

На рисунке сплошными линиями показана зависимость парциального давления азота от температуры, рассчитанная по данным работ [5, 6]. С ростом температуры парциальное давление азота уменьшается.

Пунктирными линиями показана зависимость суммарного давления паро-газовой смеси при равновесном распределении газа в гетерогенной системе — вода от температуры при постоянной концентрации азота в воде. Кривые имеют минимум, который с увеличением концентрации азота в воде сдвигается в область больших температур.

Условием образования газовой фазы внутри объема воды является  $P_{г} > P_0$ . При наличии гетерогенной системы газ — вода газ будет выделяться при  $P_{г} + P_{п} > P_0$ .

При известном значении температуры в компенсационном объеме  $T_{КО}$  и давления  $P_0$  концентрация азота  $C_1$  в воде, находящейся в КО, а следовательно, и в теплоносителе первого контура, определится кривой А, так как при этом для гетерогенной системы газ — вода выполняется условие  $P_{г} + P_{п} = P_0$ . Зависимость парциального давления азота  $P_{г}$  от температуры при концентрации его в воде  $C_1$  представлена кривой В.

Из рисунка следует, что выделение азота внутри объема воды возможно только при  $T_{1К} < T_{мин}$ , где  $T_{мин}$  — температура теплоносителя в первом контуре. Заметим, что  $T_{мин} < T_{КО}$ . При искусственном введении газа в гомогенный объем или локальном вскипании теплоносителя образуется гетерогенная система. При этом условие выделения азота из воды является  $T_{1К} < T_{БО}$  и  $T_{1К} > T_{К}$ , где  $T_{К}$  — максимальная температура, характеризующая равновесное состояние гетерогенной системы при концентрации азота в воде  $C_1$  в заданных параметрах. В диапазоне температур  $T_{БО} < T_{1К} < T_{К}$  будет происходить растворение газа, находящегося в ранее образованной газовой фазе.

Следует отметить, что при наличии в воде растворенного газа температура начала кипения ее несколько повышается. При вскипании воды газ, находившийся в ней в растворенном состоянии, создаст в образовав-

шемся паровом объеме определенное парциальное давление  $P_{1г}$ . При этом давление водяных паров составит  $P_{1п} = P_0 - P_{1г}$ . Следовательно, вода будет вскипать при температуре  $T_{1с}$ , соответствующей состоянию насыщения при давлении  $P_{1п}$ .

Понижение температуры кипения  $\Delta T = T_s - T_{1с}$ , где  $T_s$  — температура кипения чистой воды при давлении  $P_0$ , рассчитано для различных концентраций азота в воде при давлениях 100 и 170 кг/см<sup>2</sup>. Результаты можно представить в виде зависимостей:

$$\Delta T_{100} = 0,090C, \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\Delta T_{170} = 0,133C, \text{ } ^\circ\text{C},$$

где  $C$  — концентрация азота в воде, н. л/кг.

Таким образом, условием отсутствия газовыделения в первом контуре водо-водяного реактора с газовыми КО является поддержание температуры в КО ниже возможных значений температуры теплоносителя в первом контуре и соблюдение температурного режима, обеспечивающего отсутствие локального вскипания воды. Для растворения ранее образованных парогазовых полостей необходимо температуру в контуре на некоторое время снизить до значения, несколько меньшего  $T_{К}$ .

Поступило в Редакцию 3/VIII 1970 г.  
В окончательной редакции 11/XI 1970 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. С. Сысоев. «Атомная энергия», 26, 461 (1969).
2. Н. В. Бычков, А. И. Касперович. «Атомная энергия», 28, 145 (1970).
3. В. А. Кириллин, А. Е. Шейндлин. Термодинамика растворов. М.-Л., Госэнергоиздат, 1956.
4. А. И. Русанов. Фазовые равновесия и поверхностные явления. Л., «Химия», 1967, стр. 165.
5. H. P. G. a. u. et al. Ind. Engng Chem., 44, 1146 (1952).
6. T. A. n. d. e. r. s. e. n. Trans. Amer. Nucl. Soc., 10, 507 (1967).

