

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 539.911

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.04.012

**АНОМАЛЬНЫЙ МАССОПЕРЕНОС БОРА ПРИ ИНДУКЦИОННОМ БОРИРОВАНИИ
СТАЛИ 20****Евгения Петровна Шевчук^{1†}, Владимир Александрович Плотников²,
Сергей Викторович Макаров³**¹ Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, пр. Шакарима, 148, 070000, Усть-Каменогорск, Республика Казахстан^{2,3} Алтайский государственный университет, пр. Ленина, 61, 656049, Барнаул, Россия¹ evgeniya-shevchu@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-1089-017X>² plotnikov@phys.asu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7051-1082>³ makarov@phys.asu.ru

Аннотация. Формирование обширной диффузионной зоны размером до 980 мкм при 1000 °С и выдержке в течение 5 минут в индукционной печи свидетельствует об аномальном высоком массопереносе бора в ходе высокотемпературного борирования стали 20. Такой массоперенос бора в диффузионной зоне обеспечен аномально высокой диффузией бора в α -матрицу. Из анализа высокой диффузионной подвижности, влияющей на диффузию бора, следует, что аномально высокий диффузионный массоперенос может быть обеспечен действием нескольких факторов различной физической природы. Во-первых, одним из факторов является градиент химического потенциала, обеспечивающий протекание реакционной диффузии и образование боридов железа FeB и Fe₂B. Во-вторых, высокая температура определяет высокую кинетическую энергию и высокую диффузионную подвижность атомов бора. В-третьих, высокий тепловой эффект реакции образования боридов (43118,4 кДж/моль) вызывает локальное повышение температуры, следствием чего является увеличение диффузионной подвижности бора в диффузионной зоне. Основным маршрутом бора в стали при борировании является диффузионный массоперенос по границам зерен. Высокая скорость зернограничной диффузии связана особенностями атомного строения границы зерен и, прежде всего, с наличием свободного объема, избыточной концентрацией вакансий при высоких температурах и областей растяжения и сжатия. Диффузия по границам зерен в условиях действия нескольких факторов, перечисленных выше, на несколько порядков больше, чем внутри зерна. Такой эффект может быть связан с появлением жидкой фазы в границах зерен задолго до температуры плавления поликристаллического агрегата, то есть коэффициент диффузии по границам зерен становится по существу равным коэффициенту диффузии в жидкости. Формально учет факторов, влияющих на диффузионный процесс, можно описать как снижение потенциального барьера в условиях действия этих факторов. Разумеется, потенциальный барьер не снижается, а снижается эффективное значение энергии активации на величину работы внешних сил. При снижении эффективной энергии активации до нуля, вероятностный экспоненциальный множитель в формуле коэффициента диффузии становится равным единице, а процесс массопереноса бора при таких условиях принимает надбарьерный характер и переходит в своеобразный автокаталитический процесс массопереноса. Представленные в статье данные показывают, что при борировании необходимо учитывать и исследовать аномальный массоперенос. Продолжение исследований в этой области поможет лучше понять физические механизмы этих сложных процессов и разработать более эффективные методы химико-термической обработки.

Ключевые слова: диффузионная зона, граница зерен, химический потенциал, коэффициент диффузии, аномальный массоперенос, реакционная диффузия, потенциальный барьер, высокая диффузионная подвижность.

Для цитирования: Шевчук Е.П., Плотников В.А., Макаров С.В. Аномальный массоперенос бора при индукционной борировании стали 20 // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2023. Т. 20, № 4. С. 524–532. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.04.012.

Original article

ABNORMAL BORON MASS TRANSFER DURING INDUCTION BORATION OF STEEL 20

Evgenia P. Shevchuk^{1†}, Vladimir A. Plotnikov², Sergey V. Makarov³

¹ East Kazakhstan University named after Sarsen Amanzholov, Shakarim Ave., 148, 070000, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan

^{2,3} Altai State University, 61 Lenin Ave., 656049, Barnaul, Russia

¹ evgeniya-shevchu@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-1089-017X>

² plotnikov@phys.asu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7051-1082>

