

УДК 544.4(075.8)

## ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ РАЗМЕРОВ ИОНОВ КОМПОНЕНТОВ И ЭЛЕКТРОПЕРЕНОСА НА ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА ПРИ КОНТАКТНОМ ПЛАВЛЕНИИ

© 2021 г. А. А. Ахкубеков<sup>1</sup>, С. Н. Ахкубекова<sup>2</sup>, А. Р. Манукянц<sup>3</sup>, В. А. Созаев<sup>3</sup>, \*

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х.М. Бербекова”, Нальчик, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет”, Нальчик, Россия

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)”, Владикавказ, Россия

\*E-mail: sozaeff@mail.ru

Поступила в редакцию 19.04.2021 г.

После доработки 12.05.2021 г.

Принята к публикации 28.05.2021 г.

Установлен вид зависимости скоростей ионов компонентов в бинарных металлических растворах для основного и примесного компонентов. Показано, что результирующая скорость переноса ионов компонентов в процессе контактного плавления при наличии электропереноса возрастает не только с увеличением отношений их размеров, но и с ростом отношения коэффициентов диффузии компонентов.

DOI: 10.31857/S0367676521090039

### ВВЕДЕНИЕ

Процесс контактного плавления (КП) при наличии электропереноса обусловлен взаимной диффузией за счет потока градиента концентрации и электропереноса. При взаимной диффузии встречные потоки не равны друг другу, что приводит к образованию в диффузионной зоне гидродинамического потока.

Исследование влияния электрического тока на процесс контактного плавления (КП) между разнородными металлами способствует выявлению определенных закономерностей в кинетике и механизме образования и роста жидкой фазы между контактируемыми компонентами [1–4].

В [1, 2] показано, что сплавы, находящиеся в жидко-твердом состоянии и образующиеся при КП в трехкомпонентных системах, содержат раздельно существующие твердые фазы. Установлено, что пропускание постоянного электрического тока в процессе КП способствует его интенсификации и регулированию морфологии включений: формы, размеров и направления их переноса. Микротвердость контактных прослоек Sn–Bi + 50 вес. % Pb бестокового образца больше по сравнению с токовыми образцами. Уменьшение

значения микротвердости, видимо, связано с обогащением этой области оловом.

В [4] теоретически обосновано влияние электропереноса на скорость макроскопического течения в расплаве, которое определяется не только неравенством коэффициентов диффузии  $D_1$  и  $D_2$ , а зависит также от величины изменения скорости течения в расплаве.

Изучение влияния электропереноса на процессы КП имеет как теоретическое, так и практическое значение. Теоретический подход позволит установить подвижности ионов при электропереносе с микроскопическими параметрами системы. Практическое значение заключается в том, что открываются пути конструирования новых композиционных материалов методом КП, например, в системе Cu–Al [5].

При построении теории процессов в КП важно установить связь характеристик доминирующего процесса электропереноса с кинетическими параметрами КП. Применение для этого активационной модели жидкого состояния не вполне обосновано.

Некоторые исследователи электропереноса при КП исходной моделью переноса предполагают гидродинамическую [6, 7]. Для дальнейших

рассуждений можно пользоваться этой моделью и представлениями, развитыми в работах [8–12].

Целью работы было установление связи результирующей скорости переноса иона в процессах электропереноса при КП от размеров ионов компонент и их коэффициентов диффузии.

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Применяется гидродинамическая модель переноса. Также используется диффузионная теория Эйнштейна, в модели “блуждающего атома” связывающая коэффициент диффузии и подвижность. Подобный подход позволяет установить взаимосвязи между кинетикой КП при электропереносе с размерами ионов компонент КП и отношением их коэффициентов диффузии.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Пусть жидкий металлический расплав состоит из  $n$  различных ионов металлов. Найдем силу, действующую на каждый отдельный ион. Такая сила будет результирующей силы поля

$$F_i = eEZ_i, \quad (1)$$

где  $e$  – заряд электрона,  $E$  – напряженность электрического поля,  $Z_i$  – заряд иона  $i$ -го сорта, и силы “электронного ветра” [13]

$$F_{iB} = -qeE\sigma_i = -eEn_e l_i \sigma, \quad (2)$$

где  $q$  – коэффициент пропорциональности,  $\sigma_i$  – эффективное сечение рассеяния электронов на ионах, характеризующее передачу потока импульса от электронов к ионам  $i$ -го сорта,  $\sigma$  – среднее сечение рассеяния электронов проводимости,  $l_i$  – длина свободного пробега ионов  $i$ -го сорта,  $n_e$  – концентрация электронов.

При равновесии образца, находящемся в постоянном электрическом поле, можно в соответствии с [13] записать:

$$\sum_i (F_{iB} + F_i) N_i = 0, \quad (3)$$

где  $N_i$  – число ионов  $i$ -го сорта в расплаве.

