

## АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ ТРЕЩИН В ЭЛЕМЕНТАХ ГИДРОТУРБИННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Постановка проблемы.** Значительная часть энергетического оборудования в Украине практически исчерпала свой нормативный ресурс, что выражается, в частности, в возникновении и развитии трещин и других дефектов, характерных для конструкций, работающих в условиях повышенных технологических нагрузок. Наличие трещин приводит к снижению надежности работы конструкции. Поэтому актуальной задачей при уточнении остаточного ресурса является учет влияния трещин, развившихся в процессе эксплуатации. Изучению прочности элементов конструкций с трещинами посвящено большое количество научных публикаций [1-3] и др.

Очень часто невозможно получить реальные данные относительно размеров трещин и расстояний между ними с помощью визуальных наблюдений, так как это связано с остановкой работающего оборудования. Таким образом, представляет интерес рассмотрение часто встречающихся дефектов и их конфигураций. В частности, часто встречаются одиночные трещины и комбинации коллинеарных трещин. Важной характеристикой решения задачи о прочности элемента конструкции, ослабленного трещиной, являются коэффициенты интенсивности напряжений вблизи вершин трещины.

**Целью данной работы** является определение наиболее опасной конфигурации трещин из таких, как изолированная трещина (рис.1), цепочка трещин (рис.2), две неравные коллинеарные трещины (рис. 3) для уточнения технических требований к сварно-литым конструкциям.

**Основная часть.** В [8] указывается, что работа элементов гидротурбинного оборудования в рабочих диапазонах нагрузок допускается при наличии дефектов, если дефекты или их скопления не превышают 7 см. Группа дефектов считается скоплением (или цепочкой), если в ней присутствует не менее четырех дефектов. Результаты данной работы позволяют уточнить техническое определение цепочки.

