

УДК 621.791.76: 621.7.044.2

*С. В. Хаустов, инженер, С. В. Кузьмин д-р техн. наук,
В. И. Лысак, д-р техн. наук, Е. А. Федянов, д-р техн. наук*

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ОКОЛОШОВНОЙ ЗОНЕ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ

Волгоградский государственный технический университет, weld@vstu.ru

Разработана методика расчета температурных полей при сварке взрывом, основанная на определении сдвиговых деформаций и локальном калориметрировании заданного объема околошовной зоны.

Methods of calculation of temperature fields at explosion welding based on shear strain evaluation and local calorimetric measurement of the given volume of the weld zone were developed.

Ключевые слова: сварка взрывом, околошовная зона, температурное поле, термический цикл, осциллограмма

Keywords: explosive welding, weld zone, temperature fields, thermal cycle, oscillogram

Большое влияние на структуру и свойства соединений при сварке взрывом, как и при любом другом способе сварки, оказывают тепловые процессы, протекающие в околошовной зоне (ОШЗ). Тепловые процессы при сварке взрывом имеют ряд особенностей: выделение тепла происходит в узкой приконтактной зоне, ограниченной глубиной пластического деформирования металла; время, в течение которого происходит выделение тепла, составляет доли микросекунд, и в первом приближении его можно полагать равным нулю; распределение мощности внутренних источников теплоты в приконтактной зоне пропорционально сдвиговой деформации (градиент температуры плавно возрастает по мере приближения к границе соединения). В зависимости от режима сварки, толщины, механических и теплофизических свойств свариваемых металлов, энергия распределяется по их сечению неравномерно и затраты на образование соединения и деформацию околошовной зоны различаются [1]. Существующие методики исследования тепловых процессов позволяют измерить температуру

только на границе образовавшегося в процессе сварки взрывом соединения и оставляют неопределенной тепловую ситуацию в прилегающих слоях металлов, которая в свою очередь зависит от степени локализации пластической деформации в них.

Целью настоящей работы явилось создание расчетно-экспериментальной методики определения температурных полей в околошовной зоне свариваемых взрывом композиционных материалов.

Методика основана на измерении средней (остаточной) температуры некоторого заданного объема исследуемого материала и экспериментальном определении в этом объеме сдвиговых пластических деформаций. Значение средней температуры позволяет оценить общее количество выделившейся теплоты, а величина сдвиговых пластических деформаций – распределение мощности внутренних источников, а, следовательно, и распределение температур по толщине околошовной зоны.

Измерения проводились методом локальных термопар по двум схемам (рис. 1). По схеме 1 в

