

# ВЛИЯНИЕ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА СВОЙСТВА СПЛАВОВ ВАНАДИЯ С ЖЕЛЕЗОМ

**М.И. Захарова, В.П. Тарасиков**

*АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»*

*249033, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1*



Приведены результаты исследования облученных нейтронами до 1,4 и 2,8 сна при температуре 350 – 450°C образцов сплавов V+(0 – 5,0 ат.% Fe), полученные с использованием комплекса экспериментальных методик: определение плотности,  $d$ ; удельного электросопротивления  $\rho$  при температурах комнатной и жидкого азота; внутреннего трения до 600°C.

Построены концентрационные зависимости  $d \sim f(C_{Fe})$ ,  $\rho \sim f(C_{Fe})$ . При облучении нейтронами до 1,4 сна при температуре 350 – 450°C наблюдается распад твердого раствора внедрения в нелегированном V, его стабилизация в сплавах, распад твердого раствора замещения и сегрегация атомов Fe на стоках.

Показано, что в отличие от нелегированного ванадия плотность сплавов в диапазоне концентраций 0,65 – 3,30 ат.% Fe в результате облучения до 1,4 сна возрастает примерно на 0,16 – 0,41%.

На образцах сплавов V+(0 – 5 ат.% Fe), облученных нейтронами до 2,8 сна при температурах 350 – 450°C, получены концентрационные зависимости плотности: линейные зависимости плотности  $d \sim f(C_{Fe})$  в необлученных образцах становятся степенными после облучения (до 2,8 сна) и описываются выражениями

$$d_{исх.} = 6,1094 + 0,0223 \cdot C_{Fe}, \text{ г/см}^3,$$
$$d_{обл.} = 6,073 + 0,07179 C_{Fe} - 0,0345 (C_{Fe})^2 + 0,0058 (C_{Fe})^3, \text{ г/см}^3.$$

Ванадий и сплавы с 0,5 и 2 ат.% Fe после облучения до 2,8 сна распухают максимально на 0,7%, тогда как плотность сплава V+5 ат.% Fe увеличивается при облучении на 1,25%, что связано с фазовой нестабильностью сплава и возможным образованием в местах локального обогащения атомами Fe.

Удельное электросопротивление (при температурах 298 и 77 K) необлученных и облученных образцов сплава V-Fe как функция содержания Fe изменяется немонотонно, свидетельствуя о возможном ближнем упорядочении и (или) расслоении твердого раствора, что подтверждается также данными внутреннего трения.

**Ключевые слова:** нейтронное облучение, радиационные дефекты, фазовые превращения, вакансии, междоузельные атомы, внутреннее трение, электросопротивление, распухание, гравиметрия, радиационно-индуцированная сегрегация.

*Захарова М.И., Тарасиков В.П. Влияние нейтронного облучения на свойства сплавов ванадия с железом. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2022. – № 4. – С. 78-88. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2022.4.07> .*

© **М.И. Захарова, В.П. Тарасиков, 2022**

## ВВЕДЕНИЕ

Механические свойства и радиационная стойкость металлов с решеткой ОЦК, к которым относится ванадий, весьма чувствительны к примесям внедрения. Наличие в сплавах атомов замещения приводит к дополнительным взаимодействиям с атомами основного металла, атомами внедрения и замещения, а в облученных сплавах эти взаимодействия усложняются, кроме того, образованием радиационных дефектов. Взаимодействия атомов внедрения и замещения между собой и с радиационными дефектами могут проявиться на стадии как зарождения, так и роста радиационных пор.

Взаимодействие атомов внедрения и замещения в ОЦК-металлах изучается методом внутреннего трения, который позволяет получить не только качественную, но и количественную информацию о природе этих взаимодействий [1, 3].

В металлах с решеткой ОЦК, содержащих углерод, азот, кислород, водород в твердом растворе, наблюдаются типичные релаксационные пики при определенных частоте и температуре [1]. Первоначальная модель релаксации была дана Снуком, поэтому этот тип релаксации называют *релаксацией Снука*.

Использование степени релаксации основано на установленном факте, что высота пика Снука пропорциональна концентрации атомов в твердом растворе. Эта особенность позволяет использовать релаксацию Снука как прекрасный метод изучения растворимости, образования сегрегаций и фаз при различных внешних воздействиях [3 – 5].

Для некоторых количественных оценок эффективно использование наряду с методом внутреннего трения метода электросопротивления.

## ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследовались ванадий и его сплавы с железом от 0,65 до 5,0 ат. % Fe. Сплавы получали электронно-лучевой плавкой. Детали получения, обработки сплавов, изготовления образцов и исследования свойств сплавов описаны в работе [1]. Образцы перед облучением отжигались в вакууме при остаточном давлении не более  $1,33 \cdot 10^{-4}$  Па при температуре 1100°C в течение двух часов.

