ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ, 2024, том 125, № 1, с. 101–107

СТРУКТУРА, ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И ДИФФУЗИЯ

УДК 621.039.53

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО РАССЕЯНИЯ НА АНАЛИЗ НАНОСТРУКТУРЫ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ ОКСИДАМИ СТАЛЕЙ МЕТОДАМИ МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ

© 2024 г. С. В. Рогожкин[a, b, *, **], А. В. Клауз[a, b], Ю. Е. Горшкова[c, d], Г. Д. Бокучава[c], А. А. Хомич[a, b], А. А. Богачев[a, b], А. А. Никитин[a, b], Л. Алмаши[e], Г. П. Копица[f, g]

[a] *Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", пл. Акад. Курчатова, 1, Москва, 123182 Россия*

[b] *Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Каширское шоссе, 31, Москва, 115409 Россия*

[c] *Объединенный институт ядерных исследований, ул. Жолио Кюри, 6, Дубна, 141980 Россия*

[d] *Институт физики, Казанский федеральный университет, ул. Кремлевская, 18, Казань, 420008 Россия*

[e] *Институт энергетической и экологической безопасности, Центр энергетических исследований, Будапешт, 1121 Венгрия*

[f] *НИЦ "Курчатовский институт" – Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова, мкр. Орлова роща, 1, Гатчина, Ленинградская область, 188300 Россия*

[g] *Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН, наб. адм. Макарова, 2, Санкт-Петербург, 199034 Россия*

** e-mail: Sergey.Rogozhkin@itep.ru*

*** e-mail: SVRogozhkin@mephi.ru*

Поступила в редакцию 14.10.2023 г.
После доработки 15.10.2023 г.
Принята к публикации 29.10.2023 г.

Отличительной особенностью дисперсно-упрочненных оксидами сплавов и сталей, обеспечивающей существенное повышение жаропрочности в сравнении с традиционными материалами, является значительное число равномерно распределенных наноразмерных включений (оксидов и кластеров). Для детальной характеризации таких материалов применяют комплекс методик, таких как просвечивающая электронная микроскопия, атомно-зондовая томография, а также малоугловое рассеяние рентгеновских лучей и нейтронов. Последняя указанная методика позволяет анализировать наибольшие объемы материала, при этом сохраняет возможность детектирования различных наноразмерных особенностей. Поскольку ферритно-мартенситные дисперсно-упрочненные оксидами стали – ферромагнитные материалы, то при использовании малоуглового рассеяния нейтронов необходимо учитывать магнитное рассеяние. В данной работе методом малоуглового рассеяния нейтронов исследуется наноструктура ферритно-мартенситных дисперсно-упрочненных оксидами сталей с различными системами легирования (различное содержание Cr, V, W, Al и Zr). Проведено сопоставление результатов исследования наноструктуры сталей (оксидных частиц и кластеров) в ферромагнитном состоянии с учетом и без учета магнитного рассеяния. Показано, что оксидные частицы имеют существенно больший магнитный контраст в сравнении с наноразмерными кластерами. В то же время наиболее точные значения твердости удается получить, учитывая как оксидные включения, так и кластеры.

Ключевые слова: дисперсно-упрочненная оксидами сталь, малоугловое рассеяние нейтронов, магнитное рассеяние, оксидная частица, нанокластер, твердость

DOI: 10.31857/S0015323024010137, **EDN:** ZQGHIU

ВВЕДЕНИЕ

Отличительной особенностью дисперсно-упрочненных оксидами (ДУО) сплавов и сталей, обеспечивающей существенное повышение жаропрочности в сравнении с традиционными материалами, является значительное число равномерно распределенных наноразмерных оксидов [1, 2]. Для детальной характеризации таких материалов применяют комплекс методик, таких как просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) [3, 4], атомно-зондовая томография (АЗТ) [5, 6],

