

С. В. РОГОЖКИН^{1,2}, А. В. КЛАУЗ^{1,2}, А. А. ХОМИЧ^{1,2}, А. А. БОГАЧЕВ^{1,2}, А. А. НИКИТИН^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО РАССЕЯНИЯ НА АНАЛИЗ НАНОСТРУКТУРЫ ДУО СТАЛЕЙ МЕТОДАМИ МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ

Методом малоуглового рассеяния нейтронов исследована 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.

S. V. ROGOZHNIKIN^{1,2}, A. V. KLAUZ^{1,2}, A. A. KHOMICH^{1,2}, A. A. BOGACHEV^{1,2}, A. A. NIKITIN^{1,2},

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

²National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

STUDY OF THE EFFECT OF MAGNETIC SCATTERING ON THE ANALYSIS OF THE NANOSTRUCTURE OF ODS STEELS BY SMALL-ANGLE NEUTRON SCATTERING

The nanostructure of ferritic-martensitic oxide dispersion-strengthened steels with different alloying systems (different content of Cr, V, W, Al and Zr) is investigated by small-angle neutron scattering. A comparison of the results of the study of the nanostructure of steels (oxide particles and clusters) in the ferromagnetic state with and without magnetic scattering is carried out. It is shown that oxide particles have a significantly higher magnetic contrast in comparison with nanoscale clusters. At the same time, the most accurate hardness values can be obtained by taking into consideration of both oxide inclusions and clusters.

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. Для детальной характеристики таких материалов применяют комплекс методик, таких как просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ), атомно-зондовая томография (АЗТ), малоугловое рентгеновское рассеяние (МУРР) и малоугловое рассеяние нейтронов (МУРН). 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 находиться в ферромагнитном состоянии. Целью настоящей работы является выявление роли магнитного рассеяния при анализе наноструктуры ДУО ферритно-мартенситных сталей.

В работе проведен анализ наноструктуры трех ДУО сталей Eurofer ODS, 13.5Cr-Fe3Y ODS и KP-4 gen1 ODS с различными системами легирования методом малоуглового рассеяния нейтронов с учетом магнитного рассеяния в ферромагнитном состоянии этих сталей [1, 2]. Исследуемые стали содержат значительное число оксидных включений и кластеров, детектируемых методами ПЭМ и АЗТ.

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

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.

Список литературы

1. S.V. Rogozhkin, A.V. Klauz, Yu. Ke, L. and others // *Nanomaterials* 2024, 14, 194. DOI: 10.3390/nano14020194.
2. S. V. Rogozhkin, A. V. Klauz, Yu. E. Gorshkova, and others // *Phys. Met. Metallogr.* 2024, Vol. 125, No. 1, pp. 93–99. DOI: 10.1134/S0031918X23602718.