В работе приведены результаты исследования методами низкочастотного внутреннего трения, измерения электросопротивления и плотности системы сплавов ванадия с железом от 0 до 5,0 ат. % Fe после облучения их в реакторе БР-10 до 1,4 и 2,8 сна при температуре 350 – 450°C.

Измерения внутреннего трения выполнялись методом крутильного маятника в амплитуднонезависимой области с частотами от 12 до 17 Гц в вакууме от комнатной температуры до 600°C [1]. Ошибка в определении внутреннего трения не превышала 2,5%. В экспериментах использовалась установка [2], позволявшая измерять внутреннее трение при изгибных и крутильных колебаниях образца в диапазоне частот [5, 30] Гц и температурах до 600°C. Частота во всём спектре температур измерения не изменялась. Измерение внутреннего трения ванадия до облучения проходило в диапазоне [13,6, 13,8] Гц, после облучения – в диапазоне [13,5, 13,9] Гц; для сплава V+2 ат. % Fe – [16,4, 16,6] Гц, для V+5 ат. % Fe – [17,8, 17,9] Гц (разброс связан с аппаратурной нестабильностью).

Электросопротивление образцов определяли потенциометрическим методом при комнатной и азотной температурах с погрешностью 1,0% для 298 К и 3,5% для 77 К. Образцы для измерения внутреннего трения и электросопротивления представляли собой прямоугольные призмы размером  $1,5 \times 1,9 \times 22$  мм<sup>3</sup> [1].

Определение плотности образцов проводилось гидростатическим методом, образцы взвешивались с абсолютной погрешностью  $5 \cdot 10^{-5}$  г. Ошибка в определении плотности составляла 0,1%.

**РЕЗУЛЬТАТЫ****Электросопротивление**

Результаты исследования электросопротивления ванадия и сплавов после облучения приведены на рис. 1 – 3.

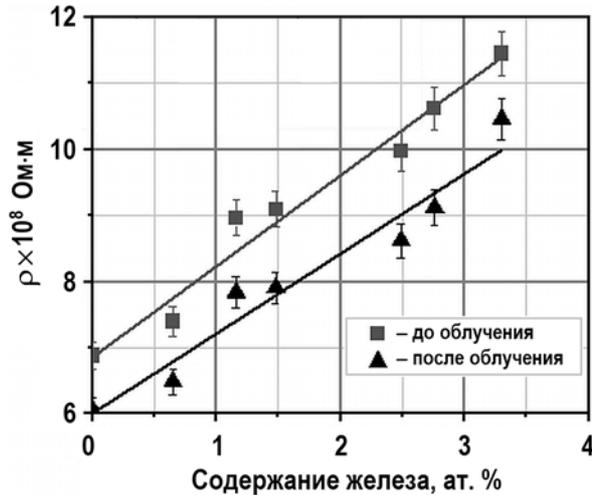


Рис. 1. Зависимость удельного электросопротивления  $\rho$  от содержания железа в ванадии при температуре измерения 77 К до облучения и после облучения до 1,4 сна

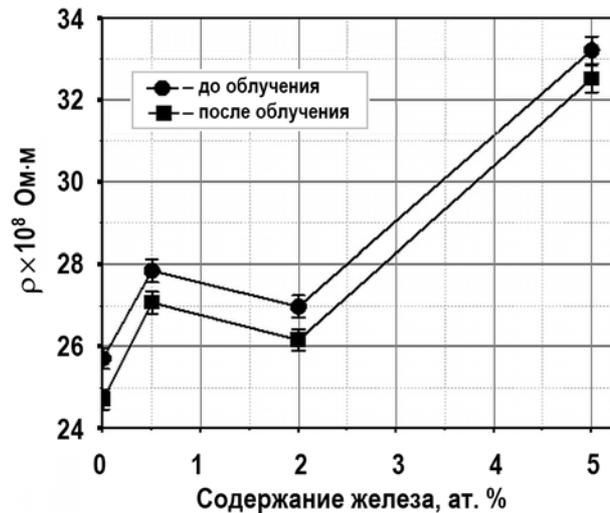


Рис. 2. Зависимость удельного электросопротивления  $\rho$  от содержания железа в ванадии при температуре измерения 298 К до облучения и после облучения до 2,8 сна

Для всех составов, в том числе и для нелегированного ванадия, в результате облучения произошло снижение удельного электросопротивления  $\rho$  примерно на 8 – 13% по отношению к исходным значениям [1]. Снижение удельного электросопротивления ранее наблюдали на монокристаллических образцах ванадия [5] и связывали это явление с выходом из твердого раствора атомов примесей внедрения на радиационные дефекты.

