



Рис. 2. Схема разметки биметаллической заготовки из стали 09Г2С + титан Вt1-0 под вырезку трубной доски и образцов для исследования

линейные размеры биметаллических заготовок. Как оказалось, эти размеры стали больше исходных на 30...40 мм (рис. 2), что свидетельствует об образовании в процессе высокоскоростного нагружения свариваемых металлов больших пластических продольных деформаций.

Из части образцов изготовлены микрошлифы для замера параметров волн, образовавшихся на поверхности соединения сталь + титан в процессе соударения свариваемых слоев. Результаты измерений размера этих волн по длине приведены в табл. 1. Из таблицы видно, что с увеличением расстояния L от места начала соударения пластин происходит рост общего среднего значения длины волны от $\lambda \approx 0,8$ мм в начальной зоне сварки до $\lambda \approx 1,1$ мм в условно средней зоне сварки и до $\lambda \approx 1,4$ мм на конечном ее участке. Известно [1, 2], что $\lambda \sim \sin^2(\gamma/2)$, если $\delta_2 \gg \delta_1$ (в нашем случае $\delta_2 = 12\delta_1$). Тогда, полагая $\lambda \approx 0,8$ мм соответствующей начальному углу соударения, можно легко найти углы соударения, соответствующие средней зоне сварки и конечному ее участку, если известен начальный угол соударения. Для его оценки проведен опыт по метанию пластины с использованием методики [3]. При этом использовали титановую пластину размером 500×300×5 мм. Заряд толщиной $H = 50$ мм состоял из ВВ того же состава, что и при плакировании заготовок трубных досок. Плотность ВВ составляла приблизительно 0,9 г/см³, скорость детонации $D \approx 2500$ м/с. Измерения показали, что при дистанции разгона 4 мм угол поворота β (см. рис. 1) титановой пластины равен около 11,8°. Поэтому считаем, что начальный угол соударения $\gamma = 11,8^\circ$. Но тогда несложно показать, что в средней зоне $\gamma = 13,6^\circ$, а на конечном

участке $\gamma = 15,3^\circ$. Интересно отметить, что если для нахождения длины ударной волны применить хорошо известную формулу из [2] $\lambda = A\delta_1 \sin^2(\gamma/2)$, то в нашем случае коэффициент пропорциональности A должен быть равным 16.

Расчет сварочных зазоров, которые должны соответствовать найденным углам соударения в средней и конечной зонах сварки, показал, что $h \approx 7$ мм при $\gamma = 13,6^\circ$ и $h = 11$ мм при $\gamma = 15,3^\circ$. Вычисления проводили с использованием двухмерной модели [4, 5] при показателе политропы $k = 2,5$, для этого значения наблюдалось наилучшее совпадение экспериментальной кривой разгона с расчетным профилем метания пластины.

Кроме того, зазор можно вычислить с использованием уравнения движения, представленного в виде выражения

$$\Delta h = pt^2 / (2m_{пл}), \quad (1)$$

где p — давление в воздушной пробке; t — время; $m_{пл}$ — масса метаемой пластины, отнесенная к единице площади.

Исходя из результатов работы [6] и относительно низкой скорости детонации считаем, что влиянием облака мелкодисперсных металлических частиц обратного потока, возникающего при косом соударении пластин [7] на параметры воздушной пробки, можно пренебречь. Тогда, значения p и t находим из хорошо известных выражений газовой динамики применительно к решению задачи о поршне [8], которые имеют в данном случае следующий вид:

$$v_k^2 = (p - p_0)^2 \frac{2/\rho_0}{(k_b + 1)p + (k_b - 1)p_0}, \quad t = \frac{\rho_0 L}{\rho v_k},$$

где $p_0 \approx 1 \cdot 10^5$ Па — начальное давление; $\rho_0 \approx 1,3$ кг/м³ плотность воздуха; $k_b = 1,4$ — пока-

Таблица 1. Результаты измерения длины λ ударной волны (мм)

Зона сварки	L, м	1-я трубная решетка	2-я трубная решетка	Общее среднее значение
Начальная	0,1	0,80	0,80	≈ 0,8
	0,2	0,78	0,92	
	0,4	0,80	0,90	
		(среднее 0,79)	(среднее 0,87)	
Средняя	2,0	1,04	1,20	≈ 1,1
	2,1	1,00	1,18	
	2,2	—	1,20	
		(среднее 1,02)	(среднее 1,19)	
Конечная	2,6	1,20	1,60	≈ 1,4
	2,7	1,56	1,35	
	2,8	1,38	1,45	
	2,9	1,36	1,30	
	3,0	1,38	1,35	
			(среднее 1,38)	



