

Р и с. 5. Схема ядерной МГД-установки на  $UF_6$  [14]:  
1 - сопло - МГД-канал;  
2 - реактор; 3 - компрессор; 4 - охладитель;  
5 - электроды.

ние вихревого МГД-канала в сочетании с регенератором [16].

В заключение отметим, что, несмотря на привлекательность идеи использования  $UF_6$  в качестве делящегося вещества в ядерных реакторах, из всех перечисленных выше установок только одна [1] была доведена до практического осуществления. Возможно, это связано с тем, что реакторы на твердых твэлах уже получили широкое и успешное развитие и новое направление, естественно, наталкивается на сопротивление со стороны специалистов, работающих в области реакторостроения.

Поступила в Редакцию 25/VIII 1969 г.  
В окончательной редакции 20/II 1970 г.

## Потенциальная опасность охрупчивания конструкций из стали типа 22К

А. С. ДОВЖЕНКО

В практике известны случаи появления трещин в конструкциях после непродолжительной эксплуатации их в условиях циклического нагружения. Развитие усталостных трещин может прерываться заключительным хрупким разрушением, распространяющимся с большой скоростью по оставшейся части сечения. Интерес к хрупкому разрушению конструкций, предназначенных для длительной эксплуатации, вызывается следующими обстоятельствами:

— циклические изменения нагрузки и температуры могут увеличить небольшие начальные

## ЛИТЕРАТУРА

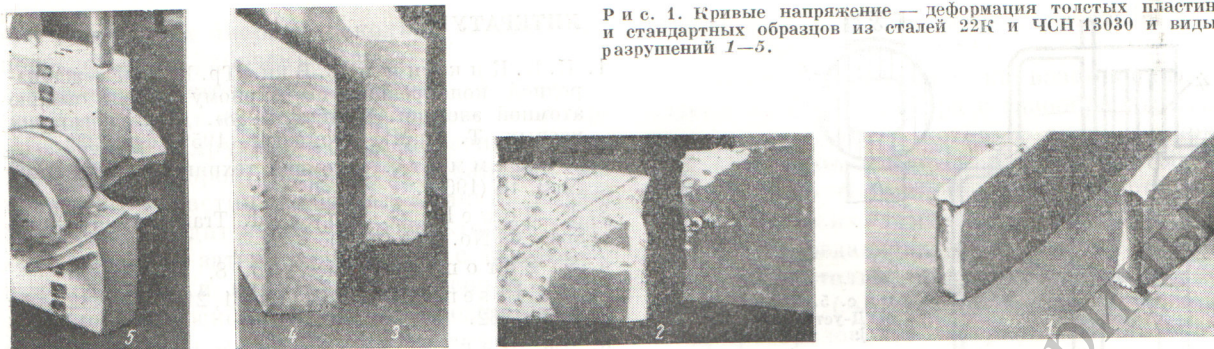
1. И. К. Кикоин и др. В кн. «Тр. Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1958». Докл. советских ученых. Т. 2, М., Атомиздат, 1959, стр. 232.
2. Ф. Хаммитт. «Атомная техника за рубежом», № 9, 16 (1960).
3. F. Powell, G. Donald. Trans. Amer. Nucl. Soc., 6, No. 193 (1963).
4. S. Baron. Nucleonics, No. 8, 128 (1958).
5. H. Clasen. Патент ФРГ, кл. 21, 21/26 No. 1127005; 18/X 1962.
6. Дж. Кац, Е. Рабинович. «Химия урана». М., Изд-во иностр. лит., 1954.
7. F. Navliček. Z. Naturforschung, 11-a, 99 (1956).
8. H. Clasen. Патент ФРГ, кл. 21, 21/20 No. 1110334, 1/II 1962.
9. Г. П. Верховикер, С. Д. Тетельбаум, Г. П. Коняева. «Атомная энергия», 24, 158 (1968).
10. А. В. Поздеев. Судовые атомные энергетические установки. Л., «Судостроение», 1964.
11. Э. С. Педерсен. Атомная энергия в космосе. М., Атомиздат, 1967.
12. S. Colgate, R. Aamodt. Nucleonics, No. 8, 41 (1957).
13. A. Valtells. Патент США, № 3149248, 15/IX 1964.
14. A. Valtells. Nucl. Sci. Abstrs, 17, No. 2, 363 (1963).
15. M. McLafferby. Патент Франции, № 1, 295.806, 1962.
16. Ch. Oickle, E. Pinsley. Патент США, № 3140, 411 (1964).
17. H. Anderson, H. Brown. Патент США, No. 2990354, 27/VI 1961.

