

УДК 621.791.13

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ

С. В. Хаустов¹, С. В. Кузьмин¹, В. И. Лысак¹, В. В. Пай²¹Волгоградский государственный технический университет, 400005 Волгоград, weld@vstu.ru²Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, pai@hydro.nsc.ru

Разработаны новые расчетно-экспериментальные методы исследования тепловых процессов, протекающих при сварке металлов взрывом, основанные на применении естественных и локальных термопар и позволяющие достоверно строить температурные поля в околошовной зоне и термические циклы сварки. Выявлены основные закономерности тепловых процессов в околошовной зоне при сварке взрывом. Теоретически показано и экспериментально подтверждено, что в этой зоне теплота, выделяющаяся при детонации взрывчатого вещества, может существенно повышать температуру контактирующих слоев металла и приводить к оплавлению последних.

Ключевые слова: сварка взрывом, тепловые процессы, околошовная зона, естественная термопара.

ВВЕДЕНИЕ

Процесс соединения металлов при сварке взрывом сопровождается локальным повышением температуры в околошовной зоне (ОШЗ), которая, как и при любом другом способе сварки, может оказывать влияние на структуру и свойства получаемых соединений. К тепловым процессам при сварке взрывом проявляют интерес различные исследователи, поскольку полное и точное решение тепловой задачи позволило бы уже на стадии разработки технологии получения металлических композитов прогнозировать тепловую ситуацию в ОШЗ и минимизировать вероятность получения нежелательных фаз в сварном шве.

Исходя из анализа баланса энергии системы двух соударяющихся пластин [1], можно выделить источники тепла, непосредственно влияющие на температурные условия образования сварного соединения. При этом количество теплоты, аккумулируемое в пластинах, будет результатом действия следующих процессов.

1. Нагрев соударяемых поверхностей потоком ударно-сжатого газа впереди точки контакта [1–4]. Температура ударно-сжатого газа может достигать нескольких тысяч граду-

сов [4], что обуславливает тепловой поток в глубь соударяющихся поверхностей. По оценкам, приведенным в работах [2, 4], в зависимости от режима соударения и свойств материалов поверхностные слои толщиной до 100 мкм могут нагреваться на несколько сотен градусов, что дает прибавку в энергозатраты в зону соединения порядка $0.1 \div 1$ МДж/м². Такие значения соизмеримы с энергозатратами на пластическую деформацию металла в ОШЗ и способны, по мнению авторов [2], привести к оплавлению приконтактных слоев.

2. Нагрев метаемой пластины продуктами детонации взрывчатого вещества (ВВ). В результате этого процесса средняя удельная энергия, «аккумулируемая» в метаемой пластине, увеличивается, и, на первый взгляд, это незначительно влияет на распределение температуры вблизи линии соединения [1]. При метании тонких металлических пластин с высокой теплопроводностью действие теплового источника на поверхности и его влияние на динамику тепловых процессов вблизи линии соединения могут быть достаточно заметными, что требует дополнительного изучения.

3. Выделение теплоты в ОШЗ в результате пластической деформации металла. В работах [1, 5–7] показано, что температурное поле такого источника имеет ярко выраженный локализованный неравномерный характер и пропорционально эпюрам остаточной сдвиговой пластической деформации g_{\max} . Причем кинематические параметры существенным образом влияют на характер изменения g_{\max} [8, 9]

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-08-00598 А) и Министерства образования и науки РФ (базовая часть гос. задания № 2014/16, проект № 1183).

© Хаустов С. В., Кузьмин С. В., Лысак В. И., Пай В. В., 2014.

и, соответственно, на распределение температуры по толщине свариваемых металлов [1, 6].

В конечном счете величина и характер энерговложения от различных источников определяют кинетику процесса образования соединения и его свойства.

Цель настоящей работы — экспериментальное исследование тепловых процессов в ОШЗ свариваемых взрывом композиционных материалов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе применяли методы, основанные на использовании локальных (размещенных в исследуемом объекте) и естественных (состоящих из частей исследуемого объекта) термопар [10, 11].

Количество теплоты, выделившейся в локальных объемах металла, определяли с использованием калориметров таблеточного типа по схемам, представленным на рис. 1.

