

DOI 10.15589/jnn20150208

УДК 629.5.015.4:539.431

K68

ANALYSIS OF MICROGEOMETRICAL PARAMETERS OF BUTT
AND FILLET WELDS IN STRUCTURAL ASSEMBLIESАНАЛИЗ МИКРОГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТЫКОВЫХ
И УГЛОВЫХ СВАРНЫХ ШВОВ КОНСТРУКТИВНЫХ УЗЛОВ**Leontii I. Korostylov**

leontyy.korostilyov@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-4370-3270

Dmytro Yu. Lytvynenko

litvinen@inbox.ru

ORCID: 0000-0003-2948-8698

Л. И. Коростылёв,

д-р техн. наук, проф.

Д. Ю. Литвиненко,

асп.

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv**Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев*

Abstract. The values of weld toe angles and weld toe radii in the butt and fillet welds produced by different welding procedures have been analyzed. The aim of the study is to determine the generalized mean values, standard deviations and lognormal distributions parameters of weld toe angles and radii for butt and fillet welds produced by SAW, MMA, and CO₂ welding. Based on the results of weld toe radii and angles measurements published in the literature for sheet thickness and steels with mechanical properties typical to ship structures generalized samples were compiled and statistically processed. Each generalized sample corresponded to a specific type of weld and welding procedure. The influence of welding position as well as some other factors, which can influence on investigated values in generalized samples, was neglected due to the small number of the measurement results. The influence of the mentioned factors on the investigated values and their magnitudes in the expected points of the fatigue crack initiation were studied separately. The largest weld toe radii were in butt welds produced by MMA welding. The obtained generalized mean values, standard deviations and lognormal distributions parameters of weld toe angles and weld toe radii allow us to approximately describe microgeometry of butt or fillet welds and may be used for estimation of the stress concentration in the ship structure welded assemblies and for the fatigue strength analysis of these assemblies.

Keywords: structural assembly; weld seam; weld toe radii and angles; lognormal distribution; statistical processing of the data.

Аннотация. Выполнен анализ величин радиусов и углов наклона профиля сварного шва в месте перехода от основного металла к металлу шва в случаях стыковых и угловых швов, полученных ручной дуговой сваркой, полуавтоматической в среде углекислого газа и сваркой под слоем флюса. Учитывая случайность величин радиусов и углов перехода и их логнормальное распределение, проведена статистическая обработка имеющихся в литературе данных и получены средние значения, стандартные отклонения и параметры распределений данных величин.

Ключевые слова: конструктивный узел; сварной шов; радиусы и углы перехода в сварных швах; логнормальное распределение; статистическая обработка данных.

Анотація. Проведено аналіз величин радіусів і кутів нахилу профіля зварного шва в місці переходу від основного металу до металу шва у випадках стикових і кутових швів, виконаних ручним дуговим зварюванням, напівавтоматичним в середовищі вуглекислого газу та зварюванням під шаром флюсу. Враховуючи випадковість величин радіусів і кутів переходу та їх логнормальний розподіл, проведено статистичну обробку наявних в літературі даних й отримано середні значення, стандартні відхилення та параметри розподілу даних величин.

Ключові слова: конструктивний вузол; зварний шов; радіуси та кути переходу у зварних швах; логнормальний розподіл; статистична обробка даних.

REFERENCES

- [1] Lvovskiy Ye. N. *Statisticheskie metody postroeniya empiricheskikh formul* [Statistical methods of empirical formulas creation]. Moscow, High School Publ., 1988. 239 p.

