

Исследование наноструктурного состояния 13,5% Cr дисперсно-упрочненной оксидами стали при вариации содержания титана

**С. В. Рогожкин, Н. Н. Орлов, А. А. Никитин,
А. А. Алеев, А. Г. Залужный, М. А. Козодаев,
R. Lindau, A. Möslang, P. Vladimirov**

Исследовано влияние легирования титаном на наноструктуру дисперсно-упрочненной оксидами (ДУО) иттрия стали, в масс. %: Fe – 13,5 % Cr – 2 % W – 0,3 % Y_2O_3 , с содержанием Ti: 0, 0,2, 0,3, 0,4 масс. %. Выполнен анализ пространственного распределения химических элементов в исследованных объемах. Проведено сравнение состава матрицы, размеров и концентрации наноразмерных кластеров, содержащихся в исследованных объемах. Показано, что средний размер нанокластеров (~ 3 нм) практически не изменяется с увеличением концентрации Ti, в то время как концентрация кластеров возрастает от $\sim 1 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ в сплаве без Ti до $\sim 1,5 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ для сплава с содержанием 0,4 масс. % Ti.

Ключевые слова: томографическая атомно-зондовая микроскопия, ДУО стали, дисперсионное упрочнение, наноструктура.

Введение

Дисперсно-упрочненные оксидами (ДУО) ферритно-мартенситные стали с быстрым спадом наведенной активности — перспективные конструкционные материалы для ядерных и термоядерных реакторов нового поколения [1, 2]. Они обладают повышенными длительной прочностью и радиационной стойкостью по сравнению с существующими ферритно-мартенситными сталями [3].

Исследования коррозионной стойкости разрабатываемых дисперсно-упрочненных сталей показывают недостаточную коррозионную стойкость сталей с содержанием хрома 9–12 масс. % [4]. Этот эффект обусловлен сегрегацией хрома на различных особенностях структуры, содержащихся в значительном количестве в этих материалах, и, соответственно, обеднением матрицы материала по этому элементу. При облучении наблюдается спад твердого раствора с образованием областей с повышенной и пониженной концентрацией хрома [5]. Эти эффекты обусловили новую тенденцию в разработке ДУО сталей, а именно повышение содер-

жания хрома в исходном состоянии до 13 масс. % и выше [5, 6].

Известно, что механические свойства в значительной степени зависят от размера и пространственного распределения дисперсных включений [7, 8]. Наилучшие механические характеристики показывают ДУО ферритно-мартенситные стали, в которых дисперсные включения имеют наименьший размер [9]. Поэтому важной задачей разработчиков этих сталей является создание материалов с равномерно распределенной мелкодисперсной фазой.

Для разрабатываемых высокочромистых ДУО сталей требуется проведение оптимизации наноструктуры этих материалов. Для создания мелкодисперсной фазы из оксидов иттрия, равномерно распределенной по объему материала, добавляют легирующие элементы, например титан. Исследования показали, что добавление Ti вместе с Y_2O_3 в матричную сталь при механическом легировании приводит к образованию более мелких частиц содержащих Y, Ti и O и к более равномерному распределению оксидов в объеме материала [8, 10–12].

Цель работы — исследование наноструктурного состояния ферритно-мартенситной ДУО стали Fe – 13,5 % Cr – 2 % W – 0,3 % Y_2O_3 с содержанием титана 0,0,2, 0,3, 0,4 масс. %.

Материалы

Исследуемые в данной работе ферритно-мартенситной ДУО стали изготовлены Институтом Технологий Карлсруэ методами порошковой металлургии [10]. Порошок исходной матрицы Fe – 13,5 % Cr – 2 % W (в масс.%) смешивали с порошком 0,3 масс.% Y_2O_3 , с добавлением порошка Ti 0, 0,2, 0,3, 0,4 масс.% (табл. 1). Механическое легирование порошков проходило в аттиторной мельнице фирмы ZOZ в атмосфере H_2 . Измельченные порошки засыпали в стальную капсулу, затем проводили дегазацию в течение 4 ч в вакууме при температуре 400 °C. После дегазации, опрессовки и электронно-лучевой сварки крышки стальной капсулы, было произведено горячее изостатическое прессование в течение 2,5 ч при температуре 1150 °C и давлении 100 МПа. Дополнительных температурных и механических обработок не проводили.

