

ОСОБЕННОСТИ СБОРКИ И МНОГОПРОХОДНОЙ СВАРКИ КОЛЬЦЕВЫХ СТЫКОВ ТОЛСТОСТЕННЫХ ОБЕЧАЕК

И. А. ТАРАРЫЧКИН, канд. техн. наук (Восточноукр. нац. ун-т, г. Луганск)

Рассмотрены особенности образования систематических отклонений геометрии разделки кромок при наличии погрешностей сборки под сварку кольцевых стыков толстостенных обечаек. Компенсацию наблюдаемых по периметру стыка отклонений предлагается осуществлять путем программного изменения скорости подачи электродной проволоки в процессе многопроходной сварки. Установлены закономерности, в соответствии с которыми следует изменять скорость подачи проволоки для соединений различных типов.

Ключевые слова: автоматическая сварка, толстостенная обечайка, многопроходный шов, разделка кромок, погрешности сборки, дефекты, параметры режима, алгоритм заполнения разделки

При изготовлении химических аппаратов, теплообменников, парогенераторов возникает необходимость сварки кольцевых стыков толстостенных обечаек [1, 2]. В работе [3] отмечается, что при сварке крупногабаритных толстостенных стыков качество сварных соединений обуславливается точностью сборки изделий, а главным препятствием автоматизации многопроходной сварки толстого металла в условиях значительных колебаний по точности сборки и геометрических параметров разделки является отсутствие алгоритмов и программ заполнения разделки.

Точность сборки кольцевых стыков под сварку характеризуется углом φ , который образуют между собой их продольные оси (рис. 1). Наличие погрешностей сборки приводит к тому, что при сварке на режимах, не изменяемых в пределах одного оборота обечайки, в первую очередь будет заполнено сечение разделки с минимальной площадью. При этом противоположное сечение заполняется лишь частично. Например, для кольцевого стыка обечайки с толщиной стенки 120 мм (рис. 2) поле допуска сборочного зазора составляет 3 мм. Если в одном из сечений зазор отсутствует, а в противоположном составляет 3 мм, то изменение геометрии разделки кромок по периметру стыка приведет к тому, что после полного заполнения сечения с нулевым зазором в противоположном сечении уровень заполнения разделки составит 104,5 мм.

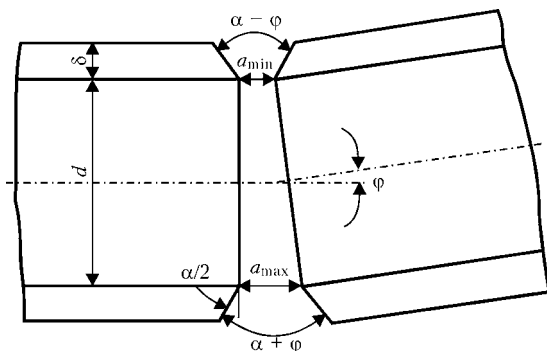


Рис. 1. Схема сборки под сварку кольцевого стыка обечайки

© И. А. Тарарычкин, 2005

Если высота отдельного слоя около 4 мм, то для заполнения оставшейся части разделки потребуется наплавить еще четыре слоя. Многократное прерывание и возобновление сварочного процесса в этом случае может сопровождаться образованием технологических дефектов в сварном шве.

Таким образом, обеспечение постоянного по периметру стыка уровня заполнения разделки, несмотря на наличие погрешностей сборки, является необходимым условием получения бездефектных кольцевых сварных соединений.

Постоянный уровень слоя в разделке можно обеспечить в том случае, если изменение площади наплавки отдельных валиков по периметру кольцевого стыка компенсирует наблюдаемое изменение площади поперечного сечения слоя. Такого рода схема заполнения разделки в дальнейшем рассматривается как компенсационная, а для ее реализации следует установить основные закономерности образования систематических отклонений геометрии разделки, возникающих при сборке и сварке кольцевых швов.

Целью настоящей работы является анализ особенностей образования систематических отклонений геометрии разделки кромок, обусловленных погрешностью сборки кольцевых стыков толстостенных обечаек, и разработка алгоритма их компенсации при автоматической многопроходной дуговой сварке.