## Влияние реакторного облучения на коррозионное растрескивание сплава АМг6М

Л. В. КРАСТ, А. В. ВЯЛОБЖЕСКИЙ

УДК 621.039

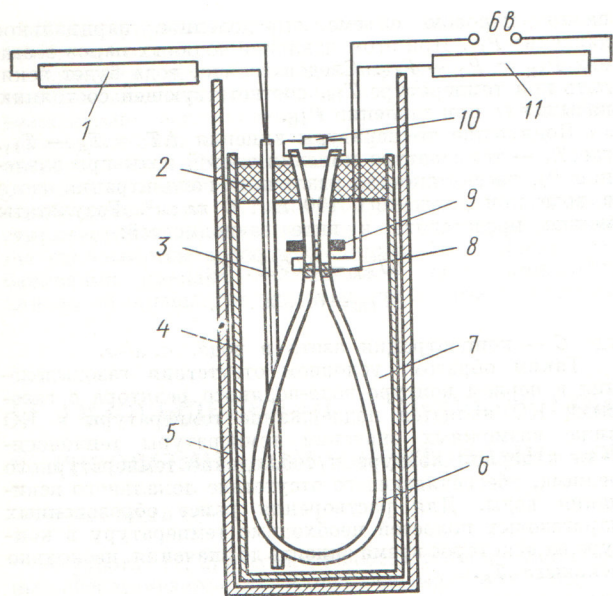
Известно, что под влиянием реакторного излучения в металлах возрастает внутреннее напряжение, увеличивается твердость и хрупкость металлов [1]. Вместе с тем было показано [2], что под действием нейтронного потока в уране, например, происходит образование значительных микронапряжений. Такие явления характерны также для никеля и циркония, объясняются возникновением дефектов под влиянием поля напря-

жения. На основании этого было сделано предположение, что реакторное облучение должно влиять и на коррозию под напряжением. Из-за отсутствия опубликованных сведений пришлось заново разработать методику эксперимента.

Испытания проводились на реакторе ИРТ-2000 [3]. Ввиду невозможности проведения испытаний под

постоянной нагрузкой был применен метод постоянной деформации, для чего использовались образцы в виде петель [4] из листа сплава АМг6М толщиной 1,5 мм. Заготовка имела размеры 160 × 15 мм [5].

Перед опытом образцы подвергались искусственному старению в течение 24 ч при температуре 170° С. Размещение образца в экспериментальной ячейке показано на рисунке. После изгиба образца в петлю между концами последней оставалась щель 0,2—0,3 мм, что не должно было приводить к заметному изменению напряжения. На смонтированные в образец изолированные контакты подавался электрический ток напряжением 6 в. Когда образец разрушался, то благодаря наличию пружины контакты замыкались и включался сигнализатор тока в цепи (лампочка, звонок и пр.).



Экспериментальная ячейка для опытов по коррозионному растрескиванию в реакторе:

1 — потенциометр; 2 — пробка; 3 — термопара в стеклянной трубке; 4 — кварцевая пробирка; 5 — полиэтиленовый контейнер; 6 — петля-образец; 7 — раствор; 8 — изолированные контакты; 9 — зажим; 10 — пружина; 11 — сигнализатор тока.

После проверки нескольких растворов, рекомендованных для быстрого определения склонности сплавов к коррозионному растрескиванию [5], был выбран

раствор, состоящий из 0,25 н. NaCl + 0,2 н. CH<sub>3</sub>COONa + 0,05 н. CH<sub>3</sub>COOH (pH = 5,15), который не вызывал общую коррозию. Объем раствора был равен 150 мл. Результаты опытов приведены в таблице. Как видно из таблицы, время до разрушения резко возрастает при облучении корродирующей системы в реакторе. Одновременно изменяется и pH раствора. В результате проведения опытов без облучения в течение 300 ч было установлено, что изменение pH составляло 0,1—0,2 единицы.

