

УДК 621.791.13

DOI: 10.35211/1990-5297-2024-11-294-12-17

С. В. Хаустов, канд. техн. наук, В. В. Пай, д-р физ.-мат. наук, С. В. Кузьмин, чл.-корр. РАН,
В. И. Лысак, академик РАН, А. Д. Кочкалов, аспирант*

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА УДАРНО-СЖАТОГО ГАЗА В ЗАЗОРЕ НА НАГРЕВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИН ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ

Волгоградский государственный технический университет, weld@vstu.ru

** Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск, pai@hydro.nsc.ru*

В работе исследовано влияние состава ударно-сжатого газа заполняющей зазор между пластинами на эффект предварительного подогрева поверхности пластин перед соударением при сварке взрывом. Проведена серия экспериментов по определению теплового потока при сварке взрывом медных (в среде воздуха, гелия и аргона) пластин длиной 0,6. Установлено, что значения теплового потока от ударно-сжатого газа слабо зависят от состава газа и, по большей части, определяется кумулятивными процессами при соударении пластин, а именно, концентрацией кумулятивных дисперсных частиц в зазоре между пластинами. Показано, что размеры области ударно-сжатого газа и распределение мощности теплового потока по его длине зависят от плотности газа и металла дисперсных частиц.

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

S. V. Khaustov, V. V. Pai, S. V. Kuz'min, V. I. Lysak, A. D. Kochkalov*

THE EFFECT OF THE COMPOSITION OF SHOCK-COMPRESSED GAS IN THE GAP ON THE HEATING OF METAL PLATES DURING EXPLOSION WELDING

Volgograd State Technical University, weld@vstu.ru

** Lavrentyev Institute of hydrodynamics, SB RAS, Novosibirsk, pai@hydro.nsc.ru*

The paper investigates the effect of the composition of the shock-compressed gas filling the gap between the plates on the effect of preheating the surface of the plates before impact during explosion welding. A series of experiments was carried out to determine the heat flux during explosion welding of copper (in air, helium and argon) plates with a length of 0.6. It was found that the values of the heat flux from shock-compressed gas weakly depend on the composition of the gas and, for the most part, are determined by cumulative processes during plate collision, namely, the concentration of cumulative dispersed particles in the gap between the plates. It is shown that the size of the shock-compressed gas region and the distribution of the heat flow power along its length depend on the density of the gas and metal dispersed particles.

Keywords: explosion welding, shock-compressed gas, heat flux, thermocouple method, cumulative jet, inert gases

Сварка взрывом, является перспективным с точки зрения универсальности и энергоемкости, а в ряде случаев и единственно возможным способом получения композиционных материалов, сочетающих в себе необходимый набор свойств [1, 2]. Воздух (или другие газы) в зазоре между пластинами, свариваемыми взрывом, оказывает заметное влияние на образование соединения [3...7]. При соударении пластин перед точкой контакта образуется область ударно-сжатого газа (УСГ), нагретая до нескольких тысяч градусов и ограниченная фронтом ударной волны в воздухе, с одной стороны, и наклонной поверхностью метаемой пласти-

ны, движущейся со скоростью контакта, с другой [1, 5, 7, 8]. При этом из зоны точки контакта в область ударно-сжатого газа поступают металлические частицы, образовавшиеся из диспергированной кумулятивной струи [3, 4], что приводит к увеличению температуры воздуха и скорости ударной волны [7, 8].

Ранее, в работе [9] термопарным способом были определены значения теплового потока от ударно-сжатого воздуха, заполняющего зазор между медными пластинами при их сварке взрывом на различных режимах соударения. Было показано, что тепловое воздействие от ударно-сжатого воздуха

сравнимо с энергией, выделяющейся в зоне шва при соударении пластин, а тепловой поток от ударно-сжатого воздуха слабо зависит от скорости точки контакта. Среди возможных причин указывалось влияние на параметры ударно-сжатого газа частиц металла, впрыскиваемых в зазор из области соударения.

