

2. Кафаров В.В. Основы массопередачи. Учебник для студентов вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1979.
3. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения. М.: Мир, 1972.
4. Пермяков В.А., Гиммельберг А.С., Виханский Г.М., Шубников Ю.М. Расчет и проектирование термических деаэраторов. РТМ 108.030.21-78, 1979.

5. Оликер И.И., Пермяков В.А. Термическая деаэрация воды на тепловых электростанциях. Л.: Энергия, 1971.
6. Хоблер Т. Массопередача и абсорбция. Пер. с польск. под ред. П.Г. Романкова. Л.: Химия, 1964.
7. КОРСАР/ВЗ. Руководство пользователя. НИТИ им. А.П. Александрова. Сосновый Бор, 2007.

Поступила в Редакцию 6.11.14

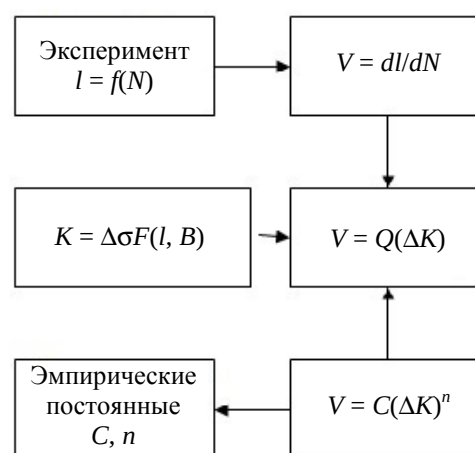
УДК 620.178.311

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ НА УСТАЛОСТНУЮ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ

Гольцев В.Ю., Маркочев В.М. (НИЯУ МИФИ, г. Москва)

Проекты новых АЭС предусматривают срок эксплуатации 60 лет и более. При таком сроке существенное влияние на прочность приобретает среда, с которой контактирует материал трубопроводов и иного оборудования [1, 2]. Широко используемые для исследований влияния среды компактные образцы не полностью удовлетворяют требованиям, поскольку с их помощью оценивается только мгновенная скорость усталостного или длительного статического разрушения [3]. Возникает необходимость в целенаправленных методиках испытания, при которых распространение трещины не влияет на силовой параметр, контролирующий процесс разрушения, — коэффициент интенсивности напряжений. Целями настоящей статьи являются анализ подходов, обеспечивающих экспериментальное получение надежной зависимости скорости роста трещины от размаха коэффициента интенсивности напряжений при использовании для этой цели двухбалочных образцов, и оценка их возможностей для исследования влияния среды при независимости коэффициента интенсивности напряжений от размера усталостной трещины.

Стандартная методика построения диаграммы усталостной трещиностойкости. Стандартная методика испытаний на усталостную трещиностойкость базируется на гипотезе существования инвариантной диаграммы усталостного разрушения — зависимости скорости роста трещины V от размаха коэффициента интенсивности напряжений ΔK . Этой гипотезе отвечает обработка результатов испытания, показанная на рис. 1 [3].



Р и с. 1. Метод построения экспериментальной зависимости скорости роста усталостной трещины от размаха коэффициента интенсивности напряжений

Важным фактором является принятая аппроксимация диаграммы усталостного разрушения степенной функцией

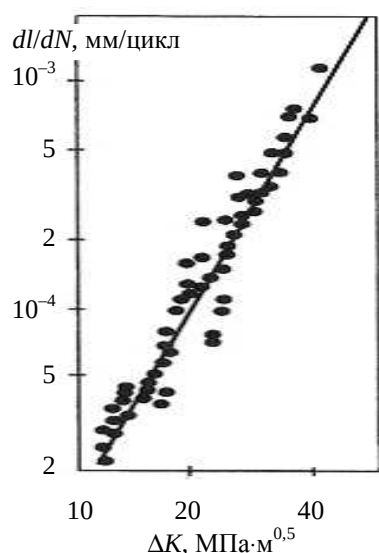
$$V = dl/dN = C(\Delta K)^n, \quad (1)$$

где l — длина усталостной трещины; N — текущее число циклов нагружения; C, n — эмпирические параметры, характеризующие сопротивление усталостному разрушению конструкционного материала при заданных условиях испытаний.