Если процесс равновесный, закон сохранения массы дает суммарный поток ионов в выделенном объеме  $\sum j_i = 0$ . Аналогично для потока нейтральных частиц  $\sum j_{ik} = 0$ . Тогда полный поток:

$$\sum_i j_i + \sum_i j_{ik} = 0. \quad (4)$$

С учетом эффекта Киркендалла в жидкометаллической среде [6, 7] на ионы действует сила вытеснения, зависящая от давления:

$$f = -n\nabla P, \quad (5)$$

где  $P$  – давление,  $n$  – объем ионов.

Результирующая сила электрической природы, действующая на единицу объема образца равна:

$$F = \sum_i c_i F_i, \quad (6)$$

где  $c_i$  – концентрация ионов  $i$ -го сорта, а результирующая сила вытеснения, действующая на единицу объема образца:

$$f = \sum_i c_i f_i. \quad (7)$$

Для ионов одного и того же  $i$ -го сорта электрические силы и силы вытеснения, действующие на ион в среднем равны, тогда:

$$\sum_i c_i \bar{F}_i = \sum_i c_i \bar{f}_i. \quad (8)$$

Причем полная средняя сила вытеснения в объеме с количеством ионов  $N_i$  равна:

$$\bar{f}_i = \frac{f_i}{N_i} = \frac{F_i}{N_i}. \quad (9)$$

Далее можем написать, что

$$\sum_i c_i \bar{f}_i = \sum_i c_i \frac{F_i}{N_i} = F_i \sum_i \frac{c_i}{N_i} = F_i, \quad (10)$$

$$\text{так как } \sum_i \frac{c_i}{N_i} = 1.$$

Из (8) и (10) получим:

$$f_i = \sum_i c_i \frac{F_i}{N_i}. \quad (11)$$

Следовательно, полная равнодействующая сила, действующая на ион с учетом силы  $F_i$  (1) и  $f_i$  (11) равна

$$F_{ni} = F_i - f_i = eEz_i - \frac{\sum_i c_i F_i}{N_i} = eE \left( z_i - \frac{\sum_i c_i z_i}{N_i} \right). \quad (12)$$

В случае двухкомпонентной системы потоки ионов через выделенную неподвижную плоскость в объеме равны соответственно:

$$\begin{aligned} j_1 &= -N_1 \tilde{D} \frac{\partial c}{\partial x} + c_1 u_1 F_{n1}, \\ j_2 &= -N_2 \tilde{D} \frac{\partial c}{\partial x} + c_2 u_2 F_{n2}, \end{aligned} \quad (13)$$

где  $u_1$  и  $u_2$  – подвижности ионов 1-го и 2-го сорта.

Полные потоки через выделенную плоскость  $j_1 = j_2 = 0$ . Тогда

$$N_1 \tilde{D} \frac{\partial c}{\partial x} = c_1 u_1 F_{n1}, \quad N_2 \tilde{D} \frac{\partial c}{\partial x} = c_2 u_2 F_{n2}. \quad (14)$$

Из уравнений (14) имеем

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{c_1 u_1 \left( z_1 - \frac{c_1 z_1 + c_2 z_2}{N_1} \right)}{c_2 u_2 \left( z_2 - \frac{c_1 z_1 + c_2 z_2}{N_2} \right)} \quad (15)$$

и далее

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{\frac{u_1}{u_2} c_1 N_2 - \frac{u_1}{u_2} c_1 c_2 + \frac{N_1^2}{N_2^2} c_2^2}{\frac{u_1}{u_2} c_1^2 + \frac{N_1^2}{N_2^2} c_2 + \frac{N_1^2}{N_2^2} c_1 c_2} \quad (16)$$

Пусть  $a$  и  $b$  есть парциальные объемы компонент 1 и 2. Тогда с учетом того, что  $c_1 = N_1 \frac{a}{a+b} = N_1$  (при  $b \ll a$ ),  $c_2 = N_2 \frac{b}{a+b} = 0$  при  $b \ll a$  из (16) получим:

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{\frac{u_1}{u_2} N_1 N_2}{\frac{u_1}{u_2} N_1^2} = \frac{N_2}{N_1}. \quad (17)$$

Учитывая, что  $\frac{N_2}{N_1} = \frac{\Omega_1}{\Omega_2}$ , где  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  – размеры ионов компонент, получим:

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{\Omega_1}{\Omega_2}. \quad (18)$$

Из уравнения (18) следует, что эффективные заряды отдельных компонент 1 и 2 по модулю пропорциональны размерам ионов.

Из уравнения (10) следует, что если  $F_i > 0$ , то  $f_i < 0$ , т.е. сила вытеснения направлена противоположно силе электрической природы  $F_i$ . Тогда очевидно, что эффективный заряд иона при доминирующей силе вытеснения будет отрицательным, то есть  $z_1, z_2 < 0$ , а по модулю пропорциональный величинам  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$ . В работе [14] сведены значения эффективных зарядов  $z_i$  ионов различных компонент с вычисленными значениями  $\Omega_i$ . Отмечено, что в пределах погрешностей найденных зарядов  $z_i$ , их модули пропорциональны значениям  $\Omega_i$ . Используя равенство (18) можно оценить скорость электропереноса в зависимости от различного размера иона.

