

Методика и программный комплекс для оценки параметров напряженно-деформированного состояния натуральных конструкций и их применение к исследованию нагруженности, дефектности и остаточных напряжений в элементах оборудования АЭС

А. С. Чернятин, И. А. Разумовский

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия

Изложены основы методического подхода и соответствующего программного комплекса, позволяющих определять параметры напряженно-деформированного состояния и дефектность натуральных объектов с трещинами. Метод базируется на расчетной оценке указанных параметров из условия минимума целевой функции, описывающей расхождение между массивами экспериментальных данных и результатами численных решений модельных задач с использованием метода конечных элементов.

Ключевые слова: обработка экспериментальной информации, метод конечных элементов, нагруженность, дефектность, остаточные напряжения.

Введение. Одной из важнейших составляющих повышения прочности и надежности атомного энергетического оборудования в совокупности с увеличением эксплуатационных параметров, а также продления сроков эксплуатации является получение надежной информации о реальном напряженно-деформированном состоянии (НДС) на всех этапах работы изделий. Современные программные комплексы (CAN, ANSYS, NASTRAN, ABAQUS и др.), реализующие метод конечных элементов (МКЭ), обеспечивают возможность создания достаточно точных расчетных моделей исследуемых объектов на стадии их проектирования. Однако, чем сложнее и ответственнее конструкции, тем более значимыми становятся оценки НДС в процессе их экспериментальной апробации (пуско-наладочные испытания) и эксплуатации.

Известно, что НДС натурной конструкции может существенно отличаться от НДС, полученного расчетным путем. Это обусловлено использованием всегда в определенной мере условной расчетной схемы, погрешностями информации о реальных эксплуатационных нагрузках, наличием остаточных технологических напряжений (ОН), ползучестью и релаксацией материала. Особенно это относится к объектам, которые длительное время находятся в эксплуатации при существенном износе наиболее нагруженных зон и элементов.

Задача определения реальных нагруженности, НДС, поврежденности материала натуральных конструкций может быть решена только на основе экспериментальных исследований реальных объектов или вырезанных из них образцов. При этом исследование натуральных объектов, как правило, включает два этапа:

регистрацию экспериментальной информации о деформациях, перемещениях и других параметрах, представляющих собой деформационный отклик на некоторое воздействие: силовое или тепловое нагружение (разгрузка),

удаление некоторой зоны исследуемого объекта (сверление малого отверстия, срезание слоя и др.);

определение искомым параметров конструкции на основе обработки полученной экспериментальной информации.

Знание параметров (максимальные напряжения, усилия, остаточные напряжения, параметры механики разрушения, наличие и размеры возможных дефектов и т.д.), определенных на конкретном этапе эксплуатации конструкции, может стать основой для получения уточненной оценки прочности и работоспособности соответствующих ее элементов.

Следует подчеркнуть, что традиционные способы определения параметров НДС путем обработки экспериментальных данных базируются на едином методическом подходе, в основе которого лежат априори известные соотношения между искомыми параметрами и экспериментальными данными, устанавливаемые с использованием аналитических или численных решений близких по постановке задач. Такого рода подходы имеют ограниченную область применения и могут содержать значительные погрешности в построении модели для конкретных задач.

В работах [1–3] предложен метод, который, в отличие от традиционных подходов, не имеет принципиальных ограничений на типы распределения искомым параметров. Он базируется на определении искомым характеристик рассматриваемой области конструкции P_j на основе минимизации “общего” расхождения (целевой функции I) между массивами экспериментальных данных (e_i^*) и результатами численных решений (e_i) соответствующих модельных задач, при постановке которых имеется возможность учета их особенности.

Для получения значительных объемов e_i^* используются современные экспериментальные методы, базирующиеся на интерференционно-оптических способах регистрации полей перемещений в лабораторных и натурных условиях (методы электронно-цифровой спекл-интерферометрии, корреляции цифровых изображений), обеспечивающих получение информации об НДС на поверхности исследуемого объекта непосредственно в цифровом виде [4, 5]. Следующим этапом исследования является расчетное определение указанных выше параметров.

