

# РАСЧЕТ РАДИУСА ПЕРЕХОДА ШВА К ОСНОВНОМУ МЕТАЛЛУ СТЫКОВОГО СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ПО НОРМИРУЕМЫМ ПАРАМЕТРАМ

А. В. МОЛТАСОВ

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Целью настоящей работы являлось установление математических зависимостей между геометрическими параметрами сварного валика, учитываемое при расчете коэффициента концентрации напряжений в стыковых сварных соединениях, и стандартными параметрами высоты и ширины усиления шва. Было предложено описывать галтели и выпуклую часть усиления стыкового сварного соединения в виде дуг соприкасающихся окружностей, что позволило установить функциональную связь флангового угла и отношения высоты к ширине усиления. При помощи этой связи определены значения отношения высоты к ширине усиления и соответствующие им величины радиуса перехода шва к основному металлу на основании известных зависимостей этого радиуса от флангового угла для различных видов сварки плавлением. Путем построения регрессионных зависимостей с использованием системы автоматизированного проектирования MathCAD были получены математические формулы для определения радиуса перехода шва к основному металлу через отношение высоты к ширине усиления шва стыкового соединения, выполненного сваркой под флюсом и в среде защитных газов. Библиогр. 13, табл. 3, рис. 3.

*Ключевые слова:* стыковое сварное соединение, концентрация напряжений, геометрия шва, радиус перехода шва на основной металл, фланговый угол, нормируемые параметры, приближенный расчет

Концентрация напряжений, обусловленная геометрической неоднородностью сварных соединений, является одним из основных факторов, определяющих их сопротивление усталости [1]. Для количественной оценки этого явления принято использовать коэффициент концентрации напряжений (ККН), который зависит преимущественно от таких параметров геометрии сварного соединения как радиус перехода шва на основной металл  $r$  и фланговый угол  $\theta$  [2], однако стандартами на сварные соединения (ГОСТ 14771–76, ГОСТ 8713–79, ГОСТ 14806–80 и ГОСТ 5264–80) эти параметры не регламентируются. Поэтому установление связи радиуса перехода и флангового угла с нормируемыми параметрами высоты  $h$  и ширины  $g$  усиления остается на сегодня актуальной проблемой в области практических расчетов на прочность, надежность и долговечность сварных соединений и элементов конструкций.

Величина радиуса перехода шва на основной металл зависит от многих факторов, в частности, от режима сварки и теплофизических свойств соединяемого металла, поверхностного натяжения металла шва и чистоты поверхности соединяемых элементов [3].

В общем виде эта зависимость представлена в работе [4] таким образом:

$$r = f_1\left(\frac{h}{g}\right) + f_2(T_0) + f_3(\sigma) + f_4(R_z), \quad (1)$$

где  $f_1...f_4$  — члены, учитывающие соответственно размеры усиления, начальную температуру свариваемых пластин, поверхностное натяжение металла шва и шероховатость поверхности соединяемых элементов.

В работе [4] было доказано, что начальная температура и чистота поверхности оказывают сравнительно малое влияние на формирование шва, а поверхностное натяжение изменяется в узком интервале и его влиянием также можно пренебречь, поэтому члены  $f_2...f_4$  по сравнению с членом  $f_1$  являются величинами второго порядка малости. Следовательно, при прочих равных условиях основное значение имеет первый фактор, и в первом приближении радиус перехода зависит от высоты и ширины усиления, так как они определяют отношение  $h/g$ . Поэтому целью настоящей работы является нахождение этой зависимости в виде математической формулы.

Все параметры профиля выпуклости шва, обусловленные процессом сварки, взаимосвязаны между собой. Так, радиус перехода и фланговый угол связаны зависимостью вида [5]

$$r = f(1/\theta). \quad (2)$$

Существование такой зависимости подтверждается экспериментальными измерениями геометрии сварных соединений, выполненных различными видами сварки плавлением, в зонах перехода шва на основной металл (рис. 1) [6].

