

В.И. Бобровский¹, С.В. Афанасьев¹, В.И. Воронин¹, В.А. Казанцев¹, Н.В. Катаева¹,
В.И. Максимов¹, В.Д. Пархоменко¹, Н.В. Проскурнина¹, В.В. Сагарадзе¹

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

В экспериментах, по изучению процессов образования карбидных precipитатов в аустенитных стареющих сталях под влиянием нейтронного облучения подтверждены как генерация предвыделений карбида ванадия, так и рост его precipитатов с дозой облучения. Выяснены особенности протекания этих процессов по сравнению с термическим старением, обусловленные некогерентным характером предвыделений карбидов, формирующихся из каскадов радиационных дефектов. Из анализа нейтронографических данных определены их характеристики. Также обнаружено, что в структурно нестабильных аустенитных системах с эффектом памяти формы на основе $\gamma \rightarrow \epsilon$ мартенситного превращения нейтронное облучение может приводить к инициированию этого эффекта при температурах значительно ниже интервала его реализации в случае термических воздействий.

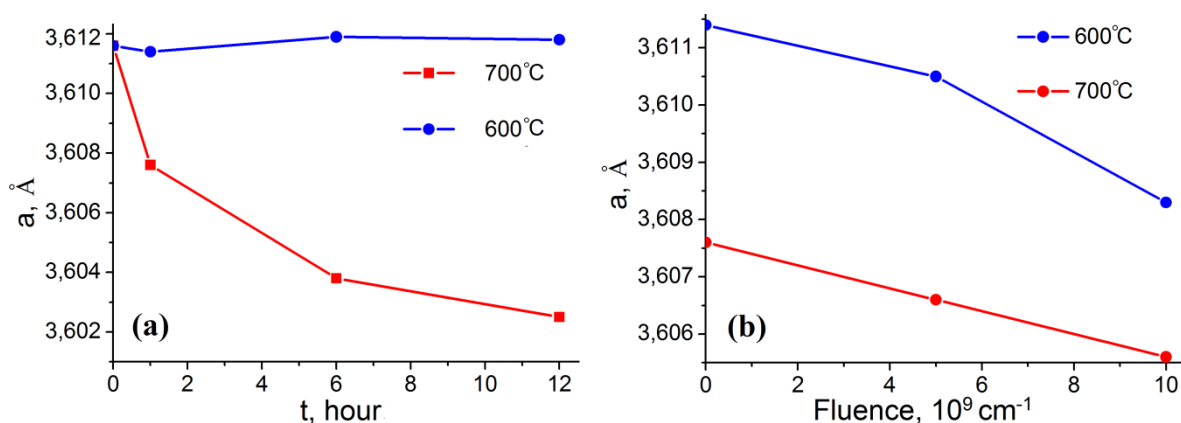


Рисунок 1 – Поведение параметра решетки стали 40X4Г18Ф2 в зависимости от времени старения при температурах 600°C и 700°C (a) и от флюенса быстрых нейтронов для образцов, подвергнутых облучению после старения в течение 1 часа (b)

Публикации:

1 Initiation of the Shape Memory Effect by Fast Neutron Irradiation / V.I. Bobrovskii, S.V. Afanasyev, V.I. Voronin, V.A. Kazantsev, N.V. Kataeva, V.D. Parkhomenko, N.V. Proskurnina, V.V. Sagaradze. – Текст: непосредственный // Physics of Metals and Metallography.- 2024.- V. 125.- P, 211–216.

2 Нейтронографическое исследование процессов формирования карбидных precipитатов в стали 40X4Г18Ф2 при термическом старении и облучении быстрыми нейтронами / В.И. Бобровский, В.И. Воронин, В.И. Максимов, В.Д. Пархоменко, Н.В. Проскурнина, В.В. Сагарадзе. – Текст: непосредственный // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures.- 2024.-№6.- (в печати).

Работа выполнена по теме шифр «Поток».

