

## РАСЧЕТ РАДИУСА ПЕРЕХОДА ОТ ШВА К ОСНОВНОМУ МЕТАЛЛУ СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

**А.В. Молтасов, И.Н. Клочков**

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Целью настоящей работы являлось установление математической зависимости между радиусом перехода от шва к основному металлу и отношением высоты к ширине шва в стыковых сварных соединениях алюминиевых сплавов. При проведении исследований авторы использовали взятые из литературных источников геометрические размеры стыковых соединений алюминиевых сплавов второй, пятой, шестой и седьмой серий по ДСТУ ISO 209-1:2002, выполненных аргонодуговой сваркой плавящимся и неплавящимся электродом, а также импульсно-дуговой сваркой плавящимся электродом. Регрессионный анализ при построении искомых зависимостей проводился с использованием системы автоматизированного проектирования MathCAD. Была получена аналитическая формула для определения радиуса перехода от шва к основному металлу как функции отношения высоты к ширине усиления на лицевой стороне соединения в виде полинома с дробными степенями. Установлено, что предложенная формула также может быть рекомендована для определения радиуса перехода от обратного валика шва к основному металлу. Библиогр. 19, табл. 3, рис. 2.

*Ключевые слова:* стыковое сварное соединение, алюминиевые сплавы, сварка в среде защитных газов, геометрия шва, радиус перехода от шва к основному металлу, обратный валик, регрессионный анализ

Концентрация напряжений в зоне перехода от шва к основному металлу является одним из основных факторов, определяющих сопротивление усталости сварных соединений [1]. Опыт показывает, что с концентрацией напряжений необходимо считаться не только при действии вибрационной нагрузки, но и при действии статической нагрузки и ударе, когда возможно хрупкое разрушение [2]. Кроме того, концентрация напряжений может стать причиной образования трещин в процессе термической обработки [3], которой сварные соединения подвергаются для устранения остаточных напряжений и деформаций [4].

Доминирующее влияние на степень концентрации напряжений в сварном соединении оказывает радиус перехода от шва к основному металлу  $r$  [5]. Методики замера этого радиуса весьма трудоёмки и представляют известные трудности [6], поэтому установление его связи с высотой  $h$  и шириной  $g$  усиления стыкового сварного шва, которые достаточно просто измерить, значительно упростит и ускорит проведение практических расчётов на прочность и выносливость сварных конструкций.

Подобного рода зависимости ранее были получены для сталей [7]. Однако величина радиуса перехода и параметры выпуклости шва зависят, в частности, от режима сварки и теплофизических свойств соединяемого металла [8, 9], поэтому получение таких зависимостей для соединений алюминиевых сплавов, полученных при помощи

дуговых процессов сварки, на сегодня остается актуальным.

На протяжении нескольких десятилетий в отделе прочности сварных конструкций ИЭС им. Е.О. Патона проводились измерения профилей стыковых соединений алюминиевых сплавов различных серий по ДСТУ ISO 209-1:2002, выполненных различными способами дуговой сварки в среде защитных газов (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 [15]. Однако использование целых показателей степени при малом числе членов полинома даёт низкую точность аппроксимации, поскольку в рассматриваемом случае (табл. 2) отношение  $h/g$  принимает значения, отличающиеся друг от друга почти на порядок. Поэтому зависимость радиуса перехода от шва к основному металлу от параметра  $h/g$  целесообразно искать в виде полинома с дробными степенями [7]:

$$r\left(\frac{h}{g}\right) = \sum_{i=0}^n a_i \left(\frac{h}{g}\right)^i, \quad (1)$$

где  $a_i$  — коэффициенты функции регрессии.

Точность при удержании первых восьми членов аппроксимирующего ряда с целыми показателями степени ниже, чем при удержании первых пяти членов такого ряда с дробными степенями.

