

УДК 539.219.3 + 519.237.5

НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ ДИФФУЗИИ ЖЕЛЕЗА
В АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЯХ**Беломытцев М.Ю.¹**, д.т.н., профессор кафедры металловедения
и физики прочности (myubelom@yandex.ru)**Образцов С.М.²**, д. ф.-м. н.**Соловьев В.А.²**, ст. научный сотрудник¹Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)²Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского (ФГУП «ГНЦ РФ – ФЭИ»)
(249033, Россия, Калужская обл., Обнинск, пл. Бондаренко, 1)

Аннотация. Скорость диффузии железа в аустенитных сталях является одним из основных факторов, определяющих распухание конструкционного материала узлов и деталей активной зоны быстрого ядерного реактора. Поскольку коэффициент диффузии железа существенно зависит от химического состава сталей и сплавов на основе железа, то в настоящее время задача его моделирования является весьма актуальной. Из литературных источников сформирован массив экспериментальных данных о диффузии в сталях и сплавах, содержащих различные комбинации C, Si, Cr, Ni, Mn, Mo, Nb, Ti, V, W, Al, Pb, Bi, Sn, Sb в диапазоне температур 1023 – 1666 К. Для корректной аппроксимации диффузии железа использовалась искусственная нейронная сеть в виде четырехслойного перцептрона с числом узлов по слоям 49:10:17:1. Разработанная нейросетевая модель тестировалась на независимых экспериментальных данных и показала удовлетворительные статистические характеристики, что говорит о ее адекватности. Расчеты коэффициента диффузии железа в чистом железе и сталях ЧС68 и ЭК164 показывают более высокий коэффициент диффузии в сталях, чем в чистом железе. При помощи модели рассчитаны коэффициенты диффузии оболочек двух тепловыделяющих элементов, изготовленных из стали ЭК164-ИД х.д., облученных в реакторе на быстрых нейтронах БН-600 при различных температурах и повреждающих дозах в предположении их максимального и минимального легирования. Расчеты показали, что в стали, содержащей минимальное количество химических элементов, скорость диффузии ниже, чем в стали с максимальным легированием, а распухание обратно пропорционально коэффициенту диффузии железа в стали ЭК164-ИД х.д. На основе этих данных получено линейное в логарифмах регрессионное уравнение распухания стали S в зависимости от температуры T , повреждающей дозы D и коэффициента диффузии железа D_{Fe} : $\ln S = -340,511 + 0,036 \ln D + 42,64 \ln T - 1,558 \ln D_{Fe}$, где D измеряется в сна; T – в градусах Цельсия; D_{Fe} – в м²/с; S – в %. Диапазон изменения температуры 435 – 515 °С, повреждающей дозы 57 – 76 сна.

Ключевые слова: аустенитная сталь, диффузия железа, искусственная нейронная сеть, распухание, регрессионная модель.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-11-891-896

Для прогнозирования радиационного распухания в реакторных сталях следует оценить температурную зависимость коэффициента диффузии железа D_{Fe} , влияющего на образование и рост пор [1, 2]. В работе [3] показано, что энергия активации самодиффузии железа в аустените существенно зависит от химического состава. Поскольку диффузия железа D_{Fe} в сталях определяется многими факторами, то для моделирования целесообразно привлечь методы нейросетевого анализа [4], которые в настоящее время активно используются для решения материаловедческих задач [5, 6].

Разработка и тестирование нейросетевой модели диффузии железа в аустенитных сталях и сплавах на основе железа являлись целями настоящей работы.

Массив экспериментальных данных имел сведения о содержании в исследуемых образцах следующих химических элементов: C, Si, Cr, Ni, Mn, Mo, Nb, Ti, V, W, Al, Pb, Bi, Sn, Sb, Fe [7 – 14]. Температура измерения коэффициента диффузии изменялась в диапазоне 1023 – 1666 К (197 наблюдений). Из-за ограниченности

литературных данных выборка не содержала микроструктурные характеристики образцов, влияющие на скорость диффузии [15].

Для вычисления D_{Fe}^P в случае легирования сплава химическим элементом, не входящим в приведенный выше список, каждой составляющей сплава был поставлен в соответствие его заряд и атомная масса. Таким образом, число факторов составило 49, откликом служила величина $\ln D_{Fe}^P$. В качестве модели использовался четырехслойный перцептрон с числом узлов по слоям 49:10:17:1. На [рис. 1, а](#) показана взаимозависимость экспериментальных и расчетных значений коэффициента диффузии.

