

*К.К. Аунг, С.А. Ивлеев*

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

## КИНЕТИКА РАСТВОРЕНИЯ АЗОТА И КИСЛОРОДА В ЛЕГИРОВАННЫХ РАСПЛАВАХ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА В ОТСУТСТВИЕ КОНВЕКЦИИ ЖИДКОЙ ФАЗЫ

**Аннотация.** Капиллярным методом исследована кинетика совместной абсорбции азота и кислорода из газовой фазы расплавами на основе железа. Для определения по экспериментальным данным численных значений кинетических характеристик процесса абсорбции (коэффициента диффузии и константы скорости поверхностной реакции) использовано решение уравнения диффузии при краевых условиях III рода. Установлена зависимость коэффициентов диффузии от химического состава расплава, а также зависимость константы скорости химической реакции процесса абсорбции азота из газовой фазы от состава межфазной поверхности.

**Ключевые слова:** система газ–металл, легированные расплавы железа, абсорбция, азот, кислород, кинетический, диффузионный.

## NITROGEN AND OXYGEN DISSOLUTION KINETICS IN IRON-BASED ALLOYED MELTS AT LIQUID PHASE CONVECTION ABSENCE

**Abstract.** Kinetic absorption of nitrogen and oxygen was simultaneous investigated in liquid iron alloys with capillary method from gas phase. For determination of characteristic process of kinetic absorption (diffusion coefficient and rate constant of surface reaction) was be used in diffusion with boundary layer third equation by experimental computation of given data. Dependence of diffusion coefficient on chemical composition was determined. Dependence of rate constant of absorption of nitrogen from gas phase in chemical reaction process on interfacial surface compound was determined.

**Keywords:** gas-metal system, liquid iron alloys, absorption, nitrogen, oxygen, kinetic, diffusion.

Анализ имеющихся экспериментальных данных по кинетике абсорбции азота расплавами на основе железа показал, что наиболее обоснованные результаты удастся получить при постановке задачи абсорбции в общем виде, с учетом реакций, идущих на поверхности расплава [1]. Там же было установлено, что при прочих равных условиях на скорость растворения азота в железе негативное влияние оказывает кислород, всегда в том или ином количестве содержащийся в газовой фазе. С учетом сказанного отчетливее проявляется роль химического состава расплава как одного из факторов, определяющих кинетику абсорбции не только азота, но и кислорода.

Кинетику одновременной абсорбции азота и кислорода из газовой фазы расплавами железа, легированными хромом и никелем, при температуре 1600 °С исследовали капиллярным методом в диффузионной ячейке, смонтированной на базе печи сопротивления с графитовым нагревателем [2]. В опытах использовали проточную атмосферу из спектрально чистой газовой смеси N<sub>2</sub> с 1 % об. Н<sub>2</sub>. Расход газа составлял 8,3·10<sup>-6</sup> м<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup> (0,5 ± 0,01 л·мин<sup>-1</sup>). Среднее парциальное давление кислорода в газовой фазе, определенное по экспериментальным данным, составляло 7·10<sup>-6</sup> Па. Для опытов использовали «чистое» железо, выплавленное без добавок легирующих элементов, а также сплавы железа с различным содержанием, % (по массе): хрома (2; 5) и никеля (10; 20), приготовленные из карбонильного

железа марки В-3 в вакуумной индукционной печи с магнетитовым тиглем. Состав сплавов определяли из условий невозможности образования оксидной фазы, прежде всего, на поверхности расплава.

Для описания одномерной диффузии в полубесконечной неподвижной среде в нестационарном режиме использовали решение уравнения диффузии с нелинейными краевыми условиями третьего рода [3].