Таблица 1

Химический состав 13,5%-хромистых сталей, дисперсно-упрочненных оксидами иттрия, в масс.%

№ сплава	Fe	Cr	W	Ti	Y_2O_3
1	84,2	13,5	2	0	0,3
2	84,0	13,5	2	0,2	0,3
3	83,9	13,5	2	0,3	0,3
4	83,8	13,5	2	0,4	0,3

Образцы для томографических атомно-зондовых исследований в виде иглы с радиусом закругления кончика 10 – 50 нм и конусностью не более 11° изготавливали методом электрохимической полировки [13].

Методика атомно-зондовых исследований, обработка результатов

Исследования проводили на оптическом томографическом атомном зонде в Институте теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова. Подробно методика атомно-зондовой томографии описана в [14]. При проведении исследований в рабочем объеме поддерживали вакуум ниже $8 \cdot 10^{-10}$ торр, температура образца составляла 72 – 75 К. На образец подавали постоянное напряжение 1 – 10 кВ, величина импульсного напряжения на контрэлектроде составляла 20 % от постоянного на образце.

Обработка результатов включала в себя расшифровку полученного масс-спектра и анализ пространственного распределения химических элементов в исследованных объемах. Для анализа обнаруженных наноразмерных особенностей использовали метод максимального разделения [14], который позволяет выделить кластеры, то есть, наноразмерные области обогащенные различными химическими элементами, и получить информацию об их размере, составе и плотности.

Результаты

Проведено исследование ДУО сплавов четырех составов, масс. %: Fe – 13,5 % Cr – 2 % W – 0,3 % Y_2O_3 , с содержанием Ti 0, 0,2, 0,3, 0,4 масс.%. Сравнение средних концентраций химических элементов в исследованных объемах и матрице представлено в табл. 2 и 3, соответственно. Выявлено, что помимо заявленных элементов, во всех сплавах присутствуют примеси Si, Mn, V, Ni, Co и др. химических элементов (табл. 2). Вероятно, это связано с недостаточной чистотой исходных порошков, из которых были изготовлены исследуемые стали, или их загрязнением в процессе механического легирования [10]. Наблюдается разброс по концентрации хрома для разных сплавов. Возможно, это связано с неравномерным распределением данного элемента по материалу, то есть сегрегацией на разных стоках, уходом атомов хрома на границу зерен и т.д.

В процессе исследования во всех исследуемых ДУО сталях были обнаружены наноразмерные кластеры. В стали, не содержащей Ti, наблюдаются кластеры (плотность $\sim 10^{23} \text{ м}^{-3}$, размер 2 – 6 нм), обогащенные O, V, Y (табл. 4). При добавлении Ti в материал наноструктура сильно изменяется — значительно возрастает число кластеров, обогащенных Ti, O, Y, V (табл. 5), при этом уменьшается их размер. Подобная картина наблюдается для всех рассмотренных сплавов, содержащих Ti. Плотность числа кластеров $\sim 10^{24} \text{ м}^{-3}$, размеры 2 – 4 нм.