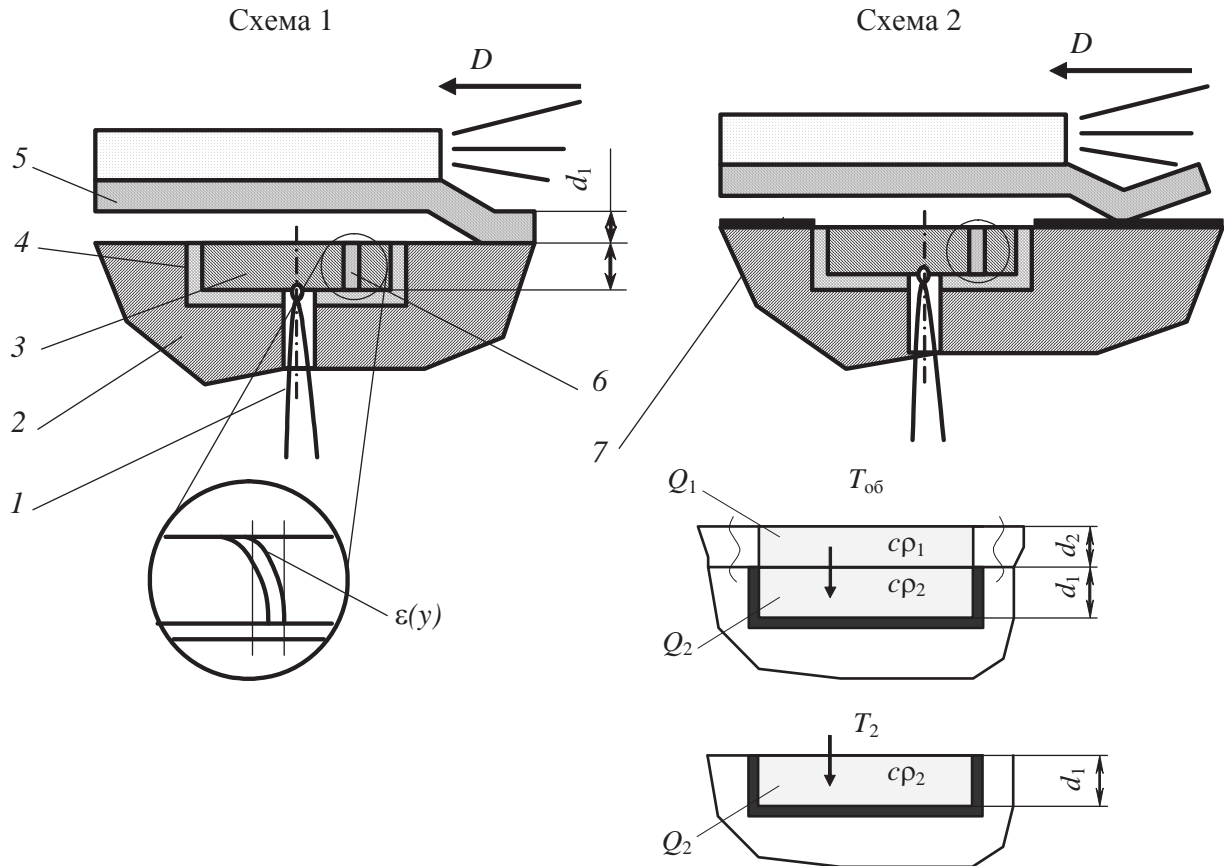


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 – термопара типа К; 2 – неподвижная пластина (основа); 3 – вставка из исследуемого материала (АмГб) заданной толщины d_2 ; 4 – термоизолятор; 5 – перемещаемая пластина Ст. 3; 6 – реперная вставка (алюминиевый стержень); 7 – противосварочное покрытие

неподвижную пластину 2 через изолятор 4 помещались вставки из исследуемого материала 3 диаметром 15 мм и толщиной 2 мм. На внутренней поверхности вставок зачеканивались термопары, сигнал с которых регистрировался цифровым осциллографом. При сварке взрывом в начальный момент времени распределение температуры внутри вставки неравномерное с монотонным возрастанием к границе соединения. Наличие перепада температур приводит к появлению тепловых потоков, выравнивающих распределение температур. При этом температура внутренней поверхности вставки повышается. Достаточно очевидно, что примерно равномерному распределению температуры по

толщине вставки будет соответствовать максимальная фиксируемая температура ее внутренней поверхности. Как показали наши измерения, выравнивание температурного поля внутри вставки происходит в течение отрезка времени порядка сотен миллисекунд. Наблюдаемое после выравнивания температуры ее дальнейшее понижение обусловлено теплоотдачей в окружающую среду и прилегающие слои изолятора.

Размеры горячего спая термопар ($\approx 0,5$ мм) обеспечивают некоторую погрешность измерения, обусловленную инерционностью термопары. Разница между реальной и фиксируемой термопарой температурой:

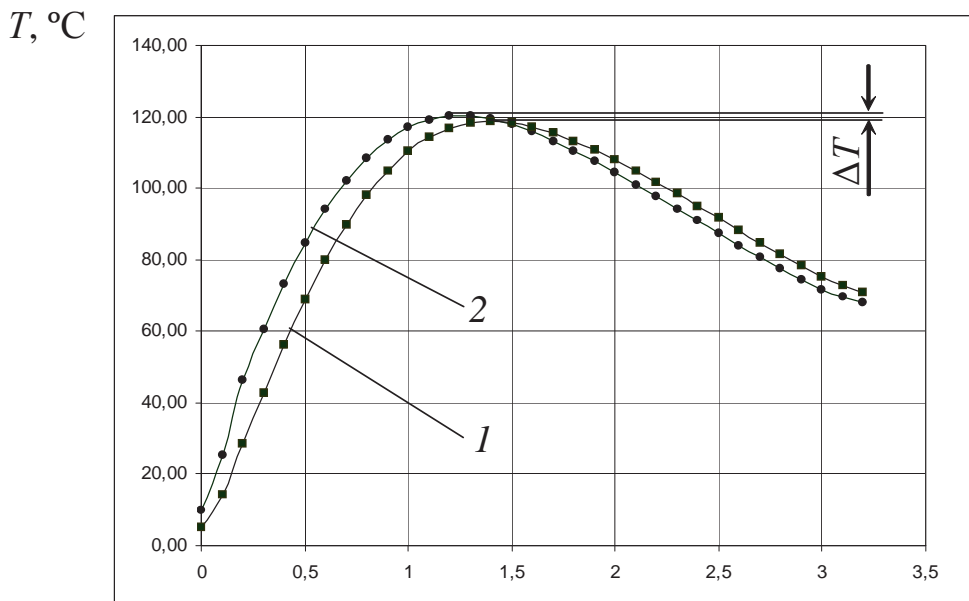


Рис. 2. Термический цикл:

1 – измеренный локальной термопарой, 2 – реальный термический цикл

$$\varepsilon = \frac{T_{\text{экс}} - T_{\text{ист}}}{T_{\text{ист}}},$$

где $T_{\text{экс}}$ – значения снятые термопарой, $T_{\text{ист}}$ – реальная температура, рассчитанная на основе известного теоретического решения задачи о нагреве шара [2, 3].

$$T_{\text{ист}}(t) = \frac{1}{m} \frac{\Delta T_{\text{экс}}(t)}{\Delta t} + T_{\text{экс}}(t),$$

где $m = \frac{3\lambda}{cpr^2}$ – темп охлаждения, λ – коэффициент теплопроводности материала термопары, c – объемная теплоемкость материала термопары, r – радиус термопары.

Анализ полученных в опытах кривых изменения во времени термо-ЭДС термопары показывает, что темп $\Delta T_{\text{экс}}(t)/\Delta t$ изменения температуры на тыльной стороне вставки не превышает 100 °C/с. При этом условии погрешность измерения ΔT не превышает 1% на любом участке термического цикла а сам реальный цикл незначительно смещается по времени почти без

изменения амплитуды сигнала (рис. 2). Таким образом, инерционностью термопары можно пренебречь.

Схема 2 (рис. 1) идентична схеме 1 с той разницей, что на поверхность основы 2 наносилось противосварочное покрытие 7 с целью предотвращения соединения метаемой пластины с основой и вставкой после прохождения точкой контакта поверхности последней. После завершения деформационных процессов в метаемой пластине и вставке образовавшееся соединение разрушалось, и металл метаемой пластины исключался из последующих теплообменных процессов. Таким образом, по схеме 1 измерялась средняя температура $T_{\text{об}}$ метаемой пластины и вставки (пакета) и по схеме 2 – температура T_2 вставки. Предполагалось, что условия нагружения вставок в обоих случаях идентичны. Одновременно исследовался характер пластического течения в околошовной зоне с помощью реперных вставок для получе-

Таблица 1

Измеренные остаточные температуры, °С		Рассчитанные значения тепловыделения в пластинах, МДж/м ²		
T_2	$T_{об}$	$Q_{об}$	Q_1	Q_2
175	152	1,48	0,57	0,91

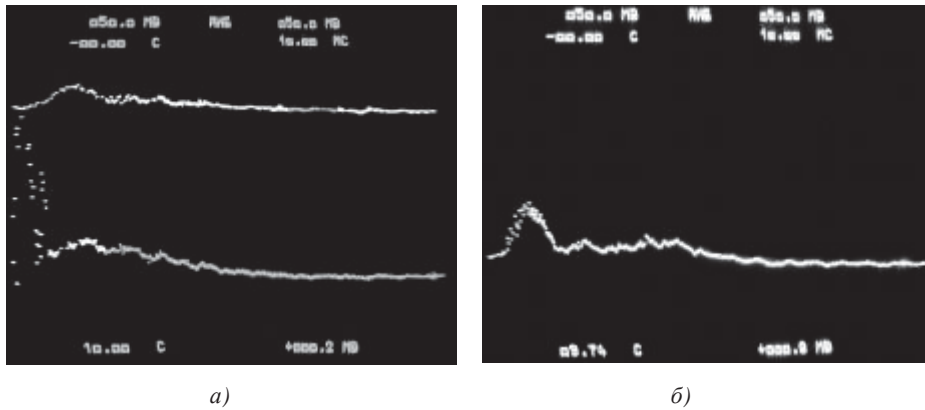


Рис. 3. Осциллограммы термо-ЭДС по схеме 1 (а) и схеме 2 (б)

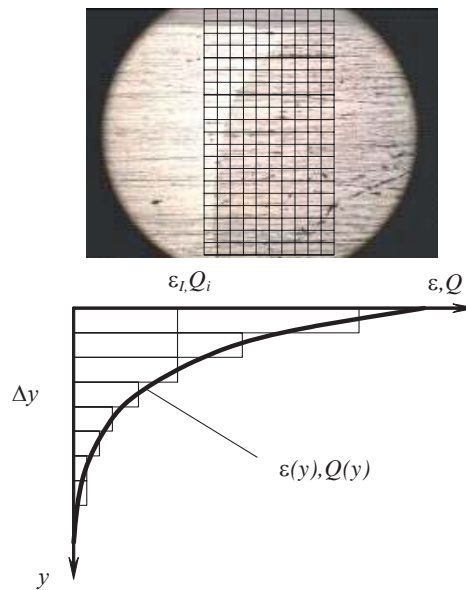


Рис. 4. Определение количества тепла в ОШЗ пропорционально остаточным пластическим деформациям [4]