УДК 621.039.5.053:669.14.018.29

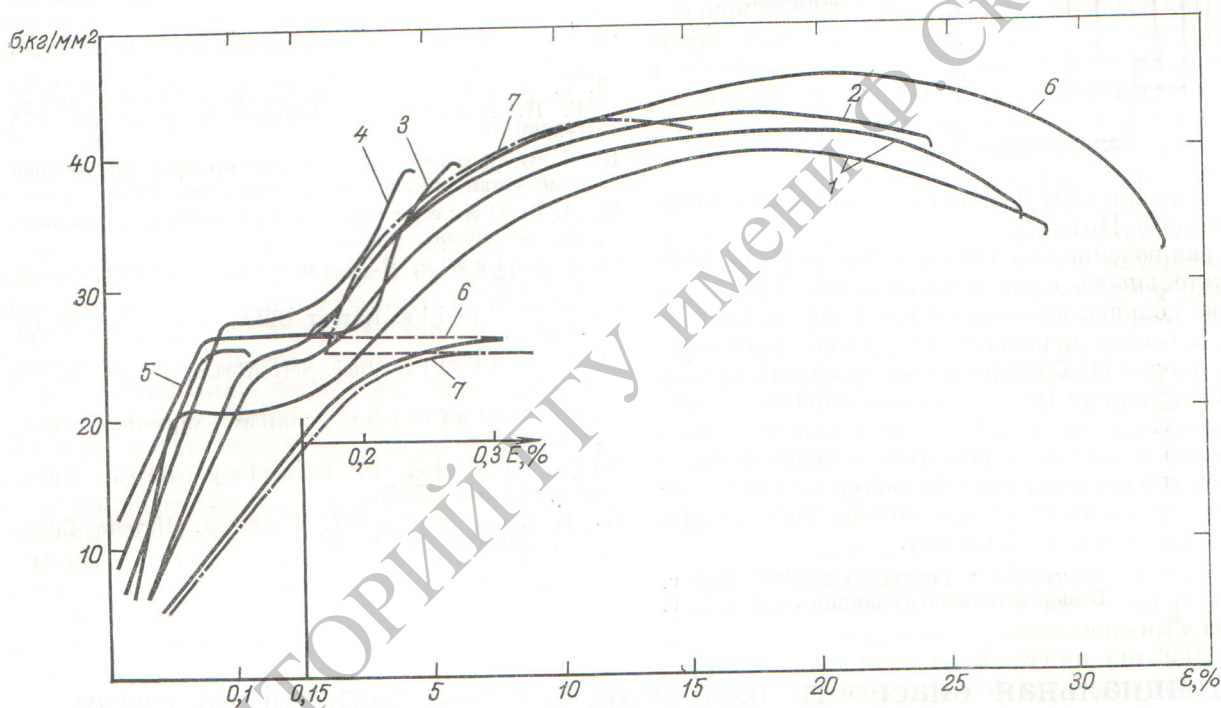
дефекты до критического размера и в результате вызвать хрупкое разрушение;

если конструкция работает при повышенной температуре, когда нельзя ожидать хрупкого разрушения при холодных гидростатических испытаниях перед эксплуатацией;

в особых случаях нейтронная бомбардировка и тепловое охрупчивание могут вызвать значительное повышение температуры перехода в хрупкое состояние, так что хрупкое разрушение может произойти при рабочей температуре;



Р и с. 1. Кривые напряжение — деформация толстых пластин и стандартных образцов из сталей 22К и ЧСН 13030 и виды разрушений 1—5.



хрупкое разрушение может возникать, если имеется дефект в виде надреза, трещины или концентратора напряжений (наряду с достаточной интенсивностью напряжений и другими условиями, способствующими переходу металла в хрупкое состояние).

Переход от вязкого в хрупкое состояние происходит в узком температурном интервале, что создает основу для сближения так называемого температурного перехода с хрупким разрушением. Связь между интенсивностью напряжения и температурой перехода имеет нелинейный характер: напряжения трехмерного растяжения наиболее чувствительны к изменению температуры в области температурного барьера.