- [2] Makhnenko V.I., Mosenkis R. Yu. Raschet koeffitsientov kontsentratsii napryazheniy v svarnykh soedineniyakh so stykovymi i uglovymi shvami [Assessment of stress concentration coefficients in welded joints with butt and fillet welds]. *Avtomaticheskaya svarka — Automatic Welding*, 1985, issue 8, pp. 7–18.
- [3] Chen T., Yu Q.Q., Gu X.L., Zhao X.L. Fatigue Test on Out-of-Plane Gusset Welded Joints Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer Materials. *APFIS 2012 — The Third Asia-Pacific Conference on FRP in Structures*. Hokkaido, February 2012.
- [4] Kawai S., Koibuchi K. Effects of Ground and Peened on Fatigue Strength of Welded joint under High Mean Stresses. *Journal of the Japan Welding Society*, 1975, no. 7, pp. 62–69.
- [5] Kawai S., Shiono T., Saikawa S. Effects of Finishes of Weld Toe on Fatigue Strength of Welded High Strength Steels. *Journal of the Japan Welding Society*, 1979, no. 9, pp. 44–51.
- [6] Lassen T. The Effect of the Welding Process on the Fatigue Crack Growth. *Welding journal Research Supplement*, February 1990, vol. 69, no. 2, pp. 75–85.
- [7] Makhnenko V.I., Pochynok V.E. *Strength Calculation of Welded Joints with Crack-Like Imperfections*. Kyiv, E. O. Paton Electric Welding Institute Publ., 2006. 266 p.
- [8] Masayoshi H., Hiroaki S., Ken K. Effect of Strong Shot Peening Cleaning and Hot Galvanizing on Fatigue Strength of Steel Welded Joint. *Journal of the Japan Welding Society*, 2007, no. 4, pp. 486–493.
- [9] Masumoto I., Shinoda T., Tajima N. Fatigue Strength of the Welded Joints by Various Coated Electrodes. *Journal of the Japan Welding Society*, 1975, no. 3, pp. 26–35.
- [10] Masumoto I., Shinoda T., Suzuki K. Fatigue Strength of Welded Joints by CO₂ Welding. *Journal of the Japan Welding Society*, 1976, no. 10, pp. 62–69.
- [11] Miki Ch., Sakano M., Toyoda Y., Yoshizawa T. Early stage propagation behavior of fatigue cracks in fillet welded joints. *Structural Engineering/Earthquake Engineering*, April 1990, vol. 7, no. 1, pp. 123–131.
- [12] Nihei M., Sasaki E. Statistical Analysis for Correlation Between the Scatter of Fatigue Strengths and that of the Reinforcement Shape of SM50A Butt Welded Joint. *Journal of the Japan Welding Society*, 1976, no. 1, pp. 54–60.
- [13] Petrovic Z.D. Fatigue strength assessment of welded joints by using notch stress approach. *13th International Research Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology"*. Hammamet, Tunisia, 2009, pp. 509–512.
- [14] Sakano M., Arai H., Nishimura T. Long life fatigue behavior of fillet welded joint in corrosive environment. *Engineering/Earthquake Engineering*, October 1989, vol. 6, no. 2, pp. 365–373.
- [15] Takahashi K., Akinori I. Effect of External Geometry of Reinforcement on the Fatigue Strength of a Welded Joint. *Journal of the Japan Welding Society*, 1971, no. 8, pp. 13–25.
- [16] Terasaki T., Akiyama T., Yokoshima N. et al. Effect of factors in weld reinforcement of stress concentration factor. *Journal of the Japan Welding Society*, 1982, no. 9, pp. 66–72.
- [17] Williams H.E., Ottsen H., Lawrence F.V., Munse W.H. *The effects of weld geometry on the fatigue behavior of welded connections*. Illinois, University of Illinois Publ., August 1970. 139 p.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Повышение местных напряжений в областях резкого изменения формы упругого тела, как правило, характеризуют коэффициентом концентрации напряжений. Прочность сварных соединений, как указывается в [2], особенно при переменных нагрузках, в значительной степени зависит от уровня концентрации напряжений, наблюдающейся, в частности, в зоне перехода от основного металла к металлу сварного шва. Приближенные зависимости и графики для определения теоретических коэффициентов концентрации напряжений стыковых, тавровых и крестообразных соединений приведены, например, в [2]. Как видно из этих зависимостей и графиков, кроме параметров шва, регламентируемых нормативными документами, таких как размер катета шва или высота

и ширина усиления, определяющими усталостную прочность стыковых и угловых сварных швов, угол наклона профиля шва θ в месте перехода от основного металла к металлу шва и радиус перехода ρ в данном месте также значительно влияют на усталостную прочность. Геометрические параметры стыкового и углового сварных швов представлены на рис. 1, а, б. В настоящей работе, однако, угол наклона профиля углового шва (рис. 1, б) представлялся как $90^\circ + \theta$.