ния распределения максимальных сдвигов в неподвижном образце (вставке). Если принять, что выделение теплоты по толщине металла пропорционально работе, затраченной на деформирование металла околошовной зоны, и происходит мгновенно, то, зная общее количество выделившейся теплоты, можно построить

начальные температурные поля пропорционально эпюрам сдвиговых пластических деформаций.

Типичные осциллограммы термо-ЭДС, зафиксированных локальными термопарами на обратной стороне вставок из АМгб, показаны на рис. 3. Из всего термического цикла интерес

представляет только максимальная зафиксированная термо-ЭДС, характеризующая среднюю температуру вставки. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Значение после сварки средней температуры вставки, выполненной по схеме 1 (см. рис. 1),

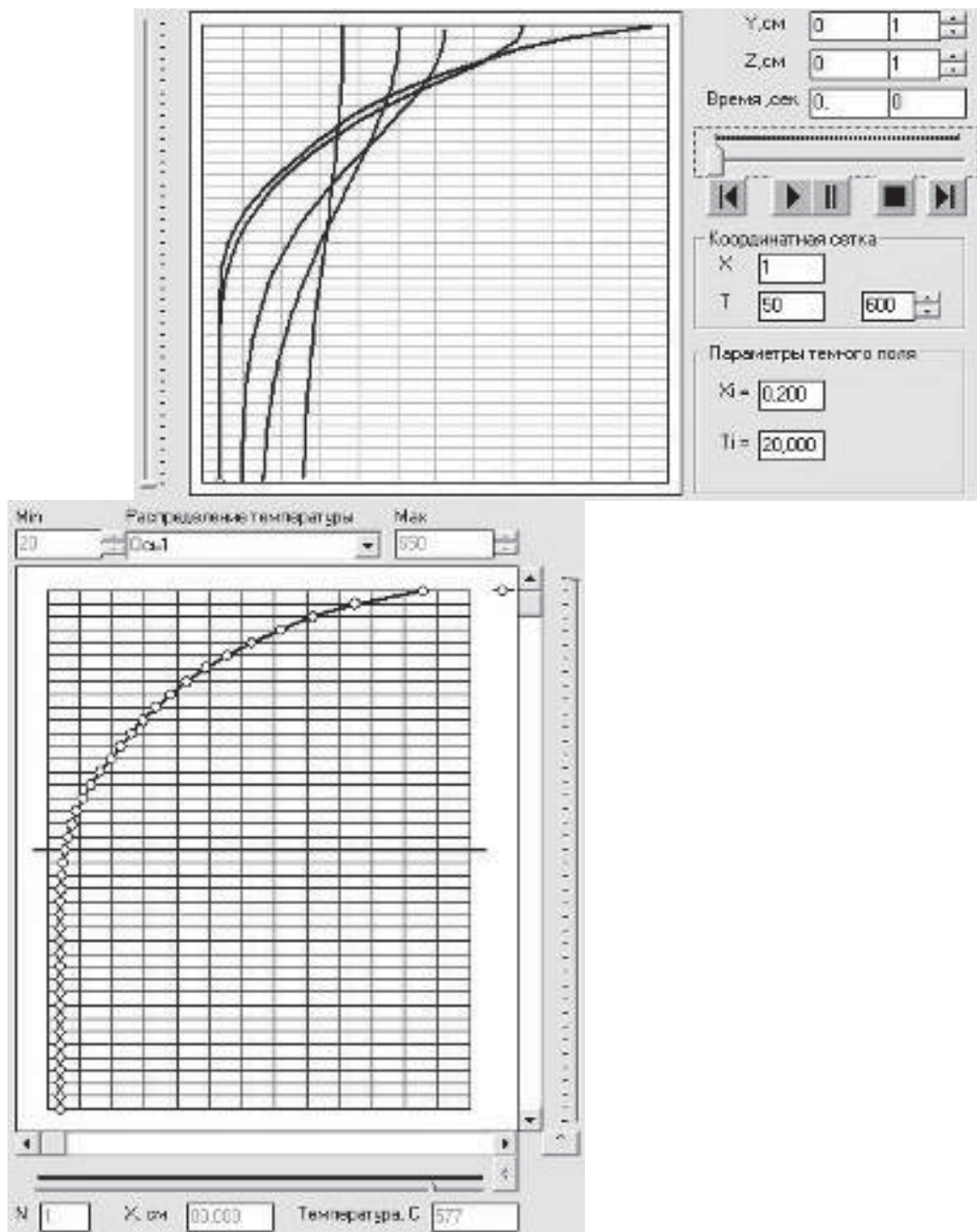
позволяет определить общее удельное количество теплоты $Q_{об}$, выделенной в пакете (сваренные вместе вставка и метаемая пластина):

