

ФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ДИССИПАТИВНЫХ СТРУКТУР ПРИ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОМ ЛЕГИРОВАНИИ МЕДИ СВИНЦОМ*

С.Г. Пономарев, В.И. Кошкин, А.Д. Шляпин

Изучены фазовые и структурные превращения в зоне контакта меди и свинца при импульсном пропускании через границу раздела электрического тока в условиях очень быстрого плавления, избыточных давлений и ускоренного охлаждения расплава. Показано, что в этих условиях основным структурообразующим фактором является образование в меди полос адиабатического сдвига (ПАС), распространяющихся нормально по отношению к границе раздела взаимодействующих фаз. Именно по ПАС свинец распространяется в медь на расстояния, на порядки, превышающие таковые, достижимые за счет классической диффузии. В процессе последующего ускоренного охлаждения свинец в ПАС распадается на мелкодисперсные включения, получить которые невозможно традиционными способами легирования. Изучено также влияние дисперсных неметаллических включений (в частности оксидов Al_2O_3 , Cu_2O , CuO) на структуру сплава медь-свинец, получаемую при импульсном пропускании электрического тока и показано, что такие включения являются причиной образования в сплаве многочисленных участков со сферической симметрией.

Ключевые слова: монотектическая реакция, полосы адиабатического сдвига, твердо-жидкофазное взаимодействие, контактное легирование.

DISSIPATIVE STRUCTURES FORMATION AND DESTRUCTION UNDER ELECTRIC-PULSE ALLOYING OF COPPER WITH LEAD

S.G. Ponomarev, V.I. Koshkin, A.D. Shlyapin

The phase and structural transformations have been studied occurring in the contact zone of copper and lead on advancing pulsed electric current, rapid melting, excess pressures and rapid cooling of the melt. These conditions result in that structure formation is mainly controlled by the formation in copper of adiabatic shear bands (ASB) normal to the interphase boundary. These bands, in turn, provide the penetration of lead to the depth much more than that obtained on classical diffusion. The effect has been also studied of dispersed non-metallic inclusions (in particular Al_2O_3 , Cu_2O , CuO) on the structure of copper-lead alloy obtained under pulsed electric current. Such inclusions give rise to the formation of numerous spherical areas in copper-lead alloy.

Keywords: monotectic reactions, adiabatic shear band, solid-liquid transformation, contact alloying.

Введение

Система медь–свинец является объектом внимания металловедов с конца XIX в., но интерес к ней не пропал и сегодня. Это связано не только с прекрасными антифрикционными

свойствами получаемых на ее основе сплавов [1], но и интересными особенностями фазовых и структурных превращений, обусловленными ярко выраженной монотектической реакцией, имеющей место при $T_m = +954$ °C и относи-

* Работа выполнена на оборудовании и при поддержке сотрудников центра коллективного пользования «Научно-технологические технологии в машиностроении» ФГБОУ ВО «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)»

тельно большом содержании (36 масс. %) тяжелого легкоплавкого компонента в продукте монотектического превращения. Именно эта особенность, приводящая к сильной ликвации по удельной массе, побуждала различных исследователей искать пути к повышению однородности распределения свинца по медной матрице и, тем самым, к улучшению антифрикционных свойств сплавов.

Для решения этой проблемы в Московском государственном индустриальном университете (МГИУ) был разработан метод контактного легирования [2] и создана установка электроимпульсного сплавления [3]. Она позволила существенно уменьшить влияние ликвации на процесс сплавления для систем несмешивающихся компонентов [3, 4].

Целью данной работы является изучение особенностей структурных превращений в зоне контактного взаимодействия меди со свинцом под воздействием электрических импульсов.

Взаимодействие меди и свинца при электроимпульсном сплавлении

Рассматриваются последовательные этапы взаимодействия свинца и меди в определенных условиях. Исследования проходили на установке электроимпульсного сплавления, состоящей из трансформатора тока, управляющего блока и рабочей камеры с образцами. В рабочей камере (рис. 1) свинцовый образец (во всех экспериментах, рассматриваемых ниже, использовалось одно и то же количество свинца m_{pb}) фиксировался в замкнутой полости 2, образованной медными пластинами 1 и изолятором 3.