Угол наклона профиля шва в месте перехода от наплавленного металла к металлу шва и радиус перехода варьируются по длине шва и зависят от ряда факторов [7]. Во многих случаях при расчете усталостной прочности сварных судокорпусных узлов параметры ρ и θ остаются неизвестными. Таким образом, для оценки величины концентрации напряжений

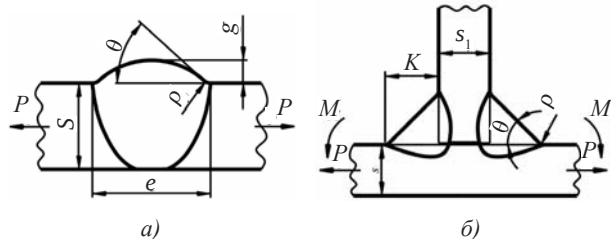


Рис. 1. Геометрические параметры сварных швов: а — стыкового; б — углового

в сварных узлах следует обладать статистическими данными о величинах радиусов и углов наклона профиля шва в местах перехода от основного металла к наплавленному относительно сварных швов различного типа и способа изготовления.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Величины микрогеометрических параметров сварных швов зависят от типа шва, ряда условий изготовления и параметров соединения. Например, в случаях стыковых швов, выполненных сваркой под слоем флюса, радиус перехода от наплавленного металла к металлу шва будет зависеть от начальной температуры металла, чистоты его поверхности, веса насыпного флюса, поверхностного натяжения металла и шлака, площади наплавки, ширины и утолщения шва. В случаях же ручной дуговой сварки и механизированной в среде защитных газов очевидно, что значения величин ρ и θ будут еще зависеть от человеческого фактора, а также положения шва в пространстве при изготовлении. Ввиду большого числа факторов, влияющих на микрогеометрические параметры сварного шва, часть из которых случайна, параметры ρ и θ целесообразно рассматривать как случайные величины, зависящие от типа сварки, вида шва и других факторов.

В работе [7] указано, что величина радиуса ρ и размеры шва не являются постоянными, особенно при ручном и полуавтоматическом способах сварки, а наиболее простым и часто используемым на практике законом распределения для данных случайных величин является нормальный закон. В [12] способом выпрямленных диаграмм показано, что высоты усиления исследуемого стыкового сварного шва распределены по нормальному закону. Кроме того, с помощью предложенного способа показано, что распределение величины $\lg \rho$ соответствует нормальному закону распределения.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — получить параметры распределения, средние значения и среднеквадратичные отклонения радиусов и углов наклона профиля шва в месте перехода от основного металла к металлу шва для стыковых и угловых швов, выполненных ручной дуговой сваркой, сваркой в среде углекислого газа и под слоем флюса.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Для того чтобы получить параметры распределения величин ρ и θ , а также их средние значения и среднеквадратичные отклонения, в данной работе на основании результатов замеров указанных параметров, представленных в различных источниках, построены статистические ряды для выборок, составленных на базе швов одного вида, выполненных одним типом сварки. Закон распределения указанных случайных величин предполагался логнормальным, результатами расчетов являлись параметры логнормального распределения, средние значения исследуемых величин и их стандартные отклонения, полученные с помощью выборок, соответствующих различным типам швов и видам сварки. При составлении обобщенных выборок влиянием положения шва в пространстве при сварке и некоторыми другими факторами, которые могут воздействовать на величины ρ и θ , пренебрегалось по причине ограниченного количества результатов замеров. Для построения гистограмм выбирались данные, измеренные на сварных соединениях с механическими характеристиками основного металла, близкими к судостроительным сталям (предел текучести $\sigma_t = 235 - 390$ МПа, предел прочности $\sigma_b = 400 - 650$ МПа, относительное удлинение при разрыве $\delta = 20 - 22\%$). Толщины при этом были также в диапазоне, характерном для конструкций судов речного и морского районов эксплуатации (примерно 3–26 мм).

Плотность распределения ρ согласно логнормальному закону имеет вид:

$$f(\rho) = \frac{0,4343}{\sigma_{\lg \rho} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\lg \rho - \lg \rho_0)^2}{2\sigma_{\lg \rho}^2}},$$

где $\sigma_{\lg \rho}$ — несмещенная оценка дисперсии логарифмированной случайной величины $\lg \rho$, распределенной по нормальному закону; $\lg \rho_0$ — оценка математического ожидания величины $\lg \rho$. Математическое ожидание случайной величины ρ , распределенной по логнормальному закону рассчитывается по формуле:

$$M_\rho = \rho_0 e^{2,65\sigma_{\lg \rho}^2},$$

где $\rho_0 = 10^{\lg \rho_0}$.

Дисперсия логнормально распределенной случайной величины определяется из зависимости:

$$\sigma_\rho = M_\rho \sqrt{\left(\frac{M_\rho}{\rho_0}\right)^2 - 1}.$$

Аналогичный вид имела плотность распределения величины θ , ее математическое ожидание и дисперсия.

