



ВЗАИМНОЕ ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ В ЗОНЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СИЛОВЫХ НАГРУЖЕНИЯХ

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО**, **Е. А. ВЕЛИКОИВАНЕНКО**, канд. физ.-мат. наук,
А. С. МИЛЕНИН, канд. техн. наук, **Г. Ф. РОЗЫНКА**, **Н. И. ПИВТОРАК**, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Силовое взаимодействие групповых дефектов несплошности материала в сварных конструкциях не обязательно ограничивается концепцией, согласно которой соседний дефект ухудшает сопротивляемость эксплуатационному нагружению либо не влияет на нее при достаточно большом расстоянии между ними. Рассмотрен вариант, когда взаимодействие групповых дефектов типа трещин либо дефектов утонения стенки улучшает сопротивляемость эксплуатационному нагружению.

Ключевые слова: сварные соединения, взаимодействие между групповыми дефектами, параллельные дефекты, коллинеарные дефекты, вероятность разрушения

Степень поврежденности той или иной конструкции в конкретных условиях эксплуатации обычно определяется количеством обнаруженных недопустимых дефектов. Естественно, что чем больше таких дефектов, тем более поврежденной считается обследуемая конструкция. Существующие правила учета взаимного влияния дефектов [1–3 и др.] обычно сводятся к объединению по соответствующим правилам двух и более близко расположенных по отношению друг к другу допустимых дефектов в один независимый допустимый (недопустимый) дефект на основе концепции, согласно которой соседний дефект ухудшает либо не влияет на сопротивляемость эксплуатационному нагружению данного дефекта.

Такая концепция достаточно проста, но в целом ряде случаев она слишком консервативна, так

как не учитывает возможность третьей альтернативы, а именно, что соседний дефект может разгружать данный дефект и таким образом повышать его работоспособность в конкретных условиях эксплуатации.

Учет этой третьей альтернативы при технической диагностике конструкций требует соответствующих расчетных методик, нормативной базы и т. п., но, тем не менее, принимая во внимание современные тенденции развития вычислительной техники, методов математического моделирования, информационных систем, а также растущие требования к оптимизации создаваемых ответственных конструкций, перспективность соответствующих разработок не вызывает сомнений, особенно для прогноза ресурса безопасной эксплуатации сварных конструкций длительного сро-

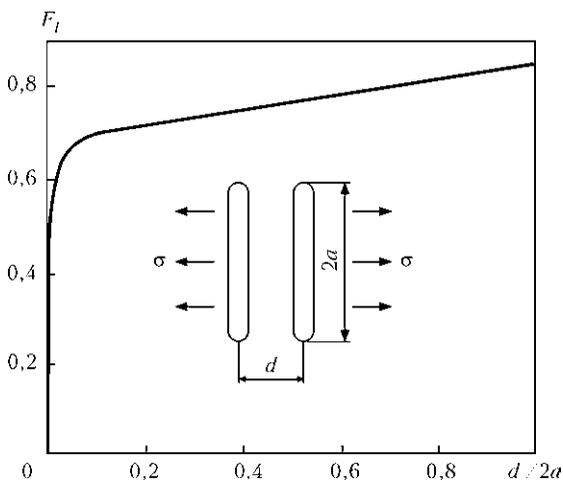


Рис. 1. Зависимость $F_I = K_I / (\sigma \sqrt{\pi a})$ от $d/2a$ [4]

Таблица 1. Численные результаты [4]

$2a/d$	F_I
0	1,0000*
0,2	0,9855*
0,4	0,9508*
0,6	0,9089*
0,8	0,8727*
1,0	0,8319
1,25	0,8037
2	0,7569
5	0,6962
10	0,6651
100	0,5846

* Пластина с центральной трещиной.