малоугловое рентгеновское рассеяние (МУРР) [7, 8] и малоугловое рассеяние нейтронов (МУРН) [9, 10]. Если ПЭМ и АЗТ с высокой точностью могут охарактеризовать типы имеющихся включений (оксидов и кластеров), то МУРР и МУРН позволяют наиболее достоверно определить средние характеристики включений в макроскопических объемах материала (размеры и объемную плотность). При этом МУРН позволяет получать наиболее представительные данные с образцов толщиной ~1 мм, в то время как МУРР – с образцов толщиной ~100 мкм. Достоинством МУРН является также использование не только ядерного, но и магнитного контраста для анализа наноструктуры материалов. Это особенно важно для анализа наноструктуры ферритно-мартенситных сталей, являющихся ферромагнитными материалами. Для такого рода исследований МУРН анализ ДУО-сталей проводится в насыщающем магнитном поле, но учет вклада магнитного рассеяния необходим и в экспериментах без внешнего магнитного поля, поскольку образцы могут находится в ферромагнитном состоянии. Целью настоящей работы является выявление роли магнитного рассеяния при анализе наноструктуры ДУО ферритно-мартенситных сталей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследованы стали Eurofer ODS, 13.5Cr-Fe_3Y ODS, разработанные в Технологическом институте Карлсруэ (KIT, Германия), и сталь KP-4 gen-1 ODS из Киотского университета (Япония).

Стали изготовлены путем механического легирования металлических порошков и порошков оксидов. При изготовлении Eurofer ODS и KP-4 gen-1 ODS использованы металлические порошки и порошок оксида Y_2O_3, а при изготовлении 13.5Cr-Fe_3Y ODS – порошок интерметаллида Fe_3Y и окисленный порошок матричной стали.

Химические составы образцов ДУО-сталей представлены в табл. 1. Эти стали уже изучались нами ранее методами ПЭМ и АЗТ [11–13], а также методом МУРН [14]. Там же представлены дополнительные детали изготовления этих сталей.

Образцы ДУО-сталей размерами 17×17 мм и толщиной 2 мм изучались на малоугловом дифрактометре Yellow Submarine (реактор BNC, Будапешт, Венгрия) [15, 16], который работает в геометрии, близкой к точечной. Измерения проводили на двух длинах волн нейтронов $\lambda = 0.42$ и 1.01 нм, $\Delta\lambda/\lambda = 18\%$. Использование двух дистанций образец–детектор $SD = 1.3$ и 5.6 м позволяло измерять интенсивность рассеяния нейтронов в диапазоне переданных импульсов $0.06 < Q < 4.5$ нм$^{-1}$. Рассеянные нейтроны регистрировали двумерным позиционно-чувствительным BF_3 детектором. Образцы сталей крепили на стандартный держатель на 6 позиций с диаметром пучка 12 мм. Исходные спектры для каждого интервала по Q корректировали с применением стандартной процедуры с учетом рассеяния арматурой установки и кюветой, а также фона зала. Полученные двумерные изотропные спектры были азимутально усреднены и приведены к абсолютным значениям путем нормировки на сечение некогерентного рассеяния 1 мм воды с учетом эффективности детектора и толщины L для каждого из образцов. Все измерения проводили при комнатной температуре. Обработка данных выполнена в пакете Irena SANS для Igor Pro software [17].

ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОМ МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ

Кривые МУРН для трех исследованных сталей, полученные на спектрометре “Yellow Submarine” в диапазоне переданных импульсов (0.06–4.5 нм$^{-1}$), представлены на рис. 1.

Для обработки данных использовали модель сферических включений с логнормальным распределением этих включений по размеру. Расчет параметров распределения числа включений по размерам, их средний размер и объемная плотность определены исходя из зависимости интенсивности рассеяния I от вектора рассеяния Q:

$$I(Q) = AQ^{-4} + \Delta\rho^2 \int_0^\infty n(R) V(R)^2 F(Q,R)^2 dR + B. \quad (1)$$

Здесь B – некогерентный шум (считается обусловленным некогерентным рассеянием на матрице). Первое слагаемое описывает рассеяние на малых векторах Q, определяемое рассеянием типа Порода на больших частицах вторичных фаз, либо границах зерен (A – параметр функции). Вто-

Таблица 1. Химический состав исследуемых ДУО-сталей (баланс по Fe)

Сталь	Содержание элементов, ат.%											
	Al	Ni	Zr	Mn	Cr	W	Y	O	V	C	N	Si
Eurofer ODS	–	0.02	–	0.39	9.8	0.34	0.13	0.34	0.22	0.40	0.21	0.06
KP-4 gen-1 ODS	7.56	–	0.19	–	15.9	0.58	0.16	0.57	–	–	–	–
13.5Cr-Fe_3Y ODS	–	–	–	–	14.6	0.6	0.3		–	–	–	–

