

PACS: 34.80.Dp, 61.66.Bi, 81.20.-n, 82.80.Ej

STUDY UNIFORM DISTRIBUTION OF ELEMENTS IN THE OXIDE DISPERSIVE STRENGTHENED STEEL

**D.V. Koblik, V.V. Levenets, O.P. Omelnik, A.O. Shchur,
B.V. Borts, I.V. Korotkova, V.I. Tkachenko**

National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology"

1, Akademicheskaya St., 61108, Kharkov, Ukraine

Email: levenets@kipt.kharkov.ua

Received December 24, 2014

The distribution of elements in the oxide dispersive strengthened steel at the outputted proton beam into the atmosphere is study. The experiments were performed on an analytical nuclear-physical complex "Sokol" is study. For the analysis of the samples obtained were used vacuum arc melting of steel industry 08Cr18Ni10Ti into which the hardening particles ZrO_2 stabilized Y_2O_3 , with a size of 0.1 – 0.5 microns. Mathematical processing of spectral data obtained by mass composition of basic elements and doping impurities studied oxide dispersive strengthened steel. The uniformity of the distribution of elements was studied on entire surface of the sample.

KEYWORDS: oxide dispersive strengthened steel, beam of protons, uniform distribution, concentration of elements

ДОСЛІДЖЕННЯ РІВНОМІРНОСТІ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕМЕНТІВ У ДИСПЕРСІЙНО ЗМІЦНЕНІЙ ОКСИДАМИ СТАЛІ

**Д.В. Коблік, В.В. Левенець, О.П. Омельник, А.О. Щур,
Б.В. Борц, І.В. Короткова, В.І. Ткаченко**

Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут»

вул. Академічна, 1, м. Харків, 61108, Україна

Досліджено розподіл елементів у дисперсійно зміцненій оксидами сталі на виведеному в атмосферу пучку протонів. Експерименти проводилися на аналітичному ядерно-фізичному комплексі "Сокол". Для аналізу використовувалися зразки отримані вакуумно-дугового плавленням із промислової сталі 08X18H10T, в яку вводилися зміцнюючі частки ZrO_2 стабілізовані Y_2O_3 , з розміром 0,1 – 0,5 мкм. Математичною обробкою спектральної інформації отримано масовий склад базових елементів і легуючих домішок досліджуваної дисперсійно зміцненій оксидами сталі. Проведено дослідження рівномірності розподілу елементів, що охоплює всю поверхню зразка.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: дисперсійно зміцнена оксидами сталь, пучок протонів, рівномірність розподілу, концентрація елементів

ИССЛЕДОВАНИЕ РАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ В ДИСПЕРСИОННО УПРОЧНЕННОЙ ОКСИДАМИ СТАЛИ

**Д.В. Коблик, В.В. Левенец, А.П. Омельник, А.А. Щур,
Б.В. Борц, И. Короткова, В.И. Ткаченко**

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»

ул. Академическая, 1, г. Харьков, 61108, Украина

Исследовано распределение элементов в дисперсионно упрочненной оксидами стали на выведенном в атмосферу пучке протонов. Эксперименты проводились на аналитическом ядерно-физическом комплексе "Сокол". Для анализа использовались образцы полученные вакуумно-дуговой плавкой из промышленной стали 08X18H10T, в которую вводились упрочняющие частицы ZrO_2 стабилизированные Y_2O_3 , с размером 0,1 – 0,5 мкм. Математической обработкой спектральной информации получено массовый состав базовых элементов и легирующих примесей исследуемой дисперсионно упрочненной оксидами стали. Проведено исследование равномерности распределения элементов, охватывающее всю поверхность образца.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дисперсионно упрочненная оксидами сталь, пучок протонов, равномерность распределения, концентрация элементов

Для решения проблем реакторного материаловедения большой научный и практический интерес в настоящее время представляют работы, посвященные исследованию нового класса материалов, способных эксплуатироваться в условиях интенсивного облучения. К таким материалам, в частности, относятся дисперсно-упрочненные оксидами (ДУО) сплавы [1,2]. Повышение радиационной стойкости таких сплавов связано с созданием в материале эффективных ловушек вакансий, которыми могут являться оксидные частицы [3]. Дисперсно-упрочненные материалы сохраняют микроструктурное строение и дислокационную структуру, а следовательно, и работоспособность до температуры $0,9 - 0,95 T_{пл}$ (где $T_{пл}$ – температура плавления матрицы). Высокая работоспособность дисперсно-упрочненных материалов при повышенных температурах объясняется наличием в матрице второй фазы, скопление дислокаций в зернах металла становится возможным при

больших напряжениях, границы зерен блокируются, а рост зерен затормаживается практически до температуры плавления матрицы.

