

СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ЗОНЕ КОНТАКТА МЕТАЛЛОВ Al и Pb, Fe и Pb ПРИ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В.И. Кошкин, А.Н. Кравченков, В.А. Нижник,
И.Б. Руденко, В.В. Рыбальченко, А.Д. Шляпин

На примере взаимодействия Al и Pb, Fe и Pb показана возможность получения сплавов с однородной структурой на основе двойных монотектических систем с разомкнутым куполом расслоения при кратковременном воздействии на зону контакта электрическим током, частотой 50 Гц и характерной амплитудной плотностью $(1...4) \cdot 10^3$ А/см². Свинец обнаружен в железе и алюминии не только в зоне импульсного сплавления, но и в зонах, не подвергавшихся расплавлению.

Ключевые слова: железо, алюминий, свинец, сплавы, электрический импульс, монотектическая реакция, твердые растворы.

Введение

Изучение закономерностей твердо-жидкофазного взаимодействия в системах с ограниченной растворимостью компонентов в жидком состоянии (системах несмешивающихся компонентов (НК)) показало, что сплавы на основе таких систем легче получать не традиционными методами сплавления и спекания, а легированием одного из реагентов, находящегося в твердом состоянии, другим реагентом из расплава. Эта технология получила название «контактное легирование» (КЛ) [1]. Однако для систем с выраженной монотектической реакцией и разомкнутым куполом расслоения методы КЛ не эффективны. Этим обусловлена актуальность исследований, направленных на поиск новых подходов к проблеме получения сплавов НК на основе систем данного типа.

Методика исследований

Структурные превращения при электроимпульсном воздействии на зону контакта металлов Al и Pb, Fe и Pb изучали на специально

созданной установке [2]. Свинцовые образцы диаметром 8 и толщиной 0,5 мм зажимались между двумя пластинами (железа или алюминия) толщиной 5 мм. Через полученные сборные конструкции (сборки) пропускали импульсы тока с амплитудной плотностью $(1...4) \cdot 10^3$ А/см², частотой 50 Гц и скважностью, равной 2. Количество энергии, подводимой к зоне контакта металлов, задавали длительностью импульсов. В данной работе во всех экспериментах длительность импульсов на сборку не превышала 1 с.

Результаты исследований и их обсуждение

Действие электрических импульсов на сборку Fe–Pb–Fe приводит к образованию в ее центральной части зоны импульсного сплавления компонентов по форме, близкой к эллипсоиду и имеющей однородную структуру (рис. 1, а). За этой зоной в железе формируется переходная зона термического воздействия с харак-

* Работа подготовлена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы, государственный контракт № 16.740.11.0444 от 30 ноября 2010 г.

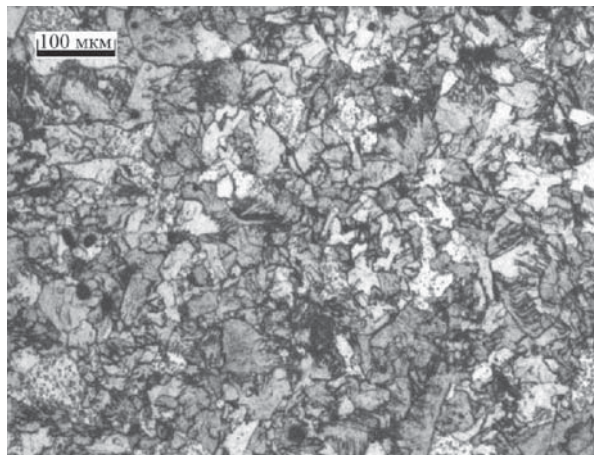
терными хлопьевидными образованиями, которые будут подробно описаны ниже (темные пятна на рис. 1, б, в).

Содержание свинца в центральной части зоны импульсного сплавления, вблизи поверхности контакта железной пластины со свинцом, составляет 1 % (по массе). Оно уменьшается при удалении от центра в глубину и на границе, вблизи переходной зоны, составляет около 0,3 %. В переходной зоне при большем увеличении на фоне зерен, основу которых составляет железо, видны мелкодисперсные включения свинца в виде темных точек размером около 1 мкм (рис. 1, в, г). Рентгеноспектральный анализ этих точек показал, что в них содержится до 40 % (по массе) Pb, а вне этих точек в зернах железа свинец отсутствует.

