

УДК 59.13.15

МОДИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКИ ИОНИЗИРУЮЩИМИ ИЗЛУЧЕНИЯМИ

В. И. Иванов

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

Рассмотрены физические процессы, протекающие при диффузионной сварке, с точки зрения их оптимизации воздействием ионизирующими излучениями. Показано, что наиболее оптимальными для диффузионной сварки являются ионы и, в частности, процесс ионного перемешивания.

Диффузионная сварка (ДС) находит все более широкое применение в промышленности и часто является наиболее ответственной технологической операцией в производственном цикле. Это объясняется тем, что этим методом [1] можно соединить в твердом состоянии без ограничения соотношения толщин разнообразные металлические и неметаллические материалы.

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

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

химическое взаимодействие (схватывание) при необходимом уровне активации соединяемых поверхностей (образование активных центров);

объемное развитие взаимодействия в контактной зоне, определяемое диффузионными процессами и сопровождающееся релаксацией внутренних напряжений, что приводит к уменьшению свободной энергии системы и получению термодинамически более стабильного соединения, характеризуемого определенной микроструктурой [2, 3]. Условия, обеспечивающие оптимальное развитие всех стадий, определяют прочностные и пластические характеристики сварного соединения.

Протекание физико-химических процессов при ДС обеспечивается сочетанием основных технологических параметров: подготовкой свариваемых поверхностей, температурой сварки T , напряжением сжатия (сварочным давлением P), временем изотермической выдержки (временем сварки t).

Процесс образования соединений может быть оптимизирован на каждой стадии сварки влиянием различных интенсифицирующих факторов.

Рассмотрим возможности использования высокоинтенсивного ионизирующего излучения (ВИИ) для модификации процессов ДС в целях улучшения качества вакуумно-плотных соединений при уменьшенных термодинамических нагрузках.

На процесс диффузионного соединения материалов влияют свойства поверхностей, их строение и рельеф, степень активации поверхности (количество активных центров), интенсификация диффузионных процессов.

Количественно оценить эффективность воздействия ВИИ на каждую стадию ДС достаточно сложно. Это связано с тем, что свариваемые поверхности можно облучить только в разнесенном состоянии. Поэтому подготовку поверхности (первая стадия ДС) и создание дефектов, которые влияют на протекание второй и третьей стадий ДС, можно осуществить только до образования фактического контакта поверхностей, что заставляет учитывать часто противоположное влияние одного и того же эффекта на развитии различных стадий ДС.

На первой стадии ДС наибольшую трудность представляет удаление с поверхности оксидных пленок. Наиболее эффективная очистка свариваемых поверхностей достигается ионным физическим распылением (десорбцией), для чего используются потоки ионов инертных газов (например, аргон) с энергией менее 500 эВ, интенсивностью менее 100 мкА/см² [4].

Параллельно с очисткой свариваемых поверхностей от оксидных пленок можно проводить полировку поверхностей за счет процесса ионного травления.

Лучшая подготовка поверхностей под сварку (очистки от оксидов) и для полировки достигается при следующих условиях: при облучении следует вращать облучаемую поверхность или источник ионов; поддерживать оптимальным угол падения ионов для данного материала. При этом можно "залечивать" такие дефекты, как углубления, царапины за счет перепыления вещества со стенок углублений и миграции атомов на поверхности [5].

Достоинствами использования ионов являются универсальность (т. е. независимость от рода облучаемой поверхности) и высокая степень очистки. Традиционные методы не позволяют получить ювенильной поверхности. Однако ионную очистку имеет смысл применять при давлении в вакуумной камере $P < 10^{-5}$ Па во избежание восстановления адсорбированного слоя за короткое время.

Высокоэнергетичные ионы ($E > 1$ кэВ) могут быть использованы в ДС для создания радиационных дефектов, оказывающих стимулирующее воздействие на последующие стадии. Однако они вызывают разрушение поверхности, т. к. коэффициент распыления не одинаков для различных участков поверхности [5], что уменьшает фактический контакт в процессе ДС.

Процесс образования фактического контакта при ДС происходит в три этапа: активная деформация; ползучесть; зарастание несплошностей.

На первом этапе происходят скольжение дислокаций вдоль плоскостей скольжения и возникновение новых дислокаций, вследствие чего стадия деформации прекращается. При облучении ВИИ образуются дефекты, тормозящие скольжение дислокации и, следовательно, уменьшающие пластичность, что ведет к снижению фактического контакта.

Этап ползучести существует благодаря диффузионному обмену точечными дефектами между системами дефектов, в результате чего форма зерна меняется таким образом, что происходят увеличение поверхности фактического контакта и ослабление напряжений.

Этап зарастания несплошностей, сохранившихся в плоскости контактирования (пор), происходит путем диффузионного тока вакансий в направлении от поры и поглощением порой межузельных атомов.

