

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Машкович В.П. Защита от ионизирующих излучений. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1982. 482 с.
2. Справочник по специальным функциям. М.: Наука, 1978. 832 с.
3. Добрынин Ю.Л., Кузьмич В.В. Метод полевой полупроводниковой гамма-спектрометрии для радиоэкологических исследований (реализация расчетных моделей): Препринт ИАЭ-4899/1, 1989.

Поступило в Редакцию 1.07.93

УДК 546.831.661.883.66.094.1/2

**ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
НА ЗАМЕДЛЕННОЕ ГИДРИДНОЕ РАСТРЕСКИВАНИЕ ЦИРКОНИЕВЫХ ТРУБ**

Иванова С.В. (НИКИЭТ)

При эксплуатации канальных реакторов внутренняя поверхность технологических каналов и каналов системы управления и защиты контактирует с потоком теплоносителя, наружная — с внутриреакторной средой. В качестве теплоносителя используется вода, внутриреакторной среды — инертный газ.

Применяемый для изготовления каналов циркониевый сплав (Zr—2,5% Nb) обладает способностью поглощать водород из газовой и водяной среды. При превышении предела растворимости в сплаве образуются пластинчатые выделения гидридов циркония, имеющие более низкую пластичность, чем металлическая матрица. Вследствие этого такие выделения являются участками образования трещин и легкими путями их развития. Трещина распространяется через гидридную фазу, затем задерживается в пластинчатой матрице. В период эксплуатации этот процесс последовательно повторяется. Такой механизм медленного ступенчатого роста субкритической трещины называют замедленным гидридным растрескиванием.

После изготовления в трубах канальных реакторов сохраняются остаточные напряжения, уровень которых может меняться от нуля до предела текучести в зависимости от технологии изготовления (правки) труб. В процессе эксплуатации на трубы дополнительно воздействуют напряжения, вызванные давлением теплоносителя на внутреннюю поверхность.

В работе исследовалось влияние на работоспособность циркониевых труб замедленного гидридного растрескивания в условиях совместного воздействия остаточных технологических напряжений и напряжений, создаваемых давлением теплоносителя.

Для реализации процесса гидридного растрескивания необходимо выполнение условия $K_1 \geq K_{ц}$, т.е. коэффициент интенсивности напряжений (K_1) должен превышать некоторое пороговое значение ($K_{ц}$).

$K_{ц}$ зависит от технологии изготовления, термомеханической обработки, температуры эксплуатации, состава гидрида ZrH_x и может колебаться в пределах $K_{ц} \sim 3—12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ [1]. Поэтому были рассмотрены следующие варианты: $K_{ц}$, равный 3, 6, 12 МПа · м^{1/2}.

Как уже отмечалось, на различных участках труб могут сохраняться разные по величине и знаку остаточные напряжения. Как показывают данные РНЦ «Курчатовский институт», область распространения положительных остаточных напряжений занимает до 1/4 толщины стенки трубы (t). С учетом этих обстоятельств были рассмотрены различные случаи нагружения труб:

действует только давление теплоносителя на внутреннюю поверхность, остаточных напряжений нет;

действует давление теплоносителя и присутствуют остаточные напряжения, имеющие на наружной поверхности максимальное значение σ_A 100, 200, 300 МПа и линейно спадающие до нуля на глубине $h = t/4$.

Принятая схема распределения остаточных напряжений приведена на рис. 1, где σ_A — наибольшие растягивающие остаточные напряжения; σ_{α} — напряжения в вершине рассматриваемой трещины; σ_{ϵ} — остаточные напряжения сжатия.