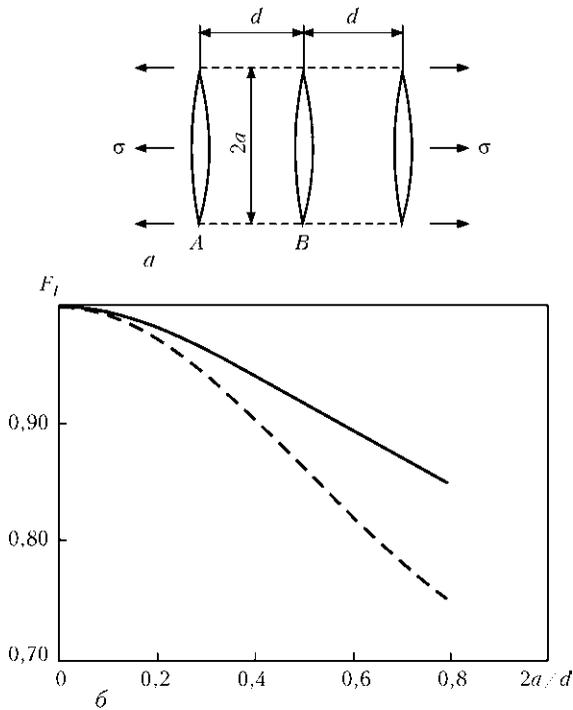


Рис. 2. Равномерное растяжение плоскости с тремя параллельными трещинами равной длины по нормали к линиям трещин (*a*) и зависимость $F_{I,A}$ (сплошная кривая) и $F_{I,B}$ (штриховая) от $2a/d$ (*b*)

ка службы по результатам соответствующих технических диагностик их состояния.

В данной работе рассматривается такая возможность для достаточно характерных эксплуатационных дефектов сварных конструкций в виде трещин и утонений.

Начнем с простейших примеров взаимодействия двух и трех сквозных параллельных трещин одинаковых размеров в неограниченной пластине, равномерно растягиваемой по нормали к плоскости трещин (рис. 1, 2) напряжением σ . Характеристикой нагружения таких дефектов является

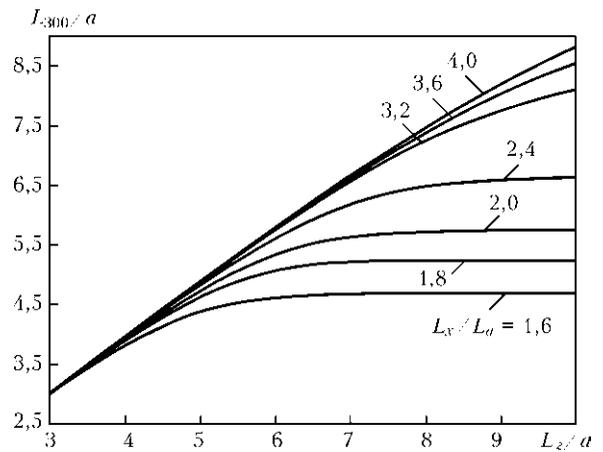


Рис. 4. Протяженность зоны разгрузки по оси $x = 0$ для одиночной трещины в пластине $L_z \times L_x$

коэффициент интенсивности напряжений в вершине трещин K_I . Соответствующие данные из [4] для случая двух трещин приведены на рис. 1 и в табл. 1, а для трех трещин — на рис. 2 в зависимости от расстояния между трещинами d . Из этих данных видно, что уменьшение d заметно снижает значения K_I как для двух, так и для трех трещин.

Объяснение такого факта вытекает из поля локальных напряжений, возникающего вокруг концов трещины. На рис. 3 приведена типовая картина распределения напряжений σ_{zz} в зоне сквозной трещины $2a = 20$ мм с нормалью z в полосе-пластине в плоскости $z = 0$. Видно, что на берегах трещины $z = 0$ $\sigma_{zz} = 0$, а затем по мере увеличения z напряжения σ_{zz} постепенно возрастают до 300 МПа, приложенных на границе $z = 500$ мм. Ширина полосы $2L_x = 200$ мм, материал — сталь с пределом текучести $\sigma_T = 420$ МПа. Таким образом, вблизи трещины — ее свободных берегов — возникает поле разгрузки