Установили, что при постоянной температуре (1600 °С) основным фактором, влияющим на величину коэффициента диффузии азота и кислорода в легированных расплавах на основе железа, является их химический состав, для удобства выраженный в виде соответствующего коэффициента активности, рассчитанного по стандартной методике. На рис. 1, 2 представлены результаты определения коэффициентов диффузии азота и кислорода по полученным в данной работе и литературным [4] экспериментальным данным. Разброс значений укладывается в пределы точности определения коэффициента диффузии. Совместная обработка представленных результатов позволила вывести общие для широкого спектра сплавов эмпирические уравнения зависимости коэффициентов диффузии азота и кислорода от химического состава расплава:

$$D_N = (1,07 \pm 0,17) \cdot 10^{-5} e^{(2,06 \pm 0,18)f_N}, R = 0,87; \quad (1)$$

$$D_O = (5,45 \pm 0,39) \cdot 10^{-6} e^{(3,19 \pm 0,47)f_O}, R = 0,78, \quad (2)$$

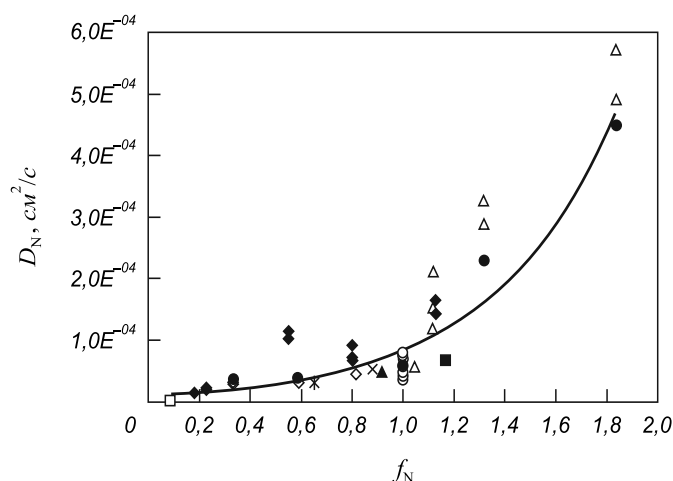


Рис. 1. Зависимость коэффициента диффузии азота от состава расплава при 1600 °C:

1 – настоящая работа; 2 – 10 – литературные данные [4]:  
2 – Fe; 3 – Fe-Si; 4 – Fe-Mn; 5 – Fe-Al; 6 – Fe-V; 7 – Fe-Ti;  
8 – Fe-Cr; 9 – Fe-Ni; 10 – Fe-Cr-Ni  
1 – ●; 2 – ○; 3 – ■; 4 – ▲; 5 – ×; 6 – ✱; 7 – □; 8 – ◇; 9 – △; 10 – ◆

где  $D_N$ ,  $D_O$  – коэффициент диффузии соответственно азота и кислорода в расплаве данного состава,  $\text{cm}^2 \cdot \text{c}^{-1}$ ;  $f_N$ ,  $f_O$  – коэффициент активности соответственно азота и кислорода в расплаве данного состава.

Установили, что константа скорости реакции азота на поверхности легированного расплава железа ( $k_N$ ) зависит от состава межфазной поверхности (рис. 3). Расчет состава границы раздела фаз [5] сделали в предположении о достижении равновесия между приповерхностным слоем и поверхностью жидкого металла в условиях диффузионного эксперимента. Зависимость  $k_N$  от содержания поверхностно-активных примесей, а также иных компонентов расплава, влияющих на термодинамическую активность азота, имеет вид:

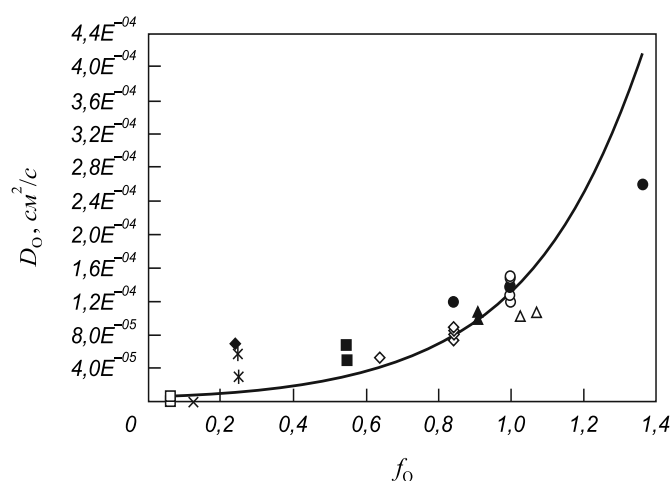


Рис. 2. Зависимость коэффициента диффузии кислорода от состава расплава при 1600 °C:  
(обозначения см. на рис. 1)