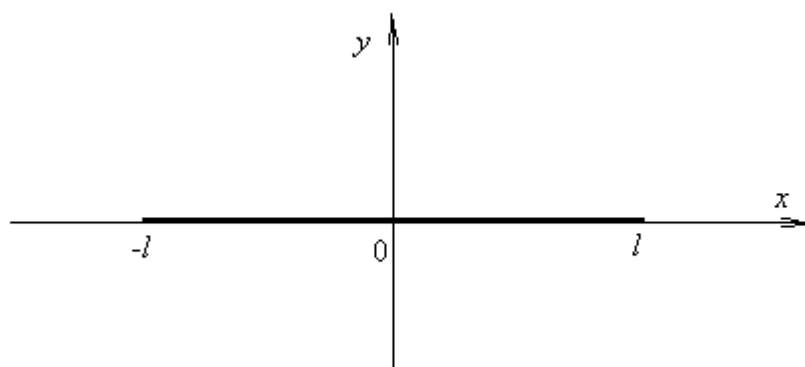


Рис.1. Изолированная трещина

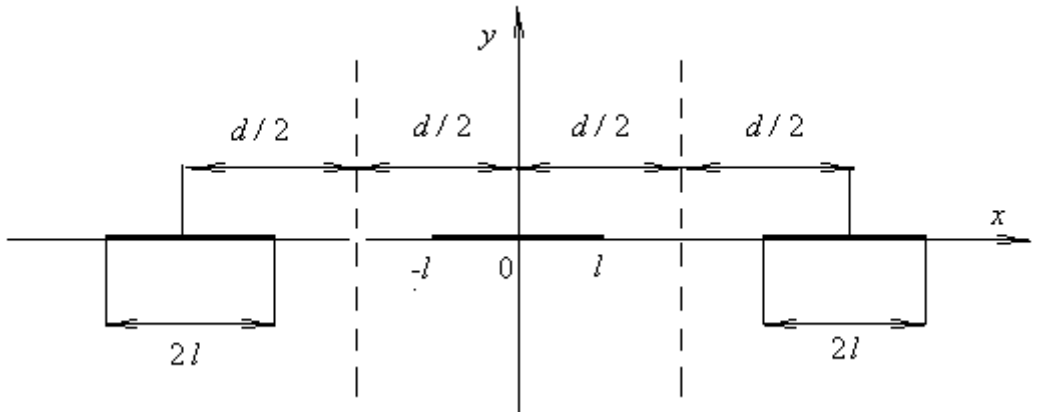


Рис.2. Цепочка трещин

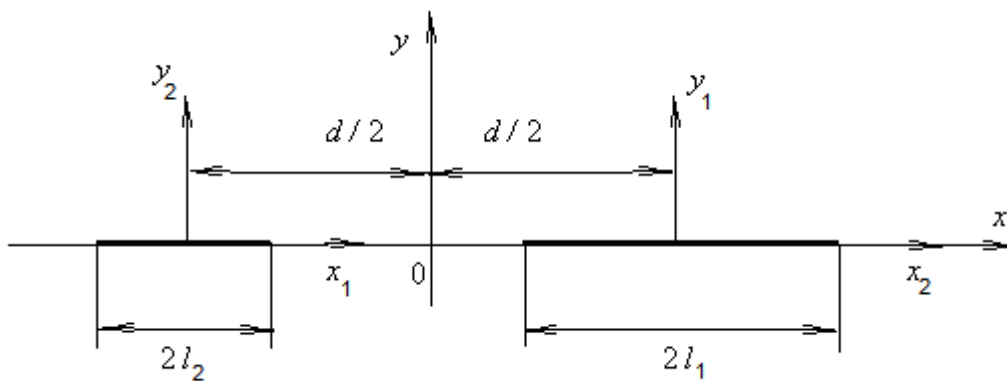


Рис.3. Две неравные коллинеарные трещины

Для решения задачи об определении наиболее опасной конфигурации трещин, в каждом из перечисленных случаев найдем коэффициенты интенсивности напряжений вблизи вершин трещины.

Рассмотрим бесконечную пластину с каждым из перечисленных дефектов. Пусть  $\sigma$  – нормальная нагрузка, действующая на пластину вблизи трещин, симметричная на берегах трещины. Для изолированной трещины длины  $2l$  (рис. 1) коэффициенты интенсивности напряжений находятся по формуле

$$k = \sigma \sqrt{l} . \quad (1)$$

Для цепочки трещин коэффициенты интенсивности напряжений будем искать по формуле

$$k = \sigma \sqrt{\frac{d}{\pi} \operatorname{tg} \frac{\pi d}{d}} , \quad (2)$$

где  $2l$  – длина трещины,  $d$  – расстояние между серединами трещин (рис. 2).

В случае же задачи для двух неравных коллинеарных трещин решим систему интегральных уравнений [3]:

$$\begin{cases} \int_{-l_1}^{l_1} \frac{\Gamma_1'(t)}{t-x} + \int_{-l_2}^{l_2} \frac{\Gamma_2'(t)}{t-x-d} = \pi\sigma, |x| < l_1 \\ \int_{-l_1}^{l_1} \frac{\Gamma_1'(t)}{t-x+d} + \int_{-l_2}^{l_2} \frac{\Gamma_2'(t)}{t-x} = \pi\sigma, |x| < l_2 \end{cases} . \quad (3)$$

Интегрируя в (3) по частям при условии  $\int_{-l_i}^{l_i} \Gamma_i'(t) dt = 0, i = 1; 2$ , получаем систему гиперсингулярных интегральных уравнений

$$\begin{cases} \int_{-l_1}^{l_1} \frac{\Gamma_1(t)}{(t-x)^2} + \int_{-l_2}^{l_2} \frac{\Gamma_2(t)}{(t-x-d)^2} = -\pi\sigma, |x| < l_1 \\ \int_{-l_1}^{l_1} \frac{\Gamma_1(t)}{(t-x+d)^2} + \int_{-l_2}^{l_2} \frac{\Gamma_2(t)}{(t-x)^2} = -\pi\sigma, |x| < l_2 \end{cases} \quad (4)$$

Систему (4) решаем методом дискретных особенностей [4]. Коэффициент интенсивности напряжений вблизи вершин трещин будем искать следующим образом:  
Из [3] следует, что

$$k_{2i}^{\pm} - ik_{1i}^{\pm} = \mp \lim_{x_i \rightarrow \pm l_i} \left[ \sqrt{\frac{l_i^2 - x_i^2}{l_i}} \Gamma_i'(x_i) \right], i = 1; 2. \quad (5)$$

где  $k_{2i}^{\pm}$  и  $k_{1i}^{\pm}, i = 1; 2$  - соответственно нормальные и касательные составляющие коэффициента интенсивности напряжений. Так как  $\sigma$  - нормальная нагрузка, симметричная на берегах трещины, то  $k_{1i}^+ = k_{1i}^- = 0, i = 1; 2$ ,

$$k_{2i} = k_{2i}^+ = k_{2i}^- = \lim_{x_i \rightarrow \pm l_i} \left[ \sqrt{\frac{l_i^2 - x_i^2}{l_i}} \Gamma_i'(x_i) \right], i = 1; 2. \quad (6)$$

(Под  $k_{2i}^+ = k_{2i}^- = k_{2i}$  будем понимать абсолютную величину нормальных компонентов коэффициента интенсивности.)