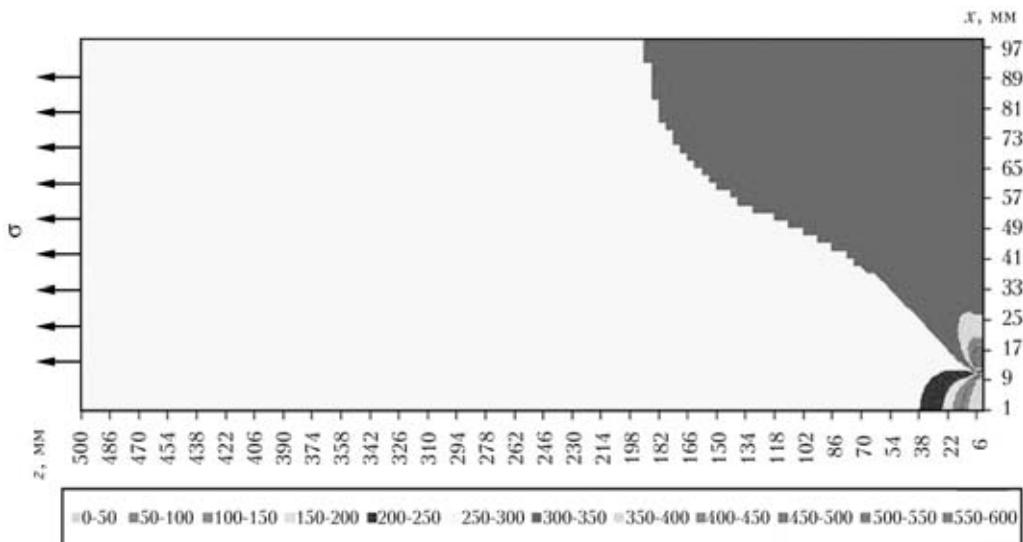


Рис. 3. Зона разгрузки для случая $a = 10$ мм одиночной трещины в пластине $2L_z = 1000$ мм, $2L_x = 200$ мм, сталь с $\sigma_T = 420$ МПа, $\sigma = 300$ МПа