Актуальность исследования: Понимание механизмов радиационных повреждений реакторных конструкционных материалов необходимо для повышения безопасности их эксплуатации и достижения экономической конкурентоспособности с реакторами на тепловых нейтронах. Наши интересы в этой области связаны, прежде всего, с изучением радиационно-индуцированных процессов в аустенитных сталях, использующихся в качестве оболочек топливных элементов, а также в аустенитных сталях с эффектом памяти формы (ЭПФ). Важную роль в процессах эволюции этих многокомпонентных материалов под облучением играют нанопреципитаты интерметаллидных, фосфидных и карбидных фаз, в зависимости от типа способные служить как стоками радиационно-индуцированных дефектов, так и центрами конденсации вакансионных кластеров и образования пор.

Цель нашего исследования: экспериментально подтвердить генерацию нанопреципитатов карбида ванадия в модельных стареющих аустенитных сталях под воздействием нейтронного облучения и выяснить ее особенности сравнительно с процессами термического старения.

Задачи исследования:

- 1) Современными методами нейтронно-дифракционного анализа выполнить сравнительное изучение процессов выпадения карбидов ванадия в марганцевой аустенитной стали 40X4Г18Ф2 при термическом старении и облучении быстрыми нейтронами.
- 2) Экспериментально выяснить возможность влияния на ЭПФ облучением быстрыми нейтронами в стареющих марганцевой стали 20Г20С2Ф1 и хром-марганцевой 30X13Г10С3Ф1.

1. Выполнен анализ брэгговского и диффузного рассеяния нейтронов в образцах стали 40X4Г18Ф2

Анализ брэгговского и диффузного рассеяния нейтронов в образцах стали 40X4Г18Ф2 Установлено, что режимы старения при 600 °С и 700 °С ведут к образованию весьма отличающихся систем дефектов – когерентных нанокластеров углерода и ванадия в первом случае и некогерентных преципитатов карбида ванадия во втором. При этом расширение решетки матрицы, создаваемое системой нанокластеров, компенсирует ее сжатие за счет ухода из нее углерода, что и объясняет поведение параметра решетки при 600 °С на рис.1а, не согласующееся с ростом твердости материала.

Поведение выделенных на дифрактограммах вкладов диффузного рассеяния (рис.2) подтверждает формирование такой системы.

Расширение решетки матрицы под действием некогерентной системы нанокластеров карбидов, возникающей под нейтронным облучением, оказывается более слабым, что и отражается на уменьшении параметра решетки с флюенсом (рис.1б). Дозовое поведение формирующихся брэгговских пиков от преципитатов карбида ванадия подтверждает рост преципитатов в процессе облучения материала (рис.3).

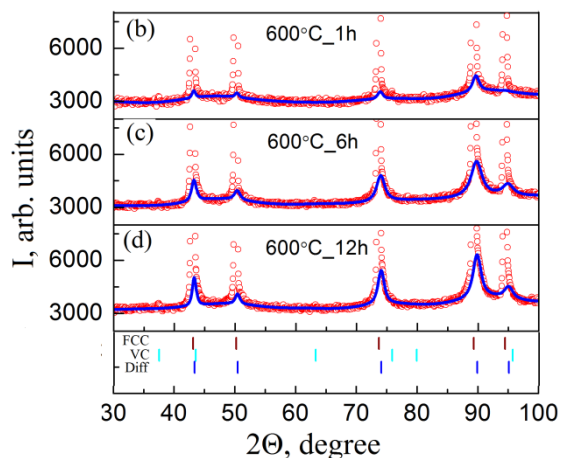


Рис.2 - Диффузные вклады в нейтронную дифрактограмму после старения образца в течение 1 (b), 6 (c) и 12 (d) часов при 600°С