Коэффициент корреляции между расчетными $\ln D_{Fe}^P$ и экспериментальными $\ln D_{Fe}$ значениями коэффициента диффузии равен 0,996, что говорит о существовании между этими величинами тесной линейной связи. На [рис. 1, б](#) представлен полигон распределения относительной ошибки $\varepsilon = 100 \left(\frac{\ln D_{Fe} - \ln D_{Fe}^P}{\ln D_{Fe}^P} \right)$.

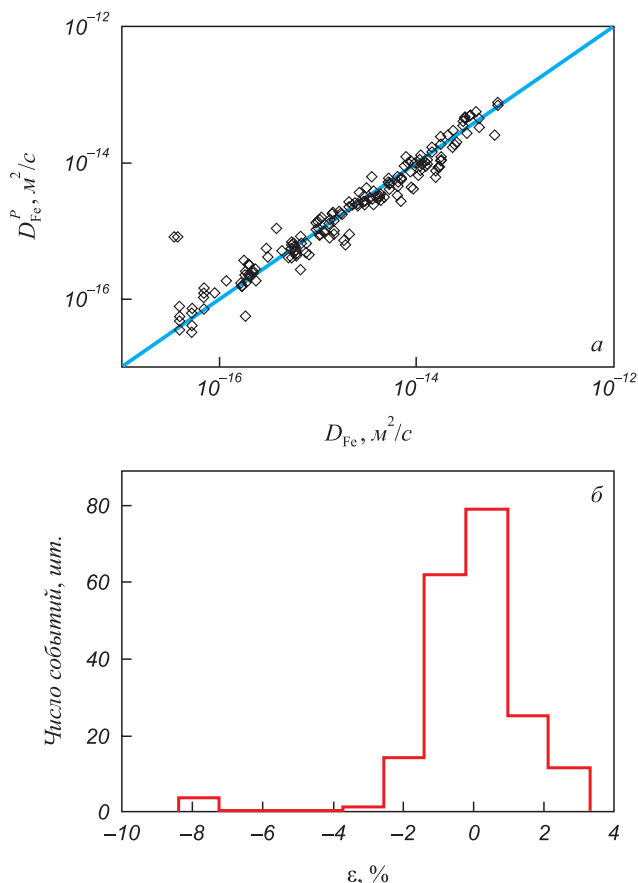


Рис. 1. Зависимость расчетных D_{Fe}^p и экспериментальных D_{Fe}^m значений коэффициента диффузии (а) и полигон распределения относительной ошибки ε (б)

Fig. 1. Dependence of calculated D_{Fe}^p and experimental D_{Fe}^m values of diffusion coefficient (a) and range of relative mistake ε distribution (b)

Из рис. 1, б видно, что в подавляющем числе случаев ε сосредоточена в диапазоне, не превышающем ± 4 %.

Тестирование модели проводилось на экспериментальных данных, не использовавшихся для обучения искусственной нейронной сети. В качестве статистических критериев корректности модели использовались

коэффициент корреляции и средние значения модуля относительного отклонения $\bar{\varepsilon} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |\varepsilon_i|$, где m – число наблюдений.

В работе [13] приведены результаты измерения D_{Fe} в железе, содержащем, % (по массе): 0,04 С и 0,05 Мп. На рис. 2, а показаны экспериментальные и расчетные значения D_{Fe} в ГЦК решетке.

Несмотря на то, что экспериментальные значения D_{Fe} лежат выше расчетных, статистические характеристики имеют высокие значения: коэффициент корреляции составляет 0,997, $\bar{\varepsilon} = 2,7$ %.

На рис. 2, б маркерами показаны значения D_{Fe} , полученные в работе [15] при исследовании диффузии в сплаве, в состав которого входили углерод и никель (0,45 и 19,8 % (по массе) соответственно) и расчетная прямая. Коэффициент корреляции равен 0,997, $\bar{\varepsilon} = 2,5$ %.

В работе [16] изучалась диффузия железа в сплавах, которые содержали азот, не представленный в обучающей выборке. В табл. 1 приведены химические составы двух исследованных сплавов, а на рис. 2, в – результаты расчетов с использованием нейросетевой модели.