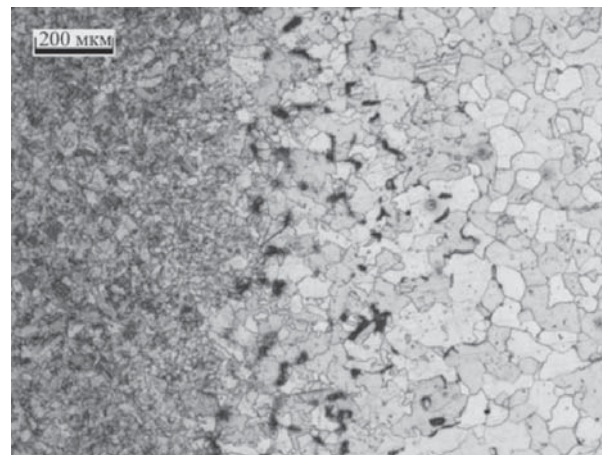
Испытания на микротвердость выявили существенное увеличение микротвердости в зоне импульсного сплавления (200 HV и более) и переходной зоне (130 HV) по сравнению с исходной в железе (115 HV). На рис. 2 приведена зависимость микротвердости HV от глубины проникания h в железную пластину. Скачок микротвердости, соответствующий границе между переходной зоной и зоной импульсного сплавления, находится на глубине около 3 мм.

Почти двукратное повышение микротвердости в зоне сплавления может быть объяснено образованием пересыщенного твердого раствора свинца в железе с большой степенью пересыщения.

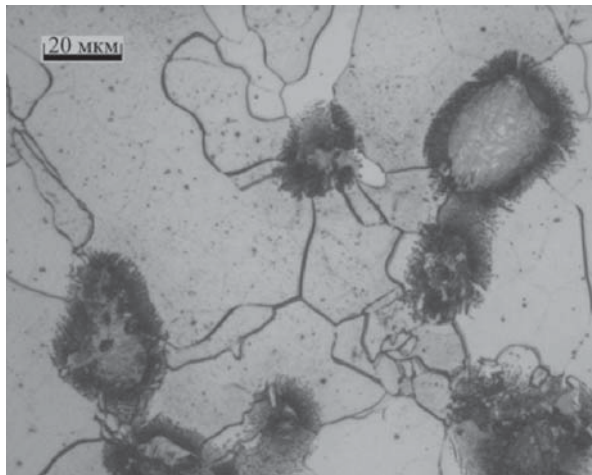
Характерные хлопьевидные (под оптическим микроскопом) образования в переходной



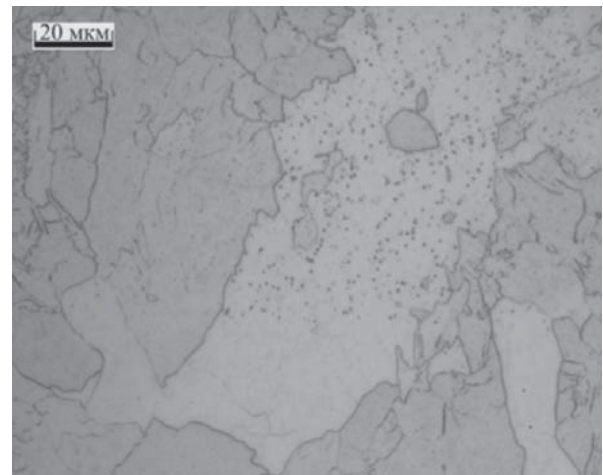
а



б



в



г

Рис. 1. Микроструктура зоны контакта железа со свинцом в зоне термического воздействия: а – зона импульсного сплавления; б, в – переходные зоны в железе, сопряженные с зоной импульсного сплавления (при разных увеличениях); г – переходная зона в железе на удалении от зоны импульсного сплавления около 500 мкм

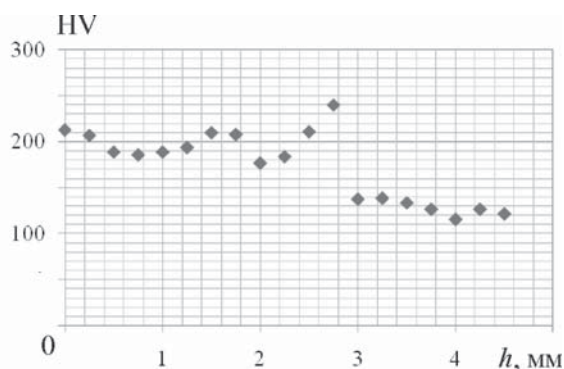


Рис. 2. Зависимость микротвердости HV от глубины проникания h в железную пластину