рое слагаемое – интенсивность рассеяния от различных наноразмерных включений. Таких слагаемых может быть несколько, если имеется несколько типов включений (R – радиус включения; $V(R) = \frac{4}{3}\pi R^3$ – объем отдельного включения; $\Delta\rho$ – разность плотности длины рассеяния (контраст) между матрицей и включением; $n(R) = \frac{N}{R\sigma\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{(\ln(R)-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$ – логнормальное распределение числа включений по размерам; $\int_0^\infty n(R)\,dR = N$ – суммарное число включений; $F(Q,R) = 3\frac{\sin(QR) - QR\cos(QR)}{(QR)^3}$ – форм-фактор включения сферической формы. В магнитных материалах контраст должен учитывать как ядерное, так и магнитное рассеяние:

$$\Delta\rho^2 = \Delta\rho^2_{\text{nucl}} + \Delta\rho^2_{\text{mag}}\sin^2\alpha, \qquad (2)$$

где $\Delta\rho_{\text{nucl, mag}}$ – ядерный и магнитный контраст, соответственно, α – угол к направлению магнитного поля (либо к направлению магнитного упорядочения).

Если эксперимент проводить в насыщающем магнитном поле H, то магнитные моменты атомов выстраиваются в направлении приложенного магнитного поля. При ориентации поля перпендикулярно пучку (вдоль плоскости детектора) угол α задается в плоскости детектора. Тогда интенсивности рассеяния, полученные в двух перпендикулярных направлениях $\perp$ и $\parallel$ к полю),

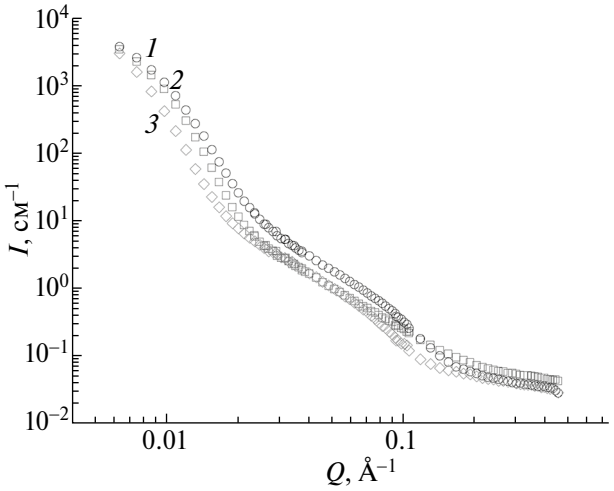

Рис. 1. Кривые малоуглового рассеяния нейтронов для сталей Eurofer ODS, 13.5Cr–Fe_3Y ODS и KP-4 gen-1 ODS.

соответствующих $\alpha = 90°$ и $\alpha = 0°$, можно рассматривать отдельно. Разница этих двух вкладов дает магнитное рассеяние, а интенсивность вдоль поля ($\parallel$ полю) – ядерное рассеяние. В случае ферромагнитного материала при температурах ниже точки Кюри T_C магнитные моменты атомов упорядочиваются без внешнего магнитного поля внутри доменов. Если намагниченность образца отсутствует, то магнитные домены случайно ориентированы к падающему пучку нейтронов и при рассеянии на объемном материале при температурах, достаточно низких по сравнению с T_C, при усреднении по телесному углу получают:

$$\Delta\rho^2 = \Delta\rho^2_{\text{nucl}} + 2/3\Delta\rho^2_{\text{mag}}. \qquad (3)$$

Таблица 2. Состав матрицы и включений в исследуемых ДУО-сталях (d – средний размер; N – объемная плотность) [13, 17], ядерный $\Delta\rho^2_{\text{nucl}}$ и магнитный $\Delta\rho^2_{\text{mag}}$ контраст включений

Сталь	Фаза	Состав	d, нм	N, 10^{22} м$^{-3}$	$\Delta\rho^2_{\text{nucl}}$(SLD), 10^{21}	$\Delta\rho^2_{\text{mag}}$(SLD), 10^{21}
Eurofer ODS	Матрица	Fe89 Cr10 Mn0.4 V0.2 N0.1 O0.1 W0.3 Y0.1	–	–	–	–
	Оксиды	Y_2O_3	6±2	4±1	0.98	2.3
	Кластеры	Fe46 Cr20 V9 O11 Y10 W0.3 Mn0.5 N0.1	2±1	32±5	0.43	0.24
13.5Cr-Fe_3Y ODS	Матрица	Fe85 Cr13 Mn0.7 O0.2 V0.1 Y0.4 Ni0.2 Si0.1 W0.4	–	–	–	–
	Оксиды	Y_2O_3	6±1	0.8±0.2	0.9	2.2
	Кластеры	Fe50 Cr14 Mn0.5 O6 Y11 Ni0.6 Si0.2 W0.11	2±1	32±4	0.5	0.27
KP-4 ODS gen-1	Матрица	Fe76 Cr16 O0,4 Y0,1 Al7 Zr0.2 W0.6	–	–	–	–
	Оксиды	$Y_4Zr_3O_{12}$	5±2	2±1	0.9	2.2
	Кластеры	Fe49 Cr12 O19 Y12 Al5 Zr3	3±1	10±2	0.5	0.27

