

Радиационное распухание стали ОХ16Н15МЗБ

БЫКОВ В. Н., ВАХТИН А. Г., ДМИТРИЕВ В. Д., КОСТРОМИН Л. Г.,
ЛАДЫГИН А. Я., ЩЕРБАК В. И.

УДК 621.039.54

Большое число опубликованных работ посвящено исследованию радиационной пористости в аустенитных сталях, используемых в качестве конструкционных материалов активной зоны быстрых реакторов. Тем не менее все еще отсутствуют сведения о температурной и дозовой зависимости радиационного распухания стали ОХ16Н15МЗБ, которая широко применяется в качестве материала оболочек твэлов быстрых реакторов.

В настоящей статье приведены некоторые результаты электронно-микроскопического исследования радиационной пористости в стали ОХ16Н15МЗБ, облучавшейся нейтронами в реакторе БР-5.

Материалы и методика эксперимента

Образцы для электронно-микроскопических исследований представляли собой диски диаметром 3,5 и толщиной 0,4 мм, вырезанные из различных участков оболочек твэлов, облученных в реакторе БР-5 до интегральных потоков $4,3 \cdot 10^{22}$ нейтр/см² в интервале температур 430—580° С. После изготовления оболочки твэлов отжигались при 950° С в течение 10 мин в вакууме.

Приготовление объектов для просмотра в электронном микроскопе и методика обработки результатов описаны ранее [1]. Необходимо только отметить, что в отличие от этой работы толщина пленки при расчете пористости по другой методике [2] составляла от 1200 до 2000 Å.

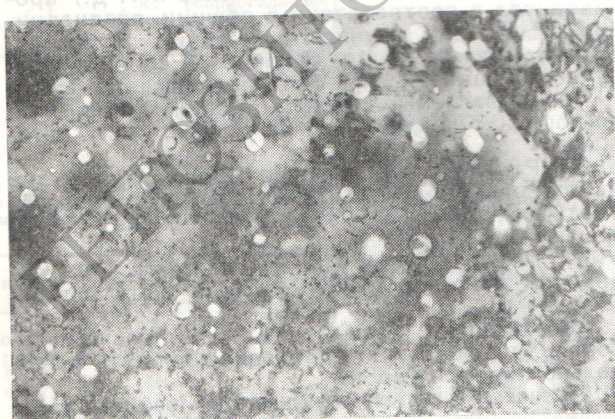


Рис. 1. Микроструктура стали ОХ16Н15МЗБ, облученной дозой 36 с/а при 520° С ($\times 100\ 000$).

Исследование распухания стали ОХ16Н15МЗБ

Электронно-микроскопические исследования облученных образцов показали наличие включений, петель и полостей, концентрация и размер которых менялись в зависимости от условий облучения. На рис. 1 приведена микроструктура стали ОХ16Н15МЗБ, облученной интегральным потоком $4,3 \cdot 10^{22}$ нейтр/см² при 520° С. Полученные из расчетов по электронно-микроскопическим снимкам концентрации ρ_v , средний диаметр d_v и общий объем полостей $\Delta V/V$, который принимается равным распуханию стали, представлены на рис. 2—5. Распределение полостей по размерам в зависимости от дозы облучения показано на рис. 6.

Так как экспериментальные результаты по радиационному распуханию получены на образцах, облучавшихся в потоках нейтронов с различным спектром, сравнение экспериментальных данных проводилось не по значениям интегрального потока, а по числу смещений на атом kt (с/а). Для расчета использовалась модифицированная модель смещений, развитая для случая облучения материалов быстрыми нейтронами [3]. На рис. 4 и 5 для сравнения также представлены интегральные потоки нейтронов, энергетический спектр которых характеризует центр активной зоны реактора БР-5.

Экспериментальные наблюдения показывают, что радиационное распухание сталей зависит от многих факторов и, в первую очередь, от температуры и дозы облучения. В связи с этим представляет интерес более детально рассмо-

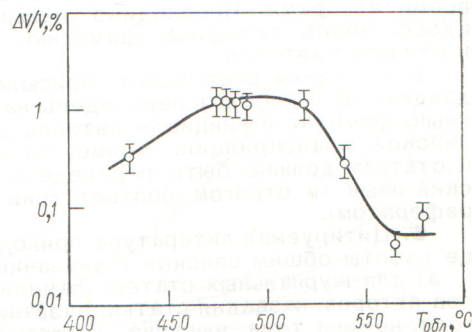


Рис. 2. Зависимость распухания стали ОХ16Н15МЗБ, облученной дозой 30 с/а, от температуры облучения.

треть зависимость общего объема полостей от этих факторов.

Зависимость распухания от температуры.