Таким образом, целью исследования явилось исследование совместного влияния состава газа и дисперсных металлических частиц на тепловые и ударно-волновые процессы, протекающие в зазоре между металлическими пластинами перед их соударением при сварке взрывом.

Сварка взрывом проводилась по плоскопараллельной схеме с заполнением зазора между пластинами, воздухом, гелием и ар-

толщина медного слоя обеспечивает стойкость медного слоя к механическому воздействию сверхзвукового потока ударно-сжатого газа, насыщенного металлическими частицами.

Термобатареи размещались на изоляторе (дерево) в колодце, вырезанном в неподвижной пластине таким образом, чтобы набегающий поток УСГ обтекал поверхность термобатареи со стороны медного слоя повышая температуру «горячих спаев» термобатареи.

Схема измерения теплового потока, экспериментальные сборки с неподвижными медными пластинами при заполнении зазора воздухом и гелием, а также внешний вид колодца с размещенной в нем термобатареи показаны на рис. 1.

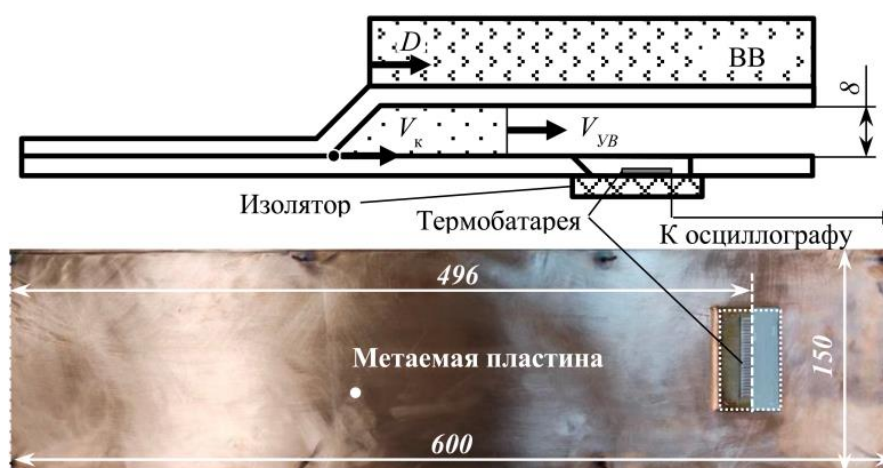


Рис. 1. Схема измерения теплового потока при сварке взрывом медных пластин толщиной 2,5+2,5 мм в среде гелия, воздуха и аргона

гоном. Использовались медные пластины толщиной 2,5 мм и длиной 0,6 м.

Экспериментальное определение теплового потока от УСГ с использованием малоинерционных термопарных датчиков выполняли по методике, представленной в работах [10].

В данной работе термопарные датчики, представляющие собой планарные медь-константановые термопары, изготавливались сваркой взрывом медных и константановых фольг толщиной ~ 20 и 180 мкм. Такая

На рис. 2 показана типичная осциллограмма термо-ЭДС, полученная с термодатчика в среде воздуха при сварке взрывом медных пластин. Как видно из осциллограммы, фронт ударной волны в воздухе, двигаясь перед точкой контакта и опережая ее, достигает «горячих» спаев элементов термобатареи нагревает их и обеспечивает монотонный рост термо-ЭДС в течении ~50 мкс до значений ~ 110 мВ, что соответствует максимальным температурам горячих спаев ~ 140 °С. Следующее за этим резкое падение