Положение текущего поперечного сечения разделки кромок в процессе сварки можно характе-

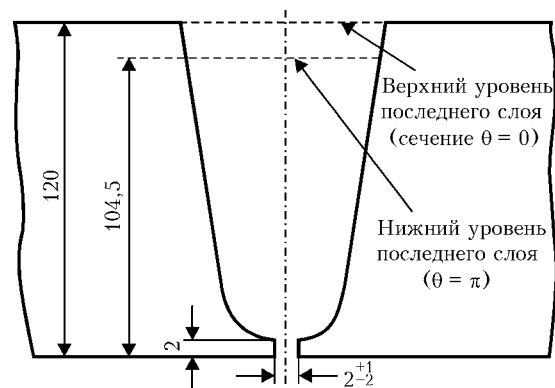


Рис. 2. Схема образования неравномерного по высоте разделки уровня слоя в результате погрешностей сборки



Таблица 1. Допускаемые значения характеристик геометрии разделки кромок для стыковых соединений различных типов

Тип соединения	δ , мм	a_{\max} , мм	a_{\min} , мм	Поле допуска для зазора в стыке, мм	$\alpha/2$, град
С 19, С 20	20...30	6,5	3,5	3	25 ± 3
С 34	40...60	2	0	2	10 ± 1
С 35	40...50	2	0	2	10 ± 2
С 36	До 60	3	1	2	13 ± 2
С 37	До 60	2	0	2	13 ± 2

Таблица 2. Допускаемые значения угла ϕ (град) для стыковых соединений различных типов

Тип соединения	d , м		
	0,5	1	2
С 19, С 20	0,34	0,17	0,09
С 34, С 35, С 36, С 37	0,23	0,11	0,06

ризовать углом θ , если за начало отсчета принять сечение, для которого сборочный зазор в стыке оказывается минимальным ($\theta = 0$). Тогда положение сечения с максимальной площадью разделки определяется как $\theta = \pi$.

Вращение обечайки, собранной под сварку, будет сопровождаться не только систематическим изменением сборочного зазора в стыке от a_{\min} до a_{\max} для сечений $\theta = 0$ и $\theta = \pi$, но и изменением угла раскрытия разделки в диапазоне от $\alpha - \phi$ до $\alpha + \phi$ (рис. 1). В табл. 1 приведены данные полей допусков для сборочных зазоров и углов раскрытия разделки кромок применительно к односторонним сварным соединениям в соответствии с требова-

ниями ГОСТ 8713-79. Для диапазона значений внутренних диаметров обечайки $d = 0,5 \dots 2$ м допускаемые значения угла ϕ приведены в табл. 2. Наибольшее значение угла $\phi/2$, приходящегося на одну кромку, составляет $0,17^\circ$, что характерно для соединений типа С 19, С 20 и оказывается пренебрежительно малым по сравнению с полем допуска на угол $\alpha/2 = 25 \pm 3^\circ$ (табл. 1).

Таким образом, изменение угла раскрытия разделки по периметру стыка в результате погрешностей сборки в дальнейшем можно не учитывать, а в качестве расчетной схемы, описывающей особенности изменения геометрии разделки при ее заполнении слоями постоянной высоты, можно использовать данные, приведенные на рис. 3. Изменение площади отдельного слоя по периметру разделки можно оценить, рассмотрев два противоположных сечения: $\theta = 0$ и $\theta = \pi$ (рис. 3). Если высота каждого слоя остается постоянной ($h = \text{const}$), то для k -го слоя отношение максимальной площади F_k^+ к минимальной F_k^- имеет вид

$$W_k = \frac{F_k^+}{F_k^-} = \frac{a_{\max} + h(2k-1)\text{tg} \frac{\alpha}{2}}{a_{\min} + h(2k-1)\text{tg} \frac{\alpha}{2}}$$

Как видно из табл. 3, для соединений типа С 19, С 20 наибольшее значение W_k достигает в первом слое ($W_1 = 1,57$). Это означает, что технологическое оборудование для сварки такого стыка должно обеспечивать возможность увеличения площади наплавки не менее чем на 60 %.

С помощью расчетной схемы, представленной на рис. 4, можно показать, что величина зазора в стыке при вращении обечайки изменяется по гармоническому закону

$$a(\theta) = a_{\min} + 0,5 (a_{\max} - a_{\min})(1 - \cos \theta).$$

Зависимость $W_k(\theta)$ для разделок различной формы позволяет установить закон изменения площади наплавки отдельных валиков при последовательном заполнении кольцевой разделки многопроходным швом. Для разделки кромок, представленной на рис. 3, это соотношение имеет вид