Так как система уравнений (4) решена численно, то есть, функции  $\Gamma_1(x), \Gamma_2(x)$  найдены в виде таблицы чисел  $\Gamma_{1k}, k = \overline{1; n_1}, \Gamma_{2j}, j = \overline{1; n_2}$ , то  $k_{2i}, i = \overline{1; 2}$  также найдем приблизительно по формуле

$$k_{2i} = \sqrt{\frac{l_i^2 - x_{p_i}^2}{l_i} \frac{\Gamma_{p_i} - \Gamma_{p_i-1}}{x_{p_i} - x_{p_i-1}}}, i = 1; 2. \quad (7)$$

Здесь  $n_i, i = \overline{1; 2}$  - количество отрезков, на которые разбивается отрезок  $[-l_i; l_i], i = \overline{1; 2}$ ,  $n_2 = \left[ \frac{l_2}{l_1} n_1 \right]$  при решении системы уравнений (4) методом дискретных особенностей.

Номер  $p_i, i = \overline{1; 2}$  выберем достаточно близким к  $n_i, i = \overline{1; 2}$ , так как нас интересуют коэффициенты интенсивности напряжений вблизи вершины трещины, однако неравным  $n_i, i = \overline{1; 2}$ , так как метод дискретных особенностей дает существенную погрешность на концах рассматриваемого промежутка.

Так как сравнивать результаты имеет смысл при одинаковой нагрузке на пластину, коэффициенты интенсивности напряжений вычислим, полагая нагрузку  $\sigma = 1$ .

Также будем рассматривать все описанные дефекты таким образом, чтобы общая длина дефекта оставалась неизменной для каждого случая.

Пусть общая длина дефекта равна 7 см, что соответствует требованиям, приведенным в [8]. Отметим, что в [8] рекомендуется не допускать дефектов, состоящих более, чем из трех трещин.

Для изолированной трещины в соответствии с формулой (1) получим

$$k = \sigma \sqrt{l} \Big|_{\sigma=1, 2l=7} = \sqrt{3.5} \approx 1.871 \text{ Мпа} \cdot \text{м}^{1/2}. \quad (8)$$

Рассмотрим теперь цепочку трещин. В [9] показано, что конечная периодическая система трещин (то есть, система равных коллинеарных трещин, расстояние между которыми постоянно) может рассматриваться как цепочка, если содержит не менее трех трещин. В процессе исследования были рассмотрены различные цепочки с сохранением расстояния между ближайшими вершинами соседних трещин. Здесь приведем результаты для цепочки из трех, четырех и пяти трещин при  $b=0.5$  см,  $b=0.25$  см и  $b=0.125$  см, где  $b$  - расстояние между ближайшими вершинами соседних трещин. Результаты, полученные согласно формуле (2), приведены в таблице 1.

Таблица 1.

$b, \text{см}$	3 трещины	4 трещины	5 трещин
0.5	$k _{2l=2} \approx 1.565 \text{ Мпа} \cdot \text{м}^{1/2}$	$k _{2l=1.375} \approx 1.158 \text{ Мпа} \cdot \text{м}^{1/2}$	$k _{2l=1} \approx 0.909 \text{ Мпа} \cdot \text{м}^{1/2}$ .
0.25	$k _{2l=2} \approx 2.162 \text{ Мпа} \cdot \text{м}^{1/2}$	$k _{2l=1.375} \approx 1.619 \text{ Мпа} \cdot \text{м}^{1/2}$	$k _{2l=1} \approx 1.289 \text{ Мпа} \cdot \text{м}^{1/2}$ .
0.125	$k _{2l=2} \approx 3.020 \text{ Мпа} \cdot \text{м}^{1/2}$	$k _{2l=1.375} \approx 2.263 \text{ Мпа} \cdot \text{м}^{1/2}$	$k _{2l=1} \approx 2.223 \text{ Мпа} \cdot \text{м}^{1/2}$ .

Можно видеть, что при увеличении длины одной трещины в цепочке при сохранении расстояния между ближайшими вершинами соседних трещин, растет значение коэффициентов интенсивности напряжений вблизи вершин трещин.

При таком же расстоянии между ближайшими вершинами соседних трещин рассмотрим и случай двух неравных коллинеарных трещин (при различных значениях длин трещин). В таблице 2 приведены некоторые результаты для данного случая. Из четырех значений коэффициентов интенсивности напряжений для каждого случая приведено максимальное (различие коэффициентов вызвано тем, что трещины неравной длины).