Для расшифровки МУРН-спектров необходим расчет ядерного и магнитного контрастов включений, для чего необходима информация о составе включений и матрицы материала. В исследуемых ДУО-сталях присутствуют различные включения, отличающиеся как по характерным размерам, так и по составу. Включения больших размеров (десятки нанометров) являются стехиометрическими оксидами, а малые наноразмерные включения – либо оксиды, либо кластеры. Результаты ПЭМ- и АЗТ-анализа по составу матрицы и включений, размерам и плотностям включений представлены в табл. 2. Там же представлены рассчитанные значения контрастов $\Delta\rho^2_{nucl}$ и $\Delta\rho^2_{mag}$. Метод расчета контраста включений в ДУО-сталях представлен в [10]. В настоящей работе ядерный контраст $\Delta\rho^2_{nucl}$ рассчитывали в программе Igor Pro с модулем Irena, исходя из состава оксидов и кластеров, а также матрицы материала. Магнитный контраст $\Delta\rho^2_{mag}$ рассчитывали, исходя из магнитных моментов $\mu_{Fe} = 2.2\ \mu_B$ и $\mu_{Cr} = 2.8\ \mu_B$ и их доли (C_i) в матрице и частицах: $\Sigma\mu_i C_i$ [18, 19].

Для выявления отмеченных выше особенностей полученные кривые МУРН (рис. 1) аппроксимировали двумя логнормальными распределениями частиц с большими (десятки нм) и малыми (несколько нм) размерами ($n_L(R)$ и $n_S(R)$). Поскольку в области малых размеров присутствует два типа объектов (оксиды и кластеры), то аппроксимацию проводили отдельно для случая оксидов и для случая кластеров (пример такой аппроксимации для оксидов представлен на рис. 2). Полученные данные по средним размерам и объемным плотностям включений представлены в табл. 3. На рис. 3 изображены измеренные и рассчитанные значения твердости.

Поскольку в области малых размеров в исследуемых ДУО-сталях имеются как кластеры, так и оксиды, то расчет плотностей малых включения был произведен для двух типов включений: оксидов и кластеров (табл. 3).

ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение средних размеров и объемных плотностей включений, обнаруженных методами ПЭМ и АЗТ [11–13], с результатами исследования МУРН представлены в табл. 3 и 4. Так, согласно ПЭМ и АЗТ, средний размер оксидных частиц в этих сталях 5–6 нм, объемная плотность составляет от 0.8×10^{22} до 4×10^{22} м$^{-3}$, а средний размер кластеров 2–3 нм и объемная плотность от 1×10^{23} м$^{-3}$ до 3.2×10^{23} м$^{-3}$.

Отметим, что обнаруженные в этих сталях большие включения имеют характерные размеры ~ 40–60 нм и очень низкую объемную плотность, по сравнению с объемной плотностью нановключений (см. табл. 3). Статистически достоверные