$$Q_{об} = T_{об} \cdot (c_{p1}d_1 + c_{p2}d_2),$$

и неподвижной вставке Q_2 :

$$Q_2 = T_2 \cdot c_{p2}d_2.$$

б)



а)

Рис. 5. Начальное температурное поле в неподвижной пластине (а), и выравнивание его с течением времени (б)

При определении теплоты Q_2 предполагается, что потери теплоты через внешнюю поверхность много меньше теплового потока внутрь материала.

Исходя из того, что $Q_{об} = Q_1 + Q_2 = W_2$ (где W_2 – энергия, затраченная на пластическую деформацию металла), было рассчитано количества теплоты Q_1 , выделенной в метаемой пластине:

$$Q_1 = Q_{об} - Q_2.$$

Значения Q_1 и Q_2 показывают, каким образом энергия распределяется между метаемой и неподвижной пластиной, большие значения Q_2 очевидно связаны с большей глубиной деформирования более пластичного по сравнению со сталью алюминиевого сплава.

Зная характер распределения остаточных пластических деформаций $\varepsilon(y)$, общее количество теплоты, выделившейся в неподвижной пластине, и тот факт, что $\varepsilon \sim Q$ или $k\varepsilon_i = Q_i$ (где k – коэффициент пропорциональности; ε_i , Q_i – относительное значение деформации) и количество выделившейся в i -том слое толщиной Δu теплоты, можно определить распределение тепла по толщине вставки и, соответственно, перейти к значениям температуры каждого i -того слоя, т.е. построить начальное температурное поле в околосварной зоне.

$$Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = \sum_{i=1}^n Q_i = Q_2,$$

$$Q_i = k \cdot \varepsilon_i,$$

$$k(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \dots + \varepsilon_n) = Q_2,$$

$$k = \frac{Q_2}{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i},$$

$$T_i = \frac{Q_i}{c\rho_i \Delta u} + T_0.$$

Полученные эпюры остаточных сдвиговых пластических деформаций (рис. 4) и значения Q_2 в неподвижной пластине позволили путем несложных расчетов определить начальное распределение температуры в неподвижной пластине (рис. 5, а, б).

Расчет энергии, запасенной в приконтактном слое толщиной 50 мкм неподвижной вставки из Амг6, составил $Q_1 = 0,075$ МДж/м², что соответствует температуре на границе $T_1 = 577$ °С, меньшей чем $T_{пл} = 630$ °С, что и подтверждается металлографическим исследованием зоны сварного соединения, в которой участков оплавленного металла не выявлено. Расчет выравнивания полученного температурного поля дал значение расчетной остаточной температуры 168 °С, что хорошо согласуется с экспериментальной $T_2 = 175$ °С.

Таким образом полученные данные позво-

ляют достоверно оценить тепловую ситуацию в приконтактных слоях соединяемых пластин при сварке взрывом одно- и разнородных компози- тов, что даст возможность целенаправленного регулирования их конечными свойствами и структурой. Помимо этого данная методика по- зволяет выявить долю энергии выделяющейся в метаемой и неподвижной пластинах и является более надежным способом определения общего количества запасенного в пластинах тепла по сравнению с традиционным калориметрирова-

нием, так как практически исключаются потери в окружающую среду.

Библиографический список

1. Пеев, А. П. Особенности пластического деформирования металла околошовной зоны при сварке взрывом меди с алюминием / А. П. Пеев, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, Е. А. Чугунов // Физика и химия обработки материалов. – 2003. – №1. – С.71-76.
2. Лыков, А. В. Теория теплопроводности – М.: Высшая школа, 1967.– 599 с.
3. Хаустов, С. В. Расчетно-экспериментальное определение температурных полей в зоне соединения при сварке взрывом / С. В. Хаустов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, Е. А. Федянов // Физика и химия обработки материалов. – 2007. – №4. – С. 46-51.
4. Пеев А. П. Математическое моделирование тепловых процессов при сварке металлов взрывом / А. П. Пеев, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, С. В. Хаустов // НПИМ—2004. Сборник тез. докл. науч. конф. – Волгоград, 2004. – С. 172-173.