УДК 621.791.13

DOI: 10.35211/1990-5297-2020-11-246-5-9

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, Е. К. Полуновский, магистрант,
А. И. Божков, магистрант, П. М. Сазыкин, магистрант, М. В. Шевченко, магистрант*

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ШВЕ И ОКОЛОШОВНОЙ ЗОНЕ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ

Волгоградский государственный технический университет, weld@vstu.ru

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

В данной работе приведены результаты измерения температуры на границе соединения и в околошовной зоне с помощью разработанных расчетно-экспериментальных методов, основанных на использовании естественных термопар. Показано, что при сварке взрывом материалов с развитым волнообразованием на границе соединения, основное тепловыделение происходит в локальной области, ограниченной размерами образующихся волн.

Ключевые слова: сварка взрывом, температура, естественная термopа, околошовная зона, волнообразование

*S. V. Khaustov, V. V. Pai, Ya. L. Lukyanov, V. I. Lysak, S. V. Kuz'min, E. K. Polunovsky,
A. I. Bozhkov, P. M. Sazykin, M. V. Shevchenko*

TEMPERATURE MEASUREMENT AT THE BOUNDARY OF THE JOINT AND HEAT-AFFECTED ZONE IN EXPLOSION WELDING

Volgograd State Technical University, weld@vstu.ru

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

This paper presents the results of measuring the temperature at the joint boundary and in the heat-affected zone using the developed computational and experimental methods based on the use of natural thermocouples. It is shown that in explosion welding of materials with developed wave formation at the joint boundary, the main heat release occurs in a narrow region limited by the size of the generated waves.

Keywords: explosion welding, temperature, natural thermocouple, heat-affected zone, wave formation

Повышение температуры материалов при их импульсном деформировании во время сварки взрывом определяет возможность получения качественного соединения и существенно зависит от условий нагружения [1]. Локальные участки оплавленного металла и сплошные прослойки расплава на границе соединения, обусловленные совместной пластической деформацией свариваемых материалов, могут приводить к снижению прочностных свойств соединения [2]. Ввиду отсутствия в настоящее время адекватной физической модели деформации металлов, полное теоретическое описание тепловых процессов в условиях сварки взрывом затруднительно. В связи с этим актуально развитие экспериментальных методов определения температуры при сварке взрывом.

Наиболее подходящим способом измерения температуры в условиях сварки взры-

вом будут нелокальные варианты термopного метода [3, 4]. Суть метода заключается в том, что в результате образования естественной термopы при сварке взрывом (при этом один спай – это граница соединения, которая сильно разогрета, а другой спай находится при комнатной температуре) на ней появляется электрическое напряжение. Регистрируя зависимость этого напряжения от времени можно определить зависимость температуры на границе соединения металлов от расстояния до точки контакта в процессе соударения.

Опыты со слоистыми вставками в свариваемых пластинах показывают [5], что их заметная деформация происходит в прилегающей к шву области, сопоставимой по размерам с размерами волн. Для упрощения расчетов будем считать, что во всей области течения металл движется вдоль оси x с постоянной скоростью V_k . Погрешность расче-

деление зависимости температуры $T(x, 0)$ на границе Γ по измеренной зависимости $U(x)$ на границах Γ_1, Γ_2 .

Сначала методом диффузии частиц решалась прямая задача для уравнения (1) в случае, когда мгновенный точечный источник диффузии расположен в точке x_0 (см. рис. 2). То есть, находилось распределение электрического потенциала на свободных границах течения при условии, что температура на границе Γ : при $x > x_0$ равна T_1 , а при $x \leq x_0$, T_0 . Разность потенциалов между точками границы, имеющими координаты X_i, X_j , будет пропорциональна числу частиц, вышедших на границу между этими точками:

$$U_{i,j} = AN_{i,j},$$

где A – коэффициент пропорциональности, $N_{i,j}$ – число частиц, вышедших на свободную границу между точками границы X_i, X_j . Пусть точечный источник испустил число частиц N_0 , пропорциональное скачку температуры δT :

$$N_0 = A(S_K - S_M)\delta T,$$

с тем же коэффициентом пропорциональности A , тогда:

$$\frac{U_{i,j}}{(S_K - S_M)\delta T} = \frac{N_{i,j}}{N_0},$$

$$U_{i,j} = \frac{N_{i,j}}{N_0}(S_K - S_M)\delta T, \quad (2)$$

где N_0 – общее количество выпущенных источником частиц.

Значит, если на границе раздела медь-константан есть скачок температуры δT , то на Γ_2 появится распределение электрического потенциала $U_0(x)$, описываемое фор-

мулой (2).

Пусть источники распределены вдоль границы раздела Γ с плотностью $\rho_0(x)$, тогда:

$$A\rho_0(x) = (S_K - S_M)\frac{\partial T}{\partial x},$$

$$U(x) = \int_0^{+\infty} (S_K - S_M)\frac{\partial T(\xi)}{\partial \xi} U_0(x - \xi) d\xi \quad (3)$$

В уравнении (3) левая часть определялась экспериментально (см. рис. 3), функция $U_0(x)$ вычислялась методом диффузии частиц. Зависимость $T(x)$ определялась из (3) представляющее собой некорректное уравнение Фредгольма 1-го рода, которое решалось методом параметризации, используя априорную информацию об искомом решении, в виде:

$$T(x) = (T_* - T_{\text{ост}}) \exp(\alpha x^2) + T_{\text{ост}}, \quad (4)$$

где T_* и $T_{\text{ост}}$ – температура в точке контакта и остаточная температура в шве, соответственно, и рассчитываются как:

$$U_{\max} = \int_{T_0}^{T_*} (S_K - S_M) dT,$$

$$U_{\min} = \int_{T_0}^{T_{\text{ост}}} (S_K - S_M) dT,$$

где $U_{\max}$ и $U_{\min}$ определяются по экспериментальной осциллограмме (см. рис. 3).

