

Инженерный метод исследования напряжённого состояния в зонах концентрации сварных соединений с симметричным усилением

А.В. Молтасов • П.Н. Ткач • С.И. Мотрунич

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев, Украина

Received: 2017 / Accepted: 2017

Аннотация. Целью настоящей работы является разработка аналитического метода оценки напряжённого состояния в зонах концентрации напряжений, обусловленной геометрической неоднородностью сварных соединений с двусторонним симметричным усилением, при растяжении и изгибе, а также обоснование математических формул для определения коэффициента концентрации напряжений (ККН) с более широкой областью достоверности, чем у имеющихся на сегодняшний день формул. На базе гипотезы ломаных сечений установлены условия равновесия действующих в сечении напряжений с внешними силовыми факторами, что позволило при помощи математических выражений описать напряжённое состояние в зонах концентрации, как по контуру зоны перехода шва на основной металл, так и по глубине сварного соединения. Посредством анализа установленных выражений получены формулы для определения коэффициентов концентрации напряжений при растяжении и изгибе. Для стыковых сварных соединений с относительным радиусом перехода шва на основной металл от 0,4 до 2,6 произведён расчёт ККН по формулам разработанного метода, а также численный расчёт методом конечных элементов. В результате установлено, что максимальное отклонение результатов расчётов при растяжении составило 1,10 %, а при изгибе – 0,91 %, что говорит о высокой точности предложенных формул на всём исследованном интервале.

Ключевые слова: сварное соединение, симметричное усиление, напряжённое состояние, концентрация напряжений, радиус перехода шва на основной металл, область достоверности, гипотеза ломаных сечений

Введение

Согласно ГОСТ 8713-79 двустороннее симметричное усиление имеют стыковые соединения типов С7, С25, С26, С29 и С38, а также соединения, выполненные контактной стыковой сваркой (КСС), и крестообразные сварные соединения (рис. 1).

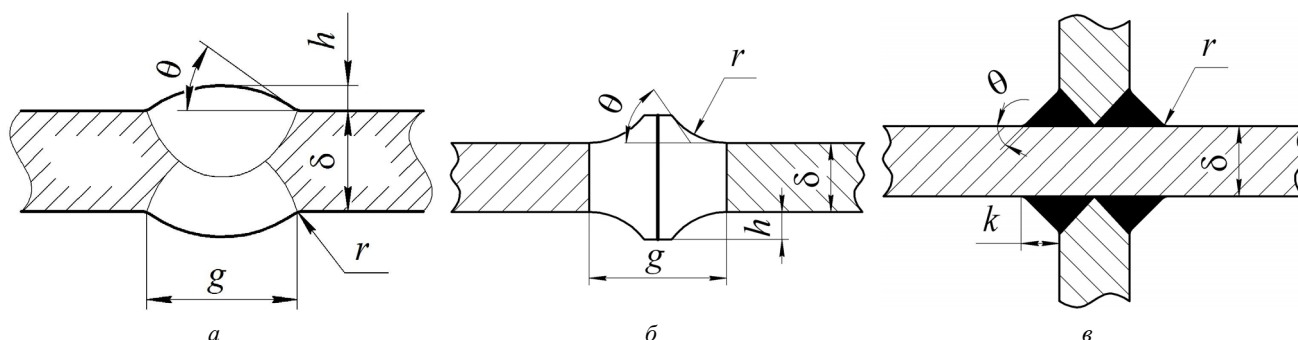


Рис. 1. Сварные соединения с двусторонним симметричным усилением а – стыковое соединение, выполненное сваркой плавлением, б – стыковое соединение, выполненное КСС оплавлением, в – крестообразное соединение

Для определения коэффициентов концентрации напряжений (ККН) в стыковых сварных соединениях с симметричным усилением принято использовать формулу Стаканова-Костылева-Рыбина (Стаканова) [1], а – в крестообразных соединениях формулы, приведенные в работах [2, 3]. Каждая из этих формул имеет свою область применимости в зависимости от относительных размеров усиления сварного шва. Так формулу Стаканова рекомендуется использовать для соединений с отношением радиуса перехода шва на основной

металл r к толщине свариваемых пластин δ от 0,01 до 0,6, а для крестообразных соединений наибольший рекомендательный интервал изменения этого соотношения – от 0,003 до 0,6 – имеют формулы работы [3].

Проблема состоит в том, что далеко не все соединения соответствуют областям достоверности упомянутых формул. Например, для стыкового соединения типа С7 согласно ГОСТ 8713-79 при толщине свариваемых пластин $\delta = 2..3$ мм ширина усиления g составляет 10 мм, а его высота h может изменяться в пределах 0,5..2,5 мм, соответственно отношение h/g изменяется в пределах 0,05..0,25. Согласно графику, приведенному в работе [4], такое изменение отношения h/g соответствует изменению радиуса перехода шва на основной металл r с 5,2 мм до 1,2 мм. Таким образом, отношение r/δ для данного соединения изменяется в пределах 0,4..2,6, что практически не совпадает с областью достоверности формулы Стаканова.