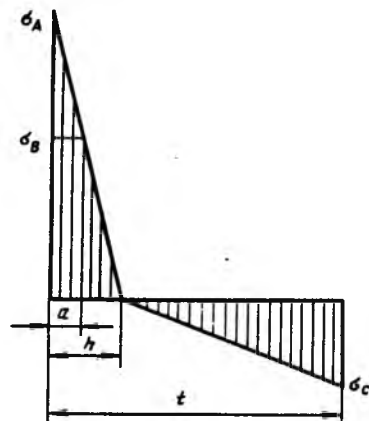
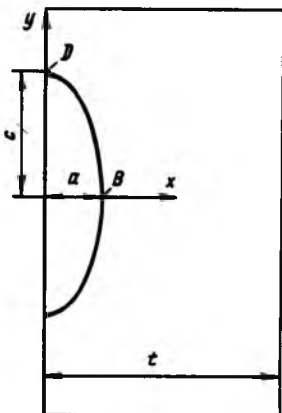


Рис. 1. Распределение остаточных напряжений по толщине стенки трубы



Р и с. 2. Поверхностная полуэллиптическая трещина

Опыт эксплуатации показывает, что в основном развитие трещины происходит с поверхности труб, поэтому в расчете была рассмотрена поверхностная полуэллиптическая трещина (рис. 2, *a, c* — глубина и полуэллиптическая трещина).

Коэффициент интенсивности напряжений определяли из выражения [2] $K_I = \sigma_{\text{зад}} Y \sqrt{a}$, где $\sigma_{\text{зад}}$ — приведенное к равномерному напряжению, зависящее от распределения напряжений по глубине трещины;

$$Y = \nu_I [1 - (0,89 - 0,57 \sqrt{a/c})^2 (a/t)^{1,5}]^{-3,25} \times \\ \times [\pi / (1 + 1,464(a/c)^{1,65})]^{0,5},$$

где $\nu_B = 1,12 - 0,8 a/c$; $\nu_D = [1 + 0,32(a/t)^2] [1,23 - 0,09(a/c)] \sqrt{a/c}$. Из условия $K_I = K_{\text{кр}}$ определяли соответствующие значения a/t и a/c .

На рис. 3, 4 приведены графики, отражающие соотношение между уровнем остаточных напряжений, $K_{\text{кр}}$ и относительными размерами трещины a/c и a/t , при превышении которых может начаться процесс замедленного гидридного растрескивания. При этом рассматриваются два случая: достижение коэффициентом интенсивности напряжений значения $K_{\text{кр}}$ в самой

глубокой точке поверхностной трещины K_{ID} (см. рис. 3, *a*) и в точке $D(K_{ID})$ (см. рис. 3, *b*). Точка на графике характеризует относительные размеры трещины (a/t и a/c), при которых K_I достигает $K_{\text{кр}}$ при рассматриваемом уровне остаточных напряжений (σ_A). В зонах, которые расположены выше полученных кривых, соответствующих определенным σ_A и $K_{\text{кр}}$, т.е. при больших размерах трещины, действует процесс замедленного гидридного растрескивания, тогда как в зонах, расположенных ниже этих кривых, т.е. при меньших размерах трещины, такой процесс не развивается.

На основе данных рис. 3 был построен график, показанный на рис. 4. В зависимости от того, в каком направлении при данных параметрах трещины быстрее достигалось равенство $K_I = K_{\text{кр}}$, т.е. начинал действовать механизм растрескивания, на график рис. 4 наносили значения a/t и a/c , соответствующие либо K_{ID} (развитие трещины в радиальном направлении, точка *B* на рис. 2), либо K_{ID} (развитие трещины в осевом направлении, точка *D* на рис. 2). Как видно из рис. 4, при протяженных трещинах (более низких значениях a/c) коэффициент K_I имеет наибольшее значение в самой глубокой точке трещины (точка *B* на рис. 2), поэтому в этой точке быстрее достигается равенство $K_I = K_{\text{кр}}$ и трещина начинает развиваться в радиальном направлении. При коротких трещинах (более высоких значениях a/c) коэффициент K_I имеет наибольшее значение в точках выхода трещины на поверхность (точка *D* на рис. 2), поэтому в этих точках быстрее достигается равенство $K_I = K_{\text{кр}}$ и трещина начинает развиваться в осевом направлении. В точках стыковки графиков 3, *a* и 3, *b*, показанных \times на рис. 4, имеет место равенство коэффициентов K_I в радиальном и осевом направлениях, поэтому трещина может развиваться как в одном, так и другом направлении.

Аналогичные зависимости получены для труб каналов СУЗ.