Для расчета D_{Fe} заменим во входных данных заряд, массу и содержание свинца аналогичными величинами для азота. Из рис. 2, в видно, что экспериментальные и рассчитанные значения D_{Fe} в сплаве 2 выше, чем в сплаве 1.

Для сплава 1 коэффициент корреляции равен 0,990, $\bar{\varepsilon} = 1,4$ %, для сплава 2 – 0,997 и 1,3 % соответственно.

Тестирование модели показывает, что коэффициент корреляции имеет высокое значение, а величина $\bar{\varepsilon}$ не превышает 3 % на всех контрольных выборках. Следовательно разработанная модель адекватно оценивает тенденции изменения D_{Fe} в разных сплавах.

Для иллюстрации на рис. 3 представлены результаты расчета D_{Fe} в чистом железе и аустенитных реакторных сталях ЧС68 и ЭК164 [17, 18].

Из рис. 3 видно, что коэффициент диффузии в стали выше, чем в чистом железе, что совпадает с экспери-

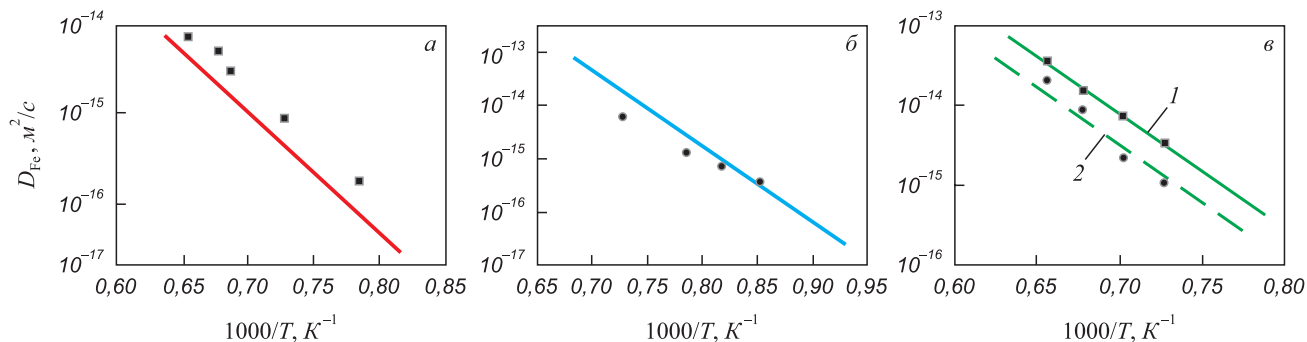


Рис. 2. Рассчитанные по нейросетевой модели (прямые) и экспериментальные (маркеры) значения D_{Fe} , полученные в работах [13] (а), [15] (б), [16] (прямые: штриховая – сплав 1, сплошная – сплав 2; маркеры: ■ – сплав 1, ● – сплав 2) (в)

Fig. 2. Calculated on neural network model (direct) and experimental (markers) of value of D_{Fe} determined in the works: [13] (a), [15] (б), [16] (straight lines: primed – an alloy 1, continuous – an alloy 2; markers: ■ – an alloy 1, ● – an alloy 2) (в)

Таблица 1

Химический состав сплавов, % (по массе) [16]

Table 1. Chemical composition of the alloys, % (mass.) [16]

Номер сплава	C	Si	Cr	Mn	N
1	0,03	0,06	7,90	0,21	0,22
2	0,17	0,18	3,98	0,24	0,15

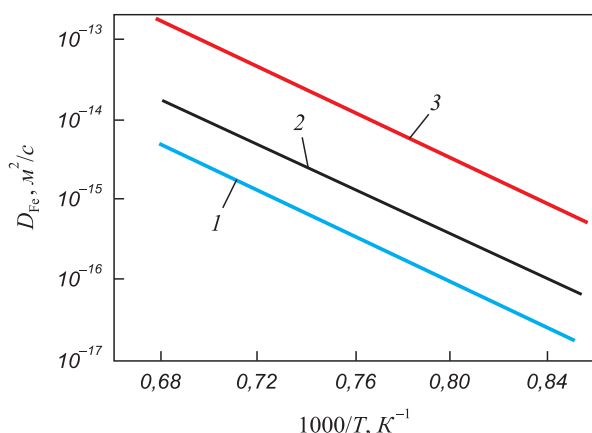


Рис. 3. Рассчитанные по нейросетевой модели коэффициенты диффузии для чистого железа (1), стали ЧС68 (2), стали ЭК164 (3)

Fig. 3. Calculated on neural network model diffusion coefficients for: pure iron (1), steel ChS68 (2), steel EK164 (3)

ментальным выводом об ускорении диффузии при легировании железа [9].