При этом фланговый угол можно однозначно определить через высоту и ширину усиления, если описать форму выпуклости параболой [7], дугой окружности [8] или другой более сложной

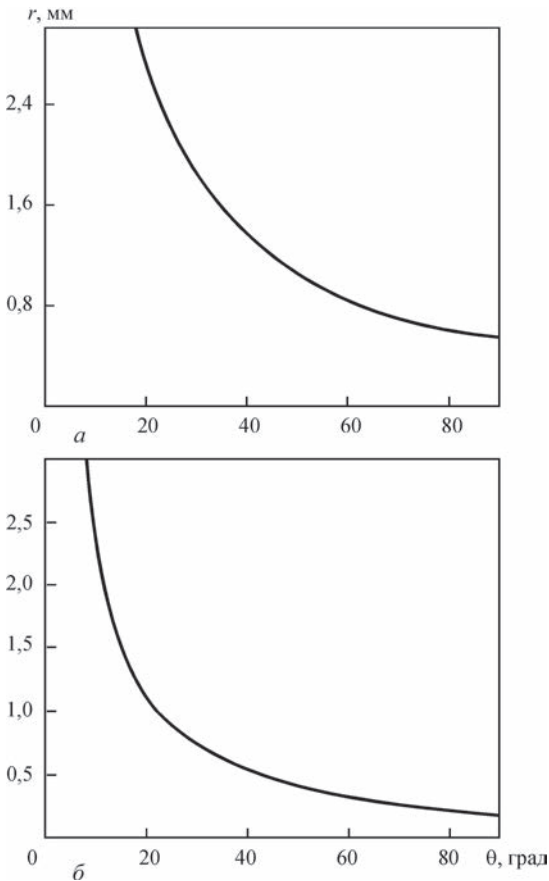


Рис. 1. Графики зависимости радиуса перехода шва к основному металлу от флангового угла для сварных соединений, выполненных сваркой под флюсом (а) и в среде защитных газов (б)

интегральной или дифференциальной зависимостью [9, 10].

В настоящей работе предлагается описывать форму усиления в виде дуг соприкасающихся окружностей (рис. 2), тогда фланговый угол будет определяться через отношение  $h/g$  зависимостью

$$\theta = 2 \arctan \frac{2h}{g}. \quad (3)$$

Выразив отношение  $h/g$  из формулы (3), можно определить его значения для различных величин флангового угла, а при помощи графиче-

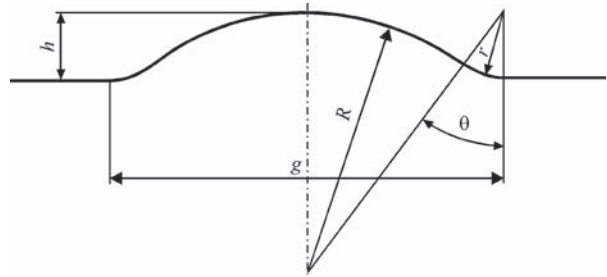


Рис. 2. Геометрические параметры идеализированной модели усиления на одной из сторон стыкового сварного соединения, выполненного сваркой плавлением

ков (рис. 1) величины радиусов перехода шва к основному металлу, соответствующие этим значениям (табл. 1).

На основании дискретных данных система автоматизированного проектирования MathCAD дает возможность построить регрессионную зависимость одной величины от другой в виде полинома  $n$ -ой степени, где  $n$  — положительное целое число [11]. Однако поскольку в рассматриваемом случае (табл. 1) отношение  $h/g$  принимает значения, отличающиеся друг от друга более чем на порядок, то зависимость радиуса перехода шва к основному металлу от этого параметра целесообразно искать в виде полинома с дробными степенями

$$r\left(\frac{h}{g}\right) = \sum_{i=0}^n a_i \left(\frac{h}{g}\right)^i, \quad (4)$$

где  $a_i$  — коэффициенты функции регрессии.

Путем последовательного увеличения количества членов аппроксимирующего ряда (4) установлено, что для случая сварки под флюсом отклонение экспериментальных результатов (табл. 1) от результатов расчета по формуле с удержанием первых пяти членов этого ряда

$$r\left(\frac{h}{g}\right) = 15 - 77,64 \left(\frac{h}{g}\right)^{\frac{1}{2}} + 166,7 \left(\frac{h}{g}\right) - 168,45 \left(\frac{h}{g}\right)^{\frac{3}{2}} + 66,6 \left(\frac{h}{g}\right)^2 \quad (5)$$

Таблица 1. Зависимость радиуса перехода шва к основному металлу при различных значениях флангового угла