В неподвижную пластину через термоизолятор помещали цилиндрическую вставку из алюминиевого сплава АМг6 диаметром 15 мм

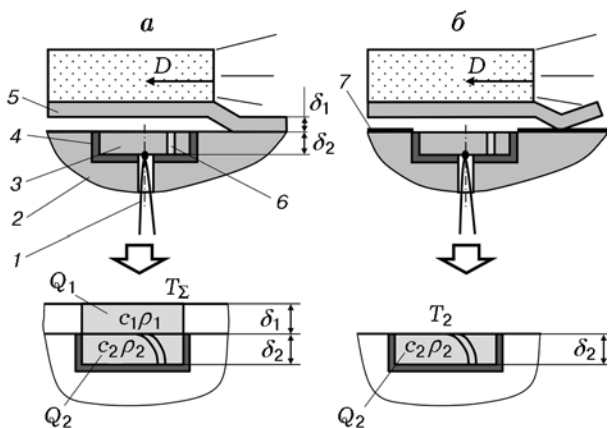


Рис. 1. Схема измерения количества теплоты в локальных объемах пластин при сварке взрывом с использованием таблеточного калориметра:

a — с получением сварного соединения (далее — схема 1), *b* — без образования сварного соединения (далее — схема 2); 1 — термопара (хромель-алюмель), 2 — неподвижная пластина (АМг6), 3 — цилиндрическая вставка из исследуемого материала (АМг6), 4 — термоизолятор, 5 — метаемая пластина (сталь Ст3), 6 — реперная вставка-проволочка из алюминия, 7 — противосварочное покрытие (полипропиленовая пленка с клеевым слоем толщиной ≈ 60 мкм)

и толщиной 2 мм, в которую со стороны нижней (тыльной) поверхности зачеканивали термопару. Сигнал, поступающий с хромель-алюмелевой термопары, регистрировали цифровым осциллографом С9-8. Во вставку также запрессовывали тонкую реперную проволочку из алюминия для оценки остаточной сдвиговой деформации $g_{\max} = f(y)$ в металле вставки.

В начальный момент времени сварки взрывом распределение температуры внутри образца носит неравномерный характер, монотонно возрастает к границе соединения пластин. Очевидно, что равномерному распределению температуры по толщине вставки будет соответствовать максимальная фиксируемая температура ее тыльной поверхности (время достижения максимальной температуры тыльной стороной вставки составляло порядка сотен микросекунд).

Горячий спай термопар (≈ 0.5 мм), применяемых в опытах, вносит некоторую погрешность в измерения вследствие инерционности термопар. Анализ изменения во времени термоЭДС термопары показал, что скорость нарастания или падения температуры на тыльной стороне вставки не превышает 100 °С/с. Из решения задачи о нагреве шара [12] получено, что погрешность измерения температуры на любом участке термического цикла менее 1 %, а сам реальный цикл незначительно смещается по времени почти без изменения амплитуды сигнала, что позволяет в дальнейшем пренебрегать инерционностью термопары.

Знание средней температуры вставки после сварки при известных размерах и теплофизических свойствах вставки позволило определить общую удельную теплоту $Q_{\Sigma} = Q_1 + Q_2$ (см. рис. 1, *a*), введенную в пакет (сваренные вместе вставка и метаемая пластина). Здесь и далее индекс 1 относится к метаемой пластине, индекс 2 — к вставке.

Для разделения тепловложений в метаемую и неподвижную пластины проведены аналогичные опыты с применением тонкого противосварочного покрытия, наносимого на поверхность неподвижной пластины и не препятствующего деформационным процессам в приконтактной области (см. рис. 1, *b*). После завершения деформационных процессов в метаемой пластине и вставке образовавшееся соединение самопроизвольно разрушалось и металл метаемой пластины исключался из последующих теплообменных процессов.

Время от начала деформационных процессов до самопроизвольного разрушения соединения определяется временем прихода в зону соединения волны разгрузки и равно ≈ 1.5 мкс. В течение этого времени характерная глубина прогрева ($\delta = \sqrt{K\tau/(c\rho)}$, где K — теплопроводность, τ — время, c — удельная теплоемкость, ρ — плотность) вставки из АМгб составляет ≈ 8 мкм, метаемой стальной пластины — 4 мкм при общей глубине вовлеченных в пластическую деформацию слоев ≈ 100 мкм.