Разработанная модель использована для анализа экспериментальных данных послереакторного контроля отработанных тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов).

В работах [19, 20] приведены данные по распуханию оболочек двух ТВЭЛов: № 9 и 50, изготовленных из стали ЭК164-ИД х.д. состава, % (по массе): 0,05 – 0,09 С; 15,0 – 16,5 Cr; 18,0 – 19,5 Ni; 1,5 – 2,0 Mn; 2,0 – 3,0 Mo; 0,3 – 0,6 Si; 0,1 – 0,4 Nb; 0,25 – 0,45 Ti + V, В, Се после облучения в реакторе БН-600. В табл. 2 представлены

Таблица 2

Условия облучения и распухание ТВЭЛов [19]

Table 2. Conditions for irradiation and swelling of fuel elements [19]

T, °C	Номер ТВЭЛа	D, сна	S, %
435 – 445	9	61	4,3
	50	57	3,2
480 – 490	9	74	4,8
	50	73	2,7
505 – 515	9	76	4,5
	50	76	2,4

диапазоны температуры облучения T , повреждающая доза D и распухание ТВЭЛов S .

Из табл. 2 видно, что материал оболочки ТВЭЛа № 9 имеет более высокое распухание по сравнению с ТВЭЛом № 50 при одинаковых эксплуатационных режимах. Резонно предположить, что ТВЭЛные трубки изготовлены по одной технологии, тогда разница в радиационных повреждениях может быть вызвана количественным различием в содержании химических элементов в рамках допустимого варьирования химического состава стали ЭК164. Разрешенный диапазон изменения содержания является весьма существенным, например, допускается содержание кремния от 0,3 до 0,6 % (по массе), а титана в пределах 0,25 – 0,45 % (по массе) [17].

Заметим, что в состав стали ЭК164 включены бор и церий, не участвовавшие в процессе облучения искусственной нейронной сети. Подставляя параметры всех элементов во входной набор данных, проведем расчет при минимальном (min) и максимальном (max) содержании легирующих элементов стали ЭК164 [19], взяв средние значения температуры из табл. 2. Результаты расчета приведены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что в стали, содержащей минимальное количество легирующих добавок, скорость диффузии ниже, чем в стали с максимальным легированием, и это влечет за собой увеличение степени распухания. Отнесем минимальный химический состав к ТВЭЛу № 9, а максимальный – к ТВЭЛу № 50 и используем данные табл. 2, 3 для расчета коэффициентов регрессионного уравнения

$$\ln S = -340,511 + 0,036 \ln D + 42,64 \ln T - 1,558 \ln D_{\text{Fe}}, \quad (1)$$

где D измеряется в сна; T – в градусах Цельсия; D_{Fe} – в м²/с; S – в %.

«Обратная проверка», а именно попытка сопоставления более высоких значений D_{Fe} с величинами распухания ТВЭЛа № 9, а низких – ТВЭЛа № 50, приводит к отрицательному коэффициенту при повреждающей

Таблица 3

Рассчитанные значения D_{Fe}^p в стали ЭК164Table 3. Calculated values of D_{Fe}^p in EK164 steel

T, °C	Содержание	$D_{\text{Fe}}^p \cdot 10^{22}$, м ² /с
435 – 445	min	0,11
	max	0,16
480 – 490	min	1,67
	max	2,36
505 – 515	min	6,58
	max	9,35

дозе. Это означает уменьшение распухания при увеличении дозы, что противоречит природе эффекта и экспериментальным наблюдениям.

На рис. 4 показаны результаты расчета зависимости распухания (1) от температуры облучения при повреждающей дозе в 76 сна для стали ЭК164 с минимальным и максимальным содержанием химических элементов.

Из рис. 4 видно, что распухание уменьшается при температуре 350 – 525 °С, что коррелирует с результатами работ [17, 20], в которых утверждается, что в диапазоне температур 425 – 525 °С наблюдается падение средней величины концентрации пор, порождающих распухание, в облученных образцах сталей ЧС68 и ЭК164.