Медно-свинцовая композиция подвергалась сильному обжатию между электродами 4, с помощью которых через рабочую зону в течение некоторого интервала времени τ (от 0,01 с до 1,0 с) пропускали переменный электрический ток с частотой 50 Гц и амплитудой I_m . При этом происходил быстрый разогрев и плавление свинца и, как следствие, возникало избыточное давление в полости 2. В зависимости от величины этого давления возможны различные варианты дальнейшего развития взаимодействия [5]. Если давление невелико, возможно эвтектическое и/или монотектическое взаимодействие свинца и меди с образованием в зоне контакта участков, содержащих медно-свинцовые сплавы с различным соотношением компонентов и их дисперсностью. Такие условия электроимпульсного сплавления были

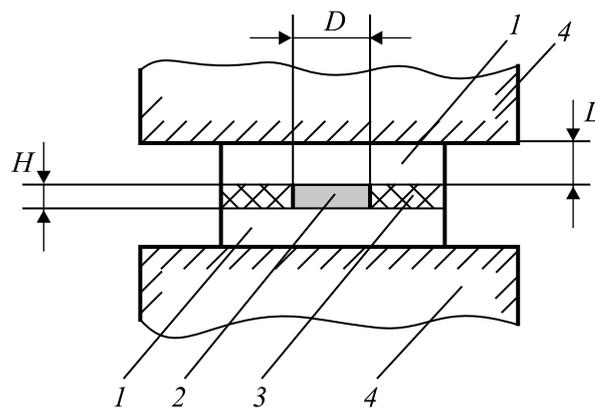


Рис. 1. Схема рабочей зоны экспериментальной установки:

1 – медные пластины; 2 – полость, заполненная свинцом; 3 – изолятор; 4 – электрические контакты;
D – диаметр полости; H – толщина изолятора;
L – толщина медных пластин

реализованы в эксперименте № 1 (табл. 1). На рис. 2 демонстрируется фрагмент полученной зоны сплавления.

Наблюдается чередование структурных элементов различной формы и окраски. Эти структуры демонстрируют сильную неоднородность зоны сплавления, в которой присутствуют области с различным соотношением компонентов. Светлые тона отвечают областям, содержащим медно-свинцовый сплав с низким содержанием свинца. Повышенная концентрация свинца делает окраску соответствующих областей более темной. Видно, что существуют области, содержащие почти чистый свинец с растворенной в нем медью (темные участки с мелкими светлыми включениями), а также области высококонцентрированного раствора свинца в меди. Отметим, что практически отсутствуют области с чистой медью, а участки с повышенным содержанием свинца соединены между собой.

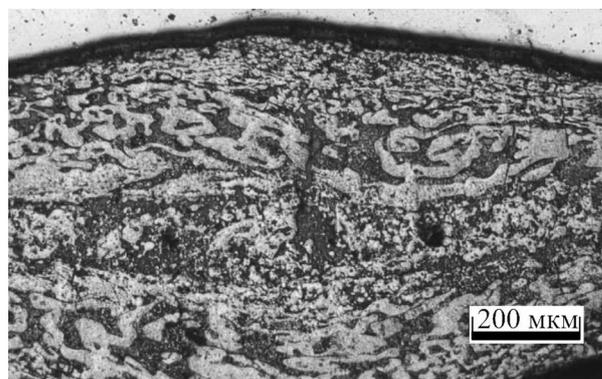


Рис. 2. Фрагмент зоны сплавления в эксперименте № 1

Параметры экспериментов при $D = 6,2$ мм, $L = 3,8$ мм, $m_{\text{Pb}} = 0,265$ г, $I_m = 8500$ А

№ п/п	Длительность действия тока τ , с	Толщина изолятора H , мм	Примечание
1	0,05	0,86	В зоне контакта Cu–Pb отсутствуют примеси
2	0,04	0,80	В зоне контакта Cu–Pb отсутствуют примеси
3	0,04	0,80	В зоне контакта Cu–Pb присутствуют частицы Al_2O_3
4	0,04	0,80	В зоне контакта Cu–Pb присутствуют частицы CuO
5	0,20	0,80	В зоне контакта Cu–Pb присутствуют частицы Al_2O_3
6	0,20	0,82	В зоне контакта Cu–Pb отсутствуют примеси

В работе [6] обсуждалось образование аналогичных структурных элементов, которые наблюдались на начальных этапах формирования структур в медно-свинцовых сплавах при использовании традиционных методов производства.