Абсолютные данные в настоящей работе логарифмировались, затем выполнялся отсев аномальных

значений в выборках, после отсева выборки проверялись на нормальность по критерию асимметрии и эксцесса [1]. С помощью программного обеспечения EasyFit® выполнялось исследование соответствия построенных кривых экспериментальным данным по критериям согласия Колмогорова-Смирнова, Андерсона-Дарлинга и Пирсона. Также были определены доверительные интервалы для искомых величин.

Выборки для стыковых швов, полученных ручной дуговой сваркой, составлены на основании работ [12], [15], [10], [17]. Замеры, полученные на швах, выполненных в нижнем и вертикальном положении, объединялись для обобщения статистических данных отдельно по каждому типу ввиду недостаточного количества замеров. С помощью указанных выборок определялись параметры распределения радиусов и углов перехода в швах, средние значения данных величин и среднеквадратичные отклонения. Толщины соединенных сваркой элементов, представленные в выборках, соответствовали: 6, 9, 19 и 20 мм. Максимальные и минимальные значения выборки объемом 835 значений, составленной для радиусов ρ , с учетом отсева аномальных значений были следующими: $\rho_{\min}=0,04$ мм; $\rho_{\max}=16,66$ мм. Объем выборки для углов θ с учетом исключения аномальных значений равен 438, граничные значения — $\theta_{\min}=4,42$ град; $\theta_{\max}=89,97$ град. Выборки для стыковых швов, полученных полуавтоматической сваркой в среде углекислого газа, составлены на основании одной работы [9] и, таким образом, не соответствовали изначально поставленной задаче. Следует также иметь в виду, что в настоящее время вместо сварки в среде CO_2 широкое

применение на практике получила сварка в газовых смесях и сварка порошковыми проволоками. Толщина свариваемых элементов, представленная в данной выборке, была 9 мм. В данном случае объем выборки для радиусов перехода с учетом отсева аномальных значений составлял 231, граничные значения — $\rho_{\min}=0,045$ мм; $\rho_{\max}=1$ мм. Объем выборки для углов перехода был 233, максимальное и минимальное значения — $\theta_{\min}=14,809$ град; $\theta_{\max}=78,664$ град.

Результаты расчетов параметров распределений ρ и θ по логнормальному закону, математических ожиданий и среднеквадратичных отклонений поданы в табл. 1, где также содержатся результаты расчета математических ожиданий и среднеквадратичных отклонений для случаев сварных швов, выполненных только в вертикальном положении или только в нижнем положении, а также результаты замеров и статистической обработки параметров микрогеометрии в предполагаемых точках появления трещины. Для сравнения с результатами, изложенными в настоящей работе, представлены также данные из других источников. Для сварных швов, выполненных с помощью сварки под слоем флюса, параметры логнормального распределения, средние значения и среднеквадратичные отклонения не определялись, однако, в табл. 1 и 3 поданы некоторые имеющиеся в литературе сведения о средних значениях и среднеквадратичных отклонениях величин ρ и θ для швов, произведенных таким видом сварки.

Гистограммы распределения величин ρ и θ в стыковых сварных швах и выравнивающие их кривые, построенные по рассчитанным результатам, представлены на рис. 2, 3.

Таблица 1. Параметры логнормального распределения, математические ожидания и стандартные отклонения величин ρ и θ для стыковых швов

Особенности выборки	$\lg \rho_0$	$\sigma_{\lg \rho}$	$\lg \theta_0$	$\sigma_{\lg \theta}$	M_ρ , мм	σ_ρ , мм	M_θ , град	σ_θ , град
Ручная дуговая сварка								
Нижнее положение на базе данных [16]	—	—	—	—	1,26	1,52	21,57	13,54
Вертикальное положение на базе данных [16]	—	—	—	—	0,67	0,76	33,4	16,67
В точке появления трещины на базе данных [12], [17]	—	—	—	—	0,58	0,76	32	16,51
Обобщенные данные на базе [12], [15], [10], [17]	$-7,76 \cdot 10^{-3}$	0,47	1,39	0,26	1,77	2,64	29,28	18,91
Данные из источника [16]	—	—	—	—	2,26	2,67	—	—
Данные из источника [16]	—	—	—	—	2,08	0,86	31,9	10,9
Сварка в среде CO_2								
Нижнее положение на базе данных [9]	—	—	—	—	0,27	0,19	40,58	14,49
Вертикальное положение на базе данных [9]	—	—	—	—	0,25	0,19	42,36	15,57
В точке появления трещины на базе данных [9]	—	—	—	—	0,28	0,20	48,77	16,98
Обобщенные данные на базе [9]	-0,67	0,28	1,59	0,15	0,26	0,19	41,32	14,93
Данные из источника [16]	—	—	—	—	0,64	0,15	23,3	5
Данные из источника [8] (Св.в атм. $\text{Ar} + \text{CO}_2$, $\sigma_t=465$ МПа; $\sigma_a=576$ МПа)	—	—	—	—	0,2	—	41	—
Сварка под слоем флюса								
Данные из источника [16]	—	—	—	—	0,67	0,76	45	11,2

