

УДК 621.002.3-419; 620.22-419

# СЦЕНАРИИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО СПЛАВЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ МЕДЬ–СВИНЕЦ

С.Г. Пономарев, В.В. Рыбальченко

*Рассмотрена физическая модель электроимпульсного сплавления в системе медь – свинец. Обосновываются два возможных сценария развития данного взаимодействия. В первом ведущую роль играет монотектические реакции твердо - жидкофазного взаимодействия меди и свинца. Во втором на первое место выходит влияние полос адиабатического сдвига. Продемонстрировано, что в зависимости от первоначального количества свинца и длительности импульса определяется выбор преимущественного развития любого сценария взаимодействия, который дает возможность управлять процессом контактного легирования.*

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

## Введение

Разработка методов поверхностного контактного легирования меди тяжелыми легкоплавкими элементами – очень важная задача для создания новых антифрикционных материалов. Предварительные исследования показали, что действие импульсов тока длительностью 0,01–1,00 с, плотностью  $(1-4) \cdot 10^3$  А/см<sup>2</sup> на контактирующие разнородные металлические реагенты приводит к образованию области импульсного сплавления компонентов и прониканию легирующих компонентов в металл матрицы на значительную глубину [1, 2]. Зона импульсного сплавления компонентов, образующаяся в центральной части сборки, имеет форму близкую к эллипсоиду и однородную структуру. Для управления процессом легирования необходимо иметь информацию о влиянии на размер и структуру зоны сплавления таких величин как длительность импульса, характерные размеры и состав сборки и т.д. Данная работа проводилась с целью выявления таких взаимосвязей на примере контактного легирования меди свинцом. Полученные результаты позволили показать возможные сценарии развития данного взаимодействия.

## Экспериментальная установка

Схема экспериментальной сборки представлена на рис. 1.

Между двумя прямоугольными медными пластинами *A* находится слой диэлектрика *B* толщиной *l*, в котором имеется круглое отверстие *C* радиуса *r*. В полость, образованную диэлектриком и медными пластинами, помещается свинец так, чтобы обеспечить электрический контакт между металлическими материалами сборки. Система подвергается сильному обжатию для предотвращения выхода расплавов из зоны сплавления. Медные пластины подключаются к контактам электро-

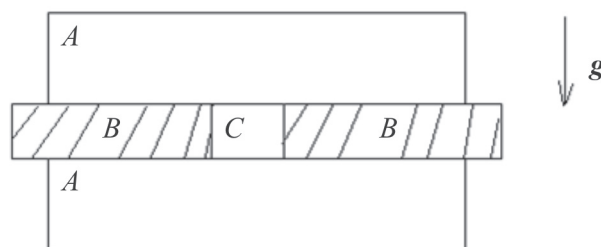


Рис. 1. Схема экспериментальной сборки:

*A* – медные пластины; *B* – диэлектрик;

*C* – цилиндрическая полость, заполненная свинцом

импульсной установки, которая выдает импульсы тока с частотой 50 Гц и длительностью  $\tau$  от 0,01 с до 1 с. Эксперименты проводились в условиях естественной гравитации  $g$ , направление которой показано на рис. 1. В результате электроимпульсного воздействия получается зона сплавления, которая схематично представлена на рис. 2.

В виду особенности конструкции установки (используется переменный ток с частотой 50 Гц) исследуемые материалы периодически нагреваются и охлаждаются. Количество таких циклов за один импульс варьируется от 1 до 50, т.е. в процессе электроимпульсного взаимодействия возможно плавление металлов с образование сплавов, а также их кристаллизация.

### Первый сценарий развития электроимпульсного сплавления

В работах [1, 2] отмечено, что процесс электроимпульсного сплавления сопровождается появлением полос адиабатического сдвига (ПАС). Эти образования являются «проводниками» распространения примеси (Pb) в легируемом материале (Cu). Однако только наличием ПАС сложно объяснить получаемую в экспериментах структуру зоны электроимпульсного сплавления. Так, свинец равномерно распределен в зоне сплавления в виде округлых включений. Кроме этого, на границе зоны сплавления наблюдалось повышенная концентрация легирующей примеси.