Выводы. На основе четырехслойной искусственной нейронной сети разработана модель зависимости коэффициента диффузии железа от температуры и содержания легирующих элементов в аустенитной стали. Верификация модели на контрольных данных показала ее удовлетворительную способность прогнозировать D_{Fe} . Применение разработанной модели для анализа распухания ТВЭЛов из стали ЭК164-ИД х.д. позволило получить регрессионное уравнение зависимости распухания от коэффициента диффузии, температуры и повреждающей дозы. Нейросетевую модель можно использовать для расчета коэффициента диффузии железа при поиске аустенитной стали с заданными свойствами, например, повышенной радиационной стойкостью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Максимов Л.А., Рязанов И. О диффузионном взаимодействии пор // Физика металлов и металловедение. 1976. Т. 41. Вып. 2. С. 284 – 291.
2. Garner F.A., Porollo S.I., Konobeev Yu.V., Maksimkin O.P. Void swelling of austenitic steels irradiated with neutrons at low temperatures and very low dpa rates // Proceedings of the 12th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System – Water Reactors. Eds. Allen T.R., King P.J., Nelson L. TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2005.
3. Васильев А.А., Соколов С.Ф., Колбасников Н.Г., Соколов Д.Ф. О влиянии легирования на энергию активации самодиффузии в γ -железе // Физика твердого тела. 2011. Т. 53. № 11. С. 2086 – 2092.
4. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.
5. Чурюмов А.Ю., Хомутов М.Г., Солонин А.Н. и др. Сравнительный анализ моделей напряжения течения коррозионно-стойкой стали с высоким содержанием бора, основанных на уравнении типа Аррениуса и искусственных нейронных сетях // Металлы. 2014. № 4. С. 30 – 34.
6. Dudała J., Gilewicz-Wolter J., Stękowski Z. Simultaneous measurement of Cr, Mn and Fe diffusion in chromium-manganese steels // NUKLEONIKA. 2005. Vol. 50(2). P. 67 – 71.
7. Иванцов И.Г., Блинкин А.М. Самодиффузия в сильно разбавленных бинарных растворах. Часть III. Влияние примесей Sn, Sb, Pb, Bi на самодиффузию железа в γ -фазе // Физика металлов и металловедение. 1966. Т. 22. Вып. 6. С. 876 – 883.
8. Федоров Г.Б., Семенихин А.Н. Влияние легирования на диффузию элементов в хромо-никелевых сталях: Сб. науч. работ. / Под

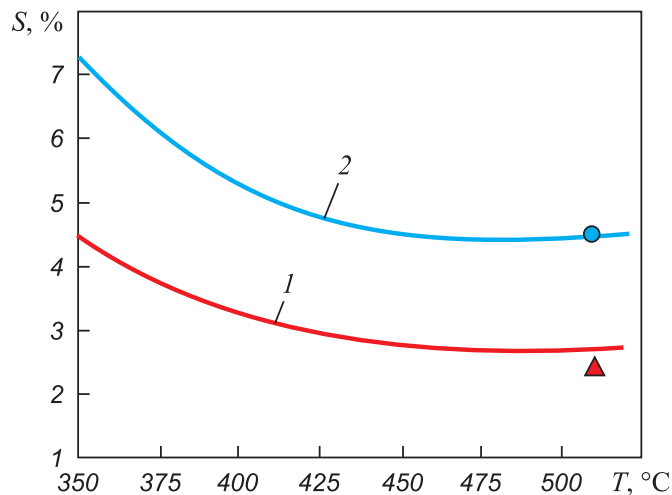


Рис. 4. Рассчитанная по выражению (1) зависимость S от температуры при дозе в 76 сна:

1 – максимальное легирование (ТВЭЛ № 50); 2 – минимальное легирование (ТВЭЛ № 9). Экспериментальные значения S [14]:

▲ – ТВЭЛ № 50, ● – ТВЭЛ № 9

Fig. 4. Calculation on expression (1) dependence of S on temperature at a dose of 76 dpa:

1 – maximal alloying (TVEL (fuel cladding tubes) no. 50); 2 – minimal alloying (TVEL no. 9). Experimental values of S [14]:

▲ – TVEL no. 50, ● – TVEL no. 9

ред. В.С. Емельянова и А.И. Евтюхина. – М.: Атомиздат, 1962. Вып. 2. С. 252 – 258.

