

Научная статья

УДК 621.039.531

## Вычисление критического диаметра пор для аустенитной стали ЧС68 после облучения нейтронами

**Артур Радионович Исинбаев<sup>1</sup>, Александр Владимирович Козлов<sup>2</sup>,  
Ирина Александровна Портных<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет им. первого Президента  
России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

<sup>1,2,3</sup> Институт реакторных материалов, Заречный, Россия

<sup>1</sup> isinbaev.artur@urfu.ru

**Аннотация.** С использованием статистической модели миграции точечных дефектов в настоящей работе найдены концентрации точечных дефектов с учетом их накопления на дислокациях, границах зерен и двойников в стали ЧС68 при действии нейтронного облучения. Также вычислены критические диаметры гелий-вакансионных зародышей пор при различных температурах облучения и скоростях радиационных повреждений.

**Ключевые слова:** аустенит, облучение нейтронами, распухание, точечные дефекты, миграция вакансий, критический диаметр пор, нержавеющая сталь

Original article

## Calculation of the Critical Pore Diameter for Austenitic Steel after Neutron Irradiation

**Artur R. Isinbaev<sup>1</sup>, Alexander V. Kozlov<sup>2</sup>, Irina A. Portnyh<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Ural Federal University named after the first President  
of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

<sup>1,2,3</sup> Institute of Reactor Materials, Zarechny, Russia

<sup>1</sup> isinbaev.artur@urfu.ru

**Abstract.** The concentrations of point defects, taking into account their accumulation on dislocations, grain boundaries and twins in ChS68 steel under the action of neutron irradiation, have been found using a statistical model of point defect migration.

**Keywords:** austenite, neutron irradiation, swelling, point defects, vacancy migration, critical pore diameter, stainless steel

В настоящее время в реакторах на быстрых нейтронах (БН) в качестве оболочек твэлов используются нержавеющие аустенитные стали. Одним из главных недостатков сталей приведенного класса является радиационное распухание, которое проходит в 3 этапа: инкубационная стадия, стадия нестационарного роста и стадия стационарного роста [1]. Во время инкубационной стадии в материале появляются гелий-вакансионные «зародыши» пор (рис. 1), рост которых контролируется поступлением в них атомов гелия. После достижения определенного «критического диаметра» они становятся порами [2], которые начинают расти за счет несбалансированного потока в них вакансий [3]:

$$j_{vv} = j_{v+} - j_{v-} - j_{i+} \quad (1)$$

$$j_{v+} = \frac{4 \cdot c_v \cdot \pi \cdot ((d/a_1)^2 + 2 \cdot (d/a_1) + 4/3) \cdot v \cdot \exp(-\frac{E_{mv}}{kT})}{1 + 3 \cdot \exp(-(E_v - U)/(kT))} \quad (2)$$

$$j_{v-} = \frac{4 \cdot \pi \cdot ((d/a_1)^2 - 2 \cdot (d/a_1) + 4/3) \cdot v \cdot \exp(-\frac{E_{mv}}{kT})}{1 + \exp((E_v - U)/(kT))} \quad (3)$$

$$j_{i+} = \frac{4 \cdot c_i \cdot \pi \cdot a \cdot ((d/a_1)^2 + 2 \cdot (d/a_1) + 4/3) \cdot v \cdot \exp(-\frac{E_{mi}}{kT})}{1 + 3 \cdot \exp(-(E_i - U)/(kT))} \quad (4)$$

где  $j_{v+}$  — поток вакансий, поступающих в пору;  $j_{v-}$  — поток вакансий, испаряющихся из поры;  $j_{i+}$  — поток межузельных атомов, поступающих в пору;  $c_v$  — концентрация ТД в матрице;  $d$  — диаметр поры;  $a_1$  — радиус первой координационной сферы;  $v$  — Дебаевская частота;  $E_v$ ;  $i$  — энергия образования вакансий и междоузлий соответственно;  $E_{mv}$ ,  $m_i$  — энергия миграции вакансий и междоузлий соответственно;  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — температура облучения;  $U$  — изменение поверхностной энергии поры при поглощении вакансии.