В образцах стали без добавления Ti, кластеры главным образом обогащены O, Y, V. При легировании материала небольшим количеством Ti (0,2 – 0,4 масс.%) состав кластеров изменяется: обогащение, главным образом, по O и Ti, а также по Y, V. При дальнейшем добавлении Ti в рассматриваемые ДУО стали обогащение кластеров по O и Y уменьшается (табл. 4). В тоже время, для стали с 0,3 масс.% Ti наблюдается небольшое снижение числа кластеров, по сравнению со сталью с 0,2 и 0,4 масс.% Ti. Средний размер кластера при этом не меняется, и составляет ~ 3 нм. Отметим, что обнаруженные

Таблица 2

Средние значения концентраций химических элементов в исследованных объемах для различных состояний 13,5%-Cr ДУО сталей, в ат.%

Химический элемент	№ сплава			
	1	2	3	4
N	0,003 ± 0,002	—	0,006 ± 0,001	0,029 ± 0,003
O	0,05 ± 0,03	0,23 ± 0,02	0,15 ± 0,01	0,29 ± 0,02
V	0,04 ± 0,01	0,08 ± 0,01	0,08 ± 0,01	0,064 ± 0,004
Mn	0,02 ± 0,01	0,033 ± 0,003	0,035 ± 0,002	0,030 ± 0,004
Y	0,02 ± 0,01	0,07 ± 0,01	0,032 ± 0,002	0,06 ± 0,01
C	0,004 ± 0,002	0,057 ± 0,004	0,05 ± 0,01	0,08 ± 0,02
Cr	12,4 ± 1,3	16,5 ± 0,6	16,5 ± 0,4	13,9 ± 0,6
Si	0,06 ± 0,01	0,15 ± 0,01	0,15 ± 0,01	0,15 ± 0,01
P	0,005 ± 0,002	0,010 ± 0,001	0,018 ± 0,004	0,019 ± 0,002
W	0,5 ± 0,1	0,55 ± 0,01	0,50 ± 0,03	0,49 ± 0,02
Ni	0,6 ± 0,1	0,67 ± 0,04	0,52 ± 0,03	0,63 ± 0,02
Ti	—	0,10 ± 0,01	0,09 ± 0,01	0,22 ± 0,02
Co	0,23 ± 0,03	0,15 ± 0,01	0,34 ± 0,02	0,13 ± 0,01
Nb	0,02 ± 0,01	0,029 ± 0,003	0,024 ± 0,003	0,038 ± 0,003

Таблица 3

Средние значения концентраций химических элементов в матрице исследованных объемов для различных состояний 13,5%-Cr ДУО сталей, в ат.%

Химический элемент	№ сплава			
	1	2	3	4
N	0,003 ± 0,002	—	0,005 ± 0,001	0,028 ± 0,003
O	0,04 ± 0,01	0,19 ± 0,01	0,11 ± 0,01	0,21 ± 0,01
V	0,04 ± 0,01	0,07 ± 0,01	0,063 ± 0,004	0,056 ± 0,003
Mn	0,022 ± 0,004	0,033 ± 0,003	0,035 ± 0,003	0,030 ± 0,004
Y	0,009 ± 0,003	0,047 ± 0,003	0,023 ± 0,002	0,04 ± 0,01
C	0,004 ± 0,002	0,055 ± 0,003	0,05 ± 0,01	0,07 ± 0,02
Cr	12,4 ± 1,3	16,5 ± 0,6	16,4 ± 0,1	13,7 ± 0,6
Si	0,06 ± 0,01	0,15 ± 0,01	0,15 ± 0,01	0,15 ± 0,01
P	0,006 ± 0,002	0,010 ± 0,001	0,018 ± 0,004	0,019 ± 0,003
W	0,5 ± 0,1	0,55 ± 0,01	0,50 ± 0,03	0,49 ± 0,02
Ni	0,6 ± 0,1	0,67 ± 0,01	0,52 ± 0,03	0,64 ± 0,02
Ti	—	0,070 ± 0,004	0,059 ± 0,003	0,14 ± 0,02
Co	0,23 ± 0,03	0,15 ± 0,01	0,34 ± 0,02	0,13 ± 0,01
Nb	0,02 ± 0,01	0,027 ± 0,003	0,022 ± 0,003	0,033 ± 0,003