**Таблица 1.** Геометрические параметры стыковых сварных соединений алюминиевых сплавов

Номер п/п	Сплав	Способ сварки	Толщина $\delta$ , мм	Радиус перехода $r$ , мм	Высота усиления $h$ , мм	Ширина усиления $g$ , мм	Источник
1	1915Т	АДСПЭ	1,7...2,0	2,65	0,30	7,60	[10]
2	АД33Т1	АДСНЭ	6,0	1,32	1,39	21,20	[11]
3	АМг2М	АДСНЭ	1,45	1,27	0,80	8,18	[12]
4	АД33Т1	АДСНЭ	6,0	1,13	1,67	16,90	[11]
5	АД33Т1	ИДСПЭ	6,0	1,10	1,73	17,40	[11]
6	АД33Т1	ИДСПЭ	2,0	1,01	1,23	7,20	[14]
7	АМг6	ИДСПЭ	2,0	1,00	1,10	9,05	[13]
8	АМг6	ИДСПЭ	6,0	0,75	2,55	18,20	[12]
9	1915Т	АДСПЭ	1,7...2,0	0,51	1,30	6,80	[10]
10	АМг6	ИДСПЭ	2,0	0,55	1,34	6,59	[14]
11	Д16Т	ИДСПЭ	2,0	0,54	1,15	5,20	[13]
12	Д16Т	ИДСПЭ	2,0	0,39	1,19	5,33	[14]
13	1915Т	АДСПЭ	1,7...2,0	0,24	1,60	6,00	[10]
14	1915Т	АДСПЭ	1,7...2,0	0,20	2,15	6,20	[10]

*Примечание.* АДСПЭ — аргонодуговая сварка плавящимся электродом (MIG); АДСНЭ — аргонодуговая сварка неплавящимся электродом (TIG); ИДСПЭ — импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом (MIG Pulse).

Кроме того, в рассматриваемом случае функция, описываемая полиномом высокой степени, не является монотонной на исследуемом промежутке изменения отношения  $h/g$  от 0 до 0,5.

Удержание первых пяти членов аппроксимирующего ряда (1) позволило получить функцию

$$r\left(\frac{h}{g}\right) = 9,215 - 53,22\left(\frac{h}{g}\right)^{1/2} + 127,05\left(\frac{h}{g}\right) - 143,43\left(\frac{h}{g}\right)^{3/2} + 62,74\left(\frac{h}{g}\right)^2, \quad (2)$$

которая строго монотонно убывает на интервале изменения отношения  $h/g$  от 0 до 0,5 и не имеет перегибов на этом интервале (рис. 1).

Отдельный интерес представляет радиус перехода от шва к основному металлу на корневой стороне стыкового сварного соединения, поскольку

**Таблица 2.** Отношение высоты к ширине усиления стыковых сварных соединений и соответствующие им значения радиусов перехода от шва к основному металлу

Номер п/п	$h/g$	Радиус перехода $r$ , мм
1	0,039	2,65
2	0,066	1,32
3	0,098	1,27
4	0,099	1,13
5	0,100	1,10
6	0,171	1,01
7	0,122	1,00
8	0,140	0,75
9	0,191	0,51
10	0,203	0,55
11	0,221	0,54
12	0,223	0,39
13	0,267	0,24
14	0,347	0,20

*Примечание.* Порядковые номера соответствуют порядковым номерам в табл. 1.

ку максимальная степень концентрации напряжений при определённых соотношениях размеров имеет место вблизи обратного валика [16].

Процессы деформирования лицевой и корневой поверхностей сварочной ванны под действием газодинамического давления дуги существенно отличаются [17]. Кроме того, для исключения прожога металла и качественного формирования обратной стороны шва используют съёмные подкладные формирующие элементы [18].

Геометрические параметры корневой выпуклости практически определяются размерами канавки формирующей подкладки [14, 19], при этом неизвестно сохраняется ли установленная связь между радиусом перехода от корневой части шва к основному металлу с отношением высоты к ширине обратного валика.

Экспериментальные измерения [10–14] показали, что, как и на лицевой стороне, радиус перехода от корневой части шва к основному металлу увеличивается с уменьшением отношения высоты к ширине обратного валика (табл. 3).