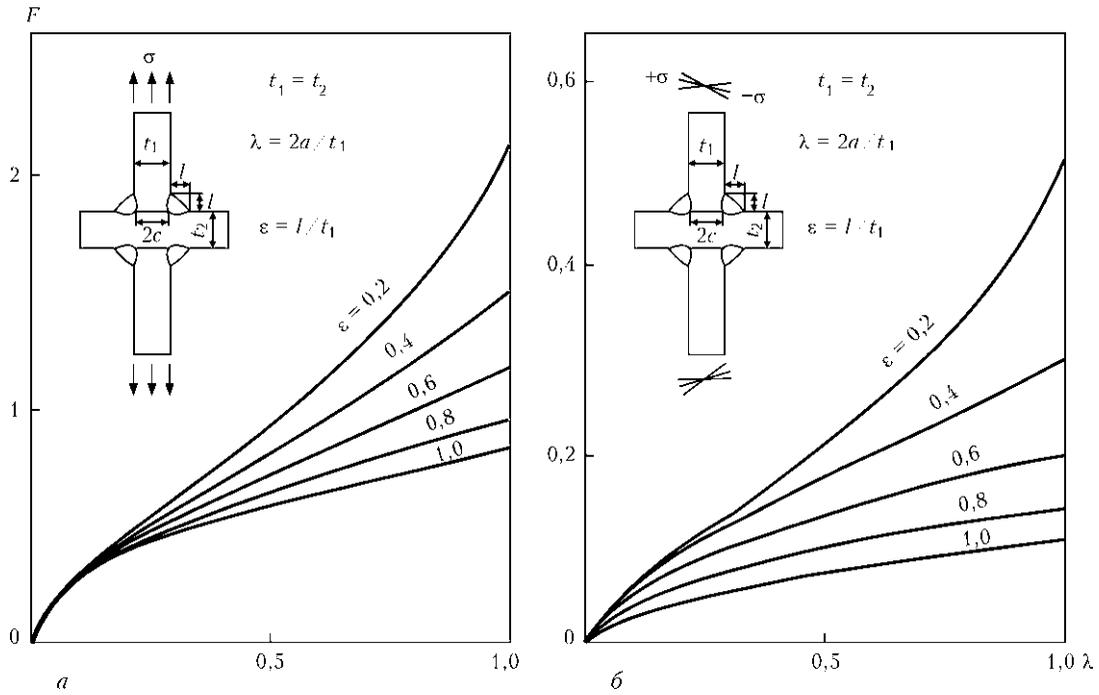


Рис. 5. Зависимость $F(\lambda)$ ($F = K_{\theta_{\max}} / \sigma \sqrt{t_1}$), $t_1 = t_2$ при растяжении (а) и изгибе (б) на крестовом соединении [4]

по напряжениям σ_{zz} , что естественно скажется на значениях K_p , если в этом поле поместить вторую трещину, что достаточно убедительно демонстрируют данные на рис. 1 и в табл. 1. Поскольку зона разгрузки имеет конечные размеры, то при достаточно больших d взаимодействие между двумя трещинами становится незначительным.

Характерно, что протяженность зоны разгрузки L_σ по оси z зависит от размеров трещины $2a$ и габаритных размеров полосы $2L_z \times 2L_x$, что видно из данных на рис. 4. Таких примеров взаимодействия параллельных дефектов-трещин применительно к сварным соединениям в практике диагностики можно найти достаточно много. Например, крестовое соединение из элементов достаточно большой толщины t , сваренных угловыми швами с катетом S при неполном проплавлении, образующем два протяженных (вдоль сварного шва) дефекта несплошности материала (трещины) размером $2a$ (рис. 5). Это соединение достаточно хорошо исследовано и при растяжении (рис. 5, а) и при изгибе (рис. 5, б) [4], что позволяет использовать данные относительно $K_{\theta_{\max}}$ как при

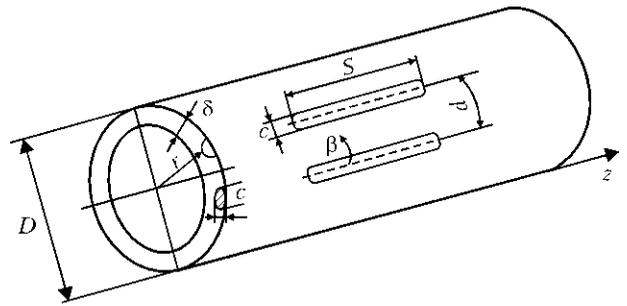


Рис. 6. Схема цилиндрической оболочки-трубы с продольными канавочными дефектами утонения

оценке хрупкой прочности, так и при оценке роста величины $2a$ при циклических нагрузках [3]. На рис. 5 параметр $\epsilon = l/t_2$, где $l = S$ — катет углового шва; t_2 — толщина неразрезного элемента — расстояние между параллельными дефектами, при прочих равных условиях демонстрирует влияние t_2 на величину $K_{\theta_{\max}}$, т. е. взаимодействие дефектов.

Отметим, что эффект параллельности дефектов в соответствующем поле номинальных нап-

Таблица 2. Результаты расчета вероятности отказа p по (2) для канавочных дефектов утонения (рис. 6) при различных расстояниях между дефектами d и давлениях P

№ варианта	Давление P , МПа	Один дефект	Два дефекта		
			$d = 90$ мм	$d = 60$ мм	$d = 48$ мм
1	7	0,00075	0	0	0
2	8	0,0068	0,0013	0,0010	0,0010
3	9	0,0500	0,0072	0,0057	0,0049
4	10	0,1600	0,0290	0,0268	0,0200