Таблица 4

Средние значения концентраций химических элементов в кластерах исследованных объемов для различных состояний 13,5%-Cr ДУО сталей, в ат.%

Химический элемент	№ сплава			
	1	2	3	4
N	—	—	0,1 ± 0,1	0,1 ± 0,1
O	3,6 ± 0,7	2,1 ± 0,6	2,0 ± 0,4	2,7 ± 0,6
V	0,5 ± 0,5	0,6 ± 0,3	0,8 ± 0,3	0,3 ± 0,2
Mn	0,2 ± 0,1	0,1 ± 0,1	0,1 ± 0,1	0,04 ± 0,04
Y	2,0 ± 0,4	1,0 ± 0,4	0,4 ± 0,2	0,6 ± 0,3
C	0,05 ± 0,04	0,1 ± 0,1	0,1 ± 0,1	0,1 ± 0,1
Cr	13,3 ± 1,6	19,1 ± 1,7	20,7 ± 1,4	18,6 ± 1,6
Si	0,9 ± 0,3	0,2 ± 0,2	0,2 ± 0,1	0,2 ± 0,1
P	—	0,01 ± 0,01	0,01 ± 0,01	0,03 ± 0,03
W	0,1 ± 0,1	0,3 ± 0,2	0,3 ± 0,2	0,3 ± 0,2
Ni	0,9 ± 0,3	0,6 ± 0,3	0,5 ± 0,2	0,6 ± 0,3
Ti	—	1,5 ± 0,5	1,4 ± 0,4	2,5 ± 0,6
Co	0,3 ± 0,1	0,1 ± 0,1	0,3 ± 0,2	0,1 ± 0,1
Nb	—	0,1 ± 0,1	0,1 ± 0,1	0,2 ± 0,1

Таблица 5

Средние значения плотности числа кластеров в исследованных объемах для различных состояний 13,5%-Cr ДУО сталей

	№ сплава			
	1	2	3	4
Содержание Ti, масс.%	0	0,2	0,3	0,4
Плотность числа кластеров, м^{-3}	$(1,4 \pm 0,9) \cdot 10^{23}$	$(1,5 \pm 0,4) \cdot 10^{24}$	$(0,8 \pm 0,2) \cdot 10^{24}$	$(1,8 \pm 0,3) \cdot 10^{24}$

клUSTERы также обогащены по хрому от 2 до 5 ат.%

Для ДУО сталей характерно наличие двух типов наноразмерных особенностей: наноразмерные (1 – 4 нм) кластеры, содержащие иттрий, кислород и значительное число других легирующих добавок (например, ванадия в стали ODS Eurofer [15]), а также оксидные частицы Y_2O_3 . Проведенные ранее исследования методом просвечивающей электронной микроскопии [10, 16] данных сплавов показали, что в материалах помимо кластеров с размерами 3 – 4 нм также содержатся оксидные частицы Y – Ti – O размеры которых преимущественно менее 20 нм, а также небольшое количество частиц с размерами до 100 нм. Отметим, что в сплаве с содержанием 0,3 масс.% Ti обнаружено наибольшее количество оксидных частиц с наименьшим размером (средний размер ~ 6 нм, плотность ~ 10^{21} м^{-3}) [16].

Заключение

Проведено томографическое атомно-зондовое исследование нано-масштабного состояния 13,5%-хромистой стали, дисперсно-упрочненной оксидами иттрия, с содержанием титана от 0 до 0,4 масс. %. Обнаружены наноразмерные кластеры, обогащенные по ряду элементов. В стали без Ti, кластеры главным образом обогащены O, Y, V. При легировании небольшим количеством Ti (0,2 – 0,4 масс. %) состав кластеров изменяется, кластеры обогащаются Ti. Отметим, что при добавлении Ti обогащение кластеров по O и Y уменьшается. Обнаружено обогащение наноразмерных кластеров по хрому в диапазоне 2 – 5 ат. %.