Существует большое разнообразие методов исследования структуры ДУО-сталей. Так, для определения наномасштабных особенностей материалов широкое распространение получил метод томографической атомно-зондовой микроскопии [4,5]. Для изучения микроструктуры применяются методы рентгеновской дифракции, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и просвечивающей электронной микроскопии [6]. В работе [7] анализ наночастиц в ДУО-стали Eurofer-97 осуществлялся методом лазерной импульсной зондовой томографии. С использованием методов анализа протяженной тонкой структуры рентгеновского спектра поглощения, просвечивающей электронной и растровой электронной микроскопией в работе [8] была определена кристаллическая структура иттриевых наночастиц. В работе [9] с помощью ядерного микронзонда исследовалось распределение Y в ферритно-мартенситной ДУО-стали до и после длительного (5000 ч) отжига на воздухе. Распределение наночастиц по размерам в объеме слитков ДУО-стали изучалось в [10] методом малоуглового рентгеновского рассеяния. В [11] методами масс-спектрометрии вторичных ионов и нейтральных частиц проводилось профилирование оксидной пленки на ДУО-сталях. В [12] для сравнительного анализа ДУО и обычных сплавов Eurofer использовали позитронную аннигиляционную спектроскопию с доплеровским уширением, а в [13] метод позитронной аннигиляции со спектроскопией орбитальных моментов применяли для изучения влияния добавок Y_2O_3 на свойства ферритных сплавов.

Одной из важнейших характеристик ДУО-сталей является равномерность распределения оксидных частиц. Выяснено, что наиболее эффективное упрочнение обеспечивается при содержании упрочняющей фазы в количестве 3 – 15% и размере ее частиц до 1 мкм [14]. Однако, в литературе отсутствуют общепринятые численные характеристики для отражения равномерности распределения частиц вещества в материале. Более того, при его относительности оно может зависеть от размера исследуемого объема объекта. Например, в работе [15] исследовалось распределение элементов в различных по размеру объемах образца и сравнивались полученные значения содержания отдельных элементов с величиной содержания, полученной для всего объема объекта. В результате было выявлено значительное расхождение в величинах содержаний. На рис.1 показано распределение элементов для исследуемого объема размером $9 \times 9 \times 68 \text{ nm}^3$. Видно, что в выделенных пространствах присутствуют области с повышенным содержанием атомов O, N, V, Y, объединенных в кластеры, которые могут являться зародышами более крупных дисперсных включений.

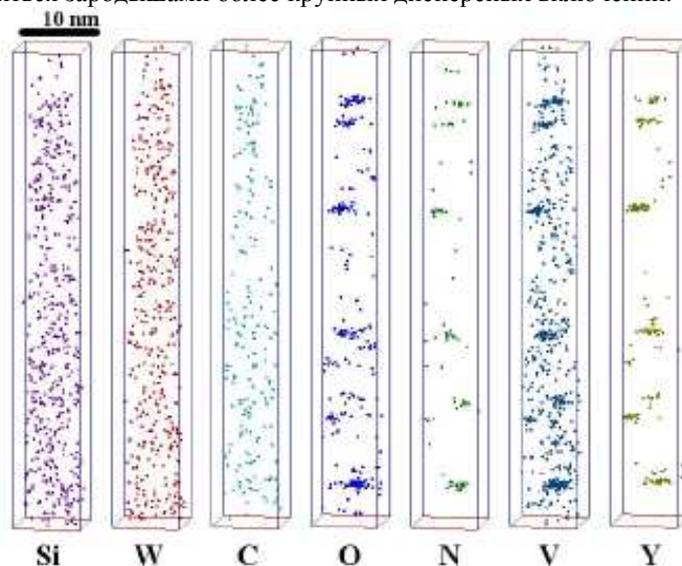


Рис. 1. Трехмерное распределение химических элементов в стали ODS-Eurofer 97 (0,5 % Y_2O_3). Размер исследованной области $9 \times 9 \times 68 \text{ nm}^3$ [15].