Как видно из рис. 1 – 3, после облучения наблюдается отклонение от линейности в зависимости  $\rho \sim (C_{Fe})$ . На необлученных образцах во всей области исследуемых концентраций (0 – 3,30 ат.% Fe) существует линейная зависимость, что отвечает нахождение атомов железа в соответствии с диаграммой состояния в твердом растворе. Было

найденно, что 1 ат.% Fe увеличивает  $\rho$  на  $1,53 \cdot 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  [1].

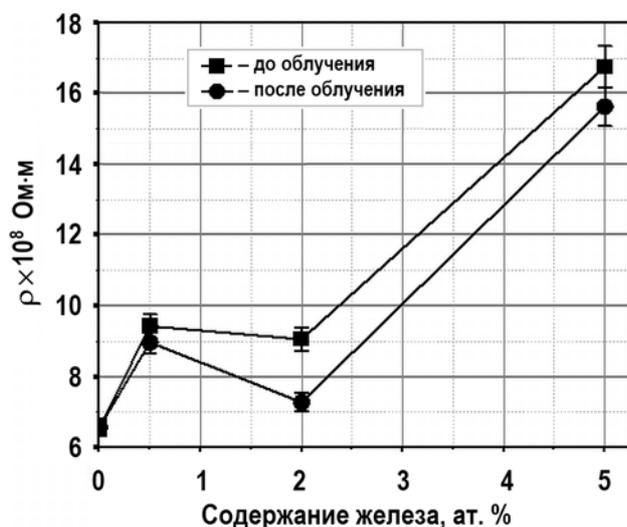


Рис. 3. Зависимость удельного электросопротивления  $\rho$  от содержания железа в ванадии при температуре измерения 77 К до облучения и после облучения до 2,8 сна

Нарушение линейной зависимости удельного электросопротивления от исходной концентрации железа в образцах указывает на то, что в исследуемых сплавах под облучением протекает несколько процессов, в том числе распад твердого раствора замещения. Если бы состав твердого раствора замещения оставался неизменным, то накопление радиационных дефектов или выход примесей внедрения из твердого раствора смещали бы эту зависимость параллельно исходной в ту или другую сторону, не изменяя ее линейности.

### Внутреннее трение

Как было показано в [1], при легировании ванадия железом для всех исследованных составов в спектрах внутреннего трения присутствуют релаксационные пики Снука, соответствующие атомам кислорода и азота. С ростом количества железа пики Снука становятся несимметричными. Обработка позволяет выделить третий пик, лежащий между кислородным и азотным пиками. Высота этого пика пропорциональна количеству железа в сплаве, поэтому было сделано заключение, что третий пик связан с комплексом железо-кислород. Была оценена энергия связи комплекса, которая составила 0,07 эВ. Однако более детальный анализ с учетом данных по облученным образцам подвергает сомнению такой вывод. На самом деле присутствие в спектре внутреннего трения сплавов ванадия с железом во всей области концентраций кислородного и азотного пиков означает, что при легировании ванадия железом атомы кислорода и азота остаются в твердом растворе внедрения, тогда как легирование ванадия, например, титаном, полностью подавляет пики Снука. Такая же картина наблюдается на ферритно-мартенситной стали по сравнению с  $\alpha\text{-Fe}$  [6] – присутствующий характерный углеродный пик Снука в  $\alpha\text{-Fe}$  полностью отсутствует в стали.

Высота релаксационных пиков Снука (рис. 4) облученного ванадия значительно снизилась, а сами пики сместились в сторону более высоких температур. Это наблюдалось и ранее на монокристаллическом ванадии, облученном до 7,6 сна при температуре 450°C [5]. Кислородный и азотный пики исчезали полностью, а при более высокой температуре сформировались новые сложные пики.

Совершенно по-другому ведут себя сплавы V-Fe. На всех исследуемых составах при облучении пики Снука сохраняются, высота их меняется незначительно и смещение их в

сторону более высоких температур меньше (рис. 5, 6) по сравнению с нелегированным ванадием. А это означает, что кислород и азот при облучении сплавов V-Fe остаются в твердом растворе, т.е. железо стабилизирует твердый раствор внедрения.

