



Р и с. 4. Вывод реактора ИРТ-2000 из подкритического состояния с заданным периодом

периода в подкритическом состоянии с дальнейшей стабилизацией этого периода при достижении и превышении критического состояния. Осциллограммы, показанные на рис. 4, зарегистрированы при пуске реактора ИРТ из подкритического состояния с заданным периодом. Точка графика, отмеченная стрелкой, соответствует критическому состоянию.

5. Экспериментально показано, что 20-кратное снижение мощности двигателя в приводе АР не снизило качества управления из-за уменьшения скорости перемещения стержня АР, повысило точность стабилизации периода и мощности за счет увеличения быстродействия сервопривода и схем управления им, упростило систему и облегчило режим работы элементов, что позволило повысить надежность системы в целом при одновременном снижении стоимости и энергопотребления.

В заключение можно сделать следующие выводы:
1. Теоретически показанные возможности управления ядерным реактором, основанные на теории оптимального управления, соответствуют реальным физическим процессам в самом реакторе и поэтому могут быть положены в основу проектирования СУЗ.

2. Технические требования к элементам СУЗ и системе в целом, обусловленные анализом системы с позиций теории оптимального управления, выполняются достаточно простыми техническими средствами и приближают переходные процессы в системе к оптимальным по быстродействию.

3. Традиционное разделение систем на каналы АР и ручной (или полуавтоматической) компенсации (РР) ограничивает возможности автоматического управления нейтронным потоком. Эти возможности наиболее полно могут быть реализованы одноканальной системой со стержнем, вес которого соответствует весу стержня РР, а скорость определяется минимальным рабочим периодом.

Авторы выражают искреннюю признательность службе СУЗ реактора ИРТ-2000 МИФИ и А. П. Крюкову, без энтузиазма и активного участия которых в подготовке и проведении экспериментов работа не могла бы быть проведена.

Поступило в Редакцию 17/ХІІ 1974 г.
В окончательной редакции 25/ІІІ 1975 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексаков Г. Н., Белоусов В. И., Крюков А. П. «Атомная энергия», 1972, т. 32, вып. 3, с. 228.
2. Алексаков Г. Н., Белоусов В. И. Индикатор состояния ядерного реактора. Авторское свидетельство № 400234. «Бюллетень изобретений», 1974, № 27.
3. Кипин Дж. Р. Физические основы кинетики ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1967.
4. Mohler R., Shen S. Optimal Control of Nuclear Reactors. N. Y., Academic Press, 1970.
5. Филичук Е. В., Потапенко П. Т., Косилов А. Н. «Атомная энергия», 1973, т. 35, вып. 5, с. 317.

УДК 621.039:532.21

Радиационное упрочнение изделий из графита с концентраторами напряжений

ВИРГИЛЬЕВ Ю. С., МАКАРЧЕНКО В. Г., БАРАБАНОВ В. Н., САЖИН А. Н.*

Различного рода концентраторы напряжений создают неоднородность поля напряжений, что приводит, в конечном счете, к снижению надежности деталей.

В искусственном графите, наряду с конструктивными концентраторами напряжений (резкие изменения сечения деталей, отверстия, выточки, шлицы и т. д.), всегда имеются технологические — риски, макропоры, раковины, трещины, которые опасны тем, что они увеличивают хрупкость.

Известно, что нейтронное облучение повышает хрупкость конструкционного графита. Влияние гиперболических выточек и сквозных отверстий в изделиях и на образцах плотного графита ВПШ на их прочность при одноосном растяжении и сжатии было исследовано ранее [1]. Показано, что на изменение прочности лабо-

раторных образцов и натуральных изделий влияют только те искусственные концентраторы, которые создают напряжения, превышающие напряжения, которые могут возникать вследствие неоднородностей. Поэтому образцы с отверстиями диаметром 1 и 2 мм, т. е. соизмеримыми с размерами зерен кокса в исследованном материале, при испытаниях на одноосное растяжение и сжатие имели практически одинаковый предел прочности.

В настоящей работе оценивалось влияние концентраторов напряжения путем испытания на изгиб. Предварительно на мелкозернистом графите МГ-1 (табл. 1)

* В работе принимал участие А. И. Плавский.

Зависимость предела прочности при изгибе от радиуса закругления в вершине надреза Таблица 1

R, мм	σ , кг/см ²
00*	170
2,85	120
1,4	110
0,8	100
0,2	95
0,05	95

* Без надреза.

составило 0,2 для создания максимального эффекта разупрочнения.

Для обеспечения достаточного числа параллельных измерений, а также вследствие ограниченных размеров облучательного устройства испытания проводились для призматических образцов размером $5 \times 5 \times 40$ мм. Образцы вырезали из одной заготовки, причем их отбирали по объемному весу, с одинаковым совершенством кристаллической структуры, оцениваемым измерением электросопротивления. Прочность предварительно оценивали неразрушающим методом, определяя динамический модуль упругости по изгибным колебаниям [2]. На специальном станке в образцах проделывали калиброванный надрез глубиной 1 мм с радиусом закругления в вершине 0,1 мм.

