

Таким образом, образовавшийся в результате облучения газ не накапливается в порах, а скорее диффундирует к границам зерен, дислокациям или захватывается примесными атомами. Вопрос о слабом захвате газа порами, расположенными далеко от границ зерен, требует отдельного анализа.

Выводы. Поры, образовавшиеся в аустенитной нержавеющей стали 0X18H9T, облученной при 460 °С флюенсом нейтронов $4 \cdot 10^{22}$ нейтр./см², имеют вакансионную природу и не заполняются газом в результате десятичасового отжига при 850 °С.

Предложенная модель для описания отжига пор удовлетворительно согласуется с экспериментом, если принять, что эффективность дислокаций как вакансионных стоков на два порядка величины меньше суммарной длины дислокаций. Эта низкая эффективность дислокаций может быть объяснена захватом вакансий только на ступеньках дислокаций.

Для детального описания поведения ансамбля вакансионных пор в условиях отжига необходимы подробные сведения о поведении ансамбля дислокационных петель междузельных атомов и сетки дислокаций.

Авторы приносят глубокую благодарность В. Н. Быкову за полезные обсуждения в дискуссии.

Поступила в Редакцию 18/VI 1975 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cawthorne C. e.a. In: Proc. Reading Conf. on Voids Formed by Irradiation of Reactor Materials, BNES, 22—25 March 1971, p. 35.
2. Jostsons A. e.a. In: Proc. AEC Symp. «Radiation Induced Voids in Metals», Albany, N. Y., 9—11 June, 1971 (CONF 710601), p. 363.
3. Быков В. Н. и др. «Атомная энергия», 1973, т. 35, вып. 4, с. 235.
4. Ham R. «Philos. Mag.», 1961, v. 6, p. 1483.
5. Brager H. e.a. «Metal. Trans.», 1971, v. 2, p. 1893.
6. Harkness S., Che-Yu-Li. «Metal. Trans.», 1971, v. 2, p. 1457.
7. Balluffi R. «Phys. State Solid.», 1969, v. 31, p. 443.
8. Лифшиц И. М., Слезов В. В. ЖЭТФ, 1958, т. 35, с. 479.
9. Ham F. «J. Appl. Phys.», 1959, v. 30, p. 915.
10. Hirth J., Lothe J. Theory of Dislocations, Mc Graw-Hill Book Co., N.Y., 1968.
11. Eyre B., Maher D. AERE-R-6648, 1970.
12. Seidman D., Balluffi R. «Philos. Mag.», 1966, v. 13, p. 649.
13. Norris D. «Radiation Effects», 1972, v. 15, p. 1.
14. Markworth A. «Metal. Trans.», 1973, v. 4, p. 2654.

УДК 621.039.531

Влияние взаимодействия стали 0X18H9T с теплоносителем на развитие пористости в чехле пакета реактора БР-5

ЩЕРБАК В. И., БЫКОВ В. Н., ДМИТРИЕВ В. Д., ПОРОЛЛО С. И., ЛАДЫГИН А. Я.

При металлографических исследованиях штатных пакетов карбидной зоны реактора БР-5 было обнаружено диффузионное взаимодействие стали с теплоносителем как фронтальное, так и по границам зерен [1]. При этом глубина слоя взаимодействия зависела в основном от температуры облучения и времени пребывания стали 0X16H15M3B и 0X18H9T в натрии, поскольку предполагается, что взаимодействие с натрием вызвано науглероживанием стали в условиях реактора БР-5. Изменение химического и фазового состава стали в результате взаимодействия с натрием, по-видимому, должно существенно повлиять на процесс развития вакансионной пористости, имеющей важное значение для оценки работоспособности отдельных узлов активной зоны быстрых реакторов.

В настоящей работе приведены некоторые результаты исследования взаимодействия с теп-

лоносителем стали 0X18H9T, использованной для изготовления шестигранных чехлов рабочих пакетов реакторов БР-5, и влияния этого взаимодействия на распухание стали.

Условия облучения и методика исследований. Для исследования был выбран шестигранный чехол штатного пакета Г-19 толщиной стенки 0,3 мм, простоявший в центре карбидной зоны реактора БР-5 с 1965 по 1971 г. и облученный флюенсом нейтронов $3,8 \cdot 10^{22}$ нейтр./см² при температуре 430—510 °С. Теплоноситель — натрий с 0,01—0,005 мас.% O; 0,003 мас.% N и 0,017 мас.% S [1] циркулировал через пакет снизу вверх со скоростью 4 м/с, в то время как в межпакетном зазоре скорость течения натрия была значительно меньше.