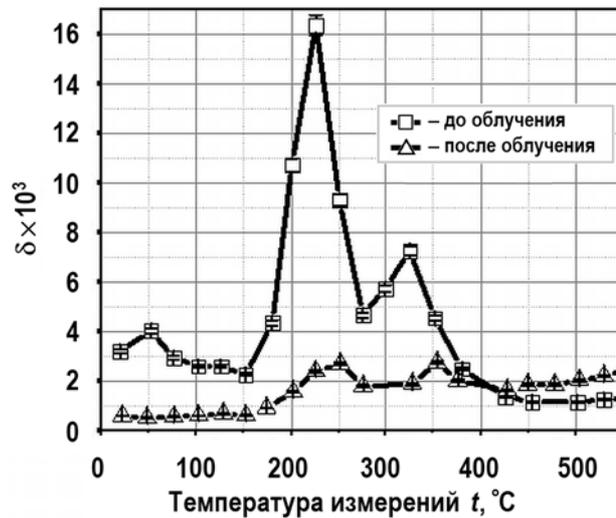


Рис. 4. Температурная зависимость внутреннего трения  $\delta$  ванадия до и после облучения

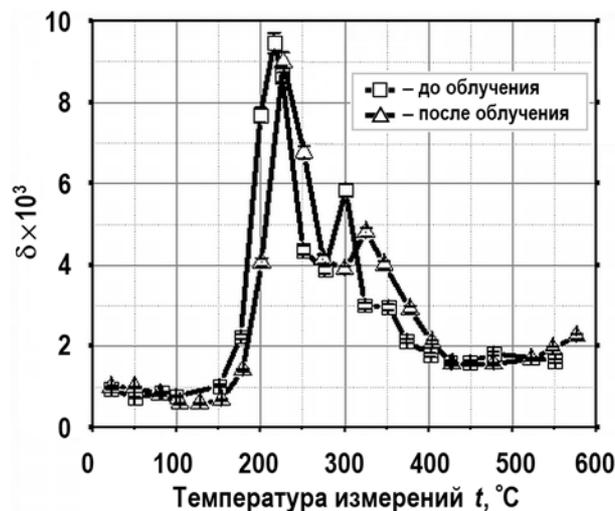


Рис. 5. Температурная зависимость внутреннего трения  $\delta$  сплава ванадия с 0,65 ат. % железа до и после облучения

Однако электросопротивление, как отмечалось выше, снижается примерно одинаково как для нелегированного ванадия, так и для сплавов. Это дает основание предположить, что снижение удельного электросопротивления в сплавах обусловлено выходом железа из твердого раствора замещения на радиационные дефекты, границы зерен, свободные поверхности и т.д. В работе [7] по результатам электронно-микроскопических и микрорентгеноспектральных исследований сплавов V-Fe после нейтронного облучения до повреждающей дозы 1,3 сна при температуре  $370^\circ\text{C}$  на границах зерен в сплавах V+2 ат.% Fe и V+5 ат.% Fe наблюдали радиационно-индуцированную сегрегацию железа. Содержание железа на границе зерна в сплаве V+2 ат.% Fe повысилось до 5,8 ат. %, в сплаве V+5 ат.% Fe — до 8,9 ат. %. Микроструктура облученного ванадия и сплавов V-Fe содержала вакансионные поры, дислокационные петли и дислокации. Таким образом, в нелегированном ванадии под облучением идет распад твердого раство-

ра внедрения с выходом атомов примесей внедрения на радиационные дефекты, а в сплавах наблюдается распад твердого раствора замещения, тогда как твердый раствор внедрения стабилизируется примесью замещения. По-видимому, такое поведение твердых растворов внедрения и замещения под облучением будет определяться степенью взаимодействия атомов внедрения и замещения.

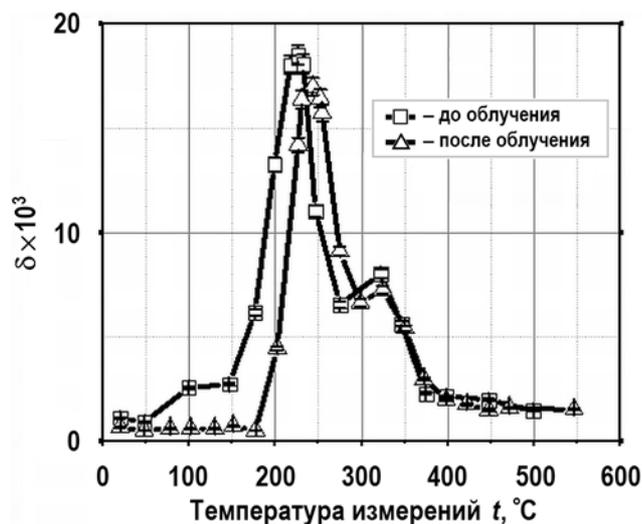


Рис. 6. Температурная зависимость внутреннего трения  $\delta$  сплава ванадия с 2,76 ат. % железа до и после облучения

Температурные зависимости внутреннего трения сплава V+2 ат. % Fe для изгибных колебаний представлены на рис. 7.