Экспериментальную зависимость $V = Q(\Delta K)$ получают дифференцированием экспериментальной кривой роста усталостной трещины

$$l = f(N) \quad (2)$$

для задаваемого размаха нагрузки ΔP или некоторого условного напряжения $\Delta \sigma$, которые под-



Р и с. 2. Зависимость скорости роста трещины от размаха коэффициента интенсивности напряжений для стали 08X18H10T после длительной эксплуатации (температура испытания 573 К, трещина ориентирована в окружном направлении)

держиваются постоянными до разрушения образца, и определением коэффициента интенсивности напряжений для образца

$$\Delta K = \Delta \sigma F(l, B), \quad (3)$$

где B — ширина образца в направлении роста трещины. Эмпирические параметры C , n определяют посредством обработки диаграммы усталостного разрушения по формуле (1).

Диаграмма усталостного разрушения, приведенная на рис. 2 в качестве примера, получена при исследовании материала главного циркуляционного трубопровода стали 08X18H10T ВВЭР-440 Кольской АЭС после 100 тыс. ч эксплуатации [4]. Для испытаний использовали компактные образцы.

Параметры C и n в уравнении (1) для случаев распространения трещины в окружном и осевом направлениях при комнатной температуре и 573 К приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Эмпирические коэффициенты C и n для стали 08X18H10T после длительной эксплуатации

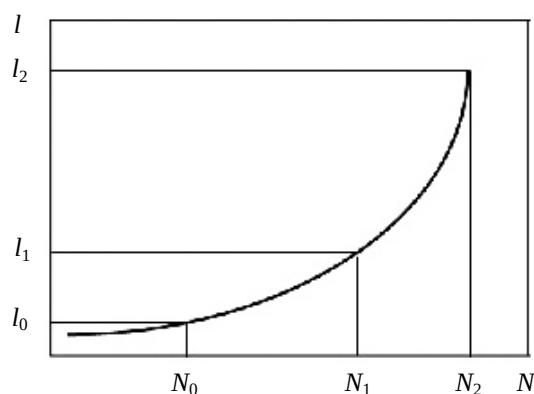
Направление роста трещины	Температура испытания, К	n	C , мм/цикл/(МПа·м ^{0.5}) ^{n} ·10 ⁻⁹
Осевое	293	3,42	2,21
	573	3,44	3,61
Окружное	293	3,235	2,21
	573	3,44	3,265

Исследованиями установлено, что длительная эксплуатация трубопровода АЭС из стали 08X18H10T не оказывает существенного влияния на ее усталостную трещиностойкость. Отсутствует заметная анизотропия трещиностойкости как в исходном состоянии, так и после длительной эксплуатации. Обнаружено некоторое снижение долговечности при повышении температуры испытания.

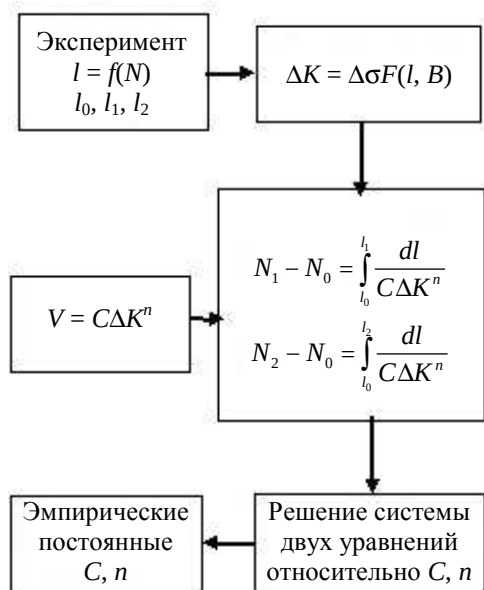
В соответствии с уравнением (3) увеличение длины усталостной трещины приводит к повышению как размаха коэффициента интенсивности напряжений ΔK , так и его среднего значения $K_m = (K_{\max} + K_{\min})/2$, поскольку возрастает функция $F(l, B)$. Следовательно, скорость роста усталостной трещины на рис. 2 неявно зависит и от среднего коэффициента интенсивности напряжений K_m при неизменной асимметрии цикла $R = K_{\min}/K_{\max}$. Представляется, что значимость K_m превышает значимость безразмерного параметра R .

Уязвимой частью процедуры получения зависимости (1) является необходимость дифференцирования по числу циклов нагружения экспериментальной кривой (2). Но если методика испытаний и обработки результатов предусматривает использование формулы (1), то при современном развитии информационных технологий возникает возможность с помощью этой формулы получать зависимости, которые аппроксимируют кривую роста трещины (2) [5]. Эта методика в определенной степени воспроизводит расчеты на усталостную трещиностойкость. Рис. 3, 4 иллюстрируют ее применение.