ряжений проявляется не только для трещинообразных дефектов, но и для дефектов утонения. Например, в цилиндрической оболочке-трубе два канавочных дефекта утонения вдоль образующей трубы при параллельности их расположения (рис. 6), взаимодействуя друг с другом, в случае внутритрубного давления P снижают критическое давление в трубе в зависимости от расстояния между дефектами d . Ниже приведены результаты численных расчетов с использованием методики работы [5]. Дефекты с габаритными размерами $s \times c \times a$ (a — максимальная глубина дефекта) моделируются полуэллипсоидом на поверхности трубы, т. е. поверхность дефекта описывается в системе координат r, β, z уравнением

$$\left(\frac{2z}{s}\right)^2 + \left(\frac{2\beta r}{c}\right)^2 + \left(\frac{R-r}{a}\right)^2 = 1 \quad (2R = D). \quad (1)$$

При внутреннем давлении максимальные окружные напряжения $\sigma_{\beta\beta}$ возникают в средних плоскостях $\beta = 0$ и $\beta = d/R$. Вероятность разрушения в этих плоскостях площадью F согласно [5] определяется зависимостью Вейбулла

$$p = 1 - \exp \left[- \int_F \left(\frac{\sigma_{\beta\beta}(0, r, z) - A}{B} \right)^4 dF \right] \quad (2)$$

при $\sigma_{\beta\beta}(0, r, z) > A$,

где A, B — параметры распределения Вейбулла, определяемые для данного материала экспериментально. Если использовать экспериментальные данные из [2], то можно принять для стальной трубы $A = (\sigma_T + \sigma_B)/2$, соответственно для одиночного дефекта в трубе $D = 1420$ мм, $\delta = 28$ мм, $A = 500$ МПа, $\sigma_T = 440$ МПа.

Соответствующий расчет напряженно-деформированного состояния для указанных исходных данных показывает, что при $P = 9$ МПа в случае одиночного дефекта при $s = 66$ мм, $c = 40$ мм, $a = 14$ мм $p \approx 0,05$ по [2], что соответствует $B = 470$ МПа. С учетом такого значения B были рассчитаны по (2) значения p , приведенные в табл. 2 при различных d и P .

It is noted that force interaction of group discontinuity defects of material in welded structures is not necessarily reduced to the concept, according to which the adjacent defect impairs the service load resistance or does not affect it at a sufficiently large distance between them. A variant is considered, when interaction of group defects of the type of cracks or wall thinning defects, improves resistance to service loading.

Выводы

1. Взаимодействие дефектов при силовом нагружении сварных конструкций в значительной степени зависит от геометрии дефектов и их положения относительно направления действия силовой нагрузки.

2. Наиболее исследовано взаимодействие дефектов несплошности материала типа трещин и утонений, лежащих в одном нагруженном сечении изделия, так называемых коллинеарных дефектов. Имеются соответствующие схемы объединения таких дефектов в зависимости от габаритных размеров дефектов и расстояний между ними.

3. В отличие от коллинеарных дефектов параллельные дефекты типа трещин и канавочных утонений, расположенные в различных, но параллельных сечениях изделия, обычно разгружают друг друга, поэтому менее опасны при сближении по сравнению с аналогичными коллинеарными дефектами.

4. В настоящее время, благодаря развитию информационных технологий и средств вычислительной техники, имеется возможность оценить взаимодействие обнаруженных дефектов в сварных конструкциях на основе соответствующих решений механики деформирования для упруго-пластических сплошных сред с трещинами либо дефектами утонения.

1. *MP-125-01-90*. Расчет коэффициентов интенсивности напряжений и коэффициентов ослабления сечений для дефектов в сварных соединениях. — Киев, 1990. — 55 с.
2. *Fitness-for-service*. American Petroleum Institute. Recommended Practice 579. — 2000. — 625 p.
3. *Махненко В. И.* Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. — Киев: Наук. думка, 2006. — 618 с.
4. *Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений* / Под ред. Ю. Муракави. — М.: Мир, 1999. — Т. 1, 2. — 1013 с.
5. *Совершенствование метода оценки риска разрушения в зоне утонений стенки магистральных трубопроводов* / В. И. Махненко, Е. А. Великоиваненко, Г. Ф. Розынка, Н. И. Пивторак // Автомат. сварка. — 2010. — № 5. — С. 16–21.

Поступила в редакцию 02.03.2012