Средний размер кластеров во всех состояниях ~ 3 нм. Плотность числа кластеров в стали без Ti ~ 10^{23} м^{-3} . При добавлении 0,2 – 0,4 масс. % Ti количество кластеров возрастает на порядок (~ 10^{24} м^{-3}).

Проведенные атомно-масштабные исследования показали, что титан играет существенную роль в формировании тонкой структуры 13,5%-хромистой ДУО стали, способствуя образованию большого числа наноразмерных кластеров.

Работа выполнена при частичной поддержке Российской фонда фундаментальных исследований (грант 13-02-91326-СИГ_a).

Литература

- Klueh R.L., Harris D.R. High-chromium ferritic and martensitic steels for nuclear application. ASTM stock Number: MONO3, 2001, 220 p.
- Hirata A., Fujita T., Wen Y.R., Schneibel J.H., Liu C.T., Chen M.W. Atomic structure of nanoclusters in oxide dispersion strengthened steels, *Nature Materials*, 2011, v. 10, p. 922 – 926.
- Ukai S., Nishida T., Okada H., Fujiwara M., Asabe K. Development of oxide dispersion strengthened ferritic steels for FBR core application, (I) Improvement of mechanical properties by recrystallization processing. *Journal of nuclear science and technology*, 1997, v. 34, p. 256 – 263.
- Cho H.S., Kimura A., Ukai S., Fujiwara M. Corrosion properties of oxide dispersion strengthened steels in super-critical water environment. *Journal of Nuclear Materials*, 2004, v. 329 – 333, p. 387 – 391.
- Cho H.S., Kasada R., Kimura A. Effects of neutron irradiation on the tensile properties of high-Cr oxide dispersion strengthened ferritic steels. *Journal of Nuclear Materials*, 2007, v. 367 – 370, p. 239 – 243.
- Klueh R.L., Shingledecker J.P., Swindeman R.W., Hoelzer D.T. Oxide dispersion-strengthened steels: A comparison of some commercial and experimental alloys. *Journal of Nuclear Materials*, 2005, v. 341, p. 103 – 114.
- Ukai S., Fujiwara M. Perspective of ODS alloys application in nuclear environments. *Journal of Nuclear Materials*, 2002, v. 307 – 311, p. 749 – 757.
- Ukai S., Harada M., Okada H. et al. Tube manufacturing and mechanical properties of oxide dispersion strengthened ferritic steel. *Journal of Nuclear Materials*, 1993, v. 204, p. 74 – 82.
- Рогожкин С.В., Никитин А.А., Алеев А.А., Германов А.Б., Залужный А.Г. Атомно-зондовые исследования радиационно-индуцированных сегрегаций в ферритно-маргентситной стали Eurofer97, облученной в реакторе БОР-60. *Перспективные материалы*, 2012, № 5, с. 45 – 52.
- He P., Klimenkov M., Lindau R., Möslang A. Characterization of precipitates in nano structured 14% Cr ODS alloys for fusion application. *Journal of Nuclear Materials*, 2012, v. 428, p. 131 – 138.