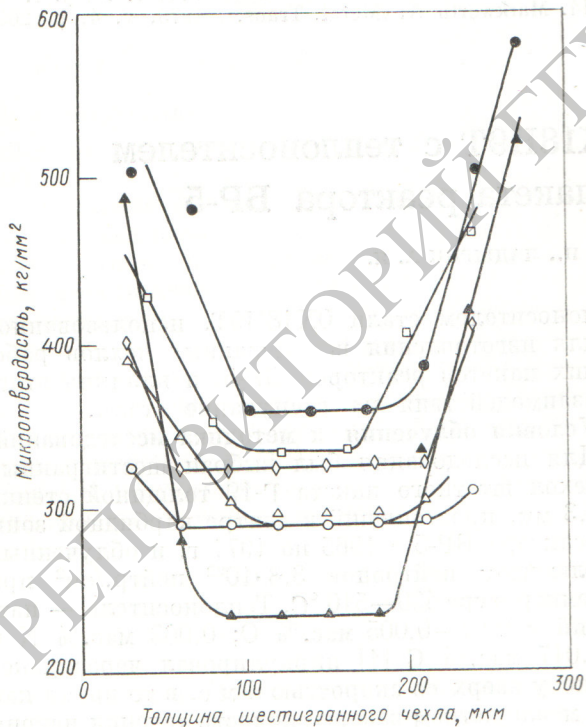
Исследовались шесть различных по высоте сечений шестигранного чехла. Температура и флюенс нейтронов, рассчитанные для каждого

Характеристика исследуемых образцов

Номер сечения	Расстояние от низа активной зоны, мм	Температура облучения *, °C	Флюенс нейтронов, 10^{22} нейтр./см ²	$\Delta V/V, \%$
1	0	430	1,7	0,1
2	70	440	3,0	0,5
3	190	460	3,8	0,9
4	310	480	3,2	0,3
5	344	485	2,9	0,1
6	510	510	1,4	—

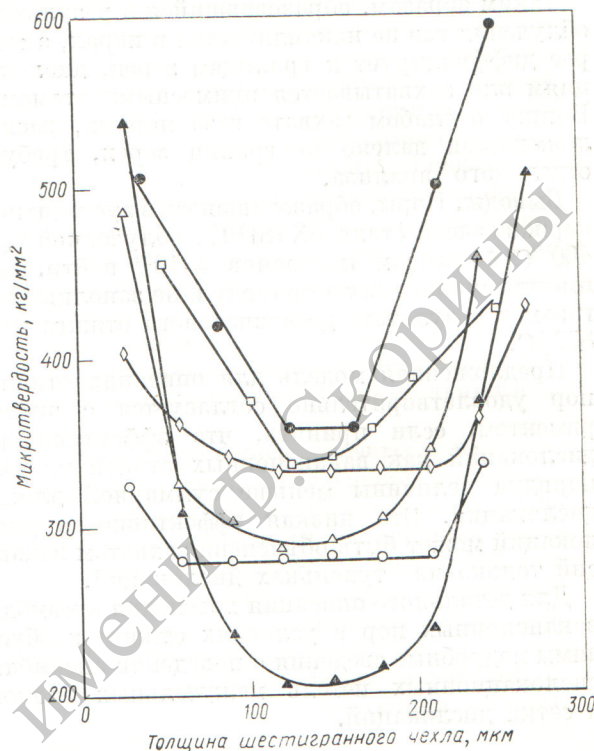
* Температура исследованных образцов принималась равной температуре теплоносителя в данном сечении при номинальном режиме работы реактора БР-5 [1].

сечения, приведены в таблице. Кроме того, исследовались еще три сечения по периметру шестигранного чехла: по углу шестигранника, на расстоянии 1/4 и 1/2 ширины грани от вершины угла. Микротвердость по этим сечениям измерялась на микротвердомере ПМТ-3.



Р и с. 1. Изменение микротвердости по толщине стенки шестигранного чехла, по углу шестигранника. Отсчет толщины ведется от внешней стороны стенки чехла.

Номера сечений (см. таблицу): ○ — 1; ◇ — 2; ● — 3; □ — 4; ▲ — 5; △ — 6



Р и с. 2. Изменение микротвердости по толщине стенки шестигранного чехла для сечений, отстоящего на расстоянии 1/4 ширины грани от угла (обозначения те же)

При электронно-микроскопическом исследовании стали для утонения образцов использовалась обычно применяемая методика односторонней полировки [2]. Толщина удаленного слоя образца измерялась с помощью микрометра типа МВМ с точностью до 10 мкм. Детали приготовления образцов и обработки электронно-микроскопических снимков описаны ранее [3, 4].