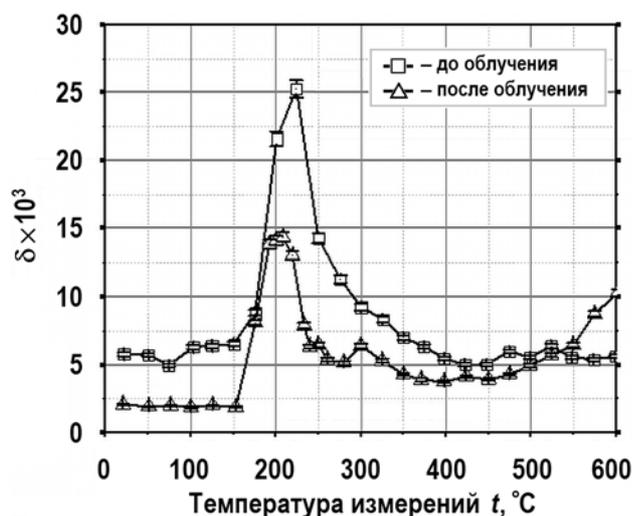


Рис. 7. Температурные зависимости внутреннего трения  $\delta$  до и после облучения до 2,8 сна при изгибных колебаниях

До облучения релаксационные пики Снука (кислородный,  $t_{\text{max}} = 225^\circ\text{C}$  и азотный  $\sim 325^\circ\text{C}$ ) практически сливаются, особенно при изгибных колебаниях [1]. По высоте кислородного пика в соответствии с данными по приросту высоты пика на 1 ат.% кислорода было оценено его количество в сплаве V+2% Fe, и оно составило 0,104 ат.% O. Тогда как по данным химического анализа эта величина составляет 0,22 ат.%. Исходя из того, что пики внутреннего трения фиксируют кислород, находящийся в твердом растворе, можно предположить, что половина кислорода находится в виде соединений или

комплексов. Этим, видимо, можно объяснить сложную структуру температурной зависимости внутреннего трения для необлученных образцов. После облучения релаксационные пики, соответствующие миграции атомов азота и кислорода в решетке ванадия, четко разрешаются, но их структура по-прежнему остается сложной, отражая суперпозицию ряда конкурирующих термически активируемых процессов. Максимумы релаксационных пиков после облучения смещаются в сторону более низких температур на 12 – 25°С. При этом высота релаксационного кислородного пика уменьшается на 40%, что отвечает выходу из твердого раствора внедрения такого же количества атомов кислорода.

На облученных образцах V+2% Fe начиная с 475°С наблюдается высокотемпературная ветвь внутреннего трения (резкий подъем фона внутреннего трения). На нелегированном V высокотемпературная ветвь после облучения появляется при более низкой температуре 425 – 450°С [8, 9] и она более пологая, в деформированном V эта ветвь начинается с 400°С и более крутая [5] по сравнению с облученным V.

В сплаве V+5 ат.% Fe высокотемпературная ветвь внутреннего трения появляется при 450 – 475°С и имеет резкий подъем [1]. Во всех отожженных сплавах высокотемпературная ветвь отсутствует.

#### Изменение плотности сплавов V-Fe при облучении нейтронами

После облучения до 1,4 сна для сплавов всех составов (0,65 – 3,30 ат.% Fe) наблюдается прирост плотности от 0,16 до 0,41%, тогда как плотность нелегированного V, как и следовало ожидать, уменьшается в результате облучения. Распухание нелегированного V составило 0,63%. Отсутствие распухания сплава по плотности (прирост, а не убыль плотности) может быть связано с перераспределением атомов Fe в матрице V при облучении, а также с возможным образованием трансмутантов (например, хром  $d = 7,14$  г/см<sup>3</sup>; кобальт  $d = 8,89$  г/см<sup>3</sup> [10]), имеющих плотность выше исходной плотности ванадия и железа. В работе [11] также наблюдали прирост плотности V после облучения и объясняли это образованием трансмутантов.

Изменения плотности сплавов V-Fe в зависимости от содержания Fe до и после облучения до 2,8 сна при температурах 350 – 450°С представлены на рис. 8.

