

ТЕПЛОВЫЕ ЭФФЕКТЫ В ЗОНЕ СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ

И. Д. Захаренко, Т. М. Соболенко
(Новосибирск)

В работе [1] описана методика измерения температуры зоны сварного соединения и сделаны некоторые предположения, позволяющие определить количество тепла, выделяющегося в шве. Оценка ширины зоны, в которой выделяется тепло [1], показала, что эта ширина значительно меньше амплитуды волны при сварке взрывом.

Настоящая работа подтверждает предположение, сделанное в работе [1], о возможности расчета теплового режима сварного шва, где реальный источник тепла в поверхности шва заменен мгновенным. Приведены также эмпирические формулы, позволяющие с достаточной для практических целей точностью рассчитать тепловой режим шва при сварке взрывом, и сделана проверка этих расчетов методом металлографии.

Поскольку энергия Q_1 выделяется в малой окрестности точки контакта, интересно проанализировать возможную зависимость Q_1 от параметров соударения. В работе [2] был проведен анализ гидродинамической задачи о соударении струй сжимаемой жидкости в акустическом приближении. Было получено, что линейный размер зоны высокого давления определяется величиной радиуса кривизны свободной поверхности, задаваемой следующим соотношением:

$$R = \frac{2}{\pi} \sqrt{1 - \frac{U^2}{c_0^2}} \frac{2\delta_1 \delta_2}{\delta_1 + \delta_2} \sin^2 \frac{\gamma}{2}, \quad (1)$$

где U — скорость потока; c_0 — скорость звука в материале струй; δ_1 — толщина верхней струи; δ_2 — толщина нижней струи; γ — угол соударения.

Параметры соударения (γ и толщины пластин) входят в эту формулу точно так же, как в известную формулу волнообразования, которая в случае $\delta_2 = \infty$ имеет вид

$$\lambda = 26\delta_1 \sin^2 \frac{\gamma}{2}.$$

Из этих соображений можно предположить, что и в зависимость энергии Q_1 от параметров соударения, угол γ и толщины δ_1 и δ_2 будут входить таким же образом, как и в выражение R . Естественно также, что энергия в этой зоне будет определяться величиной ρU_k^2 , где ρ — плотность материала; U_k — скорость точки контакта.

Таким образом можно сконструировать эмпирическую формулу для расчета энергии, выделившейся в шве:

$$Q_1 = k V_k^2 \rho_1 \delta_1 \frac{\delta_2}{\delta_1 + \delta_2} \sin^2 \frac{\gamma}{2}. \quad (2)$$

Зная количество выделившегося тепла Q_1 для режима, приведенного в работе [1], получаем значение коэффициента $k = 6,8 \cdot 10^{-2}$. При расчете теплового режима сваренных пластин необходимо иметь в виду, что кроме тепла Q_1 , выделяющегося в узкой зоне на границе соединения, происходит выделение тепла по всей глубине материала за счет его деформации [3, 4].

Для оценки температуры образца после сварки взрывом предположим, что разность между кинетической энергией метаемой пластины

и кинетической энергией сваренных пластин полностью переходит в тепло и распределяется по толщине образца равномерно. При этом энергией, выделяющейся в шве, можно пренебречь, так как она составляет примерно 3% от кинетической энергии метаемой пластины. Тогда для количества тепла, выделившегося на единицу площади пластины Q_2 , можно записать выражение

$$Q_2 = \frac{1}{2} V_n^2 \rho_1 \delta_1 \left(\frac{\rho_2 \delta_2}{\rho_1 \delta_1 + \rho_2 \delta_2} \right). \quad (3)$$

В результате соударения температура образца возрастает на величину

$$\Delta T = \frac{Q_2}{c_1 \rho_1 \delta_1 + c_2 \rho_2 \delta_2},$$

где c — теплоемкость материала. Тепло Q_2 выделяется в момент соударения пластин одновременно с выделением Q_1 , поэтому при расчете теплового режима необходимо считать начальную температуру образца

$$T_0 = T_1 + \Delta T, \quad (4)$$

где T_1 — температура образца до соударения.