На кривой (2) выбирают три длины трещины l_1 , l_2 , l_3 и фиксируют соответствующее им



Р и с. 3. Зависимость длины трещины l от числа циклов нагружения N при фиксированной нагрузке



Р и с. 4. Модернизированный метод определения эмпирических параметров C, n

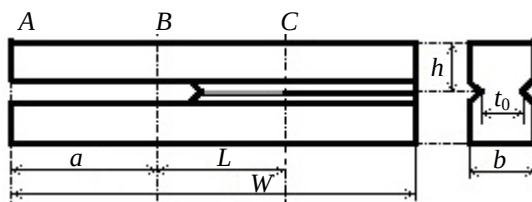
число циклов нагружения N_1, N_2, N_3 . Затем записывают систему двух уравнений

$$N_1 - N_0 = \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{C\Delta K^n}; \quad (4)$$

$$N_2 - N_0 = \int_{l_0}^{l_2} \frac{dl}{C\Delta K^n} \quad (5)$$

и численно решают относительно параметров C, n . Тем самым устраняется необходимость дифференцирования кривой (2). Кроме того, необязательным становится построение всей кривой (2) — достаточно иметь три пары значений длины трещины и чисел циклов нагружения. Численное решение системы уравнений (4), (5) при современном развитии информационных технологий не представляет затруднений.

Методика исследования усталостной трещиностойкости на ДКБ-образцах. Значительные погрешности экспериментального измерения мгновенной скорости роста усталостной трещины в нестационарных условиях препятствуют получению обоснованных данных о влиянии различных внешних факторов на усталостную трещиностойкость материала. Постоянные условия нагружения, в первую очередь, размах коэффициента интенсивности напряжений ΔK в процессе распространения усталостной или коррозионной трещины — важнейшая причина установления фундаментальных закономерностей влияния различных факторов на скорость ее распространения. В связи с этим



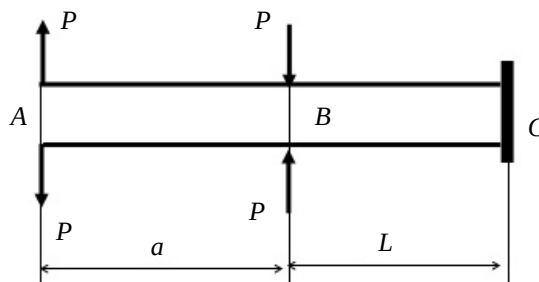
Р и с. 5. ДКБ-образец

было предложено и реализовано несколько схем нагружения ДКБ-образца, которые обеспечивают постоянство размаха коэффициента интенсивности напряжений при значительном росте усталостной трещины [6—9].

В сечениях A, B на рис. 5, расстояние между которыми равно a , прикладываются циклические нагрузки. Размер L включает часть исходного надреза и усталостную трещину, конец которой находится в сечении C . При исследовании процессов распространения усталостных трещин в материалах для толстостенных конструкций образец имел следующие размеры: $b = 20$ мм, $h = 25$ мм, $t_0 = 7$ мм, $a = 50$ мм, $W = 250—300$ мм. Но нет препятствий для снижения ширины b до 5 мм при примерно пропорциональном изменении остальных размеров образца.

Нагружение плеч ДКБ-образца изгибающими моментами. На рис. 6 силы P приложены в сечениях A и B образца. Сечение C соответствует концу трещины. Но есть данные, что реально сечение C удалено от конца трещины в направлении ее роста на расстояние, примерно равное высоте сечения h [9]. На участке BC изгибающий момент $M = Pa$ постоянный и не зависит от размера L , поэтому коэффициент интенсивности напряжений также будет постоянным и независимым от длины усталостной трещины [6]:

$$K = \frac{Pa}{\sqrt{t_0 I_z}} = \frac{M_z}{\sqrt{t_0 I_z}}, \quad (6)$$



Р и с. 6. Схема нагружения образца изгибающими моментами

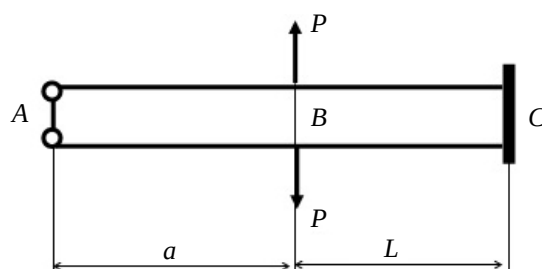
где I_z — осевой момент инерции поперечного сечения плеча ДКБ-образца.