11. He P., Liub T., Möslang A., Lindau R., Ziegler R., Hoffmann J., Kurinskiy P., Commin L., Vladimirov P., Nikitenko S., Silveir M. XAFS and TEM studies of the structural evolution of yttrium-enriched oxides in nanostructured ferritic alloys fabricated by a powder metallurgy process. *Materials Chemistry and Physics*, 2012, v. 136, p. 990 – 998.
12. Klueh R.L., Maziasz P.J., Kim I.S., Heatherly L., Hoelzer D.T., Hashimoto N. et al. Tensile and creep properties of an oxide dispersion-strengthened ferritic steel. *Journal of Nuclear Materials*, 2002, v. 307 – 311, p. 773 – 777.
13. Рогожкин С.В., Агеев В.С., Алеев А.А., Залужный А.Г., Леонтьева-Смирнова М.В., Никитин А.А. Томографическое атомно-зондовое исследование жаропрочной 12%-ной ферритно-мартенситной хромистой стали ЭК-181. *Физика металлов и металловедение*, 2009, т. 108, № 6, с. 612 – 618.
14. Miller M.K. *Atom Probe Tomography: Analysis at the atomic level*. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2000, 239 p.
15. Aleev A.A., Iskandarov N.A., Klimenkov M., Lindau R., Möslang A., Nikitin A.A., Rogozhkin S.V., Vladimirov P., Zaluzhnyi A.G. Investigation of oxide particles in unirradiated ODS Eurofer by tomographic atom probe. *Journal of Nuclear Materials*, 2011, v. 409, p. 65 – 71.
16. Рогожкин С.В., Богачев А.А., Кириллов Д.И., Никитин А.А., Орлов Н.Н., Алеев А.А., Залужный А.Г., Козодаев М.А. Влияние легирования титаном на микроструктуру дисперсно-упрочненной оксидами 13,5% хромистой стали. *Физика металлов и металловедение*, 2014, т. 115, № 12, с. 1328 – 1335.
17. dispersion strengthened ferritic steels. *Journal of Nuclear Materials*, 2007, vol. 367 – 370, pp. 239 – 243.
18. Klueh R.L., Shingledecker J.P., Swindeman R.W., Hoelzer D.T. Oxide dispersion-strengthened steels: A comparison of some commercial and experimental alloys. *Journal of Nuclear Materials*, 2005, vol. 341, pp. 103 – 114.
19. Ukai S., Fujiwara M. Perspective of ODS alloys application in nuclear environments. *Journal of Nuclear Materials*, 2002, vol. 307 – 311, pp. 749 – 757.
20. Ukai S., Harada M., Okada H. et al. Tube manufacturing and mechanical properties of oxide dispersion strengthened ferritic steel. *Journal of Nuclear Materials*, 1993, vol. 204, pp. 74 – 82.
21. Rogozhkin S.V., Nikitin A.A., Aleev A.A., Germanov A.B., Zaluzhnyi A.G. Atom probe study of radiation induced precipitates in Eurofer97 ferritic-martensitic steel irradiated in BOR60 reactor. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2013, vol. 4, no. 2, pp. 112 – 118.
22. He P., Klimenkov M., Lindau R., Möslang A. Characterization of precipitates in nano structured 14% Cr ODS alloys for fusion application. *Journal of Nuclear Materials*, 2012, vol. 428, pp. 131 – 138.
23. He P., Liub T., Möslang A., Lindau R., Ziegler R., Hoffmann J., Kurinskiy P., Commin L., Vladimirov P., Nikitenko S., Silveir M. XAFS and TEM studies of the structural evolution of yttrium-enriched oxides in nanostructured ferritic alloys fabricated by a powder metallurgy process. *Materials Chemistry and Physics*, 2012, vol. 136, pp. 990 – 998.
24. Klueh R.L., Maziasz P.J., Kim I.S., Heatherly L., Hoelzer D.T., Hashimoto N. et al. Tensile and creep properties of an oxide dispersion-strengthened ferritic steel. *Journal of Nuclear Materials*, 2002, vol. 307 – 311, p. 773 – 777.
25. Rogozhkin S.V., Ageev V.S., Aleev A.A., Zaluzhnyi A.G., Leont'eva-Smirnova M.V., Nikitin A.A. Tomographic atom-probe analysis of temperature-resistant 12%chromium ferritic-martensitic steel EK181. *Physics of Metals and Metallography*, 2009, vol. 108, pp. 579 – 585.
26. Miller M.K., Atom probe tomography: Analysis at the atomic level, New York, Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2000, 239 p.
27. Aleev A.A., Iskandarov N.A., Klimenkov M., Lindau R., Möslang A., Nikitin A.A., Rogozhkin S.V., Vladimirov P., Zaluzhnyi A.G. Investigation of oxide particles in unirradiated ODS Eurofer by tomographic atom probe. *Journal of Nuclear Materials*, 2011, vol. 409, pp. 65 – 71.
28. Rogozhkin S.V., Bogachev A.A., Kirillova D.I., Nikitin A.A., Orlov N.N., Aleev A.A., Zaluzhnyi A.G., Kozodaev M.A. Effect of alloying with titanium on the microstructure of an oxide dispersion strengthened 13.5% Cr steel. *The Physics of Metals and Metallography*, 2014, vol. 115, no. 12, pp. 1259 – 1266.