Возможно получение ДУО-сплавов путем плавления. При этом в процессе соединения оксидных порошков с расплавленным металлом происходят различные процессы: удаление газов и адсорбированных на поверхности частиц, возгонка различных примесей, снятие остаточных напряжений на контактных участках между частицами и в самих частицах, восстановление оксидных пленок, растворение или коагуляция, перестройка поверхностного слоя в результате диффузии и переноса металла в виде пара с одних мест в другие. Контакт между оксидными частицами превращается в металлический, происходит срачивание частиц и изменение соотношения между порами и объемом металла в сторону уменьшения объема пор. С учетом всех обстоятельств необходимо получить слиток с возможно более равномерным распределением элементов.

Целью работы является разработка методики неразрушающего контроля ядерно-физическим методом анализа вещества на пучке протонов, выпущенном в атмосферу основных и легирующих компонент сплава, а также исследование их распределения в реальных изделиях – слитках, трубах и т.д. для ДУО-стали, полученной вакуумным плавлением.

ПОЛУЧЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ

При создании дисперсно-упрочненных материалов выбирают фазу-упрочнитель и способ введения ее в матрицу. Фаза-упрочнитель должна иметь высокую термодинамическую прочность, малую величину скорости диффузии компонентов фазы в матрицу, высокую чистоту и большую суммарную поверхность частиц. Способ введения частиц фазы-упрочнителя в матрицу влияет на структуру дисперсно-упрочненного материала, которая может быть дисперсной или агрегатной.

В данной работе получение ДУО-сплава проводили путем введения оксидных частиц в расплав материала на промышленной стали типа 08X18H10T. В качестве упрочняющих частиц использовался диоксид циркония ZrO_2 , стабилизированный оксидом иттрия Y_2O_3 с размером 0,1 – 0,5 мкм. В переплавляемом стальном электроде диаметром 30 мм в радиальном направлении высверливались отверстия диаметром 3 мм, в которые засыпался легирующий порошок. Элементный состав упрочняющих оксидных частиц, стабилизированных иттрием, приведен в таблице 1.

Таблица 1.

Содержание химических элементов в порошке ZrO_2 .

Элементы	Концентрация, масс. %
B	0,0090±0,0002
O	25,05±0,99
F	0,0134±0,0002
Na	0,0079±0,0003
Al	0,033±0,017
Ca	0,012±0,004
Ti	0,0014±0,004
Mn	0,0039±0,004
Fe	0,034±0,003
Ni	0,0057±0,0009
Y	5,31±0,15
Zr	69,0±0,65
Nd	0,0032±0,004
Hf	0,024±0,008
Pb	0,015±0,005

Плавление электрода с легирующими добавками осуществлялось в вакуумной камере (10^{-3} Па) в процессе горения электрической дуги. Кристаллизация и последующее охлаждение ДУО-стали происходили в вакуумной камере печи, после чего слиток извлекался на воздух [16]

Таким образом были получены слитки ДУО-стали с расчетным содержанием 0,02 и 0,075 масс.% легирующих частиц $ZrO_2 + Y_2O_3$. Важной операцией технологического процесса производства ДУО-стали является оперативный контроль распределения легирующих элементов, а также других примесей по объему слитка. Поэтому для проведения аналитических исследований и дальнейшей прокатки, слиток был разрезан вдоль оси на несколько образцов (рис.2). Для каждого из полученных темплетов был определен состав и пространственное распределение элементов.



Рис. 2. Разрезанный слиток 08X18H10T с 0,02 вес. % $ZrO_2 + Y_2O_3$. (слева), макроструктура центрального темплета слитка (справа).

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Эксперименты проводились на аналитическом ядерно-физическом комплексе (АЯФК) “Сокол” ННЦ ХФТИ [15]. Он содержит в своем составе 4 аналитических канала и канал облучения материалов ионами газов вплоть до Хе с энергиями 200 – 2000 кэВ [17]. АЯФК “Сокол” позволяет реализовать основные ядерно-физические методы анализа на пучках ионов: характеристического рентгеновского излучения (ХРИ), резерфордского обратного рассеяния (РОР), метод ядерных реакций (МЯР), метод ядер отдачи (ЯО), метод вторичного рентгеновского излучения (РХХ). Они могут применяться по отдельности или комплексно, что значительно расширяет аналитические возможности. Выпущенный в атмосферу пучок протонов может быть использован для исследования крупных объектов и изделий.