Возможны различные схемы реализации нагружения ДКБ-образца изгибающими моментами [9]. Вертикальное расположение образца оказалось эффективным при исследовании влияния среды испытания на скорость усталостной трещины в условиях постоянства коэффициента интенсивности напряжений. Для оценки влияния среды на скорость роста трещины при заданном размахе коэффициента интенсивности напряжений достаточно заменить среду и продолжить испытания. Ее влияние проявится как изменение наклона нового участка роста трещины по отношению к предшествующему. При этом можно наблюдать за ростом трещины на протяженном участке ее распространения (50 мм и более). Это существенно повышает материаловедческую достоверность данных, так как в одинаковых условиях трещина разрушает значительно больший объем материала как при наличии среды, так и без нее.

Из табл. 2 следует, что при размахе коэффициента интенсивности напряжений $8 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$ скорость роста трещины в алюминиевом сплаве Д19пчТ, находящемся в 3,5%-ном растворе NaCl, почти вдвое превышает скорость распространения трещины на воздухе: 0,088 и 0,046 мкм/цикл соответственно. Для алюминиевого сплава В95пчТ2 скорость трещины в той же среде увеличивается почти в 3 раза: 0,29 и 0,11 мкм/цикл соответственно. Увеличение размаха коэффициента интенсивности напряжений до $14,4 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$ нивелирует влияние среды (частота нагружения образца в обоих случаях составляла 200 циклов в минуту).

Таблица 2. Влияние среды на скорость роста усталостных трещин в сплавах, мкм/цикл [7]

Коэффициент интенсивности напряжений, $\text{МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$	Воздух	0,5%-ный раствор NaCl	3,5%-ный раствор NaCl	Дистиллят
Сплав Д19пчТ				
8	0,046	0,077	0,088	0,046
10	0,165	0,162	0,167	0,162
14,4	0,551	0,55	0,55	0,552
Сплав В95пчТ2				
8	0,11	0,25	0,29	0,12
10	0,57	0,66	0,89	0,58
14,4	1,8	1,8	2	1,9



Р и с. 7. Схема нагружения двухбалочного образца со связанными консолями

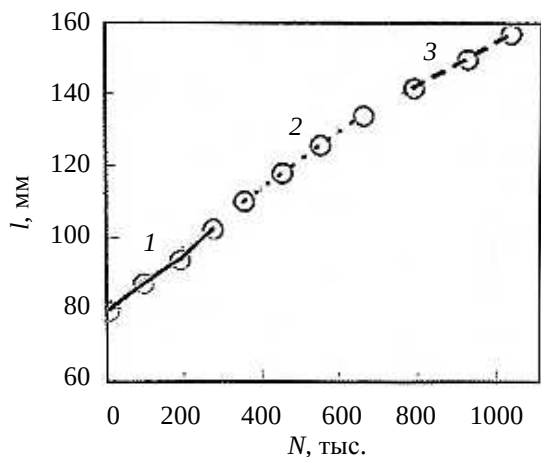
Нагружение связанного ДКБ-образца поперечными силами. На рис. 7 показана схема нагружения ДКБ-образца с шарнирно соединенными концами A растягивающими силами, приложенными в сечении B на расстоянии a от концов образца. В этом случае плечи ДКБ-образца превращаются в статически неопределимые балки, а сам образец из двухконсольного превращается в двухбалочный [8]. При таком способе нагружения на участке распространения трещины реализуется следующая зависимость коэффициента интенсивности напряжений от длины распространяющейся трещины:

$$K = \frac{1}{2} \frac{Pa}{\sqrt{t_0 I_z}} \left(1 - \frac{a^2}{(L+a)^2} \right). \quad (7)$$

При $a^2/(L+a)^2 \gg 1$ коэффициент интенсивности напряжений становится независимым от длины трещины.

Экспериментальную проверку осуществляли посредством испытаний двух ДКБ-образцов, изготовленных из стали 15Х2НМФАА. Сталь была термообработана по режиму закалка 920°C , выдержка 2 ч, охлаждение в воде, отпуск 620°C в течение 10 ч. Каждый образец длиной 300 мм испытывали при неизменном режиме нагружения. Режим нагружения первого образца — $P_{\text{макс}} = 30 \text{ кН}$, $P_{\text{мин}} = 5 \text{ кН}$, начальная длина трещины 80,4 мм, второго — 25 кН, 5 кН, 79,4 мм. Такие нагрузки были выбраны из соображений, чтобы возникающие напряжения на конце усталостной трещины составляли примерно половину предела текучести материала.

