

ФОРМИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ СТРУКТУР В СВАРНОМ ШВЕ ПРИ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОЙ СВАРКЕ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

О. Н. Бежин, В. А. Косяков, Р. А. Кректулева

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634021 Томск

На основе численного моделирования процесса формирования сварного шва неплавящимся электродом изучаются технологические режимы сварки, способствующие равномерному распределению свойств по длине сварного соединения.

Введение. В последнее время благодаря созданию импульсных источников питания с программным управлением открылись принципиально новые возможности в развитии технологий сварки и наплавки на основе дозированного подвода энергии электрической дуги по некоторому заданному алгоритму.

Чисто опытным путем [1, 2] обнаружено, что при определенных импульсных режимах наблюдается ряд положительных моментов в процессе формирования неразъемного соединения. В частности, уменьшаются испарение металла из расплава сварной ванны и зона термического влияния (ЗТВ), снижается количество дефектов в сварном соединении, внутренняя структура сварного шва и ЗТВ становится более однородной. Все это в конечном счете способствует повышению прочности неразъемного соединения. Существует предположение, что указанные эффекты связаны с возникновением процессов самоорганизации материи [3, 4]. Знание причин и основных закономерностей самоорганизации материи позволило бы перейти к целенаправленному конструированию технологических процессов сварки, обеспечивающих сварному соединению максимально высокие эксплуатационные свойства. Необходимо отметить, что в целом импульсно-дуговые технологии сварки являются достаточно сложным объектом физического и математического моделирования из-за большого разнообразия электромагнитных, тепловых, химических, механических и других явлений, присутствующих в технологическом цикле. В связи с этим представляет интерес разработка и исследование некоторых базовых математических моделей процессов импульсно-дуговой сварки, оказывающих наибольшее влияние на конечные свойства сварного соединения. Одним из них является взаимодействие электрической дуги (как источника концентрированной тепловой энергии) со свариваемым объектом, так как от процесса тепловложения зависят ширина и глубина зоны проплавления, размеры ЗТВ, явления кристаллизации и рекристаллизации в шве и околошовной зоне, от которых зависит внутренняя микро- и мезоструктура.

В данной работе численно решается пространственная динамическая задача теплопроводности при импульсном подводе тепла от движущегося источника нагрева (дуги). Исследуется влияние частоты импульсов и скорости сварки на формирование тепловой картины в стыковом соединении двух стальных пластин конечных размеров.

Постановка задачи. В общем случае система уравнений, описывающих взаимодействие электрической дуги со свариваемыми встык пластинами, включает:

- пространственное уравнение теплопроводности

$$C(T)\rho(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div} [\lambda(T) \operatorname{grad} T] + Q \quad (1)$$

с граничными условиями на поверхности (кроме области воздействия дуги)

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T)(T - T_0) \quad (2)$$

и в зоне воздействия дуги

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial n} = Q; \quad (3)$$

- уравнение движения фронта плавления или кристаллизации (условие Стефана)

$$LV_k = \lambda_t \frac{\partial T}{\partial n} - \lambda_{ж} \frac{\partial T}{\partial n}; \quad (4)$$

- уравнение теплового потока, идущего от дуги (уравнения нормального распределения [5]),

$$Q = \eta IU(k/\pi) \exp(-kr^2). \quad (5)$$

В уравнениях (1)–(5) введены следующие обозначения: T — текущая температура; T_0 — температура окружающей среды; $C(T)$, $\rho(T)$, $\lambda(T)$ — функциональные зависимости теплоемкости, плотности, теплопроводности от температуры; $\alpha(T)$ — коэффициент теплообмена с окружающей средой; $\mathbf{n}$ — вектор нормали к поверхности; L — удельная теплота фазового перехода; V_k — скорость распространения фронта плавления (кристаллизации); λ_t , $\lambda_{ж}$ — теплопроводность твердой и жидкой фаз в процессе фазового перехода; $I(t)$ — ток; $U(t)$ — напряжение; η — эффективный КПД дуги; k — коэффициент сосредоточенности потока; r — радиус активного пятна нагреваемой поверхности; t — время; x , y , z — пространственные координаты.

Задача (1)–(5) решалась численно методом конечных разностей [6]. Размеры каждой из свариваемых пластин составляли $80 \times 20 \times 8$ мм. В силу симметричности расположения пластин относительно источника тепла задача решалась только для одной пластины с расчетной сеткой $80 \times 20 \times 8$ ячеек. При этом использовался алгоритм разбиения трехмерной задачи на две двумерные по аналогии с работой [7]. Кроме того, в решении тепловой задачи учитывалась нелинейность теплофизических характеристик $C(T)$, $\lambda(T)$, $\rho(T)$. Опытные данные для сталей типа Ст45, приведенные в [8, 9], аппроксимировались полиномом вида $\sum_{i=0}^n a_i T^i$, число членов которого определялось с помощью стандартных процедур решения задачи регрессии [10].

На рис. 1 приведен пример «сглаживания» коэффициента теплопроводности $\lambda(T)$ функцией вида $\lambda(T) = 112,33637 - 0,12759T + 0,00005T^2$ (сплошная линия — расчет, точки — эксперимент).