References

1. Klueh R.L., Harris D.R. High-chromium ferritic and martensitic steels for nuclear application. *ASTM stock Number: MONO3*, 2001, p. 220.
2. Hirata A., Fujita T., Wen Y.R., Schneibel J.H., Liu C.T., Chen M.W. Atomic structure of nanoclusters in oxide dispersion strengthened steels. *Nature Materials*, 2011, vol. 10, pp. 922 – 926.
3. Ukai S., Nishida T., Okada H., Okuda T., Fujiwara M., Asabe K. Development of oxide dispersion strengthened ferritic steels for FBR core application, (I) Improvement of mechanical properties by recrystallization processing. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 1997, vol. 34, pp.256 – 263.
4. Cho H.S., Kimura A., Ukai S., Fujiwara M. Corrosion properties of oxide dispersion strengthened steels in supercritical water environment. *Journal of Nuclear Materials*, 2004, vol. 329 – 333, pp. 387 – 391.
5. Cho H.S., Kasada R., Kimura A. Effects of neutron irradiation on the tensile properties of high-Cr oxide

Статья поступила в редакцию 2.06.2014 г.

Рогожкин Сергей Васильевич — Национальный Исследовательский Университет “МИФИ” (г. Москва); НИЦ “Курчатовский институт” ФГБУ “Государственный научный центр Российской Федерации – Институт Теоретической и Экспериментальной Физики” (г. Москва), начальник отдела, доктор физико-математических наук, специалист в области физики твердого тела. E-mail: sergey.rogozhkin@itep.ru.

Орлов Николай Николаевич — НИЦ “Курчатовский институт” ФГБУ “Государственный научный центр Российской Федерации – Институт Теоретической и Экспериментальной Физики” (г. Москва), инженер; Национальный Исследовательский Университет “МИФИ” (г. Москва), инженер, специалист в области ультрамикроскопии. E-mail: Nikolay.Orlov@itep.ru.

Алеев Андрей Аскольдович — НИЦ “Курчатовский институт” ФГБУ “Государственный научный центр Российской Федерации – Институт Теоретической и Экспериментальной Физики” (г. Москва), научный сотрудник; Национальный Исследовательский Университет “МИФИ” (г. Москва), ассистент, специалист в области физики твердого тела. E-mail: andrey.aleev@itep.ru.

Никитин Александр Александрович — НИЦ “Курчатовский институт” ФГБУ “Государственный научный центр Российской Федерации — Институт Теоретической и Экспериментальной Физики” (г. Москва), научный сотрудник; Национальный Исследовательский Университет “МИФИ” (г. Москва), ассистент, специалист в области ультрамикроскопии. E-mail: aleksandr.nikitin@gmail.com.

Залужный Александр Георгиевич — Национальный Исследовательский Университет “МИФИ” (г. Москва), НИЦ “Курчатовский институт” ФГБУ “Государственный научный центр Российской Федерации — Институт Теоретической и Экспериментальной Физики” (г. Москва), доктор физико-математических наук, профессор. E-mail: Zaluzhnyi@itep.ru.

Козодаев Михаил Александрович — Национальный Исследовательский Университет “МИФИ” (г. Москва), НИЦ “Курчатовский институт” ФГБУ “Государственный научный центр Российской Федерации – Институт Теоретической и Экспериментальной Физики” (г. Москва), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, специалист в области ультрамикроскопии. E-mail: mkozodaev@ptmpractice.ru.