Таким образом, по схеме 1 (см. рис. 1,а) измеряли среднюю температуру T_Σ метаемой пластины и вставки (пакета), а по схеме 2 (см. рис. 1,б) — температуру только вставки (T_2). По измеренному значению T_Σ определяли общую удельную теплоту, выделенную в пакете (сваренные вместе вставка и метаемая пластина): $Q_\Sigma = T_\Sigma(c\rho_1\delta_1 + c\rho_2\delta_2)$, а по значению T_2 — удельную теплоту, полученную неподвижной вставкой: $Q_2 = T_2c\rho_2\delta_2$. При определении теплоты Q_2 предполагается, что потери тепла через внешнюю поверхность много меньше теплового потока внутрь материала. Исходя из того, что $Q_\Sigma = Q_1 + Q_2 = W_2$ (где W_2 — энергия, затраченная на пластическую деформацию металла, или, что то же самое, работа деформации), было рассчитано количество теплоты Q_1 , выделившееся в метаемой пластине: $Q_1 = Q_\Sigma - Q_2$.

Значения Q_1 и Q_2 показывают, каким образом энергия распределяется между метаемой и неподвижной пластинами. Зная характер распределения остаточных сдвиговых пластических деформаций $g_{\max}(y)$ (рис. 2), общее количество теплоты, выделившейся в неподвижной пластине и учитывая тот факт, что Q пропорционально g_{\max} или $Q_i = kg_{\max i}$ (где k — коэффициент пропорциональности, $g_{\max i}$, Q_i — текущие значения деформации и выделившейся в i -м слое толщиной Δy_i теплоты), можно приближенно, но с достаточно высокой степенью точности при малых значениях Δy_i рассчитать распределение температуры по толщине вставки, т. е. построить начальное температурное поле:

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

$$Q_i = kg_{\max i},$$

$$k(g_{\max 1} + g_{\max 2} + \dots + g_{\max n}) = Q_2,$$

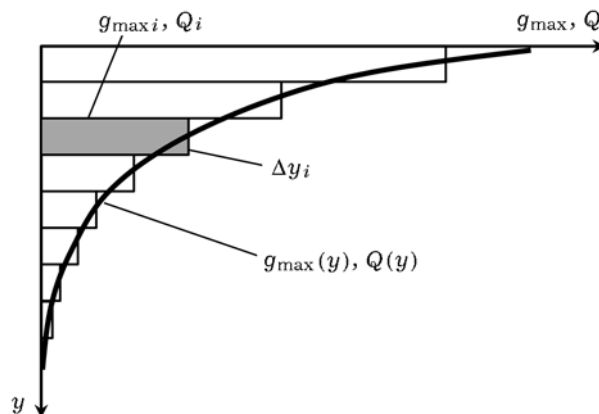


Рис. 2. Схема приближенного расчета распределения температуры по толщине вставки в зависимости от теплоты, выделившейся в результате деформационных процессов в ОШЗ

$$k = Q_2 / \sum_{i=1}^n g_{\max i},$$

$$T_i = \frac{Q_i}{c\rho\Delta y_i}.$$

В опытах применяли также методику измерения температуры с использованием естественных термопар, которую несколько усовершенствовали. В качестве термообразующей пары использовали медные и константановые датчики, установленные на неподвижном основании (рис. 3).

Так как металл соударяющихся пластин при сварке взрывом участвует в образова-

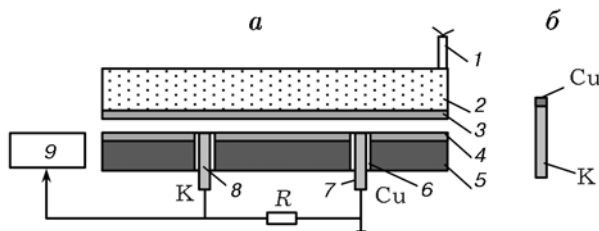


Рис. 3. Методика измерения температуры вблизи границы свариваемого взрывом соединения металлов методом естественных термопар (а) и схема медно-константанового (покрытого) датчика (б):