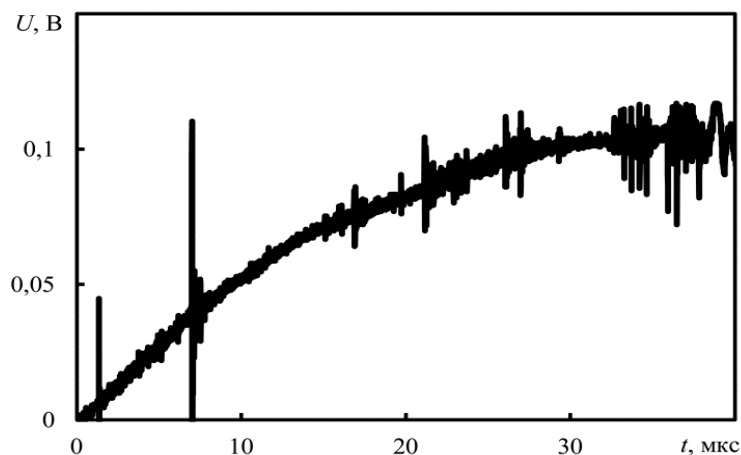


Рис. 2. Типичная осциллограмма термо-ЭДС при сварке взрывом медных пластин в среде воздуха ($V_k = 2270$ м/с)

термо-ЭДС и «дребезг» сигнала соответствует моменту прихода метаемой пластины к термодатчику и его механическому разрушению. На основе экспериментальных осциллограмм (см. рис. 2) были построены зависимости (термические циклы) температуры «горячих спаев» термобатарей (границы медь-константан) от времени (рис. 3) и решением обратной задачи теплопроводности рассчитаны тепловые потоки (рис. 4), действующие на поверхности медного слоя термобатареи по методике, описанной в [9, 10].

Видно, что при замене газовой среды в зазоре на аргон (рис. 3) характер термического цикла изменяется. В течение ~ 35 мкс с

момента прихода ударной волны в аргоне к датчику следует монотонный рост температуры, а затем резкое увеличение в 2-3 раза.

Время воздействия t_l области ударно-сжатого газа на термобатарею можно найти из экспериментальных осциллограмм от момента начала роста температуры (0 мкс) до момента дребезга сигнала, соответствующего соударению метаемой пластины с датчиком.

Зная расстояние от начала пластины до датчика L , скорость точки контакта $V_k = D$, можно найти скорость фронта ударной волны $V_{ув}$ и длину l области ударно-сжатого газа [10]:

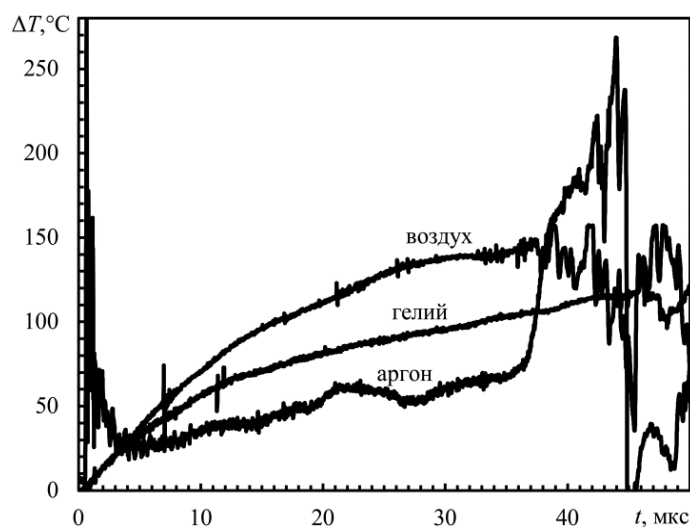


Рис. 3. Экспериментальная зависимость температуры горячих спаев термобатареи от времени при сварке взрывом медных пластин в среде различных газов

$$V_{sw} = \frac{L}{(L/V_c - t_l)} \quad (1)$$

$$l = L \left(1 - \frac{V_c}{V_{sw}} \right) \quad (2)$$

Таким образом, при сварке медных пластин длиной 0,6 м в среде воздуха, гелия и аргона времена воздействия ударно-сжатого газа сравнимы и составляют ~ 45-50 мкс, что дает скорость фронта ударной волны в воздухе, гелии и аргоне $V_{yb} = 2940-3230$ м/с (или $\sim 1,3V_k$) и длину области ударно-сжатого газа $l \approx 0,11$ м.

