

аргона в техническом азоте, поставляемом в баллонах, сравнимо с содержанием его в воздухе.

Нами был использован газ CO_2 , поставляемый в баллонах. При активационном анализе этого газа установлено, что содержание аргона в нем на два порядка меньше, чем в воздухе. Экспериментальная проверка использования CO_2 в качестве вытеснителя воздуха была проведена на частично герметизированной воздушной полости тепловой колонны, непосредственно примыкающей к отражателю активной зоны реактора. При объеме этой полости ~160 л и расходе CO_2 350 л/ч выброс ^{41}Ag был сокращен на 36% общего выброса.

Следует отметить, что при использовании CO_2 по сравнению с азотом сокращается на два порядка образование, а следовательно, и выброс долгоживущего ^{14}C . Это обусловлено различием сечений образования ^{14}C по реакциям: $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ ($\sigma_a = 1,75 \text{ б}$) и $^{13}\text{C}(n, \gamma)^{14}\text{C}$ ($\sigma_a = 0,9 \cdot 10^{-3} \text{ б}$), а также малым содержанием азота в CO_2 ($1 \text{ б} = 10^{-28} \text{ м}^2$).

Можно пренебречь вкладом продуктов активации кислорода, не оказывающими влияния на внешнюю среду из-за малого периода полураспада ($T_{1/2} < 30 \text{ с}$), и реакцией $^{17}\text{O}(n, \alpha)^{14}\text{C}$, так как содержание ^{17}O в естественной смеси кислорода составляет $3,74 \cdot 10^{-2}\%$ при сечении активации 0,4 б.

Использование описанного способа на горизонтальных экспериментальных каналах реактора затруднено их конструктивными особенностями. Для этих каналов был сокращен воздухообмен в полостях, находящихся вблизи активной зоны реактора, за счет вставок в канал полых цилиндров из алюминия с торцовыми доньшками толщиной 1 мм, длиной 500 мм и диаметром на 2 мм меньше проходного диаметра канала. На доньшке, обращенном к активной зоне, сделано отверстие диаметром 0,5 мм для снятия давления в результате теплового расширения воздуха, так как при мощности реактора 16 МВт температура стенки вставки может достигать 350°C . При большой температуре, возможной при повышении мощности реактора до 30 МВт, вставки можно изготовлять из циркониевых сплавов. Общий эффект сокращения выброса ^{41}Ag в атмосферу от применения этих способов составляет ~70%.

Для сокращения выброса радиоактивных осколочных газов, поступающих в систему вентиляции из теплоносителя через его открытую поверхность в баке реактора, были исследованы факторы, оказывающие влияние на их выход. Установлено, что для стационарных условий отношение скорости выхода газов из теплоносителя (j_i) к скорости их генерации (κ_i) подчиняется уравнению

$$j_i/\kappa_i = \gamma/(\lambda_i + \gamma),$$

где $\gamma = SD/V\sigma$, с^{-1} ; λ_i — константа распада нуклида;

S — площадь открытой поверхности теплоносителя в баке реактора; D — коэффициент диффузии нуклида в воде; δ — толщина диффузионного слоя; V — объем теплоносителя.

При постоянстве значений κ_i , D и V сокращение выхода газов из теплоносителя может быть достигнуто уменьшением открытой поверхности теплоносителя и увеличением толщины диффузионного слоя, которая определяется степенью перемешивания теплоносителя в поверхностном слое. Чтобы увеличить толщину диффузионного слоя, по внутреннему периметру бака реактора на глубине 1 м от поверхности воды была установлена кольцевая диафрагма шириной 750 мм. Открытая поверхность воды была сокращена размещением в баке реактора плавающей полиэтиленовой диафрагмы шириной 700 мм.

Эти мероприятия позволили сократить выброс осколочных газов ^{87}Kr , ^{88}Kr , ^{85m}Kr , ^{138}Xe , ^{135}Xe в среднем на 55%, а ^{133}Xe на 7%. Выброс долгоживущих ^{86}Kr и ^3H практически остался на прежнем уровне. Необходимо отметить, что одновременно с сокращением выхода осколочных РБГ уменьшился и выброс их дочерних продуктов, входящих в состав аэрозольного компонента выброса.

Кроме того, выброс аэрозольного компонента сокращается не только из-за уменьшения выброса газовых предшественников, но и в результате выведения очистными фильтрами из воды первого контура изотопов, входящих в состав аэрозолей.