Роль радиационных дефектов на втором и третьем этапах положительна. Однако результирующее их воздействие может быть отрицательным, т. к. на этапе активной деформации пластичность снижается.

Для достижения максимального эффекта на первой стадии необходимо облучать менее пластичный материал.

На второй 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.

Влияние радиационных дефектов на вторую стадию ДС неоднозначно. С одной стороны, происходят распад радиационных дефектов на точечные дефекты и выход их на поверхность, что ведет к активации поверхности, с другой — снижается пластичность материала, что ведет к снижению числа точечных дефектов и дислокаций в процессе пластической деформации. Этот недостаток может быть скомпенсирован, если в процессе ДС большинство дефектов распадается, что приведет к более полной активации поверхности за счет обоих процессов. Следовательно, ДС должна протекать при температуре выше или равной температуре отжига большей части дефектов, тогда влияние облучения будет только положительно. Однако не следует выбирать температуру слишком высокой и проводить нагревание быстро, т. к. это может привести к выходу дефектов на поверхность до окончания первой стадии ДС.

В работе [6] дана оценка условий, необходимых для протекания 2-й стадии ДС при создании избыточной концентрации вакансий воздействием ВИИ, обеспечивающим необходимую степень активации поверхности. Получено выражение для определения времени (t_0), необходимого для получения максимальной степени активации:

$$t_0 = 2,3 \frac{R_{\text{эф}}}{\gamma a^2 \nu_0} e^{\frac{E_{\text{ав}}}{RT}}, \quad (1)$$

- где $R_{\text{эф}}$ — эффективный радиус зерна, см;
 γ — численный коэффициент ($\gamma = 1$);
 a — константа решетки, см;
 ν_0 — эффективная частота, с^{-1} ($\nu_0 \approx 10^{13}$);
 $E_{\text{ав}}$ — энергия активации вакансий, Дж/моль;
 R — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль · К);
 T — температура отжига, К.

Следует отметить приближенность данной модели, которая не учитывает время, необходимое на распад сложных дефектов на вакансии. В действительности за время t_0 протекают процессы второй стадии ДС и радиационно-усиленная диффузия (РУД). За время РУД происходит возвращение к термодинамическому равновесию концентраций вакансий. Поэтому необходимое условие оптимальности времени протекания процессов на 2-й стадии ($\theta_A^{\max} \geq 1$) будет при

$$\Delta C_{\text{отн}} = (C_0^{\text{отн}} - C_1^{\text{отн}}) \geq \frac{a_1}{2 R_{\text{эф}}}. \quad (2)$$

Время, за которое $\theta_A = 1$, получим из выражения:

$$t_{\text{акт}} = \frac{R_{\text{эф}} e^{E_{\text{ав}}/RT}}{\gamma a^2 \nu_0} \ln \left(1 - \frac{a_1}{2 R_{\text{эф}} \Delta C_{\text{отн}}} \right), \quad (3)$$

где $t_{\text{акт}}$ — время выхода вакансий на поверхность (т. е. время протекания 2-й стадии);

a_1 — межплоскостное расстояние в решетке металла, см ($a_1 = \frac{N_M}{n_0}$);

N_M — число атомов на поверхности металла, т. е. максимально возможное число активных центров, см⁻² ($N_M = 10^{15}$);

n_0 — плотность атомов, см⁻³;

$C_0^{\text{отн}}$ — относительная начальная избыточная концентрация вакансий в зерне ($C_0^{\text{отн}} = \frac{C_0}{n_0}$);

C_0 — начальная избыточная концентрация вакансий в зерне, см⁻³;

$C_1^{\text{отн}}$ — относительная равновесная концентрация вакансий в приповерхностном слое зерна при данной температуре ($C_1^{\text{отн}} = \frac{C_1}{n_0}$);

C_1 — концентрация вакансий в зерне, см⁻³.

При увеличении $\Delta C_{\text{отн}} \rightarrow \infty$, $t_{\text{акт}} \rightarrow 0$, t_0 остается постоянным.

Можно считать, что за время $t_{\text{акт}}$ поверхность активирована, а далее идет 3-я стадия (процесс диффузии).

Рассмотрим влияние РУД на третью стадию ДС. Коэффициент диффузии вакансий можно найти из выражения [7]:

$$D_b = A [n_v + \Delta n_v] \exp \left[-\frac{E_{\text{ав}}}{RT} \right], \quad (4)$$

где Δn_v — избыточная концентрация вакансий, см⁻³;

A — константа;

n_v — равновесная концентрация вакансий;

$E_{\text{ав}}$ — энергия активации миграции, эрг/моль.

$$n_v = B \exp \left[-\frac{E_v}{RT} \right]. \quad (5)$$

При отсутствии избыточной концентрации вакансий (Δn_v) D_b уменьшается.