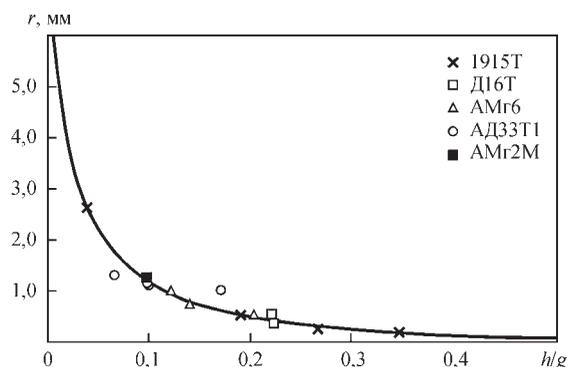


Рис. 1. Зависимость радиуса перехода от шва к основному металлу от отношения высоты к ширине усиления и расчетная кривая по уравнению (2) для стыковых соединений алюминиевых сплавов, выполненных дуговой сваркой в среде защитных газов

Таблица 3. Геометрические параметры корневой стороны стыковых сварных соединений алюминиевых сплавов

Номер п/п	Сплав	Способ сварки	Толщина $\delta$ , мм	Радиус перехода $r$ , мм	Высота усиления $h$ , мм	Ширина усиления $g$ , мм	$h/g$	Источник
1	АД33Т1	АДСНЭ	6,0	0,76	1,38	7,90	0,175	[11]
2	АД33Т1	АДСНЭ	6,0	0,72	1,38	7,80	0,177	[11]
3	Д16Т	ИДСПЭ	5,0	0,52	1,03	4,51	0,228	[12]
4	АМг6	ИДСПЭ	6,0	0,51	1,29	4,38	0,295	[11]
5	1915Т	АДСПЭ	1,7...2,0	0,45	2,30	7,60	0,303	[10]
6	АД33Т1	ИДСПЭ	2,0	0,37	1,37	4,70	0,291	[14]
7	1915Т	АДСПЭ	1,7...2,0	0,31	1,40	5,10	0,275	[10]
8	Д16Т	ИДСПЭ	2,0	0,31	1,20	3,75	0,320	[13]
9	АМг6	ИДСПЭ	2,0	0,31	1,10	3,72	0,296	[14]
10	АМг6	ИДСПЭ	1,5	0,30	0,56	2,33	0,240	[12]
11	Д16Т	ИДСПЭ	2,0	0,26	0,97	3,50	0,277	[13]
12	1915Т	АДСПЭ	1,7...2,0	0,18	1,20	4,50	0,267	[10]
13	1915Т	АДСПЭ	1,7...2,0	0,07	2,00	5,40	0,370	[10]

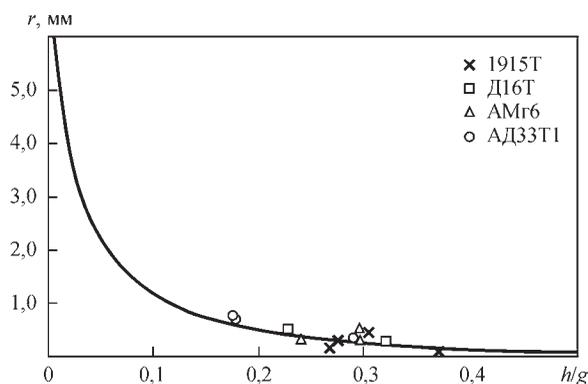


Рис. 2. Зависимость радиуса перехода от обратного валика шва к основному металлу от отношения высоты к ширине корневого усиления и расчетная кривая по уравнению (2) для стыковых соединений алюминиевых сплавов, выполненных дуговой сваркой в среде защитных газов

Экспериментальные точки (табл. 3) достаточно точно описываются расчётной кривой (рис. 2), поэтому формула (2) может быть рекомендована для определения радиуса перехода от шва к основному металлу как на лицевой, так и на корневой стороне стыковых соединений алюминиевых сплавов различных систем легирования, выполненных дуговыми способами сварки в среде защитных газов.

**Выводы**

1. Собраны и упорядочены данные различных авторов об экспериментальных измерениях радиуса перехода от шва к основному металлу в стыковых соединениях алюминиевых сплавов, выполненных дуговыми способами сварки в среде защитных газов.