В соответствии с техническими условиями допустимая глубина дефекта на трубах циркониевых каналов составляла 0,2 мм, в настоящее время она снижена до 0,12 мм. На графиках рис. 3, 4 нанесены значения $a_1/t = 0,05$ и $a_2/t = 0,03$, соответствующие допустимой глубине дефекта $a_1 = 0,2$ мм и $a_2 = 0,12$ мм.

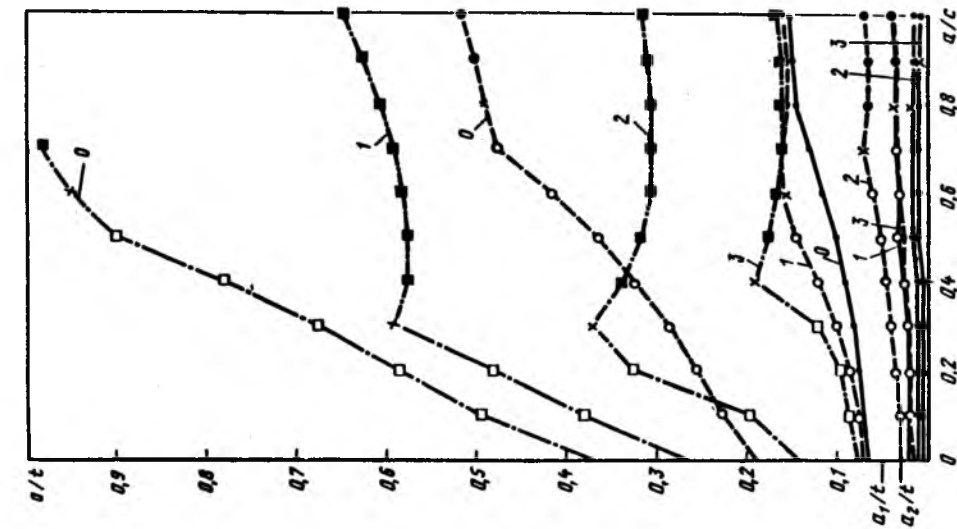
Полученные данные позволяют заключить:

при отсутствии остаточных напряжений и глубине дефекта, не превышающей допустимую, даже при низких значениях $K_{\text{кр}}$ замедленного гидридного растрескивания нет. В случае больших значений $K_{\text{кр}}$ (≥ 12 МПа \cdot м $^{1/2}$) и допустимой глубине дефекта растрескивания не происходит даже при самых высоких остаточных напряжениях 300 МПа;

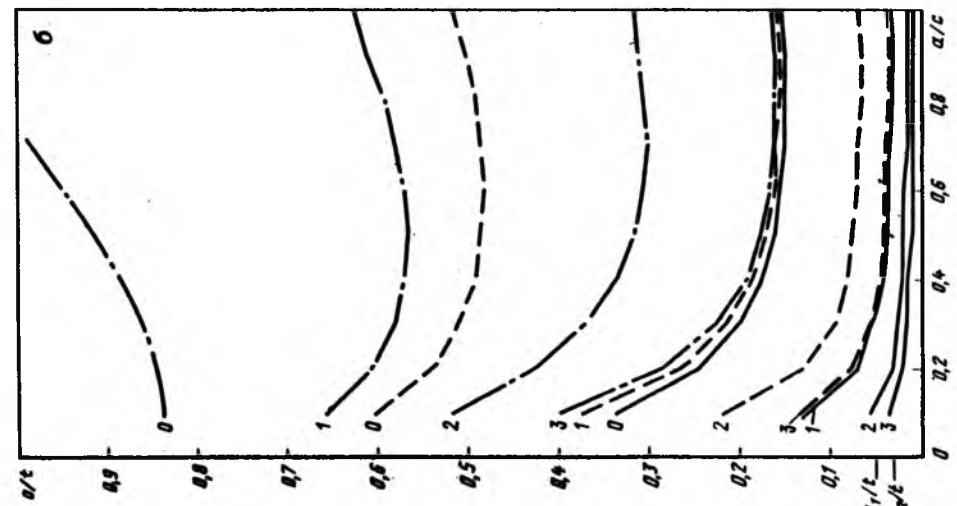
если действуют остаточные напряжения, то при допустимой глубине дефекта и $K_{\text{кр}} = 3$ МПа \cdot м $^{1/2}$ механизм замедленного гидридного растрескивания начнет действовать уже при 100 МПа для технологического канала и 200 МПа для канала СУЗ, в случае $K_{\text{кр}} = 6$ МПа \cdot м $^{1/2}$ эти значения составят 200 и 300 МПа соответственно;