Большая величина относительного радиуса перехода шва на основной металл r/δ характерна не только для тонколистовых соединений, но и для соединений пластин и стержней большей толщины, выполненных КСС, которая обеспечивает на порядок больший радиус перехода шва на основной металл, чем все виды сварки плавлением [5].

Кроме того, радиус галтели усиления может быть значительно увеличен путём послесварочных обработок зоны перехода шва на основной металл, например, путём высокочастотной механической проковки (ВМП) стандартными бойками диаметром 2, 3 и 5 мм [6, 7]. Так в работе [8] было показано, что обработка сварного соединения алюминиевого сплава Д16Т толщиной $\delta = 2$ мм бойками диаметром 3 мм приводит к увеличению радиуса галтели усиления r с 0,3 до 3,2 мм, т.е. относительный радиус r/δ увеличивается с 0,15 до 1,6. Таким образом, формула Стаканова уже не может быть использована для расчёта ККН в обработанном ВМП соединении, поэтому исследования напряжённого состояния сварных соединений с симметричным усилением и относительным радиусом $r/\delta > 0,6$ на сегодняшний день остаются актуальными.

Цель

Целью настоящей работы является разработка аналитического метода оценки напряжённого состояния в зонах концентрации напряжений, обусловленной геометрической неоднородностью сварных соединений с двусторонним симметричным усилением, при растяжении и изгибе. На основе разработанного метода необходимо установить математические выражения, описывающие изменение первого главного напряжения в зоне концентрации, как по контуру зоны перехода шва на основной металл, так и по глубине сварного соединения. Посредством анализа установленных выражений, описывающих напряжённое состояние в зонах концентрации, получить формулы для определения ККН в точках контура зоны перехода шва на основной металл. Обосновать область достоверности полученных формул путём сравнения результатов расчёта величины ККН по этим формулам для сварных соединений с различными относительными размерами усиления и результатов численного расчёта соответствующей величины при помощи пакетов компьютерных программ, реализующих метод конечных элементов (МКЭ).

Исследование

Через точку A , находящуюся на контуре галтели усиления, проведём ломаное сечение $ABCD$, при этом, согласно гипотезе ломаных сечений [9], участки AB и CD проводятся нормально к контуру на глубину a_0 , а участок BC – перпендикулярно действующей растягивающей нагрузке p (рис. 2).

Параметр ломаного сечения a_0 характеризует глубину действия концентратора и для галтели согласно [10] определяется по формуле

$$a_0 = 2\sqrt{r \cdot t}, \quad (1)$$

где t – высота галтели усиления, которая согласно [11] связана с радиусом галтели r и фланговым углом θ соотношением

$$t = r \cdot (1 - \cos \theta). \quad (2)$$

Через точку A_1 , следуя тому же правилу, проведём ломаное сечение $A_1B_1C_1D_1$ таким образом, что продолжения отрезков AB и A_1B_1 образуют бесконечно малый угол $\Delta\alpha$.

Предположим, что вследствие деформации сечение $A_1B_1C_1D_1$ осталось неподвижным, а сечение $ABCD$ заняло положение, указанное пунктиром (рис. 2), при этом волокно KF , находящееся на расстоянии u от центра инерции сечения, получит удлинение KN , в результате чего в нём возникнет нормальное напряжение растяжения

$$\sigma_u^T = \frac{KN \cdot E}{(r + a_1 - u) \cdot \Delta\alpha}. \quad (3)$$

так как согласно построениям (рис. 2)

$$KF = (r + a_1 - u) \cdot \tan \Delta\alpha,$$

а для бесконечно малых углов справедливо равенство $\tan \Delta\alpha \approx \Delta\alpha$.

Геометрическая характеристика ломаного сечения a_1 согласно [12] определяется зависимостью

$$a_1 = \frac{\delta + 2r(1 - \cos \alpha)}{2 \cos \alpha} \quad (4)$$

В тоже время волокно QS , находящееся на расстоянии v от центра инерции сечения, получит удлинение ST , в результате чего в нём возникнет нормальное напряжение растяжения

$$\sigma_v^T = \frac{ST}{QS} = \frac{KN \cdot \cos \alpha \cdot E}{(r + a_0) \cdot \cos \alpha \cdot \tan \Delta \alpha} = \frac{KN \cdot E}{(r + a_0) \cdot \Delta \alpha} \quad (5)$$

Условие равновесия для соединения единичной толщины имеет вид

$$p \cdot \delta = 2 \int_{a_1 - a_0}^{a_1} \sigma_u^T du \cdot \cos \alpha + 2 \int_0^{y_B} \sigma_v^T dv, \quad (6)$$

где в соответствии с [13]

$$y_B = \frac{\delta}{2} + r \cdot (1 - \cos \alpha) - a_0 \cdot \cos \alpha \quad (7)$$

Подставляя выражения для напряжений (3) и (5) в условие равновесия (6), после интегрирования получим

$$\frac{p \cdot \delta}{2T_0} = \frac{KN \cdot E}{\Delta \alpha} \quad (8)$$

где T_0 – геометрическая характеристика ломаного сечения при растяжении, которая изменяется от сечения к сечению по закону