Пучок протонов после ускорения и прохождения через распределительный магнит выводится в ионопровод канала. Далее его поперечное сечение последовательно формируется системой диафрагм. На отрезке между последними диафрагмами пучок проходит между двумя пластинами системы режекции спектрометрических импульсов с электростатическим отклонением пучка. После прохождения через медный коллиматор диаметром 2 мм пучок достигает фольги в окошке выхода пучка в атмосферу. Материал выходной фольги – алюминий, толщиной 7 мкм [18].

Предварительно были проведены исследования по определению оптимальных условий измерения содержания легирующих добавок Y и Zr в нержавеющей стали, в ходе которых были выбраны анализируемые линии спектров, энергия и ток протонного пучка, материал и толщина поглощающих фильтров.

В эксперименте использовались полупроводниковые детекторы, регистрирующие рентгеновское и γ -излучение. Регистрация рентгеновского излучения осуществлялась Si(PiN)-детектором XR-100CR с энергетическим разрешением 163 эВ по линии 5,9 кэВ, расположенным под углом 140° по отношению к пучку. Перед детектором размещался поглотитель из алюминия толщиной 200 мкм. Наиболее подходящим диапазоном энергий для Si(PiN)-детектора без снижения эффективности регистрации является 1 – 30 кэВ. Ge(Li)-детектор предназначен для измерения спектров γ -излучения. Детектор характеризуется энергетическим разрешением 2,5 кэВ по линии 1332 кэВ, расположен под углом 90° по отношению к пучку и окружен свинцовым цилиндрическим экраном толщиной 20 мм для уменьшения фона (рис.3). Эффективным диапазоном энергий для Ge(Li)-детектора является диапазон от 60 кэВ до 10 МэВ. Спектры измерялись при энергии 1716 кэВ до набора прошедшего через мишень заряда 25 мкКл, при токе пучка 30 нА.

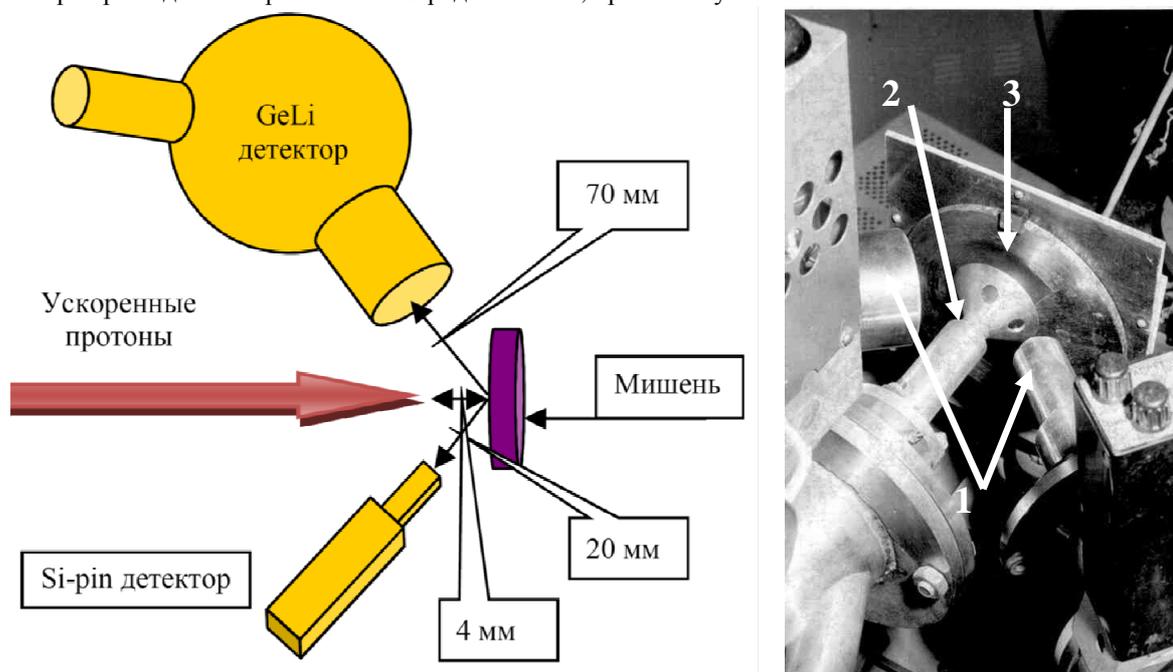


Рис. 3. Геометрическая схема эксперимента (слева), облучение пучком протонов одного из темплетов (справа)
 1- детекторы рентгеновского и гамма-излучений; 2- выпуск пучка в атмосферу; 3- исследуемый темплет.