Кривые напряжение — деформация позволяют судить о связи между свойствами прочности и пластичности, размером сечения и температурой разрушения образцов из стали 22К и ЧСН13030 (рис. 1). При вязком разрушении (1) толстых пластин сечением  $90 \times 300$  мм ( $t = 20^\circ \text{C}$ ) по сравнению со стандартным образцом (кривая 6) предел прочности понижается на 15%, предел текучести — на 10%, остаточное удлинение и поперечное сужение — до 25% [1]. Для аналогичных образцов (кривая 7) из стали ЧСН13030 было замечено, что с увеличением сечения в  $2 \cdot 10^3$  раза предел прочности понижается на 10%, а предел текучести — до 20% [2].

Квазихрупкое разрушение (2) при  $t = 20^\circ \text{C}$  характеризуется некоторым изменением свойств прочности и пластичности: сопротивление сдвигу и отрыву в случае квазихрупкого разрушения оказывается на 10% выше, чем при вязком разрушении. Одновременно относительное удлинение при разрыве понижается в полтора, а поперечное сужение — почти в три раза. Интенсивность напряжения, намного превышающая предел текучести, температура и наличие дефекта в виде кольцевой наплавки, выполненной после термообработки образцов толстых пластин из стали 22К (нормализация, отпуск и высокий отпуск для сварных соединений), способствуют переходу стали в хрупкое состояние. Хрупкое разрушение, как правило, наблюдается при низкой температуре; оно сопровождается существенным изменением свойств прочности и пластичности. При понижении температуры до  $-40^\circ \text{C}$  предел текучести  $\sigma_T$  изменяется до 1,16, предел прочности  $\sigma_B$  до 0,94 (разрушение 3), а при понижении температуры до  $-50^\circ \text{C}$   $\sigma_T = 1,28$  и  $\sigma_B = 0,91$  (разрушение 4), при понижении до  $-60^\circ \text{C}$  предел прочности совпадает с пределом текучести (разрушение 5). Существенно понижаются также пластические свойства: относительное удлинение при разрыве до 4%, поперечное сужение до 7%.

Напряжение, температура и размер дефекта взаимосвязаны, что показано на диаграмме разрушения рис. 2, построенной по результатам работ [1, 3]. Если дефект отсутствует, понижение температуры приводит к постепенному увеличению установленного при комнатной температуре предела прочности  $\sigma_B^{20}$  (точки 1 и 2) и предела текучести стали  $\sigma_T^{20}$ . При этом предел текучести увеличивается быстрее, и в случае очень низкой температуры они становятся равными. Пластическая деформация, замеренная по изменению относительного поперечного сужения  $\psi$  и доли вязкого волокна в изломе  $F_B$ , уменьшается, по существу, до нулевого значения. Если дефект отсутствует, такая температура может рассматриваться как температура нулевой пластичности (ТНП). В случае испытаний гладких образцов температура хрупкого разрушения составляет  $-200^\circ \text{C}$ , температура же нулевого значения деформации поперечного сужения будет ниже  $-180^\circ \text{C}$ , а температура отсутствия вязкого волокна в изломе ниже  $-120^\circ \text{C}$  [3].

Если в образце имеется дефект в виде кольцевой наплавки, то хрупкое разрушение в некоторых случаях наблюдается при нормальной температуре (точки 6, рис 2). С понижением температуры предел прочности уменьшается и при ТНП становится равным пределу текуче-