1 — электродетонатор, 2 — заряд ВВ, 3 — метаема медная пластина, 4 — медная фольга, 5 — неподвижная основа (СтЗ), 6 — изолятор, 7 — медный термоэлектрод, 8 — константановый термоэлектрод, 9 — осциллограф

нии кумулятивной струи, на поверхность неподвижной пластины предварительно наносили медную фольгу толщиной 0.1 мм, чтобы предотвратить присутствие инородных частиц на границе соединения медь — константан, образующего термопару. В этом случае термоЭДС измеряли на границе соединения.

Поскольку интерес представляет тепловая ситуация не только на границе соединения, но и в околошовной зоне, конструкцию константанового датчика усовершенствовали. На торце константанового стержня предварительно наносили сваркой взрывом тонкий слой меди (см. рис. 3, б) толщиной 0.3 ÷ 1 мм, а измеряемая термоЭДС соответствовала сечению, отстоящему от границы соединения на расстояние, равное толщине медного слоя.

ОЦЕНКА ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ УДАРНО-СЖАТОГО ГАЗА ВПЕРЕДИ ТОЧКИ КОНТАКТА НА ТЕПЛОВУЮ СИТУАЦИЮ В ОШЗ

Для оценки предварительного подогрева соударяющихся пластин потоком ударно-сжатого газа применяли расчетно-экспериментальную методику, основанную на измерении адиабатической температуры локальных слоев металла (см. рис. 1) в неподвижной пластине, расстояние между исследуемыми сечениями 60 мм.

Для режимов сварки $V_k = 1900$ м/с, $V_c = 390$ м/с и $V_k = 1700$, $V_c = 310$ м/с (см. таблицу) значения тепловыделения, зафиксированные с помощью таблеточных калориметров, составили соответственно $Q_{\Sigma}^I = 1.36$, $Q_{\Sigma}^{II} = 1.48$ и $Q_{\Sigma}^I = 1.26$, $Q_{\Sigma}^{II} = 1.38$ МДж/м² для сечений

I и II. Разница $Q_{\Sigma}^{II} - Q_{\Sigma}^I$, предположительно обусловленная тепловым воздействием ударно-сжатого газа, в обоих режимах оказалась равной 0.12 МДж/м², что составляет ≈ 8 % от общего количества тепла во вставке в сечении II. По-видимому, с увеличением размеров неподвижной пластины эта разница будет возрастать, а саму прибавку к выделяемой в ОШЗ теплоте необходимо учитывать даже при сварке относительно коротких пластин.

Полученные значения $Q_{\Sigma}^{II} - Q_{\Sigma}^I$, однако, не дают представления о том, каким образом тепло распределено по сечению соударяющихся пластин и на какую глубину прогреваются слои сваренных пластин. Для выяснения характера распределения теплоты в зависимости от воздействия ударно-сжатого газа применяли усовершенствованную методику с использованием естественных термопар (см. рис. 3).

Оказалось, что термические циклы в продольных сечениях, отстоящих на расстояние 0.3 ÷ 1 мм от границы соединения, имеют экстремумы (см. рис. 4, кривые 1–3), абсолютная величина которых по мере увеличения толщины медного слоя на торце константанового датчика уменьшается и смещается в большие времена.

Полученные термические циклы позволили построить распределение температуры по толщине неподвижной пластины и проследить ее динамику во времени (рис. 5). Видно, что градиент температуры в рассматриваемом сечении сначала возрастает (см. кривые t_0-t_3), а затем падает (см. кривую t_4), что, по-видимому, обусловлено переменной мощностью источника тепла (поток ударно-сжатого газа), действующего на поверхности пластин.

Температура и тепловыделение в пластинах при сварке взрывом

Номер режима	Параметры режима	Средняя (остаточная) температура, °С		Тепловыделение в пластинах, МДж/м ²		
		T_a	T_{Σ}	Q_{Σ}	Q_1	Q_2
1	$V_k = 1900$ м/с, $V_c = 390$ м/с	168	175	1.36	0.45	0.91
2	$V_k = 1700$ м/с, $V_c = 310$ м/с	154	164	1.26	0.41	0.85

Примечание. V_k — скорость контакта, V_c — скорость соударения, T_a — адиабатическая температура.