Фланговый угол ( $\theta$ ), град	90	80	70	60	50	40	30	20	18	10	8
$h/g$	0,500	0,42	0,350	0,298	0,233	0,182	0,134	0,088	0,079	0,045	0,035
$(h/g)^{1/2}$	0,707	0,648	0,592	0,537	0,483	0,424	0,367	0,297	0,281	0,212	0,187
Радиус перехода $r$ , мм для вида сварки	Под флюсом	0,550	0,600	0,700	0,830	1,050	1,370	1,850	2,700	3,000	—
	В среде защитных газов	0,180	0,220	0,270	0,330	0,410	0,540	0,740	1,100	—	2,310

Таблица 2. Экспериментальные и расчетные значения радиуса перехода шва к основному металлу стыкового соединения, выполненного под флюсом

$h/g$	0,500	0,420	0,350	0,288	0,233	0,182	0,134	0,088	0,079
Измеренный радиус перехода, мм	0,550	0,600	0,700	0,830	1,050	1,370	1,850	2,700	3,000
Расчетный радиус перехода, мм	0,550	0,601	0,697	0,832	1,053	1,368	1,847	2,709	2,994
Отклонение, %	0,000	0,166	0,429	0,241	0,286	0,146	0,162	0,335	0,200

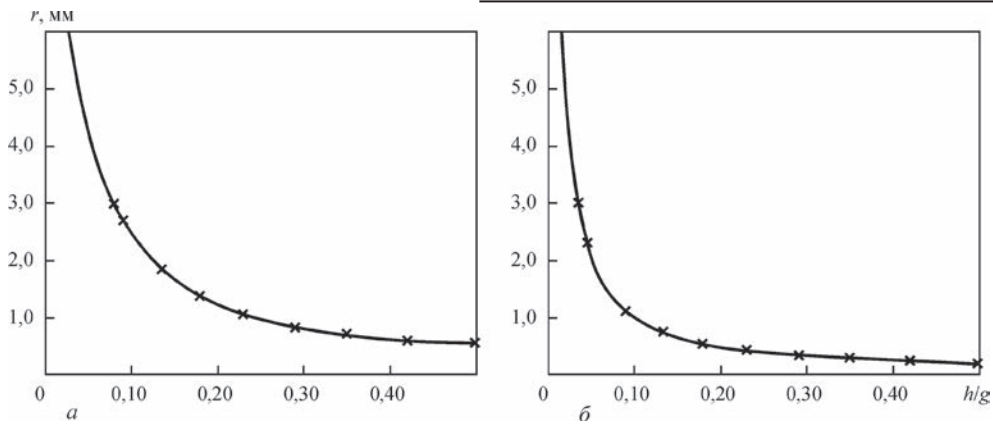


Рис. 3. График зависимости радиуса перехода шва к основному металлу от отношения высоты к ширине усиления и экспериментальные точки (×) для стыкового сварного соединения, выполненного сваркой под флюсом (а) и среде защитных газов (б)

Таблица 3. Экспериментальные и расчетные значения радиуса перехода шва к основному металлу стыкового соединения, выполненного в среде защитных газов

$h/g$	0,500	0,420	0,350	0,288	0,233	0,182	0,134	0,088	0,045	0,035
Измеренный радиус перехода, мм	0,180	0,220	0,270	0,330	0,410	0,540	0,740	1,100	2,310	3,000
Расчетный радиус перехода, мм	0,180	0,219	0,272	0,326	0,413	0,542	0,735	1,103	2,308	3,001
Отклонение, %	0,000	0,455	0,741	1,212	0,732	0,370	0,676	0,273	0,087	0,033

составляет не более 0,43 % (табл. 2).

Исследование функции (5) по известной методике [12] показало, что она строго монотонно убывает на промежутке изменения отношения  $h/g$  от 0 до 0,5 (рис. 3, а). Для случая сварки в среде защитных газов было установлено, что отклонение расчетных значений радиуса перехода по формуле

$$r\left(\frac{h}{g}\right) = 26,32 - 290,77\left(\frac{h}{g}\right)^{\frac{1}{2}} + 1413,6\left(\frac{h}{g}\right) - 3840,35\left(\frac{h}{g}\right)^{\frac{3}{2}} + 5808,56\left(\frac{h}{g}\right)^2 - 4655,42\left(\frac{h}{g}\right)^{\frac{5}{2}} + 1538,1\left(\frac{h}{g}\right)^3, \quad (6)$$

полученной удержанием первых семи членов ряда (4), от экспериментальных результатов (табл. 1) составляет не более 1,212 % (табл. 3). Исследование функции (6) показало, что она, как и функция (5), строго монотонно убывает на промежутке изменения отношения  $h/g$  от 0 до 0,5 (рис. 3, б).