Для реализации предложенного подхода разработан “гибкий” вычислительный комплекс (ВК), включающий программы с графическим интерфейсом (в среде MATLAB) и параметрические макросы (в среде ANSYS), которые обеспечивают:

1) формирование массива экспериментальных данных e_i^* на фоне экспериментально полученных картин полей деформационных откликов в интерактивном режиме;

2) решение прямой задачи, заключающейся в расчете величин деформационных откликов e_i в назначенных точках измерений (ТИ) при заданных (принятых в качестве первого приближения) значениях параметров P_j с использованием МКЭ. При этом можно проводить расчет деформационных полей, возникающих в результате нагружения области или другого воздействия на уже нагруженную область (например, высверливание отверстия);

3) решение обратной задачи (определение параметров P_j) на основе интерпретации экспериментальных данных e_i^* . Согласно разработанной методике обратная задача сводится к задаче минимизации целевой функции $I(e_i, e_i^*)$, характеризующей комплексное расхождение между массивами экспериментальных данных (e_i^*) и их расчетными значениями (e_i). В качестве целевых функций могут быть приняты среднеквадратическое (I_{RMS}) и максимальное (I_{max}) отклонения, а также функции специального вида;

4) численное исследование влияния разброса различных факторов на точность определения величин параметров P_j .

Ряд разработок из области прикладной математики и программирования позволил существенно увеличить скорость решения обратной задачи и повысить точность решения прикладных задач по оценке нагруженности конструкций. Эффективность метода проиллюстрирована на ряде численных экспериментов (примеры решения типовых практических задач), связанных с исследованием нагруженности и дефектности типовых элементов АЭС.

Оценка нагруженности трубопроводов, в том числе имеющих поверхностные дефекты типа трещин. В работе [2] показана возможность применения метода для анализа нагруженности элементов конструкций с поверхностными и сквозными трещинами. Для воздействия на исследуемую зону в вершине трещины высверливали малое отверстие. Заметим, что указанная процедура используется в качестве конструкционного торможения трещин, что обеспечивает снижение концентрации напряжений и удаление поврежденного металла в вершине трещины [6]. В развитие этого метода была рассмотрена задача одновременного определения нагруженности области (напряжений σ_x, σ_y на удалении от зоны трещины) и глубины трещины b (рис. 1). Знание $P = \{\sigma_x, \sigma_y, b\}$ позволяет провести уточненный расчет параметров механики разрушения для оценки трещиностойкости данной области. В качестве исходной экспериментальной информации использовались поля перемещений u, v, w на поверхности, обусловленные образованием отверстия. Протяженность трещины на поверхности $2a$ считается известной, а ее форма принимается полуэллиптической.

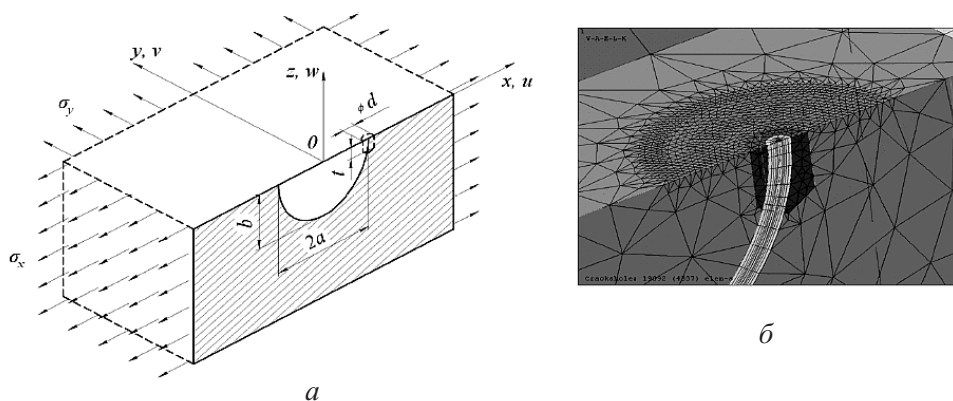


Рис. 1. Полупространство с поверхностной полуэллиптической трещиной (а) и конечно-элементная модель зоны выхода трещины на поверхность (б).

Метод и его программная реализация предусматривают при решении каждой конкретной задачи установление объема и области локализации экспериментальной информации, а также требований к чувствительности аппаратуры для регистрации деформационного отклика, обеспечивающих надежное получение искомых параметров на основе расчетов соответствующих модельных задач. Результаты расчетов одной из модельных задач (рис. 1) приведены в табл. 1 ($\bar{\sigma}_x = \sigma_x / \sigma_x^*$, $\bar{\sigma}_y = \sigma_y / \sigma_y^*$, $\bar{b} = b / b^*$, где b^* , σ_x^* , σ_y^* – истинные значения параметров; \bar{r} – радиус-вектор, начало которого расположено в центре отверстия). Видно, что при наличии достаточно больших объемов экспериментальной информации (N – количество ТИ), несмотря на значительный диапазон разброса экспериментальных данных ($\delta_e = 20\%$), погрешность в вычислении нагрузок не превышает 10%, а глубины трещины – 15%.