Результаты эксперимента. При металлографическом исследовании образцов, вырезанных из различных участков, обнаружено, что с внутренней и внешней сторон материал шестигранника подвергся диффузионному воздействию натрия. Судя по измерению микротвердости, ширина зон взаимодействия увеличивается с ростом температуры облучения (рис. 1 и 2), причем на углах шестигранника ширина зон взаимодействия несколько меньше, а их микротвердость больше, чем в других сечениях, отстоящих от угла на 1/2 и 1/4 ширины грани.

Согласно рис. 1 и 2 и данным таблицы, микротвердость различных по высоте сечений средней части стенки чехла хорошо коррелирована с изменением флюенса нейтронов и температуры

облучения. Повышенная микротвердость стали в сечении *б*, по-видимому, вызвана взаимодействием с натрием на всю толщину стенки чехла.

При электронно-микроскопическом исследовании той части чехла, которая не подвергалась взаимодействию с теплоносителем, наблюдалась микроструктура, характерная для облученной большими флюенсами нейтронов стали 0X18H9T [3, 4]. Данные суммарного объема пор в образцах, вырезанных из различных по высоте сечений, отстоящих от угла на $1/4$ ширины грани, представлены в таблице.

Исследования распределения радиационной пористости по сечению стенки шестигранного

чехла исследованного пакета показали, что зоны взаимодействия претерпевают значительно меньшее распухание по сравнению с серединой сечения. Изменение микроструктуры стали 0X18H9T по сечению стенки шестигранника показано на рис. 3, откуда следует, что диффузионное воздействие теплоносителя на сталь приводит к повышенному содержанию мелкодисперсных выделений в теле зерен.

Обсуждение. Экспериментальные результаты свидетельствуют об интенсивном взаимодействии материала шестигранных чехлов штатных пакетов с теплоносителем в реакторе БР-5. Содержащиеся в натрии примеси, в том числе 0,017 мас. % С и 0,003 мас. % N, могли вызвать науглероживание и азотирование сталей [1, 5], причем нельзя исключить и действие других механизмов, в частности проникновение натрия в глубь стали [6].

Как следует из полученных данных, науглероживание подавляет развитие вакансионной пористости в зонах взаимодействия, что способствует неравномерному распуханию шестигранных чехлов штатных пакетов не только по высоте, но и по толщине стенки. Поскольку распухание чехла вызвано преимущественно развитием пористости в ненауглероженных уча-

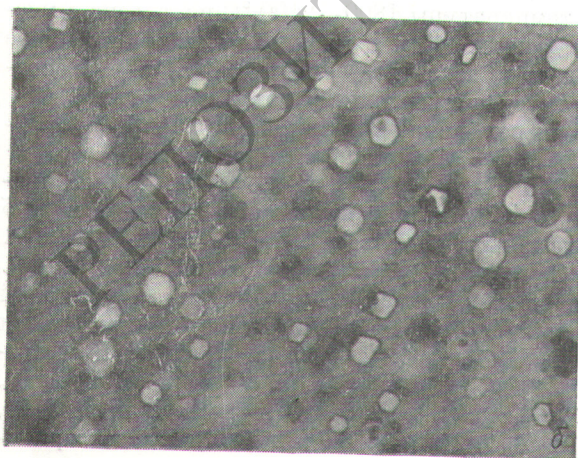


Рис. 3. Микроструктура стали 0X18H9T на расстоянии 50 (*а*), 150 (*б*) и 250 мкм (*в*) от внешнего края стенки шестигранника для сечения, отстоящего на расстоянии $1/4$ ширины грани от угла и 190 мм от низа активной зоны ($\times 100\ 000$)

стках, суммарные изменения объема материала шестигранника должны быть меньше найденных

расчетом на основании электронно-микроскопических исследований этих участков.

Как уже отмечалось, науглероживание стали ОХ18Н9Т способствует повышению концентрации выделений в теле зерен. Эти выделения могут действовать как нейтральные стоки точечных дефектов или тормозить рост дислокационных петель, уменьшая тем самым их способность захватывать межузельные атомы, или препятствовать радиационному отжигу сетки дислокаций. Такие явления в конечном счете должны привести к снижению установившейся концентрации точечных дефектов и, следовательно, к подавлению процесса зарождения и роста пор. Возможны и другие объяснения, основан-

ные, в частности, на изменении коэффициентов диффузии, поверхностной энергии, появлении локальных напряжений, поскольку все эти факторы могут оказать существенное влияние на образование пор.