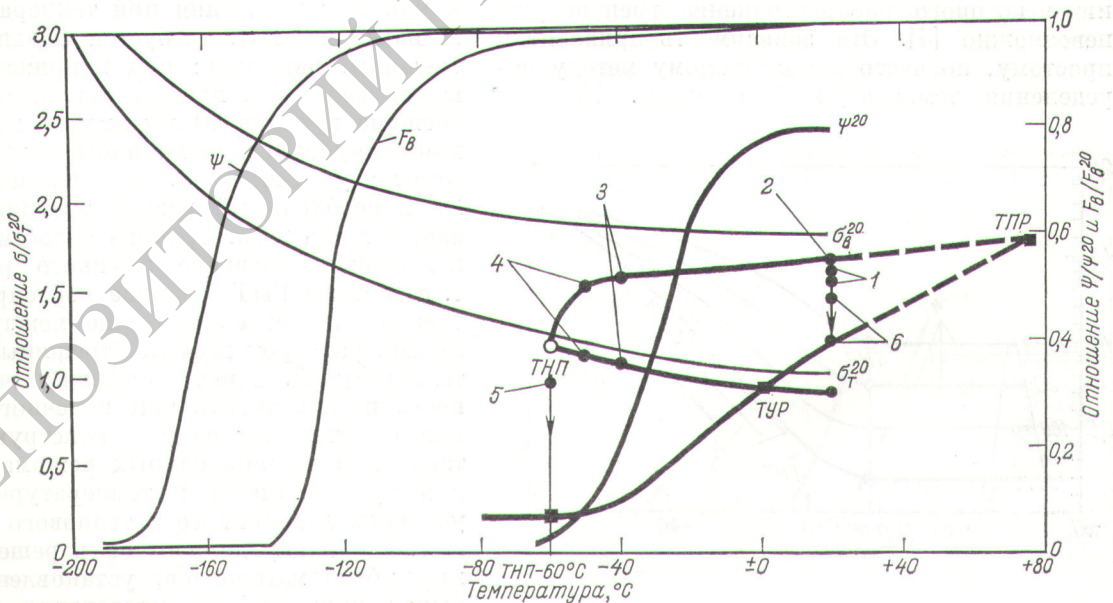
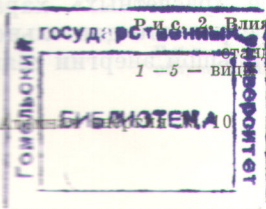


Рис. 2. Влияние температуры на характеристики разрушения образцов из стали 22К:

1 — стандартный образец сечением  $0,3 \text{ см}^2$ ; 2 — толстая пластина с дефектом (сечение  $270-486 \text{ см}^2$ ); 3 — стандартный образец сечением  $0,3 \text{ см}^2$ ; 4 — толстая пластина с дефектом (сечение  $270-486 \text{ см}^2$ ); 5 — стандартный образец сечением  $0,3 \text{ см}^2$ ; 6 — толстая пластина с дефектом (сечение  $270-486 \text{ см}^2$ ); 1-5 — вид разрушений (см. рис. 1).



309187

сти (виды разрушения 1—5, рис. 1). На рис. 2 стрелка, ведущая вниз от точки ТНП, указывает, что увеличение интенсивности напряжений или размера дефекта при более низких номинальных напряжениях приводит к разрушению. Для образцов в виде толстых пластин с кольцевой наплавкой ТНП остается не ниже  $-60^{\circ}\text{C}$ , что соответствует нулевой деформации поперечного сужения.

Нижняя кривая диаграммы разрушения (см. рис. 2) построена по крайним точкам границы хрупкого разрушения (с целью показать взаимосвязь между напряжениями и переходной температурой нераспространения трещины). Эта кривая указывает границу нераспространения хрупкой трещины при различной интенсивности напряжения. Температура нераспространения трещины при напряжениях, равных пределу текучести, определяется как переходная температура упругого разрушения (ТУР) и представляет собой наибольшую температуру распространения трещины при полностью упругих напряжениях. Точно так же переходная температура пластического разрушения (ТПР) представляет собой температуру, выше которой разрушение является полностью вязким, причем разрушающее напряжение приближается к пределу прочности стали 22К.

Почти горизонтальная ветвь этой нижней кривой соответствует напряжению около  $0,2\sigma_{\text{т}}$ , ниже которого распространение трещин уже невозможно [4]. Эта зависимость приводит к простому, но часто используемому методу определения температурной границы. Поэтому

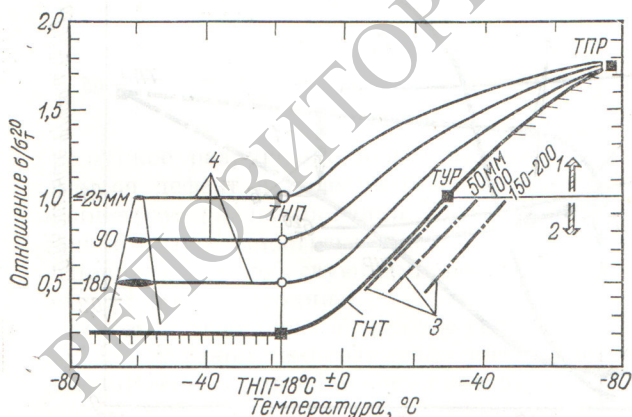


Рис. 3. Особенности переходной температуры хрупкого разрушения образцов с трещиной:

1 — пластические деформации; 2 — упругие деформации; 3 — граница остановки трещины для стали ЧСН 13030; 4 — граница нераспространения трещины при различных размерах дефекта.

