.

Список литературы

1. Markworth A.J., Gelles S.H., Duga J.J. and Oldfield W. Immiscible materials and alloys // Proc. 3-rd Space Processing Symp., NASA Report 74-5, 1974. – P. 1003.
2. Авраамов Ю.С., Шамшев К.Н., Шляпин А.Д. Явление увеличения скорости массопереноса жидкофазной системы через твердофазную при монотектическом превращении // Открытие № 164. Зарег. 9.02.2001. Международная академия авторов научных открытий и изобретений, приоритет от 4.11.1984.
3. Авраамов Ю.С., Шляпин А.Д. Теоретические основы, технология и свойства сплавов на основе несмешивающихся компонентов. – М.: ИНТЕРКОНТАКТ НАУКА, 2002. – 376 с.
4. Твердо-жидкофазное взаимодействие компонентов систем с ограниченной растворимостью в жидком состоянии / Ю.С. Авраамов, В.И. Кошкин, В.Л. Столяров, А.Д. Шляпин. – М.: Изд-во МГИУ, 2008. – 82 с.
5. Явление взаимного массопереноса контактирующих твердых металлических веществ при импульсном воздействии / Ю.С. Авраамов, Н.П. Калашников, В.И. Кошкин, В.Е. Панин, К.Н. Шамшев, А.Д. Шляпин // Открытие № 322. Зарег. 26.01.2007. Международная академия авторов научных открытий и изобретений.
6. Истомин-Кастровский В.В., Кошкин В.И., Руденко И.Б. Микроструктурные особенности процесса сверхглубокого проникания в металлических системах в условиях твердо-жидкофазного взаимодействия // Перспективные материалы. 2008. № 2. С. 87–90.
7. Установка для обработки токопроводящих материалов импульсами электрического тока с регистрацией параметров процесса измерения их физико-механических свойств / И.Б. Руденко, В.И. Кошкин, В.А. Нижник, А.Д. Шляпин // Патент № 71088. Опубл. 27.02.2008. Бюл. № 6.

Материал поступил в редакцию 30.05.2010

РУДЕНКО
Игорь Борисович

E-mail: Rudenko@msiu.ru
Тел. 8 (495) 620-39-77

Директор Информационно-аналитического центра МГИУ. Сфера научных интересов – материаловедение в машиностроении, компьютерные системы. Автор 8 научных публикаций и 2 патентов.