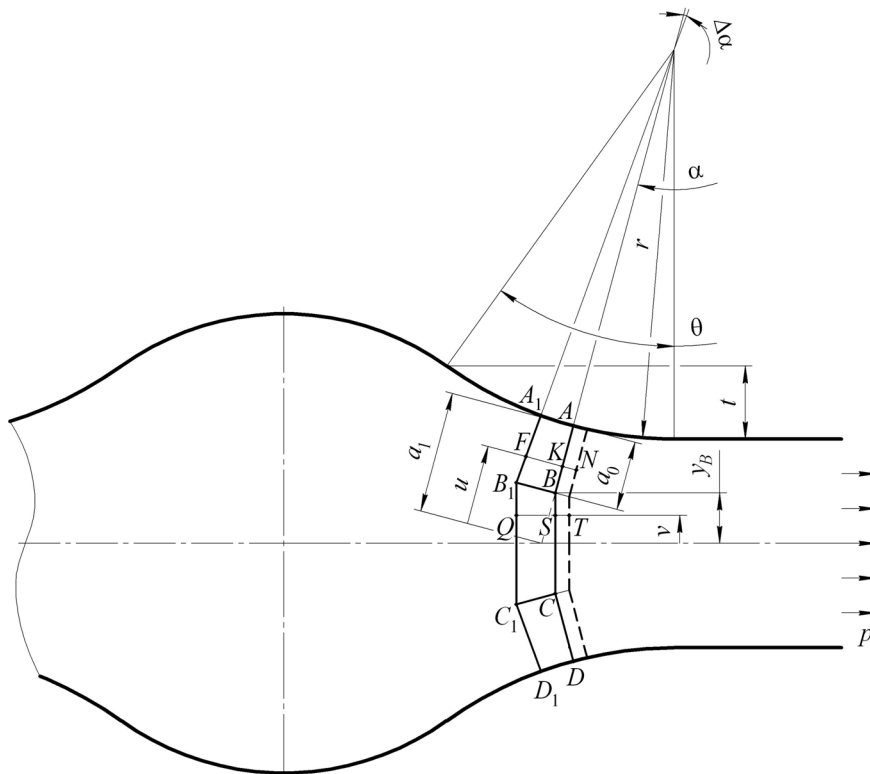


Рис. 2. Построение ломаных сечений в зоне концентрации напряжений стыкового сварного соединения

$$T_0 = \cos \alpha \cdot \ln \frac{r + a_0}{r} + \frac{y_B}{r + a_0} \quad (9)$$

Подставив тождество (8) в выражения (3) и (5), установим связь между растягивающей нагрузкой p и напряжениями на участках AB и CD

$$\sigma_u^T = \frac{p \cdot \delta}{2T_0 \cdot (r + a_1 - u)}, \quad (10)$$

и на участке BC

$$\sigma_v^T = \frac{p \cdot \delta}{2T_0 \cdot (r + a_0)}, \quad (11)$$

соответственно.

Из анализа выражений (10) и (11) следует, что на участке BC напряжение постоянно по толщине и изменяется только от сечения к сечению, а на участках AB и CD напряжение достигает максимума на поверхности галтели усиления в точках A и D , тогда ККН в точках контура при растяжении определяется выражением

$$\alpha_{\sigma}^T = \frac{\sigma_u^T|_{u=a_1}}{p} = \frac{\delta}{2r \cdot T_0}. \quad (12)$$

В работе [12] было доказано, что ККН принимает своё максимальное значение у подножия выступа

$$\alpha_{\sigma}^T|_{\alpha=0} = \frac{\delta}{2r \cdot \left(\ln \frac{r+a_0}{r} + \frac{\delta-2a_0}{2(r+a_0)} \right)}. \quad (13)$$

Полученные формулы справедливы для случая $a_0 \leq a_1$, что соответствует интервалу изменения α от α_t до θ , причём α_t согласно [12] определяется по формуле

$$\alpha_t = \arccos \frac{\delta + 2r}{2(r+a_0)}. \quad (14)$$

Если же α изменяется в интервале от 0 до α_t , то в формулах (5) и (6) постоянный параметр a_0 следует заменить переменной a_1 , тогда, подставляя (4) в (7), установим, что y_B обращается в нуль и при определении ККН в формуле (12) параметр T_0 следует заменить параметром

$$T_1 = \cos \alpha \cdot \ln \frac{r+a_1}{r}, \quad (15)$$

тогда ККН определяться выражением

$$\alpha_{\sigma}^T = \frac{\delta}{2r \cdot \ln \frac{\delta+2r}{2r \cdot \cos \alpha}}, \quad (16)$$

а его значение у подножия выступа можно рассчитать по формуле

$$\alpha_{\sigma}^T|_{\alpha=0} = \frac{\delta}{2r \cdot \ln \frac{\delta+2r}{2r}}. \quad (17)$$

Предположим, что вследствие изгиба сечение $A_1B_1C_1D_1$ осталось неподвижным, а сечение $ABCD$ повернулось на малый угол $\Delta\gamma$ и заняло положение, указанное пунктиром (рис. 3), при этом волокно KF , находящееся на расстоянии u от центра инерции сечения, получит удлинение KN , в результате чего в нём возникнет нормальное напряжение

$$\sigma_u^B = \frac{\left(\frac{y_B}{\cos \alpha} + u - a_1 + a_0 \right) \Delta\gamma \cdot E}{(r+a_1-u) \cdot \Delta\alpha}, \quad (18)$$