Общий объем полостей с ростом температуры (рис. 2) сначала растет, достигая, например, при 30 с/а 1,4%, затем снижается, т. е. зависимость $\Delta V/V$ от температуры имеет колоколообразный вид с максимумом в области 500° С. Увеличение $\Delta V/V$ с возрастанием температуры от 430 до 500° С (рис. 3) связано с ростом размера полостей, так как концентрация полостей с увеличением температуры в этой области имеет тенденцию к снижению. С дальнейшим повышением температуры облучения до 560° С уменьшаются концентрация и средний размер полостей. При температуре облучения выше 560° С концентрация и средний диаметр полостей почти не зависят от температуры и даже несколько увеличиваются. Зависимость ρ_v от T может быть объяснена падением скорости образования зародышей полостей с ростом температуры из-за уменьшения пересыщения матрицы точечными дефектами.

Относительно физических причин изменения среднего размера полостей необходимо отметить следующее. Из выражения для скорости роста вакансионной полости радиуса r [4]

$$\frac{dr}{dt} = \frac{1}{r} \left[(C_v D_v - C_I D_I) - D_s \exp\left(\frac{2\gamma\Omega}{rkT}\right) \right],$$

где $C_v D_v$ и $C_I D_I$ — диффузионные потоки вакансий и междоузельных атомов на поверхности полости; D_s — коэффициент самодиффузии; γ — поверхностная энергия; Ω — атомный объем, следует, что величина dr/dt определяется соотношением двух членов: первый описывает разность диффузионных потоков точечных дефектов на поверхности полости, второй — термический отжиг полости.

С ростом температуры облучения от 430 до 525° С радиус полости может расти из-за увеличения избыточного потока вакансий на поверхность поры в результате возрастания подвижности вакансий, даже несмотря на падение их концентрации с ростом температуры. В то же время

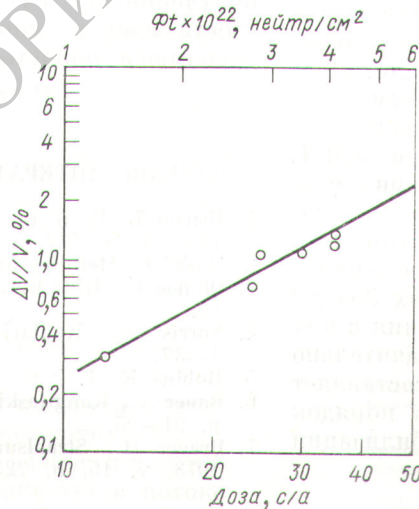


Рис. 4. Зависимость распухания стали ОХ16Н15М3Б от дозы при 525° С.

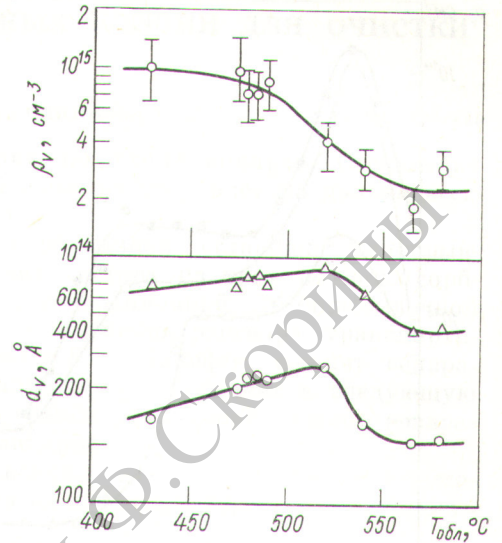


Рис. 3. Зависимость концентрации, среднего (○) и максимального (Δ) диаметров полостей в стали ОХ16Н15М3Б, облученной дозой 30 с/а, от температуры облучения.

второй член в уравнении для dr/dt , всегда отрицательный для вакансионных пор, также растет с увеличением температуры облучения вследствие возрастания коэффициента самодиффузии.

Уменьшением пересыщения матрицы точечными дефектами и усилением термической диссоциации полостей можно объяснить уменьшение

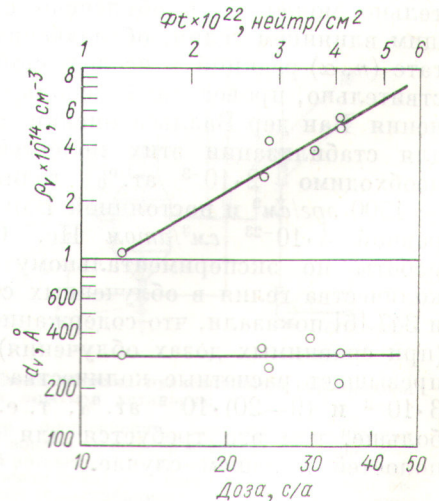


Рис. 5. Зависимость среднего диаметра и концентрации полостей в стали ОХ16Н15М3Б от дозы при 525° С.