Таким образом, при помощи формулы (3), а также формул (5) или (6) в зависимости от способа сварки, имея регламентируемые стандартами параметры высоты и ширины усиления, можно установить все геометрические характеристики, необходимые для определения величины ККН в стыковых сварных соединениях по известным расчетным зависимостям [13].

### Выводы

1. Предложена идеализированная модель формы усиления стыкового сварного шва, согласно кото-

рой кривая, образованная галтелями и выпуклой частью усиления, описывается дугами соприкасающихся окружностей. Использование предложенной модели позволяет однозначно определить фланговый угол как непрерывную функцию отношения высоты к ширине усиления.

2. Путем аппроксимации дискретных данных полиномами с дробными степенями при помощи системы автоматизированного проектирования MathCAD были получены математические формулы для определения радиуса перехода шва к основному металлу через отношение высоты к ширине усиления стыкового соединения, выполненного сваркой под флюсом и в среде защитных газов.

### Список литературы

- Труфяков В. И., Дворецкий В. И., Михеев П. П. и др. (1990) *Прочность сварных соединений при переменных нагрузках*. Киев, Наукова думка.
- Кныш В. В., Клочков И. Н., Пашуля М. П., Мотрунич С. И. (2014) Повышение сопротивления усталости тонколистовых сварных соединений алюминиевых сплавов высокочастотной проковкой. *Автоматическая сварка*, **5**, 22–29.
- Бельчук Г. А., Налетов В. С. (1972) О некоторых закономерностях формирования сварного шва в месте сопряжения шва с основным металлом. *Сварка в судостроении*, **79**, 32–35.
- Бельчук Г. А. (1969) *Сварные соединения в корпусных конструкциях*. Ленинград, Судостроение.
- Шонин В. А., Покляцкий А. Г. (2001) Малоцикловая усталость сварных стыковых соединений сплава АМг6, выполненных в среде инертного газа. *Автоматическая сварка*, **3**, 20–24.
- Березовский Б. М., Стихин В. А. (1981) Особенности формирования зоны перехода от усиления стыкового шва к основному металлу. *Вопросы сварочного производства*, **266**, 99–106.
- Бельчук Г. А. (1964) *Приближенный расчет геометрической формы и коэффициента концентрации напряже-*

ний сварных стыковых соединений по режиму сварки. Ленинград, ЛДНТП.

8. Kaufmann P. (1970) Ermüdungsverhalten von Stumpfnähten. *Schweißtechnik*, 20, 1, 38–41.
9. Пацкевич И. Р., Рябов В. Р., Деев Г. Ф. (1991) *Поверхностные явления при сварке металлов*. Киев, Наукова думка.
10. Панков В. В., Панков С. В., Богородский И. Г., Букин В. М. (2015) Мера формы сварного шва как основа разработки цифровых технологий оценки качества сварных швов. *Журнал нефтегазового строительства*, 2, 20–26.
11. Алексеев Е. Р., Чеснокова О. В. (2006) *Решение задач вычислительной математики в пакетах Mathcad 12, MATLAB 7, Maple 9*. Москва, ИТ Пресс.
12. Бугров Я. С., Никольский С. М. (2004) *Высшая математика: Уч. для вузов*. Москва, Дрофа, Т. 2. Дифференциальное и интегральное исчисление.
13. Махненко В. И., Мосенкис Р. Ю. (1985) Расчет коэффициентов концентрации напряжений в сварных соединениях со стыковыми и угловыми швами. *Автоматическая сварка*, 8, 7–18.