так как согласно построениям (рис. 3)

$$KN = \frac{y_B}{\cos \alpha} \tan \Delta\gamma + (u - a_1 + a_0) \cdot \tan \Delta\gamma.$$

В тоже время волокно QS , находящееся на расстоянии v от центра инерции сечения, получит удлинение ST , в результате чего в нём возникнет нормальное напряжение

$$\sigma_v^B = \frac{v \cdot \Delta\gamma \cdot E}{(r+a_0) \cdot \Delta\alpha \cdot \cos \alpha}. \quad (19)$$

Условие равновесия при изгибе соединения единичной толщины имеет вид

$$M = 2 \int_{a_1-a_0}^{a_1} \sigma_u^B \cdot \left(\frac{y_B}{\cos \alpha} + u - a_1 + a_0 \right) du + 2 \int_0^{y_B} \sigma_v^B \cdot v dv. \quad (20)$$

Подставляя выражения для напряжений (18) и (19) в условие равновесия (20), после интегрирования получим

$$\frac{M}{2B_0} = \frac{\Delta\gamma \cdot E}{\Delta\alpha}, \quad (21)$$

где B_0 – геометрическая характеристика ломаного сечения при изгибе, которая изменяется от сечения к сечению по закону

$$\begin{aligned}
 B_0 = & \frac{(y_B - (a_1 - a_0) \cos \alpha)^2}{\cos^2 \alpha} \cdot \ln \frac{r + a_0}{r} + (r + a_1)^2 \ln \frac{r + a_0}{r} - a_0 (r + 2a_1) + \\
 & + \frac{a_0^2}{2} + \frac{2(y_B - (a_1 - a_0) \cos \alpha)}{\cos \alpha} \cdot \left[(r + a_1) \ln \frac{r + a_0}{r} - a_0 \right] + \frac{y_B^3}{3(r + a_0) \cos \alpha}.
 \end{aligned} \quad (22)$$

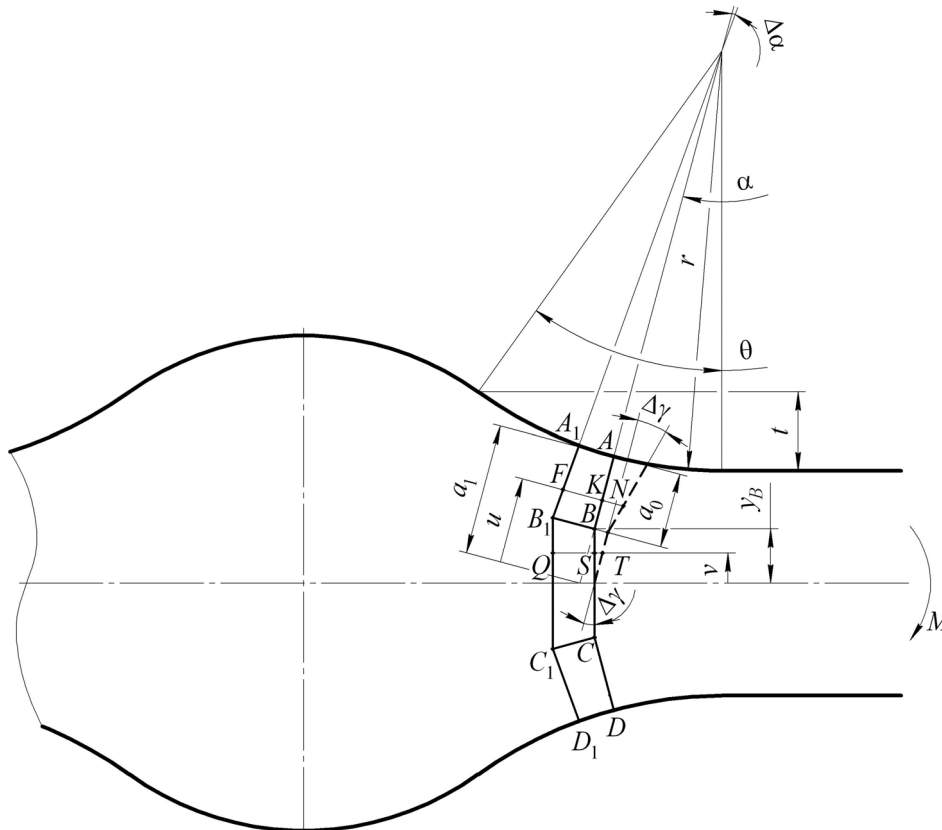


Рис. 3. Поворот ломаного сечения в области растяжения при изгибе стыкового сварного соединения

Подставив тождество (21) в выражения (18) и (19), установим связь между изгибающим моментом M , действующим на единицу толщины, и напряжениями на участках AB и CD

$$\sigma_u^B = \frac{M \left(\frac{y_B}{\cos \alpha} + u - a_1 + a_0 \right)}{2(r + a_1 - u) \cdot B_0}, \quad (23)$$

и BC

$$\sigma_v^B = \frac{M \cdot v}{2(r + a_0) \cdot B_0 \cdot \cos \alpha}, \quad (24)$$

соответственно.

