УДК 621.791.13

DOI: 10.35211/1990-5297-2021-11-258-5-11

С. В. Хаустов, канд. техн. наук, В. В. Пай, д-р физ.-мат. наук, Я. Л. Лукьянов*, с. н. с.,
С. В. Кузьмин, д-р техн. наук, В. И. Лысак, академик РАН, А. М. Андресян, магистрант*

**ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ПОДОГРЕВА ПОВЕРХНОСТИ
СОУДАРЯЮЩИХСЯ ПЛАСТИН УДАРНО-СЖАТЫМ ГАЗОМ В СВАРОЧНОМ ЗАЗОРЕ
ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ**

*Волгоградский государственный технический университет, weld@vstu.ru
* Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, pai@hydro.nsc.ru*

Разработана методика измерения теплового потока от ударно-сжатого газа впереди точки контакта к поверхности соударяемых пластин. Получены экспериментальные значения теплового потока, находящиеся в удовлетворительном согласии с теоретическими расчетами. Впервые экспериментально доказан значимый эффект предварительного подогрева пластин перед соударением для различных материалов, проявляющийся в нагревании поверхности пластин, в зависимости от их габаритов и свойств, до 1000 °C и выше.

Ключевые слова: сварка взрывом, ударно-сжатый газ, тепловой поток, термопарный метод

S. V. Khaustov, V. V. Pai, Ya. L. Lukyanov, S. V. Kuz'min, V. I. Lysak, A. M. Andresyan

**MEASURING THE PRE-HEATING TEMPERATURE OF THE PLATES SURFACE WITH IMPACT GAS
IN THE WELDING GAP DURING EXPLOSION WELDING**

*Volgograd State Technical University, weld@vstu.ru
* Lavrentyev Institute of hydrodynamics, SB RAS, Novosibirsk, pai@hydro.nsc.ru*

A technique for measuring the heat flux from the shock-compressed gas in front of the point of contact to the surface of the colliding plates has been developed. The experimental values of the heat flux are obtained, which are in satisfactory agreement with theoretical calculations. For the first time experimentally proved a significant effect of preheating of plates before collision for various materials. The effect consists in heating the surface of the plates, depending on their dimensions and properties, up to 1000 °C and above.

Keywords: explosion welding, shock-compressed gas, heat flux, thermocouple method

При сварке взрывом в газе, заполняющем сварочный зазор между пластинами, образуется ударная волна, распространяющаяся со скоростью U , большей, чем скорость точки контакта V_k . В результате перед точкой контакта образуется область ударно-сжатого газа (пробка), способная оказывать существенное влияние на тепловую ситуацию в зоне соединения [1]. Температура газа при скоростях V_k , применяемых при сварке взрывом (2000-3000 м/с), может достигать 3000-4000 К, а размер области ударно-сжатого газа и время его теплового воздействия на поверхности соударяемых пластин возрастает с увеличением их длины и с уменьшением V_k [2]. При этом параметры ударно-сжатого газа в сварочном зазоре можно с достаточной степенью точности рассчитать по ударной адиабате воздуха [3].

Качественная оценка температуры границы соединения при сварке взрывом в сечениях, находящихся на различном расстоянии от места начала сварки, проведенная авторами [4], показывает, что эффект предварительного подогрева ударно-сжатым газом проявляется уже при сварке пластин длиной от 0,4 м. Очевидно, что при сварке взрывом протяженных (крупногабаритных) пластин эффект предварительного подогрева соударяющихся поверхностей может приводить к увеличению количества оплавленного металла на границе соединения и, соответственно, к нестабильности его свойств. Расчетная оценка воздействия теплового потока от ударно-сжатого газа [5] показывает, что при сварке крупногабаритных листов (свыше 1-2 м), может происходить оплавление соударяемых поверхностей. При этом

толщина расплавленного слоя существенно зависит от степени механической обработки поверхностей (шероховатости) и может достигать десятков мкм.