2. Путем регрессионного анализа дискретных экспериментальных данных при помощи системы автоматизированного проектирования MathCAD была получена функциональная зависимость радиуса сопряжения шва с основным металлом от отношения высоты к ширине усиления на лицевой стороне стыкового сварного соединения.

3. Дальнейший анализ показал, что полученная зависимость также может быть использована для расчетного определения радиуса сопряжения обратного валика шва с основным металлом на корневой стороне сварного соединения через отношение высоты к ширине обратного валика.

**Список литературы**

- Труфяков В.И., Дворецкий В.И., Михеев П.П. и др. (1990) *Прочность сварных соединений при переменных нагрузках*. Труфяков В.И. (ред.). Киев, Наукова думка.
- Навроцкий Д.И. (1968) *Расчет сварных конструкций с учетом концентрации напряжений*. Ленинград, Машиностроение.
- Лахтин Ю.М. (1983) *Металловедение и термическая обработка металлов*. Москва, Металлургия.
- Винокуров В.А. (1973) *Отпуск сварных конструкций для снижения напряжений*. Москва, Машиностроение.
- Макаров И.И., Луцук О.А., Гребенчук В.Г. (1977) Влияние параметров углового шва на усталостную прочность сварных тавровых соединений. *Сварочное производство*, 6, 18–21.
- Аснис А.Е., Иващенко Г.А., Андерсон Я.Э. (1982) Влияние радиуса сопряжения шва с основным металлом на сопротивление усталости сварных соединений. *Автоматическая сварка*, 4, 48–51.
- Молтасов А.В. (2017) Расчет радиуса перехода шва к основному металлу стыкового сварного соединения по нормируемым параметрам. *Там же*, 9, 59–62. <https://doi.org/10.15407/as2017.09.09>
- Березовский Б.М., Стихин В.А. (1977) Влияние сил поверхностного натяжения на формирование усиления сварного шва. *Сварочное производство*, 1, 51–53.
- Машин В.С., Пашуля М.П., Шонин В.А., Клочков И.Н. (2010) Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом в аргоне тонколистовых алюминиевых сплавов. *Автоматическая сварка*, 5, 49–53.
- Шонин В.А., Якубовский В.В., Игнатьев В.Г. (1991) Сопротивление малоциклового усталости сварных соединений панелей из сплава 1915Т. *Там же*, 1, 22–25.
- Шонин В.А., Гуца О.И., Машин В.С. и др. (2005) Влияние размеров образца сварного соединения алюминиевого сплава на остаточную напряженность и сопротивление усталости. *Там же*, 2, С. 21–31.
- (2011) *Исследовать сопротивление усталости сварных соединений алюминиевых сплавов, выполненных современными способами сварки*. Отчет о НИР (заключ.). ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. Рук. Кирьян В.И.; исполн.: Кныш В.В., Ковальчук В.С., Соловей С.А. и др. № ГР 0107U004035. Киев.
- Кирьян В.И., Шонин В.А., Клочков И.М. та ін. (2009) Довговічність стикових з'єднань тонколистових сплавів