³ makarov@phys.asu.ru

Abstract. The formation of an extensive diffusion zone up to 980 microns in size at 1000 °C and exposure for 5 minutes in an induction furnace indicates an abnormally high mass transfer of boron during high-temperature boration of steel 20. Such a mass transfer of boron in the diffusion zone is provided by an abnormally high diffusion of boron into the α -matrix. From the analysis of high diffusive mobility affecting boron diffusion we can understand that anomalously high diffusive mass transfer can be ensured by the action of several factors of different physical nature. Firstly, one of the factors is the gradient of the chemical potential, which ensures the course of reaction diffusion and the formation of iron borides FeB. Secondly, high temperature determines high kinetic energy and high diffusion mobility of boron atoms. Thirdly, the high thermal effect of the boride formation reaction (43118.4 kJ/mol) causes a local temperature increase, resulting in an increase in the diffusion mobility of boron in the diffusion zone. The main route of boron in steel during boration is diffusion mass transfer along grain boundaries. The high rate of grain boundary diffusion is associated with the atomic structure of the grain boundary and, above all, with the presence of free volume, excessive concentration of vacancies and areas of tension and compression. Such heterogeneity of the free volume leads to the fact that diffusion can occur mainly along some channels, and not over the entire volume of the grain boundary. The diffusion of the grain under the conditions of the action of several factors listed above, there are several orders of magnitude more than the grain. This effect may be associated with the appearance of the liquid phase in the grain boundaries long before the melting temperature of the polycrystalline aggregate, that is, the diffusion coefficient along the grain boundaries becomes essentially equal to the diffusion coefficient in the liquid. Formally, taking into account the factors affecting the diffusion process can be described as reducing the potential barrier under the conditions of the action of these factors. Of course, the potential barrier does not decrease, but decrease an effective activation energies by the amount of work of external forces. When the effective activation energy decreases to zero, the probabilistic exponential factor in the formula for the diffusion coefficient becomes equal to unity, and the process of boron mass transfer under such conditions takes on an over-barrier character and turns into a kind of autocatalytic mass transfer process. The data presented in the article show that when borating, it is necessary to take into account and investigate abnormal mass transfer. Continuing research in this area will help to better understand the physical mechanisms of these complex processes and develop more effective methods of chemical and thermal treatment.

Keywords: diffusion zone, grain boundary, chemical potential, diffusion coefficient, abnormal mass transfer, reaction diffusion, potential barrier, high diffusion mobility.

For citation: Shevchuk, E. P., Plotnikov, V. A. & Makarov, S. V. (2023). Abnormal boron mass transfer during induction boration of steel 20. *Fundamental'nye problemy sovremennoy materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 20(4), 524–532. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.04.012.

Введение

Явление аномально высокой твердофазной диффузии обнаруживается в ряде ситуаций. Например, при воздействии импульсными высокоэнергетическими электронными и ионными пучками средней интенсивности, а также при химико-термическом ($t = 900-1000$ °C) легировании металлических порошков различными элементами в условиях дополнительного механического воздействия [1, 2]. В условиях контактной высокотемпературной микропластической деформации металлических частиц было выяснено, что эффек-

тивный коэффициент диффузии легирующих элементов в железо выше значения коэффициента объемной диффузии в 6 раз, что связано с уменьшением размера зерен и соответственно, с увеличением роли зернограничной диффузии [3]. Обычно увеличение коэффициента диффузии в металлах и сплавах с высокой плотностью структурных дефектов (границ зерен и дислокаций) объясняют наличием большого числа путей для ускоренной или легкой диффузии. Физический механизм этого сложного явления полностью не выяснен и является предметом исследований [4-6].

Аномальный ускоренный массоперенос, в том числе его частный случай – диффузионный массоперенос в металлах и сплавах, представляет собой результат одновременного действия нескольких факторов (процессов) различной физической природы [7]. Протекание химических реакций между компонентами, участвующими в процессе химико-термической обработки, может являться одним из факторов интенсификации аномально высокого массопереноса, обусловленного градиентом химического потенциала, внешне выраженным как тепловой эффект химических реакций [8-10]. Движущая сила диффузии в этом случае определяется градиентом химического потенциала (свободной энергии) диффундирующего компонента. Следует заметить, что на практике в настоящее время для определения диффузионных потоков при химико-термической обработке учитывают не градиент химического потенциала, а градиент концентрации [11, 12], что фактически выводит за пределы обсуждения реакцию диффузию.

Другой движущей силой аномального массопереноса может являться градиент температуры. Известно, чем выше температура нагрева тела, тем больше средняя кинетическая энергия его молекул, а, значит, повышается подвижность атомов бора. А она, в свою очередь, влияет на коэффициент диффузии. Градиент температуры означает, что внутренние слои имеют низкую температуру, а внешний слой – высокую температуру. Поэтому встречный массоперенос затруднен или полностью подавлен. В условиях борирования стали 20 индукционным воздействием температура атомов железа низкая, а температура атомов бора высокая.

Характеристикой процесса диффузии является коэффициент диффузии, являющийся чрезвычайно чувствительным к температуре. Формально зависимость коэффициента диффузии от температуры подчиняется соотношению Аррениуса [13-15]:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right), \quad (1)$$

где E_a – энергия активации, k – постоянная Больцмана и D_0 – предэкспоненциальный множитель. Экспоненциальная зависимость D от температуры является выражением того, что диффузия происходит вследствие термически активированного движения атомов, преодолевающих потенциальный барьер, где энергия активации является характеристикой потенциального барьера в элементарном акте перемещения атома [16]. Предэкспоненциальный множитель D_0 численно равен коэффициенту диффузии, если экспоненциальный множитель равен единице. Эта ситуация возможна либо при снижении энергии активации до нуля, либо при очень большой температуре. Заметим, что в кристаллической среде равенство нулю энергии активации в представлении коэффициента диффузии в виде аррениусовской зависимости (1) невозможно в связи с наличием потенциального барьера между атомами кристаллической решетки.