В результате импульсного нагрева возможно достижение таких условий, при которых за счет импульсного воздействия расширяющегося свинца на медь в ней возникают значительные сдвиговые напряжения, что приводит к образованию полос адиабатического сдвига (ПАС) (при этом свинец может полностью и не расплавиться). Эти области характеризуются повышенной температурой и уходят от зоны электрического контакта далеко вглубь меди [4]. Сильный разогрев меди в ПАС [7, 8] инициирует ее интенсивное взаимодействие со свинцом и продвижение свинца в толщу массива меди. ПАС как бы «затягивают» свинец на всю длину полосы с образованием сплава произвольного состава (определяется температурой в ПАС). Одновременно происходит

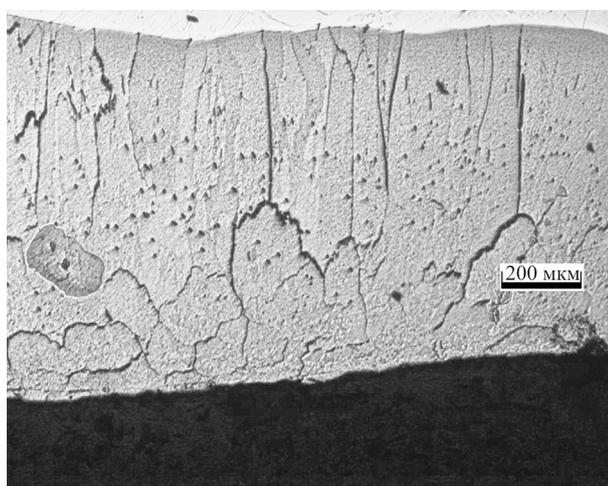


Рис. 3. Фрагмент зоны сплавления в эксперименте № 2

нагрев и деформация областей медного массива вблизи ПАС, что способствует прониканию свинца в направлении, перпендикулярном линии распространения ПАС.

В качестве иллюстрации к сказанному на рис. 3 представлен фрагмент зоны сплавления из эксперимента № 2. Здесь свинец полностью занимал полость в изоляторе (см. рис. 1) и его нагревание и плавление привело к появлению ПАС. На рисунке видно, что большая часть свинца (мелкие серые включения) равномерно распределена в зоне сплавления (размер большей части включений меньше 0,1 мкм), образуя пересыщенный твердый раствор. Также в зоне сплавления видны темные линии – это результат действия ПАС (по этим линиям наблюдается образование дефектов, вызванных термоусадкой материала). Подобную картину удастся зафиксировать благодаря очень большой скорости остывания сплава, что является конструктивной особенностью данного метода.

Дальнейшее увеличение длительности электроимпульсного воздействия приводит к укрупнению включений и увеличению зоны сплавления с понижением среднего содержания в ней свинца.

Влияние примесей на образование диссипативных структур

Присутствие некоторых веществ в зоне контакта медь–свинец приводит к образованию в зоне электроимпульсного сплавления различных округлых диссипативных структур с характерным размером в несколько десятков микрометров. В качестве таких дополнительных структурообразующих элементов рассматривались термостойкий оксид алюминия Al_2O_3 (температура плавления $T_{\text{пл}} = +2044$ °С) и тер-

мически нестойкие оксиды меди Cu_2O и CuO (температура разложения $T_{\text{разл}} = +800\text{--}1200\text{ }^\circ\text{C}$). Перед проведением экспериментов эти материалы в небольших количествах ($\sim 1\text{ мкг}$) наносились на контактную границу раздела металлов. Характерный размер частиц порошков составлял от 1 до 30 мкм.