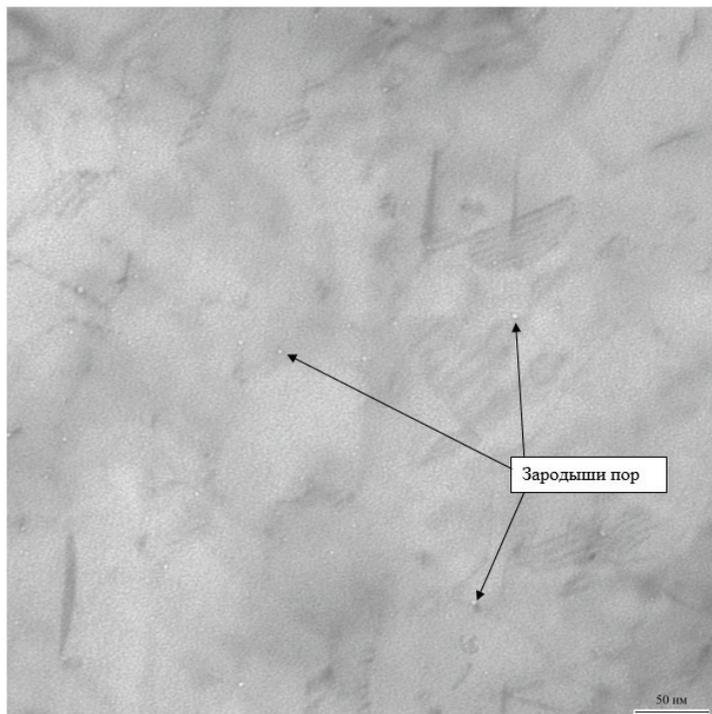


Рис. 1. Микроструктура стали ЧС68 после облучения нейтронами

Во поступления гелия в пузырек его давление на стенку увеличивается, уменьшая эффективный коэффициент поверхностного натяжения. Это увеличит несбалансированный поток вакансий в него —  $j_{vv}$ . Так будет происходить до тех пор, пока для роста  $j_{vv}$  не будет необходим приток гелия, что будет означать достижения критического размера гелий-вакансионного зародыша поры, что позволяет вычислить его значение —  $d_{bcr}$ .

В работе показано, что при росте и распухании поры становятся все более значимым стоком для точечных дефектов, что приводит к уменьшению концентрации точечных дефектов в кристаллической матрице и увеличивает  $d_{bcr}$ .

#### Список источников

1. Зеленский В. Ф., Неклюдов И. М., Черняева Т. П. Радиационные дефекты и распухание металлов. Киев : Наукова думка, 1988. 296 с.

2. Портных И. А., Козлов А. В. Рост вакансионных пор на начальной стадии нестационарного распухания // ФММ. 2018. Т. 119, № 6. С. 636–644.
3. Козлов А. В., Портных И. А., Исинбаев А. Р Модель заключительного этапа стадии нестационарного радиационного распухания металлов // ФММ. Теория металлов. 2020. Т. 121, № 7. С. 675–681.

### References

1. Zelenskii V. F., Neklyudov I. M., Chernyaeva T. P. Radiation defects and swelling of metals. Kiev : Naukova Dumka, 1988. 296 p.
2. Portnykh I. A., Kozlov A. V. Growth in vacancy voids at the initial stage of transient swelling // The physics of metals and metallography. 2018. Vol. 119, no. 6. P. 598–605.
3. Kozlov A. V., Portnykh I. A., Isinbaev A. R. Model of final stage of nonstationary radiation swelling of metals // The physics of metals and metallography. 2020. Vol. 121, no. 7. P. 611–617.