Равное число (4—13) надрезанных и ненадрезанных образцов одновременно облучали при температуре 70—140 °С до достижения интегрального потока от $3 \cdot 10^{18}$ до $3,7 \cdot 10^{20}$ нейтр./см². Интегральный поток определяли по времени работы реактора с учетом мощности и известного потока быстрых нейтронов ($E > 0,18$ МэВ) в данном канале, температуру измеряли методом алмазных индикаторов. Для контроля снова измеряли модуль упругости облученных образцов, а затем проводили испытания на изгиб.

Однородность испытанных образцов можно охарактеризовать среднеарифметической погрешностью измерения электросопротивления ($\pm 8\%$) и модуля упругости ($\pm 14\%$). Среднеарифметическая погрешность определения предела прочности при испытаниях на изгиб контрольных образцов составила 13%.

Испытания на изгиб проводились на лабораторной установке с максимальным усилием до 30 кг и точности регистрации нагрузки не ниже 0,1 кг. Расстояние между опорами составляло 30 мм. Одновременно с облученными испытывали необлученные контрольные образцы. Расчет предела прочности при изгибе для призматических образцов определяли по формуле $\sigma = 3pl/2bh^2$, где b — ширина образца, см; h — высота образца, равная 0,5 и 0,4 см без концентратора и с ним соответственно; p — разрушающее усилие, кг/см²; l — расстояние между опорами, равное 3 см.

Из разрушенных при испытании призм изготовляли образцы размером $5 \times 5 \times 6$ мм, на которых определяли предел прочности при сжатии на машине МР-0,5. Проверкой было установлено, что предварительное разрушение образца при изгибных испытаниях не влияет на последующие результаты, получаемые во время испытания на сжатие.

Усредненные результаты определения зависимости предела прочности при изгибе надрезанных и ненадрезанных образцов зависят от накопленной дозы при температуре 70°С и от температуры при постоянном интегральном потоке ($0,65—1,2 \cdot 10^{19}$ нейтр./см²; здесь же для сравнения приведены изменения предела прочности при сжатии).

Известно, что прочность графита при облучении быстро растет с дозой, достигая затем «насыщения». При этом достигнутый уровень экспоненциально снижается с ростом температуры облучения [3]. Из полученных данных видно, что облучение при 70°С потоком нейтронов до $3,7 \cdot 10^{20}$ нейтр./см² не привело к достигнуто установленным значениям предела прочности при сжатии и модуля упругости. В то же время предел прочности при изгибе достигал максимального значения 900 ± 40 кг/см² уже при интегральном потоке $\sim 2,4 \times 10^{20}$ нейтр./см². При дальнейшем облучении намечалась даже тенденция к его снижению. Наличие концентратора напряжений обеспечило более значитель-

было оценено влияние на прочность радиуса надреза.

Из полученных данных видно, что разупрочнение возрастает по мере уменьшения радиуса закругления и при радиусе закругления, меньшем 0,2 мм достигает практически предела.

На призматических образцах трех материалов: мелкозернистых МГ-1 и МПГ и среднезернистым плотном ВПП изучено влияние глубины надреза (табл. 2). Размер образцов $20 \times 10 \times 100$ мм. Из представленных данных следует, что с увеличением глубины надреза предел прочности при изгибе снижается, причем особенно значительно у высокопрочного мелкозернистого материала МПГ. Максимальное разупрочнение соответствует отношению глубины надреза к толщине образца в пределах 0,1—0,4. При дальнейшем увеличении этого отношения подсчитываемый по обычной формуле предел прочности повышается. Последнее объясняется существенным смещением нейтральной оси образца в зону растяжения.

С учетом полученных результатов для радиационных испытаний были выбраны образцы мелкозернистого высокопрочного равноплотного графита МПГ-6. Радиус закругления в вершине надреза R был выбран 0,1 мм, отношение глубины надреза к толщине образца (C)

Зависимость предела прочности образцов от глубины надреза Таблица 2

МГ-1		ВПП		МПГ	
C *, мм	σ , кг/см ²	C **, мм	σ , кг/см ²	C *, мм	σ , кг/см ²
0****	170	0	290/335 ***	0	354
2	105	2	205/225	2,25	127
3	92	5	198/202	4,1	121
6	93	8	200/205	10,3	109
8	99	10	218/209	14,6	124
11	104	12	238/229		
		14	276/234		

* Радиус закругления в вершине надреза 0,1 мм.