Для количественной оценки теплового воздействия от ударно-сжатого газа необходимо экспериментальное измерение температуры поверхности пластин. С этой целью была разработана конструкция планарной

термобатареи для регистрации высокоинтенсивных тепловых потоков. На поверхности подложки 4 (см. рис. 1, а) размещена константановая фольга 2 толщиной 8 мкм, частично покрытая (электролитическим способом) медью 3 толщиной 2,5 мкм, таким образом, что образуется лента, состоящая из монометаллических (константан) и биметаллических частей (медь-константан) ча-

Рис. 1. Фрагмент из трех термопар (а) и внешний вид термобатареи из 250 термопар (б):

1 – защитный слой; 2 – константановая лента; 3 – медь; 4 – подложка (текстолит)

Рис. 2. Тарировочная кривая $\Delta T(U)$ термобатареи

стей. Каждый второй стык монометалла и биметалла покрыт защитным слоем 1, предохраняющим от теплового воздействия ударно-сжатого газа, и образует холодный спай термопары. Открытый стык является горячим спаем. Таким образом, монометаллическая и биметаллическая части ленты образуют одну термопару, а вся термобатарея (см. рис. 1, б) составлена из 250 термопар (10 рядов по 25 термопар в каждой). Толщина подложки 4 составляла 1 мм, а защитного слоя – 30 мкм.

Термо-ЭДС одной термопары рассчитывается по формуле [1]:

$$U(t) = \int_{T_k}^{T_r} \frac{(S_k - S_m)}{(1 + \sigma_k \delta_k / \sigma_m \delta_m)} dT, \quad (1)$$

где T_k , T_r – температуры «горячего» и «холодного» спаев соответственно; S , σ , δ – термоэлектрический коэффициент, проводимость и толщина соответствующего металла (индекс «к» – константан, «м» – медь).

Эффективное значение термоэлектрического коэффициента для одной термопары составляло ~ 37 мкВ/град, всей термобатареи $\sim 9,4$ мВ/град. Термобатарея перед экспериментом тарировалась в интервале температур 20 ... 100 °С (рис. 3).

Схема эксперимента показана на рис. 3. Для формирования области ударно-сжатого газа использовались медные пластины толщиной 1,5 мм и размерами 460 на 150 мм. В качестве взрывчатого вещества использовался плоский заряд высотой $H=15$ мм смеси

аммонита 6ЖВ с NaCl в соотношении 80/20 % масс. Скорость детонации измерялась электроконтактным методом с погрешностью измерения ± 5 %. Зазор между пластинами составлял 8 мм. Для исключения механического влияния на термобатарею облака металлических частиц за фронтом ударной волны в газе в нижней (неподвижной) пластине на расстоянии 400 мм от начала сварки вырезалось отверстие 50x80 мм, закрытое с тыльной стороны пластины изолятором, на котором размещалась термобатарея (см. рис. 3). При этом плоскость термобатареи была параллельна поверхности свариваемых пластин, что обеспечивало теплообмен с ударно-сжатым газом.

Измеренная скорость детонации составила $2,1 \pm 0,1$ км/с. На рис. 4 приведена осциллограмма термо-ЭДС с термобатареи. Как видно из осциллограммы, ударная волна в воздухе в сварочном зазоре последовательно накрывает ряды термопар, составляющих термобатарею, и нагревает ее, обеспечивая рост термо-ЭДС. Дальнейшее падение сигнала и выход его на полку обусловлен срывом защитной полимерной пленки и воздействием потока ударно-сжатого газа на «холодные» спаи. Таким образом, максимальный сигнал с термобатареи составил ~ 360 мВ, что соответствует (см. рис. 2) приросту средней температуры «горячих» спаев термобатареи $\Delta T \sim 39$ °С при времени воздей-

Рис. 3. Схема измерения теплового потока от ударно-сжатого газа при сварке взрывом медных пластин толщиной 1,5 мм ($V_k=2100$ м/с, сварочный зазор между пластинами $\delta=8$ мм)

Рис. 4. Осциллограмма зависимости напряжения (термо-ЭДС) от времени на термобатарее

ствия ударно-сжатого газа на термобатарее $\sim 3,6$ мкс.

Далее рассмотрим следующую одномерную задачу (см. рис. 5). На поверхности медного слоя в течении времени $t = 3,6$ мкс действует постоянный тепловой поток $q_{\text{экс}}$. За время действия теплового потока температура границы «медь-константан» повысится на $\Delta T = 39$ °C. За это же время константановая лента не успевает прогреться на всю толщину, а значит теплообменом константана с подложкой можно пренебречь ($q = 0$).

Для определения теплового потока $q_{\text{экс}}$ от ударно-сжатого газа к поверхности медных слоев термобатареи при известной темпера-

туре границы «медь-константан» решим обратную задачу теплопроводности, воспользовавшись методикой, описанной в [6]. Рассчитанный таким образом средний постоянный тепловой поток от ударно-сжатого газа составил $q_{\text{экс}} = 0,25$ ГВт/м².