Методика и материалы

Обширная диффузионная зона была сформирована борированием борсодержащей шихтой образцов из стали 20 в условиях воздействия индукционными токами. Для этого использовали лабораторную установку Agatron G (номинальное напряжение – 230 В / 50 Гц, мощность – 4 кВт). Мощность, а, следовательно, и тепло, выделяемое вихревыми токами, которые циркулируют в образце, зависят от частоты переменного магнитного поля.

Для борирования использовалась обмазывающая паста, приготовленная из шихты с объемным содержанием железа и борной кислоты – 25 % (Fe) + 75 % (H_3BO_3). Насыщение поверхностного слоя бором осуществлялось при температуре 1000 °С в течение 5 минут. Состав пасты для борирования приведен в таблице 1.

Таблица 1. Образцы и состав пасты

Table 1. Samples and paste composition

№ образца	Состав пасты
1	25 % Fe + 75 % H_3BO_3 + NH_4OH + C + Na_2OSiO_3
2	75 % H_3BO_3 + 25 % Fe + NH_4OH + C

Измерения микротвердости выполняли на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке на инден-

тор $P = 100$ г (0,98 Н) и времени выдержки при этой нагрузке 10 сек.

Исследование элементного состава проводилось на растровом электронном микроскопе JEOL JSM – 6390LV с рентгеновским микроанализатором и энергодисперсионным спектрометром в режиме вторичных и обратно рассеянных электронов при ускоряющем напряжении 25 кВ. Низковакуумный режим в модели JSM-6390LV позволяет изучать образцы без специальной пробоподготовки.

Результаты экспериментов

Наличие в поверхностном слое стали 20 обширной диффузионной зоны подтверждается распределением микротвердости по сечению исследованных образцов (рис.1), представляющим собой достаточно плавный переход от насыщенной боридами поверхности к матрице α -фазы железа.

Из рис.1 видно, что распределения микротвердости флуктуирует относительно аппрокси-

мирующей линии, однако может наблюдаться пики микротвердости, обусловленные, очевидно, формированием насыщенных боридных слоев в образцах. Так в образце 1 на глубине диффузионной зоны 360 мкм наблюдается скачек микротвердости до примерно 3400 МПа. То есть монотонное поведение микротвердости в диффузионной зоне может свидетельствовать о формировании областей с высоким содержанием боридных фаз.

Действительно, как следует из представленных данных на рис.2, максимум распределения бора в диффузионной зоне находится примерно на расстоянии около 143 мкм от поверхности образца, что может свидетельствовать о формировании боридного слоя FeB. То есть диффузия бора, адсорбированного на поверхности образца, осуществлялась через слой FeB [11], сформированный на первой стадии борирования.

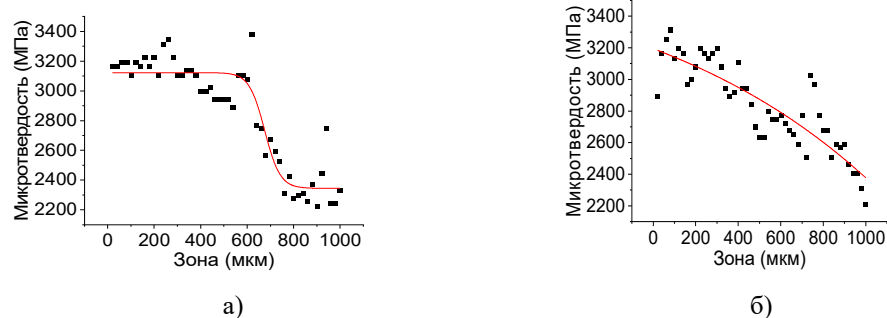


Рис.1. Распределение микротвердости в поверхностном слое образцов: а – образца 1; б – образца 2

Fig.1. Distribution of microhardness in the surface layer of samples: a – sample 1; b – sample 2

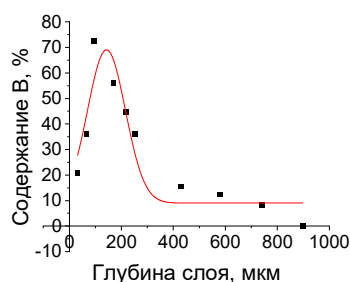


Рис.2. Распределение бора в диффузионной зоне образца 1 (с жидким стеклом)

Fig.2. Boron distribution in the diffusion zone sample 1 (with liquid glass)

Как показано в таблице 2, максимальное содержание бора составило 72,49 мас. % на глубине 142,8 мкм.

Из геометрии диффузионной зоны, представленной на рис.1, можно определить среднее значение коэффициента диффузии бора в стали 20 при температуре 1000 °С и времени выдержки 5 минут. Вычисление коэффициента диффузии было произведено по формуле (2) [17, 18]:

$$D = \frac{h^2}{2\tau}. \quad (2)$$

Значения коэффициентов диффузии, ширины диффузионной зоны приведены в таблице 3. Как следует из данных таблицы 3, средняя величина коэффициента диффузии бора в стали при индукционном борировании на два порядка выше, чем коэффициент диффузии бора при традиционной схеме борирования.