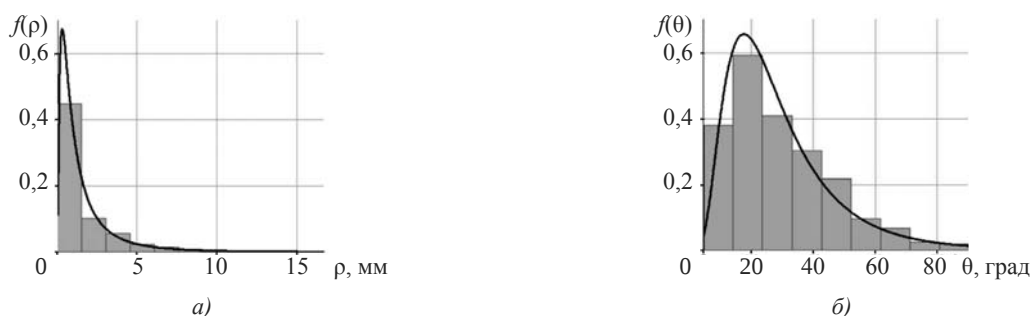


Рис. 2. Гистограммы и выравнивающие их кривые, полученные для стыковых швов при ручном способе сварки: а — распределения радиусов ρ ; б — распределения углов θ

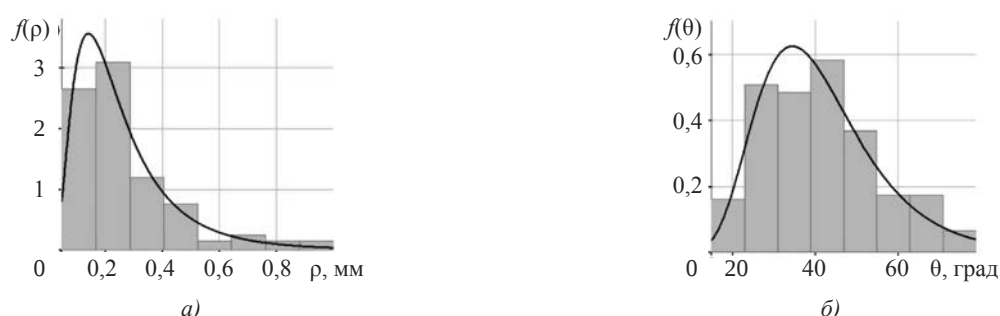


Рис. 3. Гистограммы и выравнивающие их кривые, полученные для стыковых швов при сварке в среде углекислого газа: а — распределения радиусов ρ ; б — распределения углов θ

Таблица 2. Математические ожидания и среднеквадратичные отклонения величин ρ и θ для стыковых сварных швов, выполненных ручной дуговой сваркой электродами с покрытиями различных типов

Тип покрытия	Положение при сварке							
	Нижнее положение				Вертикальное положение			
	M_ρ , мм	σ_ρ , мм	M_θ , град	σ_θ , град	M_ρ , мм	σ_ρ , мм	M_θ , град	σ_θ , град
Ильменитное покрытие	1,3	2,24	21,6	13,52	0,51	0,57	40,08	20,75
Титан-кальциевое покрытие	1,43	1,88	21,12	15,56	0,36	0,33	34,82	12,01
Рутиловое покрытие	0,90	1,22	25,21	15,91	0,77	0,84	34,45	20,34
Фтористо-кальциевое покрытие	1,35	1,11	19,72	8,06	0,93	0,92	27,43	16,48

В результате проверки соответствия теоретических распределений, полученных в данной работе для стыковых швов (см. рис. 2, 3 и табл. 1), экспериментальным данным по критериям согласия с помощью программного обеспечения EasyFit® было установлено соответствие экспериментальным данным при уровне значимости $\alpha=0,1$ по всем критериям, однако, кривая на рис. 2, а, по критерию Колмогорова-Смирнова противоречила экспериментальным данным при всех уровнях значимости.