Аналогично аппроксимировались и другие параметры. Отметим, что для исследуемой марки стали в литературе не удалось обнаружить достоверных данных об изменении теплофизических параметров при температурах выше температуры плавления $T_{пл}$, и поэтому при $T > T_{пл}$ использовались аппроксимационные зависимости, построенные по экспериментальным данным для более низкой температурной области ($T < T_{пл}$). По этой же причине в точке плавления принято $\lambda_t = \lambda_{ж}$, что позволило в явном виде не учитывать условие Стефана. Параметры дуги r , η , k задавались в соответствии с [5].

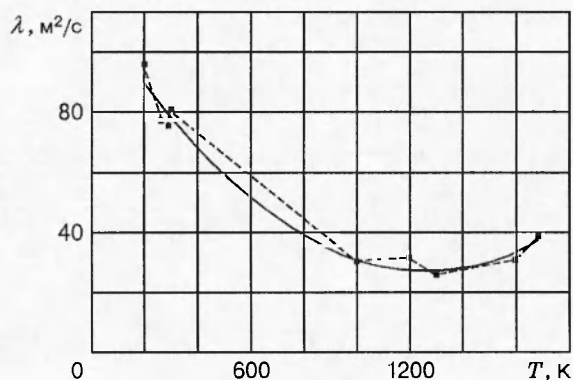


Рис. 1

В численном эксперименте рассматривались технологические режимы, используемые на практике при сварке в аргоне. Так, скорость сварки изменялась в пределах 0,001–0,004 м/с, вольт-амперные характеристики (ВАХ) задавались в пределах не более 20 % от значений: ток в импульсе $I_{\text{и}} = 350$ А, ток в паузе $I_{\text{п}} = 150$ А, напряжение в импульсе $U_{\text{и}} = 52$ В, — в паузе $U_{\text{п}} = 12$ В. На частоту и форму импульсов ограничения не накладывались.

Обсуждение результатов вычислений. Проанализируем решение тепловой задачи (1)–(5). На рис. 2 представлено распределение температуры в сварном соединении при скорости сварки $V_c = 0,002$ м/с, прямоугольной форме импульса ($t_{\text{и}} = t_{\text{п}} = 0,3$ с) и базовых значениях ВАХ, указанных выше. На рис. 2,а место стыка обозначено вертикальным сечением. В сечении и по поверхности приведены тепловые поля, которые возникли к 24-й секунде. Штриховкой показаны области с различной температурой. Отсчет ведется от внутренней (незаштрихованной) области — зоны расплава металла, где материал достигает температуры кипения, на границе этой зоны температура равна температуре плавления ($T_{\text{пл}} = 1808$ К). Внутри каждой последующей области температура от границы до границы падает на 500 градусов.

На рис. 2,б представлено распределение температур в приповерхностном слое на глубине 1 мм. Обращает на себя внимание, что фронт тепловой волны локализован в достаточно узкой области. Это обусловлено, во-первых, нелинейностью теплопроводящих свойств среды (коэффициенты теплопроводности, температуропроводности и обмена с

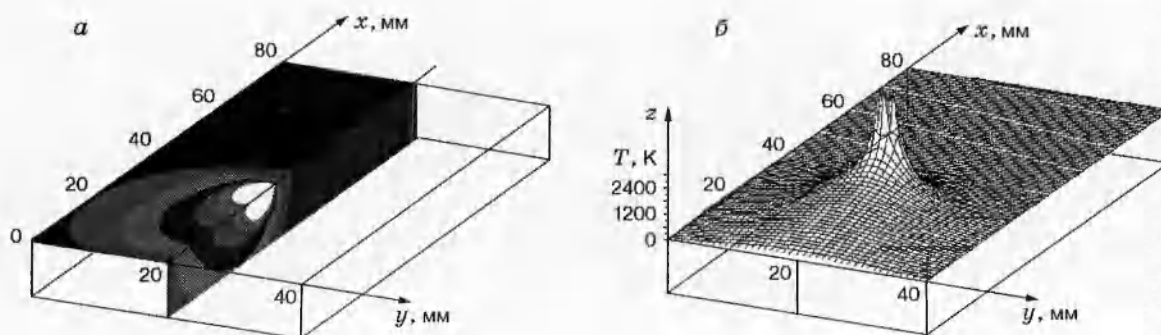


Рис. 2

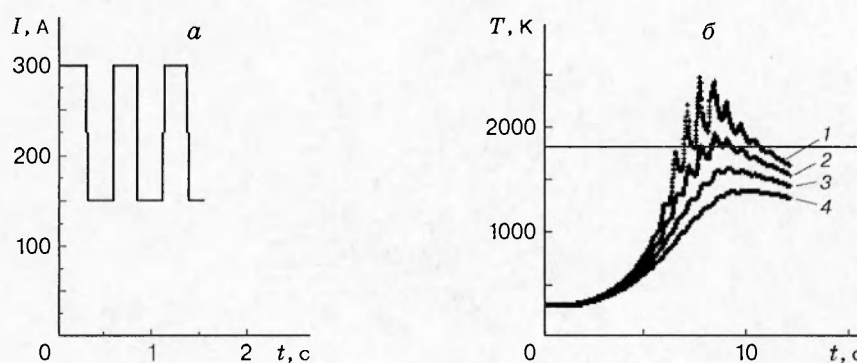


Рис. 3

окружающей средой в диапазоне температур 300–1800 К у Ст45 изменяются в 3–4 раза [8, 9]), во-вторых, непрерывным перемещением с некоторой скоростью источника нагрева, в-третьих, импульсным характером тепловложения.