При исследовании равномерности распределения элементов в темплете необходимо иметь пучок протонов с известными характеристиками: размер пучка на мишени и распределение плотности частиц в пучке. Для определения этих параметров был проделан эксперимент с измерением спектра характеристического рентгеновского излучения (х.р.и.) мишени-пробника. Она представляла собой алюминиевый диск Ø 10 мм с закрепленным в центре медным диском Ø200 мкм. Мишень перемещалась с шагом 0,2 мм поперек пучка протонов. В каждой фиксированной точке измерялись спектры характеристического рентгеновского излучения (х.р.и.) К-серии Cu и Al и для уменьшения погрешности, связанной с измерением заряда, вычислялось отношение интенсивностей аналитических линий. и х.р.и. К-серии меди к алюминию. На рис. 4 показано,

полученное в результате серии измерений распределение интенсивности х.р.и. (адекватно плотности частиц) в протонном пучке. Видно, что оно имеет плато с резким спаданием к краям, а сам размер пучка характеризуется размером диафрагм формирования пучка.

Измерения тока пучка при исследовании темплетов осуществлялось по интенсивности излучения гамма – линии 991 кэВ из реакции $^{27}\text{Al}(\text{p},\gamma)^{28}\text{Si}$ на выходной фольге.

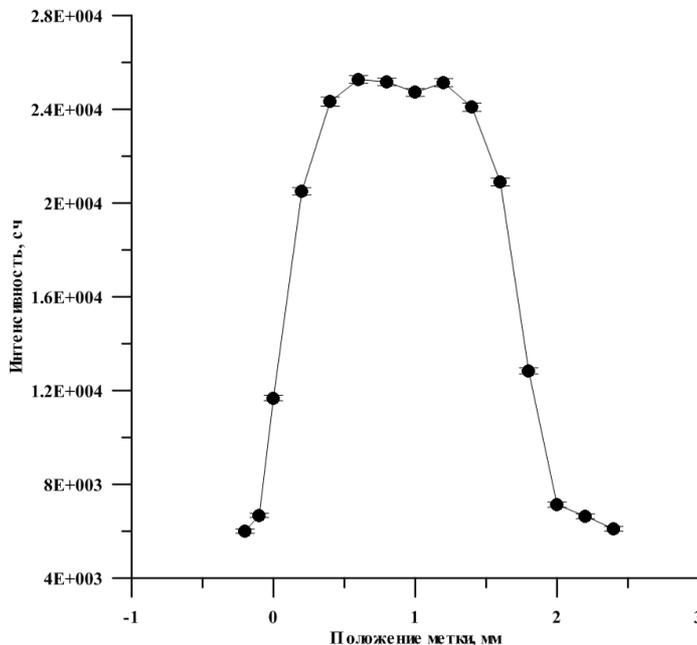


Рис. 4. Распределение интенсивности в протонном пучке.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Математическая обработка спектральной информации осуществлялась с использованием разработанной под эгидой МАГАТЭ программы «Winqas» (версия 1.30). Для получения оптимальной подгонки спектральных линий и фона варьировались фактор Фано и энергетическое разрешение детектора. Типичный вид спектра х.р.и. для образца ДУО-стали, где присутствуют добавленные элементы цирконий и иттрий приведен на рис. 5.