Наибольшее растягивающее напряжение действует в точке A , лежащей на контуре соединения, и определяется при помощи подстановки $u = a_1$ в выражении (23)

$$\sigma_u^B \Big|_{u=a_1} = \frac{M \left(\frac{y_B}{\cos \alpha} + a_0 \right)}{2r \cdot B_0}. \quad (25)$$

Поскольку из сопротивления материалов известно, что номинальное напряжение, действующее на контуре сварного соединения вне зоны концентрации, при изгибе определяется по формуле

$$\sigma_{nom}^B = \frac{6M}{\delta^2}, \quad (26)$$

то ККН при изгибе определяется выражением

$$\alpha_{\sigma}^B = \frac{\sigma_u^B|_{u=a_1}}{\sigma_{nom}^B} = \frac{\delta^2 (y_B + a_0 \cdot \cos \alpha)}{12r \cdot B_0 \cdot \cos \alpha}. \quad (27)$$

Исследования [12] показали, что при изгибе максимальное напряжение, как и при растяжении, действует у подножия выступа. Значение ККН в этой точке можно рассчитать по формуле

$$\alpha_{\sigma}^B|_{\alpha=0} = \frac{\delta^3}{24r \cdot \left[\left(r + \frac{\delta}{2} \right)^2 \cdot \ln \frac{r+a_0}{r} - a_0 \cdot (r+\delta) + \frac{a_0^2}{2} + \frac{(\delta-2a_0)^3}{24(r+a_0)} \right]}. \quad (28)$$

Для случая $a_0 > a_1$ в выражениях (18)-(20) следует положить $a_0 = a_1$, $y_B = 0$, тогда ККН на контуре соединения будет определяться зависимостью

$$\alpha_{\sigma}^B = \frac{\delta^2 \cdot a_1}{12r \cdot B_1}, \quad (29)$$

где геометрическая характеристика ломаных сечений при изгибе B_1 изменяется от сечения к сечению по закону

$$B_1 = (r + a_1)^2 \ln \frac{r+a_1}{r} - a_1 (r + 2a_1) + \frac{a_1^2}{2}. \quad (30)$$

Значение ККН у подножия выступа в этом случае можно рассчитать по формуле

$$\alpha_{\sigma}^B|_{\alpha=0} = \frac{\delta^3}{3r \cdot \left[2(2r+\delta)^2 \cdot \ln \frac{2r+\delta}{2r} - 4r \cdot \delta - 3\delta^2 \right]}. \quad (31)$$

На основе предложенного метода был произведён расчёт ККН для стыкового соединения типа С7 согласно ГОСТ 8713-79 с толщиной выпуклости $g = 10$ мм и различными значениями относительного радиуса r/δ при растяжении и изгибе (табл. 1).

Таблица 1

Результаты аналитического расчёта ККН в сварных соединениях при растяжении и изгибе

Радиус перехода (r), мм	Относительный радиус (r/δ)	Высота выпуклости (h), мм	Фланговый угол (θ), °	Глубина концентратора (a_0), мм	ККН при растяжении (α_{σ}^T)	ККН при изгибе (α_{σ}^B)
1,2	0,4	2,5	45,0*	1,30	1,536**	1,273**
1,5	0,5	2,1	40,0	1,45	1,442**	1,223**
1,2	0,6	2,5	45,0	1,30	1,375	1,188
1,6	0,8	2,0	38,6	1,50	1,287	1,145
2,0	1,0	1,55	31,8	1,55	1,233	1,117
2,4	1,2	1,22	26,0	1,53	1,196	1,099
2,8	1,4	1,0	21,8	1,50	1,170	1,085
3,2	1,6	0,91	20,0	1,57	1,149	1,075
3,6	1,8	0,79	17,5	1,55	1,133	1,067
4,0	2,0	0,72	16,1	1,58	1,120	1,060
4,4	2,2	0,62	14,0	1,51	1,110	1,055
4,8	2,4	0,58	13,0	1,54	1,101	1,051
5,2	2,6	0,5	11,3	1,45	1,093	1,047

* Величина флангового угла рассчитана по приближённой формуле работы [14];

** Значения ККН при растяжении и изгибе рассчитаны по формулам (13) и (28) соответственно, так как для этих соединений $a_0 < a_1$ при $\alpha = 0$, остальные значения ККН были рассчитаны по формулам (17) и (31) соответственно.

Для того чтобы установить области достоверности предложенных формул был произведён численный расчёт ККН при растяжении и изгибе с помощью компьютерных программ, реализующих метод конечных элементов (МКЭ) (рис. 4).