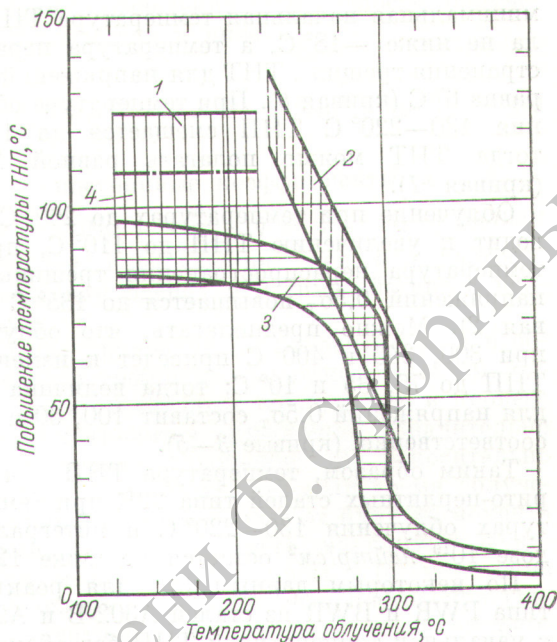
на практике часто выбирают такой материал и технологию обработки, чтобы температура перехода в хрупкое состояние была значительно ниже рабочей температуры несущих конструкций.

Для анализа данных испытаний и оценки эксплуатационной надежности конструкций, подверженных хрупкому разрушению, на рис. 3 приведена диаграмма разрушения конструкций из феррито-перлитных сталей. Диаграмма отражает влияние напряжений, температуры и размеров дефектов, вызывающих хрупкое разрушение (от трещин длиной 25 мм до сквозных трещин длиной, равной удвоенной толщине стенки сосуда давления). Данные о размерах трещин получены на основе испытаний образцов из сталей 22К и ЧСН 13030 [1, 2] в результате многочисленных испытаний образцов с небольшими трещинами и нескольких исследований больших трещин на листах толщиной 19 и 25 мм [4]. Зависимость температуры остановки трещин от интенсивности напряжений установлена для стали ЧСН 13030 толщиной 50, 100 и 150—200 мм. Из диаграмм можно видеть, что увеличение толщины на каждые 50 мм позволяет повысить температуру остановки трещины приблизительно на  $10^{\circ}\text{C}$ .

Диаграмма рис. 3 показывает, что при данном уровне напряжений для возникновения хрупкого разрушения при температурах, превышающих ТНП, требуется больший размер трещины, например: при напряжениях, соответствующих  $3/4$  предела текучести, сквозная трещина порядка 90 мм является достаточной для стимулирования хрупкого разрушения при температуре ниже  $5^{\circ}\text{C}$ . Однако при температуре  $20^{\circ}\text{C}$  необходимый размер трещины увеличивается в два раза. Граница области, в которой невозможно развитие хрупкого разрушения, т. е. кривая ГНТ (граница нераспространения трещины), дает соотношение между напряжениями, размером дефекта (трещины) и рабочей температурой. Вполне очевидно, что возможность предсказывать тип конечного разрушения особенно важна для конструкций, работающих в нестационарных режимах нагружения при повышенной температуре в особых условиях нейтронного и теплового охрупчивания, поскольку должны быть решены проблемы выбора материалов, установления расчетных напряжений и определения надежности конструкций. Изменение «расчетных» характеристик материалов в результате длительного облучения нейтронами большой энергии связа-

во с постепенным повышением температуры перехода в хрупкое состояние.

