

ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ УГЛОВЫХ КОНЦЕНТРАТОРОВ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ИЗ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ

Д.М. Шахматов, М.В. Шахматов

THE RISK EVALUATION OF ANGLE CONCENTRATORS IN WELDED JOINTS OF THE BRITTLE MATERIALS

D.M. Shakhmatov, M.V. Shakhmatov

На основе подходов механики разрушения рассмотрены угловые концентраторы сварных соединений, к которым относят подрезы, не полностью заваренную V-образную разделку кромок, резкие переходы от усиления шва к основному металлу и т. д. Получены аналитические зависимости, позволяющие проводить оценку опасности рассматриваемых дефектов и их нормирование.

Ключевые слова: дефект, угловой концентратор, трещина, номинальные напряжения.

Angle concentrators of welded joints which include undercuts, not completely welded V-shaped grooving, abrupt junction from the weld reinforcement to the base metal, etc. are considered on the basis of fracture mechanics. Analytical dependences for the risk evaluation for considered defects and their valuation are received.

Keywords: defect, angle concentrator, crack, nominal stress.

Дефекты, представляющие собой угловые концентраторы, достаточно часто встречаются в сварных соединениях. Например, в стыковых соединениях, выполненных сваркой плавлением, – это резкие переходы от усиления шва к основному металлу, неполное заполнение V- и X-образной разделки кромок, смещение свариваемых кромок, угловатость сварного соединения и др. В сварных соединениях с угловыми швами угловой концентратор обусловлен типом соединения (тавровое, нахлесточное, угловое) и переходом от углового шва к основному металлу); в соединениях, выполненных контактной стыковой сваркой, угловой концентратор имеет место при смещении осей деталей при осадке и т. д. В общем случае модель сварного соединения с угловым концентратором можно условно представить на рис. 1.

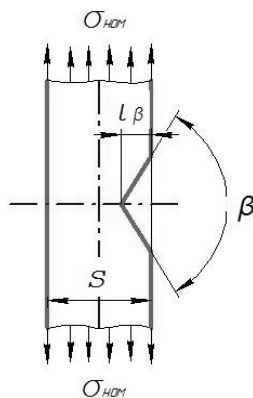


Рис. 1. Схема сварного соединения с угловым концентратором

Для сварных соединений из хрупких материалов с повышенными значениями эквивалентного

содержания углерода ($C_3 > 0.45$) и, следовательно, с возможностью образования хрупких структур в области рассматриваемого концентратора вероятность хрупкого разрушения конструкций под действием эксплуатационных нагрузок достаточно велика. В этой связи вопрос об оценке опасности рассматриваемых дефектов стоит достаточно остро. С одной стороны, угловой концентратор менее опасен, чем трещина размером l , с другой – в вершине углового концентратора (согласно теории упругости) напряжения, как и в устье трещины, обладают свойством сингулярности [1]. Следовательно, оценку опасности рассматриваемого дефекта необходимо производить методами механики разрушения (методом механики трещин).

Особенностью подхода оценки опасности рассматриваемых дефектов по сравнению с трещиной является то, что, помимо глубины внедрения дефекта l_β , появляется дополнительный параметр – угол β (рис. 1). При этом степень напряженности (градиент напряжений с приближением к вершине дефекта) существенно зависит от угла β и с уменьшением данного параметра должна переходить в известную оценку коэффициента интенсивности напряжений для трещины глубиной $l = l_\beta$. Алгоритм задачи об оценке опасности трещины для тела с бесконечными размерами основан на использовании асимптотических выражений, описывающих распределение напряжений в непосредственной близости от ее вершины (то есть если поместить полярные координаты в вершину трещины, а радиус-вектор r данных координат устремить к 0 ($r \rightarrow 0$), то для напряжений, действующих перпендикулярно плоскости краевой трещины при $\sigma_1 \rightarrow \infty$, получаем:

$$K_I = \sigma_1 (2\pi r)^{0.5}, \quad (1)$$

где K_I – коэффициент интенсивности напряжений, который однозначно описывает распределение напряжений вблизи вершины трещины при $r \rightarrow 0$, а индекс I обозначает, что данное решение для трещины нормального отрыва. Необходимо отметить, что в формуле (1) имеет место произведение бесконечно большого числа на бесконечно малое и это дает (при раскрытии неопределенности) вполне определенное значение, равное K_I . При этом параметр K_I для деталей конечного размера с краевой трещиной определяется по следующей формуле [1]:

$$K_I = 1,12\sigma_{\text{ном}}(\pi l)^{0,5} Y. \quad (2)$$

Здесь $\sigma_{\text{ном}}$ – номинальные напряжения, действующие в нетто-сечении детали и определяемые отношением нагрузки на деталь, отнесенной к площади нетто-сечения; Y – поправочная функция, учитывающая влияние размеров и геометрии детали; 1,12 – коэффициент для односторонней краевой трещины.