9. Павлинов Л.В. Диффузия железа и углерода в двойных и четырехкомпонентных сплавах системы железо – хром – никель – молибден в области γ -твердых растворов // Физика металлов и металловедение. 1976. Т. 41. Вып. 2. С. 344 – 350.
10. Павлинов Л.В., Сугоняев В.Н., Гладышев А.М. Исследование диффузии железа, кобальта и марганца в аустенитных хромо-никелевых сталях 0X16H15M3B и 10X18H10T. – Обнинск: ФЭИ, 1980. Препринт ФЭИ-1146. – 13 с.
11. Грузин П.Л., Корнев Ю.В., Курдюмов Г.В. Влияние углерода на самодиффузию железа // ДАН СССР. 1951. Т. 80. № 1. С. 49 – 51.
12. Зелинский М.С., Носков Б.М., Павлов П.В., Шитова Э.В. Влияние примесей ванадия на самодиффузию железа // Физика металлов и металловедение. 1959. Т. 8. Вып. 5. С. 725 – 730.
13. Герцрик С.Д., Прянишников М.П. Дослідження впливу типу кристалічних ґрат і всьбічного тиску на параметри саодифузії заліза в чистому залізі та в залізі з малими домішками алюмінію // Український фізичний журнал. 1958. Т. III. № 2. С. 255 – 264.
14. Образцов С.М., Биржевой Г.А., Конобеев Ю.В. и др. Бутстреп-анализ температурной зависимости самодиффузии железа в α , γ и δ -фазах железа // Тр. XVIII Междунар. совещания «Радиационная физика твердого тела». – М.: НИИ ПМТ при МГИЭМ (ТУ), 2008. С. 277 – 288.
15. Грузин П.Л., Кузнецов Е.В., Курдюмов Г.В. Влияние внутризреренной структуры аустенита на самодиффузию железа // ДАН СССР. 1953. Т. 93. № 6. С. 1021 – 1023.
16. Грузин П.Л. Влияние хрома на самодиффузию железа: Сб. «Проблемы металловедения и физики металлов». – М.: Металлургиздат, 1955. Сб. 4. С. 524 – 527.
17. Целищев А.В., Агеев В.С., Буданов Ю.П. и др. Разработка конструкционной стали для ТВЭЛов и ТВС быстрых натриевых реакторов // Атомная энергия. 2010. Т. 108. Вып. 4. С. 217 – 222.
18. Образцов С.М., Конобеев Ю.В., Печенкин В.А., Соловьев В.А. Нейросетевое исследование влияния кремния и титана на радиационное распухание аустенитной нержавеющей стали

// Радиационная физика твердого тела: Тр. XX Междунар. совещания, Севастополь, 2010. – М.: НИИ ПМТ МГИЭМ (ТУ), 2010. С. 63 – 67.

19. Портных И.А., Козлов А.В., Панченко В.Л., Митрофанова Н.М. Характеристики радиационной пористости, сформировавшейся в реакторе БН-600 в материале оболочек из стали ЭК164 (06Х16Н20М2Г2БТФР)-ИД Х.Д. // Физика металлов и металловедение. 2012. Т. 113. № 5. С. 549 – 560.

20. Портных И.А., Козлов А.В., Панченко В.Л. Влияние дозово-температурных параметров нейтронного облучения до максимальной повреждающей дозы 77 сна на характеристики пористости, сформировавшейся в стали 0,07 С; 16 Cr; 19 Ni; 2 Мо; 2 W; Ti, Si, V, Nb, В (ЭК164) // Физика металлов и металловедение. 2014. Т. 115. № 6. С. 664 – 670.

Поступила 25 октября 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. Vol. 60. No. 11, pp. 891–896.