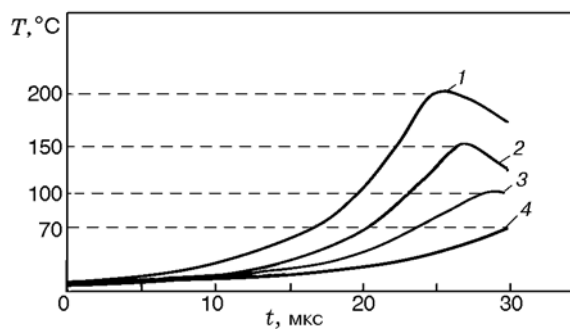


Рис. 4. Термические циклы в сечениях ОШЗ на расстоянии $\delta = 0.3, 0.5, 0.7, 1$ мм от условной границы соединения (соответственно кривые 1–4)

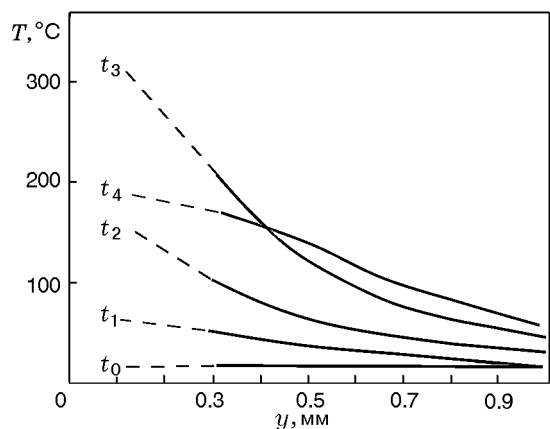


Рис. 5. Изменение температуры по толщине неподвижной пластины ($t_0 = 0$, $t_1 = 12$ мкс, $t_2 = 20$ мкс, $t_3 = 25$ мкс, $t_4 = 30$ мкс)

Таким образом, толщина металла, прогретого до $100 \div 200$ °С, составляет $0.3 \div 0.5$ мм, и это не может не отразиться на общей тепловой ситуации и условиях образования соединения.

НАГРЕВ МЕТАЕМОЙ ПЛАСТИНЫ ПРОДУКТАМИ ДЕТОНАЦИИ ВВ

Как уже отмечалось, нагрев металла под воздействием детонации ВВ приводит к дополнительному увеличению энергии, вводимой в метаемую пластину. Как правило, тепловому потоку от продуктов детонации ВВ, требуется некоторое время, чтобы достичь тыльной стороны метаемой пластины, и его влияние на тепловые процессы, протекающие на границе соединения, практически равно нулю. Однако при определенных условиях, например при метании относительно тонких материалов (фольг), обладающих высокой теплопроводностью, вклад этого теплового потока может быть значительным и может существенно изменить тепловую ситуацию в ОШЗ.

Такая оценка была получена расчетным путем с использованием численной методики, учитывающей зависимость теплофизических свойств материалов от температуры [11, 13]. Граничные условия были выбраны адиабатические, теплообмен с окружающей средой отсутствовал, что допустимо при характерных временах сварки взрывом порядка нескольких микросекунд. В качестве начальных условий задавались мощность мгновенного источника тепла q на внешней стороне пластины. По данным авторов [2] $q = 0.2 \div 0.7$ МДж/м² для раз-