в каналах СУЗ развитие трещин в осевом направлении вследствие процессов гидридного растрескивания может происходить только при $K_{\text{кр}} = 3$ МПа \cdot м $^{1/2}$, если максимальные остаточные напряжения превышают 200 МПа. При более высоких значениях $K_{\text{кр}}$ развитие трещин в осевом направлении становится невозможным независимо от уровня остаточных напряжений;

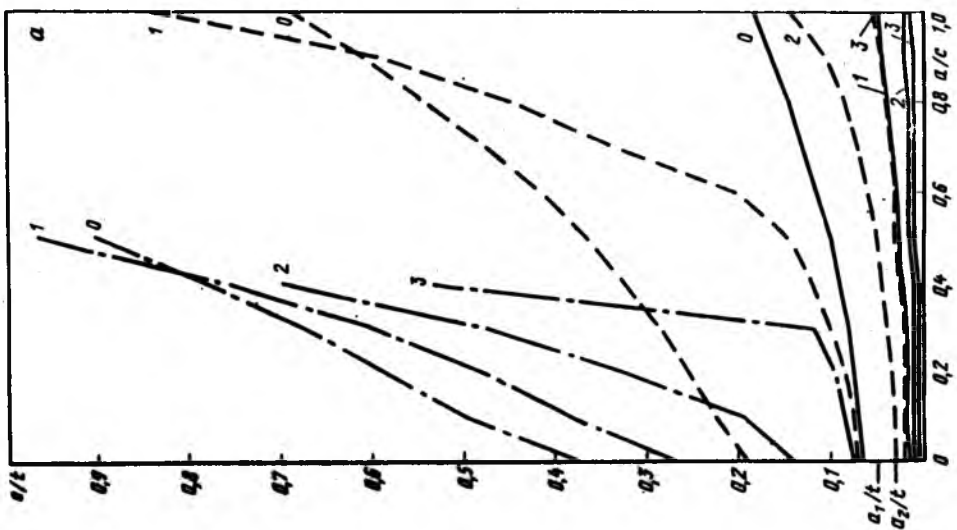
при использовании труб из циркониевых сплавов необходимо проводить указанный анализ для установления допустимых размеров дефектов и допустимого уровня остаточных напряжений в готовых трубах.



Р и с. 4. То же, что на рис. 3, в радиальном (•••○ □) и осевом направлениях (—•—•—■)



Р и с. 3. Относительные размеры трещин труб технологических каналов, при превышении которых возможен процесс замедленного гидридного растрескивания в радиальном ($K_{0d} \geq K_{0b}$) (a) и осевом направлениях ($K_{0d} \geq K_{0b}$) (б) при K_{0b} , равном 3 (—•—), 6 (---), 12 МПа·м^{1/2} (—•—), 100 (1), 200 (2), 300 МПа (3) соответственно



Р и с. 3. Относительные размеры трещин труб технологических каналов, при превышении которых возможен процесс замедленного гидридного растрескивания в радиальном ($K_{0d} \geq K_{0b}$) (a) и осевом направлениях ($K_{0d} < K_{0b}$) (б) при K_{0b} , равном 3 (—•—), 6 (---), 12 МПа·м^{1/2} (—•—), 100 (1), 200 (2), 300 МПа (3) соответственно

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Evropin S.V., Kisselev V.A., Abramov V.J. e.a. Investigation of subcritical cracks growth in channel reactor tubes from zirconium alloy. — In: Proc. Third Intern. At. En. Agency Specialists Meet. on Subcritical Crack Growth. May 14—17 1990, v. 1, 20, p. 223—230.
2. Овчинников А.В. Приближенная формула определения коэффициентов интенсивности напряжений K_I для тел с поверхностными трещинами. — Проблемы прочности, 1986, № 11, с. 41—44.