Варьируя значение α , добивались наилучшего совпадения рассчитанной функции $U(t)$ с экспериментально определенной. На рис. 4 показано рассчитанная таким образом зависимость температуры шва от времени в сечении, соответствующем месту прикрепления измерительного провода к константановой пластине. Так как при расчете температуры в шве по измеренным величинам термо-ЭДС рассматривалась ста-

Рис. 2. Область течения металла при сварке взрывом меди с константаном

ционарная модель процесса, то температура в шве будет усредненной по периоду волны. Надо отметить, что в зоне волнообразования, где свариваемые материалы значительно деформируются, могут присутствовать как участки без оплавов, так и участки расплавленного материала, перегретые выше температуры плавления. Однако, уже через ~ 1 мкс в процессе остывания неоднородно нагретого шва температура в этой области за счет теплопроводности выравнивается, и расчетная температура соответствует средней температуре шва.

Для определения температуры в околошовной зоне при сварке взрывом был разработан следующий метод.

На константановую пластину толщиной

Рис. 3. Зависимость термо-ЭДС от времени:

1 – эксперимент; 2 – расчет по (3)

2,5 мм предварительно наносился сваркой взрывом медный слой толщиной 0,3 мм. Затем проводился отжиг в вакуумной печи при 900 °С в течение 1 часа. В середине получившейся заготовки 1 (рис. 5, а) вырезался прямоугольный колодец, в который через слой диэлектрика помещался термопарный датчик 2 из того же материала. Далее на неподвижную медно-константановую пластину с размещенным внутри нее термопарным датчиком металась медная пластина 3 толщиной 2 мм. Для определения температуры по экспериментально измеренному напряжению термопарного датчика, последний тарировался в статических условиях в интервале температур $\sim 30 \dots 900$ °С (рис. 5, б).

Таким образом, регистрировалась за-

Рис. 4. Зависимость температуры шва от времени при сварке взрывом

а)

б)

Рис. 5. Схема измерения температуры на расстоянии 0,3 мм от шва при сварке взрывом (а) и тарировочная кривая медно-константановой термопары (б):

1 – медно-константановая неподвижная пластина; 2 – термопарный датчик;
3 – метаемая медная пластина; 4 – изолятор

Рис. 6. Зависимость термо-ЭДС от времени на расстоянии 0,3 мм от границы соединения (а) и микроструктура зоны соединения и ОШЗ при сварке взрывом меди с константаном (б)

висимость термо-ЭДС (рис. 6, а) от времени на расстоянии от сварного шва равном толщине медного слоя, а затем с помощью тарировочной кривой (см. рис. 5, б) пересчитывалась в температуру. Поскольку температура вдоль датчика будет неравномерной, то линейный размер датчика вдоль оси шва (3 мм) будет определять временное разрешение термопары, равное $\sim 1,5$ мкс.

Максимум измеренного термо-ЭДС составил $\sim 7,1$ мВ, что соответствует $\Delta T \approx 155$ °C и достигается он спустя ~ 10 мкс, с момента начала повышения температуры. Это говорит о том, что, нагрев осуществляется путем теплопроводности от неоднородно нагретого сварного шва.

На рис. 6, б показана микроструктура сваренных взрывом медной пластины с константановой пластиной и медно-константановым датчиком. Видно, что местные разрезы не нарушают картину течения металла и при переходе на термопарный датчик характер деформации и параметры волн на границе соединения существенно не меняются. Также видно, что заметная деформация (а значит и тепловыделение) происходит только в области, сопоставимой с размерами образующихся в процессе сварки взрывом волн.

Выводы

Разработаны методики измерения температуры в сварном шве и околошовной зоне в условиях сварки взрывом. Показано, что при сварке взрывом материалов с развитым волнообразованием на границе соединения, основное тепловыделение происходит в локальной области, ограниченной размерами образующихся волн.

Библиографический список

1. Lysak, V. I. Lower boundary of metal explosive welding. Evolution of ideas / V. I. Lysak, S. V. Kuzmin // Journal of Materials Processing Technology. – 2012. – Vol. 212, iss. 1. – Pp. 150-156.
2. Седых, В. С. Сварка взрывом и свойства сварных соединений / В. С. Седых, Н. Н. Казак. – М.: Машиностроение, 1971. – 70 с.
3. Об измерении поля температуры при плоском установившемся течении металла / С. Н. Ишуткин, Г. Е. Кузьмин, В. В. Пай, Л. Л. Фрумин // Журнал прикладной механики и технической физики. – 1992. – №2. – С. 157-165.
4. Кузьмин, Г. Е. Экспериментально-аналитические методы в задачах динамического нагружения материалов / Г. Е. Кузьмин, В. В. Пай, И. В. Яковлев. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2002. – 315 с.
5. Особенности пластического деформирования металла околошовной зоны при сварке взрывом меди с алюминием / С. В. Кузьмин, А. П. Пеев, В. И. Лысак, Е. А. Чугунов // Физика и химия обработки материалов. – 2003. – №1. С.71-76.
6. Ландау, Л. Д. Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука, 1982. – 624 с. – 496 с.