Таким образом, при внедрении этих разработок можно снизить выброс радиоактивных продуктов в атмосферу на единицу мощности ВВР-М практически вдвое, что проверено экспериментально. Хотя настоящие исследования относятся только к ВВР-М, общий подход к проблеме снижения выбросов в окружающую среду и разработанные средства могут быть полезны и на других реакторах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Временные методические указания по расчету предельно допустимых выбросов радиоактивных продуктов в атмосферу промышленными предприятиями и энергетическими установками (ПДВ—73). М., Гидрометиздат, 1975.
2. Баданина Н. Г. и др.— Атомная энергия, 1975, т. 38, вып. 2, с. 94.
3. Туркин А. Д. Дозиметрия радиоактивных газов. М., Атомиздат, 1973.

Поступило в Редакцию 20.05.80

УДК 669.15'26'28

Жаропрочность низколегированной стали 10X2M

в среде натрия с примесью NaOH при 500°C

СТАРКОВ О. В., МУХИН И. П., ЖЕЛНИН В. Д.

Эксплуатационная надежность быстрых реакторов во многом определяется способностью конструкционных материалов парогенераторов выдерживать длительные нагрузки как в чистом натрии, так и в натрии, содержащем примеси кислорода, углерода, азота и гидроокиси. Анализ советских и зарубежных исследований влияния натрия, в том числе содержащего примеси кислорода, углерода и азота, на механические свойства сталей показал [1, 2], что натрий реакторной чистоты не является коррозионно-активной средой, тогда как значительное количество неметаллических примесей (кислорода, углерода и азота)

несколько ускоряют коррозионные процессы и заметно ухудшают механические свойства.

Целесообразно исследовать жаропрочность низколегированной хромомолибденовой стали 10X2M при 500°C в натрии с примесью NaOH. Плоские образцы стали шириной 4 мм, толщиной 1 мм и длиной рабочей части 17,5 мм испытывали на длительную прочность и ползучесть в чистом натрии (контрольные испытания) и в натрии, содержащем 2,5 и 5 мас.% NaOH. Эксперименты проводили методом растяжения в специально разработанном вакуумном устройстве при 500°C . После штамповки и опи-

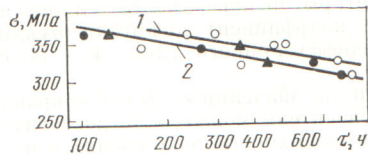


Рис. 1. Зависимость времени до разрушения от напряжения для стали 10X2M в натрии (1) и в натрии с примесью NaOH (2) при 500 °С: ○ — Na; ● — Na + 5% NaOH; ▲ — Na + 2,5% NaOH

ливания плоские образцы подвергали рекристаллизационному отжигу в вакуумной печи при нагреве до 900 °С и последующих выдержке в течение 30 мин и охлаждении до 700 °С в печи, а с 700 °С до 20 °С на воздухе. Обработка методом наименьших квадратов [3, 4] результатов испытаний стали 10X2M на длительную прочность при 500 °С выявила зависимости

$$\lg \sigma [\text{МПа}] = -0,0771 \lg \tau [\text{ч}] + 1,7264 \quad (1)$$

для испытаний в натрии, содержащем NaOH, и

$$\lg \sigma [\text{МПа}] = -0,0735 \lg \tau [\text{ч}] + 1,7287 \quad (2)$$

для испытаний в чистом натрии, содержащем $< 2 \cdot 10^{-3}$ мас. % кислорода.

Полученные зависимости показывают, что наличие NaOH в натрии не вызывает существенного снижения длительной прочности (рис. 1), причем при содержании NaOH, равном 2,5 и 5,0 мас. %, значения длительной прочности оказываются практически одинаковыми. Некоторый разброс экспериментальных точек при одинаковых нагрузках, вероятно, вызван дефектами, образовавшимися в процессе выплавки и прокатки исследуемых образцов стали.

Наличие NaOH в натрии не вызывает при 500 °С и заметного снижения сопротивления ползучести стали 10X2M (рис. 2). Например, если в чистом натрии скорость установившейся ползучести при напряжении 304 МПа равна $1 \cdot 10^{-2}$ %/ч, то в натрии с примесью NaOH она составляет $2,5 \cdot 10^{-2}$ %/ч.