Таблица 2. Результаты расчетов и измерения зависимости ширины сварочного зазора h от расстояния b от места начала соударения пластины

$L, м$	$t(t-28), мкс$	$h = h_0 + \Delta h, мм$		Относительное отклонение расчета от эксперимента, %
		Расчет по (1)	Эксперимент + + двухмерный расчет [4, 5]	
0	0	4	4	0
0,4	28 (0)	6 (4)	4	50 (0)
2,1	148 (120)	9 (7)	7	30 (0)
2,8	198 (170)	13 (10)	11	20 (10)

Примечания. 1. В скобках указаны значения соответствующих параметров при условии начала отсчета времени при $L = 0,4 м$. 2. $m_{пл} = 22,5 кг/м^2$; $p = 10 МПа$.

затель политропы воздуха; $\rho = \rho_0 \frac{(k_b + 1)p + (k_b - 1)p_0}{(k_b - 1)p + (k_b + 1)p_0}$ — плотность воздушной пробки. Для простоты будем брать расстояние L для средней и конечной зон сварки по его среднему значению — соответственно 2,1 и 2,8 м. В табл. 2 представлены оценочные значения сварочного зазора, определенные двумя указанными выше методами при различных значениях L . Из таблицы видно, что сходимость экспериментальных и расчетных данных резко увеличивается, если отсчет времени вести с $L = 0,4 м$. При этом для конечного участка сходимость расчетных данных с экспериментальными остается удовлетворительной как с учетом, так и без учета смещения по времени (28 мкс). Эти результаты свидетельствуют о том,

что в нашем случае плотная воздушная пробка, способная заметно смещать метаемую пластину, сформировалась, по-видимому, на определенном удалении от начала процесса соударения пластин. Можно полагать, что в начальной зоне сварки, длина которой составляет примерно 0,5 м, воздушная пробка либо отсутствует, либо находится на стадии зарождения (формирования), что требует дополнительного исследования. В остальном же экспериментальные и расчетные результаты хорошо согласуются с выводами работы [9].

1. Cowan G., Holtzman A. Flow configuration in colliding plates: explosive banding // J. Appl. Phys. — 1963. — 34, № 4. — P. 928–939.
2. О моделировании процесса волнообразования при сварке взрывом / А. А. Дерибас, В. М. Кудинов, Ф. И. Матвеевков, В. А. Симонов // Физ. горения и взрыва. — 1968. — № 1. — С. 100–107.
3. Кузьмин Г. Е., Мали В. И., Пай В. В. О метании плоских пластин слоями конденсированных ВВ // Там же. — 1973. — 9, № 4. — С. 558–562.
4. Кузьмин Г. Е. Применение численных методов в задачах прессования и сварки взрывом: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Новосибирск, 1978. — 145 с.
5. Кузьмин Г. Е. О метании пластин в условиях сварки взрывом // Механика взрывных процессов. Динамика сплошной среды. — 1977. — Вып. 29. — С. 137–142.
6. Ишуткин С. Н., Кирко В. И., Симонов В. И. Исследование теплового воздействия ударно-сжатого газа на поверхность соударяющихся пластин // Физ. горения и взрыва. — 1980. — 16, № 6. — С. 69–73.
7. Дерибас А. А., Захаренко И. Д. О поверхностных эффектах при косых соударениях металлических пластин // Там же. — 1974. — 10, № 3. — С. 409–421.
8. Овсянников Л. В. Лекции по основам газовой динамики. — М.: Наука, 1981. — 368 с.
9. Кудинов В. М., Коротеев А. Я. Сварка взрывом в металлургии. — М.: Металлургия, 1978. — 168 с.

Dependence of growth of the length of a shock wave formed within the joining zone between titanium and steel in explosion welding upon the path length of the detonation front has been studied. A simplified calculation model of the given process is suggested, based on an assumption that the key factor affecting increase in the shock wave length is expansion of the gap between the plates located in parallel, due to the impact on them by an air plug formed ahead of the contact point.

Поступила в редакцию 03.09.2009