Поступила в Редакцию 1/XII 1975 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ладыгин А. Я. и др. IV Женевск. конф., 1974, докл. № 707.
2. Norris D. «Rad. Effects», 1972, v. 14, p. 4.
3. Быков В. Н. и др. «Атомная энергия», 1973, т. 34, вып. 4, с. 247.
4. Быков В. Н. и др. «Атомная энергия», 1974, т. 36, вып. 1, с. 24.
5. Невзоров Б. А. Коррозия конструктивных материалов в натрии. М., Атомиздат, 1968.
6. Claxton K., Collier J. «J. Brit. Nucl. Energy Soc.», 1973, v. 12, p. 63.

УДК 669.822

p-T-диаграмма состояния системы уран — углерод

ЛЕВИНСКИЙ Ю. В.

Подробный анализ равновесия фаз в системе уран — углерод дан в работе [1], а наиболее вероятная диаграмма состояния этой системы, представляющая собой проекцию линий максимальной растворимости на плоскость температура — состав, предложена в работе [2].

Более подробные сведения о равновесии в этой системе дает *p-T-x*-диаграмма состояния или проекция линии моновариантного равновесия этой системы на плоскость температура — давление (*p-T*-диаграмма состояния). Известная неопределенность значений общего равновесного давления над большинством фаз в системе уран — углерод позволяет предложить схему *p-T*-диаграммы состояния только в области температуры 1000—2600 °С и давления 0—10⁻¹⁶ ат. Однако даже такая схема может оказаться очень полезной при построении изобарных и изотермических сечений диаграммы состояния.

На схеме *p-T*-диаграммы состояния (рис. 1) кривые 8-9 и 9-22 характеризуют давление пара над твердым и жидким ураном, а кривая 9-24 — плавление урана. В точке 7 в равновесии находятся четыре фазы: γ — U, UC, жидкость и газ. Из этой точки выходят кривые 7-23, 7-9, 7-6 и 7-19 трехфазных равновесий γ -U \rightleftharpoons UC \rightleftharpoons Ж, γ -U \rightleftharpoons Ж \rightleftharpoons Г, γ -U \rightleftharpoons UC \rightleftharpoons Г и UC \rightleftharpoons Ж \rightleftharpoons Г. Кривая 7-23 вертикальна ($T = 1117$ °С), кривая 7-19 на участке температуры 1800—2100 °С построена по данным

работы [1], а при более низкой температуре, как и кривая 7-6, — экстраполяцией этих данных.

Кривые 19-33, 17-32 и 18-30 обозначают конгруэнтное плавление UC, UC₂ и их твердого раствора. В точке 16 наблюдается четырехфазное равновесие: β -UC₂ \rightleftharpoons Ж \rightleftharpoons С \rightleftharpoons Г. Из этой точки начинаются кривые 16-31, 16-21, 16-17 и 16-10 трехфазных равновесий β -UC₂ \rightleftharpoons С \rightleftharpoons Ж, Ж \rightleftharpoons С \rightleftharpoons Г, β -UC₂ \rightleftharpoons Ж \rightleftharpoons Г и β -UC₂ \rightleftharpoons С \rightleftharpoons Г. Кривая 16-31 равновесия трех конденсированных фаз вертикальна ($T = 2430$ °С), кривые 16-21 и 17-16 нанесены ориентировочно, а кривая 6-10 в области температуры 1800—2100 °С построена с учетом данных [1] и в предположении, что общее давление газа над смесью β -UC₂ + С соответствует парциальному давлению урана.

Четырехфазное равновесие α -UC₂ \rightleftharpoons β -UC₂ \rightleftharpoons С \rightleftharpoons Г отмечено точкой 10 ($T = 1765$ °С, $p = 10^{-10}$ ат), откуда, кроме кривой 10-16, выходят кривые 10-26, 10-11 и 10-5 трехфазных равновесий α -UC₂ \rightleftharpoons β -UC₂ \rightleftharpoons С, α -UC₂ \rightleftharpoons β -UC₂ \rightleftharpoons Г и α -UC₂ \rightleftharpoons С \rightleftharpoons Г. Последняя кривая получена экстраполяцией кривой 10-16. В точке 5 в равновесии находятся фазы: U₂C₃, α -UC₂, С и газ. Трехфазным реакциям U₂C₃ \rightleftharpoons α -UC₂ \rightleftharpoons Г, U₂C₃ \rightleftharpoons С \rightleftharpoons Г, U₂C₃ \rightleftharpoons α -UC₂ \rightleftharpoons С соответствуют кривые 5-11, 5-3 и 5-25. Кривые 5-11 и 5-3 нанесены ориен-