

УДК 621.039.58

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТРУБОПРОВОДНЫХ (АРМАТУРНЫХ) УСТРОЙСТВ НЕТРАДИЦИОННЫМИ СРЕДСТВАМИ

Ионайтис Р.Р. (НИКИЭТ)

В ядерной технике, особенно на АЭС, трубопроводные устройства применяются широко и в большом количестве (до 6000 арматурных изделий на один энергоблок ВВЭР, до 22 000 — РБМК). Ввиду затрудненности монтажа и демонтажа трубопроводных устройств арматура до условного диаметра 300 мм поставляется на АЭС в комплекте с приводами. Клапаны, задвижки и другие арматурные изделия работают в трудных условиях (воздействие агрессивной среды, высокая скорость потока, абразивный и кавитационный износ, эрозия и коррозия, вибрация, влияние облучения и др.), поэтому нередко выходят из строя (до 70% отказов на энергоблоке), требуют больших затрат (тоже до 70%) на ремонт и диагностику, затрудняют продление срока службы АЭС.

Усовершенствование трубопроводных устройств возможно только при использовании принципиально новых конструкторско-технологических решений, учитывающих разнообразие компоновок, резервирование составных элементов, модульность построения и т.п.

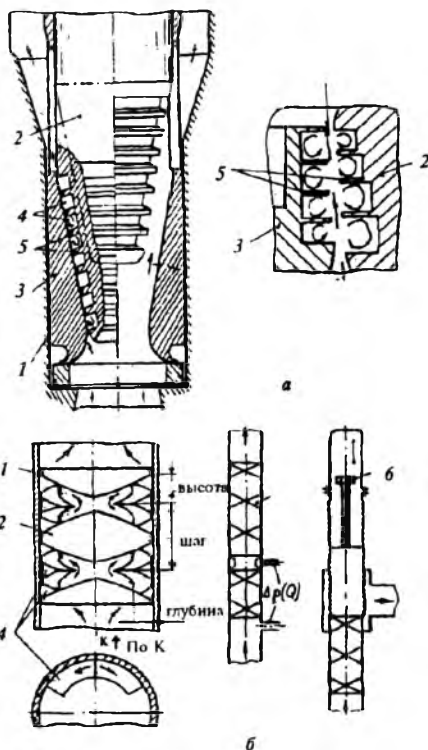
Основными нетрадиционными путями совершенствования трубопроводных устройств (частично опробованными в ядерной технике) являются комплексное использование набора принципов и технических критериев повышения надежности [1—4], введение ступенчатого дросселирования [5], применение сплавов с памятью формы [6, 7], создание принципиально новой ремонтной арматуры со съёмными (малогабаритными) приводами.

Повышению безопасности ядерной техники эффективно способствует соблюдение принципов надежности [1, 4], что относится и к вновь разрабатываемым трубопроводным устройствам.

Высокой степени дросселирования потока, необходимой для регулирования расхода среды, обычно достигают уменьшением площади проходного сечения устройства [8]. Это приводит к возрастанию скорости течения теплоносителя и снижению срока службы устройства

(вследствие эрозионного износа или вибрационного разрушения). В узком проходном сечении возможно засорение с недопустимым снижением расхода. Для устранения таких нежелательных эффектов, как эрозия, кавитация, вибрация, нестабильность расхода, определяемых скоростью протекания жидкости в узком сечении устройства, в ядерной технике разработаны дроссельно-регулирующие устройства, в которых создаются и реализуются потери при закрутке и резких поворотах потока, последовательные расширения и сужения, вихреобразование, искусственная шероховатость. При анализе и разработке проточной части дроссельно-регулирующих устройств рассчитывают и экспериментально определяют расходную и скоростную характеристики, пропускную способность, коэффициент сопротивления (отнесенный к скорости в самом узком сечении между плунжером и седлом), число кавитации, зазор между плунжером и седлом [8].