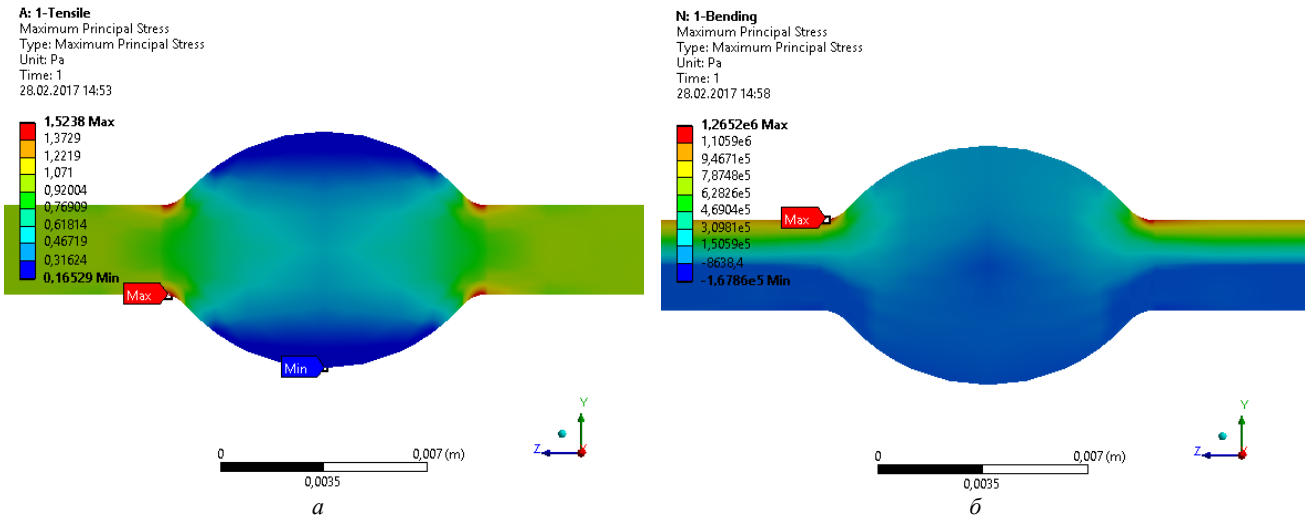


Рис. 4. Расчетные поля напряжений в стыковом сварном соединении ($\delta = 3$ мм, $r = 1,2$ мм, $h = 2,5$ мм, $g = 10$ мм) при растяжении (а) и изгибе (б)

В работе [15] было доказано, что данные расчётов МКЭ хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными методом фотоупругости, при дискретизации зоны перехода шва на основной металл сеткой конечных элементов со стороны $l = 0,1r$ (рис. 5).

При решении задачи для улучшения аппроксимации был выбран плоский восьми узловой сирендипов конечный элемент [16], так как в рамках работы [17] было установлено, что использование элементов более высокого порядка не приводит к значительному повышению точности решения даже при последующем сгущении сетки.

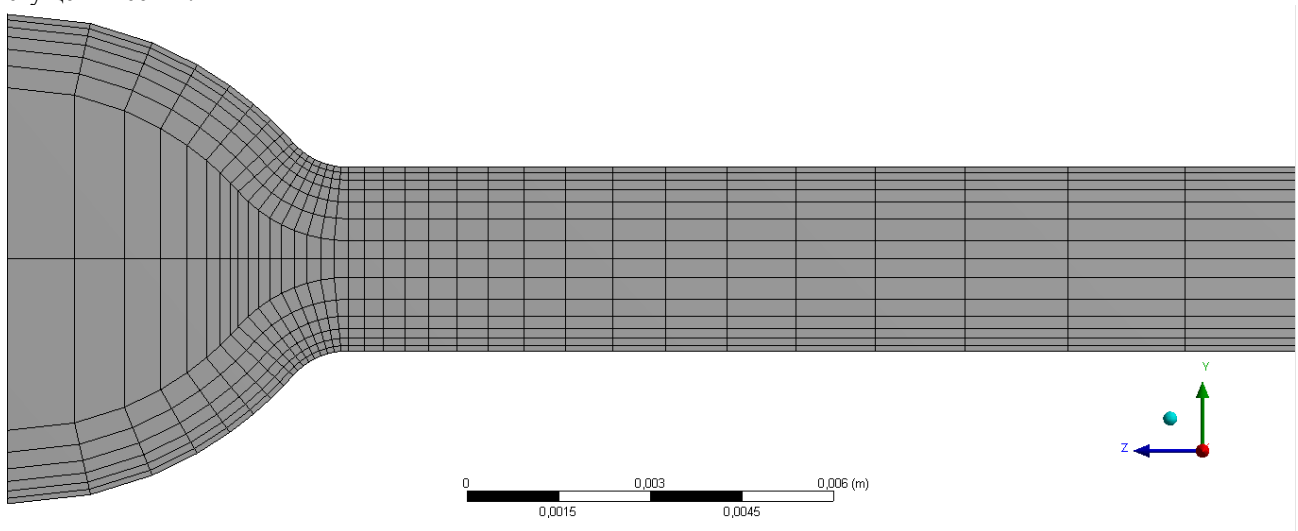


Рис. 5. Дискретизация модели стыкового сварного соединения сеткой конечных элементов

Сравнение результатов аналитического и численного расчётов показали, что максимальное отклонение ККН при растяжении составляет немногим более 1 %, а при изгибе – менее 1 % (табл. 2).