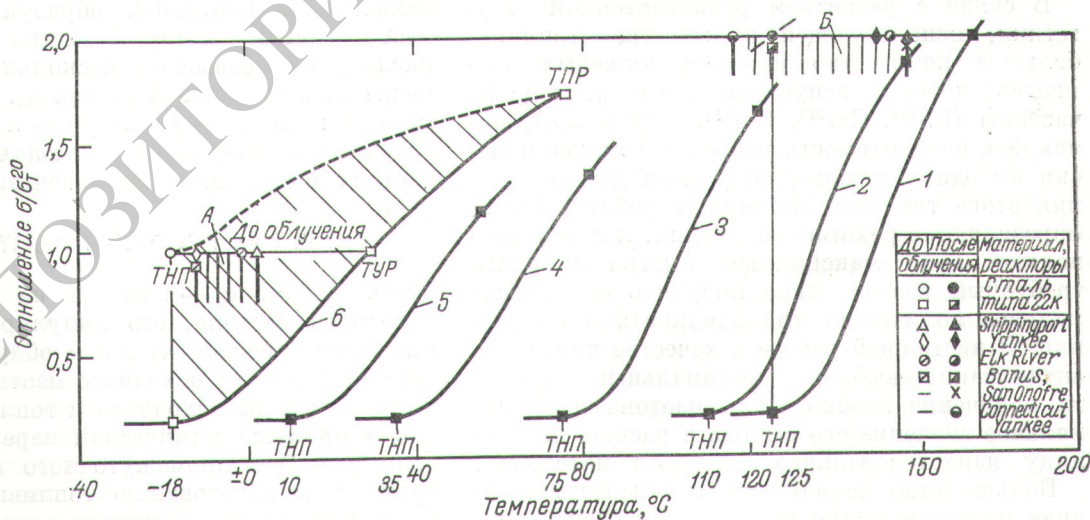
На диаграмме рис. 4, построенной с использованием данных работ [5—7], показано, что критическая температура хрупкости значительно повышается в результате длительного облучения нейтронами при температуре ниже 230° С, так что хрупкое разрушение может произойти при рабочей температуре конструкции. При температуре облучения <220° С критическая температура хрупкости стали 22К (область 1) при статическом и ударном изгибах [5] смещается в диапазон 80—125° С, для сталей А 302-В, SA 336, SA 350-LF-1(мод), SA 350-LF-3 и металла сварного шва (область 2) достигает 135° С [6], а для стали А212-В (область 3) смещается в диапазон 83—97° С [7]. Критическая температура хрупкости, установленная для образцов из стали ЧСН 13030 (область 4) по отношению суммарного спада нагрузки к максимальному значению ее  $\Sigma \Delta P_i / P_{\text{макс}} \leq 1/3$  при статическом изгибе [5], приближается к значению ТНП, оцениваемому по ударной вязкости для образцов Шарпи с V-образным надрезом. При температуре облучения образцов стали ЧСН 13030 (сечением 20 × 20 × 100 мм с острым надрезом в диапазоне 130—200° С) критическая температура хрупкости повышается до 140° С. Начальная температура хрупкости необлученной стали составляет 38° С [5]. Определение хрупкой прочности по величине суммарного спада нагрузки при статическом изгибе, по-видимому, более удовлетворяет



Р и с. 4. Влияние температуры облучения на смещение температуры ТНП при интегральной дозе  $10^{19}$  нейтр/см<sup>2</sup> ( $E > 1$  Мэв).

условиям оценки металлургических свойств стали.

На рис. 5 показана взаимосвязь температуры ТНП, напряжения и температуры облучения нейтронами с энергией >1 Мэв для ферритоперлитных сталей типа 22К. Для облучения



Р и с. 5. Смещение переходной температуры хрупкого разрушения стали 22К в результате интегрального облучения нейтронами при суммарной дозе  $10^{19}$  нейтр/см<sup>2</sup> ( $E > 1$  Мэв) при температурах до 400° С.

минимальная начальная температура ТНП была не ниже  $-18^{\circ}\text{C}$ , а температура нераспространения трещины ТНТ для напряжений  $0,5\sigma_T$  равна  $6^{\circ}\text{C}$  (кривая 6). При температуре облучения  $130-220^{\circ}\text{C}$  ТНП смещается до  $125^{\circ}\text{C}$ ; тогда ТНТ можно полагать равной  $150^{\circ}\text{C}$  (кривая 1).

Облучение при температурах до  $260^{\circ}\text{C}$  приводит к увеличению ТНП до  $110^{\circ}\text{C}$ , причем температура нераспространения трещины для напряжений  $0,5\sigma_T$  повышается до  $135^{\circ}\text{C}$  (кривая 2). Можно предполагать, что облучение при  $300, 340$  и  $400^{\circ}\text{C}$  приведет к изменению ТНП до  $75, 35$  и  $10^{\circ}\text{C}$ ; тогда величина ТНТ для напряжений  $0,5\sigma_T$  составит  $100, 60$  и  $35^{\circ}\text{C}$  соответственно (кривые 3-5).