Т а б л и ц а 1

Оценка влияния условий эксперимента на искомые параметры

Условия эксперимента				Математическое ожидание			Дисперсия		
Локализация ТИ	N	$\delta_e, \%$	I	\bar{b}	$\bar{\sigma}_x$	$\bar{\sigma}_y$	\bar{b}	$\bar{\sigma}_x$	$\bar{\sigma}_y$
$1,0 \leq \bar{r} /d \leq 1,5$	55	10	I_{RMS}	1,013	0,998	0,988	0,081	0,036	0,049
			I_{max}	1,010	0,996	0,988	0,109	0,061	0,067
$0,5 \leq \bar{r} /d \leq 1,0$			I_{RMS}	1,049	0,994	0,982	0,216	0,091	0,116
			I_{max}	1,075	0,989	0,975	0,262	0,093	0,128
$1,0 \leq \bar{r} /d \leq 1,5$	110	10	I_{RMS}	1,003	0,992	0,992	0,051	0,023	0,030
			I_{max}	1,030	0,970	0,959	0,124	0,055	0,071
		20	I_{RMS}	1,054	0,093	0,932	0,097	0,040	0,055
			I_{max}	1,054	0,093	0,932	0,097	0,040	0,055
60		20	I_{RMS}	0,996	0,978	0,078	0,081	0,048	0,054
			I_{max}	0,996	0,978	0,078	0,081	0,048	0,054

Исследование остаточных напряжений в зоне стыка разнородных материалов корпусов реакторов. Рассматривается задача об исследовании способом “слепого” отверстия пространственных высокоградиентных полей остаточных напряжений в биметаллических элементах конструкций, в которых происходит скачок напряжений, обусловленный различием в термомеханических характеристиках материалов биметаллической композиции. В качестве примера рассмотрена задача о распределении ОН в биметаллической цилиндрической обечайке корпуса реактора ВВЭР-1000, для которой закон их распределения в исследуемой зоне стыка разнородных материалов (рис. 2) известен из работ [7–9 и др.].

Определяется поле ОН в двухслойном тонкостенном цилиндре с кусочно-линейным по глубине и скачкообразным на границе стыка разнородных материалов распределением нормальных напряжений. Законы распределения напряжений в направлениях θ и z считаются подобными (коэффициент подобия α). Таким образом, напряженное состояние можно охарактеризовать четырьмя параметрами: $P = \{s_\theta^1, s_\theta^2, s_\theta^3, s_\theta^4\}$ – рис. 2, б.

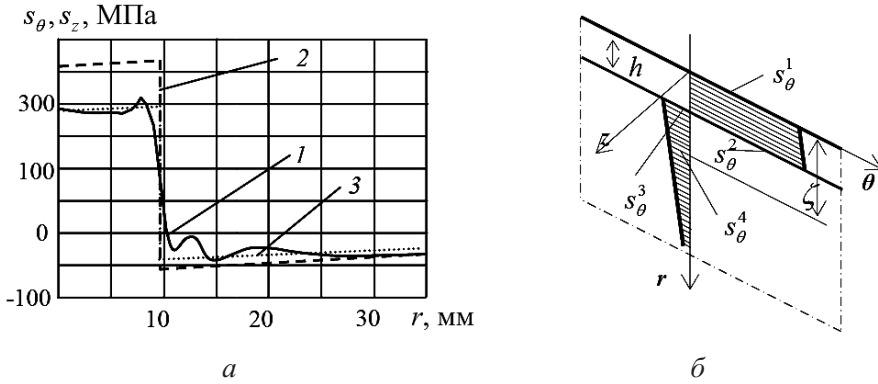


Рис. 2. К исследованию ОН в обечайке корпуса реактора ВВЭР-1000: а – данные работ [7–9] (1 – эпюра кольцевых напряжений (s_θ); 2, 3 – схематизированные эпюры кольцевых (s_θ) и осевых (s_z) напряжений); б – схема модельной задачи.