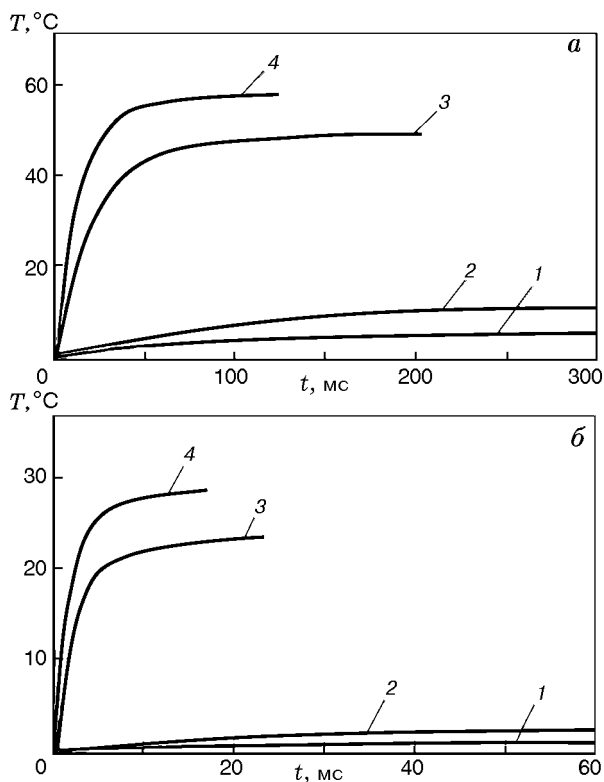


Рис. 6. Термический цикл на тыльной стороне метаемых стальных (а) и медных (б) пластин толщиной 15, 10, 2 и 1 мм (кривые 1–4 соответственно)

личных зарядов ВВ (в расчетах принималось $q = 0.5$ МДж/м²).

Рассчитанные термические циклы на тыльной стороне метаемой пластины (медной и стальной) при различной ее толщине показаны на рис. 6. Видно, что максимальная температура и время ее достижения сильно зависят от толщины и теплофизических свойств материала метаемой пластины, и при толщине порядка 1 мм для хорошо проводящих тепло материалов, например меди, время достижения максимальных температур сравнимо с характерным временем выравнивания температуры при сварке взрывом, в течение которого тепловой поток от продуктов детонации ВВ может влиять на условия образования соединения.

Составляющие температурного поля в метаемой медной пластине толщиной 1 мм показаны на рис. 7. Тепловой поток от продуктов детонации ВВ помимо того, что повышает максимальную температуру на границе соединения неподвижной и метаемой пластин, способствует также уменьшению градиента тем-

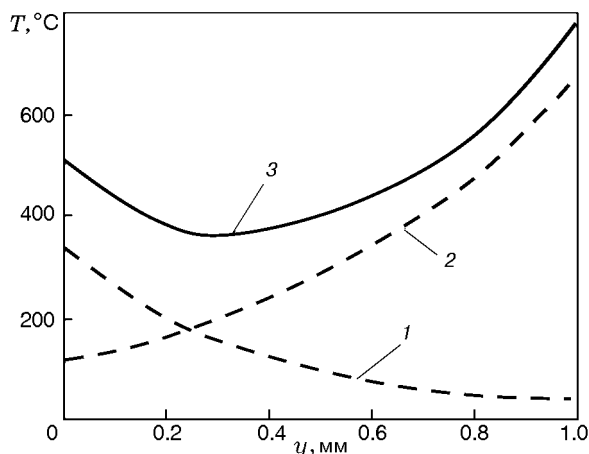


Рис. 7. Составляющие температурного поля, реализуемого в метаемой медной пластине толщиной 1 мм:

1 — температура, обусловленная тепловым воздействием продуктов детонации ВВ, 2 — температура, обусловленная выделившимся в результате пластической деформации пластины теплом, 3 — результирующее температурное поле (y — расстояние от поверхности раздела метаемаемая пластина — ВВ)

пературы в последней. Это приводит к замедлению процесса выравнивания температурного поля и, как следствие, к уменьшению скорости охлаждения границы соединения. В случае, когда свариваются материалы с резко отличающимися температурами плавления, например медь с алюминием, такая прибавка к температуре, достигаемой в меди, может вызывать интенсивное оплавление прилегающих слоев алюминиевой пластины за счет дополнительного притока тепла со стороны медной [8, 9].

Таким образом, нагрев метаемой пластины продуктами детонации ВВ при сварке тонких пластин может оказывать существенное влияние на тепловые условия образования соединения и должен учитываться при назначении параметров режима.