Следовательно, наличие Δn_v позволяет уменьшать время протекания третьей стадии или уменьшить температуру ДС.

При низких температурах вакансии малоподвижны, а при высоких — $n_v \gg \Delta n_v$, т. к. n_v растет экспоненциально с ростом T , а Δn_v — падает из-за уменьшения времени жизни вакансий (t_0). При этом систему уравнений диффузии [8]

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(D_b \frac{\partial c}{\partial x} \right); \\ C(x, 0) &= 0; \\ C(\infty, 0) &= 0; \\ -D_b \frac{\partial c}{\partial x} \Big|_{x=0} &= \beta (C_{\text{оп}} - C(x, t) \Big|_{x=0}), \end{aligned} \quad (6)$$

где C — концентрация примеси в зависимости от x и t ;

$C_{\text{оп}}$ — насыщенная концентрация примеси;

β — коэффициент, зависящий от рода вещества

нельзя точно решить без учета зависимости D_b от x и t , т. к. D_b зависит от Δn_v , которая есть функция координат и времени ($\Delta n_v(x, t)$).

Уравнение (6) допускает лишь численное решение на ЭВМ.

Если принять, что сложные дефекты "мгновенно" распадаются на точечные, то $\Delta n_v(x, t)$ можно определить по кривой (рис. 1), где $\Delta n_v(x, 0)$ — распределение дефектов по глубине после облучения ВИИ.

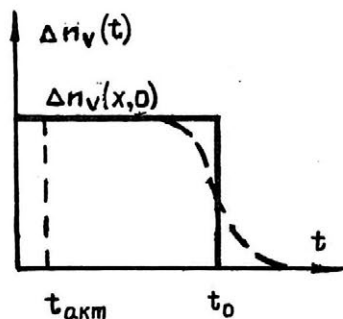


Рис. 1. Зависимость избыточной концентрации вакансий Δn_v от времени в фиксированной точке x ; — — — приближенное описание; - - - истинное описание

РУД развивается в течение времени t_0 , а далее идет обычная диффузия.

Если $t_0 \ll t_{\text{акт}}$, то РУД можно пренебречь. Однако при большой избыточной концентрации ($\Delta C^{\text{отн}}$) выполняется условие $t_{\text{акт}} \ll t_0$, и РУД нельзя не учитывать в течение времени t_0 , при этом зависимость $\Delta n_v(t)$ можно приближенно считать постоянной, т. е. $\Delta n_v(x, t)$ зависит только от X , а в момент t_0 обращается в ноль во всех точках (см. рис. 1).

Для численного определения концентрации одного материала в другой [$C(x, t)$] при существовании РУД в течение времени t_0 используются система уравнений (6), зависимость (4) и выражение $\Delta n_v(x, t)$, где $\Delta n_v(t)$ изображена на рис. 1, а $\Delta n_v(x)$ — находится численным методом на ЭВМ.

Таким образом, учитывая вышесказанное, можно рекомендовать следующий подход при использовании ВИИ для оптимизации ДС:

облучать менее пластичный материал;

производить отжиг радиационных дефектов при температуре, при которой останется столько дефектов, что преимущества от облучения превысят отрицательный эффект из-за потери пластичности и разрушения поверхности;

проводить отжиг с такой скоростью и при такой температуре, чтобы он большей частью проходил после окончания первой стадии ДС;

при сварке материалов с ограниченной растворимостью при $T > T_{\text{opt}}$ на третьей стадии снижение диффузии может дать положительный эффект из-за возможности увеличения времени сварки. Это позволит получить более прочное соединение, что нельзя сделать без замедления диффузии из-за возможности образования преципитатов.

Учитывая особенности взаимодействия различных видов ВИИ с твердым телом и технические возможности источников ВИИ [9], для ДС наиболее универсальными (оптимальными) представляются ионные пучки инертных газов.

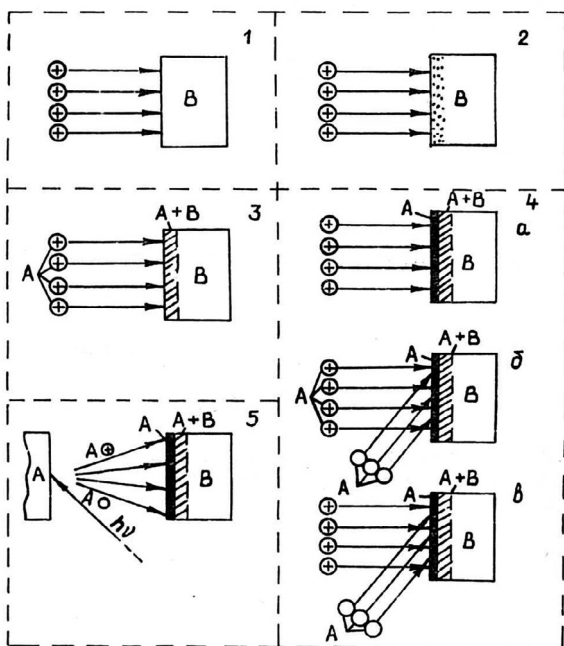
В ДС могут быть использованы многие вторичные процессы взаимодействия ионов с твердым телом (десорбция, дефектообразование, имплантация, ионное перемешивание). Причем ионы с энергиями до 50 кэВ могут быть получены в относительно простых и малогабаритных ионных источниках, а с энергиями выше 50 кэВ — в более сложных ионных источниках.

