

УДК 53.13.15

ИОННОЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЕ В ДИФФУЗИОННОЙ СВАРКЕ

В. И. Иванов

Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики, Москва, Россия

Рассмотрены возможности использования ионизирующих излучений в диффузионной сварке. Показана эффективность использования процесса ионного перемешивания в диффузионной сварке на примере соединения медного анодного узла магнетрона с фланцем из магнитомягкого железа.

По современным представлениям физико-химических явлений, протекающих при диффузионной сварке (ДС), процесс образования соединений условно разделяют на три стадии:

физическое взаимодействие при образовании контакта поверхностей, т. е. взаимодействие внешних электронных оболочек атомов поверхностей;

химическое взаимодействие при необходимом уровне активации соединяемых поверхностей — образование активных центров;

объемное развитие взаимодействия в контактной зоне, определяемое диффузионными процессами и сопровождающиеся релаксацией внутренних напряжений.

Процесс образования соединений поддается модифицированию на каждой стадии сварки путем воздействия различных интенсифицирующих факторов. Специалистами-сварщиками исследованы и предложены многие интенсифицирующие факторы кроме ионизирующих излучений (ИИ), которые, по нашему мнению, наиболее эффективно могут быть использованы для улучшения качества соединений и технологии ДС.

На 1-й стадии наибольшую трудность представляет удаление со свариваемых поверхностей оксидных пленок. Использование ионных потоков инертных газов с энергией менее 500 эВ, интенсивностью менее $100 \text{ мкА} \cdot \text{см}^2$ эффективно очистят поверхности за счет процесса физического распыления, а также проведут полировку их за счет процесса ионного травления.

На 2-й стадии возникающие при формировании фактического контакта силы сцепления (дисперсные и электростатические) не могут обеспечить прочного соединения поверхностных атомов. Для получения прочных межатомных связей химической природы необходимо активировать поверхность. Энергию активации можно снизить за счет выделения избыточной энергии при выходе на поверхность дислокаций и точечных дефектов. Избыточное число точечных дефектов (вакансий и межузельных атомов) можно легко получить при облучении ускоренными электронами.

Экспериментальные исследования показали, что увеличение избыточной концентрации вакансий, полученной при облучении свариваемых поверхностей электронами с энергией 5 МэВ до дозы $5 \cdot 10^{18} \text{ эл} \cdot \text{см}^2$ медленного образца с ферритом (30-04-6) позволили снизить температуру сварки в 2 раза, уменьшить деформацию в 3—4 раза. При этом прочность вакуумно-плотного шва возросла на 30%. Протекание 3-й стадии ДС определяется диффузионными процессами, зависимость которых от радиационного воздействия очевидна.

Учитывая особенности взаимодействия различных видов ИИ с твердым телом и технические возможности источников ИИ для ДС, особенно в промышленных условиях, наиболее универсальными представляются ионы.

Особенно заманчивым является использование в ДС процесса ионного перемешивания для предварительного создания покрытия и переходного слоя одного из свариваемых материалов в другом. Результаты исследований структуры и свойств покрытий и переходного слоя, получаемые методом ионного перемешивания, показали высокую стойкость к термическому и механическому воздействию. Особенно это важно при сварке деталей из термодинамически несмешиваемых материалов (например Cu-W), в которых отсутствует объемная диффузия, и сварка заканчивается на второй стадии.

Ионное перемешивание — это динамический массоперенос выбитыми атомами в результате ионного облучения за счет смущающих и замещающих атомных столкновений, который позволяет образовывать гомогенные смеси веществ, неразстворимых в равновесных условиях. Схема реализации ионного перемешивания с использованием ионных инертных газов приведена на рис. 1. На поверхность образца каким-либо способом осаждают тонкую пленку их вещества, предназначенного для внедрения. Осаждение пленки можно осуществлять до или в процессе перемешивания.

Процесс ионного перемешивания был использован при соединении медного анодного блока магнетрона с фланцем из магнитомягкого железа МЖ. Обычно такое соединение осуществляется в ДС посредством вдавливания ножа фланца в медь при давлении, соответствующем пластической деформации меди, и температуре около 500—600 °С. Недостатком данного метода является то, что термокомпрессия осуществляется уже на собранном анодном узле, когда наличие тепловых поводок более чем на 50 мкм может привести к потере резонансных

условий. Для медно-железных узлов такие поводки наблюдаются уже при $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, что всего лишь на $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше температуры ДС, поэтому для увеличения процента выхода годного необходимо снижение температуры ДС.