зоне термического воздействия были исследованы с помощью электронно-ионного сканирующего микроскопа Quanta 3D фирмы FEI Company. Этот прибор совмещает возможности растрового электронного микроскопа и фокусированного ионного пучка в одной камере. С помощью электронного пучка формируется изображение выбранной области. Фокусированный ионный пучок (FIB), действуя как микрохирургический инструмент, позволяет углубленно изучать внутреннюю структуру объекта. Это дает возможность, не ограничиваясь просмотром только поверхности объекта, наблюдать его трехмерную структуру. Изображение исследуемого образования, полученное с помощью электронного пучка энергии 15 кВ, приведено на рис. 3.

С помощью ионной колонны Magnum с галлиевым жидкометаллическим источником ионов в исследуемой области образца была сделана микровыемка для изучения подповерх-

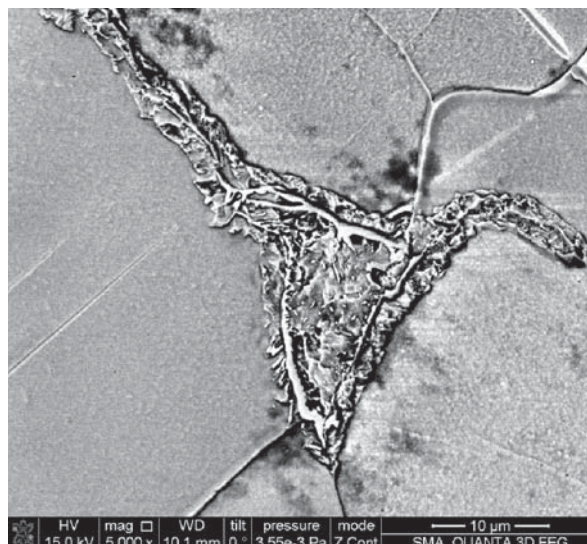


Рис. 3. Образования на границах зерен в переходной зоне

ностных слоев.

После завершения процесса воздействия ионами, включавшего в себя финишную полировку вертикальной поверхности сделанного углубления, на фото можно наблюдать вертикальный срез данного образования (рис. 4).

Далее был выполнен микрорентгеноспектральный анализ образования. Для того чтобы исключить возможность обнаружения привнесенных элементов в выбранной области, с помощью ионного пучка был снят тонкий (порядка 100 нм) поверхностный слой. На рис. 5 представлена область микрорентгеноспектрального анализа. Элементный анализ, выполненный по площадке 1, показал содержание Fe около 84 %