Таблица 2

Результаты аналитического и численного расчетов величины ККН и их сравнительный анализ

Относительный радиус (r/δ)	Теоретический ККН при растяжении	Численный ККН при растяжении	Отклонение при растяжении, %	Теоретический ККН при изгибе	Численный ККН при изгибе	Отклонение при изгибе, %
0,4	1,536	1,5238	+0,8	1,273	1,2652	+0,62
0,5	1,442	1,4403	+0,12	1,223	1,223	0
0,6	1,375	1,36	+1,1	1,188	1,1773	+0,91
0,8	1,287	1,2827	+0,34	1,145	1,1421	+0,25
1	1,233	1,2318	+0,1	1,117	1,118	-0,09

продолжение табл.2

1,2	1,196	1,1974	-0,12	1,099	1,101	-0,18
1,4	1,17	1,1703	-0,03	1,085	1,0893	-0,39
1,6	1,149	1,151	-0,17	1,075	1,0795	-0,42
1,8	1,133	1,1348	-0,16	1,067	1,0719	-0,46
2	1,12	1,1222	-0,2	1,06	1,0658	-0,54
2,2	1,11	1,1106	-0,05	1,055	1,0608	-0,55
2,4	1,101	1,1022	-0,11	1,051	1,0564	-0,51
2,6	1,093	1,0935	-0,05	1,047	1,0527	-0,54

Таким образом, разработанный в настоящей работе инженерный метод обеспечивает более чем достаточно точный результат, а область достоверности предложенных формул (13), (17), (28) и (31) распространяется на весь исследованный промежуток изменения относительного радиуса r/δ от 0,4 до 2,6.

Выводы

1. Разработан инженерный метод описания напряжённого состояния в зонах концентрации напряжений сварных соединений с двусторонним симметричным усилением, основанный на гипотезе ломаных сечений. Установлены аналитические выражения, описывающие изменение первого главного напряжения в исследуемых областях, как по контуру зоны перехода шва на основной металл, так и по глубине сварного соединения. Получены формулы для определения ККН при растяжении и изгибе.

2. Для стыковых сварных соединений с относительным радиусом перехода шва на основной металл от 0,4 до 2,6 произведён расчёт ККН разработанным аналитическим и численным методом. В результате установлено, что максимальное отклонение результатов расчётов при растяжении составило 1,10 %, а при изгибе – 0,91 %, поэтому область достоверности предложенных формул распространяется на весь исследованный интервал.

3. Верхняя граница области достоверности полученных формул значительно превышает соответствующую величину для ранее предложенных формул, что позволяет проводить точный расчёт ККН тонколистовых сварных соединений, а также соединений, выполненных КСС или обработанных ВМП.

Інженерний метод дослідження напруженого стану в зонах концентрації зварних з'єднань із симетричним підсиленням

А.В. Молтасов, П.М. Ткач, С.І. Мотруніч

Анотація. Метою даної роботи є розробка аналітичного методу оцінки напруженого стану в зонах концентрації напружень, зумовленої геометричною неоднорідністю зварних з'єднань з двостороннім симетричним підсиленням, при розтягуванні та згинанні, а також обґрунтування математичних формул для визначення коефіцієнта концентрації напружень (ККН) з більш широкою областю достовірності, ніж у наявних на сьогоднішній день формул. На базі гіпотези ламаних перерізів встановлені умови рівноваги діючих в перерізі напружень з зовнішніми силовими факторами, що дозволило за допомогою математичних залежностей описати напружений стан в зонах концентрації, як по контуру зони переходу шва на основний метал, так і по глибині зварного з'єднання. Шляхом аналізу встановлених залежностей отримані формули для визначення коефіцієнтів концентрації напружень при розтягуванні та згинанні. Для стыкових зварних з'єднань з відносним радіусом переходу шва на основний метал від 0,4 до 2,6 проведено розрахунок ККН за формулами розробленого методу, а також числовий розрахунок методом скінчених елементів. В результаті встановлено, що максимальне відхилення результатів розрахунків при розтягуванні становило 1,10 %, а при згинанні – 0,91 %, що говорить про високу точність запропонованих формул на всьому дослідженому інтервалі.

Ключові слова: зварне з'єднання; симетричне підсилення; напружений стан; концентрація напружень; радіус переходу шва на основний метал; область достовірності; гіпотеза ламаних перерізів

Engineering method for research of stress state in concentration areas of welded joints with symmetrical reinforcement

A. Moltasov, P Tkach., S.Motrunich

Abstract. Subject, theme, aim. The subject of research in this work is the stress distribution in stress concentration areas of welded joints with double-sided symmetrical reinforcement. The topic of this work is related to development of engineering method of describing the stress state in the transition areas of weld to the base metal of butt and cruciform welded joints. The aim consists in

establishing of mathematical relationships that describe the change of the first principal stress on the contour of the investigated area, and in the depth of the welded joint at tension and bending.

Method or methodology. In order to establish the equilibrium conditions which exist in the section of stresses at external force factors in the development of research method of stress state was used the hypothesis of broken cross sections. Mathematical dependences which describe the stress distribution in the areas of concentration, and the formulas for determining of stress concentration factor was obtained by means of developed method, and the adequacy of these formulas was verified by numerical calculation by finite element method.