Оценим параметры ударно-сжатого воздуха в зазоре из ударной адиабаты воздуха используя известные соотношения для одномерной задачи о сверхзвуковом движении поршня в трубе [3]:

$$D = \frac{k+1}{4} V_k + \sqrt{\left[\left(\frac{k+1}{4}\right) u_2\right]^2 + c_1^2}, \quad (2)$$

$$p_2 = \frac{2\rho_1 D^2}{k+1} - \frac{k-1}{k+1} p_1, \quad (3)$$

Рис. 5. К решению обратной задачи теплопроводности (нахождению теплового потока $q_{\text{экс}}$)

$$\rho_2 = \frac{\rho_1 D}{D - V_k}, \quad (4)$$

$$c_2 = \sqrt{k \frac{p_2}{\rho_2}}, \quad (5)$$

$$T_2 = \frac{p_2}{p_1} \left[\frac{(k+1)p_1 + (k-1)p_2}{(k+1)p_2 + (k-1)p_1} \right] T_1, \quad (6)$$

где D – скорость фронта ударной волны в газе; u_2 – массовая скорость за фронтом ударной волны; k – показатель политропы; $p_1, \rho_1, c_1, T_1, p_2, \rho_2, c_2, T_2$ – давление, плотность, скорость звука и температура невозмущенного газа (индекс «1») перед фронтом и сжатого газа (индекс «2») за фронтом ударной волны, соответственно.

Исходя из предположения о равенстве массовой скорости u_2 за фронтом ударной волны скорости точки контакта (поршня) V_k (равной скорости детонации), температура ударно-сжатого газа T_2 составила ~ 3500 К, давление за фронтом ~ 70 атм, скорость ударной волны $\sim 2,5$ км/с.

Конвективный тепловой поток из газа на поверхность пластин определим из уравнений [7-9]:

$$q_{\text{расч}} = St \rho_2 u_2 c_2 (T_* - T_{\text{п}}), \quad (7)$$

$$T_* = T_2 \left[1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right], \quad (8)$$

$$St = 1/8 [2 \lg(h/\Delta) + 1,74]^{-2}, \quad (9)$$

где T_* – температура торможения, обусловленная торможением сверхзвукового потока газа в тонком приграничном с пластиной слое; $T_{\text{п}}$ – температура поверхности пластины; M и St – числа Маха и Стентона (для турбулентного обтекания поверхности газовым потоком [8]); ρ_2, c_2, T_2 – плотность, теплоемкость и температура газа; h – сварочный зазор; Δ – средняя высота микронеровностей поверхности (шероховатость) медного слоя на термобатарее.

Рассчитанное по (2) – (9) при скорости точки контакта $V_k = 2,1$ км/с значение теплового потока $q_{\text{расч}}$ составило $\sim 0,1$ ГВт/м². Расхождение с экспериментально определенным тепловым потоком $q_{\text{экс}} = 0,25$ ГВт/м² может быть обусловлено тем, что в (7) не учтена радиационная составляющая теплового потока, не учтена ионизация газа в сва-

рочном зазоре, а также тем известным фактом, что в сварочном зазоре присутствует облако металлических частиц кумулятивного происхождения [2], имеющих скорость большую, чем скорость точки контакта и изменяющих свойства газа в зазоре (температуру, скорость ударной волны и пр.).

Для оценки эффекта предварительного подогрева поверхности было проведено численное моделирование процесса теплообмена между ударно-сжатым газом и пластинами толщиной δ из различных материалов. В расчете использовался экспериментально определённый тепловой поток из ударно-сжатого газа, теплофизические свойства металлов принимались постоянными и не зависящими от температуры.

Для одномерного случая система уравнений, описывающих процесс теплообмена имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad t > 0, \quad 0 < x < \delta, \quad (10)$$

$$T(x, 0) = 0, \quad 0 \leq x \leq \delta, \quad (11)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_{\text{экс}}, \quad (12)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\delta} = 0, \quad (13)$$

Алгоритм счета основывался на неявной 4-х точечной разностной схеме аппроксимации задачи (10) – (13). На рис. 6 представлена зависимость температур $T(0, t)$ поверхности пластин из различных материалов от расстояния до начала соударения (или, что тоже самое, от габаритов пластины). Увеличение температуры поверхности с ростом длины пластины обусловлено возрастанием размеров области ударно-сжатого газа, а, следовательно, увеличением времени воздействия теплового потока на поверхность пластины, которое можно рассчитать по формуле:

$$t = L \left(\frac{D - V_k}{V_k^2} \right), \quad (14)$$

где L – расстояние от начала сварки; D – скорость фронта ударной волны; V_k – скорость точки контакта.