Характерная диссипативная структура образуется благодаря наличию в зоне взаимодействия частичек Al_2O_3 (рис. 4). Видно, что кристаллизация медно-свинцового сплава проходила слоями. Медно-свинцовый сплав с высоким содержанием свинца (может быть чистый свинец) кристаллизовался вдоль вложенных сферических поверхностей, между которыми находится практически чистая медь.

Такая картина взаимодействия говорит о том, что в этой области произошел локальный нагрев до температуры монотектического превращения T_m . Затем произошло послойное выделение почти чистого свинца на поверхности частиц оксида алюминия с последующей кристаллизацией. Следует заметить, что подобные структурные образования сильно локализованы и рядом с ними находятся участки сплава, типичные для структур, закристаллизованных при больших скоростях.

Рассмотрим несколько иной случай. На контактной границе металлов находится термически нестойкий оксид, например оксид меди. Вследствие разложения оксида выделяется кислород, что приводит к появлению дополнительных градиентов давления и температуры и, как следствие, к несколько иной картине кристаллизации сплава. В ходе эксперимента № 4 была получена зона сплавления, в которой наблюдалось образование многочисленных округлых структур. Изображение одного из таких образований представлено на рис. 5. Здесь наблюдается круговая область, содержащая участки практически чистой меди, по границе которых располагаются фрагменты медно-свинцового сплава с повышенным содержанием свинца в виде прямолинейных отрезков лучей, исходящих из одного центра. Лучевая картина распределения фрагментов сплава наблюдается и в центральной области рассматриваемой структуры.

Таким образом, в отличие от спиральных структур, рассмотренных выше, в данном случае наблюдалась только одна сферическая

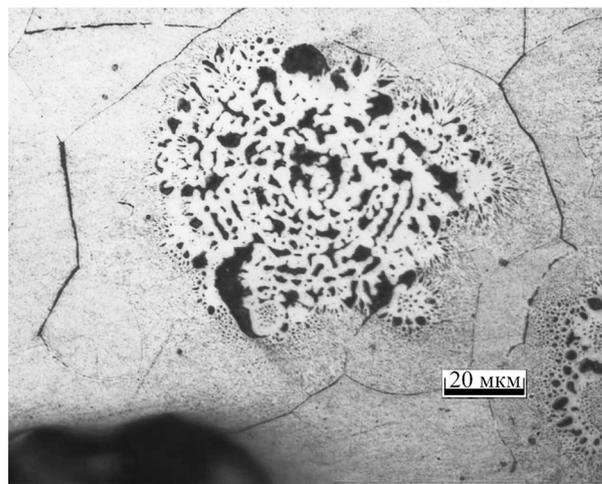


Рис. 4. Фрагмент зоны сплавления в эксперименте № 3

поверхность, на которой произошло расслоение компонентов сплава. При этом произошло разложение оксида, что, вероятно, понизило температуру окружающей среды и, как следствие, остановило образование структуры, подобной той, что изображена на рис. 4.

При более длительном воздействии электрического тока на зону сплавления в присутствии порошка Al_2O_3 (эксперимент № 5) возникают области, где происходит монотектическое сплавление с последующей кристаллизацией при больших скоростях охлаждения. Это приводит к образованию мелкозернистой структуры, в которой свинец (или медно-свинцовый сплав с повышенным содержанием свинца) концентрируется на границах зерен (рис. 6). При этом зерна имеют сильно вытянутый вид и размер от 2 до 10 мкм (см. рис. 6, а).