При проведении численного “эксперимента” полагали, что отверстие последовательно углубляется за пять шагов; при этом отношение его глубины t к толщине верхнего слоя h (наплавки) принимается равным 0,33; 0,67; 1,22; 1,44 и 1,67. На каждом шаге увеличивается также диаметр отверстия d таким образом, что $t/d \approx 1$. Это обусловлено тем, что функция, связывающая ОН и параметры деформационного отклика, “измеряемого” на поверхности, при увеличении параметра t/d быстро затухает. На каждом шаге выполняется “регистрация” полей перемещений u , v и w . Обратная задача решается следующим образом: на первом шаге определяются величины параметров s_θ^1 , s_θ^2 , на втором – s_θ^3 , s_θ^4 . Полученные значения искомым (безразмерных) параметров представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Оценка влияния погрешности условий эксперимента на величины параметров $s_\theta^1, s_\theta^2, s_\theta^3, s_\theta^4$

Условия эксперимента			Дисперсия				
I	N^*	δ_e	$\overline{s_\theta^1}$	$\overline{s_\theta^2}$	$\overline{s_\theta^3}$	$\overline{s_\theta^4}$	$\overline{\Delta s}$
I_{\max}	3	5	0	0,01	0,17	0,55	0,04
I_{\max}	10	5	0	0	0,07	0,21	0,02
I_{RMS}	10	5	0	0,02	0,31	0,81	0,07
I_2	3	10	0,01	0,03	0,05	0,05	0,04
I_2	10	10	0,01	0,03	0,05	0,04	0,03

Примечание. N^* – количество точек измерений на каждой интерференционной полосе.

Результаты анализа величин параметров s_θ^1, s_θ^2 подтвердили высокую точность определения линейно-изменяющихся полей напряжений. Однако среднеквадратическое и максимальное отклонения не обеспечивали доста-

точной точности определения параметров $s_{\theta}^3, s_{\theta}^4$ даже при небольших погрешностях исходных данных. Поэтому был выполнен анализ возможностей использования целевых функций другого вида. Так, были разработаны две функции специального вида:

$$I_1 = \sqrt[3]{\frac{\sum_m \tilde{e}_m \sum_m d_m^2}{N}}; \quad I_2 = \sqrt{\frac{\sum_m \{(N - m + 1)d_m^2\}}{N}},$$

где \tilde{e}_m – вектор упорядоченных по возрастанию компонент вектора \tilde{e}_i (относительные отклонения e_i и e_i^*); d_m – вектор разности между значениями смежных компонент вектора \tilde{e}_m .

Данные функции позволили получить результат с приемлемой точностью, в частности при $\delta_e = 10\%$ дисперсия наименее “устойчивого” к погрешности исходных данных параметра s_{θ}^4 при использовании полей абсолютных откликов не превышает 11,0%, при относительных – 4,8%. Погрешность в определении важнейшего параметра – “скачка” напряжений $\Delta s = |s_{\theta}^2| + |s_{\theta}^3|$ – лежит в пределах 5...7%.

Оценка размеров трещин на внутренней поверхности трубопровода.

Успешное применение разработанного метода при определении глубины поверхностной трещины позволило поставить более сложную задачу: определение размеров трещины, расположенной на внутренней поверхности трубопровода, по деформационным полям (возмущениям) на наружной поверхности, возникающим при нагружении (или частичной разгрузки) трубопровода внутренним давлением. С целью оценки возможностей указанного подхода была рассмотрена следующая модельная задача: тонкостенный элемент, на внутренней стороне которого ортогонально к поверхности располагается трещина эллиптической формы, размеры которой (b и a) подлежат определению (рис. 3). На части поверхности (плоскости $z = 0$) регистрируются поля перемещений u, v, w , возникающие вследствие действия известных по величине напряжений σ_x, σ_y .

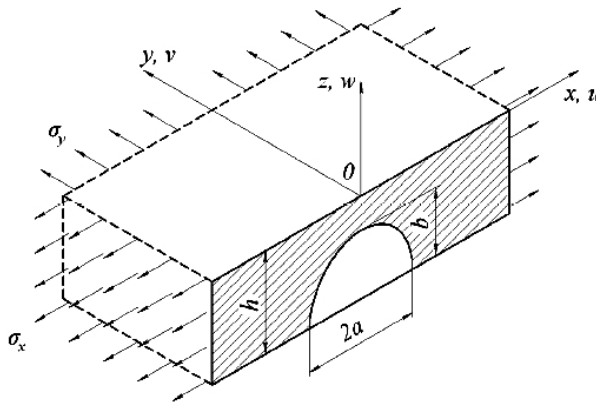


Рис. 3. Тонкостенный элемент с внутренней трещиной.

Результаты расчетов некоторых модельных задач представлены в табл. 3. Видно, что использование в качестве целевой функции среднеквадратического и максимального отклонений приводит к относительным погрешностям в определении искомым параметров $P_1 = a$, $P_2 = b$ около 15...20% при небольшой погрешности исходных данных. В то же время даже при значительной погрешности в определении деформационных откликов имеем $\delta_e = 20\%$ (величина разбросов значений нагрузок σ_x , σ_y порядка $\delta_\sigma = 10\%$), при использовании предложенной функции специального вида I_2 погрешность в определении параметров a , b составляет менее 7,5%.