Поступило в Редакцию 13.07.93

УДК 614.876

РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ РАДИАЦИОННОЙ АВАРИИ НА АТОМНОЙ ПОДВОДНОЙ ЛОДКЕ В БУХТЕ ЧАЖМА

*Сивинцев Ю.В. (Ин-т ядерных реакторов РНЦ «Курчатовский ин-т»),
Высоцкий В.Л., Данилян В.А. (ВМФ, г. Владивосток)*

Настоящая статья базируется на материалах расчетно-экспериментальных работ и натурных экспедиционных исследований, выполненных в 1985—1992 гг. сотрудниками РНЦ «Курчатовский институт», химической и медицинской служб Тихоокеанского флота и некоторых других институтов и организаций Приморья. Эти данные послужили основой для соответствующего раздела «Белой книги» — доклада комиссии А.В. Яблокова об удалении радиоактивных отходов в моря, омывающие Россию*. Ядерное общество планирует опубликовать монографию, содержащую основные материалы упомянутых работ.

Реактивная авария и ее последствия. 10 августа 1985 г. на атомной подводной лодке, находившейся у пирса судоремонтного завода в бухте Чажма (Приморье, пос. Шкотово-22), произошла тяжелая радиационная авария: при завершении работ по перегрузке реакторов вследствие нарушения требований ядерной безопасности и технологии подрыва крышки реактора возникла самопроизвольная цепная реакция в реакторе левого борта. В результате теплового взрыва были разрушены носовая и кормовая аппаратные выгородки, часть свежего топлива выброшена из корпуса реактора, разрушен перегрузочный домик (его крыша была отброшена взрывом на 70—80 м и упала в воду в 30 м от берега), подводная лодка получила повреждения прочного корпуса в кормовой части реакторного отсека. Сразу же после взрыва в реакторном отсеке возник пожар, который был локализован через 4 ч, после чего началось радиационное обследование территории завода и автомобильных дорог.

Установлено, что образовавшиеся продукты горения вместе с продуктами деления и активации и частицами непрореагировавшей топливной композиции (в виде крупнодисперсных частиц и шлака) выпали вокруг аварийной подводной лодки в зоне радиусом 50—100 м. Через 7,5 ч после аварии мощность экспозиционной дозы излучения в районе аварии достигала 250—500 мР/ч, поверхностная плотность радиоактивных загрязнений излучающими нуклидами — $(0,5-4)10^6$ расп./ $(\text{мин} \cdot \text{см}^2)$.

Возникшее при аварии облако газообразных радиоактивных веществ пересекло п-ов Дунай в северо-западном направлении и вышло к морю на побережье Уссурийского залива. Результаты натурных исследований морской воды и донных отложений позволили обосновать вывод, что при дальнейшем перемещении радиоактивного облака над акваторией Уссурийского залива (шириной 28—30 км) плотность выпадений снизилась до фоновой и не повлияла на радиационную обстановку в г. Владивостоке и его пляжной зоне. По данным 1989—1991 гг. мощность экспозиционной дозы γ -излучения у береговой черты бухты Шамора составляла 6—8 мкР/ч.

Метеоусловия в момент аварии благоприятствовали тому, что пос. Шкотово-22, расположенный в 1,5 км от места стоянки подводной лодки, также не пострадал от радиоактивных выпадений — они пришлось в основном на территорию завода, прилегающую к акватории бухты Чажма, и необитаемую часть п-ва Дунай.

По оценкам, выброс короткоживущих радиоактивных благородных газов составил приблизительно 2 МКи, других летучих продуктов деления (в основном изотопов йода) и активации (преимущественно ^{60}Co и ^{54}Mn) — около 5 МКи.

В результате радиационного мониторинга местности установлено, что наибольшая плотность выпадений оказалась сосредоточенной в лесном массиве на узком участке длиной 3,5 км и шириной 200—650 м общей площадью 2 км² (рис. 1).

*Факты и проблемы, связанные с захоронением радиоактивных отходов в морях, омывающих территорию Российской Федерации (материалы доклада Правительственной комиссии). Администрация Президента Российской Федерации. М, 1993 (разд. 3, 4, с. 59—61).