Созданы щелевые, винтовые и гребенчатые дроссельно-регулирующие устройства с длинной ступенчато-профилированной щелью, дроссельной щелью, стенка (стенки) которой выполнена (ы) шероховатой (зубчатой), с пересекающимися канавками, дроссельными канавками (рис. 1).



Р и с. 1. Интенсификация проточной части дроссельно-регулирующих устройств поперечными дроссельными канавками на плунжере и седле (а), пересекающимися канавками, с измерительной частью и подрегулировкой (б): 1 — корпус; 2 — плунжер; 3 — седло; 4 — канавки; 5 — гребешки (зубцы); 6 — канавки; 7 — настроечная гайка

Наиболее распространенные дроссельно-регулирующие устройства, предназначенные для обслуживания реакторов, характеризуются следующими основными параметрами: гребенчатые вентили — расход теплоносителя от 2 до 100 т/ч, перепад давления до 2 МПа, условный диаметр от 20 до 80 мм, ход плунжера от 10 до 100 мм, дроссели с пересекающимися канавками — перепад давления до 10 МПа, диаметр пробки от 8 до 40 мм, длина пробки от 10 до 130 мм, шаг витка от 4 до 32 мм, сторона канавки от 1 до 11 мм. Используется 35 тыс. дроссельно-регулирующих устройств, включающих до 40 типоразмеров, реализующих комплекс трудносочетаемых параметров, таких, как широкий диапазон регулирования, малое гидравлическое сопротивление в полностью открытом состоянии, высокая степень дросселирования, особенно в почти прикрытом состоянии (см. рис. 1, а слева от оси), низкая скорость среды в узком сечении, большой срок службы, незасоряемость, неподверженность износу, невысокая стоимость изготовления. Поэтому целесообразно распространение регулирующих устройств с дроссельными канавками на соответствующие нужды АЭС.

Отдельные проблемы арматуры АЭС могут быть успешно решены применением сплавов и устройств с памятью формы. В арматурных изделиях могут быть обеспечены высокие развиваемые усилия и деформации, в результате существенно (в 8—10 раз) повысится компактность, комплексная функциональность, т.е. реализация контролирующей, преобразующей, усиливающей и исполнительных функций в одном устройстве, что важно при создании пассивных средств безопасности. Исключительная простота технологии использования (малое число деталей, отсутствие строгих допусков на изготовление и т.п.) может существенно облегчить внедрение сплавов и устройств с памятью формы в трубопроводные устройства.

Выпускаемые сплавы и устройства с памятью формы имеют уникальные характеристики: восстановление формы — путем растяжения, сжатия, изгиба (крючения), по деформации — 4—8% характерного размера, по напряжению — 300—600 (до 1200) МПа. Освоено производство материалов никель-титановых, медно-алюминиевых, марганцево-медных и др., рассчитанных на различную температуру срабатывания: обычно до 100—200 °С (у новых до 300 °С, иногда до 500 °С). Выпускаются разнообразные силовые элементы — прутки диаметром до 230 мм и длиной до 0,7 м, трубы диаметром от 1,5 до 70 мм и длиной до 1,5 м, проволока диаметром от 0,5 до 10 мм, листы толщиной от 0,5 до 10 мм, размером до 1,5 м, ленты толщиной от 0,04 до 5 мм и длиной до 30 м. Сплавы и устройства с памятью формы проверены на практике (в быту, медицине, технике). Их внедрение, особенно на АЭС, осложняется существенной новизной, малым опытом разработки, разбросанностью сведений. Отсутствует общепризнанная концепция применения в сложных отраслях техники, пока не созданы инженерные пособия по разработке, методики расчета быстродействующих устройств с памятью формы, не изучены способы быстрого нагрева и охлаждения, а также защиты от вредных факторов.

Использование устройств с памятью формы сопряжено с отдельными проблемами, к которым относятся преобразование нетепловых эксплуатационных параметров в управляющие тепловые сигналы, обеспечение стабильности температуры срабатывания, воздействие вредных производственных факторов, введение средств сигнализации готовности и срабатывания устройств.