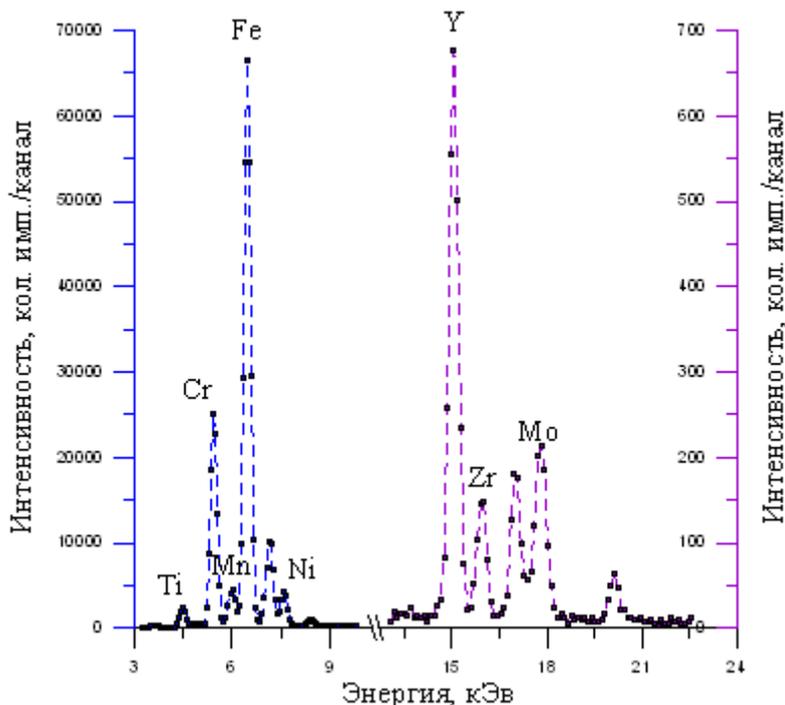


Рис. 5. Вид спектра х. р. и. образца ДУО-стали.

Эффективность регистрации х.р.и. детектором была определена экспериментально с использованием набора калибровочных источников рентгеновского излучения. Таким образом, используя данные таблиц физических величин, и экспериментальные данные относительно условий измерения спектров, был вычислено массовое содержание основных и примесных элементов исследуемой ДУО-стали. Результаты определения приведены в табл. 2.

Таблица 2.

Концентрация основных и легирующих элементов в ДУО-стали.

Элементы	Концентрация, масс. %
Ti	0,91 ± 0,03
Cr	12,62 ± 0,38
Mn	0,82 ± 0,05
Fe	71,86 ± 0,82
Ni	13,28 ± 0,33
Y	0,268 ± 0,030
Zr	0,087 ± 0,003
Mo	0,154 ± 0,009
B	0,0009 ± 0,0001
Na	0,0025 ± 0,0004
O	0,13 ± 0,04

Для полной картины равномерности распределения легирующих элементов было проведено дополнительное измерение, охватывающее всю поверхность образца. Для определения концентрации элементов выбраны «условные» точки, равноудаленные друг от друга по горизонтали на 21,25 мм, по вертикали – на 22,5 мм; расстояние от краев 4 мм (рис.6).

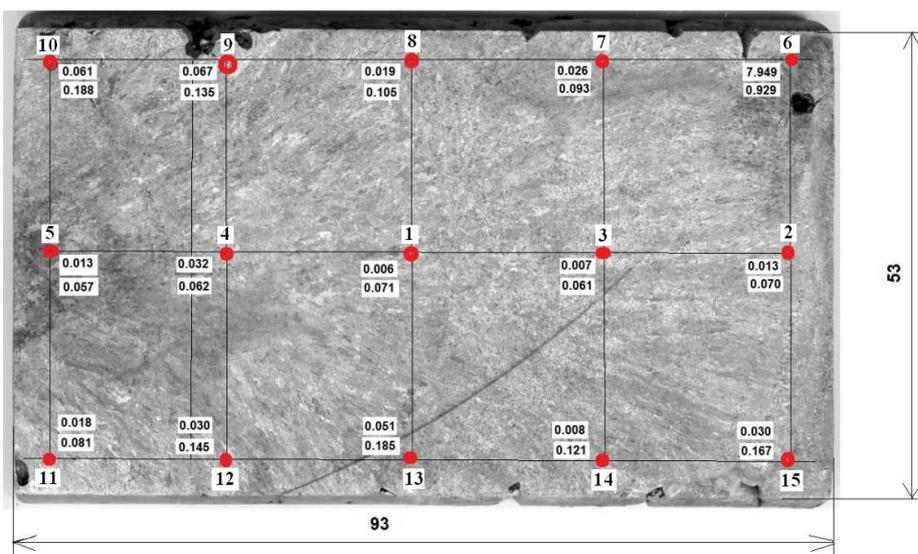


Рис. 6. Схематическое изображение образца с экспериментальными точками: верхнее значение – концентрация Zr, нижнее – Y.