Для выяснения причины изменения pH смеси было проведено облучение растворов отдельных компонентов. Эти опыты показали, что наиболее значительно изменяется pH раствора ацетата натрия. Так, pH 0,2 н. раствора перед облучением был равен 8,1, а после облучения 9,45. Возрастание щелочности раствора ацетата натрия, очевидно, и определяет увеличение pH раствора в целом. Причина изменения pH раствора ацетата окончательно не выяснена. Возможно, это связано с углублением процесса гидролиза ацетата под влиянием изотопа Na<sup>24</sup>.

Замедление растрескивания (см. таблицу) обусловлено не изменением состава коррозионного раствора под действием реакторного облучения, а воздействием излучения на металл, приводящим к релаксации имеющихся в нем напряжений. Действительно, если необлученную металлическую петлю поместить в предварительно облученный раствор, то замедление процесса ее растрескивания не наблюдается. Наоборот, предварительное облучение металлического образца на воздухе приводит к замедлению его растрескивания даже в необлученном растворе. Замедление растрескивания вызвано нейтронным облучением, так как проведенные контрольные опыты с  $\gamma$ -облучением 600 рад/сек не показали сколько-нибудь заметного влияния на процессы коррозионного растрескивания.

Влияние нейтронного облучения на коррозионное растрескивание (интенсивность облучения 10<sup>12</sup> нейтр/см<sup>2</sup>.сек)

Условия облучения	Продолжительность опыта под облучением, ч	Температура опыта, °С	pH в конце опыта	Время до разрушения (среднее для трех образцов), ч
Без облучения	—	53	5,2	5—7,5
Облучение образца в растворе	11, 12 *, 11	50—55	6,4	120—140
	11	50—55	6,4	120—140
	36	50—55	6,4	450
Облучение только раствора	11 **	50—55	6,4	6—10
	11 ***	53	7,1	5—6
Облучение только образца	11	53	5,2	150

\* Без облучения с последующим облучением в течение 11 ч.  
 \*\* Тепловая мощность реактора 1500 квт.  
 \*\*\* Тепловая мощность реактора 2200 квт.

Необходимо отметить, что сделанные на основании приведенной работы выводы относятся только к исследуемому виду механических напряжений. При наличии напряжений, менее подверженных релаксации, результаты могут измениться.

В заключение авторы выражают искреннюю благодарность А. А. Цветаеву и Е. М. Зарецкому за помощь в постановке экспериментов и участии в обсуждении полученных результатов.

Поступило в Редакцию 14/IX 1970 г.  
В окончательной редакции 1/II 1971 г.

## Связь между решениями нестационарного и квазикритического уравнений переноса

Б. Д. АБРАМОВ

Некритические реакторы в односкоростном приближении описываются уравнениями двух типов: нестационарным уравнением переноса с учетом запаздывающих нейтронов

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{v} \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\Omega \nabla \psi - \Sigma \psi + \frac{1}{4\pi} (\Sigma_s + b_0 v \Sigma_f) \times \\ \times \int d\Omega' \psi + \sum_{i=1}^m \lambda_i N_i; \\ \frac{\partial N_i}{\partial t} = -\lambda_i N_i + \frac{1}{4\pi} b_i v \Sigma_f \times \\ \times \int d\Omega' \psi; \quad i=1, 2, \dots, m \end{aligned} \right\} (1)$$

где  $\psi(\mathbf{r}, \Omega, t)$  — поток нейтронов;  $N_i(\mathbf{r}, t)$  — концентрации источников запаздывающих нейтронов ( $i$ -й группы) или квазикритическим уравнением вида

$$\Sigma \psi = -\Omega \nabla \psi + \frac{c \Sigma}{4\pi \eta} \int d\Omega' \psi, \quad (2)$$

где  $\eta$  — некий параметр, определенным образом связанный с  $k_{\text{эф}}$ .

В общем случае связь между решениями этих уравнений довольно сложна. Ее исследованию посвящены последние работы [1, 2], из которых следует, что простая связь существует лишь для слабо некритичных реакторов.

Используемый в настоящей работе прием позволяет получить в односкоростном приближении весьма простую связь и при больших некритичностях для квазикритического реактора без отражателя.