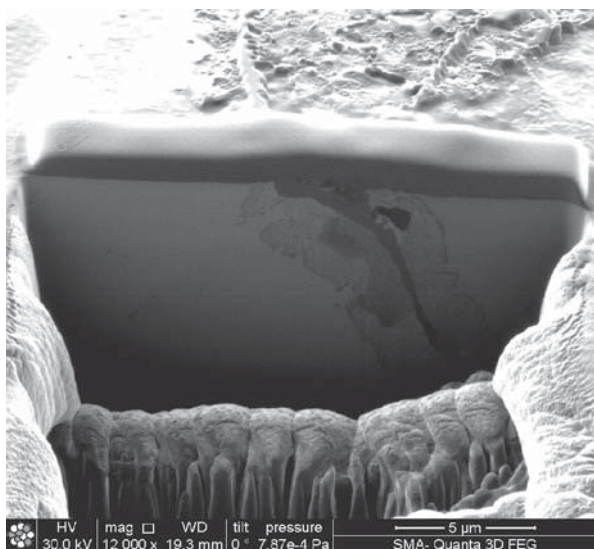


Рис. 4. 3D-структура исследуемого образования

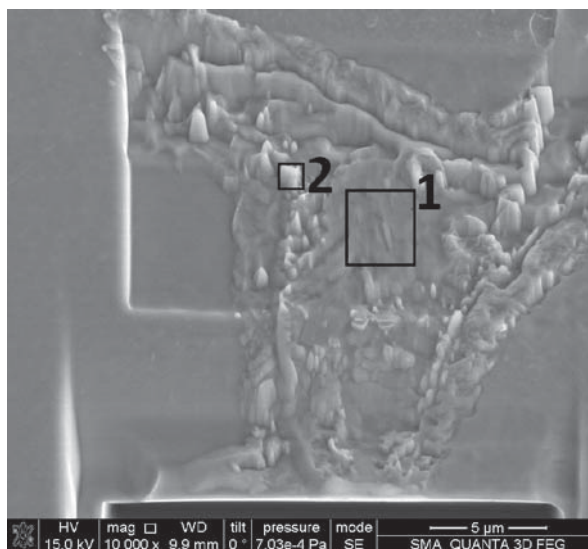


Рис. 5. Область микрорентгеноспектрального анализа

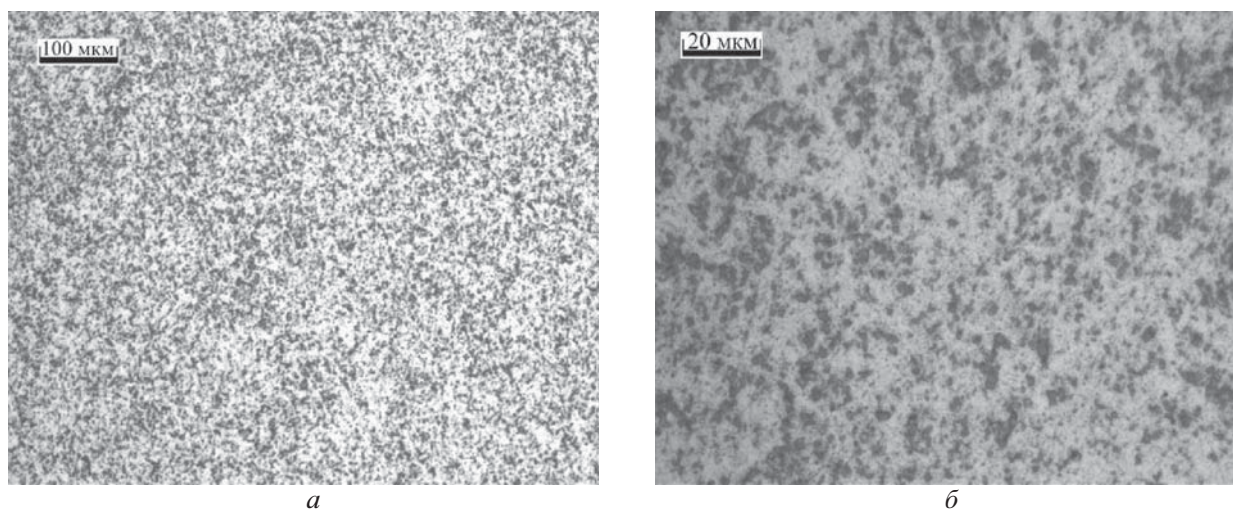


Рис. 6. Микроструктуры зоны импульсного сплавления после действия электрического тока на контактирующие пластины:
а, б – микроструктуры сборки Al – Pb – Al (при разных увеличениях)

(ат.), С – около 16 % (ат.). Исследование более узкой площадки 2 в области, которая ранее выглядела на снимке, как сплошная толстая линия, показало увеличение содержания С до 26 % (ат.).

Система Al – Pb – Al

Электроимпульсное воздействие на сборку Al – Pb – Al также приводит к образованию зоны сплавления компонентов, по форме близкой к эллипсоиду. Действие электрического тока на сборку Al – Pb – Al в течение 1 с формирует зону импульсного сплавления с однородно распределенными включениями размером до 5 мкм, содержащими свинец (рис. 6, а, б).

При длительности импульсного воздей-

ствия 0,8 с на сборку Al – Pb – Al получается сетчатая структура с характерным размером ячейки около 10 мкм, сочетающаяся с мелкодисперсными точечными включениями размером около 1 мкм. Эта структура и точечные включения содержат примерно 90 % (по массе) Pb. В алюминиевой матрице образуются каналы, по которым свинец проникает в алюминий (рис. 7). В точке А содержится около 92 % (по массе) Pb.

Микротвердость алюминиевой пластины составляет 55 HV. В зоне импульсного сплавления микротвердость достигает 85 HV.

Таким образом, в сборке Al – Pb – Al наблюдается такая же ситуация как в сборке Fe – Pb – Fe.

Закключение

На примере взаимодействия металлов Al и Pb, Fe и Pb изучено явление взаимного проникания компонентов при электроимпульсном воздействии на зону контакта разнородных металлических реагентов.