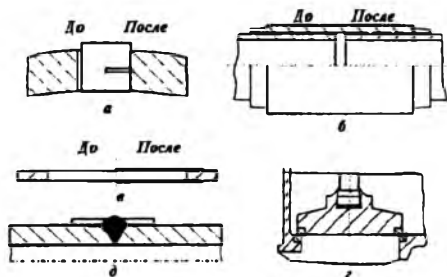
В применении устройств с памятью формы предлагается сосредоточить усилия исследователей и конструкторов на первоочередных задачах для реализации положительных свойств сплавов с памятью формы и перейти к практическому использованию в качестве дополнения к имеющимся устройствам. В первую очередь целесообразно внедрение фиксаторно-уплотнительных элементов (рис. 2), силовых приводов, прямодействующих автоматических устройств, ремонтно-монтажной оснастки, противопожарных устройств.

Уже созданы элементы с памятью формы для термомеханического соединения труб — термомуфты (диаметром от 10 до 100 мм, по ТУ от 6 до 56 мм), уплотнения фланцев и седел (диаметром от 20 до 100 мм), бандаж для укрепления сварных швов. Разработаны и проверены автоматические термомуфты, выпускаются силовые актуаторы (рис. 3) массой до 10 кг, усилием до 18 кН и ходом до 16 мм [9].

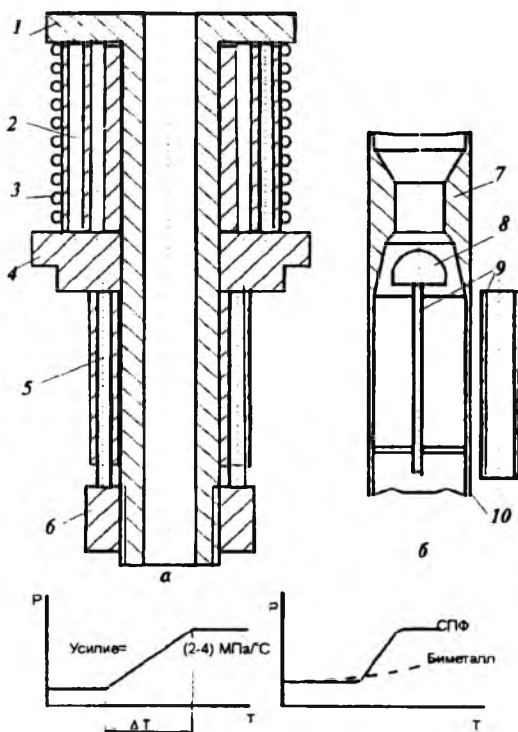
Отработаны деформируемые устройства: сигнализаторы роста мощности, прямодействующие устройства удержания, трансформирующиеся органы управления, устройства шлангового типа.

Термомеханическое укрепление сварных швов трубопроводов и оборудования обеспечивает уменьшение растягивающих усилий.

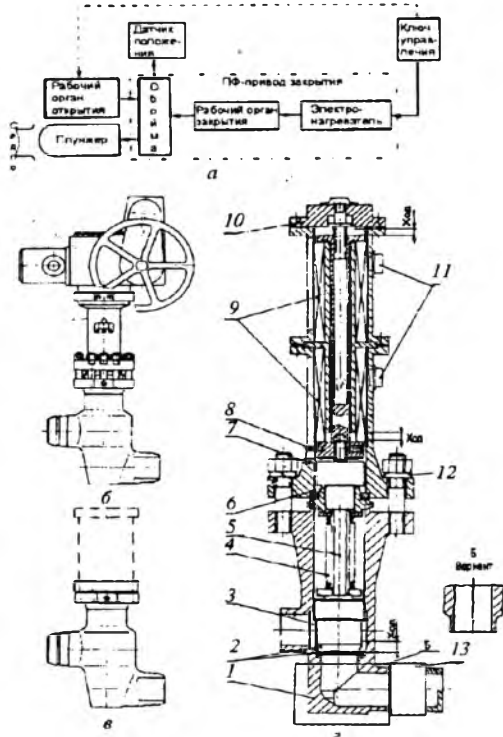
Прямодействующие автоматические устройства на основе сплавов с памятью формы могут существенно изменить возможности создания пассивных средств безопасности. При разработке трубопроводных устройств с памятью формы учитывается и варьируется температура перехода мартенсит—аустенит, характер деформации, расположение конструкции, взаимодействие с передаваемой средой; управляющее воздействие; размещение нагревателя; механизм возврата в исходное положение; возможность ручного дублирования; ремонтпригодность и др.