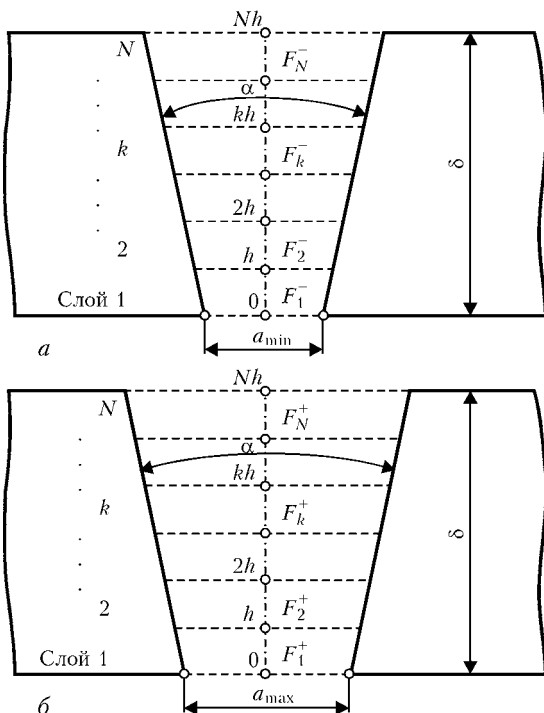


Рис. 3. Расчетная схема для определения соотношения площади слоя в различных поперечных сечениях разделки кромок: а — сечение $\theta = 0$; б — π

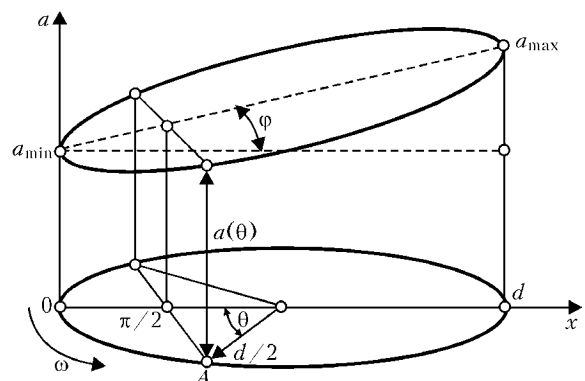


Рис. 4. Расчетная схема для определения текущего зазора в стыке $a(\theta)$ при повороте обечайки, собранной под сварку, на угол θ от начального положения

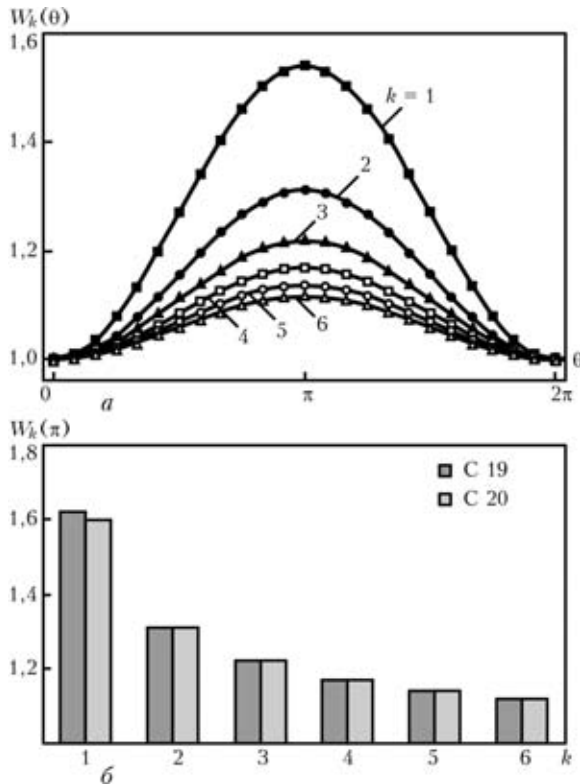


Рис. 5. Расчетные значения $W_k(\theta)$ для соединений типа С 19 (а) и зависимости $W_k(\pi)$ от номера слоя k для допустимых значений зазора в стыке $a_{max} = 6,5$, $a_{min} = 3,5$ мм (б)

$$W_k(\theta) = 1 + \frac{0,5(a_{max} - a_{min})(1 - \cos \theta)}{a_{min} + h(2k - 1) \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}$$

Зависимость показывает, во сколько раз следует увеличить площадь наплавки отдельного валика, принадлежащего k -му слою, при повороте обечайки на угол θ по сравнению с начальным положением, для которого сборочный зазор в стыке минимален.