Скорость роста усталостной трещины была постоянной на всей рабочей длине ДКБ-образца при постоянном коэффициенте интенсивности напряжений: в первом образце — $V_1 = 2,74 \cdot 10^{-4} \text{ мм/цикл}$ при $\Delta K_1 = 27,77 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$, во втором — $V_2 = 2,22 \cdot 10^{-4}$ при $\Delta K_2 = 22,22 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$.

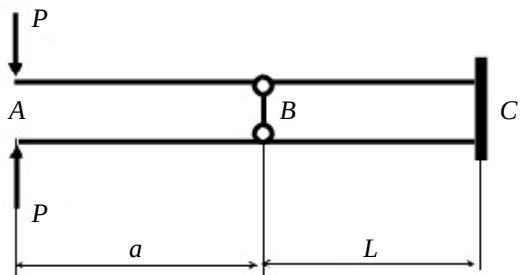


Р и с. 8. Зависимость длины трещины от числа циклов нагружения при средней нагрузке цикла P_m 12,5 (1), 17,5 (2), 22,5 кН (3) и постоянном размахе 15 кН

Этих данных достаточно для вычисления параметров C , n в уравнении (1): $n = \ln(V_1/V_2)/\ln(\Delta K_1/\Delta K_2) = 0,92$, $C = V_1/(\Delta K_1)^n = 1,28 \cdot 10^{-5} \text{ мм}/(\text{МПа} \cdot \text{м}^{0,5})^n$.

Удобство ДКБ-образца для испытаний при постоянном размахе коэффициента интенсивности напряжений заключается в том, что на одном образце можно провести серию испытаний при разных условиях (уровень напряжения, среда, термическая обработка и др.), обеспечивая на каждом участке постоянство скорости роста трещины. Эти данные с большей уверенностью и основанием могут быть использованы при построении диаграммы усталостного разрушения. На рис. 8 приведены результаты испытания образцов при одинаковом размахе коэффициента интенсивности напряжений, но разном среднем напряжении циклического нагружения. На каждом участке наблюдается постоянная, но разная скорость роста трещины.

Нагружение ДКБ-образца с промежуточной опорой сжимающими поперечными силами (рис. 9). Эта схема, обратная по отношению к схеме нагружения на рис. 7, обеспечивает



Р и с. 9. Схема нагружения сжимающими силами двухбалочного образца с промежуточной опорой в сечении B

постоянство коэффициента интенсивности напряжений на всем участке распространения трещины в соответствии с формулой

$$K = Pa/(2\sqrt{t_0 I_z}). \quad (8)$$

Отметим, что при равной силе P коэффициент интенсивности напряжений, рассчитанный по формулам (7), (8), вдвое меньше, чем определенный по формуле (6). Это объясняется тем, что введение связей в исходный ДКБ-образец превращает систему балок в статически неопределимую и менее податливую по сравнению с двухконсольной системой.

Заключение. Таким образом, ДКБ-образцы в сравнении с компактными или плоскими обеспечивают больший диапазон роста усталостных трещин и большие возможности для стабилизации размаха коэффициента интенсивности напряжений [6]. Продольные боковые надрезы, используемые для направления роста усталостной трещины вдоль образца, снижают толщину сечения разрушения t_0 по сравнению с толщиной образца b . Эти надрезы изменяют плоское напряженное состояние перед фронтом трещины на плоское деформированное, что не может рассматриваться как недостаток ДКБ-образца, поскольку позволяет определять сопротивление материала распространению трещины в наиболее жестких условиях. Таким образом, ДКБ-образцы существенно пополняют арсенал исследователей сопротивления материалов усталостному разрушению, особенно в условиях воздействия внешней среды, включая радиационное.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казанцев А.Г. Коррозионное растрескивание стали 10ГН2МФА при низкоскоростном нагружении. — Заводская лаб. Диагностика материалов, 2012, № 1, с. 79—86.
2. Шарый Н.В., Семишкин В.П., Пименов В.А., Драгунов Ю.Г. Прочность основного оборудования и трубопроводов реакторных установок ВВЭР. М.: ИздАТ, 2004. 496 с.
3. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. РД 50-345-82. М.: Изд-во стандартов, 1983. 96 с.
4. Гетман А.Ф. Концепция безопасности «течь перед разрушением» для сосудов и трубопроводов давления АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1999. 258 с.