## References

1. Trufyakov V.I., Dvoretzky V.I., Mikheev P.P. (1990) *Strength of welded joints under alternating loads*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
2. Knysh V.V., Klochkov I.N., Pashulya M.P. et al. (2014) Increase of fatigue resistance of sheet welded joints of aluminum alloys using high-frequency peening. *The Paton Welding J.*, 5, 21–27.
3. Belchuk G.A., Naletov V.S. (1972) On some dependencies of weld formation in zone of weld-base metal junction. *Svarka v Sudostroenii*, 79, 32–35 [in Russian].
4. Belchuk G.A. (1969) *Welded joints in hull structures*. Leningrad, Sudostroenie [in Russian].
5. Shonin V.A., Poklyatsky A.G. (2001) Low-cycle fatigue of welded butt joints made from alloy AMg6 in inert atmosphere. *The Paton Welding J.*, 3, 18–22.
6. Berezovsky B.M., Stikhin V.A. (1981) Peculiarities of transition zone formation from butt weld reinforcement to base metal. *Voprosy Svarochn. Proizvodstva*, 266, 99–106 [in Russian].
7. Belchuk G.A. (1964) *Approximate calculation of geometric shape and stress concentration coefficient of welded butt joints on welding mode*. Leningrad, LDNTP [in Russian].
8. Kaufmann P. (1970) Ermuedungsverhalten von Stumpfnähten. *Schweisstechnik*, 20(1), 38–41.
9. Patskevich I.R., Ryabov V.R., Deev G.F. (1991) *Surface phenomena in welding of metals*. Kiev: Naukova Dumka [in Russian].
10. Pankov V.V., Pankov S.V., Bogorodsky I.G. et al. (2015) Measure function of weld as the basis in development of digital technologies of weld quality. *Zh. Neftegazovogo Stroitelstva*, 2, 20–26 [in Russian].
11. Alekseev E.R., Chesnokova O.V. (2006) *Solution of problems of computational mathematics in packets Mathcad 12, MATLAB 7, Maple 9*. Moscow: NT Press [in Russian].
12. Bugrov Ya.S., Nikolsky S.M. (2004) *Higher mathematics: Manual for inst. of higher education*. Moscow: Drofa. Vol.2: Differential and integral calculus [in Russian].
13. Makhnenko V.I., Mosenkis R.Yu. (1985) Calculation of stress concentration coefficients in joints with butt and fillet welds. *Avtomatich. Svarka*, 8, 7–18 [in Russian].

A. В. Молтасов

ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України.  
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

## РОЗРАХУНОК РАДІУСА ПЕРЕХОДУ ШВА НА ОСНОВНИЙ МЕТАЛ СТИКОВОГО ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ ЗА НОРМОВАНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Ціллю роботи є встановлення математичних залежностей між геометричними параметрами, необхідними для розрахунку коефіцієнта концентрації напружень в стикових зварних з'єднаннях, та нормованими стандартами параметрами висоти та ширини підсилення шва. Було запропоновано описувати галтелі та випуклу частину підсилення стикового зварного з'єднання у вигляді дуг кіл, що дотикаються, це дозволило встановити функціональний зв'язок флангового кута та відношення висоти до ширини підсилення. За допомогою цього зв'язку визначені значення відношення висоти до ширини підсилення та відповідні ним величини радіуса переходу шва на основний метал на основі відомих графіків залежності цього радіуса від флангового кута для різних видів зварювання плавленням. Шляхом побудови регресійних залежностей з використанням системи автоматизованого проектування MathCAD були отримані математичні формули для визначення радіуса переходу шва на основний метал через відношення висоти до ширини підсилення шва стикового з'єднання, виконаного зварюванням під флюсом та в середовищі захисних газів. Бібліогр. 13, табл. 3, рис. 3.

*Ключові слова:* стикове зварне з'єднання, концентрація напружень, геометрія шва, радіус переходу шва на основний метал, фланговий кут, нормовані параметри, наближений розрахунок

A. V. Moltasov

E.O. Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine.  
11 Kazymyr Malevych Str., 03680, Kiev, Ukraine.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

## APPROXIMATE CALCULATION OF THE RADIUS OF WELD TRANSITION TO THE BASE METAL OF THE BUTT WELDED JOINT BY CRITICAL PARAMETERS

The aim of this paper is to establish mathematical relationships between the geometric parameters which are necessary for calculating the stress concentration factor (SCF) in butt welded joints and the standardized parameters of the height and width of the reinforcement of the weld. It has been proposed to describe the fillets and the convex part of the reinforcement of the butt welded joint in the form of arcs of contiguous circles, which made it possible to establish a functional relationship between the flank angle and the ratio of the height to the width of the reinforcement. With this relationship, the values of the ratio of the height to the width of reinforcement and the corresponding values of the radius of weld transition to the base metal are determined on the basis of the known graphs of the dependence of this radius on the flank angle for various types of fusion welding. By constructing regression dependencies using the MathCAD system, mathematical formulas were obtained for determining the radius of weld transition to the base metal through the height-to-width ratio of the butt weld joint made by submerged arc and gas-shielded arc welding. 13 Ref., 3 Tabl., 3 Fig.

*Keywords:* butt welded joint, stress concentration, weld geometry, radius of weld transition to the base metal, flank angle, critical parameters, approximate calculation

Поступила в редакцію 17.05.2017