Ионные источники с энергиями ионов до 50 кэВ легко сопрягаются с установкой ДС и могут располагаться как снаружи, так и внутри. Ионные источники позволяют регулировать энергию и интенсивность ионного потока, что дает возможность использовать в ДС в любой необходимой последовательности вторичные процессы взаимодействия.

Особенно эффективно применение ионов для сварки нерастворимых материалов, когда отсутствует объемная диффузия, и сварка заканчивается на второй стадии. В этом случае оптимальным представляется использование процесса ионного перемешивания для предварительного создания перемешанного слоя. Подробно физика данного процесса рассмотрена в работе [10]. Использование процесса ионного перемешивания для сварки растворимых материалов также может оказаться оптимальным, т. к. в этом случае будет сведено к минимуму влияние противоречивого процесса диффузии для этой цели.

Рис. 2. Схемы применения ионного облучения для подготовки поверхности под диффузионную сварку:

1 — очистка поверхности ($E < 500$ КэВ);
 2 — очистка поверхности и создание радиационных дефектов ($E < 1$ МэВ);
 3 — создание переходного слоя имплантацией; 4 — создание покрытия и переходного слоя ионным перемешиванием: а — с предварительным нанесением покрытия, б, в — с одновременным нанесением покрытия ($E < 50$ КэВ); 5 — создание покрытия и переходного слоя ЛИМ: + — ионы инертного газа; А, В, — свариваемые материалы; А \oplus — ионы материала А; АО — атомы материала А; А + В — переходный слой



Процесс ионного перемешивания позволит:

больше и быстрее получить перемешанный слой из двух материалов, в том числе из нерастворимых материалов, что достижимо диффузионным путем, и обеспечить высокую прочность контакта (шва);

перемешивание может проходить при меньших температурах, чем диффузия, что позволяет избежать образования преципитата и снизить температуру сварки материалов с ограниченной растворимостью;

проводить сварку с материалом (В), на поверхности которого находится толстая пленка другого материала (А). Практически сварка проходит между однородными материалами (А + А). Для этого необходимо осуществлять перемешивание и заменять пленку более пластичного материала на менее пластичный, т. к. параметры сварки (T , P , t) пластичного материала ниже.

Возможные схемы использования ионов в ДС приведены на рис. 2.

Литература

1. А. с. 112460. Способ соединения керамических и металлокерамических деталей/ Казаков Н. Ф. Опубл. в Бюл. изобрет. и товарных знаков. 1958. № 4. С. 106.
2. Конюшков Г. В., Копылов Ю. Н. Диффузионная сварка в электронике. — М.: Энергия, 1974. С. 168.
3. Мусин Р. А., Анциферов В. Н., Квасницкий В. Ф. Диффузионная сварка жаропрочных сплавов. — М.: Металлургия, 1979. С. 208.
4. Броудай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии. — М.: Мир, 1985. С. 495.
5. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой/Под ред. Р. Бериша. — М.: Мир, 1984. Т. 1. — 336 с.; Т. 2. — 484 с.
6. Иванов В. И., Зоркин А. Я., Конюшков Г. В. Вакансионная активация поверхностей при облучении и диффузионной сварке//Электронная техника. Сер. 4. Электровакуумные и газоразрядные приборы. 1989. Вып. 4 (127). С. 54—57.
7. Лейман К. Взаимодействие излучения с твердым телом и образование элементарных дефектов/Пер. с англ. канд. физ.-мат. наук Г. И. Бабкина. — М.: Атомиздат, 1979. С. 293.
8. Гегузин Я. Е. Диффузионная зона. — М.: Наука, 1979. С. 343.
9. Иванов В. И. Высокоинтенсивные технологии в производстве электровакуумных приборов//Прикладная физика. 1994. № 1. С. 39.
10. Иванов В. И. Высокоинтенсивные технологии в создании покрытий//Там же. № 3. С. 21.

THE MODIFICATION OF DIFFUSION WELDING PROCESSES BY IONIC RADIATION

V. I. Ivanov

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

Physical processes of diffusion welding are discussed by using ionic radiation. In view of their optimisation it is shown that for diffusion welding ions and in particular, processes of ionic mixing are more suitable.