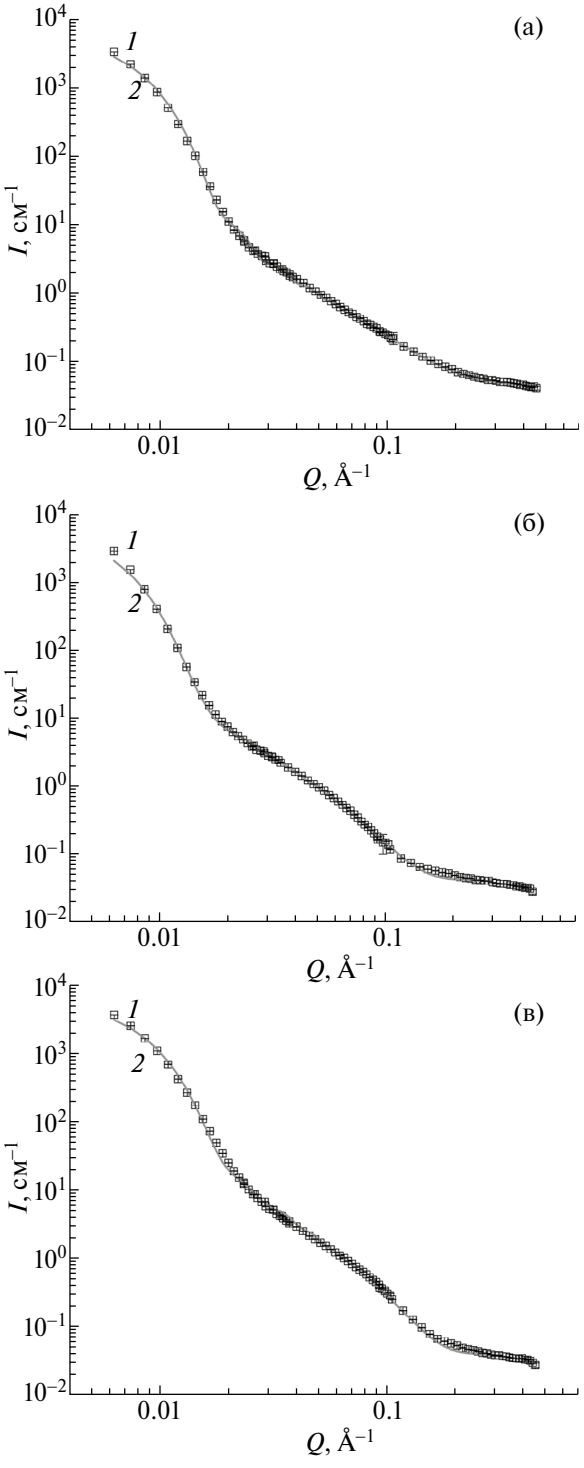

Рис. 2. Подгонка кривых МУРН для образцов ДУО-сталей Eurofer ODS (а), 13.5Cr–Fe_3Y ODS (б) и KP-4 gen-1 ODS (в) методом наименьших квадратов по двум логнормальным распределениям: (1) – экспериментальная кривая, (2) – модельная кривая.

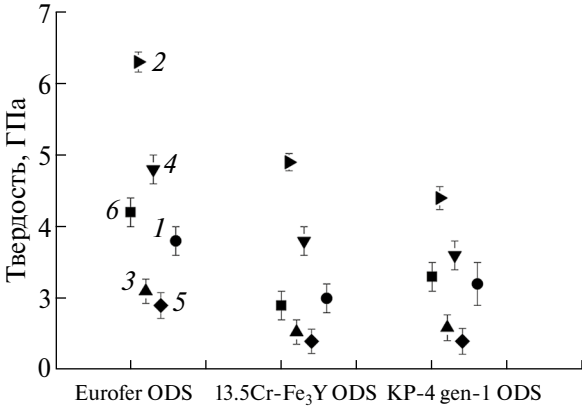

Рис. 3. Измеренные значения микротвёрдости (1); результаты расчета твердости по DBH модели с результатами обработки МУРН спектров: с учетом ядерного рассеяния на оксидных включениях (2); с учетом ядерного рассеяния на кластерах (3); с учетом ядерного и магнитного рассеяния на оксидных включениях (4); с учетом ядерного и магнитного рассеяния на кластерах (5); результаты расчета по DBH модели с результатами ПЭМ- и АЗТ-анализа (6).

данные по таким объектам методом ПЭМ получены не были. Метод МУРН дает значение их плотности от 3 до 30×10^{18} м$^{-3}$ в разных сталях. При расчетах параметров малых включений видна заметная роль вклада магнитного рассеяния, поскольку отсутствие такого вклада дает завышенные параметры плотности включений (см. табл. 3).

Сравнение расчетов МУРН с одним типом малых включений показывает хорошее согласие с ПЭМ- и АЗТ-данными как по средним размерам включений, так и по их плотностям (см. табл. 4). В то же время видно, что при выборе оксидов в качестве мелких включений получаемые из кривых МУРН плотности мелких оксидов несколько больше плотностей включений, наблюдаемых в ПЭМ. А при выборе кластеров в качестве мелких включений, получаемые из кривых МУРН плотности кластеров меньше плотностей кластеров, наблюдаемых в АЗТ.

Одной из причин отличия детектируемых методами МУРН мелких включений, оксидов и кластеров, возможно, является то, что эти объекты одновременно присутствуют в материале и имеют достаточно близкие размеры, и, в результате, пересекаются при восстановлении информации о включениях из данных МУРН.

Для выявления роли магнитного вклада в рассеяние нейтронов, а также роли оксидов и кластеров был проведен расчет упрочнения изучаемых сталей с учетом полученных данных.