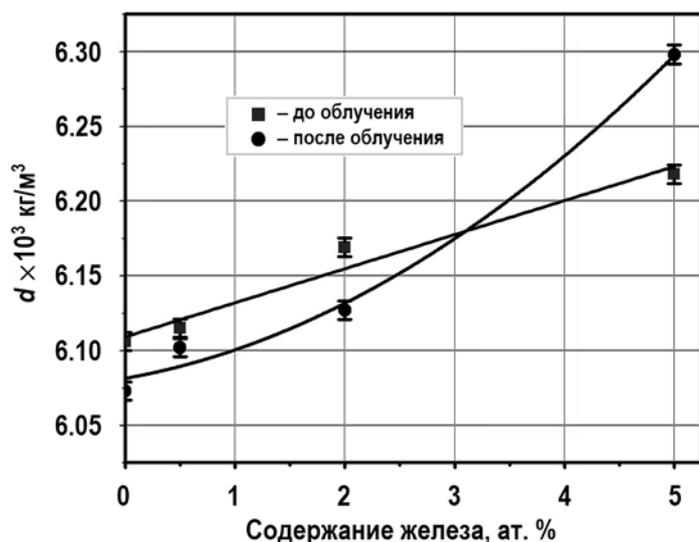


Рис. 8. Концентрационная зависимость плотности  $d$  необлученных и облученных образцов сплава V-Fe

До облучения плотность сплавов возрастает с увеличением концентрации Fe линейно и описывается уравнением

$$d = 6,1094 + 0,0223 \cdot C_{\text{Fe}}, \text{ г/см}^3. \quad (1)$$

После облучения до 2,8 сна концентрационная зависимость плотности становится степенной и описывается выражением

$$d = 6,073 + 0,07179 C_{\text{Fe}} - 0,0345 (C_{\text{Fe}})^2 + 0,0058 (C_{\text{Fe}})^3, \quad (2)$$

где  $d$  – плотность сплавов, г/см<sup>3</sup>,  $C_{\text{Fe}}$  – концентрация Fe, ат. %.

Увеличение плотности по данным гидростатического метода, дилатометрии, рентгеновских исследований наблюдали в различных системах двойных и более сложных сплавов, в частности: Cr+Fe, Fe+V, Cu+V, V+Cr+Ti и др. [12] и объясняли фазовой нестабильностью материала, поскольку пор в электронном микроскопе, как правило, не наблюдали. В работе [7] одной из возможных причин ускоренного распухания сплава V+5 ат. % Fe может быть сегрегация атомов железа на стоках, в результате чего изменяется их способность поглощать точечные дефекты.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты анализа полученных экспериментальных данных позволяют сделать следующие выводы.

1. При облучении нейтронами до 1,4 сна при температуре 350 – 450°C наблюдается распад твердого раствора внедрения в нелегированном V, его стабилизация в сплавах, распад твердого раствора замещения и сегрегация атомов Fe на стоках.

2. Показано, что, в отличие от нелегированного ванадия, плотность сплавов в диапазоне концентраций 0,65 – 3,30 ат. % Fe в результате облучения до 1,4 сна возрастает примерно на 0,16 – 0,41%.

3. На образцах сплавов V+(0 – 5 ат. % Fe), облученных нейтронами до 2,8 сна при температурах 350 – 450°C, получены концентрационные зависимости плотности – линейные зависимости плотности  $d \sim f(C_{\text{Fe}})$  в необлученных образцах становятся степенными после облучения (до 2,8 сна) и описываются выражениями

$$d_{\text{исх.}} = 6,1094 + 0,0223 \cdot C_{\text{Fe}}, \text{ г/см}^3,$$

$$d_{\text{обл.}} = 6,073 + 0,07179 C_{\text{Fe}} - 0,0345 (C_{\text{Fe}})^2 + 0,0058 (C_{\text{Fe}})^3, \text{ г/см}^3.$$

4. Ванадий и сплавы с 0.5 и 2 ат. % Fe после облучения до 2,8 сна распухают максимально на 0,7%, тогда как плотность сплава V+5 ат. % Fe увеличивается при облучении на 1,25%, что связано с фазовой нестабильностью сплава и возможным образованием в местах локального обогащения атомами Fe микровыделений.

5. Удельное электросопротивление (при температурах 298 и 77 К) необлученных и облученных образцов сплава V-Fe как функция содержания Fe изменяется немонотонно, свидетельствуя о возможном ближнем упорядочении и/или расслоении твердого раствора, что подтверждается также данными внутреннего трения.

### Литература

1. Захарова М.И., Тарасиков В.П. Исследование сплавов системы V–Fe методами внутреннего трения и электросопротивления. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2020. – № 3. – С. 108-116. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2020.3.11>.
2. Быков В.Н., Федоровский А.Е. Измерение модулей упругости и внутреннего трения на малых образцах. // Приборы и техника эксперимента. – 1966. – Т. 1. – С. 163-167.
3. Захарова М.И., Тарасиков В.П. Влияние нейтронного облучения на физико-механические свойства тугоплавких металлов. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2020 – № 1. – С. 78-88. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2020.1.08>.
4. Лысова Г.В., Биржевой Г.А., Храмушин Н.И. Влияние температуры на процессы сегрегации в сплаве V–5 Fe после облучения ионами V+ с энергией 5 кэВ. // Известия