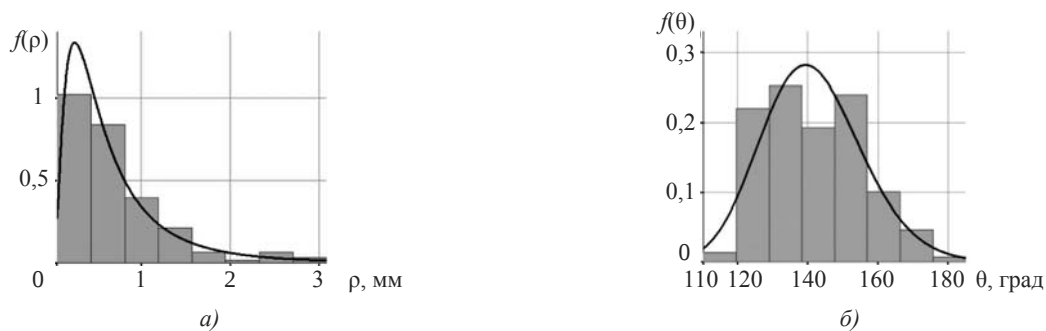
С целью исследования влияния типа обмазки электрода на значения радиусов и углов перехода в сварных швах, произведенных ручной дуговой сваркой, на основании результатов замеров, представленных в работе [10], получены средние величины ρ и θ и их среднеквадратичные отклонения для стыковых швов, выполненных в вертикальном и нижнем положениях электродами с различными покрытиями (результаты поданы в табл. 2.) Рассматриваемое в [10] соединение имело толщину 9 мм, V-образную разделку

кромки и следующие характеристики основного металла: $y_b=471$ МПа; $y_t=347$ МПа; $d=25,8\%$.

Выборки для угловых швов, полученных ручной дуговой сваркой, составлены на основании работ [11], [14], [4]. В указанных работах рассматривались тавровые соединения с толщинами соединяемых элементов 15 мм, 9 мм, в [4] сваривались элементы разных толщин, 9 и 18 мм. Общий объем выборки для радиусов ρ с учетом исключения аномальных значений был 161, граничные значения — $r_{\max}=3,08$ мм, $r_{\min}=0,06$ мм. Объем выборки для углов θ в данном случае составил 161, максимальные и минимальные значения — $\theta_{\min}=110,20$ град; $\theta_{\max}=184,88$ град. Результаты статистической обработки данных замеров представлены в табл. 3 и на рис. 4. Теоретические кривые на рис. 4, а, б соответствовали экспериментальным данным при уровнях значимости $\alpha=0,1$ по критериям согласия Колмогорова-Смирнова, Андерсона-Дарлинга и Пирсона. Данные относительно величин M_ρ , M_θ , σ_ρ , σ_θ из различных

Таблица 3. Радиусы и углы перехода от основного металла к металлу сварного шва в угловых швах

Особенности выборки	$\lg \rho_0$	$\sigma_{\lg \rho}$	$\lg \theta_0$	$\sigma_{\lg \theta}$	M_ρ , мм	σ_ρ , мм	M_θ , град	σ_θ , град
Ручная дуговая сварка								
Обобщенные данные на базе [11], [14], [4]	-0,29	0,36	2,15	0,04	0,72	0,72	141,49	14,34
Данные из источника [5]	—	—	—	—	0,85	—	133,3	—
Данные из источника [5] (высокопрочные стали $\sigma_s = 792$ МПа)	—	—	—	—	1,27	—	129,6	—
Данные из источника [6]	—	—	—	—	0,75	—	148	—
Данные из источника [6] (характеристики материала: $\sigma_t = 416$ МПа, $\sigma_s = 501$ МПа, 1 тип электрода)	—	—	—	—	1,6	0,7	143	9
Данные из источника [6] (характеристики материала: $\sigma_t = 416$ МПа, $\sigma_s = 501$ МПа, 2 тип электрода)	—	—	—	—	1,8	0,9	159	8
Сварка в среде CO_2								
Данные из источника [11]	—	—	—	—	0,43	—	152	—
Данные из источника [13]	—	—	—	—	1	—	—	—
Данные из источника [3]	—	—	—	—	2,06	—	128,65	—
Сварка под слоем флюса								
Данные из источника [6]	—	—	—	—	0,5	—	152	—

Рис. 4. Гистограммы и выравнивающие их кривые, полученные для угловых швов при ручном способе сварки: а — распределения радиусов ρ ; б — распределения углов θ

источников для угловых швов, произведенных ручной дуговой сваркой, а кроме того, для таких же швов, полученных сваркой в среде углекислого газа и под слоем флюса, представлены в табл. 3.