Т а б л и ц а 3

Результаты расчета модельных задач

Условия эксперимента								Максимальное отклонение, %	
Истинные значения параметров			Начальные отклонения, %		Поля откликов	I	N		
b/h	a/b	σ_y/σ_x	δ_σ	δ_e					
0,6	2	2,0	0	10	u, v	I_{RMS}	81	4,3	9,0
0,6	2	2,0	5	10	u, v	I_{RMS}	81	7,3	14,6
0,6	2	2,0	5	10	u, v	I_{max}	81	9,5	20,5
0,6	2	2,0	5	10	u, v	I_2	81	4,7	6,2
0,6	2	2,0	5	10	u, v, w	I_2	81	4,0	4,8
0,6	2	2,0	10	20	u, v, w	I_2	81	7,2	6,4
0,6	2	2,0	10	20	u, v, w	I_{RMS}	81	16,6	22,6
0,6	2	0,5	5	10	u, v, w	I_2	81	3,8	5,4
0,6	2	1,0	5	10	u, v, w	I_2	81	2,3	4,5

Было показано, что при использовании I_2 отношение растягивающих нагрузок $k = \sigma_y/\sigma_x$ не оказывает существенного влияния на точность решения. Следует отметить, что исследования проводились для дефектов, глубина которых более $0,4h$. При меньших размерах дефектов деформационный отклик на поверхности становится слабо выраженным, однако с увеличением нагруженности элемента он становится более явным.

Заклучение. Таким образом, проведенные расчеты модельных задач различных типов показали высокую эффективность применения методики и разработанного вычислительного комплекса для исследования нагруженности, дефектоскопии и остаточных напряжений. Представляется возможным также применение последнего при расчете элементов оборудования АЭС. Ввиду универсальности разработанных алгоритмов и программ в перспективе открываются возможности дальнейшего расширения круга задач диагностики элементов АЭС, включая упругопластические задачи, анализ деградации свойств материала. При этом в качестве способа воздействия на исследуемый объект предполагается рассмотреть метод вдавливания индентора.

Резюме

Викладено основи методичного підходу і відповідного програмного комплексу, що дозволяє визначати параметри напружено-деформованого стану і дефектність натурних об'єктів із тріщинами. Метод базується на розрахунковій оцінці вказаних параметрів з умови мінімуму цільової функції, що описує розходження між великим масивом експериментальних даних і результатами числового розв'язку модельних задач із використанням методу скінченних елементів.

1. *Разумовский И. А., Чернятин А. С.* Экспериментально-расчетный метод оценки нагруженности натуральных конструкций с поверхностными трещинами // Пробл. машиностроения и надежности машин. – 2009. – № 3. – С. 35 – 42.
2. *Разумовский И. А., Чернятин А. С.* Методология и программа для исследования напряженно-деформированного состояния с использованием интерференционно-оптических и численных методов // Машиностроение и инж. образование. – 2009. – № 4. – С. 42 – 51.
3. *Chernyatin A. and Razumovsky I.* Experimental and computational method for determining parameters of stress-strain state from the data obtainable by interference optical techniques // Proc. ICEM-14 (Poitiers, France). – EPJ Web of Conferences. – 2010. – 6. – No. 45003.
4. *Gloud G. L.* Optical Methods of Engineering Analysis. – Cambridge: University Press, 1998. – 503 p.
5. *Razumovsky I. A.* Interference-optical. Methods of Solid Mechanics. – Springer, 2011. – 270 p.
6. *Партон В. З., Морозов Е. М.* Механика упруго-пластического разрушения. – М.: Наука, 1985. – 502 с.
7. *Mahutov N. A., Kudrjavitsev B. A., Kyljiev V. D., et al.* Methods for determination of brittle strength parameters of bimetal elements for reactor vessels // SMiRT 11 Transactions. – Tokyo, 1991. – Vol. F. – P. 395 – 400.
8. *Kostylev V. I. and Margolin B. Z.* Determination of residual stress and strain fields caused by cladding and tempering of reactor pressure vessels // Int. J. Press. Vess. Piping. – 2000. – 77. – P. 723 – 735.
9. *Обеспечение безопасности и живучести водо-водяных энергетических реакторов* / Под ред. Н. А. Махутова, М. М. Гаденина. – М.: Наука, 2009. – 342 с.

Поступила 20. 12. 2012