5. **Бабенков А.В., Маркочев В.М.** Оценка усталостной трещиностойкости при минимальном числе измерений. — Заводская лаб., 1985, № 2, с. 67—68.
6. **Гольцев В.Ю., Маркочев В.М.** Методы стабилизации коэффициента интенсивности напряжений при испытании материала на трещиностойкость и их развитие. — Ядерная физика и инжиниринг, 2013, т. 4, № 11—12, с. 964—970.
7. **Краев А.Г., Маркочев В.М., Яблонский И.С.** О влиянии среды на рост усталостной трещины в сплавах В95пчТ2 и Д19пчТ. — В сб.: Физика и механика де-

формации и разрушения. М.: Атомиздат, 1978, вып. 5, с. 63—67.

8. **Гольцев В.Ю., Маркочев В.М.** Методика исследования процессов роста усталостных трещин при постоянном размахе коэффициента интенсивности напряжений. — Деформация и разрушение материалов, 2012, № 7, с. 43—47.
9. **Гольцев В.Ю., Краев А.Г., Маркочев В.М.** Исследовательские возможности применения образцов типа двухконсольной балки. — Там же, 2014, № 7, с. 34—43.

Поступила в Редакцию 6.10.14

УДК 621.039.531

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ СОВЕРШЕНСТВА РЕАКТОРНОГО ГРАФИТА НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА

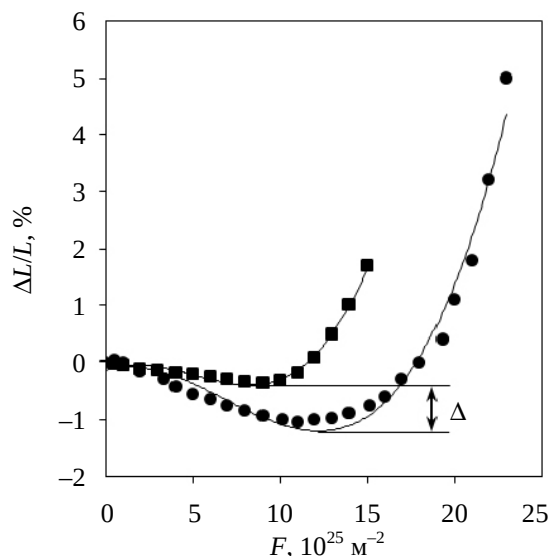
*Кулешов Д.А., Новобратская И.Ф., Платонов П.А., Чугунов О.К.
(НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)*

Реакторный графит, изготавливаемый по электродной технологии, характеризуется значительной неоднородностью свойств [1, 2]. Неоднородно также и изменение его свойств под действием облучения, что приводит к особенностям поведения элементов конструкций графитовых кладок канальных ядерных реакторов, в частности, РБМК. Эти особенности должны быть приняты во внимание и учтены при оценке состояния графитовых кладок, остаточного ресурса, а также при рассмотрении возможности продления срока эксплуатации.

Одними из ключевых параметров, в значительной степени определяющих изменение большинства свойств графита, являются изменения его линейных размеров. Их поведение при рабочей температуре 500—800 °С характеризуется кривой с максимумом усадки, сменяющимся последующим вторичным распуханием (рис. 1). Таким образом, радиационное формоизменение реакторного графита носит сложный двухстадийный немонотонный характер, что связано со сложностью его структуры и с текстурой, возникающей при изготовлении. Текстура графита, в свою очередь, связана с неравномерной укладкой кристаллитов (монокристаллов графита), имеющих разное совершенство структуры.

Деформации графитовых блоков РБМК. Определяющим фактором работоспособности блоков графитовой кладки РБМК является их деформация. В конструкции ячейки РБМК

предусмотрен зазор между канальной трубой из циркониевого сплава и внутренней поверхностью графитового блока для взаимного свободного перемещения. Зазор заполнен графитовыми кольцами, которые обеспечивают теплосъем графитовой кладки и свободное перемещение в радиальном направлении. Такая конструкция должна была обеспечивать работоспособность до конца назначенного срока эксплуатации реактора. Но поскольку деформация циркониевых канальных труб оказалась выше проектной, для исключения преждевременного разрушения



Р и с. 1. Изменение линейных размеров образцов реакторного графита ГР-280 (перпендикулярное направление вырезки образцов) при температуре облучения 500—600 °С (●), 700—800 °С (■)