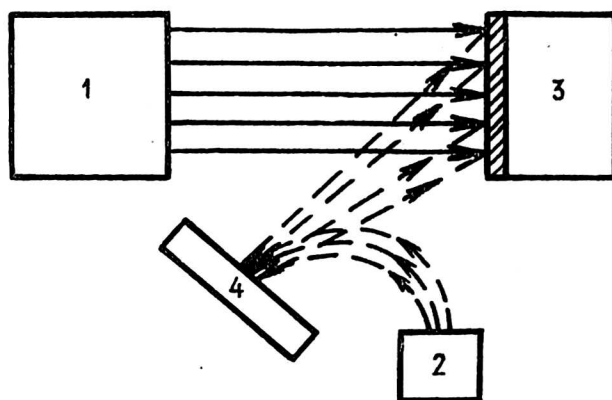


Рис. 1. Схема реализации процесса ионного перемешивания с использованием ионов инертных газов:

- 1 — ионный источник для перемешивания ($E = 30\text{ кэВ}$; $I = 10\text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$);
 2 — электронно-лучевой испаритель для распыления;
 3 — подложка; 4 — мишень для распыления

Для повышения надежности сварных соединений и снижения рабочей температуры на поверхность ножевого уплотнения железного фланца наносилось смежное покрытие ионным перемешиванием. Осаждение меди, поступающей из электронно-лучевого испарителя, сопровождалось одновременным облучением растущего покрытия ионами аргона с энергией 5 кэВ при плотности тока около $100\text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$. Подбор сорта, энергии и интенсивности ионного потока скорости осаждения и температуры подложки позволял достичь доминирования динамического переноса массы выбитыми атомами в зоне облучения над термической диффузией и тем самым обеспечит надежную адгезию покрытия с матрицей, существенно снизить дефектность покрытия.

Доминирование динамического массопереноса при ионном перемешивании позволяет получить переходный слой в виде непрерывного ряда метастабильных твердых растворов, тогда как в равновесных условиях растворимость меди в железе при температурах, близких к комнатной, практически отсутствует. Толщина переходного слоя регулируется условиями процесса ионного перемешивания так, чтобы за время последующей термокомпрессии метастабильные твердые растворы не успели распасться при заданной рабочей температуре. В конкретном случае толщина слоя метастабильных твердых растворов (переходного слоя) подбиралась таким образом, чтобы он сохранялся при $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 48 ч. Эти условия соответствуют операции вакуумной тренировки, что позволяет проводить ДС одновременно с дегазацией поверхности магнетрона.

Таким образом, при ДС в контакте находились не мед и железо, а медь и медь. Немаловажным является тот факт, что покрытия, полученные методом ионного перемешивания, обладают значительно меньшей микрошероховатостью. Это связано с тем, что напыление меди происходит с одновременным ее распылением ионным пучком. Покрытие становится более гладким, что существенно повышает площади контакта соединяемых поверхностей, что в свою очередь облегчает взаимное проникновение атомов меди из одной детали в другую.

Поперечные шлифы соединений, полученных традиционной ДС и ДС с использованием процесса ионного перемешивания, исследовались методом сканирующей электронной микроскопии (рис. 2, а, б). На шлифе соединения, полученного традиционным способом, видно, что оно образовано исключительно за счет

механического сцепления железа и меди. На соединении с предварительно нанесенным покрытием видно, что в покрытии отсутствуют такие специфические дефекты, как поры или столбчатые кристаллы. Место соединения покрытия с массивной медью можно обнаружить лишь из-за различия картин травления областей различной исходной структуры пленки и массивного материала, поскольку это соединение образуется посредством самодиффузии меди в медь.

Таким образом, получение покрытий с использованием процесса ионного перемешивания на поверхности материалов с ограниченной растворимостью позволяет существенно повысить надежность соединения этих материалов посредством последующей ДС и снизить температуру сварки.

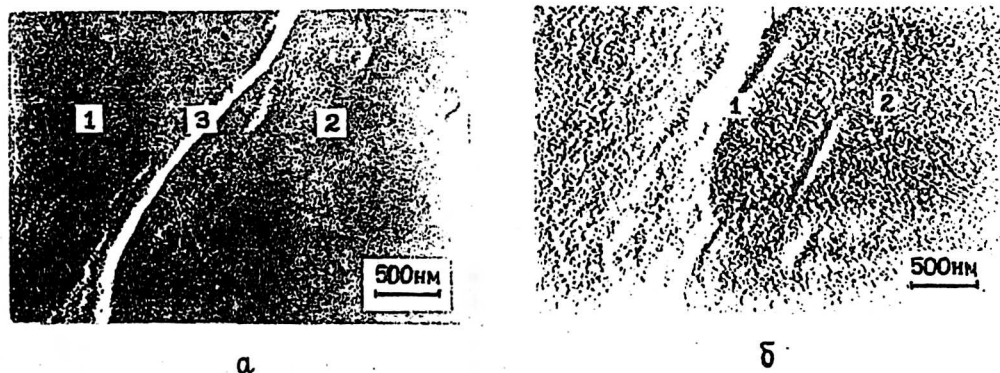


Рис. 2. Поперечный шлиф сварного соединения, полученного диффузионной сваркой:
 а — традиционной: 1 — железо; 2 — медь; 3 — сварной шов; б — с использованием процесса ионного перемешивания: 1 — переходный слой между железной матрицей и медным покрытием; 2 — диффузионный слой между покрытием и массивной медью

Технологически оптимальное решение для получения переходного слоя с использованием процесса ионного перемешивания могло бы быть достигнуто если для перемешивания использовались бы ионы не инертных газов, а ионы вещества, образующего покрытие. Это можно реализовать используя мощное лазерное излучение, которое способно перевести любое вещество в плазменное состояние с достаточным содержанием ионной компоненты. Ионную компоненту лазерной плазмы можно ускорить до энергий, необходимых для проведения процесса перемешивания, во внешнем электрическом поле и направить ионный поток на подложку. Нейтральная компонента лазерной плазмы поступает на подложку с относительно низкими энергиями (до 10 эВ) и обеспечит рост пленки на поверхности.