Видно (рис. 3), что при сварке взрывом медных пластин, экспериментальные значения теплового потока в ударно-сжатом гелии и воздухе сравнимы и составляют, в среднем, ~ 0,3 и 0,4 ГВт/м². Тогда как расчетные значения отличаются на два порядка и составляют ~ 0,15 и 0,002 ГВт/м². Это можно объяснить тем, что наибольший вклад в тепловой эффект от ударно-сжатого газа вносят медные частицы диспергированной кумулятивной струи, поступающие в зазор из области точки контакта и имеющие максимально возможную скорость в два раза большую чем скорость точки контакта.

Также видно, что мощность теплового потока по длине области УСГ в воздухе и гелии меняется незначительно, что может быть связано с плотностью распределения медных частиц по длине области. Вблизи

точки контакта (области соударения) количество частиц наименьшее, а затем их количество почти линейно возрастает до максимума вблизи фронта ударной волны. Это связано с тем, что в произвольный момент времени, количество частиц в области фронта ударной волны максимально.

При заполнении зазора аргоном (обладающем большей плотностью по сравнению с воздухом, и тем более гелием), медные частицы испытывают большее торможение и скапливаются в окрестности точки контакта, что приводит к повышению максимальной мощности теплового потока до ~ 1,8 ГВт/м². В остальной части области УСГ среднее значение теплового потока составляет ~ 0,2 ГВт/м², что меньше, чем в воздухе и гелии.

Таким образом, при сварке медных пластин скорость фронта ударной волны в газе, заполняющем зазор между пластинами, и тепловой эффект от УСГ слабо зависят от состава газа, и в большей степени определяются кумулятивными процессами перед точкой контакта. Это подтверждается экспериментами по измерению фотоэлектрическим способом температуры УСГ и скорости ударной волны при сварке взрывом на скоростях детонации, превышающих скорость звука в металлических пластинах, когда

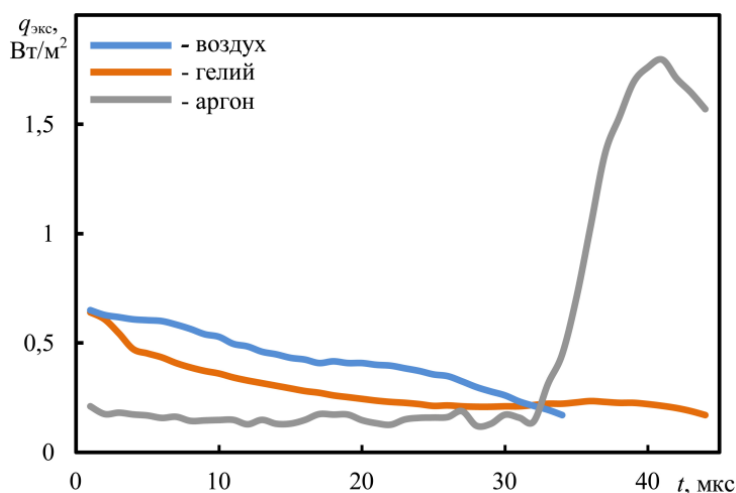


Рис. 4. Зависимость мощности теплового потока от времени при сварке медных пластин в среде различных газов

процессы кумуляции отсутствуют [7]. При сварке на сверхзвуковых режимах, измеренная температура УСГ становится равной температуре, рассчитанной по ударной адиабате воздуха. На дозвуковых режимах сварки температура УСГ и скорость фронта ударной волны превышает расчетные значения [8]. При этом в аргоне происходит перераспределение концентрации медных частиц кумулятивного происхождения по длине области УСГ.

На основании экспериментально определённых зависимостей теплового потока от времени (рис. 4) можно рассчитать температуру предварительного подогрева поверхности медных и титановых пластин перед соударением в зависимости от состава газа, заполняющего зазор. Решим эту задачу численно: пусть тепловой поток $q_{\text{экс}}(t)$ (известный из эксперимента, см. рис. 4) действует на поверхности медной пластины ($x=0$), отстоящей от начала соударения на расстояние $L = 0,46$ м в течение времени $t_l = 45$ мкс. Граничное условие на обратной стороне пластины ($x=\delta$, где δ – толщина пластины) можно принять изотермическим и равным

температуре окружающей среды $T_0 = 0^\circ\text{C}$, поскольку в силу малости t_l характерная глубина прогрева пластины $\sqrt{at_l} \ll \delta$ (где a – коэффициент температуропроводности пластины).