Для этого использовали модель дисперсного барьерного упрочнения (модель DBH) (см., напр., [20]). В этой модели каждый тип барьера способствует упрочнению в соответствии с формулой Орована (4):

$$\Delta\sigma_i = M_T\alpha_i\mu b\sqrt{N_i d_i}, \qquad (4)$$

где α_i – сила барьера; M_T – коэффициент Тейлора; μ – модуль сдвига; b – модуль вектора Бюргерса; N_i и d_i – объемная плотность и средний размер

Таблица 3. Результаты обработки данных МУРН для включений различного размера: d – средний размер; N – объемная плотность

Сталь	Крупные включения (без/с учетом магнитного рассеяния)		Мелкие включения (без/с учетом магнитного рассеяния)			
			Оксиды		Кластеры	
	d, нм	N, $\times10^{18}$ м$^{-3}$	d, нм	N, $\times10^{22}$ м$^{-3}$	d, нм	N, $\times10^{22}$ м$^{-3}$
Eurofer ODS	51	5/2.7	5	21 /8.6	5	35/21.2
13.5Cr-Fe_3Y ODS	52	4/2.5	4	15 / 6	4	28/16.6
KP-4 gen-1 ODS	70	30/8.3	6	6 / 2.6	6	13/6.4

Таблица 4. Средний размер и плотность объектов, обнаруженных методами ПЭМ, АЗТ и МУРН (с учетом магнитного рассеяния) в исследуемых ДУО-сталях: d – средний размер; N – объемная плотность

Сталь	ПЭМ		АЗТ		МУРН (малые включения)		Условия расчета
	d, нм	N, $\times10^{22}$ м$^{-3}$	d, нм	N, $\times10^{22}$ м$^{-3}$	d, нм	N, $\times10^{22}$ м$^{-3}$	
Eurofer ODS	6 ± 2	4 ± 1	2 ± 1	32 ± 5	5	21	Кластеры
						9	Оксиды
13.5Cr-Fe_3Y ODS	6 ± 1	0.8 ± 0.2	2 ± 1	32 ± 4	4	17	Кластеры
						6	Оксиды
KP-4 gen-1 ODS	5 ± 2	2 ± 1	3 ± 1	10 ± 2	6	6	Кластеры
						3	Оксиды

Таблица 5. Результаты расчета в рамках DBH-модели с учетом данных ПЭМ и АЗТ либо с учетом данных МУРН с ядерным и магнитным рассеянием, и данные измерения микротвердости

Сталь	DBH (ПЭМ и АЗТ), ГПа	DBH (МУРН), ГПа				Микротвердость, H_v, ГПа
		Ядерное рассеяние		Ядерное и магнитное рассеяние		
		Оксиды	Кластеры	Оксиды	Кластеры	
Eurofer ODS	4.2 ± 0.2	6.3 ± 0.2	3.1 ± 0.2	4.8 ± 0.2	2.9 ± 0.2	3.8 ± 0.2
13.5Cr-Fe_3Y ODS	2.9 ± 0.2	4.9 ± 0.2	2.5 ± 0.2	3.8 ± 0.2	2.4 ± 0.2	3.0 ± 0.2
KP-4 gen-1 ODS	3.3 ± 0.2	4.4 ± 0.2	2.6 ± 0.2	3.6 ± 0.2	2.4 ± 0.2	3.2 ± 0.3

барьера данного типа. Отметим, что значения силы барьера α_i различны для оксидных включений и кластеров: 0.1 для кластеров [21] и 0.63 для оксидных включений [22].

Общее упрочнение всех типов барьеров было рассчитано по формуле (см., напр., [23]):

$$\sigma_y = \sigma_i + \sigma_m + \sigma_{gb}, \quad (5)$$

где σ_i – упрочнение от включений, σ_m – твердофазное упрочнение для ферритно-мартенситных сталей выбирали σ_m = 255 МПа [22], $\sigma_{gb} = kD^{-1/2}$ – упрочнение от границ зерен (соотношением Холла – Петча, где D – размер зерна, k = 338 МПа/мкм).