Ниже описывается некоторая модель рассматриваемого процесса, которая, на наш взгляд, адекватно объясняет сделанные наблюдения. Рассмотрим ситуацию, когда образование ПАС в эксперименте маловероятно.

При проведении опытов [1, 2] по контактному легированию меди свинцом с помощью электроимпульсов всегда предполагалось, что свинец полностью заполняет полость  $C$ , образованную пластинами меди и диэлектриком (рис. 1). Под воздействием электроимпульса свинец нагревается и плавится, при этом происходит его расширение. Это приводит к возникновению избыточного давления в области взаимодействия, что способствует проникновению свинца в медь. Как будет протекать реакция и что образуется в результате, если эта полость заполнена частично? Очевидно, что в зависимости от степени заполнения полости возможны два варианта развития взаимодействия.

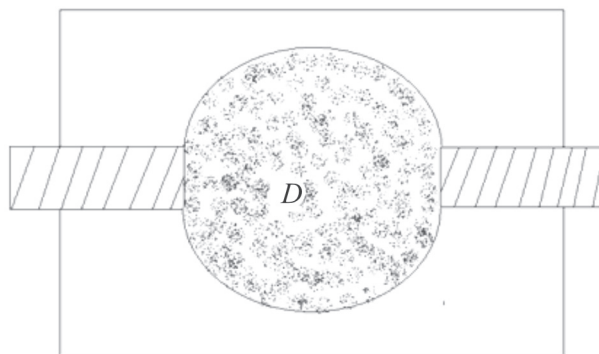


Рис. 2. Схема зоны сплавления ( $D$ )

*Первый вариант.* Несмотря на тепловое расширение, расплавленный свинец не заполняет весь объем полости, что приводит к разрушению электрического контакта в сборке и, следовательно, электроимпульсного сплавления не произойдет ни при какой длительности импульса.

*Второй вариант.* Сплавление в системе возможно, если в момент плавления расплав свинца заполняет всю полость в диэлектрике, сохраняя электроконтакт в сборке. Для удобства дальнейшего изложения рассмотрим величину

$$\delta = 1 - \frac{V_{\text{Pb}}}{V_{\text{пол}}},$$

где  $V_{\text{Pb}}$  – первоначальный объем свинца;  $\frac{V_{\text{Pb}}}{V_{\text{пол}}}$  – объем полости

Везде существует пороговое значение  $\delta^*$ , которое определяет возможность возникновения сплавления компонентов. Для данной конфигурации без учета теплового расширения диэлектрика имеем  $\delta^* \sim 0,1$ . Если количества свинца такое, что  $\delta > \delta^*$ , то электроимпульсного сплавления не произойдет. Для случаев, когда  $\delta < \delta^*$ , сплавление возможно и оно может иметь различное развитие в зависимости от величины  $\delta$ . Причем, чем меньше значение  $\delta$ , тем большее давление развивается в полости.

В качестве примера приведены результаты нескольких экспериментов, в которых варьировались количество свинца и длительность импульса.

На рис. 3 представлен результат эксперимента 1, при котором длительность импульса  $\tau = 0,2$  и  $\delta = 0,09$ . Значение  $\delta$  близко к критическому значению, избыточное давление от теплового расширения невелико и, следовательно, мала вероятность образования ПАС. Зона сплавления имеет четкую, ярко выраженную

границу сложной формы и внутри зоны наблюдается равномерное распределение свинцовых включений. Кроме того, медно-свинцовый сплав выходит за пределы медной пластины и заполняет полость *C*.