Будем искать решение уравнения (1) в виде  $\psi(\mathbf{r}, \Omega, t) = e^{\alpha t} \varphi(\mathbf{r}, \Omega)$ . Тогда получим

$$\left( \frac{\alpha}{v} + 1 \right) \Sigma \varphi = -\Omega \nabla \varphi + \frac{c \Sigma}{4\pi} \frac{\left( \frac{\alpha}{v \Sigma} + 1 \right)}{\xi(\alpha)} \int d\Omega' \varphi, \quad (3)$$

### ЛИТЕРАТУРА

1. Металловедение реакторных материалов. Под ред. Д. М. Скорова. Ч. 2. М., Госатомиздат, 1962.
2. С. Т. Конобеевский. Действие облучения на материалы. М., Атомиздат, 1967, стр. 175.
3. Х. Б. Краст и др. «Атомная энергия», 27, 286 (1969).
4. И. Л. Розенфельд, К. А. Жигалова. Ускоренные методы коррозионных испытаний металлов. М., «Металлургия», 1966, стр. 283.
5. Т. М. Сигаловская, Е. М. Зарецкий. «Защита металлов», 3, 730 (1967).

где

$$\xi(\alpha) = \frac{\left( \frac{\alpha}{v \Sigma} + 1 \right)}{m - \sum_{i=1}^m \frac{\alpha \beta_i}{\alpha + \lambda_i}}; \quad c = \frac{\Sigma_s + v \Sigma_f}{\Sigma}; \quad \beta_i = \frac{b_i v \Sigma_f}{\Sigma_s + v \Sigma_f}. \quad (4)$$

Обозначив  $\mathbf{r}' = \mathbf{r} \left( 1 + \frac{\alpha}{v \Sigma} \right)$  и  $\varphi(\mathbf{r}) \equiv \varphi \left( \frac{\mathbf{r}'}{1 + \frac{\alpha}{v \Sigma}} \right) = \bar{\varphi}(\mathbf{r}')$ , преобразуем уравнение (3) к виду

$$\Sigma \bar{\varphi} = -\Omega \nabla \bar{\varphi} + \frac{c \Sigma}{4 v \xi(\alpha)} \int d\Omega' \bar{\varphi}. \quad (5)$$

Решения уравнений (2) и (5) совпадут, если  $\eta = \xi(\alpha)$  и на некоторой границе  $L = R \left( 1 + \frac{\alpha}{v \Sigma} \right)$  с нормалью  $\mathbf{n}$  оба решения удовлетворяют граничному условию

$$\psi(L, \Omega) = \bar{\varphi}(L, \Omega) = 0, \quad (\Omega \mathbf{n}) < 0, \quad (6)$$

т. е. будет выполняться равенство

$$\psi(\mathbf{r}', \Omega) = \bar{\varphi}(\mathbf{r}', \Omega) = \varphi(\mathbf{r}, \Omega), \quad (7)$$

где  $\varphi(\mathbf{r}, \Omega)$  как функция  $\mathbf{r}$  удовлетворяет уже граничному условию

$$\varphi(\mathbf{R}, \Omega) = 0, \quad (\Omega \mathbf{n}) < 0. \quad (8)$$

Обозначив собственные функции уравнений (3) и (2) с граничным условием (8), соответствующие собственным числам  $\alpha_i$  и  $\eta_k$  соответственно, как  $\varphi_i(\mathbf{r}, \Omega; \mathbf{R})$  и  $\psi_k(\mathbf{r}, \Omega; \mathbf{R})$ , видим, что при выполнении условия

$$\xi(\alpha_i) = \eta_k \quad (9)$$

справедливо соотношение

$$\varphi_i(\mathbf{r}, \Omega; \mathbf{R}) = \psi_k \left[ \mathbf{r} \left( 1 + \frac{\alpha}{v \Sigma} \right), \Omega; \mathbf{R} \left( 1 + \frac{\alpha}{v \Sigma} \right) \right]. \quad (10)$$