ОЦЕНКА НАГРЕВА МЕТАЛЛА ОШЗ ЗА СЧЕТ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Для решения этой задачи использовали описанную выше методику (см. рис. 1), основанную на измерении средней температуры некоторого заданного объема исследуемого материала (таблеточного калориметра) и на экспериментальном построении в сечении этого объема эпюр остаточных сдвиговых пластических деформаций. Для минимизации воздей-

ствия тепла от ударно-сжатого газа на нагрев таблеточного калориметра последний размещали в начале пластин.

Для двух режимов сварки, указанных в таблице, были определены средние (остаточные) температуры пластин после ее выравнивания, построены эпюры остаточных пластических деформаций, рассчитаны тепловыделение, начальные температурные поля и их изменение во времени (рис. 8).

Расчеты показали, что максимальная температура сечения с координатами $y = 0$ (свободная поверхность вставки или поверхность соударения) не превышает температуру плавления АМг6, что подтверждается отсутствием расплава на макрошлифах на границе вставки и метаемой пластины. Увеличение скорости соударения V_c (в нашем случае с 310 до 390 м/с) приводит к большему тепловыделению Q_2 в неподвижной вставке, а температурное поле в ней характеризуется, с одной стороны, дости-

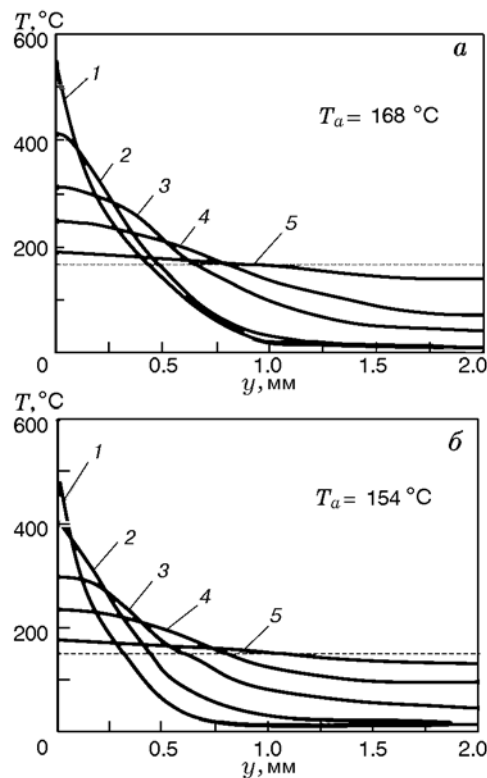


Рис. 8. Рассчитанные поля температуры в неподвижной пластине и динамика их выравнивания во времени для режимов 1 (а) и 2 (б) (см. таблицу):

1 — $t = 0$ мкс, 2 — $t = 40$ мкс, 3 — $t_2 = 90$ мкс, 4 — $t_3 = 170$ мкс, 5 — $t_4 = 600$ мкс

жением более высоких температур в ОШЗ, а с другой — более низкими градиентами температуры и скоростями охлаждения, что обусловлено вовлечением в пластическое течение более глубоко расположенных слоев металла ОШЗ.

Рассчитанные значения адиабатической температуры составили $T_a = 168$ и 154 °С, что хорошо согласуется с экспериментально зафиксированными значениями 175 и 164 °С (см. таблицу).

Таким образом, температурное поле, рассчитанное на момент окончания деформационных процессов ($t = 0$), соответствует экспериментальному в рамках известных граничных условий: $T(y, t) < T_{пл}$, $y = 0$, $t = 0$; $T(y, t) = T_0$, $y = 2$, $T_0 = 20$ °С.

Расчеты проводили с помощью специализированного пакета прикладных программ [14], позволяющего рассчитывать выравнивание заданных одно-, двух- и трехмерных температурных полей. Пакет дает возможность рассчитывать температурные поля при сварке взрывом на основе известных экспериментальных термических циклов в сечениях композита, а также с использованием экспериментальных эпюр остаточных сдвиговых пластических деформаций; задавать в качестве начальных условий внутренние источники тепла заданной мощности и интенсивности.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально установлено, что еще до соударения свариваемых пластин слои металла, прилегающие к границе соединения, могут существенно прогреться на значительную глубину даже при сварке относительно коротких пластин. Полученные при этом экспериментальные значения тепловложения от потока ударно-сжатого газа (0.12 МДж/м²) соответствуют рассчитанным по методикам [3, 4]. При этом показано, что тепловое влияние потока ударно-сжатого газа впереди точки контакта имеет немонотонный характер: поверхностные слои в околошовной зоне в зависимости от их удаленности от границы соединения могут претерпевать как нагрев, так и охлаждение на несколько сотен градусов на глубину, сравнимую с размерами околошовной зоны, вовлеченной в пластическую деформацию.