Таблица 2. Содержание бора в диффузионной зоне

Table 2. Boron content in the diffusion zone

№ образца	Состав пасты	Величина диффузионной зоны		Положение максимума распределения бора, мкм	Бор, весовые %
		из элементного анализа, мкм	по распределению микротвердости, мкм		
1	с жидким стеклом	900	900	142,8 ± 9,5	72,49

Таблица 3. Значения коэффициентов диффузии бора и размер сформированной диффузионной зоны

Table 3. The values of the boron diffusion coefficients and the size of the formed diffusion zone

№ образца	h (ширина диффузионной зоны), мкм	D, м ² /с	D, м ² /с [19]	D, м ² /с [20]
1	900	1,35 · 10 ⁻⁹	1,82 · 10 ⁻¹¹	7,85 · 10 ⁻¹¹
2	980	1,6 · 10 ⁻⁹		

Обсуждение

Известно, что при борировании низкоуглеродистых сталей при термической активации химических реакций на поверхности нагретой подложки с реагентами в виде газообразной смеси H₂ и B₂H₆ при температуре 950 °С в течение 1-8 часов, содержание боридов FeB в борированном слое составило 16,23 мас. %, значение коэффициента диффузии бора в борлируемый слой равен 1,82 · 10⁻¹¹ м²/с, а для диффузионной зоны – 1,53 · 10⁻¹⁰ м²/с [19]. При электролизном борировании при температуре 950 °С значение коэффициента диффузии бора в железо $D = 7,85 \cdot 10^{-11}$ м²/с [20]. В нашем случае значения коэффициентов диффузии при формировании обширной диффузионной зоны лежит в пределах 1,35 · 10⁻⁹ – 1,6 · 10⁻⁹ м²/с, что на два порядка выше, чем в известных [19, 20] случаях. Очевидно, что низкие значения коэффициентов диффузии, приведенные в цитируемых источниках [19, 20], обусловлены низкой температурой борирования, равной 950 °С, отсутствием температурного градиента.

Аномально высокий массоперенос бора, очевидно, связан с зернограничными траекториями диффузии. Известно, что преимущественными путями диффузионного массопереноса бора являются границы зерен [21, 22], причем границы зерен в твердых телах представляют собой пути ускоренной диффузии. Скорость диффузии по границе зерен может быть на три и даже четыре порядка выше, чем диффузия по зерну [23]. В этой связи нас будет интересовать структурное состояние границ зерен, обеспечивающее аномально высокий массоперенос атомов бора.

Отметим, что мы не будем учитывать атом-вакансионный механизм, такой же, как в идеальном кристалле, который может осуществляться и по границам зерен, имеющим правильную атом-

ную структуру [24]. Не будем учитывать и трубчатую диффузию по ядрам дислокаций, хотя ускоренное движение атомов вдоль зернограничных дислокаций может происходить также как и вдоль решеточных дислокаций в кристалле [25]. Проведем анализ механизма, связанного со свободным объемом в границах зерен. Как показано в работах [26, 27], вакансии в области границы зерна находится в «распределенном» делокализованном состоянии, создавая свободный объем. При высоких температурах наблюдается активное насыщение границ вакансиями. В результате теплового движения атомов может происходить локализация вакансии с образованием достаточно большого межузельного объема в некоторых точках границы зерна и перескоку туда атома [28]. То есть высокая скорость зернограничной диффузии может быть связана с особенностями атомного строения границ зерен и, прежде всего, с наличием свободного объема, который является интегральной характеристикой, усредненной по всей области границы зерна [29]. Неоднородность зернограничного слоя приводит к тому, что диффузия может идти преимущественно по некоторым каналам, распределенным по всему объему границ зерен. Высокая концентрация вакансий в границах зерен при высоких температурах может привести к экспериментально наблюдаемому появлению жидкой фазы в границах задолго до температуры плавления поликристаллического агрегата [30, 31]. Участки расплава, в первую очередь, локализованы в тройных стыках, в которых наблюдается особенно высокая разупорядоченность атомной структуры. Коэффициент диффузии по границам зерен становятся, по существу, равными коэффициенту диффузии в жидкости в некотором температурном интервале, характерном для конкретного металла или сплава [31].