В результате эксперимента № 5 получены структурированные области размером порядка 100 мкм, разделенные участками при-

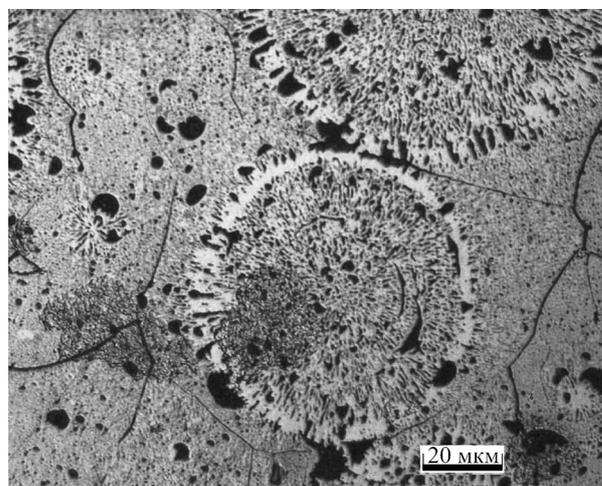
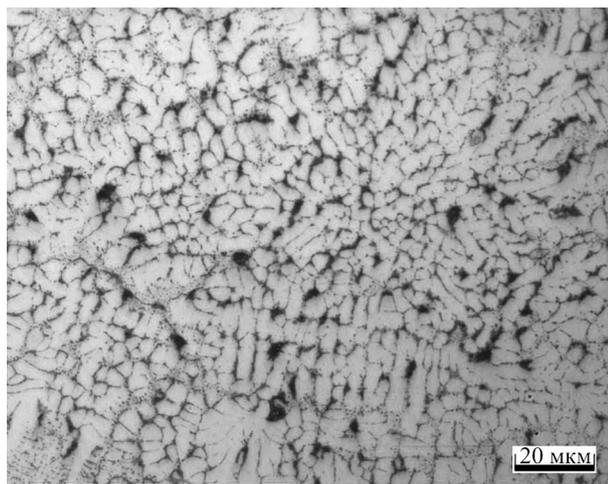
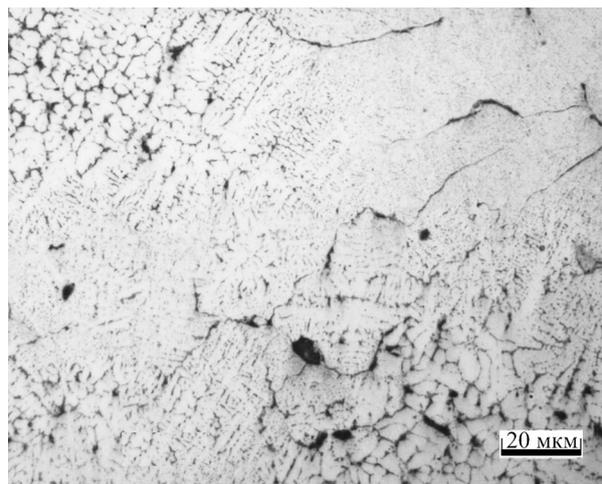


Рис. 5. Фрагмент зоны сплавления в эксперименте № 4



а



б

Рис. 6. Фрагменты зоны сплавления в эксперименте № 5

мерно такого же размера, где не наблюдалось плавление сплава (они имеют такой же вид как в эксперименте № 2, см. рис. 3). Аналогичная микроструктура образуется и при традиционной технологии производства бронз [1, 2, 6].

Повышенная концентрация свинца вдоль границ зерен меди может наблюдаться при электроимпульсном сплавлении и в отсутствие примесных веществ. Например, на рис. 7 представлен участок зоны сплавления из эксперимента № 6, который был подвергнут нагреву в течение 15 мин при $T = +960$ °С с последующей закалкой в воде.

Здесь также можно наблюдать медно-свинцовый сплав, в основном, сконцентрированный по границам зерен, но размер этих зерен значительно больше изображенных на рис. 6, что говорит о подавлении роста зерен при сверхбы-