Рассмотрим соединение типа С 19 при толщине стенки обечайки $\delta = 28$ мм. Если принять количество выполняемых слоев $N = 6$, то высота отдельного слоя $h = 4,42$ мм (табл. 3). Как видно из рис. 5, в наибольшей степени варьировать площадь наплавки отдельных валиков следует при сварке первого слоя. По мере заполнения разделки (с увеличением значений k) разница в площадях наплавки для противоположных сечений $\theta = 0$ и

Таблица 3. Расчетные значения W_k для стыковых соединений с V-образной разделкой кромок для С 19, С 20

Номер слоя k	$N = 7, h = 3,79$ мм	$N = 6, h = 4,42$ мм	$N = 5, h = 5,3$ мм
1	1,57	1,54	1,50
2	1,34	1,31	1,28
3	1,24	1,22	1,19
4	1,19	1,17	1,14
5	1,16	1,14	1,12
6	1,13	1,12	—
7	1,11	—	—

Примечание. $a_{min} = 3,5$; $a_{max} = 6,5$ мм; $\delta = 28$ мм.

$\theta = \pi$ уменьшается, а значение $W_k(\pi)$ снижается от 1,54 для $k = 1$ до 1,12 для $k = 6$. Если учесть наличие притупления кромок и необходимость заполнения зазора присадочным металлом, то значение $W_1(\pi) = 1,62$ (для соединения С 19) и 1,60 (для С 20) (рис. 5, б).

При анализе комбинированной формы разделки кромок нижнюю и верхнюю части следует рассматривать отдельно. Если нижняя часть заполняется с помощью двух слоев, то зависимость имеет вид

$$W_k(\theta) = 1 + \frac{0,5(a_{max} - a_{min})(1 - \cos \theta)}{a_{min} + \Omega_k}$$

Значения Ω_1 и Ω_2 (рис. 6) зависят только от формы нижней части разделки. При заполнении верхней части значения Ω_k ($k = 3, 4, \dots, N$) необходимо принимать в соответствии с данными табл. 4. Следует отметить, что параметр $W_k(\theta)$ изменяется по гармоническому закону для любой формы разделки кромок и номера слоя k . Так, если в результате выполнения контрольных операций для кольцевого стыка обечайки толщиной 48 мм, собранного под сварку (соединение С 35), установлены значения $a_{min} = 0,2$ и $a_{max} = 1,8$ мм, то для $k = 1, 2$ параметр $W_k(\theta)$ имеет вид

$$W_1(\theta) = 1 + 0,12(1 - \cos \theta),$$

$$W_2(\theta) = 1 + 0,05(1 - \cos \theta),$$

а для $k = 3, 4, \dots, N$

$$W_k(\theta) = 1 + \frac{0,8(1 - \cos \theta)}{16 + 0,18h(2k - 5)}$$

Как видно из рис. 7, независимо от формы разделки наиболее существенным образом корректировать параметры режима по периметру разделки необходимо при сварке первого слоя. При этом наибольшая вариация площади наплавки валиков первого слоя характерна для ступенчатой разделки (~80%), а наименьшая — для U-образной (~30%).

Изменение площади наплавки валика в процессе заполнения разделки возможно в результате совместного или отдельного изменения скорости сварки $v_{св}$ и скорости подачи электродной проволоки $v_{п.п.}$. При этом между площадью наплавки валика f и параметрами режима сварки существует зависимость [3]:

Таблица 4. Значения Ω_k для верхней части комбинированной разделки кромок соединений различных типов

Тип соединения	δ , мм	Ω_k ($k = 3, 4, \dots, N$), мм
С36, С37	≤ 60	$16 + 0,23h(2k - 5)$
С34	≤ 40	$11,7 + 0,21h(2k - 5)$
	40...60	$15,8 + 0,18h(2k - 5)$
С35	≤ 40	$11,7 + 0,21h(2k - 5)$
	40...60	$15,8 + 0,18h(2k - 5)$