Результаты расчетов твердости, в сравнении с измеренными значениями, приведены в табл. 5. Видно, что расчеты в предположении, что малые включения – оксиды, дают завышенные значения твердости, а в предположении, что малые включения – кластеры, дают заниженные значения твердости. Учет магнитного рассеяния заметно проявляется при анализе влияния оксидов на упрочнение: отклонение расчетного упрочнения от измеренного значения заметно уменьшается, в то время как при анализе вклада кластеров влияние магнитного рассеяния незначительно. Этот результат коррелирует с тем, что кластеры обладают существенно меньшим магнитным контрастом, в сравнении с оксидами (см. табл. 2). Полученные результаты также свидетельствуют о том, что наиболее корректную оценку влияния наноразмерных барьеров можно получить, рассматривая комбинированную модель с кластерами и оксидами. Именно это демонстрирует расчет, учитывающий одновременно ПЭМ- и АЗТ-данные, который дает наилучшее согласие с результатом прямого измерения твердости (см. рис. 3 и табл. 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ наноструктуры трех ДУО сталей Eurofer ODS, 13.5Cr-Fe_3Y ODS и KP-4 gen-1 ODS с различными системами легирования методом малоуглового рассеяния нейтронов с учетом магнитного рассеяния в ферромагнитном состоянии этих сталей. Исследуемые стали содержат значительное число оксидных включений и кластеров, детектируемых методами ПЭМ и АЗТ.

Методом МУРН определены средние размеры и плотности больших оксидных включений. Средние размеры крупных частиц варьировались в диапазоне 50–70 нм, а их объемная плотность в диапазоне (0.3–0.8) × 10^{19} $м^{-3}$. Средние размеры мелких частиц варьировались в диапазоне 4–6 нм, а их объемная плотность в диапазоне (3–21) × 10^{22} $м^{-3}$.

Средний размер детектированных методом МУРН нановключений находится между значениями средних размеров включений, детектируемых методами ПЭМ и АЗТ во всех сталях, что указывает на необходимость рассматривать модели, комбинирующие различные типы включений, при анализе МУРН-данных. Показано, что учет магнитного рассеяния дает значения объемной плотности включений, определяемые из МУРН-данных, в большей степени согласующиеся с результатами ПЭМ и АЗТ, и повышает точность расчетов упрочнения сталей за счет включений в сравнении с измеренными величинами твердости.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение № 075–15–2021–1352). Томографический атомно-зондовый анализ выполнен на оборудовании Центра коллективного пользования КАМИКС (http://kamiks.itep.ru/) НИЦ “Курчатовский институт”.