Рис. 6. Зависимость температуры предварительного подогрева ударно-сжатым газом впереди точки контакта поверхности соударяющихся пластин из различных металлов от расстояния до начала соударения ($V_k=2100$ м/с):

1 – титан; 2 – низкоуглеродистая сталь; 3 – латунь

Из рис. 6 видно, что наряду с увеличением габаритов пластин на температуру предварительного подогрева поверхности перед соударением существенно влияют теплофизические свойства материала пластин. Так, видно, что при сварке титановых пластин длиной 1 ... 2 м температура поверхности пластин перед точкой контакта может достигать 400 ... 600 °C (см, рис. 6, кривая 1). Это эквивалентно выделению в зоне шва энергии 0,026 ... 0,052 МДж/м². Такие энерговыделения соизмеримы с энергией, выделяющейся в зоне шва при соударении пластин [9]. В частности, полученные результаты могут объяснить существенную нестабильность структуры и свойств титаностальных соединений по длине пластин, проявляющейся на расстояниях более 1000 мм от начала сварки, выражающуюся в увеличении параметров волнового профиля и объема оплавленных участков от 0 до 100% в конечной части свариваемых пластин [10, 11].

Выводы

1. Разработана методика измерения теплового потока от ударно-сжатого газа к поверхности соударяемых пластин, позволяю-

щая определять температуру предварительного подогрева поверхности перед точкой контакта. С помощью разработанной методики получены количественные зависимости температур разогрева поверхности перед соударением от габаритов свариваемых пластин и их теплофизических свойств.

2. Впервые доказано, что нестабильность структуры и повышение количества оплавов при сварке крупногабаритных пластин (свыше 1 ... 2 м) обусловлены тепловым влиянием области ударно-сжатого газа впереди точки контакта. При этом тепловой эффект от предварительного разогрева поверхности становится величиной одного порядка с энергией, выделяющейся при соударении пластин, что необходимо учитывать при разработке технологических процессов сварки взрывом крупногабаритного биметалла.

Библиографический список

1. Кудинов, В. М. Сварка взрывом в металлургии / В. М. Кудинов, А. Я. Коротеев. – М.: Металлургия, 1978. – 168 с.
2. Ишуткин, С. Н. Исследование теплового воздействия ударно-сжатого газа на поверхность соударяющихся пластин / С. Н. Ишуткин, В. И. Кирко, В. А. Симо-

нов // Физика горения и взрыва. – 1980. – №6. – С. 69-73.

3. Физика взрыва / Под ред. Л. П. Орленко. – Изд. 3-е, испр. – В 2 т. Т.1. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 832 с.

4. Оценка тепловой ситуации в зоне соединения при сварке взрывом крупногабаритных металлических заготовок / Т. Ш. Сильченко, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, С. В. Хаустов, А. А. Эрентраут // Новые перспективные материалы и технологии их получения. НПМ-2007: сб. науч. тр. междунар. конф., Волгоград, 9-12 окт. 2007 г. / ВолгГТУ [и др.]. – Волгоград, 2007. – С. 202-204.

5. Ишуткин, С. Н. Численное исследование воздействия газового потока на поверхность сталкивающихся пластин / С. Н. Ишуткин, В. И. Кирко, Н. И. Пак // Физика горения и взрыва. – 1981. – №1. – С. 151-153.

6. Thermal effect of explosive detonation products on a flyer plate in the explosive welding of metals / S. V. Khaustov, V. V. Pai, Ya. L. Lukyanov, V. I. Lysak, S. V. Kuz'min // International Journal of Heat and Mass Trans-

fer. – 2020. – Vol. 163 (December). – Article № 120469. – 8 р.

7. Анисимов С. И., Действия излучения большой мощности на металлы / С. И. Анисимов, Я. А. Имас, Г. С. Романов, Ю. В. Ходыко. – М.: Наука, 1970. – 272 с.

8. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа: Учеб. для вузов. – 7-е изд., испр. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.

9. Захаренко, И. Д. О тепловом режиме зоны сварного шва при сварке взрывом / И. Д. Захаренко // Физика горения и взрыва. – 1971. – №2. – С. 269-272.

10. Лысак, В. И. Сварка взрывом / В. И. Лысак, С. В. Кузьмин. – М.: Машиностроение - 1, 2005. – 544 с.

11. Кузьмин, С. В. Формирование соединений при сварке взрывом крупногабаритных металлических слоистых композитов / С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, Ю. Г. Долгий // Сварочное производство. – 2002. – №5. – С. 48-53.

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках проекта № 19-08-00311