Из изложенных выше исследований вытекает, что использование логнормального закона для описания распределения радиусов и углов в месте перехода от основного к наплавленному металлу показывает удовлетворительное соответствие экспериментальным данным по критериям согласия Пирсона, Андерсона-Дарлинга и Колмогорова-Смирнова. Наибольшим средним радиусом в месте перехода от металла шва к основному металлу в случае стыковых соединений обладают швы, выполненные ручной дуговой сваркой. Влияние типа покрытия электрода для стыкового сварного шва, полученного ручной дуговой сваркой в нижнем положении на средние радиусы и углы перехода, было значительным лишь при использовании электродов с рутиловым покрытием. Для стыковых швов, выполненных ручной дуговой сваркой в вертикальном

положении, средние величины ρ и θ , соответствующие каждому из использованных в исследовании типу покрытий, существенно разнились. Среднее значение радиуса ρ в предполагаемых точках появления трещины в сварных стыковых швах было значительно меньше среднего значения ρ , рассчитанного на основании замеров ρ по длине сварных швов в различных сечениях. При сварке в среде углекислого газа средний радиус в точках появления трещины практически не отличался от среднего ρ , полученного замерами по длине шва. Средняя величина угла θ для стыковых и угловых швов изменялась в зависимости от параметров соединения и условий изготовления в узких пределах и практически не зависела от механических характеристик металла. Данное обстоятельство может быть использовано в дальнейших исследованиях для упрощения расчетов.

ВЫВОДЫ. 1. Рассчитанные параметры логнормального распределения, математические ожидания и среднеквадратичные отклонения радиусов и углов наклона профиля шва в месте перехода

от основного металла к металлу шва для стыковых швов, выполненных ручной дуговой сваркой, были следующими: $\lg \rho_0 = -7,76 \cdot 10^{-3}$; $\sigma_{\lg \rho} = 0,47$; $\lg \theta_0 = 1,39$; $\sigma_{\lg \theta} = 0,26$; $M_\rho = 1,77$ мм; $\sigma_\rho = 2,64$ мм; $M_\theta = 29,28$ град.; $\sigma_\theta = 18,91$ град. Для стыковых швов, полученных сваркой в среде углекислого газа, рассчитанные значения были такими: $\lg \rho_0 = -0,67$; $\sigma_{\lg \rho} = 0,28$; $\lg \theta_0 = 1,59$; $\sigma_{\lg \theta} = 0,15$; $M_\rho = 0,26$ мм; $\sigma_\rho = 0,19$ мм; $M_\theta = 41,32$ град.; $\sigma_\theta = 14,93$ град (сварка в среде углекислого газа, однако, в настоящее время вытеснена сваркой в газовых смесях и порошковыми проволоками). В случае угловых швов, произведенных ручной дуговой сваркой, полученные в результате расчетов величины были следующими: $\lg \rho_0 = -0,29$; $\sigma_{\lg \rho} = 0,36$; $\lg \theta_0 = 2,15$; $\sigma_{\lg \theta} = 0,04$; $M_\rho = 0,72$ мм;

$\sigma_\rho = 0,72$ мм; $M_\theta = 141,49$ град.; $\sigma_\theta = 14,34$ град. Стыковой шов, выполненный сваркой под слоем флюса, рассмотренный в [16], имел такие средние значения и среднеквадратичные отклонения ρ и θ : $M_\rho = 0,67$ мм; $\sigma_\rho = 0,76$ мм; $M_\theta = 45$ град.; $\sigma_\theta = 11,2$ град. Угловой шов, произведенный сваркой под слоем флюса, рассмотренный в [6], обладал такими средними микрогеометрическими параметрами: $M_\rho = 0,5$ мм; $M_\theta = 152$ град.