Итак, имеются все данные для расчета температуры в любом сечении сварного соединения по формуле, приведенной в работе [1].

$$T = T_0 + \frac{Q_1}{2c \rho \sqrt{\pi a^2 t}} e^{-\frac{x^2}{4a^2 t}}, \quad (5)$$

где T_0 и Q_1 вычисляются по формуле (4) и (2), a — коэффициент температуропроводности, x — расстояние от шва.

Для нахождения максимальной температуры, возникающей в сечении x в процессе остывания шва, исследуем функцию (5) на экстремум. Из условия $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ получаем $t = \frac{x^2}{2a^2}$. Подставляя данные значения в (5), получим выражение для T_{\max} в сечении x

$$T_{\max} = T_0 + \frac{Q_1}{2c \rho \sqrt{\pi/2} x} e^{-\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

На рисунке приведены кривые зависимости температуры от времени для стали, рассчитанные по формуле (5). При сварке взрывом на волновой поверхности в зоне вихрей, а иногда и вдоль всей поверхности соударения на металлографических шлифах наблюдаются структуры, обычно вызываемые предварительным расплавлением металла. Кроме того, вокруг расплавов и вблизи шва на расстоянии 5—50 м происходят рекристаллизационные процессы или отдых, а также возможны и некоторые другие явления. Были проанализированы некоторые режимы соударения двух однородных пластин медь — медь, сталь — сталь, дюраль — дюраль, титан — титан, нержавеющая сталь — нержавеющая сталь. Методика работы состояла в следующем.

По структурам, снятым при фотографировании шлифов, вырезанных из пластин известного режима сварки, замерялась суммарная площадь расплавов на всей длине зафиксированного участка. Такие замеры производились на нескольких фотографиях различных отрезков одной сварной пластины (от 3 до 8 участков). Затем вычислялась средняя толщина расплавленного слоя h , если бы он присутствовал на всей поверхности соударения равномерно, и разделялся пополам поверхностью соударения. Используя измеренную таким образом усредненную толщину

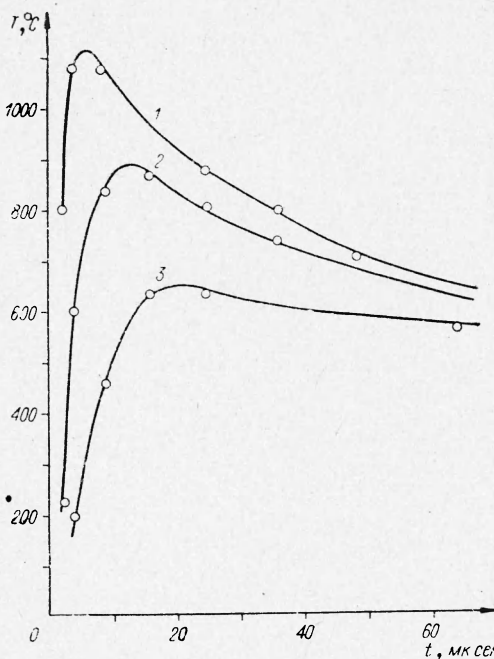
слоя у шва, переходившего в процессе соединения в расплавленное состояние, определялось минимальное количество тепла, необходимое для расплавления этого слоя без учета теплоотвода

$$Q = c m (T_1 - T_n) + \lambda m,$$

m — масса расплавляемого металла на 1 см^2 площади пластин; T_n — температура плавления; λ — удельная теплота плавления.

Рассчитанное таким образом количество тепла сопоставлялось количеством тепла, рассчитанным по формуле (2). Результаты расчетов и экспериментальных измерений приведены в таблице. Как видно из приведенных результатов, определенное экспериментально и рассчитанное по формуле (2) количество тепла находится в хорошем согласовании. Поскольку формула (6) дает возможность оценить максимальную температуру вблизи зоны соединения, было рассчитано максимальное состояние от поверхности соударения, на котором еще существовала температура плавления (см. таблицу). В данном случае также обнаружено достаточно хорошее соответствие расчетного и действительного (усредненного) слоя расплава, хотя формула (6) не учитывает фазовых переходов. Как отмечалось ранее, вокруг расплавов и зачастую вдоль всего шва существуют участки начальной рекристаллизации. Зерно на этих участках очень мелкое, но равновесное, с размером в среднем около 5 мк .