Можно определить скорость электропереноса иона с эффективным зарядом  $z$  как величину

$$v = zeuE, \quad (19)$$

где  $u$  – подвижность иона;  $E$  – напряженность внешнего электрического поля.

Из уравнения (19) и соотношения Эйнштейна  $D = kTu$ , связывающего коэффициент диффузии

$D$  и подвижность  $u$ , где  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура, получим:

$$z = \frac{v k T}{e E D}. \quad (20)$$

Из уравнения (20) при  $E = \text{const}$ ,  $T = \text{const}$  получим отношение эффективных зарядов двух ионов:

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{v_1 D_2}{v_2 D_1}. \quad (21)$$

Или из уравнений (18), (21):

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\Omega_1 D_1}{\Omega_2 D_2}, \quad (22)$$

то есть вклад в скорость электропереноса вносит еще и коэффициент диффузии иона примеси, который, по данным [14], зависит от массы иона. Но здесь величина  $D$  пропорциональна массе иона и, следовательно, размеру иона, а результирующая скорость переноса возрастет не только с увеличением отношения  $\Omega_1/\Omega_2$ , но и с возрастанием отношения  $D_1/D_2$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые установлена связь результирующей скорости переноса иона в процессах КП при наличии электропереноса от отношения размеров ионов и коэффициентов диффузии компонент. Результирующая скорость переноса иона возрастает как с увеличением отношения размеров ионов компонент, так и с ростом отношения их коэффициентов диффузии. Выявленные закономерности могут найти применение в технологиях контактно-реактивной пайки, машиностроении и ядерной энергетике.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афашоков В.З., Ахкубеков А.А. // Поверхн. Рентген-, нейтрон. и синхротрон. исслед. 2014. № 1. С. 99.
2. Ахкубеков А.А. Диффузия и электроперенос при контактном плавлении. Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Нальчик: КБГУ, 2001. 312 с.
3. Гегуева М.М., Гринюк В.Н., Касумов Ю.Н. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 6. С. 814; Gegueva M.M., Grinyuk V.N., Kasumov Y.N. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. No. 6. P. 737.
4. Ахкубеков А. А., Багов А.М. // Изв. РАН. Сер. физ. 2009. Т. 73. № 7. С. 961; Akhkubekov A.A., Bagov A.M. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2009. V. 73. No. 7. P. 950.
5. Атаев Я.Ф., Дедегкаева Л.М., Манукянц А.Р. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 11. С. 1577; Ataev I.F., Dedegkaeva L.M., Manukyants A.R. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. No. 11. P. 1380.
6. Савинцев П.А., Рогов В.И. // Изв. вузов СССР. Физ. 1967. Т. 8. С. 151.
7. Гаврилов Н.И., Рогов В.И., Савинцев П.А. // ФММ. 1974. Т. 37. № 3. С. 638.

8. *Ахкубеков А.А., Ахкубекова С.Н., Зубхаджиев М.-А.В. и др.* Процессы взаимной диффузии компонентов, образующих эвтектики. Владикавказ: СКГМИ, 2016. 208 с.
9. *Белащенко Д.К.* Явления переноса в жидких металлах и полупроводниках. М.: Атомиздат, 1970. 400 с.
10. *Белащенко Д.К.* Исследования расплавов методом электропереноса. М.: Атомиздат, 1974. С. 88.
11. *Шморгун В.Г., Кулевич В.П., Савченко В.В.* // Изв. ВолГТУ. 2016. С. 21.
12. *Манукянц А.Р., Созаев В.А.* Поверхностные свойства металлических систем. Владикавказ: Изд-во Терек, 2017. 220 с.
13. *Фикс Б.В.* // ФТТ. 1959. Т. 1. № 1. С. 16.
14. *Гринюк В. Н., Елекоева К.М.* // Труды Сев.-Кав. ГМИ. 2008. № 15. С. 156.

## **Influence of the ion size ratio of components and electrical transfer on transfer phenomena during contact melting**

**A. A. Akhkubekov<sup>a</sup>, S. N. Akhkubekova<sup>b</sup>, A. R. Manukyants<sup>c</sup>, V. A. Sozaev<sup>c, \*</sup>**

<sup>a</sup>*Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, 360004 Russia*

<sup>b</sup>*Kabardino-Balkarian State Agricultural University, Nalchik, 360030 Russia*

<sup>c</sup>*North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy, Vladikavkaz, 362021 Russia*

*\*e-mail: sozaeff@mail.ru*

A dependence of the ion velocities of the main and impurity components in binary metallic solutions has been studied. It is shown that the resulting speed ion transport of components in the process of contact melting in the presence of electrical transfer increases not only with an increase in the ratio of their sizes, but also with an increase in the ratio of the diffusion coefficients of the components.