Зависимость между скоростью установившейся ползучести $\dot{\epsilon}$ в натрии, содержащем NaOH, и в чистом натрии и напряжением описывается соответственно уравнениями

$$\lg \sigma [\text{МПа}] = 0,0995 \lg \dot{\epsilon} [\%/\text{ч}] + 1,6588; \quad (3)$$

$$\lg \sigma [\text{МПа}] = 0,1050 \lg \dot{\epsilon} [\%/\text{ч}] + 1,7042. \quad (4)$$

Примесь NaOH несколько снижает удлинение испытываемых образцов (примерно на 1,5–5%), причем деформация распределена в основном равномерно по всей рабочей части.

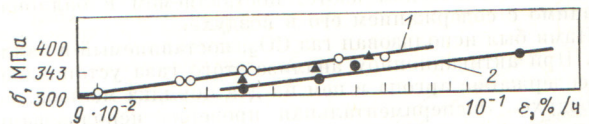


Рис. 2. Зависимость скорости установившейся ползучести от напряжения при 500 °С в чистом натрии (1) и в натрии, содержащем NaOH (2) Обозначения как на рис. 1

При исследовании микроструктуры образцов стали 10X2M после непродолжительных испытаний на ползучесть (то есть при больших нагрузках) в натрии, содержащем NaOH, не обнаружено заметного воздействия среды на материал. С увеличением длительности испытания до 830 ч в зоне максимальной пластической деформации наблюдается протравливание границ зерен на глубине до 12 мкм и снижение микротвердости до 1050–1500 МПа на глубине 30–45 мкм. Следует заметить, что и вдали от места разрушения, т. е. в области равномерной пластической деформации, образуется фронтальная коррозионная зона толщиной 5–8 мкм, микротвердость которой снижается до 1500 МПа.

После испытаний в чистом натрии не обнаружено какого-либо коррозионного взаимодействия. Микротвердость исследованных образцов практически не изменилась и близка к исходной 1960 МПа.

Разрушение образцов, испытывавшихся в натрии с примесью NaOH, происходит, в основном, по границам зерен, тогда как при испытаниях в чистом натрии разрушение носит смешанный характер.

Таким образом, наличие в натрии до 5 мас. % NaOH не вызывает существенного снижения длительной прочности, пластичности и ускорения ползучести стали 10X2M при 500 °С.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Старков О. В. и др. Коррозионно-усталостные процессы в материалах парогенераторов натрий — вода. Обнинск, изд. ФЭИ, 1976.
2. Старков О. В. и др. Влияние вибраций на коррозионно-усталостные характеристики конструкционных материалов атомных энергетических установок. Обнинск, изд. ФЭИ, 1977.
3. Пустыльник Е. И. Статистические методы анализа и наблюдений. М., Наука, 1965.
4. Сазонова Н. Д. Испытания жаропрочных материалов на ползучесть и длительную прочность. М., Машиностроение, 1965.

Поступило в Редакцию 02.06.80

УДК 543.42:537.311.33:539.166

К расчету чувствительности метода полупроводниковой гамма-спектрометрии

КЕРМАНОВ В. П., РЯБУШЕНКО С. И.

При контроле состава и содержания γ -излучателей в объектах окружающей среды с помощью полупроводниковых гамма-спектрометров с высоким энергетическим разрешением в одном измерении приходится охватывать большой интервал энергии γ -квантов ($\sim 0,05 \div 2$ МэВ), вследствие чего каждый фотопик в аппаратурных спектрах регистрируется в небольшом числе каналов.

В связи с этим представляет большой интерес расчет минимально определяемой радиоактивности того или иного радионуклида в измеряемых образцах $Q_{\text{мин}}$ при узких фотопиках.

В общем случае $Q_{\text{мин}}$ рассчитывают по известной формуле

$$Q_{\text{мин}} = \frac{N_{\text{мин}}}{T \epsilon(E) K_{\gamma}(E)}, \quad (1)$$

где T — время измерения; $\epsilon(E)$ — эффективность регистрации γ -квантов энергией E ; $K_{\gamma}(E)$ — выход γ -квантов на распад, отн. ед.; $N_{\text{мин}}$ — минимально определяемое число импульсов в фотопике.

В работе [1] получено следующее выражение для $N_{\text{мин}}$:

$$N_{\text{мин}} = (2/8) [(2bR\bar{N}_{\phi} + 1/4\delta^2)^{1/2} + 1/2\delta], \quad (2)$$