Из табл. 3 видно, что концентрации иттрия и циркония в точке 6 существенно отличаются от их концентраций в других точках. Вероятно, при выплавке образца там образовалась неоднородность в виде раковины. В остальных точках отличие составляет десятые доли процента, что является вполне допустимым, если исходить из нормативных документов, регламентирующих состав стали. Однако, пространственное распределение элементов по образцу указывает на большую неоднородность в приповерхностном слое и на концах слитка по сравнению со срединной частью, что характерно для такого способа получения слитка.

Таблица 3.

Содержание элементов в разных точках образца.

Точка	Y, масс. %	Zr, масс. %	Mo, масс. %
1	0,071 ± 0,014	0,006 ± 0,019	0,159 ± 0,030
2	0,070 ± 0,013	0,013 ± 0,017	0,212 ± 0,028
3	0,061 ± 0,012	0,007 ± 0,016	0,193 ± 0,028
4	0,062 ± 0,014	0,032 ± 0,018	0,220 ± 0,028
5	0,057 ± 0,009	0,013 ± 0,011	0,151 ± 0,019
6	0,929 ± 0,032	7,949 ± 0,088	0,030 ± 0,037
7	0,093 ± 0,018	0,026 ± 0,018	0,225 ± 0,030

Точка	Y, масс. %	Zr, масс. %	Mo, масс. %
8	0,105 ± 0,018	0,019 ± 0,018	0,205 ± 0,028
9	0,135 ± 0,019	0,067 ± 0,019	0,280 ± 0,032
10	0,188 ± 0,021	0,061 ± 0,020	0,207 ± 0,030
11	0,081 ± 0,017	0,018 ± 0,017	0,216 ± 0,030
12	0,145 ± 0,018	0,030 ± 0,017	0,188 ± 0,030
13	0,185 ± 0,020	0,051 ± 0,019	0,234 ± 0,030
14	0,121 ± 0,020	0,008 ± 0,019	0,221 ± 0,032
15	0,167 ± 0,020	0,030 ± 0,018	0,186 ± 0,028

ВЫВОДЫ

Разработан неразрушающий метод исследования дисперсионно упрочненных оксидами сталей на выпущенном в атмосферу пучке протонов. Предложенная методика может быть использована для сертификации подобных материалов и отбора годных изготовленных изделий.

С помощью данного метода исследован как элементный состав образца ДУО-стали, так и пространственное распределение элементов. Установлена неоднородность пространственного распределения элементов. Концентрации элементов в приповерхностном слое и в объеме слитка различаются, что является характерным для такого способа получения слитка. Показано что при легировании сплавов оксидами редкоземельных элементов необходимо контролировать чистоту исходных материалов,