Для одномерного случая, система уравнений, описывающая процесс, имеет вид.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad t > 0, \quad 0 < x < \delta \quad (3)$$

$$T(x, 0) = T_0, \quad 0 \leq x \leq \delta \quad (4)$$

$$T(\delta, t) = T_0, \quad t > 0 \quad (5)$$

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = q_{\text{экс}}(t) \quad (6)$$

На рис. 5 представлено распределение температуры по толщине медной пластины спустя $t_l = 45$ мкс (время воздействия УСГ перед соударением для воздуха, гелия и аргона). Видно, что температура предварительного подогрева поверхности медной пластины при сварке в среде воздуха и гелия сравнимы и не превышают 60°C . При замене среды на аргон температура поверхности возрастает в три раза (до $\sim 180^\circ\text{C}$). Во всех трех газовых средах морфология границы соединения представлена типичной волнообразным профилем, с локальными опла-

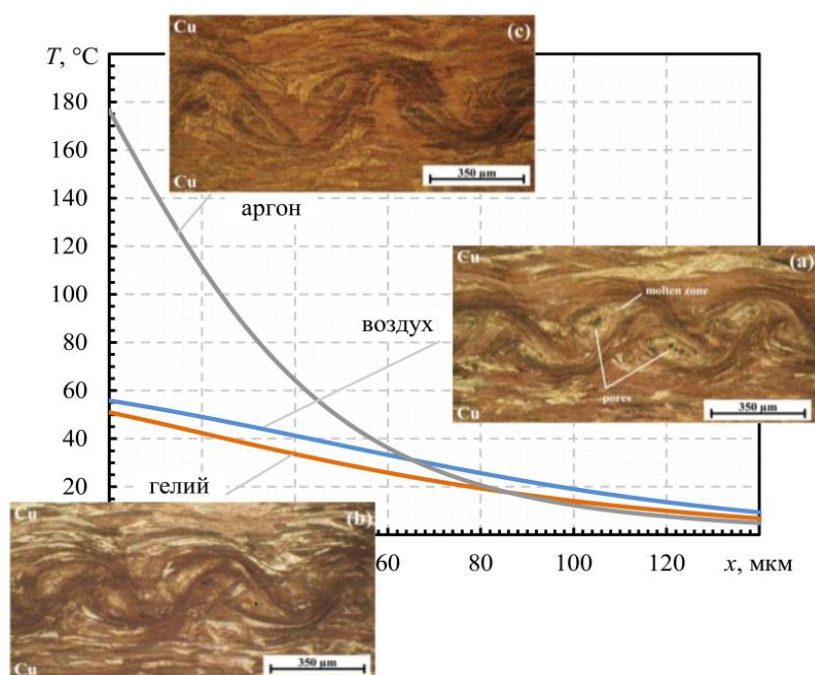


Рис. 5. Распределение температуры по толщине медной пластины на расстоянии 0,48 м от начала соударения при воздействии теплового потока $q_{\text{экс}}(t)$ в течение времени t_l

ленными зонами.

Параметры волн и количество оплавов при сварке медных пластин в воздухе и гелии сравнимы (см. рис. 5). При этом в воздушной среде в зонах расплава имеются локальные неоднородности в виде пор. В среде аргона параметры (длина и амплитуда) волн увеличиваются примерно в 1,5 раза.

Выводы

1. Проведены эксперименты по определению теплового потока от ударно-сжатого газа при сварке взрывом медных пластин в среде воздуха, гелия и аргона. Установлено, что скорость фронта ударной волны и мощность теплового потока от ударно-сжатого газа практически не зависят от состава газа, а в большей степени определяется кумулятивными процессами, протекающими перед точкой контакта, а именно количеством металлических частиц и их распределением в зазоре.