- AMg6 і D16, виконаних зварюванням плавким електродом (MIG Pulse). *Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій*, **8**, 189–203.
14. Кныш В.В., Клочков И.Н., Пашуля М.П., Мотрунич С.И. (2014) Повышение сопротивления усталости тонколистовых сварных соединений алюминиевых сплавов высокочастотной проковкой. *Там же*, **5**, С. 22–29.
  15. Кирьянов Д.В. (2007) *Mathcad 14*. Санкт-Петербург, БХВ-Петербург.
  16. Цумарев Ю.А. (2010) Влияние асимметрии односторонних стыковых швов на распределение напряжений в сварном соединении. *Сварка и диагностика*, **5**, 24–27.
  17. Lin M.L., Eagar T.W. (1985) Influence of arc pressure on weld pool geometry. *Welding Journal* (Miami, Fla.), **6**, 163–169.
  18. Машин В.С., Пашуля М.П. (2010) Особенности импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом алюминиевых сплавов без применения подкладных формирующих элементов. *Автоматическая сварка*, **3**, С. 52–58.
  19. Рабкин Д.М., Игнатъев В.Г., Довбищенко И.В. (1982) *Дуговая сварка алюминия и его сплавов*. Москва, Машиностроение.
  7. Moltasov, A.V. (2017) Approximate calculation of radius of weld transition to base metal of welded butt joint by normalized parameters. *The Paton Welding J.*, **9**, 50-52. <https://doi.org/10.15407/as2017.09.09>.
  8. Berezovsky, B.M., Stikhin, V.A. (1977) Influence of surface tension forces on formation of weld reinforcement. *Svaroch. Proizvodstvo*, **1**, 51-53 [in Russian].
  9. Mashin, V.S., Pashulya, M.P., Shonin, V.A., Klochkov, I.N. (2010) Consumable electrode pulsed argon-arc welding of sheet aluminium alloys. *The Paton Welding J.*, **5**, 38-41.
  10. Kirianov, D.V. (2007) *Mathcad 14*. St.-Petersburg, BKhV-Peterburg [in Russian].
  11. Tsumarev, Yu.A. (2010) Influence of asymmetry of one-sided butt welds on stress distribution in welded joint. *Svarka i Diagnostika*, **5**, 24-27 [in Russian].
  12. Lin, M.L., Eagar, T.W. (1985) Influence of arc pressure on weld pool geometry. *Welding J.*, **6**, 163-169.
  13. Mashin, V.S., Pashulya, M.P. (2010) Features of consumable electrode pulsed-arc welding of aluminium alloys without application of forming backing elements. *The Paton Welding J.*, **3**, 43-49.
  14. Knysh, V.V., Klochkov, I.N., Pashulya, M.P., Motrunich, S.I. (2014) Increase of fatigue resistance of sheet welded joints of aluminum alloys using high-frequency peening. *Ibid.*, **5**, 21-27.
  15. Rabkin, D.M., Ignatiev, V.G., Dovbishchenko, I.V. (1982) *Arc welding of aluminium and its alloys*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
  16. Shonin, V.A., Yakubovsky, V.V., Ignatiev, V.G. (1991) Resistance to low-cycle fatigue of welded joints of 1915T alloy panels. *Ibid.*, **1**, 22-25 [in Russian].
  17. Shonin, V.A., Gushcha, O.I., Mashin, V.S. et al. (2005) Influence of sizes of welded joint sample of aluminium alloy on residual stress intensity and fatigue resistance. *Ibid.*, **2**, 21-31 [in Russian].
  18. Kirian, V.I., Knysh, V.V., Kovalchuk, V.S., Solovej, S.A. et al. (2011) *Study of fatigue resistance of aluminium alloy welded joints performed by modern welding methods*. In: Report on research (Conclus.). Kiev, PWI [in Russian].
  19. Kyryan, V.I., Shonin, V.A., Klochkov, I.M. et al. (2009) Service life of butt joints of aluminium alloys AMg6 and D16 sheets made by consumable electrode welding (MIG Pulse). *Mekhanika i Phisyka Rujnyvannya Bud. Materialiv i Konstruktsij*, **8**, 189-203 [in Ukrainian].

## References

## РОЗРАХУНОК РАДІУСА ПЕРЕХОДУ ВІД ШВА ДО ОСНОВНОГО МЕТАЛУ СТИКОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

А.В. Молтасов, І.М. Клочков

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Метою даної роботи було встановлення математичної залежності між радіусом переходу від шва до основного металу та відношенням висоти до ширини шва в стикових зварних з'єднаннях алюмінієвих сплавів. При проведенні досліджень автори використали взяті з літературних джерел геометричні розміри стикових з'єднань алюмінієвих сплавів другої, п'ятої, шостої та сьомої серій за ДСТУ ISO 209-1:2002, виконаних аргонодуговим зварюванням плавким та неплавким електродом, а також імпульсно-дуговим зварюванням плавким електродом. Регресійний аналіз при побудові шуканих залежностей проводився з використанням системи автоматизованого проектування MathCAD. Була отримана аналітична формула для визначення радіуса переходу від шва до основного металу як функції відношення висоти до ширини підсилення на лицьовій стороні з'єднання у вигляді полінома з дробовими ступенями. Встановлено, що запропонована формула також може бути рекомендована для визначення радіуса переходу від кореня шва до основного металу. Бібліогр. 19, табл. 3, рис. 2.