NEURAL NETWORK MODEL OF IRON DIFFUSION IN AUSTENITIC STEELS

M.Yu. Belomytsev¹, S.M. Obraztsov², V.A. Solov'ev²

¹ National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS), Moscow, Russia

² “State Scientific Centre of the Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering named after A. I. Leypunsky” (FSUE “SSC RF – IPPE”), Obninsk, Russia

Abstract. Speed of iron diffusion in austenitic steels is one of the major factors determining swelling of a constructional material of units and details of an active zone of a fast nuclear reactor. The factor of iron diffusion essentially depends on a chemical composition of steels and alloys on the basis of iron. Therefore the problem of its modeling is rather actual. The file of experimental data on diffusion in steels and alloys containing various combinations of C, Si, Cr, Ni, Mn, Mo, Nb, Ti, V, W, Al, Pb, Bi, Sn and Sb in a range of temperatures of 1023 ÷ 1666 K has been generated on the basis of literary data. For correct approximation of iron diffusion the artificial neural network was used in the form of 4-layer-perceptron with number of units on layers as 49:10:17:1. Developed neural network model was tested on independent experimental data and has shown satisfactory statistical characteristics that shows its adequacy. Calculations of coefficient of iron diffusion in pure iron and both steels of grades ChS68 and EK164 show higher factor of diffusion in steels, than in pure iron. On the basis of the developed model the diffusion coefficients of shells of two fuel elements of EK164-ID c.d. steel have been calculated. Fuel elements were irradiated in a reactor on fast neutrons BN-600 at various temperatures and damaging doses at their maximal and minimal alloying. Calculations have shown that in the steel containing a minimum quantity of alloying elements, speed of diffusion is below, than in steel with maximal contents of alloying elements, and swelling in inverse proportion to coefficient of iron diffusion in EK164-ID c.d. steel. On the basis of these data it has been received linear (in logarithms) regression equation of steel swelling S depending on temperature T , damaging dose D and coefficient of iron diffusion D_{Fe} : $\ln S = -340,511 + 0,036 \ln D + 42,64 \ln T - 1,558 \ln D_{Fe}$, where D is measured in dpa; T – in degrees of Celsius; D_{Fe} – in m^2/s ; S – in %. A range of change of temperature was 435 – 515 °C, damaging dose was 57 ÷ 76 dpa.

Keywords: austenitic steel, iron diffusion, artificial neural network, regression model, irradiation swelling.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-11-891-896

REFERENCES

1. Maksimov L.A., Ryazanov I. On the diffusion interaction of voids. *Physics of Metals and Metallography*. 1976, vol. 41, no. 2, pp. 46–53.
2. Garner F.A., Porollo S.I., Konobeev Yu.V., Maksimkin O.P. Void swelling of austenitic steels irradiated with neutrons at low temperatures and very low dpa rates. In: *Proceedings of the 12th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System – Water Reactors*. Eds. Allen T.R., King P.J., Nelson L. TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2005.
3. Vasilyev A.A., Sokolov S.F., Kolbasnikov N.G., Sokolov D.F. Effect of alloying on the self-diffusion activation energy in γ -iron. *Phys. Solid State*. 2011, vol. 53, Issue 11, pp. 2194–2200.
4. Osovskii S. *Neironnye seti dlya obrabotki informatsii* [Neural networks for information processing]. Moscow: Finansy i statistika, 2002, 344 p. (In Russ.).
5. Churyumov A.Yu., Khomutov M.G., Solonin A.N., Mukhanov E.L., Efimov V.M. Comparative study of the stress flow models for high-boron corrosion-resistant steel based on an Arrhenius-type equation and artificial neural networks. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2014, no. 4, pp. 527–531.
6. Dudała J., Gilewicz-Wolter J., Stękowski Z. Simultaneous measurement of Cr, Mn and Fe diffusion in chromium-manganese steels. *NUKLEONIKA*. 2005, vol. 50(2), pp. 67–71.
7. Ivantsov I.G., Blinkin A.M. Self-diffusion in highly diluted binary solutions. Part. III. Influence of Sn, Sb, Pb, Bi impurities on self-diffusion of iron in γ -phase. *Fizika metallov i metallovedenie*. 1966, vol. 22, no. 6, pp. 876–883. (In Russ.).
8. Fedorov G.B., Semenikhin A.N. Influence of alloying on diffusion of elements in chromium-nickel steels. In: *Sb. nauchnykh rabot* [Collection of materials]. Emel'yanov V.S., Evtyukhin A.I. eds. Issue 2. Moscow: Atomizdat, 1962, pp. 252–258. (In Russ.).
9. Pavlinov L.V. Diffusion of iron and carbon in four-component iron-chromium-nickel - molybdenum alloys in the gamma solid solution range. *Physics of Metals and Metallography*. 1976, vol. 41, no. 2, pp. 102–108.
10. Pavlinov L.V., Sugonyaev V.N., Gladyshev A.M. *Issledovanie dif-fuzii zheleza, kobalta i margantsa v austenitnykh khromonikelevykh stalyakh 0Kh16N15M3B i 10Kh18N10T* [Research of diffusion of iron, cobalt and manganese in austenitic chromium-nickel steels 0Cr16Ni15Mo3Nb and 10Cr18Ni10Ti]. Obninsk: FEI, 1980, Preprint FEI-1146, 13 p. (In Russ.).
11. Gruzin P.L., Kornev Yu.V., Kurdyumov G.V. Influence of carbon on iron self-diffusion. *DAN SSSR*. 1951, vol. 80, no. 1, pp. 49–51. (In Russ.).
12. Zelinskii M.S., Noskov B.M., Pavlov P.V., Shitova E.V. Influence of vanadium impurities on iron self-diffusion. *Fizika metallov i metallovedenie*. 1959, vol. 8, Issue 5, pp. 725–730. (In Russ.).
13. Gertsriken S.D., Pryanishnikov M.P. Influence of crystal lattice and all-round compression on parameters of self-diffusion of iron in pure iron and in iron with small additives of aluminum. *Ukrainskii fizichnyi zhurnal*. 1958, vol. III, no. 2, pp. 255–264. (In Ukr.).
14. Obraztsov S.M., Birzhevoi G.A., Konobeev Yu.V. etc. Butstrep-analysis of temperature dependence of iron self-diffusion in α -, γ - and δ -phases of iron. In: *Trudy XVIII Mezhdunarodnogo soveshchaniya “Radiatsionnaya fizika tverdogo tela”* [Proceedings of the 18th Int. Meeting “Radiative Physics of Solid State “]. Moscow: NII PMT pri MGIEM (TU), 2008, pp. 277–288. (In Russ.).
15. Gruzin P.L., Kuznetsov E.V., Kurdyumov G.V. Influence of the intragranular structure of austenite on iron self-diffusion. *DAN SSSR*. 1953, vol. 93, no. 6, pp. 1021–1023. (In Russ.).
16. Gruzin P.L. Influence of Cr on iron self-diffusion. In: *Problemy metallovedeniya i fiziki metallov. Sb. 4* [Problems of metal sci-