Для прояснения механизма электроимпульсного взаимодействия обратимся к общеизвестным фактам. В системе медь-свинец большую роль играют процессы ликвации и монотектического превращения. Известно, что при некоторых условиях жидкий свинец проникает в твердую медь на значительную глубину. Процесс запускается, если температура смеси медь-свинец достигает температуры  $T_m$  монотектической реакции. При этом на контактной границе Cu–Pb возникает сплав монотектического состава.

При  $T$  близкой к  $T_m$  существуют три фазы: сплав, содержащий около 36% Pb, кристаллы Cu и жидкость с 92% Pb [3, 4]. Вокруг свинца образуется слой сплава. Под действием силы тяжести свинец опускается, выталкивая сплав из области взаимодействия. В зависимости от скорости остывания соотношение компонентов в сплаве может изменяться. Излишки жидкого свинца из сплава осаждаются на капле расплава, а кристаллы меди всплывают вверх. Внешне это выглядит как прохождение свинца через массив меди.

Основываясь на этой схеме взаимодействия рассматриваемых материалов, можно предложить следующий сценарий легирования меди свинцом при воздействии электроимпульса в эксперименте 1. Свинец в результате нагревания под действием силы тяжести и избыточного давления, вызванным тепловым расширением, переместился в толщу меди, оставив за собой сплав Cu–Pb, при этом остатки свинца при остывании кристаллизовались вблизи контактной границы раздела фаз. Поскольку процесс электроимпульсного взаимодействия (и, следовательно, нагревание и охлаждение) на экспериментальной установке носит циклический характер, то часть первоначального свинца осталась в сплаве, уменьшив его количество на границе. Следовательно, можно ожидать, что при воздействии достаточно длительного электроимпульса весь свинец перейдет в состав сплава. Однако процентное соотношение компонентов в сплаве будет отличаться от монотектического, так как температура зоны сплавления может существенно отличаться от

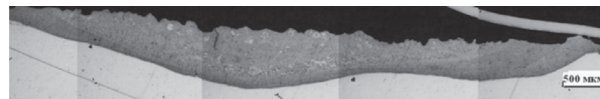


Рис. 3. Сечение зоны сплавления в эксперименте 1

$T_m$ . Отсюда можно оценить максимальную глубину проникновения свинца в массив меди при указанных условиях.

Поскольку радиус  $r$  зоны сплавления совпадает с радиусом полости *C*, то в качестве аппроксимации границы зоны сплавления выберем параболоид вращения. Объем области, ограниченный параболоидом:

$$V = 0,5\pi r^2 H,$$

где  $H$  – глубина проникновения сплава в массив меди.

Предположим, что:

- в полости высоты  $l$ , радиуса  $r$  находится свинцовый диск того же радиуса и высоты  $h$  ( $h \leq l$ );
- в процессе взаимодействия весь свинец из полости без потерь перешел в зону сплавления, образовав сплав, содержащий  $\eta\%$  масс. Pb;
- зона сплавления симметрична относительно середины диэлектрика;
- значения плотностей меди и свинца в процессе взаимодействия не изменяются.

Исходя из этого, получаем соотношение между высотой  $h$  и глубиной проникновения  $H$ :

$$H = h \left( \frac{\lambda}{\eta} - \lambda + 1 \right); \quad \lambda = \rho_1 / \rho_2,$$

где  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  – плотность свинца и меди соответственно.

Например, если  $\rho_1 = 11,3^3$  г/см<sup>3</sup>,  $\rho_2 = 8,9$  кг/см<sup>3</sup>,  $h = 0,4$  мм,  $\eta = 0,36$ , то  $H = 1,2$  мм.

Очевидно, что если толщина пластины меньше указанной величины  $H$ , то при некоторой длительности импульса может произойти выход сплава за пределы пластины. Если при этом сохраняется избыточное давление, вызванное нагреванием, то вся область, содержащая сплав, будет «выбита» из массива меди. При этом свинец, скопившийся на границе раздела сплав – медь, будет работать как «жидкая смазка».