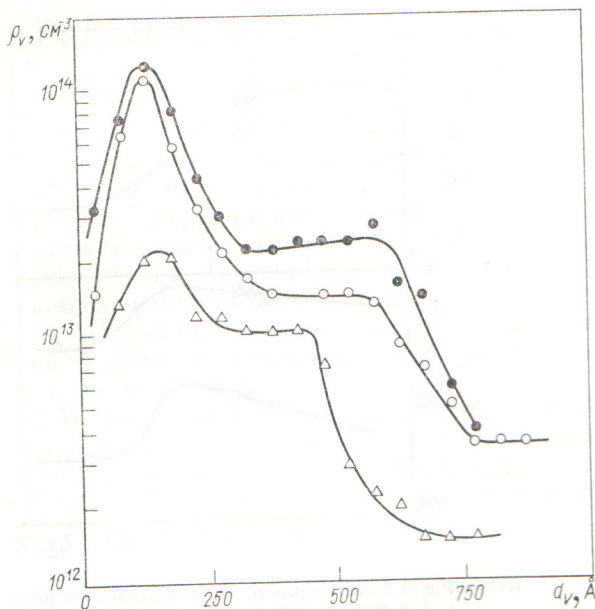


Рис. 6. Распределение полостей по размерам для стали ОХ16Н15МЗБ, облученной дозами 36 (●), 30 (○) и 12 (△) с/а при 525° С.

среднего диаметра полостей для стали ОХ16Н15МЗБ при температуре облучения выше 525° С.

Однако с 560° С характер зависимости ρ_v и d_v от T снова меняется: при дальнейшем увеличении температуры концентрация и средний диаметр полостей практически уже не зависят от нее. Такое изменение кинетики зарождения и роста полостей предположительно может быть объяснено стабилизирующим влиянием гелия, образующимся в результате (n, α)-реакций в исследуемой стали. Действительно, проведение с использованием уравнения Ван дер Ваальса оценки показали, что для стабилизации этих полостей при 560° С необходимо $2 \cdot 10^{-3}$ ат.% гелия при $\gamma = 1500$ эрг/см² и постоянной Ван дер Ваальса, равной $4 \cdot 10^{-23}$ см³/атом He. Отметим, что работы по экспериментальному определению количества гелия в облученных сталях 304 [5] и 347 [6] показали, что содержание гелия в них (при сравнимых дозах облучения) значительно превышает расчетные количества и составляет $3 \cdot 10^{-2}$ и $(9-20) \cdot 10^{-2}$ ат.%, т. е. на порядок больше, чем это требуется для стабилизации полостей в нашем случае.

Зависимость распухания от дозы. Зависимость приращения объема в результате образования полостей от дозы облучения для стали ОХ16Н15МЗБ, как и для стали 316 [7], имеет степенной характер (рис. 4). Определенный графически показатель степени при температуре облучения 525° С несколько меньше, чем для стали 316, и равен 1,5. Экстраполяция экспериментальных данных до дозы 85 с/а, соответствующей интегральному потоку 10^{23} нейтр/см², показывает, что с учетом определенного выше показателя степени при этой дозе максимальное распухание стали может достичь 6-7%.

Увеличение $\Delta V/V$ с ростом kt связано главным образом с возникновением новых полостей (рис. 5), поскольку средний диаметр полостей практически не зависит от дозы.

Из представленных на рис. 6 распределений полостей по размерам при облучении различными дозами и неизменной температуре видно, что для оболочек зависимость ρ_v от размера имеет сложный характер. Причина этого может заключаться в воздействии целого ряда факторов (напряжение, присутствие газа и др.) на процессе зарождения и рост полостей.

Анализ изменения кривых распределений полостей по размерам при возрастании дозы облучения свидетельствует о том, что с ростом числа смещений на атом характер изменения ρ_v от d практически не меняется, происходят лишь подъем этих кривых в сторону больших концентраций и незначительный их сдвиг в сторону больших размеров. Таким образом, экспериментальные результаты указывают, что при облучении стали ОХ16Н15МЗБ развитие пористости идет в основном за счет роста новых зародышей полостей.

Поступила в Редакцию 28/V 1973 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быков В. Н. и др. «Атомная энергия», 1973, т. 34, вып. 4, с. 247.
2. Wolff E. Metallography, 1969, v. 2, p. 89.
3. Ohmae K., Hida B. J. Nucl. Mater., 1972, v. 42, p. 86.
4. Norris D. Radiation effects, 1972, v. 14, p. 1-37.
5. Robins K. J. Nucl. Mater., 1969, v. 33, p. 102.
6. Bauer A., Kangilaski M. J. Nucl. Mater., 1972, v. 42, p. 91-95.
7. Brager H., Straalsund I. Trans. Amer. Nucl. Soc., 1973, v. 15, p. 725.