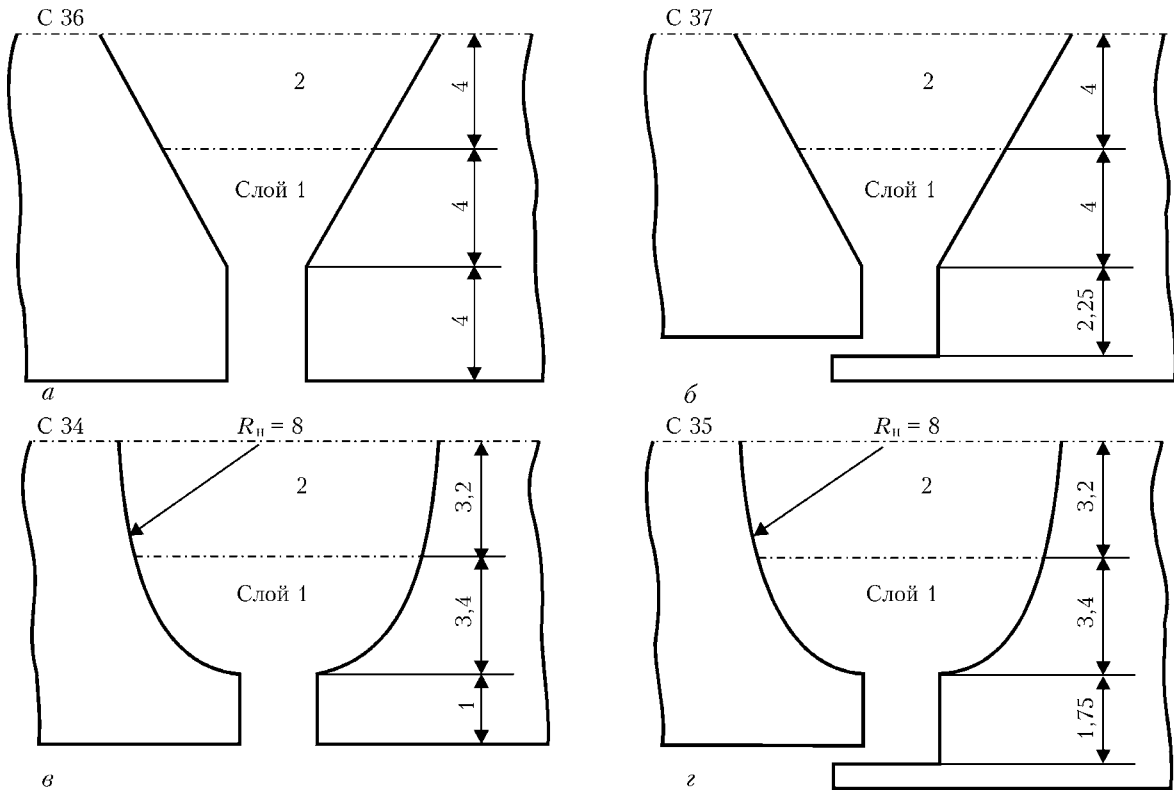


Рис. 6. Расчетные характеристики нижней части комбинированных разделок для различных типов соединения: а – $a_{\max} = 3$ мм; $a_{\min} = 1$ мм; $\Omega_1 = 2$ мм; $\Omega_2 = 12$ мм; $W_1(\pi) = 1,67$; $W_2(\pi) = 1,15$; б – $a_{\max} = 2$ мм; $a_{\min} = 0$ мм; $\Omega_1 = 2,56$ мм; $\Omega_2 = 12$ мм; $W_1(\pi) = 1,78$; $W_2(\pi) = 1,17$; в – $a_{\max} = 2$ мм; $a_{\min} = 0$ мм; $\Omega_1 = 7,27$ мм; $\Omega_2 = 14,7$ мм; $W_1(\pi) = 1,28$; $W_2(\pi) = 1,14$; з – $a_{\max} = 2$ мм; $a_{\min} = 0$ мм; $\Omega_1 = 6,21$ мм; $\Omega_2 = 14,7$ мм; $W_1(\pi) = 1,32$; $W_2(\pi) = 1,14$

$$f = \frac{\pi d_3^2}{4} \frac{v_{\text{п.п}}}{v_{\text{св}}} (1 - \Psi_L),$$

где d_3 – диаметр электродной проволоки; Ψ_L – коэффициент потерь электродного металла.

Поскольку при сварке кольцевых стыков угловая скорость вращения обечайки остается постоянной ($\omega = \text{const}$), постепенное вертикальное перемещение горелки от слоя к слою сопровождается увеличением скорости сварки. Так, при сварке обечайки с внутренним диаметром 1 м и тол-

щиной стенки 100 мм скорость сварки при переходе от первого слоя к последнему увеличится примерно на 12 %. Поэтому закон изменения скорости подачи электродной проволоки должен быть связан не только с изменением геометрии разделки кромок в пределах одного слоя, но и с наблюдаемым систематическим изменением скорости сварки при переходе от слоя к слою.