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ukai Sh., Harada M. Okada H. et al. Tube manufacturing and mechanical properties of oxide dispersion strengthened ferritic steel // Nucl. Mater. – 1993. – Vol. 204. – P. 74 – 82.
2. Azarenkov N.A., Voevodin V.N., Kirichenko V.G., Kovtun G.P. Nanostrukturnye materialy v yadernoj energetike // The Journal of Kharkiv National University (Physical series: Nuclei, Particles, Fields. – vyp. 1/45). – 2010. – No. 887. – S. 4 – 24.
3. Yutani K., Kishimoto H., Kasada R., Kimura A. Evaluation of Helium effects on swelling behavior of oxide dispersion strengthened ferritic steels under ion irradiation // Nucl. Mater. – 2007. – Vol. 367 – 370. – P. 423 – 427.
4. Miller M.K., Kenik E.A., Russell K.F., Heatherly L., Hoelzer D.T., Maziasz P.J. Atom probe tomography of nanoscale particles in ODS ferritic alloys // Mater. Sci. and Eng. A. – 2003. – Vol. 353. – P. 140 – 145.
5. Miller M.K., Russella K.F., Hoelzera D.T. Characterization of precipitates in MA/ODS ferritic alloys // Nucl. Mater. – 2006. – Vol. 351. – P. 261 – 268.
6. Phaniraj M.P., Kim Dong-Ik, Shim Jae-Hyeok, Young Whan Cho. Microstructure development in mechanically alloyed yttria dispersed austenitic steels // Acta Mater. – 2009. – Vol. 57. – P. 1856 – 1864.
7. Williams C.A., Marquis E.A., Cerezo A., Smith G.D.W. Nanoscale characterization of ODS-Eurofer 97 steel: An atom-probe tomography study // Nucl. Mater. – 2010. – Vol. 400. – P. 37 – 45.
8. Degueldre C., Conradson S., Hoffelner W. Characterization of oxide dispersion-strengthened steel by extended X-ray absorption spectroscopy for its use under irradiation // Comput. Mater. Sci. – 2005. – V. 33/ – P. 3 – 12.
9. Alves L.C., Alves E., Paul A., da Silva M.R., Odriozola J.A. Ion beam characterisation of ODS steel samples after long term annealing conditions // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. (Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms). – 2006. – Vol. 249. – P. 493 – 496.
10. Ohnumaa M., Suzukib J., Ohtsukac S., Kimc S.-W., Kaitoc T., Inouec M., Kitazawaa H. A new method for the quantitative analysis of the scale and composition of nanosized oxide in 9Cr-ODS steel // Acta Mater. – 2009. – Vol. 57. – P. 5571 – 5581.
11. Pfeiferl J.P., Holzbrecher H., Quadackers W.J., Breuer U., Speier W. Quantitative analysis of oxide films on ODS- alloys using MCs⁺ - SIMS and e-beam SNMS. Fresenius' // Anal. Chem. – 1993. – V. 346. – P. 186 – 191.
12. Ortega Y., de Castro V., Monge M.A., Mucoz A., Leguey T., Pareja R. Positron annihilation characteristics of ODS and non-ODS EUROFER isochronally annealed // Nucl. Mater. – 2008. – Vol. 376. – P. 222 – 228.
13. Alinger M.J., Glade S.C., Wirth B.D., Odette G.R., Toyama T., Nagai Y., Hasegawa M. Positron annihilation characterization of nanostructured ferritic alloys // Mater. Sci. Eng. A. – 2009. – Vol. 518. – P. 150 – 157.
14. Rzhavskaia S.V. Materialovedenie: Ucheb. dlia vuzov. – 4 izd., pererab. i dop. – M.: Logos, 2004. – 424 s.
15. Nikitin A.A., Aleev A.A., Zaluzhnyj A.G. i dr. Tomograficheskie atomno-zondovye issledovania izmenenia struktury dispersno-uprochnennoj oksidami stali EUROFER ODS pod dejstviem nejtronnogo obluchenia // Reaktory na bystrykh nejtronakh: Vserossijskaa nauchnaa shkola dlia molodykh uchenykh, 26 – 30 okt. 2009 y. – Obninsk (Russia). – 2009. – S. 122 – 128.
16. Borts B.V., Vanzha A.Ph., Korotkova V.I. i dr. Issledovanie vozmozhnosti poluchenia dispersno-uprochnennykh oksidami (DUO) stalej metodom vakuumno-dugovogo pereplava // VANT (Physical series: Fizika radiatsionnykh povrezhdenij i radiatsionnoe materialovedenie). – 2010. – No.4 (92). – S. 117 – 124.
17. Bondarenko V.N., Glazunov L.S., Goncharov A.V. i dr. Analiticheskij yaderno-phizicheskij kompleks NNC KhPhTI "Sokol" // Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy: international conf., 29 May – 03 June, 2006 y.: abstracts. – Kyiv (Ukraine). – 2006. – P. 852 – 857.
18. Levenets V.V., Omelnik A.P., Schur A.A. Analiz redkozemelnykh elementov po kharakteristicheskomu rentgenovskomu izluchenu K-serii. VANT (Physical series: Fizika radiatsionnykh povrezhdenij i radiatsionnoe materialovedenie). – 2004. – No. 6 (14). – S. 47 – 52.
19. Levenets V.V., Omelnik A.P., Usikov N.P. i dr. Sistema rezheksii spektrometricheskikh impulsiv s elektrostatcheskim otkloneniem puchka protonov // Zbirnyk naukovykh prats SNUJaEtaP. – 2008. – No. 4 (28). – S. 143 – 149.