Lindau Rainer — Institute for Applied Materials – Applied Materials Physics (IAM-AWP), Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany, senior researcher. E-mail: rainer.lindau@kit.edu.

Möslang Anton — Institute for Applied Materials – Applied Materials Physics (IAM-AWP), Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany, acting Head. E-mail: anton.moeslang@kit.edu.

Vladimirov Pavel — Institute for Applied Materials – Applied Materials Physics (IAM-AWP), Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany, senior researcher. E-mail: pavel.vladimirov@kit.edu.

Nanoscale characterisation of 13.5% Cr ODS steels with various titanium concentration

S. V. Rogozhkin, N. N. Orlov, A. A. Nikitin, A. A. Aleev, A. G. Zaluzhny, M. A. Kozodaev, R. Lindau, A. Möslang, P. Vladimirov

Atom probe data on oxide dispersed strengthened steel Fe – 13.5% Cr – 2%W – 0.3% Y_2O_3 with the different content of Ti (0, 0.2, 0.3, 0.4 wt.%) has been acquired. Analysis of spatial distribution of alloying elements in the investigated volumes, matrix composition, size and number density of oxide nanoparticles was carried out. It is showed that the number density of oxide particles grows from $\sim 1 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$ (for 0 wt.% Ti steel) up to $\sim 1.5 \cdot 10^{24} \text{ m}^{-3}$ (for 0.4 wt.% Ti steel) yet the mean size of these particles remains stable (about $\sim 3 \text{ nm}$).

Keywords: atom probe tomography, ODS steels, oxide-dispersed strengthened steel, nanostructure.

Rogozhkin Sergey — National Research Nuclear University MEPhI (Moscow), State Scientific Center of the Russian Federation — Institute for Theoretical and Experimental Physics of NRC “Kurchatov Institute” (Moscow), DrSci (Phys-Math), Head of department. E-mail: sergey.rogozhkin@itep.ru.

Orlov Nikolay — State Scientific Center of the Russian Federation — Institute for Theoretical and Experimental Physics of NRC “Kurchatov Institute” (Moscow), National Research Nuclear University MEPhI (Moscow), engineer. E-mail: Nikolay.Orlov@itep.ru.

Nikitin Aleksandr — State Scientific Center of the Russian Federation — Institute for Theoretical and Experimental Physics of NRC “Kurchatov Institute” (Moscow), National Research Nuclear University MEPhI (Moscow), research assistant. E-mail: aleksandr.nikitin@gmail.com.

Aleev Andrey — State Scientific Center of the Russian Federation — Institute for Theoretical and Experimental Physics of NRC “Kurchatov Institute” (Moscow), National Research Nuclear University MEPhI (Moscow), research assistant. E-mail: andrey.aleev@itep.ru.

Zaluzhnyi Alexander — National Research Nuclear University MEPhI (Moscow), State Scientific Center of the Russian Federation — Institute for Theoretical and Experimental Physics of NRC “Kurchatov Institute” (Moscow), DrSci (Phys-Math), professor. E-mail: Zaluzhnyi@itep.ru.

Kozodaev Mikhail — State Scientific Center of the Russian Federation — Institute for Theoretical and Experimental Physics of NRC “Kurchatov Institute” (Moscow), National Research Nuclear University MEPhI (Moscow), PhD, senior researcher. E-mail: mkozodaev@pmpractice.ru.

Lindau Rainer — Institute for Applied Materials — Applied Materials Physics (IAM-AWP), Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany, senior researcher. E-mail: rainer.lindau@kit.edu.

Möslang Anton — Institute for Applied Materials — Applied Materials Physics (IAM-AWP), Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany, acting head. E-mail: anton.moeslang@kit.edu.

Vladimirov Pavel — Institute for Applied Materials — Applied Materials Physics (IAM-AWP), Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany, senior researcher. E-mail: pavel.vladimirov@kit.edu.