Скорость сварки при выполнении первого слоя кольцевого шва $v_1 = 0,5\omega d$, а k -го слоя

Таблица 5. Расчетные значения коэффициента Λ_k для обечайек диаметром 0,5 и 2 м с различной толщиной стенки

Номер слоя k	С 19, С 20 $N = 6, \delta = 28$ мм, $h = 4,42$ мм		С 36 $N = 12, \delta = 58$ мм, $h = 4,6$ мм		С 37 $N = 12, \delta = 58$ мм, $h = 4,85$ мм		С 34 $N = 12, \delta = 58$ мм, $h = 5,04$ мм	
	d , мм							
	0,5	2	0,5	2	0,5	2	0,5	2
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1,04	1,01	1,05	1,01	1,04	1,01	1,03	1,01
3	1,06	1,02	1,07	1,02	1,06	1,01	1,05	1,01
4	1,08	1,02	1,09	1,02	1,08	1,02	1,07	1,02
5	1,10	1,02	1,1	1,03	1,10	1,02	1,09	1,02
6	1,11	1,03	1,12	1,03	1,11	1,03	1,11	1,03
7	–	–	1,14	1,04	1,14	1,03	1,13	1,03
8	–	–	1,16	1,04	1,15	1,04	1,15	1,04
9	–	–	1,18	1,04	1,17	1,04	1,17	1,04
10	–	–	1,20	1,05	1,19	1,05	1,19	1,05
11	–	–	1,21	1,05	1,21	1,05	1,21	1,05
12	–	–	1,23	1,06	1,23	1,06	1,23	1,06

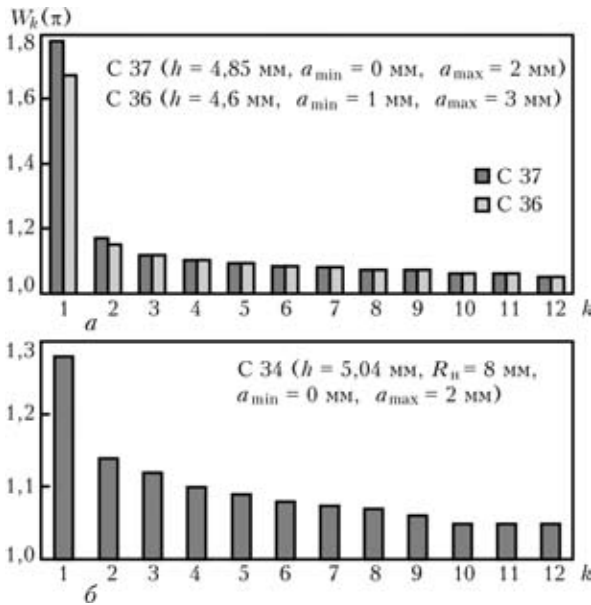


Рис. 7. Зависимость $W_k(\pi)$ от номера слоя ($N = 12, \delta = 58$ мм) для ступенчатой (а) и U-образной разделки (б)

$$v_k = \omega[0,5d + \delta - h(N - k)] \quad (k = 2, 3, \dots, N),$$

или

$$v_k = v_1 \Lambda_k,$$

где

$$\Lambda_k = 1 + \frac{\delta - h(N - k)}{0,5d}.$$

Соответственно для $k = 1$ принимаем $\Lambda_1 = 1$.

Коэффициент Λ_1 показывает, во сколько раз возрастет скорость сварки при выполнении k -го слоя по сравнению с первым, если в верхней части разделки все слои имеют высоту h . Как видно из табл. 5, увеличение скорости сварки в некоторых случаях может превышать 20 %.

Площадь валика, наплавляемого в k -м слое:

$$f_k = \frac{\pi d_{\vartheta}^2}{4} (1 - \psi_L) \frac{v_{п.п}}{v_1 \Lambda_k}.$$

Закон изменения скорости подачи электродной проволоки в процессе заполнения разделки имеет вид

$$v_{п.п}(k, \theta) = \frac{4f_1 v_1}{\pi d_{\vartheta}^2 (1 - \psi_L)} \vartheta_k \Lambda_k W_k(\theta),$$

где f_1 — площадь наплавки валика в начальном сечении первого слоя; $\vartheta_k = f_k / f_1$ — характеристика начального сечения разделки, показывающая во сколько раз площадь валика, наплавленного в k -м слое, больше чем в первом.

Таким образом, при многопроходной сварке кольцевых стыков толстостенных обечаек оптимальной является стратегия заполнения разделки слоями постоянной высоты с параметрами режима, изменяемыми в пределах каждого слоя по гармоническому закону.