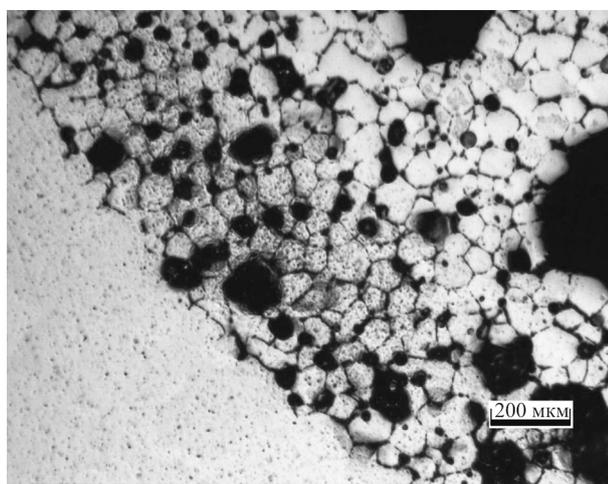


Рис. 7. Фрагмент зоны сплавления
в эксперименте № 5 после термообработки

стром охлаждении, обусловленным условиями проведения электроимпульсного сплавления.

Заключение

Результаты экспериментов показали, что в условиях избыточного давления свинца на медь, возникающего при импульсном пропускании электрического тока через границу их контакта, основным структурообразующим фактором является образование полос адиабатического сдвига (ПАС) в меди, распространяющихся нормально по отношению к границе раздела взаимодействующих фаз. Именно ПАС являются основными каналами, по которым свинец распространяется в медь на расстояния, на порядки превышающие таковые, достижимые за счет классической диффузии. Это дает, в свою очередь, возможность получения различных распределений мелкодисперсного легирующего компонента, что невозможно при использовании традиционных способов легирования.

Список литературы

1. Федорченко И.М. Пугина Л.И. Композиционные спеченные антифрикционные материалы. Киев: Наукова думка, 1980. – 403 с.
2. Авраамов Ю.С., Шлятин А.Д. Сплавы на основе систем с ограниченной растворимостью в жидком состоянии. М.: Интерконтакт наука, 2002. – 371 с.
3. Пат. 71088 Российская Федерация. Установка для обработки токопроводящих материалов импульсами электрического тока с регистрацией параметров процесса изменения их физико-механических свойств /

- И.Б. Руденко, В.И. Кошкин, В.А. Нижник, А.Д. Шляпин; опублик. 27.02.2008; бюл. № 6.
- Структурные превращения в зоне контакта металлов Al и Pb, Fe и Pb при электроимпульсном воздействии / В.И. Кошкин, А.Н. Кравченко, В.А. Нижник, И.Б. Руденко, В.В. Рыбальченко, А.Д. Шляпин // *Машиностроение и инженерное образование*. 2012. № 1. С. 23–27.
 - Пономарев С.Г., Рыбальченко В.В. Сценарии развития электроимпульсного сплавления в системе медь–свинец // *Машиностроение и инженерное образование*. 2014. № 1. С. 16–20.
 - Авраамов Ю.С., Набутовский Л.Ш., Шляпин А.Д. Микроструктурные особенности твердо-жидкофазного взаимодействия систем несмешивающихся компонентов. М.: Изд-во МГИУ, 2002. – 108 с.
 - Наймарк О.Б., Соковиков М.А. О механизме адиабатического сдвига при высокоскоростном нагружении материалов // *Математическое моделирование систем и процессов*. 1995. № 3. С. 71-76.
 - Wright T.W. The physics and mechanics of adiabatic shear bands. Cambridge University Press, 2002. – 241 p.

Материал поступил в редакцию 20.10.2015

**ПОНОМАРЕВ
Сергей Григорьевич**

E-mail: psgpsg1@ya.ru
Тел.: (916) 685-77-24

Кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ФГБОУ ВО «МАМИ». Сфера научных интересов – математическое моделирование физических процессов. Автор (соавтор) 27 научных работ.

**КОШКИН
Валерий Иванович**

E-mail: vik.mos@mail.ru
Тел.: (8692) 43-50-02

Доктор физико-математических наук, профессор, ректор ФГБОУ ВО «Севастопольский государственный университет». Сфера научных интересов – физика конденсированного состояния. Автор (соавтор) более 100 научных работ.

**ШЛЯПИН
Анатолий Дмитриевич**

E-mail: 6883412@mail.ru
Тел.: (495) 276-34-49

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой материаловедения ФГБОУ ВО «МАМИ». Сфера научных интересов – физика металлов, материаловедение. Автор (соавтор) более 200 научных работ.