Для проверки наших оценок и предположений были проведены эксперименты 2 и 3. Количество свинца в этих опытах было такое же, как в эксперименте 1, длительность импульса  $\tau = 0,4$  с и 1,0 с соответственно. На рис. 4 показана часть сечения зоны сплавления во втором

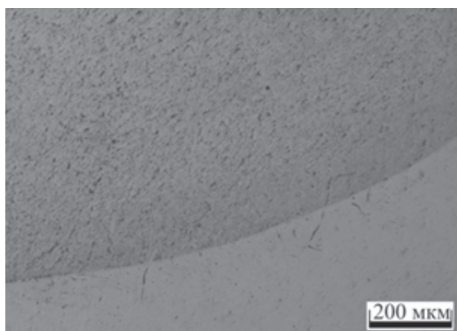


Рис. 4. Часть сечения зоны сплавления в опыте 3

случае. При  $\tau = 0,4$  с картина примерно такая же.

При  $\tau > 0,4$  с размер зоны сплавления перестает зависеть от длительности импульса, вблизи границы зоны сплавления отсутствует область с большой концентрацией свинца, примесь (свинец) равномерно распределена по всей области сплавления. Микрорентгено-спектральный анализ показал, что концентрация свинца в зоне сплавления составляет 20%. Анализ структуры зоны сплавления проводился с помощью рентгеновского микроанализатора М.А. Кумахова «ФОКУС-М 2», характерный размер анализируемой поверхности при единичном измерении 100 мкм. Максимальная глубина проникновения примеси в массив меди равна  $\sim 2,3$  мм, что хорошо согласуется с нашими оценками. Следует отметить, что увеличение длительности импульса приводит к разогреву экспериментальной сборки и, как следствие, укрупнению частиц примеси, которые могут образовывать структуры различной формы, что согласуется с результатами работы [4]. При этом размеры зоны сплавления изменяются незначительно.

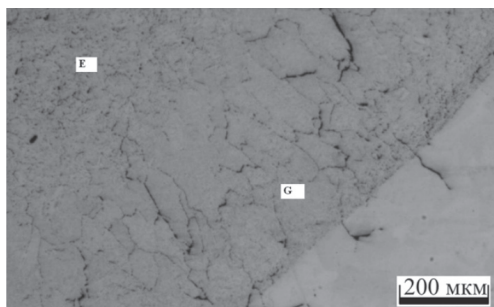
### Второй сценарий развития электроимпульсного сплавления

Рассмотрим ситуацию, когда роль ПАС в миграции легкоплавкого компонента становится

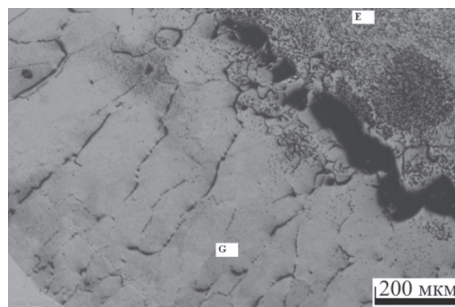
очень существенной. Это происходит, если изначально свинец практически полностью заполняет полость в диэлектрике ( $\delta = 0$ ). Под воздействием электрического тока происходит быстрое расплавление свинца, что приводит к взрывному росту давления и, как следствие, образованию ПАС. Наличие ПАС способствуют ускоренному проникновению свинца в медь, даже если температура не достигает критического значения  $T_m$ . При этом может образоваться область медно-свинцового сплава с произвольным соотношением компонентов. Но как только избыточное давление уменьшится настолько, что перестают образовываться новые ПАС, и температура повышается до значения  $T_m$ , дальнейшее развитие взаимодействия будет реализовываться по описанному выше первому сценарию. В этом случае в прямую и обратную монотектические реакции вовлекаются не только частицы свинца, уже находящиеся в зоне сплавления, но и остатки свинца из полости  $C$ . При этом в соответствии с циклами нагрева и охлаждения образуются концентрические области с различным содержанием легирующего компонента. На рисунке 5а видны некоторые элементы этого взаимодействия.