$$k_N = 3,27 \cdot 10^{-3} (f_N^w)^{(-0,94 \pm 0,63)} (N_O^w + 0,5 N_S^w)^{(-3,85 \pm 0,79)}, R = 0,95, \quad (3)$$

где  $f_N^w$  – коэффициент активности азота, определенный с учетом состава поверхности расплава;  $N_O^w$ ,  $N_S^w$  – содержание соответственно кислорода и серы на поверхности расплава, выраженное в мольных долях.

В отсутствие надежной информации о кинетике адсорбционно-кинетической стадии процесса абсорбции азота неперемешиваемыми легированными расплавами достоверность данных по  $k_N$  и полученной зависимости может быть подтверждена совпадением (в пределах точности определения) значений  $D_N$  и  $D_O$ , полученных в настоящей работе, с наиболее надежными литературными данными.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ивлев С.А. Исследование взаимодействия азота с расплавами на основе железа в системах с различной окисленностью и разработка методов регулирования его содержания: Дисс. ... канд. техн. наук. – М.: МИСиС, 2005. – 137 с.
2. Ивлев С.А., Аунг К.К. Лабораторная установка и методика исследования кинетики массообменных процессов в системе газ – жидкий металл // Сб. тр. Междунар. научно-практич. конф. «Современные направления теоретических и прикладных исследований 2012». Вып. 1. Т. 7. – Одесса: Купrienko, 2012. С. 36 – 43.
3. Ивлев С.А., Аунг К.К., Свяжин А.Г. Исследование кинетики абсорбции азота расплавами железа с использованием двухстадийной модели массообмена. Перспективы развития техники и технологий в XXI веке. Под ред. С.В. Купrienko – Одесса: Купrienko, 2012. – 177 с.
4. Лепинских Б.М., Кайбичев А.В., Савельев Ю.А. Диффузия элементов в жидких металлах группы железа. – М.: Наука, 1974. – 191 с.
5. Григорян В.А., Белянчиков Л.Н., Стомахин А.Я. Теоретические основы электросталеплавильных процессов. – М.: Металлургия, 1979. – 256 с.

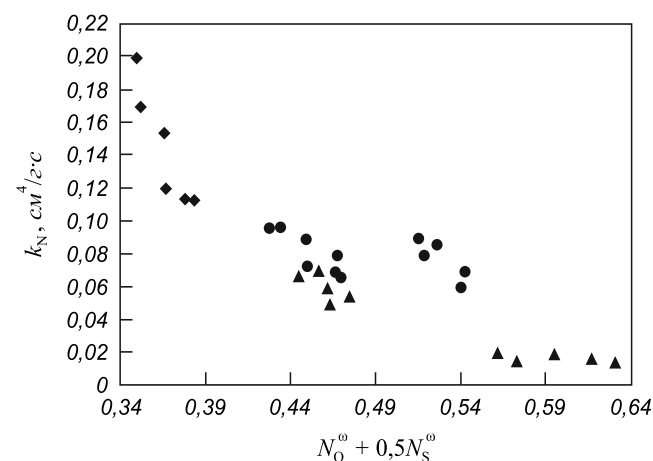


Рис. 3. Зависимость константы скорости поверхностной реакции растворения азота в неперемешиваемых расплавах на основе железа при 1600 °C от содержания кислорода и серы на межфазной поверхности, выраженного в мольных долях:

1 – Fe; 2 – Fe-Cr; 3 – Fe-Ni  
1 – ◆; 2 – ●; 3 – ▲