- ence and metal physics. Part 4]. Moscow: Metallurgizdat, 1955, pp. 524–527. (In Russ.).
17. Tselishchev A.V., Ageev V.S., Budanov Yu.P., Ioltukhovskii A.G., Mitrofanova N.M., Leontieva-Smirnova M.V., Shkabura I.A., Zabud'ko L.M., Kozlov A.V., Mal'tsev V.V., Povstyanko A.V. Development of structural steel for fuel elements and fuel assemblies of sodium-cooled fast reactors. *Atomic Energy*. 2010, vol. 108, no. 4, pp. 274–280.
 18. Obraztsov S.M., Konobeev Yu.V., Pechenkin V.A., Solov'ev V.A. Neural network research of influence of silicon and titan on irradiating swelling of austenitic stainless steel. In: *Radiatsionnaya fizika tverdogo tela. Trudy 20 Mezhdunarodnogo soveshchaniya, Sevastopol', 2010* [Radiation physics of solid body. Proceedings of the 20th International Meeting, Sevastopol, 2010]. Moscow: NII PMT MGIEM (TU), 2010, pp. 63–67. (In Russ.).
 19. Portnykh I.A., Kozlov A.V., Panchenko V.L., Mitrofanova N.M. Characteristics of radiation porosity formed upon irradiation in a BN-600 reactor in the fuel-element cans of cold-deformed steel EK-164 (06Kh16N20M2G2BTFR)-ID c.d. *Physics of Metals and Metallography*. 2012, vol. 113, no. 5, pp. 520–531.
 20. Portnykh I.A., Kozlov A.V., Panchenko V.L. Effect of dose and temperature parameters of neutron irradiation to maximum damaging dose of 77 dpa on characteristics of porosity formed in steel 0.07C-16Cr-19Ni-2Mo-2Mn-Ti-Si-V-P-B. *Physics of Metals and Metallography*. 2014, vol. 115, no. 6, pp. 625–633.

Information about the authors:

M.Yu. Belomytsev, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Metallography and Physics of Strength” (myubelom@yandex.ru)

S.M. Obraztsov, Dr. Sci. (Phys.–Math.)

V.A. Solov'ev, Senior Researcher

Received October 25, 2016