Таблица 2.

$b, \text{см}$			
0.5	$k \approx 1.596 \text{ Мпа} \cdot \text{м}^{1/2},$ $2l_1=2, 2l_2=4.5$	$k \approx 1.598 \text{ Мпа} \cdot \text{м}^{1/2},$ $2l_1=2.5, 2l_2=4$	$k \approx 1.682 \text{ Мпа} \cdot \text{м}^{1/2},$ $2l_1=3, 2l_2=3.5$
0.25	$k \approx 1.849 \text{ Мпа} \cdot \text{м}^{1/2},$ $2l_1=2.25, 2l_2=4.5$	$k \approx 1.950 \text{ Мпа} \cdot \text{м}^{1/2},$ $2l_1=2.75, 2l_2=4$	$k \approx 2.020 \text{ Мпа} \cdot \text{м}^{1/2},$ $2l_1=3.25, 2l_2=3.5$
0.125	$k \approx 2.158 \text{ Мпа} \cdot \text{м}^{1/2},$ $2l_1=2.125, 2l_2=4.75$	$k \approx 2.278 \text{ Мпа} \cdot \text{м}^{1/2},$ $2l_1=2.625, 2l_2=4.25$	$k \approx 2.358 \text{ Мпа} \cdot \text{м}^{1/2},$ $2l_1=3.125, 2l_2=3.75$

**Выводы и перспективы дальнейших исследований.** Анализ результатов показывает, что наиболее безопасным и предсказуемым из рассмотренных дефектов является изолированная трещина, а влияние двух неравных коллинеарных трещин на время работы конструкции сопоставимо с влиянием цепочки. При этом значение коэффициентов интенсивности в случае неравных трещин зависит от соотношения их длин, что делает поведение такого дефекта менее предсказуемым по сравнению с цепочкой.

Таким образом, рекомендуется пересмотреть требования к работе сварно-литых конструкций при наличии дефектов [8] с учетом того, что скопление трех трещин представляет не меньшую опасность, нежели скопление большего их числа, а также с учетом влияния суммарной длины трещин внутри дефекта и соотношения их длин на время непрерывной работы конструкции.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Андрейкив А.Е. Усталостное разрушение и долговечность конструкций/ А.Е. Андрейкив, А.И. Дарчук. – Киев: Наук. думка, 1987. – 404 с.
2. Панасюк В.В. Методы оценки трещиностойкости конструкционных материалов / В.В.Панасюк, А.Е.Андрейкив, С.Е Ковчик. – Киев: Наук. думка, 1971. – 278 с.
3. Панасюк В.В. Распределение напряжений около трещин в пластинах и оболочках / В.В. Панасюк, М.П. Саврук, А.П. Дацышин. – Киев: Наук. думка, 1976. – 444с.
4. Кантор Б.Я. Гиперсингулярные интегральные уравнения в задачах механики сплошной среды/Б.Я. Кантор, Е.А. Стрельникова. – Харьков: Новое слово, 2005.– 252 с.
5. Гандель Ю.В. Введение в методы вычисления сингулярных и гиперсингулярных интегралов/Ю.В. Гандель. – Харьков: Изд. Харьк. национального ун-та им. В.Н.Каразина, 2000. – 92 с.
6. Мухелишвили Н.И. Сингулярные интегральные уравнения/Н.И. Мухелишвили – М: Наука, 1968. – 512 с.
7. Пэрис П. Критерии усталостного распространения трещин/П. Пэрис, Ф. Эрдоган //Техн. механика. Сер. Д.– 1987. –№ 4. – С. 60-68.
8. Веремеенко И.С. Турбины гидравлические. Технические требования к сварно-литым конструкциям. ПО «Харьковский турбинный завод»/ И.С. Веремеенко.– 1988.–14 с.
9. Zaydenvarg O. The Method of Discrete Singularities in Justification of The Number of Cracks in a Chain/O. Zaydenvarg, E. Strelnikova // Сучасні проблеми прикладної математики та інформатики. – Львів: видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2009. – С. 88.

ЗАЙДЕНВАРГ Ольга Леонидовна – аспирант Института проблем машиностроения им.А.Н. Подгорного НАН Украины, г. Харьков.

Научные интересы:

– сингулярные и гиперсингулярные интегральные уравнения, механика хрупкого разрушения, преподавание фундаментальных дисциплин в высшей школе.