Экспериментально установлено, что действие электрического тока при длительности импульсов 0,01–1 с и плотности $(1...4) \cdot 10^3$ А/см² на контактирующие разнородные металлические реагенты приводит к образованию зоны импульсного сплавления реагентов и прониканию легирующих компонентов в металл матрицы на значительную глубину (экспериментально зарегистрирована глубина проникания до 5 мм).

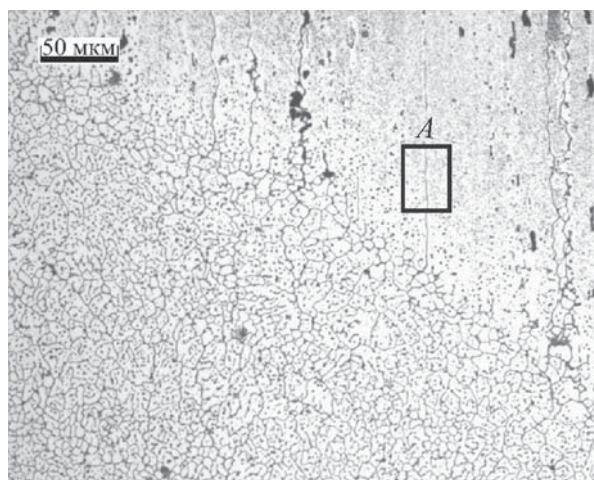


Рис. 7. Проникание свинца из зоны сплавления в алюминиевую пластину после электроимпульсной обработки (фрагмент микроструктуры)

Список литературы

1. Авраамов Ю.С., Шляпин А.Д. Сплавы на основе систем с ограниченной растворимостью в жидком состоянии. – М.: Интерконтакт наука, 2002. – 372 с.
2. Пат. 71088 Российская Федерация. Установка для обработки токопроводящих материалов импульсами электрического тока с регистрацией параметров процесса изменения их физико-механических свойств / И.Г.

Руденко, В.И. Кошкин, В.А. Нижник, А.Д. Шляпин; заявл. 13.06.2007.

3. Истомин-Кастровский В.В., Кошкин В.И., Руденко И.Б. Микроструктурные особенности процесса сверхглубокого проникания в металлических системах в условиях твердожидкофазного взаимодействия // Перспективные материалы. 2008. № 2. С. 87–90.

Материал поступил в редакцию 15.02.2012

КОШКИН Валерий Иванович

E-mail: koshkin@msiu.ru
Тел.: +7(495) 620-37-50

Доктор физико-математических наук, профессор, ректор ФГБОУ ВПО «МГИУ». Сфера научных интересов – физическое материаловедение. Автор более 50 научных трудов.

КРАВЧЕНКОВ Антон Николаевич

E-mail: akravchenkov64@yandex.ru
Тел.: +7(495) 620-39-68

Кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и ТКМ ФГБОУ ВПО «МГИУ». Соавтор 12 научных трудов. Сфера научных интересов – материаловедение и композиционные материалы.

НИЖНИК Владимир Адамович

E-mail: vanizhnik@gmail.com
Тел.: +7(495) 620-35-66

Директор Информационно-аналитического центра ФГБОУ ВПО «МГИУ». Сфера научных интересов – ИКТ, материаловедение. Автор более 10 научных работ.

РУДЕНКО Игорь Борисович

E-mail: newmalina@rambler.ru
Тел.: +7(495) 620-39-89

Проректор по информационным технологиям ФГБОУ ВПО «МГИУ». Сфера научных интересов – материаловедение в машиностроении, компьютерные системы. Автор более 10 научных работ, 2 патентов.

РЫБАЛЬЧЕНКО Виктор Викторович

E-mail: wwr01@rambler.ru
Тел.: +7(495) 620-39-68

Директор Центра коллективного пользования «Наукоемкие технологии в машиностроении». Сфера научных интересов – материаловедение. Автор более 10 научных работ.

ШЛЯПИН Анатолий Дмитриевич

E-mail: ashliapin@list.ru
Тел.: +7(495) 675-61-92

Доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе ФГБОУ ВПО «МГИУ», заслуженный работник Высшей школы РФ. Сфера научных интересов – материаловедение, физика металлов и композиционные материалы. Автор более 130 научных работ, в том числе 7 монографий, 35 авторских свидетельств и патентов.