- Академии наук. Серия физическая. – 2002. – Т. 66. – № 7. – С. 1059-1060.
5. *Захарова М.И., Тарасиков В.П.* Термическая стабильность радиационных эффектов в монокристаллическом ванадии. // ВАНТ. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2018. – Вып. 4 (95). – С. 4-15.
6. *Биржевой Г.А., Захарова М.И., Тарасиков В.П.* Формирование комплексов атомов внедрения – замещения в ферритно-мартенситной стали ЭП-823 при различных видах термообработки. // ВАНТ. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2019. – Вып. 2 (98). – С. 4-11.
7. *Поролло С.И., Дворяшин А.М., Конобеев Ю.В.* Радиационные повреждения в облученных нейтронами сплавах V-Fe. // Физика металлов и металловедение. – 2022. – Т. 123. – № 8. – С. 837-843. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0015323022080071>.
8. *Корнилов И.И., Глазунов В.В.* Взаимодействие тугоплавких металлов переходных групп с кислородом. – М: Наука, 1967. – 256 с.
9. *Lang E., Bressers J.* The effect of oxygen doping on the electrical resistivity of vanadium. // Zeitschrift fur Metall-Kunde. – 1975. Vol. 66. – No. 10. – PP. 619-624. DOI: <https://doi.org/10.1515/ijmr-1975-661011>.
10. *Захарова М.И., Биржевой Г.А., Мельниченко Н.А., Павлинчук Е.А., Шейнкер И.Г.* Наведенная активность и радионуклидный состав образцов ванадия, облученных в реакторе БР-10. // Перспективные материалы – 1999. – № 2. – С. 32-35.
11. *Ohnuki S., Takahashi H., Shiba K., Hishinuma A., Pawel I. and Garner F.,* Influence of Transmutat Ion on Microstructure, Density Change and Embrittlement of Vanadium and Vanadium Alloys Irradiated in HRIR. // 11 Fusion Materials Semiannual Progress Report DOE/ER-0313/16. 1994. – PP. 293-304. DOI: <https://doi.org/10.2172/10167568>.
12. *Borovitskaya I.V., Zakharova M.I.* Internal Friction of Neutron Irradiation Vanadium and its Alloys. // Rare metals. – 2009. – Vol. 29. – Spec Issue. – PP. 334-337.

Поступила в редакцию 08.04.2022 г.

#### Авторы

Захарова Мария Ивановна, старший научный сотрудник  
Тел. +7-910-917-42-89

Тарасиков Владимир Прокофьевич, ведущий научный сотрудник  
E mail: [tarasikov@ippe.ru](mailto:tarasikov@ippe.ru)

UDC 621.039.531

## EFFECTS OF NEUTRON IRRADIATION ON THE PROPERTIES OF VANADIUM-IRON ALLOYS

Zakharova M.I., Tarasikov V.P.

IPPE JSC

1 Bondarenko sq., 249033 Obninsk, Kaluga Reg., Russia

#### ABSTRACT

The paper presents the results of testing samples of V+(0 – 5,0 at.% Fe) alloys irradiated with neutrons to 1,4 and 2,8 dpa at a temperature of 350 to 450°C, obtained using a set of experimental techniques: determination of density  $d$ , electrical resistivity  $\rho$  at indoor and liquid nitrogen temperatures, and internal friction at up to 600 °C .

Concentration dependences  $d \sim f(C_{Fe})$  and  $\rho \sim f(C_{Fe})$  have been plotted.

The neutron irradiation to 1,4 dpa at a temperature of 350 to 450°C involves breakdown of the solid interstitial solution in unalloyed V, its stabilization in alloys,

breakdown of the solid substitution solution, and segregation of Fe atoms at discharge points.

It has been shown that, unlike unalloyed vanadium, the density of alloys in the concentration range of 0,65 to 3,30 at.% of Fe increases by about 0,16 to 0,41% as a result of irradiation to 1,4 dpa.

Concentration dependences were obtained on the V+(0 – 5 at.% Fe) samples irradiated with neutrons to 2,8 dpa at temperatures of 350 to 450°C for density  $d$ : linear dependences of density  $d \sim f(C_{\text{Fe}})$  in non-irradiated samples become power-law after irradiation (to 2,8 dpa) and are described by the expressions

$$d_{\text{non-ir}} = 6,1094 + 0,0223 \cdot C_{\text{Fe}}, \text{ g/cm}^3,$$

$$d_{\text{ir}} = 6,073 + 0,07179 \cdot C_{\text{Fe}} - 0,0345 \cdot (C_{\text{Fe}})^2 + 0,0058 \cdot (C_{\text{Fe}})^3, \text{ g/cm}^3.$$

Vanadium and alloys with 0,5 and 2 at.% of Fe after irradiation to 2,8 dpa swell by 0,7% at most, as the density of the V+5 at.% Fe alloy increases with irradiation at 1,25%, which is explained by the phase instability of the alloy and the possible formation of Fe atoms in the local enrichment areas.