2. На основании математического моделирования теплового воздействия продуктов детонации ВВ на метаемый элемент показано,

что при сварке относительно тонких пластин (фольг) тепловой вклад продуктов в зависимости от теплофизических свойств свариваемых материалов может влиять на тепловую ситуацию в сварном шве, приводя к повышению температуры на границе соединения, замедлению охлаждения и интенсивному оплавлению прилегающих к границе соединения слоев более легкоплавкого материала.

3. Полученные с помощью описанных методик данные позволяют достоверно оценивать температурные поля в приконтактных слоях соединяемых пластин при проектировании и оптимизации режимов сварки взрывом разнородных композитов, что дает возможность целенаправленно управлять их конечными структурой и свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лысак В. И., Кузьмин С. В. Сварка взрывом. — М.: Машиностроение-1, 2005.
2. Захаренко И. Д. Сварка металлов взрывом. — Мн.: Навука і тэхніка, 1990.
3. Ищуткин С. Н., Кирко В. И., Симонов В. А. Исследование теплового воздействия ударно-сжатого газа на поверхность соударяющихся пластин // Физика горения и взрыва. — 1980. — Т. 16, № 6. — С. 69–73.
4. Бердыченко А. А., Первухин Л. Б. Теоретические основы сварки взрывом в среде защитных газов // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: межвуз. сб. науч. тр. / ВолгГТУ. — Волгоград, 2002. — С. 134–151.
5. Пеев А. П., Кузьмин С. В., Лысак В. И. Расчетно-экспериментальная оценка тепловой ситуации в околошовной зоне при сварке металлов взрывом // Автомат. сварка. — 2004. — № 4. — С. 9–12.
6. Lysak V. I., Kuzmin S. V. Lower boundary in metal explosive welding. Evolution of ideas // J. Mater. Proces. Technol. — V. 212, iss. 1. — P. 150–156.
7. Пеев А. П., Кузьмин С. В., Лысак В. И., Хаустов С. В. Расчет температурных полей при сварке взрывом // Изв. ВолгГТУ. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. — Волгоград, 2004. — Вып. 1, № 6. — С. 89–94.
8. Чугунов Е. А., Кузьмин С. В., Лысак В. И., Пеев А. П. Основные закономерности деформирования металла околошовной зоны при сварке взрывом алюминия // Физика и химия обработки материалов. — 2001. — № 3. — С. 39–44.
9. Пеев А. П., Кузьмин С. В., Лысак В. И., Чугунов Е. А. Особенности пластического деформирования металла околошовной зоны при

- сварке взрывом меди с алюминием // Физика и химия обработки материалов. — 2003. — № 1. — С. 71–76.
10. **Кузьмин Г. Е., Пай В. В., Яковлев И. В.** Экспериментально-аналитические методы в задачах динамического нагружения материалов. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002.
 11. **Хаустов С. В., Кузьмин С. В., Лысак В. И., Пеев А. П.** Моделирование тепловых процессов в околошовной зоне соединений при сварке взрывом // Забабахинские научные чтения: тез. докл. междунар. конф., 10–14 сент. 2007 г. — Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2007. — С. 233.
 12. **Лыков А. В.** Теория теплопроводности. — М.: Высш. шк., 1967.
 13. **Хаустов С. В., Кузьмин С. В., Лысак В. И., Федянов Е. А.** Расчетно-экспериментальное определение температурных полей в зоне соединения при сварке взрывом // Физика и химия обработки материалов. — 2007. — № 4. — С. 46–51.
 14. **Свид-во** о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2007613261 «Программа моделирования тепловых процессов в условиях сварки взрывом» / С. В. Хаустов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, А. П. Пеев.
-

*Поступила в редакцию 4/X 2013 г.,
в окончательном варианте — 6/II 2014 г.*