Results. Using the formulas which corresponding to the tenets of the proposed method for butt-welded joints with a relative transition radius from weld to the base metal between 0,4 and 2,6 the SCF was calculated. Comparative analysis of the obtained results with the results of numerical calculation by finite element method showed that the maximum deviation for tension was 1,10%, and for bending it was 0,91%.

Field of application of the results. The formulas which obtained in the result of research can be used for the calculation of stress concentration factor in the butt and cruciform welded joints with a high value of the relative transition radius from weld to the base metal.

Keywords: welded joint; symmetrical reinforcement; stress state; stress concentration; transition radius from weld to the base metal; reliability area; hypothesis of broken cross sections

References

1. Stakanov, V.I., Kostylev, V.I. and Rybin, Ju.I. (1987), "About the calculation of stress concentration factor in butt welded joints", *Avtomaticheskaja svarka*, no. 11, pp. 19–23.
2. Mahnenko, V.I. and Mosenkis, R.Ju. (1985), "Calculation of stress concentration factors in welded joints with butt and fillet welds", *Avtomaticheskaja svarka*, no. 8, pp. 7–18.
3. Karhin, V.A., Kostylev, V.I. and Stakanov, V.I. (1988), "Influence of geometric parameters of the butt, tee and cruciform joints on stress concentration factor", *Avtomaticheskaja svarka*, no. 3, pp. 6–11.
4. Bel'chuk, G.A. (1964), *Priblizhennyj raschjot geometricheskoj formy i koeficienta koncentracii naprjazhenij svarnyh stykovykh soedinenij po rezhimu svarki* [An approximate calculation of the geometrical shape and the stress concentration factor of welded joints according to welding mode], LDNTP, Leningrad, Russia.
5. Trufjakov, V.I., Dvoreckij, V.I., Miheev, P.P. and dr. (1990), "Prochnost' svarnyh soedinenij pri peremennyh nagruzkah" [*The strength of welded joints under variable loads*], in Trufjakov, V.I. (ed.), Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
6. Lobanov, L.M., Kyr"yan, V.I., Knysh, V.V. (2006), "Resource improving of welded metal structures by high-frequency mechanical forging", *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv*, no. 1, p. 56–61.
7. Knysh, V.V., Klochkov, I.N., Pashulja, M.P. and Motrunich, S.I. (2014), "Increasing of fatigue resistance of thin sheet aluminum alloy welded joints by high-frequency forging", *Avtomaticheskaja svarka*, no. 5, p. 22–29.
8. Klochkov, I.N. (2013), Increasing of durability of thin sheet aluminum alloy welded joints by high-frequency forging: dissertation [Povyshenie dolgovechnosti tonkolistovykh svarnyh soedinenij aljuminievych splavov vysokochastotnoj prokovkoj: dis. kand. tehn. nauk], Kiev, Ukraine.
9. Verhovskij, A.V. (1947), "The hypothesis of broken cross sections and its application to the calculation of bars with complex configuration", *Izvestija TPI*, no. 1 (61), p. 3–46.
10. Verhovskij, A.V., Andronov, V.P., Ionov, V.A. and dr. (1958), *Opreделение naprjazhenij v opasnykh sechenijah detalej slozhnoj formy. Metod neploskih sechenij* [Determination of the stresses in the dangerous sections of elements with complex shapes. The method of non-planar cross sections], Mashgiz, Moscow, Russia.
11. Moltasov, A.V., Tkach, P.N., Gogolev, A.Ja. and dr. (2016), Static strength evaluation of welded disk of rotor exhauster *Avtomaticheskaja svarka*, no. 12, pp. 46–53.
12. Moltasov, A.V. (2015), *Razrabotka metodov raschjota silovykh parametrov kontaktnoj stykovej svarki kol'cevych izdelij: dis. kand. tehn. Nauk* [Development of methods for the calculation of power parameters for flash butt welding of ring products: dissertation], Kiev, Ukraine.
13. Moltasov, A.V. (2013), "Application of the non-planar cross sections to stress definition in the areas of concentration caused by the reinforcement of butt weld", *Problemy prochnosti*, no.1, pp. 159–167.
14. Bel'chuk, G.A. (1969), *Svarnye soedinenija v korpusnykh konstrukcijah* [Welded joints in hull constructions], Sudostroenie, Leningrad, Russia.
15. Rybin, Ju.I., Stakanov, V.I., Kostylev, V.I. and dr. (1982), Investigation the influence of geometrical parameters of T-joints and cruciform welded joints on stress concentration by finite element method, *Avtomaticheskaja svarka*, no. 5, pp. 16–20.
16. Rudakov, K.M. (2007), *Numerical analysis methods in dynamics and strength of structures: Textbook* [Chysel'ni metody analizu v dynamitsi ta mitsnosti konstruktsij: Navch. Posibnyk], NTUU "KPI", Kyiv, Ukraine.
17. Moltasov, A.V., Klochkov, I.N., Knysh, V.V. (2013), Engineering method of calculation of tensile and bending stress concentration factor in the lap-welded joint, *Journal of Mechanical engineering of the National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»*, no. 3, pp. 150–157.