Таким образом, температура ТНП для феррито-перлитных сталей типа 22К при температурах облучения  $130-220^{\circ}\text{C}$  и интегральной дозе  $10^{19}$  нейтр/см<sup>2</sup> остается не ниже  $125^{\circ}\text{C}$ .

По некоторым данным [8], для реакторов типа PWR и BWR из сталей A302-B и A212-B с начальной температурой ТНП без облучения в пределах  $-12 \div +3^{\circ}\text{C}$  (область А) при ожидаемой дозе  $(1,6-6,1) \cdot 10^{19}$  нейтр/см<sup>2</sup> ( $E > > 1$  Мэв) в конце срока службы, после 20-30 лет работы, температура ТНП смещается в диапазон  $120-160^{\circ}\text{C}$  (область Б) [8].

В настоящее время очевидной является потребность расширить основные сведения о переходной температуре хрупкого разрушения, механизме возникновения и залечивания радиационных повреждений, о влиянии энергетического спектра нейтронов и мощности дозы.

Поступила в Редакцию 11/VIII 1969 г.  
В окончательной редакции 8/1 1970 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Н. П. Мельников, А. С. Довженко. «Сварочное производство», № 5, 9 (1967).
2. К. Кална. В сб. «Исследование напряжений и прочности корпуса реактора». М., Атомиздат, 1968, стр. 183.
3. Н. А. Махутов. Там же, стр. 202.
4. W. Pellini, L. Steete, J. Hawthorne. Analysis of Engineering and Basic Research Aspects of Neutron Embrittlement of Steels (Italy, Venice, May 1962).
5. А. Д. Амаев, Н. Ф. Правдюк. См. [2], стр. 241.
6. G. Serpan, L. Steele. Report NRL-6415, 1966.
7. R. Berggren, W. Stelzman, T. Jones. Report, ORNL-4097, 1967.
8. Report ORNL-2829, 1959.

## Оптимальный режим облучения при производстве изотопов

В. П. ТЕРЕНТЬЕВ, В. А. ЖАРКОВ, Г. М. ФРАДКИН, Т. П. ЧАВЫЧАЛОВА

УДК 621.039.574.5

В связи с развитием радиоизотопной энергетики, использующей в качестве «топлива» большое количество изотопов тяжелых элементов, которые испускаются при распаде  $\alpha$ -частицы (Pu<sup>238</sup>, Cm<sup>242</sup>, Cm<sup>244</sup>, U<sup>232</sup> и пр.), появилась необходимость разработать экономически выгодные режимы облучения для получения этого топлива. Во многих работах [1, 2] определяются режимы облучения, которые позволяют либо максимально быстро получить требуемый изотоп, либо получить его максимальное количество при однократном облучении. В настоящей работе в качестве критериев оптимизации выбраны минимальные затраты на получение необходимого изотопа и максимальное значение его выхода в расчете на единицу израсходованного исходного материала.

Большинство используемых в качестве топлива изотопов получают по следующей схеме. Практически стабильный исходный изотоп (его количество в момент времени  $t$  обозначим  $n_1$ )

захватывает нейтроны, образуя промежуточный изотоп  $n_2$ , который быстро (период полураспада не превышает нескольких дней) распадается в топливный изотоп  $n_3$ . Принята нормировка:  $n_1(0) = 1, n_2(0) = n_3(0) = 0$ . Затраты  $c$  на получение 1 г-атома топливного изотопа определяют из равенства

$$c_1 + c_2 + c_3 + c_4 = c_1 \alpha n_1 + c\beta (\gamma n_2 + n_3). \quad (1)$$

Здесь  $c_1, c_2, c_4$  — затраты на приобретение исходного изотопа, его ампулирование и химическую переработку после облучения (в расчете на 1 г-атом исходного изотопа);  $\alpha$  и  $\beta$  — прямые выходы исходного и топливного изотопов в процессе химической переработки;  $\gamma$  — доля распадов промежуточного изотопа, приводящая к образованию топливного изотопа;  $c_3$  — затраты на облучение.

В большинстве практически важных случаев затраты на облучение можно выразить одной