

ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ МИГРАЦИИ АТОМОВ ПРИ ДЕЙСТВИИ НА МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ ИСКРОВЫХ РАЗРЯДОВ И ДРУГИХ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Д.В. Миронов, О.А. Миронова
Самарский государственный аграрный университет,
ул. Учебная 2, п. Усть-Кинельский 446442,
Самарская обл., Россия, dvonorim@mail.ru

В работе рассматривается возможная физическая природа процессов, лежащих в основе ускоренной диффузии при импульсных воздействиях. Рассмотрена модель миграции атомов при действии на металл искровых разрядов и других высокоинтенсивных воздействий, основанная на повышении эффективной температуры газа межузельных атомов, что является движущей силой ускоренной диффузии, и сделаны оценки коэффициентов диффузии, коррелирующие по порядку величины с экспериментально определенными. Показано, что эффективная температура газа межузельных атомов, возникающего в экспериментальных условиях на границе твердой фазы со смесью, состоящей из элементов в других агрегатных состояниях, прямо пропорциональна плотности теплового потока ($T_{ef} \sim Q$), величина которого и определяет скорость миграции атомов в твердой фазе в условиях высокоинтенсивных воздействий.

Ключевые слова: миграция; диффузия; механизм; скоростная пластическая деформация.

POSSIBLE MECHANISM OF ATOMIC MIGRATION UNDER THE ACTION OF SPARK DISCHARGES AND OTHER HIGH-INTENSITY EFFECTS ON METALS AND ALLOYS

D. V. Mironov, O. A. Mironova
Samara State Agrarian University,
2 Uchebnaya Str., 446442 Ust-Kinelsky village by the Samara province,
Russia, dvonorim@mail.ru

The paper considers the possible physical nature of the processes underlying accelerated diffusion under pulsed influences. The model of atomic migration under the action of electric discharges and other highly intense influences on metal is considered, based on an increase in the effective temperature of the gas of interstitial atoms, which is the driving force of accelerated diffusion, and estimates of diffusion coefficients are made, correlating with order of magnitude with experimentally determined values. It has been shown that the effective temperature of the gas of interstitial atoms, which occurs under experimental conditions at the boundary of the solid phase with a mixture consisting of elements in other states of aggregation, is directly proportional to the heat flux density ($T_{ef} \sim Q$), the value of which determines the rate of migration of atoms in the solid phase under high-intensity conditions.

Keywords: migration; diffusion; mechanism; high-speed plastic deformation.

Введение

Процесс ускоренной диффузии, стимулированный быстро протекающими нагружениями, носит универсальный характер. Поэтому логично предположить, что и механизм данного явления будет сходным при разнообразных обработках.

Рассмотрим общие черты протекания

миграции атомов при различных высокоинтенсивных воздействиях и возможную физическую природу процессов, лежащих в основе ускоренной диффузии при импульсных воздействиях.

Результаты и обсуждение

Анализ существующих представлений

о природе ускоренной миграции атомов при импульсных воздействиях показывает, что большинство авторов, работающих в этой области [1, 2], опирается на теорию межузельных атомов металлов со сверхвысокой подвижностью [3-5]. В частности, авторы [3, 4] полагают, что энергия миграции собственных межузельных атомов в металлах при скоростной пластической деформации не превышает 0.05 – 0.15 эВ. Это подтверждается экспериментальными исследованиями, проведенными для фиксации атомов в жидком азоте или жидком гелии [4].

При электроискровом легировании поверхностей металлических материалов в процессе формирования покрытия и диффузионной зоне на катоде происходят взаимодействие элементов, находящихся в жидкой фазе, которое способствует возникновению между ними химической связи, развитию само- и гетеродиффузии, образованию твердых растворов, интерметаллических фаз, фаз внедрения и сложных многокомпонентных соединений.