Схема, так называемого, лазерно-имплантационного метода (ЛИМ) получения покрытий, позволяющего реализовать оптимизацию процесса ионного перемешивания показана на рис. 3. ЛИМ обладает высокой технологической гибкостью, позволяет управлять в широких пределах режимами образования покрытия. Так, изменяя мощность лазерного импульса, можно изменять количественное содержание ионной компоненты (от 0 до 100 %) в лазерной плазме и изменять зарядность ионов (от 1 до нескольких десятков). Изменяя зарядность ионов и величину внешнего электрического поля можно управлять энергией ионов. Все это дает возможность в едином вакуумном цикле комбинировать многие процессы, участвующие в формировании покрытия, ионное травление (очистку) подложки и образующегося покрытия; ионное легирование; ионное перемешивание; термическое осаждение атомов покрытия и др.

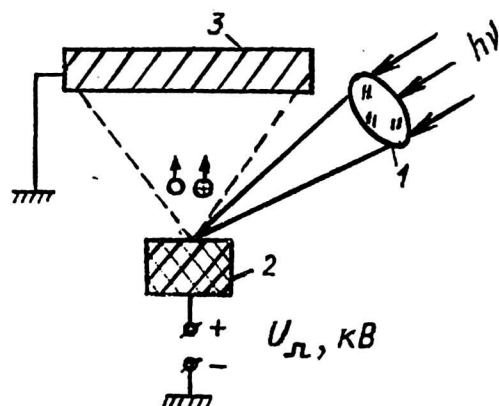


Рис. 3. Схема ЛИМ нанесения покрытий:
1 — оптическая система; 2 — мишень;
3 — подложка

Проведены экспериментальные исследования по созданию переходного слоя W на медной подложке лазерно-имплантационным методом. Соотношение концентраций элементов по поверхности и по глубине подложки исследовалось методом оже-электронной спектроскопии.

На рис. 4 приведено распределение концентрации W и Cu по глубине образцов. На рис. 4, б заметна резкая асимметрия этого распределения и значительно большая глубина проникновения вольфрама в медь.

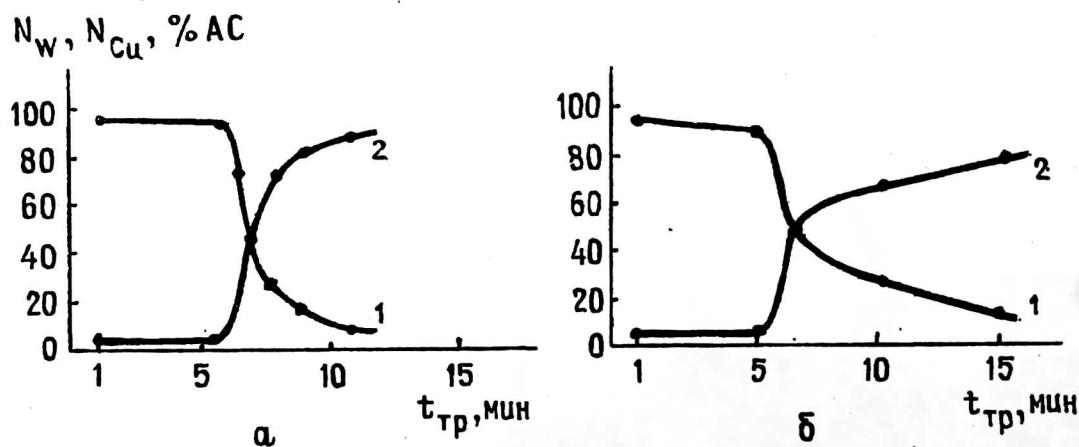


Рис. 4. Распределение концентраций W и Cu по глубине образца при нанесении с применением импульсного ускоряющего напряжения и при 200 импульсах лазера (а — $U_{\text{уск}} = 3$ кВ, б — $U_{\text{уск}} = 13$ кВ):
1. — концентрация вольфрама; 2 — концентрация меди

ION HASHING IN DIFFUSION WELDING

V. I. Ivanov

Moscow Institute of Radio Engineering, Electronic and Automation, Moscow, Russia

The opportunities of using ionized radiations in diffusive welding are considered. The efficiency of using ionic mixing in diffusive welding on an example of connection of copper anodi unit of magnetron with a flange from magnet-soft iron is shown.