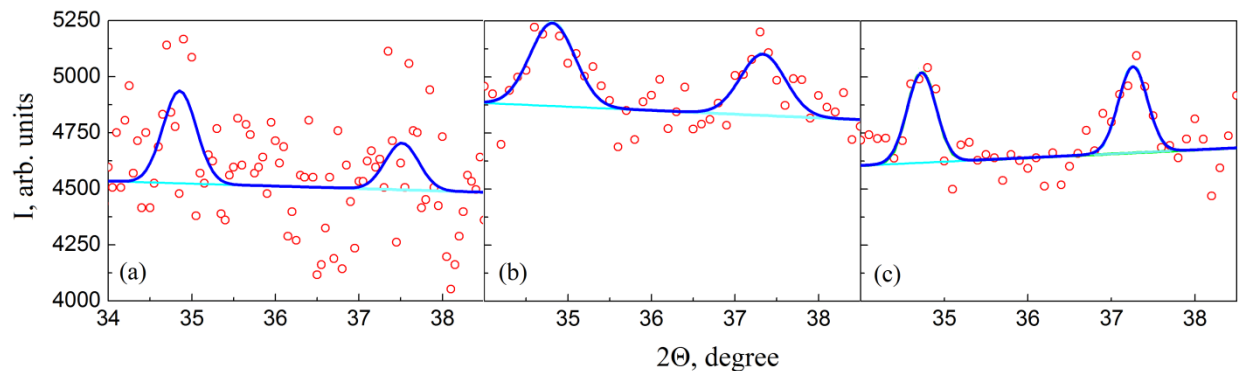


Рис.3 – Пики (220- $\lambda/2$) от решетки матрицы и пики (111) от частиц карбида ванадия для образца, отпущенного при температуре 450°C (a) и затем облученного флюенсами быстрых нейтронов $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ (b) и $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$ (c)

2. Обнаружено инициирование эффекта памяти формы (ЭПФ) облучением быстрыми нейтронами

Вместо ожидавшегося вследствие выпадения под нейтронным облучением преципитатов карбида ванадия ослабления ЭПФ для образца из хром-марганцевой стали 30X13Г10С3Ф1 было выявлено проявление ЭПФ непосредственно под воздействием облучения (рис.4). Контрольные эксперименты с образцами-свидетелями подтвердили, что нижняя температурная граница проявления ЭПФ в данном материале лежит при 120 °C, а при 80°C эффект отсутствует (рисунок 5). Это позволяет сделать вывод, что наблюдавшийся эффект является результатом именно нейтронного облучения.

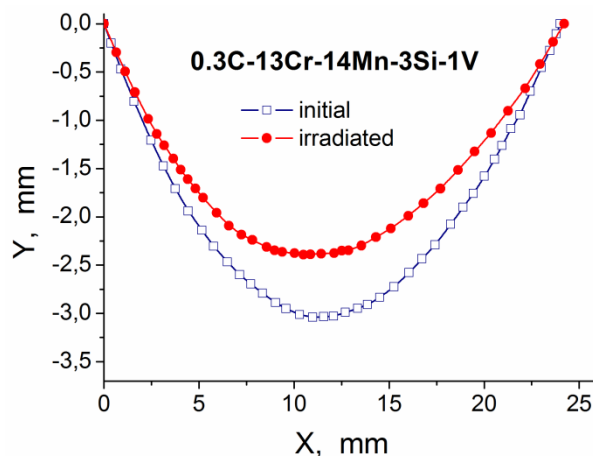


Рис.4 - - Средняя линия боковой проекции образца из стали 30X13Г10С3Ф1 в исходном состоянии и после облучения флюенсом быстрых нейтронов $6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$

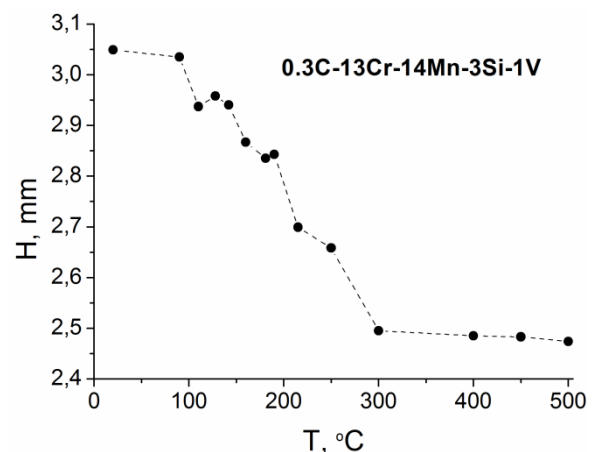


Рис.5 - Величина стрелы прогиба средней линии боковой проекции образца-свидетеля из стали 30X13Г10С3Ф1 в зависимости от температуры отжига

Выводы:

Анализ нейтронографических данных подтвердил существование процесса ухода углерода из матрицы в систему когерентных нанокластеров карбидов при отжиге 600 °C, а также образование некогерентных кластеров карбидов и рост преципитатов карбида ванадия под действием нейтронного облучения.

Показано, что облучение структурно-нестабильных материалов быстрыми нейтронами может влиять на проявление эффекта памяти формы.