Следует также отметить, что высокий уровень диффузионной подвижности бора в нашем случае обусловлен действием нескольких факторов, влияющих на диффузионный массоперенос: градиент химического потенциала, активирующий реакцию диффузии; высокая температура борирования (1000 °С), определяющая высокий градиент температур в диффузионном пространстве и высокую кинетическую энергию атомов бора. Таким образом, перенос атомов бора в диффузионной зоне осуществляется в условиях реакционной диффузии, то есть в условиях градиента химического потенциала. Исходя из термодинамики химических реакций между компонентами смеси для борирования, использованной в работе [32], можно утверждать, что процесс образования боридов FeB сопровождался выделением тепла. Тепловой эффект этого химического процесса при нормальных условиях, в результате которого образовался борид FeB, составил $\Delta H_{298}^0 = 43118,4$ кДж/моль, энергия Гиббса $\Delta G_p^0(T) = -38529,04$ кДж/Моль. Это тепло локально может повышать температуру еще более, чем 1000 °С. То есть, кинетическая энергия и подвижность бора еще более возрастают, что повышает диффузионный массоперенос по границам раздела.

Таким образом, аномально высокая диффузионная подвижность бора в α -железе обусловлена действием нескольких факторов, таких как: градиент химического потенциала, высокая кинетическая энергия атомов бора, малые размеры атомов бора. Основным маршрутом бора в стали при борировании является диффузионный массоперенос по границам зерен. Заметим, что коэффициент диффузии, определенный из анализа геометрии диффузионной зоны, является усредненной величиной процесса борирования и в этой связи не характеризует диффузионный процесс на его разных стадиях.

Любой из факторов, перечисленных выше, увеличивает исходную энергию атома, что эквивалентно уменьшению энергии активации диффузии. То есть правильно будет говорить об эффективной энергии активации, которая меньше энергии активации в классическом приближении, описываемом формулой (1). Выражение (1) не учитывает градиент химического потенциала и действие других факторов. Однако, если воспользоваться подходом Журкова [33], то уравнение для коэффициента диффузии можно переписать следующим образом:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{(E_a - A_{\text{внеш.сил}})}{kT}\right). \quad (3)$$

Работа внешних сил приводит к снижению потенциального барьера, а значит к увеличению вероятности диффузионного перемещения атомов

бора. Нельзя исключить, что действие внешних сил может снизить потенциальный барьер до нуля, то есть $E_a - A_{\text{внеш.сил}} \rightarrow 0$, а экспоненциальный множитель стремится к единице.

$$\exp\left(-\frac{(E_a - A_{\text{внеш.сил}})}{kT}\right) \rightarrow 1. \quad (4)$$

Отметим, что в условиях работы внешних сил мы можем говорить не о снижении величины потенциального барьера, а о снижении эффективного значения энергии активации. Равенство единице экспоненциального множителя в уравнении (4) формально означает, что коэффициент диффузии $D = D_0$. Исходя из структуры предэкспоненциального множителя D_0 , следует, что каждое колебание атома сопровождается разрывом связи и перемещением атома в новое положение. То есть процесс массопереноса бора при таких условиях может принять фактически надбарьерный характер и перейти в своеобразный автокаталитический процесс массопереноса [34]. Действительно, при анализе диффузионных процессов в ряде публикаций обсуждаются не атом-вакансионный механизм перемещения атомов, а сильно коррелированные (string-like) кооперативные перемещения одновременно многих атомов в жидком или аморфном состояниях [35, 36]. То есть для неупорядоченного конденсированного состояния кооперативное перемещение атомов наблюдается в широком диапазоне температур, а при высоких – этот механизм становится доминирующим.

Выводы

При борировании образцов из стали 20 в индукционной печи в течение 5 минут при температуре 1000 °С сформирована обширная диффузионная зона размером до 980 мкм, насыщенная боридными железом. Очевидно, формирование обширной диффузионной зоны обусловлено аномально высоким массопереносом бора в матрицу из стали 20. Анализ возможного механизма аномально высокого массопереноса позволил заключить, что в основе его лежит аномально высокий процесс диффузии бора по границам зерен. Высокая скорость зернограницной диффузии связана, прежде всего, с наличием свободного объема, в котором имеются области сжатия и растяжения, и связанные с ними каналы, по которым осуществляется диффузия бора. Кроме того нужно иметь в виду, что диффузия при температурах выше 1000 °С может представлять диффузионный процесс по границам зерен, находящимися в виде своеобразного аморфного (квазизжидкого) состояния, а коэффициент диффузии фактически характеризует массоперенос в жидкой фазе.

Установлено, что усредненный коэффициент диффузии бора при формировании обширной диффузионной зоны находится в пределах

1,35 – 1,6·10⁻⁹ м²/с. Показано, что высокий коэффициент диффузии обусловлен действием нескольких факторов, влияющих на диффузионный массоперенос: градиент химического потенциала, активирующий реакционную диффузию; высокая температура борирования (1000 °С), определяющая высокую кинетическую энергию атомов бора и их высокую подвижность в диффузионном пространстве. Показано, что процесс образования боридов FeB сопровождался выделением тепла, которое локально может повышать температуру еще более, чем 1000 °С, то есть приводит к локальному возрастанию кинетической энергии и подвижности бора.

Формально действие этих факторов сказывается на величине эффективного порога активации (эффективной энергии активации), который может снижаться в этих условиях вплоть до нуля. В этих условиях процесс диффузии представляет собой надбарьерный массоперенос атомов бора, представляющий собой своеобразный автокаталитический процесс.