*Ключові слова:* стикове зварне з'єднання, алюмінієві сплави, зварювання в захисних газах, геометрія шва, радіус переходу від шва до основного металу, корінь шва, регресійний аналіз

## CALCULATION OF THE RADIUS OF TRANSITION OF THE WELD TO BASE METAL OF ALUMINIUM ALLOY WELDED JOINTS

A. V. Moltasov, I. N. Klochkov

E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

The objective of the work was establishing a mathematical dependence between the radius of the weld transition to base metal and ratio of weld height to its width in butt welded joints of aluminium alloys. During investigations, the authors used the published data on geometrical dimensions of butt joints of aluminium alloys of the second, fifth, sixth and seventh series to DSTU ISO 209-1:2002 made by consumable and nonconsumable electrode argon-arc welding, as well as consumable electrode pulsed-arc welding. When plotting the sought dependencies regression analysis was conducted with application of MathCAD system. An analytical formula was obtained in the form of a polynomial with fractional powers to determine the radius of weld transition to base metal, as a function of the ratio of reinforcement height to its width on the joint face side. It is found that the proposed formula can also be recommended for determination of the radius of transition of the weld back bead to base metal. 19 Ref., 3 Tabl., 2 Fig.

*Keywords: butt welded joint, aluminium alloys, gas-shielded welding, weld geometry, radius of weld transition to base metal, back bead, regression analysis*

Поступила в редакцию 21.05.2019



### TUBE 2020, WIRE 2020 — 17-я Международная выставка трубопроводов, труб, проволоки, кабеля и метизов, технологий и оборудования для их производства

30.03.2020–03.04.2020

Германия, Дюссельдорф,  
Messe Düsseldorf Exhibition Centre

Международные специализированные выставки TUBE 2020 (трубы и их производство) и WIRE 2020 (Проволока. Кабель. Метизы) пройдут в Дюссельдорфе (Германия).

Выставки Tube и Wire представляют интерес для директоров и главных специалистов заводов по производству труб, проволоки, кабелей.

#### Профили выставки Tube:

Трубные материалы, трубы, комплекующие: трубы на базе стали, нержавеющей сталь, трубы из цветных металлов и сплавов (алюминий, бронза, медь и т.п.), трубы пластмассовые, трубы из минерального сырья (бетон, керамика), трубы различных методов изготовления и обработки, сварка, холодная и горячая вытяжка, прессование, гальванизированные трубы, с напылением или покрытием определенным слоем, проводные трубы, дренажи, системы отвода, трубы для обмена и передачи тепла, техника сверления, измерительная техника, конструкционные трубы из стали и т.п., комплекующие (арматуры, уплотнители, соединители, запоры, гайки, винты).

Оборудование для изготовления труб: различные виды литья, прокатные станы, прессы, сварка, тепловая обработка, установки по обработке труб — формование, гибка, резка, шлифование; логистика, системы управления и контроля; упаковка.

Оборудование бывшее в употреблении.

Инструменты для различных технологий и вспомогательная техника: литье, прессование, волочение, прокат, сварка.

Регулирующая и измерительная техника и техника управления.

Испытательное, контрольное оборудование.

Специализированные разделы: охрана окружающей среды, техника безопасности, специальная литература, консультации.

#### Профили выставки Wire:

Оборудование и машины для изготовления проволоки и ее обработки; оборудование для производства метизов из проволоки.

Готовая продукция.

Специализированная проволока или кабель; контрольное оборудование и др.

Станки, инструменты и технологии для литейного дела, экструзии, протяжки.

Оборудование и машины для изготовления кабелей, пружин и креплений.

Вспомогательные материалы для производства проволоки и кабеля (смазочные, чистящие, смазывающие вещества).