Авторы выражают благодарность доктору П. Владимирову из Института технологий Карлсруэ (Германия) и профессору А. Кимуре из Университета Киото (Япония) за предоставленные образцы ДУО-сталей.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Klueh R.L., Shingledecker J.P., Swindeman R.W., Hoelzer D.T.* Oxide dispersion-strengthened steels: A comparison of some commercial and experimental alloys // J. Nucl. Mater. 2005. V. 341. P. 103–114.
2. *Ukai S., Fujiwara M.* Perspective of ODS alloys application in nuclear environments // J. Nucl. Mater. 2002. V. 307–311. P. 749–757.
3. *Klimiankou M., Lindau R., Möslang* A. TEM characterization of structure and composition of nanosized ODS particles in reduced activation ferritic–martensitic steels// J. Nucl. Mater. 2004. V. 329. P. 347–351.
4. *Rogozhkin S.V., Bogachev A.A., Nikitin A.A., Vasiliev A.L., Presnyakov M.Yu., Tomut M., Trautmann C.* TEM analysis of radiation effects in ODS steels induced by swift heavy ions // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 2021. V. 486. P. 1–10.
5. *Rogozhkin S.V., Aleev A.A., Zaluzhnyi A.G., Nikitin A.A., Iskandarov N.A., Vladimirov P., Lindau R., Möslang A.* Atom probe characterization of nano-scaled features in irradiated ODS Eurofer steel // J. Nucl. Mater. 2011. V. 40. P. 94–99.
6. *Rogozhkin S.V., Orlov N.N., Nikitin A.A., Aleev A.A., Zaluzhny A.G., Kozodaev M.A., Lindau R., Möslang A., Vladimirov P.* Nanoscale characterization of 13.5% Cr oxide dispersion strengthened steels with various titanium concentrations // Inorganic Mater. Appl. Research. 2015. V. 6. № 2. P. 151–155.
7. *Oono N., Ukai S.* Precipitation of Oxide Particles in Oxide Dispersion Strengthened (ODS) Ferritic Steels // Mater. Trans. 2018. V. 59. № 10. P. 651–658.
8. *Rogozhkin S.V., Khomich A.A., Klauz A.V., Bogachev A.A., Gorshkova Y.E., Bokuchava G.D., Nikitin A.A., Lukyanchuk A.A., Raznitsyn O.A., Shutov A.S., Zaluzhny A.G.* // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2022. V. 16. № 6. P. 1189.
9. *Coppola R., Klimiankou M., Lindau R., May R.P., Valli M.* SANS and TEM study of Y2O3 particle distributions in oxide-dispersion strengthened EUROFER martensitic steel for fusion reactors // Physica B. 2004. V. 350. P. E545–E548.
10. *Mathon M.H., Perrut M., Zhong S.Y., de Carlan Y.* Small angle neutron scattering study of martensitic/ferritic ODS alloys // J. of Nuclear Materials. 2012. V. 428. P. 147–153.
11. *Rogozhkin S.V., Khomich A.A., Bogachev A.A., Nikitin A.A., Khoroshilov V.V., Lukyanchuk A.A., Raznitsyn O.A., Shutov A.S., Vasiliev A.L., Presniakov M.Yu.* Comprehensive Analysis of Nanostructure of Oxide Dispersion Strengthened Steels as Prospective Materials for Nuclear Reactors // Phys. Atomic Nuclei. 2020.V. 83. № 10. P. 1425–1433.
12. *Rogozhkin S.V., Khomich A.A., Klauz A.V., Bogachev A.A., Gorshkova Y.E., Bokuchava G.D., Nikitin A.A., Lukyanchuk A.A., Raznitsyn O.A., Shutov A.S., Zaluzhny A.G.* Comprehensive Analysis of Nanostructure of Oxide Dispersion-Strengthened Steels by Ultramicroscopy Methods // J. Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2022. V. 16. № 6. P. 1189–1200.
13. *Rogozhkin S.V., Klauz A.V., Khomich A.A., Bogachev A.A., Nikitin A.A., Lukyanchuk A.A., Raznitsyn O.A., Shutov A.S., Khalyavina A.A., Zaluzhnyi A.G.* Study of nanostructures in high-chromium oxide dispersion-strengthened steels // J. Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2023. V. 17. Suppl. 1. P. S282–S288.
14. *Rogozhkin S.V., Gorshkova Yu.E., Bokuchava G.D., Klauz A.V., Khomich A.A., Bogachev A.A., Nikitin A.A., Almásy László, Kopitsa G.P.* Study of the nanostructure of oxide dispersion-strengthened steels with small-angle neutron scattering // J. Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Technique. 2023. V. 17, Suppl. 1. P. S6-S11.
15. YS-SANS – Small Angle Neutron Scattering Instrument – "Yellow Submarine [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://bnc.hu/sans/ l свободный – Загр. с экрана.
16. *Almásy L.* New Measurement Control Software on the Yellow Submarine SANS Instrument at the Budapest Neutron Centre // J. Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2021. V. 15. № 3. P. 527–531.
17. *Ilavsky J., Jemian P.R.* Irena: tool suite for modeling and analysis of small-angle scattering. J. Appl. Crystallography. 2009. V. 42(2). P. 347–353.
18. *Razee S.S.A., Assaad R.O.* Onset of magnetic order in multilayers of Fe and Ni on and embedded in fcc-Cu(100) substrates //J. Magn. Magn. Mater. 2018. V. 446. P. 177–184.
19. *Rodic D., Antic B., Tellgren R., Rundlof H., Blanusa J.* A change of magnetic moment of Cr ion with the magnetic phase transition in CuCr2Se4 // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 1998. V. 187(1). P. 88–92.
20. *Swenson M.J., Dolph C.K., Wharry J.P.* The effects of oxide evolution on mechanical properties in proton- and neutron-irradiated Fe-9%Cr ODS steel // J. Nucl. Mater. 2016. V. 479. P. 426–435.
21. *Gil E., Ordás, C. García-Rosales N., Iturriza I.* Microstructural characterization of ODS ferritic steels at different processing stages // Fusion Eng. Design. 2015. V. 98–99. P. 1973–1977.
22. *Kim J.H., Byun T.S., Hoelzer D.T., Park C.H., Yeom J.-T., Hong J.-K.* Temperature dependence of strengthening mechanisms in the nanostructured ferritic alloy 14YWT: Part II – Mechanistic models and predictions // Mater. Sci. Eng.. 2013. V. 559. P. 111–118.
23. *Mouawad B., Boulnat X., Fabrègue D., Perez M., de Carlan Y.* Tailoring the microstructure and the mechanical properties of ultrafine grained high strength ferritic steels by powder metallurgy // J. Nucl. Mater. 2015. V. 465. P. 54–62.