Р и с. 2. Фиксаторно-уплотнительные элементы с памятью формы: а — заглушка (Ø5—30 мм); б — термомуфта (Ø10—100 мм); в — фланцевая прокладка (Ø20—100 мм); з — уплотнение седла клапана (Ø30—100 мм); д — укрепитель сварного шва



Р и с. 3. Силовые приводы с памятью формы: а — электроуправляемый; б — прямодействующий; 1 — нажимной фланец; 2 — силовой элемент; 3 — электронагреватель; 4 — опора; 5 — возвратный механизм; 6 — гайка; 7 — седло; 8 — плунжер; 9 — шток; 10 — труба



Р и с. 4. Схемы и компоненты клапана с памятью формы: а — структурная схема; б — традиционный сильфонный клапан с электроприводом; в — электроуправляемый (ремонтный); г — электроуправляемый сильфонный клапан; 1 — корпус; 2 — уплотнение; 3 — зазор; 4 — сильфон; 5 — шток; 6 — сальник; 7 — стойка; 8 — указатель; 9 — приводы; 10 — ручной привод; 11 — кабельный ввод; 12 — шайба; 13 — термомуфта; 2, 9, 12, 13 — с памятью формы

Разработанная арматура с памятью формы (рис.4) разнообразна и характеризуется высокой компактностью, что позволяет приступить к созданию принципиально новой ремонтной арматуры. В этом случае на трубопроводе устанавливается корпус с уплотнением штока, а привод хранится на складе и используется только при ремонте.

Положительные свойства разработанных арматурных изделий с памятью формы — это разнообразие компоновочного исполнения, высокая компактность и простота конструкции, дистанционная управляемость, большие развиваемые усилия, высокая сопротивляемость воздействию рабочей и окружающей среды, резервирование рабочих органов, модульность, ремонтпригодность и высокая надежность.

Для эффективного массового внедрения устройств с памятью формы необходим системный анализ трубопроводных систем и устройств АЭС и выработка технических рекомендаций по их усовершенствованию в целях повышения надежности, ремонтпригодности и продления срока службы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (ОПБ-88/97) ПНАЭ Г-1-011-97. М.: 1997. 41 с.
2. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов АЭС (ПНАЭ Г-7-008-89). 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1990. 169 с.
3. Безопасность ядерных установок. Сер. «Основы безопасности» № 110. Вена: МАГАТЭ, 1993. 26 с.
4. Ионайтис Р.Р. Комплекс критериев для определения, обеспечения и повышения уровня безопасности энергоустановок. — Атомная энергия, 1995, т. 79, вып. 2, с. 83—88.
5. Дроссельно-регулирующие устройства. Авт. свид. СССР, кл. F16K, № 276663 (1970), № 460408 (1975), № 813064 (1981), № 1159374 (1984), № 1215443 (1985).

6. Митенков Ф.М., Самойлов О.Б., Шукин И.М. Перспективы использования СПФ в атомной технике. — Тяж. машиностроение, 1991, № 7, с. 16—19.
7. Ионайтис Р.Р. Возможности и особенности использования СПФ в ядерной технике. — Атомная энергия, 1997, т. 82, вып. 5, с. 392—396.
8. Ионайтис Р.Р. Нетрадиционные средства управления ядерными реакторами. М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 1992. 230 с.
9. Василенко А.Ю., Кандыбин В.И., Косилов А.Т., Паршин В.Г. Привод. Пат. России № 2028507, F03G 7/06, 17.12.90/09.02.95.