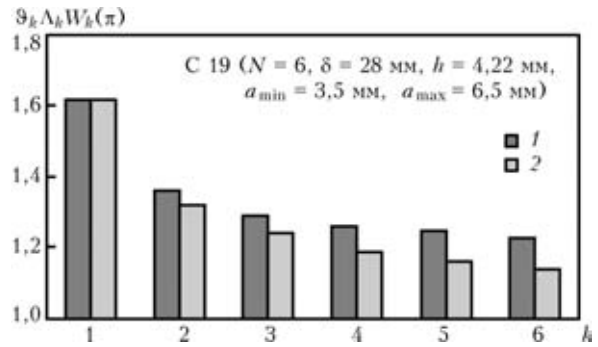


Рис. 8. Зависимость произведения $\vartheta_k \Lambda_k W_k(\pi)$ от номера слоя k для обечаек диаметром 0,5 (1) и 2 (2) м

Произведение $\vartheta_k \Lambda_k W_k(\pi)$ показывает во сколько раз следует увеличить скорость подачи электродной проволоки в сечении с максимальным сборочным зазором $\theta = \pi$ при выполнении k -го слоя по сравнению с начальным сечением первого слоя ($\theta = 0, k = 1$).

На рис. 8 приведены расчетные зависимости произведения $\vartheta_k \Lambda_k W_k(\pi)$ от номера слоя k для обечаек диаметром 0,5 и 2 м с односторонней V-образной разделкой кромок, заполнение которой производится слоями постоянной высоты, а все валики в начальном сечении имеют неизменную площадь наплавки ($\vartheta_k = 1$). Принятые значения максимального и минимального зазора в стыке соответствуют предельно допускаемым для соединения типа С 19 (см. табл. 1).

Поскольку увеличение скорости сварки для обечайки толщиной 28 мм не превышает 11 % (табл. 6), а все валики в начальном сечении имеют одну и ту же площадь, то установленный закон изменения скорости подачи проволоки позволяет

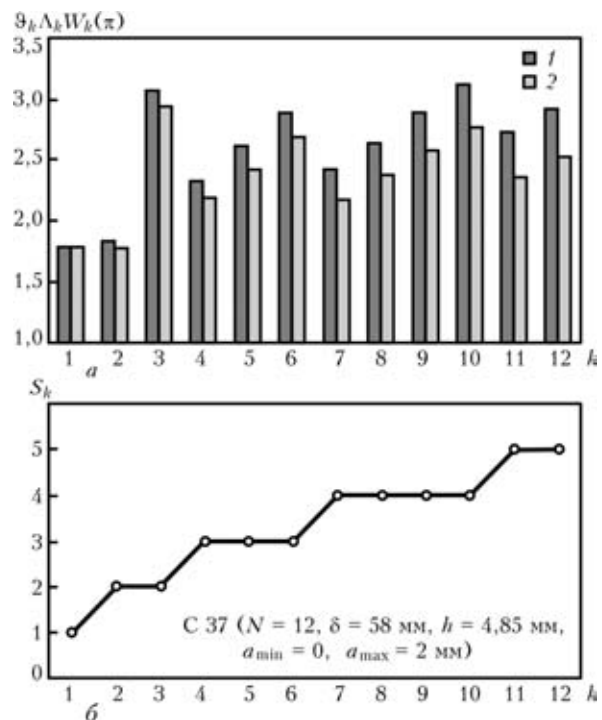


Рис. 9. Зависимость произведения $\vartheta_k \Lambda_k W_k(\pi)$ от номера слоя для обечаек диаметром 0,5 (1) и 2 (2) м (а) и соответствующая $S_k - k$ диаграмма, описывающая схему заполнения разделки кромок (б)



Таблица 6. Расчетные значения параметров процесса многопроходной сварки (соединение типа С 37, $v_i = 6$ мм/с, $d_0 = 3$ мм, $(1 - \psi_L) = 0,98$, $\delta = 0,5$ м, $N = 12$, $\delta = 58$ мм, $h = 4,85$ мм, $a_{\min} = 0,6$ мм, $a_{\max} = 1,8$ мм)