Помимо взаимодействия в жидкой фазе также наблюдается атомная диффузия элементов анода в катод, происходящая в твердой фазе [6]. Все эти явления в поверхностном слое электродов обусловлены возникновением в зоне разряда высоких температур, давлений, термоупругих нагрузжений, высокоскоростной пластической деформации в микрообъемах металлах и др. Следовательно, диффузионное взаимодействие материалов электродов происходит в крайне неравновесных условиях, что приводит к ускорению подвижности проникающих атомов и сложному характеру распределения элементов в поверхностных слоях.

Межузельные атомы, генерируемые на границе твердой фазы, распространяются в глубь образца вдоль оси X . Уравнение квазисвободного движения такого атома с массой m с учетом диссипативного члена в функции Лагранжа, имеющего кулонов-

ский вид (трение)

$$m\ddot{X} = -\kappa\dot{X} \quad (1)$$

где $\frac{\kappa}{m} = \lambda$ – коэффициент трения единичной массы. Решение уравнения (1) при начальных условиях

$$X(0) = 0, \quad X(\infty) = l, \quad \dot{X}(0) = V_0 \quad (2)$$

есть

$$X(t) = \left(-\frac{V_0}{\lambda} \right) \cdot e^{-\lambda t} + l \quad (3)$$

где $V_0 = \lambda l$, t – время (4)

Предположим, что совокупность межузельных атомов представляет собой квазиидеальный газ, т. е. распределение атомов по скоростям является максвелловским с температурой, зависящей от времени:

$$d^2 n_X = n_0 f(V_0) dV_0 dt \quad (5)$$

где n_0 – нормировочная постоянная,

$$f(V_0) = \left(\frac{m}{2\pi k(t)} \right)^{1/2} \exp \left(-\frac{mV_0^2}{2kT(t)} \right) \quad (6)$$

– максвелловская плотность распределения по скоростям, k – постоянная Больцмана, $T(t)$ – зависящая от времени температура газа межузельных атомов.

Интегрируя выражение (5) с учетом формулы (6) по t , получаем полное число атомов, проникших в твердую фазу за время действия импульса τ и имеющих начальные скорости в интервале $V_0 - (V_0 + dV_0)$:

$$dn_X(V_0) = n_0 \left[\int_0^{t_{\max}} \left(\frac{m}{2\pi k(t)} \right)^{1/2} \cdot \exp \left(-\frac{mV_0^2}{2kT(t)} \right) dt \right] dV_0 \quad (7)$$

При t_{\max} выполняется соотношение

$$X(t_{\max}) \approx l \quad (8)$$

Произведя оценку интеграла (7) для коротких импульсов, заменяя реальную форму зависимости $T(t)$ ступенчатой функцией T_{ef} (рис. 1):

$$dn_X(V_0) = n_0 \left(\frac{m}{2\pi k(t)} \right)^{1/2} \exp \left(-\frac{mV_0^2}{2kT(t)} \right) \tau dV_0 + \dots \quad (9)$$

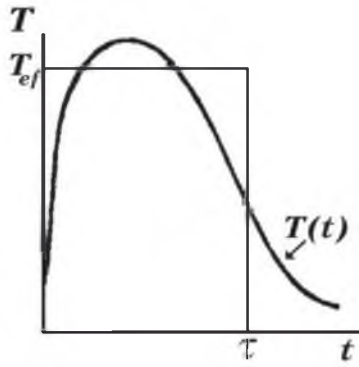


Рис. 1. Зависимость температуры газа межузельных атомов от времени: $T(t)$ – для реальных процессов, T_{ef} – ступенчатая функция

В этом выражении отброшен низко-температурный вклад, несущественный при высоких скоростях и не вносящий заметного вклада в аномально высокие глубины проникновения, наблюдаемые экспериментально.