** Радиус закругления 1 мм.

*** Приведены данные по двум сериям испытаний, для которых образцы вырезали из двух заготовок.

**** Без надреза.

Радиационное упрочнение образцов графита МПГ-6 с концентраторами напряжений и без них

Интегральный поток, нейтр./см ²	T, °C	$\sigma_{сж}$, кг/см ²	$\frac{\Delta\sigma_{сж}}{\sigma_{сж}}$	$\Delta E/E$	σ , кг/см ²		$\sigma/\sigma_{конц}$	$\Delta\sigma/\sigma$	
					A	B		A	B
0	20	900±45	0	0	485±40	160±20	3,05	0	0
3·10 ¹⁸	70	1640±70	0,82	0,30	800±35	330±10	2,40	0,65	1,05
4,8·10 ¹⁸	70	1680±90	0,87	0,39	850±80	360±15	2,35	0,75	1,25
2,4·10 ²⁰	70	2300±290	1,55	1,48	900±40	380±10	2,35	0,85	1,36
3,0·10 ²⁰	70	2210±190	1,45	1,51	730±100	385±15	1,90	0,50	1,40
3,7·10 ²⁰	70	2460±300	1,70	1,59	730±90	395±30	1,85	0,50	1,45
6,5·10 ¹⁸	70	1580±60	0,75	0,25	760±40	320±30	2,40	0,60	1,00
8,4·10 ¹⁸	110	1430±120	0,59	0,19	760±70	315±15	2,40	0,60	0,97
1,0·10 ¹⁹	130	1340±30	0,49	0,27	750±55	290±15	2,60	0,54	0,81
1,2·10 ¹⁹	140	1290±50	0,43	0,25	715±50	260±25	2,45	0,47	0,62

Примечание: А — без концентраторов; В — с концентраторами.

ное упрочнение графита. По этой причине отношение пределов прочности на изгиб у ненадрезанных и надрезанных образцов по мере продолжающегося облучения снижается от 3,0 (необлученные образцы) до 1,85 (после накопления дозы 3,7·10²⁰ нейтр./см²), причем повышение температуры облучения от 70 до 140° С в интервале накопленных доз (0,65—1,2)·10¹⁹ нейтр./см² не изменило этого отношения. Следовательно, наличие различного рода дефектов: трещин, пор и т. д. при достигнутых уровнях облучения не приводит к ухудшению живучести графитовых конструктивных деталей при облучении.

В менее прочных среднезернистых материалах ГМЗ разупрочняющее влияние концентратора напряжений

должно проявиться слабее, чем в испытанном мелкозернистом прочном графите МПГ-6.

Поступило в Редакцию 15/I 1975 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барабанов В. Н. и др. В сб.: Конструкционные материалы на основе графита. Вып. VI. М., «Металлургия», 1971, с. 160.
2. Лушников Г. А. В сб.: Исследование по физике металлов и неразрушающим методам контроля, Минск, «Наука и техника», 1968, с. 35.
3. Виргильев Ю. С. «Атомная энергия», 1974, т. 36, вып. 6, с. 479.

УДК 621.039.564

Контроль попадания воды в натрий по акустическим шумам

КОЗЛОВ Ф. А., СЕРГЕЕВ Г. П., ЮГАЙ В. С.

Изучение шумов, возникающих при течи воды в натрий, проводится для выяснения возможностей акустического метода как средства контроля протечек парогенераторов натрия — вода. Интерес к такого рода исследованиям обусловлен поисками более эффективных по сравнению с используемыми сейчас методов контроля малых протечек парогенератора.

Основной недостаток существующих способов контроля протечек — относительно большое время запаздывания сигнала для парогенераторов с большим объемом и расходом натрия. Кроме того, при работающих системах очистки теплоносителя эти методы даже за неограниченное время не позволяют обнаружить течи ниже конкретной величины, определяемой как параметрами установки (объемом и расходом натрия, скоростью очистки), так и характеристиками самих приборов контроля [1]. Любая течь в парогенераторе считается потенциально опасной, и необходима возможно более быстрая информация о ее появлении.

Акустические шумы в жидких металлах современными средствами можно обнаружить почти мгновенно. Однако реализация такой возможности в условиях

промышленной установки при малой течи парогенератора будет осложнена рядом значительных трудностей (большим уровнем фоновых шумов установки, сложностью выбора наилучших методов, мест монтажа акустических приемников и т. п.). Успех применения акустического метода для контроля протечек воды в натрий будет зависеть от отношения сигнала к шуму, которое удастся получить для реальных систем при малых течах.

Определение оптимальной системы обнаружения течи акустическим методом сейчас в большой степени затруднено из-за непонимания процессов, посредством которых генерируется звук при попадании воды в натрий. Можно назвать следующие факторы, по-видимому, влияющие на характеристический акустический спектр, связанный с реакцией натрия и воды: зарождение, колебания и исчезновение паровых и водородных пузырей, динамика натрия и струи, исходящей из места течи, геометрия реакционной зоны, образование стоячих волн между местом истечения воды в натрий, соседних трубками и корпусом реакционного сосуда, резонансные свойства сосуда и акустического датчика, место монтажа датчика и т. п.