Номер слоя k	Количество валиков в k -м слое, S_k	Площадь валика в k -м слое начального сечения f_k , мм ²	$\frac{4f_k v_i \vartheta_k \Lambda_k}{\pi d_0^2 (1 - \psi_L)}$, мм/с	Закон изменения скорости подачи электродной проволоки $v_{п.п}(k, \theta)$, мм/с	Максимальная скорость подачи проволоки в k -м слое $v_{п.п}(k, \pi)$, мм/с
1	1	19,75	17,1	$20,35 - 3,25 \cos \theta$	23,60
2	2	25,2	22,74	$23,88 - 1,14 \cos \theta$	25,02
3	3	28,6	26,33	$27,23 - 0,9 \cos \theta$	28,13
4	3	32,2	30,09	$30,99 - 0,9 \cos \theta$	31,89
5	3	35,9	34,20	$35,12 - 0,92 \cos \theta$	36,04
6	4	29,6	28,56	$29,27 - 0,71 \cos \theta$	30,00
7	4	32,3	31,81	$32,51 - 0,7 \cos \theta$	33,21
8	4	35	34,88	$35,61 - 0,73 \cos \theta$	36,34
9	5	30,17	30,61	$31,19 - 0,58 \cos \theta$	31,77
10	5	32,33	33,35	$33,95 - 0,6 \cos \theta$	34,55
11	5	34,5	36,25	$36,87 - 0,62 \cos \theta$	37,49
12	6	30,6	32,66	$33,18 - 0,52 \cos \theta$	33,70

в основном компенсировать наблюдаемое изменение площади сечения отдельного слоя по периметру разделки. Однако принятая для этого случая схема раскладки валиков имеет ряд существенных недостатков, связанных со сложностью обеспечения качества сварных соединений. Более предпочтительным следует считать вариант заполнения разделки, при котором площадь поперечного сечения отдельных валиков f_k для начального сечения остается неизменной только в пределах одного слоя.

Зависимость произведения $\vartheta_k \Lambda_k W_k(\pi)$ от номера слоя k для обечаек диаметром 0,5 и 2 м с толщиной стенки $\delta = 58$ мм приведена на рис. 9, а. Схема раскладки валиков соответствует данным рис. 9, б, где S_k — количество валиков в k -м слое с площадью наплавки $f_k = F_k^- / S_k$. При этом в пределах отдельного слоя для начального сечения принимается $f_k = \text{const}$. Видно, что принятая схема заполнения разделки связана с необходимостью увеличения скорости подачи электродной проволоки в процессе заполнения разделки более чем в 3 раза.

Задача выбора оптимальной схемы заполнения разделки кромок не имеет однозначного решения [3], поэтому в зависимости от конкретных условий сборки разделка может быть заполнена с использованием различных схем. При этом требуемый диапазон изменения скорости подачи электродной проволоки должен быть обеспечен имеющимся технологическим оборудованием. Например, если после сборки под сварку обечайки диаметром 0,5 м по результатам контрольных операций для сое-

динения С 37 установлены значения зазора в стыке: $a_{\min} = 0,6$ и $a_{\max} = 1,8$ мм, то они в соответствии с ГОСТ 8713-79 рассматриваются как допусковые (см. табл. 1).

Процесс сварки следует начинать, установив обечайку в положение, при котором дуга зажигается в начальном сечении с минимальным зазором $\theta = 0$. Результаты расчетов и рекомендуемая схема заполнения разделки для этого случая приведены в табл. 6, где указан также алгоритм, в соответствии с которым следует изменять скорость подачи электродной проволоки при сварке. Кроме того, для принятой схемы заполнения разделки можно указать максимальную и минимальную скорость подачи электродной проволоки ($v_{п.п \min} = 17,1$, $v_{п.п \max} = 37,49$ мм/с) и тем самым установить требования к используемому сварочному оборудованию.

Таким образом, предложенные расчетные зависимости позволяют на основе компенсационного подхода решать задачу обеспечения качества кольцевых швов толстостенных обечаек путем предварительного выбора схемы раскладки валиков и программного изменения параметров режима в процессе многопроходной сварки.

1. Панков В. В., Чернышев Г. Г., Козлов Н. Е. Математическая модель оптимизации многослойной сварки под флюсом корпусного оборудования энергетических установок // Свароч. пр-во. — 1987. — № 7. — С. 34–37.
2. Куркин С. А., Ховов В. М., Рыбачук А. М. Технология, механизация и автоматизация производства сварных конструкций: Атлас. — М.: Машиностроение, 1989. — 328 с.
3. Березовский Б. М. Математические модели дуговой сварки: В 3 т. — Т. 2. Математическое моделирование и оптимизация формирования различных типов сварных швов. — Челябинск: ЮУрГУ, 2003. — 601 с.

Considered are the features of development of systematic deviations of edge geometry in the presence of errors of assembly for welding of circumferential butt joints of thick-walled shells. It is proposed to compensate for deviations observed around the butt perimeter by a programmed change of the electrode wire feed rate in multipass welding. Regularities of variation of the wire feed rate for different types of joints are established.

Поступила в редакцию 24.02.2005