Список литературы

1. Бровер А.В. Роль массопереноса в структурообразовании поверхностных слоев материалов при экстремальном тепловом воздействии // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2021. № 2. С. 72–78.
2. Вершинин Г.А., Геринг Г.И., Субочева Т.В. Волновой механизм массопереноса в металлических системах при многократном импульсном воздействии // Вестник Омского университета. 2001. № 4. С. 22–24.
3. Ворошнин Л.Г., Пантелеенко Ф.И., Константинов В.М. Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО. Минск: ФТИ; Новополоцк: ПГУ, 2001. 148 с.
4. Константинов В.М., Хина Б.Б. Об ускорении процессов ХТО в подвижных порошковых смесях // Металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов. 2015. Вып. 36. С. 262–272.
5. Скаков Ю.А. Высокоэнергетическая холодная пластическая деформация, диффузия и механохимический синтез // Металловедение и термическая обработка металлов. 2004. № 4. С. 3–12.
6. Штремель М.А. В какую сторону идет диффузия? // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2004. – № 4. – С. 12–13.
7. Криштал М.А. Механизм диффузии в железных сплавах. М.: Металлургия, 1972. 400 с.
8. Крицкий В.Г., Родионов Ю.А., Березина И.Г., Гаврилов А.В. Особенности массопереноса и формирования отложений в активной зоне АЭС с ВВЭР без высокотемпературных фильтров // В сб. трудов VIII МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». Подольск, 2013. С. 1–20.
9. Хохлова Ю.А., Федорчук В.Е., Хохлов М.А. Особенности межзеренного массопереноса галлия в алюминиевом сплаве при твердофазной активации соединяемых поверхностей // Автоматическая сварка. 2011. № 3. С. 19–22.
10. Винтайкин Б.Е., Камынин А.В., Смирнов А.Е., Терезанова К.В., Черенкова С.А. Особенности формирования поверхностных фаз при химико-термической обработке сплавов на основе железа // Вестник Московского государственного технического университета им. НЭ Баумана. Серия «Естественные науки». 2018. № 2(77). С. 73–81.
11. Кеддам М., Кулька М., Макух Н. Моделирование кинетики роста поверхностного боридного слоя в процессе диффузионного отжига // Физика металлов и металловедение. 2018. Т. 119, № 10. С. 983–991.
12. Семенченко М. В., Дашкевич В. Г. Исследование структурообразования при получении и наплавке диффузионно-легированной стальной проволоки // Металлургия: Республ. межведом, сб. науч. тр. Вып. 31. Минск: БНТУ, 2008. С. 260.
13. Готтштайн Г. Физико-химические основы материаловедения. Москва: БИНОМ; Лаборатория знаний, 2011. 400 с.
14. Мерер Х. Диффузия в твердых телах. Москва: Интеллект, 2011. 536 с.
15. Бокштейн Б.С., Ярославцев А.Б. Диффузия атомов и ионов в твердых телах. Москва: МИСиС, 2005. 362 с.
16. Лобанов М.Л., Зорина М.А. Методы определения коэффициентов диффузии. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. 100 с.
17. Урусов В.С. Теоретическая кристаллохимия. М.: Изд-во МГУ, 1987. 275 с.
18. Ворошнин Л.Г. Многокомпонентные диффузионные покрытия. Минск: Наука и техника, 1981. 296 с.
19. ASM International 1991, ASM Handbook: Heat Treatment, Vol. 4, American Society for Metals Park, Ohio. 2173 p.
20. Борсяков А.С. Научно-практические основы формирования диффузионных борсодержащих покрытий на металлах триады железа и их сплавах: дис. ... докт. техн. наук. Воронеж, 2000. 396 с.
21. Ушеренко С.М., Дашкевич В.Г., Ушеренко Ю.С. Активация диффузии при формировании на поверхности стальных деталей боридных слоев // Литье и металлургия. 2021. № 2. С. 94–99.
22. Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Иванов С.Г., Власова О.А., Гармаева И.А., Кошелева Е.А., Гурьев М.А. Новые методы диффузионного термодиффузионного упрочнения поверхности стальных изделий бором совместно с титаном и хромом // Успехи современного естествознания. 2007. № 10. С. 84–85.
23. Зайт В. Диффузия в металлах. М.: Издательство иностранной литературы, 1958. 381 с.
24. Демьянов Б.Ф., Векман А.В., Кустов С.Л., Старостенков М.Д. Атомная структура равновес-

ных границ зерен // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2004. Т. 1, № 1. С. 86–91.

25. Бокштейн Б.С., Копецкий Ч.В., Швиндлерман Л.С. Термодинамика и кинетика границ зерен. М., 1986. 224 с.

26. Клоцман С.М. Примесные состояния и диффузия в границах зерен металлов // *Успехи физических наук*. 1990. Т. 160, Вып. 1. С. 99–139.