2. Полученные результаты могут быть использованы для ориентировочных расчетов концентрации напряжений в сварных узлах судового корпуса для решения задач усталостной прочности сварных судокорпусных узлов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Львовский, Е. Н.** Статистические методы построения эмпирических формул [Текст] : учеб. пособие для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. / Е. Н. Львовский. — М. : Высш. шк., 1988. — 239 с.
- [2] **Махненко, В. И.** Расчет коэффициентов концентрации напряжений в сварных соединениях со стыковыми и угловыми швами [Текст] / В. И. Махненко, Р. Ю. Мосенкис // Автоматическая сварка. — 1985. — № 8. — С. 7–18.
- [3] **Chen, T.** Fatigue Test on Out-of-Plane Gusset Welded Joints Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer Materials [Text] / T. Chen, Q. Q. Yu, X. L. Gu, X. L. Zhao // APFIS 2012 — The Third Asia-Pacific Conference on FRP in Structures. — Hokkaido, Japan, February 2–4, 2012.
- [4] **Kawai, S.** Effects of Ground and Peened on Fatigue Strength of Welded joint under High Mean Stresses [Text] / S. Kawai, K. Koibuchi // J. Jap. Weld. Soc. — 1975. — № 7. — P. 62–69.
- [5] **Kawai, S.** Effects of Finishes of Weld Toe on Fatigue Strength of Welded High Strength Steels [Text] / T. Miyamoto, T. Shiono, S. Saikawa // J. Jap. Weld. Soc. — 1979. — № 9. — P. 44–51.
- [6] **Lassen, T.** The Effect of the Welding Process on the Fatigue Crack Growth [Text] / T. Lassen // Welding journal Research Supplement. — AWS, Feb. 1990. — Vol. 69. — No. 2. — P. 75s–85s.
- [7] **Makhnenko, V. I.** Strength Calculation of Welded Joints with Crack-Like Imperfections [Text] / V. I. Makhnenko, V. E. Pochynok. — Kiev : E. O. Paton Electric Welding Institute, 2006. — 266 p.
- [8] **Masayoshi, H.** Effect of Strong Shot Peening Cleaning and Hot Galvanizing on Fatigue Strength of Steel Welded Joint [Text] / H. Masayoshi, S. Hiroaki, K. Ken // J. Jap. Weld. Soc. — 2007. — № 4. — P. 486–493.
- [9] **Masumoto, I.** Fatigue Strength of the Welded Joints by Various Coated Electrodes [Text] / I. Masumoto, T. Shinoda, N. Tajima // J. Jap. Weld. Soc. — 1975. — № 3. — P. 26–35.
- [10] **Masumoto, I.** Fatigue Strength of Welded Joints by CO₂ Welding [Text] / I. Masumoto, T. Shinoda, K. Suzuki // J. Jap. Weld. Soc. — 1976. — № 10. — P. 62–69.
- [11] **Miki, Ch.** Early stage propagation behavior of fatigue cracks in fillet welded joints [Text] / M. Sakano, Y. Toyoda, T. Yoshizawa // Structural Eng./Earthquake Eng. — April 1990. — Vol. 7. — No. 1. — P. 123s–131s.
- [12] **Nihei, M.** Statistical Analysis for Correlation Between the Scatter of Fatigue Strengths and that of the Reinforcement Shape of SM50A Butt Welded Joint [Text] / M. Nihei, E. Sasaki // J. Jap. Weld. Soc. — 1976. — № 1. — P. 54–60.
- [13] **Petrovic, Z. D.** Fatigue strength assessment of welded joints by using notch stress approach [Text] / Z. D. Petrovic // 13th International Research Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology". — Hammamet, Tunisia, 2009. — P. 509–512.
- [14] **Sakano, M.** Long life fatigue behavior of fillet welded joint in corrosive environment [Text] / M. Sakano, H. Arai, T. Nishimura // Structural Eng. / Earthquake Eng. — October 1989. — Vol. 6. — No. 2. — P. 365s–373s.
- [15] **Takahashi, K.** Effect of External Geometry of Reinforcement on the Fatigue Strength of a Welded Joint [Text] / K. Takahashi, I. Akinor // J. Jap. Weld. Soc. — 1971. — № 8. — P. 13–25.

- [16] **Terasaki, T.** Effect of factors in weld reinforcement of stress concentration factor [Text] / T. Terasaki, T. Akiyama, N. Yokoshima et al. // J. Jap. Weld. Soc. — 1982. — №9. — P. 66–72.
- [17] **Williams, H. E.** The effects of weld geometry on the fatigue behavior of welded connections [Text] / H. E. Williams, H. Ottsen, F. V. Lawrence, W. H. Munse. — Illinois : University of Illinois, August 1970. — 139 p.

© Л. І. Коростильов, Д. Ю. Литвиненко

Надійшла до редколегії 17.02.2015

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. *В. Ф. Квасницький*