Измеренная и усредненная ширина зоны рекристаллизации сравнивалась с шириной зоны существования температуры T_2 , при которой



Кривые зависимости температуры от времени в стали для различных сечений при $Q_1 = 5 \text{ кал/см}^2$, $T_0 = 100^\circ \text{ С}$.

x , см: 1 — 10^{-3} ; 2 — $1,4 \cdot 10^{-3}$; 3 — $2 \cdot 10^{-3}$.

Материалы	Режимы соударения		δ_1 , мм	δ_2 , мм	Q_1 расчетное, кал/см ²	Q расплавов, кал/см ²	h , м			
	V_K , км/сек	γ					расплавов		рекристаллизации	
							расчетное	экспериментальное	расчетное	экспериментальное
Ст. 3 + Ст. 3	3,8	15° 30'	3	10	8,0	6,0	13	14	47	35
	2,25	18° 20'	3	10	4,3	2,9	7,3	7	26	30
Cu + Cu	2,2	16°	2,5	6	2,7	1,4	8	8	31	33
	1,86	21° 30'	1,4	2,5	2,4	1,3	7,1	5	—	—
Д16 + Д16	1,86	21° 30'	2,5	2,5	3,55	2,4	10	9,5	—	—
	3,2	17°	4	10	2,9	2,9	20	49	—	—
Нерж. + Нерж.	3,4	14° 20'	6	10	3,0	2,4	21	40	—	—
	4,5	13°	1	1	1,44	1,0	2,6	3	—	—
Ti + Ti	4	28°	1	1	3,2	3,5	1,8	2,9	—	—

еще теоретически возможен процесс рекристаллизации $T_2 = 0,4T_{\text{п}}$. Результаты расчетов и экспериментов также оказались близкими. Некоторые расхождения расчетов и наблюдений при определении ширины зоны рекристаллизации можно объяснить тем, что для прохождения рекристаллизационных процессов требуется определенное время. График зависимости температуры шва от времени, приведенный в работе [1], позволяет определить также скорость падения температуры в шве. Так, в интервале температур 700—350°С средняя скорость падения температуры в шве

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = 3,5 \cdot 10^6 \text{ град/сек.}$$

Очевидно, что при более высоких температурах в том же режиме соударения пластин эта скорость еще выше и намного превосходит скорости охлаждения во всех обычных процессах термообработки металлов. Это дает возможность ожидать в некоторых случаях появления в зоне шва структур металлов, которые не встречались ранее.

Поступила в редакцию
13/1 1971

ЛИТЕРАТУРА

1. И. Д. Захаренко. ФГВ, 1971, 7, 2.
2. S. K. Godunov, A. A. Deribas a. o. J. of Computational Physics. 1970, 5, 3.
3. С. К. Годунов, А. А. Дерibas и др. ФГВ, 1971, 7, 1.
4. И. П. Краснокутская и др. Физика и химия обработки материалов. 1969, 6.
5. А. А. Бочвар. Металловедение. Металлургиздат, 1948.

УДК 621.787

ОБ ИЗМЕНЕНИЯХ В СТРУКТУРЕ СЛЮД ПРИ ВЗРЫВНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

*Л. Д. Аникина, Д. К. Архипенко, Н. С. Вартанова,
Т. Н. Григорьева, В. И. Мали
(Новосибирск)*

Высокие давления и температуры, достигаемые в процессе прохождения сильных ударных волн по веществу, приводят к существенным изменениям его структуры. В качестве объекта исследования была выбрана слюда различного химического состава, кристаллохимические формулы которой приведены в табл. 1. Цилиндрические стальные или медные ампулы с наружным диаметром 10 мм, внутренним 5 мм и высотой полости 50 мм заполнялись предварительно растертой в порошок слюдой. Ампулы помещали вдоль оси цилиндрического заряда гексогена диаметром 150 мм. Процесс взрывного воздействия по такой методике подробно рассмотрен в работе [1].

При исследовании образцов слюды через оптический микроскоп выяснилось, что после взрыва получается неоднородное вещество как в поперечном, так и в продольном сечении ампулы. Исследованию подвер-