2. Установлено, что распределение частиц по длине области ударно-сжатого газа зависит от плотности материала частиц и газа. При заполнении зазора воздухом и гелием, дисперсные частицы относительно равномерно распределены по длине области ударно-сжатого газа, что обеспечивает средние значения теплового потока к поверхности пластин $\sim 0,3$ и $0,4$ ГВт/м² по всей области ударно-сжатого газа. При сварке в среде аргона концентрация частиц по длине области ударно-сжатого газа неравномерна. За счет торможения частиц в более плотном по сравнению с другими газами, аргоне частицы скапливаются в области соударения и увеличивают тепловой поток до $\sim 1,8$ ГВт/м² при сварке медных пластин

3. Определены температуры предварительного подогрева медных пластин при заполнении зазора различными газами. Установлено, что температура поверхности перед соударением может достигать несколь-

ких сотен градусов уже на расстоянии $\sim 0,5$ м от начала сварки, что приводит к увеличению параметров волнового профиля сварного соединения и количества оплавов.

Библиографический список

1. Kudinov, V. M. Explosion welding in metallurgy [in Russian] / V. M. Kudinov, A. Ya. Koroteev. – Moscow: Metallurgy. – 1978. – 166 p.
2. Zakharenko, I. D. Explosive Welding of Metals [in Russian] / I. D. Zakharenko. – Minsk: Nauka Tekhnika. – 1990. – 204 p.
3. Mori, A. Optical observation of metal jet generated by high speed inclined collision / A. Mori, S. Tanaka, K. Hokamoto // Selected Papers From the 31st International Congress on High-Speed Imaging and Photonics. – 2017. – Vol. 10328. – Pp. 103281Q. <https://doi.org/10.1117/12.2270473>
4. Godunov, S. K. Influence of material viscosity on the jet formation process during collisions of metal plates / S. K. Godunov, A. A. Deribas, V. I. Mali // Combustion, Explosion and Shock Waves. – 1975. – Vol. 11. – Pp. 1-13. <https://doi.org/10.1007/BF00742849>
5. Role of gas in the gap during explosive cladding / I. M. Richardson, E. P. Carton, Y. van der Drift, H. van der Linde // In Shock-assisted materials synthesis and processing: Science, innovations, and industrial implementation (EPNM-2008). – 2008. – pp. 3-3.
6. Shterzer, A. A. Flows, deformations and formation of a joint during oblique collision of metal plates / A. A. Shterzer, B. S. Zlobin // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2015. – Vol. 56. – Pp. 927-935. <https://doi.org/10.1134/S0021894415050211>
7. Ishutkin, S. N. Thermal action of shock-compressed gas on the surface of colliding plates / S. N. Ishutkin, V. I. Kirko, and V. A. Simonov // Combustion, Explosion and Shock Waves. – 1980. – Vol. 16. – Pp. 663-667. <https://doi.org/10.1007/BF00741515>
8. Theoretical and Experimental Studies of the Shock-Compressed Gas Parameters in the Welding Gap / A. Malakhov, I. Denisov, N. Niyozbekov, I. Saikov, D. Shakhrai, V. Sosikov, A. Emelyanov // Materials. – 2024. – Vol. 17 (1). – P. 265. <https://doi.org/10.3390/ma17010265>
9. Investigation of thermal processes in the gap during explosion welding / S. V. Khaustov, V. V. Pai, V. I. Lysak, S. V. Kuz'min // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2023. – Vol. 209. – P. 124166, <https://doi.org/10.1016/j.jheatmasstransfer.2023.124166>
10. Thermal effect of explosive detonation products on a flyer plate in the explosive welding of metals / S. V. Khaustov, V. V. Pai, Y. L. Lukyanov, V. I. Lysak, S. V. Kuz'min // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2020. – Vol. 163. – P. 120469. <https://doi.org/10.1016/j.jheatmasstransfer.2020.120469>