На периферии зоны сплавления (область  $G$ ) есть участки, где свинец распределен в виде нитевидных образований, которые явились следствием действия ПАС. Ближе к зоне электроконтакта есть область  $E$ , в которой свинец распределен более равномерно в виде мелких округлых включений. Таких разнохарактерных областей может быть несколько и их число, по-видимому, зависит от количества легирующего элемента и числа циклов нагрева – охлаждения.

На рисунке 5б показан участок сечения зоны сплавления, полученной в опыте 5. Для уменьшения влияния монотектической реак-



а



б

Рис. 5. Участки зон сплавления

в эксперименте 4:  $\tau = 0,1$  с,  $l = h = 0,4$  мм; в эксперименте 5:  $\tau = 0,03$  с,  $l = h = 0,8$  мм (б)



ции на процесс легирования толщина диэлектрика и, следовательно, начальное количество свинца подбирались так, чтобы вызвать плавление легирующего элемента и минимизировать разогрев медных пластин. На рисунке 5б зафиксирован момент, когда полоса сплава с высокой концентрацией свинца разделяет зону сплавления на две части: периферическая  $G$  и область  $E$  вблизи зоны электроконтакта. В области  $G$  примесь (свинец) распределена неравномерно вдоль границ зерен меди, что является результатом действия ПАС, и концентрация свинца в зависимости от места измерения изменяется от 20% до 25%.

В области  $E$  свинец распределен более равномерно (концентрация свинца составляет 20%) в виде мелких сферических включений – результат монотектического взаимодействия.

Таким образом, варьируя длительность импульса и количество легирующего компонента, мы можем существенным образом влиять на качественный и количественный состав сплава в зоне электроимпульсного сплавления.

### Заключение

В работе продемонстрированы два сценария развития электроимпульсного сплавления в системе медь – свинец. Применение этих моделей позволяет адекватно объяснить распро-

странение примеси, и в какой-то мере дает возможность управлять процессом легирования и, следовательно, получать новые композиционные материалы.

Работа выполнена на оборудовании и при поддержке сотрудников центра коллективного пользования Московского государственного индустриального университета.

### Список литературы

1. В.И. Кошкин, А.Н. Кравченко, В.А. Нижник, И.Б. Руденко, В.В. Рыбальченко, А.Д. Шляпин. Структурные превращения в зоне контакта металлов Al и Pb, Fe и Pb при электроимпульсном воздействии // Машиностроение и инженерное образование. 2012. № 1. С. 23–27.
2. И.Б. Руденко. Электроимпульсное легирование железа тяжёлыми легкоплавкими элементами // Машиностроение и инженерное образование. 2010. № 2. С. 27–33.
3. Мартюшев Н.В. Кристаллизация свинцовых бронз. Томский политехнический университет, Томск, 2011.
4. Авраамов Ю.С., Шляпин А.Д. Сплавы на основе систем с ограниченной растворимостью в жидком состоянии. Москва, Интерконтакт Наука, 2002. – 372 с.

Материал поступил в редакцию 12.11.13

#### ПОНОМАРЕВ Сергей Григорьевич

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

Кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ФГБОУ ВПО «МГИУ». Сфера научных интересов: математическое моделирование физических процессов. Автор (соавтор) 25 научных работ.

#### РЫБАЛЬЧЕНКО Виктор Викторович

E-mail: vvr\_01@mail.ru  
Тел.: (495) 620-35-66

Директор центра коллективного пользования «Научное оборудование в машиностроении» ФГБОУ ВПО «МГИУ». Сфера научных интересов: материаловедение и композиционные материалы. Автор (соавтор) 5 научных работ.