27. Демьянов Б.Ф., Грахов Е.Л., Старостенков М.Д. Взаимодействие вакансий со специальными границами зерен в алюминии // *Физика металлов и материаловедение*. 1999. Т. 88, № 3. С. 37–42.

28. Dem'yanov B.F., Kustov S.L., Starostenkov M.D. Computer simulation of the interaction of vacancies with the special tilt grain boundaries // *Materials Science and Engineering A*. 2004. V. 387–389. P. 738–742.

29. Демьянов Б.Ф., Драгунов А.С., Векман А.В. Механизмы самодиффузии по границам зерен в алюминии // *Известия Алтайского государственного университета*. 2010. № 1–2. С. 158–161.

30. Fan R., Magargee J., Hu P., Cao J. Influence of grain size and grain boundaries on the thermal and mechanical behavior of 70/30 brass under electrically-assisted deformation // *Materials Science & Engineering A*. 2013. V. 574. P. 218–225.

31. Straumal A.B., Yardley V.A., Straumal B.B., Rodin A.O. Influence of the grain boundary character on the temperature of transition to complete wetting in the Cu–In system // *J. Mater. Sci*. 2015. V. 50. P. 4762–4771.

32. Шевчук Е.П., Плотников В.А., Макаров С.В. Особенности формирования диффузионной зоны, полученной на стали 20 борированием в индукционной печи // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2022. Т. 65, № 2. С. 98–105.

33. Журков С.Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел // *Вестник АН СССР*. № 3. 1968. С. 46–52.

34. Денисов Е.Т. Кинетика гомогенных химических реакций. Москва: Высш. школа, 1978. 367 с.

35. Vogel M., Glotzer S. Heterogeneous Dynamics and Dynamic Facilitation in a Model of Viscous Silica // *Phys. Rev. Lett*. 2004. V. 92. P. 255901.

36. Алексеенко В.В. О механизме диффузии атомов в конденсированных средах // *ФТТ*. 2008. Т. 50, № 10. С. 1775–1778.

Информация об авторах

Е. П. Шевчук – старший преподаватель кафедры физики и технологий Восточно-Казахстанского университета имени Сарсена Аманжолова.

В. А. Плотников – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры общей и экспериментальной физики Алтайского государственного университета.

С. В. Макаров – доктор физико-математических наук, директор ИЦТЭФ и ведущий кафедрой общей и экспериментальной физики Алтайского государственного университета.

References

1. Brover, A. V. (2021). The role of mass transfer in the structure formation of surface layers of materials under extreme thermal exposure. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, (2), 72–78.

2. Vershinin, G. A., Goering, G. I. & Subocheva, T. V. (2001). Wave mechanism of mass transfer in metal systems under multiple pulsed action. *Bulletin of Omsk University*, (4), 22–24.

3. Voroshnin, L. G. Panteleenko, F. I. & Konstantinov, V. M. (2001). Theory and practice of obtaining protective coatings using CTO. Minsk: FTI; Novopolotsk: PSU. P. 148.

4. Konstantinov, V. M. & Hina, B. B. (2015). On the acceleration of CTO processes in mobile powder mixtures. *Metallurgy: Republican interdepartmental collection of scientific papers*, (36), 262–272.

5. Skakov, Yu. A. (2004). High-energy cold plastic deformation, diffusion and mechanochemical synthesis. *Metallurgy and heat treatment of metals*, (4), 3–12.

6. Stremel, M. A. (2004). In which direction is the diffusion going? *Metallurgy and heat treatment of metals*, (4), 12–13.

7. Krishtal, M. A. (1972). Mechanism of diffusion in iron alloys. M.: Metallurgy. P. 400.

8. Kritsky, V. G., Rodionov, Yu. A., Berezina, I. G. & Gavrilov, A. V. (2013). Features of mass transfer and sediment formation in the core of a nuclear power plant with VVER without high-temperature filters. *V sb. trudov VIII MNTK «Obespecheniye bezopasnosti AES s VVER»*. Podol'sk, 1–20.

9. Khokhlova, Yu. A., Fedorchuk, V. E. & Khokhlov, M. A. (2011). Features of intergranular mass transfer of gallium in an aluminum alloy with solid-phase activation of the connected surfaces. *Automatic welding*, (3), 19–22.

10. Vintaykin, B. E., Kamynin, A. V., Smirnov, A. E., Terezanova, K. V. & Cherenkova, S. A. (2018). Features of the formation of surface phases during chemical-thermal treatment of iron-based alloys. *Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. The series «Natural Sciences»*, 77(2), 73–81.

11. Keddani, M., Kulka, M. & Makukh, N. (2018). Modeling of the kinetics of the growth of the surface boride layer in the process of diffusion annealing. *Physics of metals and metallurgy*, 119(10), 983–991.

12. Semenchenko, M. V. & Dashkevich, V. G. (2008). Investigation of structure formation during the production and surfacing of diffusion-alloyed steel wire. *Metallurgy: Republic of interdepartmen-*

tal, collection of scientific works. Is. 31. Minsk: BNTU, 260.