Поступило в Редакцию 14.08.97

УДК 621.039.6

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НА РАДИАЦИОННОЕ ОХРУПЧИВАНИЕ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

Крюков А.М., Николаев Ю.А.

(РНЦ «Курчатовский ин-т»), Николаева А.В. (ИБРАЭ РАН)

Целью настоящего исследования являлось выявление качественных закономерностей влияния содержания в стали фосфора, меди и никеля на радиационную чувствительность и эффективность восстановления механических свойств облученной низколегированной стали в результате послерадиационного отжига. Для усиления эффекта деградации свойств под облучением использована сталь, не содержащая молибдена и хрома, в отличие от марочной корпусной стали. В связи с этим основной интерес представляют относительные изменения характеристик стали при варьировании химического состава.

Исследуемые материалы. Было исследовано шесть плавок низколегированной стали (см. таблицу). Основными элементами, изменение концентрации которых существенно влияет на радиационную чувствительность, считаются фосфор, медь и никель [1]. При оценке степени влияния того или иного легирующего элемента или остаточной примеси на охрупчивание стали под действием потока быстрых нейтронов неизбежно встает вопрос о суммарном влиянии и «фоновом» воздействии некоторых элементов на радиационное повреждение. Элемент оказывает фоновое воздействие, если изменения содержания в рамках марочного состава мало изменяют радиационное охрупчивание стали, значительные изменения концентрации приводят к существенным последствиям. Например, не выявлено значимого влияния молибдена, кремния и хрома на охрупчивание корпусной стали, однако известно, что молибден немного повышает энергию активации диффузии некоторых примесей [2], кремний, наоборот, понижает эту энергию [3, 4]. Поэтому в отсутствие молибдена должна повышаться чувствительность стали к охрупчивающим обработкам, связанным с диффузионным перераспределением элементов [5]. Влияние хрома неопределенно, но предполагается [6], что он может изменять радиационное охрупчивание корпусной стали. Столь же неоднозначно трактуется роль углерода в радиационно-индуцированных процессах. Наличие никеля в стали может замедлять стабилизацию подсистемы углерода в матрице α -Fe в процессе отпуска [7] и тем самым усложнять процессы, протекающие под облучением. Поэтому исследованная низколегированная сталь не содержала молибдена и хрома, а содержание углерода и остаточных примесей, кроме фосфора и меди, минимизировано (см. таблицу).

Все исследуемые материалы были подвергнуты нейтронному облучению в каналах для образцов-свидетелей первого блока Ровенской АЭС при 270 °С в течение одного года. Флюенс нейтронов составил $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,5 \text{ МэВ}$). Несколько облученных образцов были отожжены при 475 °С в течение 100 ч.

Результаты испытания образцов на ударный изгиб. Стандартные образцы Шарпи ($10 \times 10 \times 55 \text{ мм}$) испытывали на копре КМД-30 с потенциальной энергией $\sim 300 \text{ Дж}$ и скоростью копра в момент удара 5,64 м/с. Построение серийной кривой и определение критической температуры хрупкости (T_K) осуществляли по стандартной методике [8]. Результаты испытаний приведены в таблице. Помимо критической температуры хрупкости в исходном (T_{K0}), облученном (T_K) и отожженном состояниях (T_{K1}) в таблице приведена ударная вязкость материалов на уровне верхнего шельфа переходной кривой ($E_{вш}$) для всех трех исследованных состояний.

Полученные параметры радиационного охрупчивания модельных материалов являются значимыми, т.е. существенно превышают ошибку определения температуры перехода для исходных и облученных образцов. Сдвиг температуры вязко-хрупкого перехода варьируется в пределах от 101 до 236 °С, в то время как при самой осторожной оценке ошибка при определении ΔT_K не превышала 10—12 °С и, как правило, составляла 3—4 °С.

Охрупчивание модельных материалов при облучении. Для удобства анализа результатов эксперимента материалы в таблице расположены в порядке возрастания радиационно-индуцированного сдвига тем-