Концентрацию для малых величин определим из соотношения

$$C = \frac{dn_x / dl}{\rho + dn_x / dl} \approx \frac{dn_x / dl}{\rho}, \quad (10)$$

где ρ – линейная плотность твердого тела, dn_x / dl – число атомов, проникших на глубину $l - (l + dl)$, есть

$$dn_x / dl = \lambda \frac{dn_x(V_0)}{dV_0} \quad (11)$$

Подставляя (9) в (10) и логарифмируя, получаем соотношение, хорошо описывающее концентрационные профили при импульсных воздействиях:

$$\ln C(l) = \ln C_0 - \alpha \cdot l^2, \quad (12)$$

$$\text{где } C_0 = \frac{n_0}{\rho} \left(\frac{m}{2\pi k T_{ef}} \right)^{1/2} \tau \quad (13)$$

и

$$\alpha = \frac{m \lambda^2}{2k T_{ef}} \approx \frac{\kappa^2}{2k T_{ef} m} \quad (14)$$

Используя, например, данные для проникновения атомов $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}$ и $\text{Fe} \rightarrow \text{Al}$ [7], протекающих при одинаковой температуре T_{ef} в условиях импульсной магнитной нагрузки, можно написать соотношение

$$\frac{\alpha_{\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}}^{\text{эксп}}}{\alpha_{\text{Fe} \rightarrow \text{Al}}^{\text{эксп}}} = 2.28. \quad (15)$$

Если параметр ξ считать не зависящим от процесса массопереноса, то при этих же условиях, согласно формуле (16), имеем

$$\frac{\alpha_{\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}}^{\text{теор}}}{\alpha_{\text{Fe} \rightarrow \text{Al}}^{\text{теор}}} = 1.32 \quad (16)$$

Учет геометрического вклада в рассеяние атомов, согласно соотношению

$$\xi = \xi' \frac{S_1 + S_2}{S'}, \quad (17)$$

где S_1 , S_2 , S' – геометрические сечения движущегося атома, атома и ячейки невозмущенной решетки твердого тела, дает

$$\frac{\alpha_{\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}}^{\text{теор}}}{\alpha_{\text{Fe} \rightarrow \text{Al}}^{\text{теор}}} = 4.05 \quad (18).$$

Отличие результатов, полученных по данной формуле и (16), в основном, обусловлено различием параметров невозмущенной решетки железа и алюминия.

Заключение

Представленные результаты свидетельствуют о правомерности данного подхода к рассмотрению процессов диффузии при высокоинтенсивных воздействиях в присутствии мощных электромагнитных полей. Таким образом, описанная выше модель с учетом реальных параметров обработки позволяет теоретически оценить величины коэффициента ускоренной диффузии и сравнить их с экспериментально полученными результатами. Следует, однако, помнить, что пока можно говорить только о качественном соответствии, и, возможно, только дальнейшие исследования помогут перейти к количественным оценкам.

Библиографические ссылки

1. Герцрикен Д.С., Мазанко В.Ф., Тышкевич В.М., Фальченко В.М. Массоперенос в металлах при низких температурах в условиях внешних воздействий. (3 изд. дополн. и переработан.) Киев: изд. НАН Украины, 2001. 458 с

2. Герцрикен Д.С., Тышкевич В.М. Тлеющий разряд и инертные газы в металлах. Киев: Академперіодика, 2006. 280 с.
3. Mazanko V.M., Gertsriken D.S., Koval Yu.N., Meshkov Yu.Ya., Mironov V.M., Alekseeva V.V. Temperature effect on diffusion processes in metals at different impulse treatments. *Вісник Черкаського Університету. Сер. Фіз.-мат. науки* 2007; 117: 40-46.
4. Дамаск А., Динс Дж. Точечные дефекты в металлах. М.: Мир, 1966. 291 с.
5. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Савушкин Е.В., Хон Ю.А. Сильно возбужденные состояния в кристаллах // *Известия. Вузов, сер. Физика* 1987; №1, С.9 – 93.
6. Душенко В.Ф., Гитлевич А.Е., Ревуцкий В.М., Михайлов В.В. О возможном механизме диффузии при электронском легировании и других видах импульсного воздействия на металлы. *Электронная обработка материалов* 1980; (3): 36-39.
- 7 Kuchuk-Yatsenko S.I., Kharchenko G.K., Mironov D.V., Mironov V.M., Mazanko V.F., Gertsriken D.S., Bogdanov S.E. Diffusion under the action of shock compression and alternating electric current at high temperatures. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii* 2014; 36(1): 1171-1187.