13. Gottstein, G. (2011). Physico-chemical fundamentals of materials science. Moscow: BINOM; Laboratory of Knowledge. P. 400.

14. Merer, H. (2011). Diffusion in solids. Moscow: Intellect. P. 536.

15. Bokstein, B. S. & Yaroslavtsev, A. B. (2005). Diffusion of atoms and ions in solids. Moscow: MISIS. P. 362.

16. Lobanov, M. L. & Zorina, M. A. (2017). Methods for determining diffusion coefficients. Yekaterinburg : Ural Publishing House University. P. 100.

17. Urusov, V. S. (1987). Theoretical crystal chemistry, Moscow: Publishing House of Moscow State University. P. 275.

18. Voroshnin, L. G. (1981). Multicomponent diffusion coatings. Minsk: Science and Technology. P. 296.

19. (1991). ASM International 1991, ASM Handbook: Heat Treatment, Vol. 4, American Society for Metals Park, Ohio. P. 2173.

20. Borsyakov, A. S. (2000). Nauchno-prakticheskiye osnovy formirovaniya diffuzionnykh borsoderzhashchikh pokrytiy na metallakh triady zheleza i ikh splavakh: dis. ... dokt. tekhn. nauk. Voronezh. P. 396.

21. Usherenko, S. M., Dashkevich, V. G. & Usherenko, Yu. S. (2021). Activation of diffusion during the formation of boride layers on the surface of steel parts. *Casting and metallurgy*, (2), 94–99.

22. Guryev, A. M., Lygdenov, B. D., Ivanov, S. G., Vlasova, O. A., Garmaeva, I. A., Kosheleva, E. A. & Guryev, M. A. (2007). New methods of diffusion thermocyclic hardening of the surface of steel products with boron together with titanium and chromium. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya*, (10), 84–85.

23. Zayt, V. (1958). Diffusion in metals. Moscow: Publishing House of Foreign Literature. P. 381.

24. Demyanov, B. F., Vekman, A. V., Kustov, S. L. & Starostenkov, M. D. (2004). Atomic structure of equilibrium grain boundaries. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 1(1), 86–91.

25. Bokstein, B. S., Kopetsky, Ch. V. & Schwindlerman, L. S. (1986). Thermodynamics and kinetics of grain boundaries. Moscow. P. 224.

26. Klotsman, S. M. (1990). Impurity states and diffusion in the boundaries of metal grains. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 160(1), 99–139.

27. Demyanov, B. F., Grakhov, E. L. & Starostenkov, M. D. (1999). Interaction of vacancies with special grain boundaries in aluminum. *Fizika metallov i metallovedeniye*, 88(3), 37–42.

28. Demyanov, B. F., Kustov, S. L. & Starostenkov, M. D. (2004). Computer simulation of the interaction of vacancies with the special tilt grain boundaries. *Materials Science and Engineering A*, 387–389, 738–742.

29. Demyanov, B. F., Dragunov, A. S. & Vekman, A. V. (2010). Mechanisms of self-diffusion along grain boundaries in aluminum. *Proceedings of the Altai State University*, (1–2), 158–161.

30. Fan, R., Magargee, J., Hu, P. & Cao, J. (2013). Influence of grain size and grain boundaries on the thermal and mechanical behavior of 70/30 brass under electrically-assisted deformation. *Materials Science & Engineering A*, 574, 218–225.

31. Straumal, A. B., Yardley, V. A., Straumal, B. B. & Rodin, A. O. (2015). Influence of the grain boundary character on the temperature of transition to complete wetting in the Cu–In system. *J Mater Sci.*, 50, 4762–4771.

32. Shevchuk, E. P., Plotnikov, V. A. & Makarov, S. V. (2022). Features of the formation of the diffusion zone obtained on steel 20 by boration in an induction furnace. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya Metallurgiya*, 65(2), 98–105.

33. Zhurkov, S. N. (1968). Kinetic concept of strength of solids. *Vestnik AN SSSR*, (3), 46–52.

34. Denisov, E. T. (1978). Kinetics of homogeneous chemical reactions. Moscow: Higher School. P. 367.

35. Vogel, M. & Glotzer, S. (2004). Heterogeneous Dynamics and Dynamic Facilitation in a Model of Viscous Silica. *Phys. Rev. Lett.*, 92, 255901.

36. Alekseenko, V. V. (2008). On the mechanism of diffusion of atoms in condensed media. *FTT*, 50(10), 1775–1778.

Information about the authors

E. P. Shevchuk – Senior Lecturer of the Department of Physics and Technology of Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University.

V. A. Plotnikov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Associate Professor of the Department of General and Experimental Physics Altai State University.

S. V. Makarov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of General and Experimental Physics of Altai State University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 19.08.2023; одобрена после рецензирования 28.07.2023; принята к публикации 07.09.2023.

The article was received by the editorial board on 19 Aug. 23; approved after reviewing 28 Aug. 23; accepted for publication 07 Sept. 23.