Условие разрушения для определения критических напряжений $\sigma_{\text{ном}}$ определяется достижением коэффициента интенсивности напряжений своего критического для данного материала значения $K_I = K_{Ic}$. При этом K_{Ic} является такой же характеристикой материала, как, например, предел текучести или временное сопротивление, но имеет размерность напряжений, умноженную на корень квадратный из длины трещины – МПа·м^{0,5}. Значение K_{Ic} дано в справочниках по механике разрушения и определяется согласно ГОСТ 25.506–85. В данном же документе имеются значения поправочных функций Y по основным расчетным схемам для определения K_{Ic} .

Задачу по определению опасности углового V-образного концентратора будем определять аналогично алгоритму решения для трещины путем нахождения некоторой эквивалентной ее величины l_3 , зависящей от угла раскрытия β . Путем численного эксперимента на основе значительного числа расчетов МКЭ, при анализе напряженного состояния деталей с рассматриваемым концентратором были получены следующие выражения:

$$l_3 = l_\beta \lambda; \quad (3)$$

$$\lambda = 1 - 0,2(\beta/\pi) + 0,8(\beta/\pi)^2 - 1,6(\beta/\pi)^3, \quad (4)$$

где λ – параметр приведения углового концентратора к эквивалентной трещине ($1,0 \geq \lambda \geq 0$).

Если произвести анализ граничных условий зависимостей (3, 4), то при $\beta = 0$ угловой концентратор вырождается в трещину, так как параметр $\lambda = 1$, $l_3 = l_\beta = l$. В данном случае справедливо решение (2) для определения K_I , а степень опасности дефекта определяем при $K_I = K_{Ic}$ с учетом геометрических размеров сварного соединения, определяемых поправкой Y .

При $\beta = 180^\circ$, параметр $\lambda = 0$ и фактически получаем сварное соединение без концентратора, $l_3 = l_\beta = l = 0$, а $K_I = 0$. Хрупкого разрушения за счет углового концентратора не происходит. Все промежуточные значения K_I при $0 < \beta < 180$ определим из соотношения:

$$K_I = 1,12\sigma_{\text{ном}}(\pi l_3)^{0,5} Y. \quad (5)$$

Аналогичный подход для оценки углового концентратора был выполнен в работе [2]. Однако полученная зависимость для l_3 в данной работе не соответствовала граничным условиям.

Для определения поправочной функции Y воспользуемся поправкой Федерсона [1]:

$$Y = (\text{Sec } \pi l_3 / 2S)^{0,5}, \quad (6)$$

где S – толщина сварной детали (см. рис. 1).

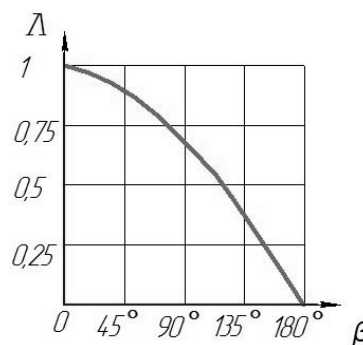


Рис. 2. Зависимость параметра λ от угла раскрытия углового концентратора β

Из рис. 2 видно, что угловые концентраторы с $\beta < 45^\circ$ работают практически как трещины (при $\beta = 45^\circ$ отличие составляет всего 10%). Если сравнивать угловой концентратор с трещиной, то при одинаковых номинальных напряжениях $\sigma_{\text{ном}}$, действующих на сварное соединение, и одинаковой глубине дефектов ($l_\beta = l$) опасность углового концентратора снижается на величину $R = (1/\lambda)^{0,5}$. То есть при угле $\beta = 45^\circ$ опасность углового концентратора по сравнению с трещиной снижается в 1,054 раза; при угле $\beta = 135^\circ$ – в 1,26 раза и при $\beta \rightarrow 180^\circ$ – в бесконечное число раз.

Выводы

1. На основе подходов механики разрушения получено решение для углового концентратора в сварных соединениях, которое учитывает глубину данного дефекта и угол его раскрытия.

2. Учитывая проведенный анализ опасности углового концентратора по сравнению с трещиной, необходимо отметить, что при равных номинальных напряжениях и глубине дефекта острый угловой концентратор до значений угла его раскрытия $\beta \leq 45^\circ$ работает практически как трещина; при $\beta > 45^\circ$ необходимо учитывать снижение опасности рассматриваемого концентратора по сравнению с трещиной на величину R .

Литература

1. Серенсен, С.В. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность: справ. пособие / С.В. Серенсен, В.П. Когаев, Р.М. Шнейдерович. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.
2. Зайнуллин, Р.С. Ресурсосберегающие технологии в нефтехимическом аппаратостроении / Р.С. Зайнуллин. – Уфа: Транстэк, 2000. – 348 с.

Поступила в редакцию 25 июня 2012 г.