The electrical resistivity (at 298 K and 77 K) of non-irradiated and irradiated V-Fe alloy samples, as a function of the Fe content, varies in a non-monotonic manner which is indicative of potential near ordering and/or stratification of the solid solution, this being also confirmed by internal friction data.

**Key words:** neutron irradiation, radiation defects, phase transformations, vacancies, interstitial atoms, internal friction, electrical resistance, swelling, gravity measurements, radiation-induced segregation.

Zakharova M.I., Tarasikov V.P. Effects of Neutron Irradiation on the Properties of Vanadium-Iron Alloys. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2022, no. 4, pp. 78-88; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2022.4.07> (in Russian).

#### REFERENCES

1. Zakharova M.I., Tarasikov V.P. Investigation of Alloys of the V-Fe System by Methods of Internal Friction and Electrical Resistance. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2020, no. 3, pp. 108-116; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2020.3.11> (in Russian).
2. Вукон V.N., Fedorovsky A.E. Измерение модулей упругости и внутреннего трения на малых образцах. *Pribory i Tekhnika Eksperimenta*. 1966, v. 1, pp. 163-167 (in Russian).
3. Zakharova M.I., Tarasikov V.P. The Effect of Neutron Irradiation on the Physical and Mechanical Properties of Refractory Metals. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2020, no. 1, pp. 78-88; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2020.1.08> (in Russian).
4. Lysova G. V., Birzhevoy G. A., Khramushin N. I. Influence of Temperature on Segregation Processes in the V-5 Fe Alloy After Irradiation with V+ Ions with an Energy of 5 keV. *Izvestiya Akademii Nauk. Seriya Fizicheskaya*. 2002, v. 66, no. 7, pp. 1059-1060 (in Russian).
5. Zakharova M.I., Tarasikov V.P. Thermal Stability of Radiation Effects in Single-Crystal Vanadium. *VANT. Ser: Materialovedenie i Novye Materialy*. 2018, iss. 4 (95), pp. 4-15 (in Russian).
6. Birzhevoy G. A., Zakharova M. I., Tarasikov V. P. Formation of Integration – Substitution Atom Complexes in Ferritic-Martensitic Steel EP-823 under Various Types of Heat Treatment. *VANT. Ser: Materialovedenie i Novye Materialy*. 2019, iss. 2 (98), pp. 4-11 (in Russian).
7. Porollo S.I., Dvoryashin A.M. and Konobeev Yu.V. Radiation Damage in Neutron-Irradiated V-Fe Alloys. *Physics of Metals and Metallography*. 2022, v. 123, pp. 784-790; DOI: <https://doi.org/10.1134/S0031918X22080075>.
8. Kornilov I.I., Glazunov V.V. *Interaction of Refractory Metals of Transition Groups with Oxygen*. Moscow. Nauka Pibl., 1967, 256 p. (in Russian).

9. Lang E., Bressers J. The Effect of Oxygendoping on the Electrical Resistivity of Vanadium. *Zeitschrift fur Metall-Kunde*. 1975, v. 66, no. 10, pp. 619-624; DOI: <https://doi.org/10.1515/ijmr-1975-661011>.

10. Zakharova M.I., Birzhevoy G.A., Melnichenko N.A., Pavlinchuk E.A., Sheinker I.G. Induced Activity and Radionuclide Composition of Vanadium Samples Irradiated in the BR-10 Reactor. *Perspektivnye Materialy*. 1999, no. 2, pp. 32-35 (in Russian).

11. Ohnuki S., Takahashi H., Shiba K., Hishinuma A., Pawel I. and Garner F. Influence of Transmutation on Microstructure, Density Change and Embrittlement of Vanadium and Vanadium Alloys Irradiated in HRIR. *11 Fusion Materials Semiannual Progress Report DOE/ER-0313/16*. 1994, pp. 293-304; DOI: <https://doi.org/10.2172/10167568>.

12. Borovitskaya I.V., Zakharova M.I. Internal Friction of Vanadium under Neutron Irradiation and its Alloys. *Rare Metals*, 2009, v. 29, spec. iss., pp. 334-337.

#### Authors

Zakharova Mariya Ivanovna, Senior Scientific Researcher  
Tel. +7-910-917-42-89

Tarasikov Vladimir Prokofievich, Leading Researcher  
E mail: [tarasikov@ippe.ru](mailto:tarasikov@ippe.ru)