Проведение численных экспериментов при различных режимах сварки показало, что тепловые структуры могут иметь достаточно сложную конфигурацию, изменяющуюся во времени. Удалось также выделить некоторый набор элементарных топологических форм или собственных функций (по терминологии [11]), из которых образуются сложные тепловые структуры. Для наглядности исследуем процесс теплопереноса в режиме низкочастотной модуляции сварочного тока (менее 10 Гц). В таких режимах материал успевает как бы подстроиться под частоту колебаний теплового потока Q , так что частота температурных колебаний материала не только в области дугового пятна, но и в его окрестностях становится синхронной с частотой импульсов тепловой энергии. На рис. 3 приведена форма импульсов сварочного тока (а) и изменение температуры во времени в точках, соосных с центром дугового пятна и расположенных соответственно на глубине 2, 3, 4, 5 мм (кривые 1–4) (б).

Расчеты также показали, что на тепловой колебательный процесс в сварном соединении практически не оказывает влияние геометрия импульсов (прямоугольная, синусоидальная и пр.). В то же время чем больше период колебаний, тем яснее проявляются составляющие элементы тепловых структур. При низкочастотной подаче энергии можно обнаружить четыре характерных типа элементарных структур, которые формируются в последовательности:

- а) при переходе от паузы к импульсу,
- б) в импульсе,
- в) при переходе от импульса к паузе,
- г) в паузе.

Такая последовательность наблюдается в течение каждого периода. Однако максимальная амплитуда температур для каждой характеристики растет с увеличением числа периодов, поскольку скорость сварки ниже скорости передачи тепла. Это приводит к увеличению размеров зоны сплавления сварного шва и ЗТВ по его длине, что влечет за собой изменение термомеханических свойств и, как правило, ухудшение прочностных и других эксплуатационных характеристик сварного соединения. На практике термомеханические свойства выравнивают с помощью термоциклирования [2].

Обнаруженные закономерности позволили предпринять попытку подобрать технологический режим, который приводил бы материал к своего рода самоорганизации в процессе концентрированного теплового воздействия. Расчеты показали, что высокую стабильность

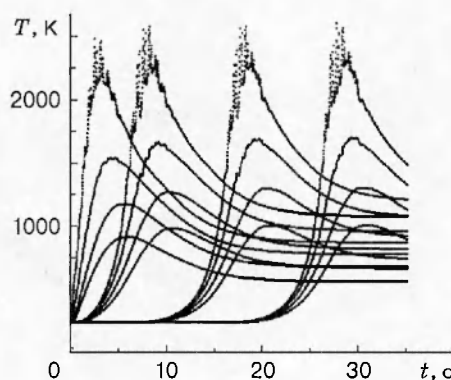


Рис. 4

температурных режимов можно получить, регулируя частоту импульсов подводимой энергии и скорость сварки. При необходимости в число управляющих параметров включают и другие технологические характеристики ($t_{и}$, $t_{п}$ и т. д.). На рис. 4 приведен пример тепловых структур, которые формируются в зоне сплавления шва при увеличивающейся скорости сварки ($V_c = 0,002 + 0,0005t$) и импульсе с периодом 0,6 с ($t_{и} = t_{п} = 0,3$ с). На графике приведены кривые для точек с координатами (в мм): [(10,1),(10,2),(10,4),(10,6)], [(20,1),(20,2),(20,4),(20,6)], [(40,1),(40,2),(40,4),(40,6)], [(60,1),(60,2),(60,4),(60,6)]. Квадратными скобками объединены точки, расположенные на одинаковом расстоянии от левого края пластины. В круглых скобках первая цифра означает это расстояние, а вторая — глубину.

Нетрудно заметить, что все четыре группы кривых подобны. В пределах области локализации характер изменения температуры в различных точках пространства одинаков. Стабильные тепловые колебания в области повышенных температур во время самого процесса сварки создают условия термоциклирования, что в указанных режимах безусловно повышает эффективность технологии сварки.

Выводы. 1. В работе приведена расчетная модель одного из основных этапов технологического процесса сварки — этапа теплового взаимодействия сварочной дуги со свариваемым изделием. Модель достаточно полно отражает реальный процесс: в ней учтены пространственная геометрия свариваемых частей, нелинейные свойства теплофизических характеристик, а также возможность импульсного подвода тепла при переменной скорости сварки.

2. Решение тепловой задачи позволило обосновать эффективность импульсных режимов сварки на токах низкой частоты (менее 10 Гц), так как при этом возможно создание стабильных тепловых структур в процессе сварки вдоль всего сварного соединения, обеспечивающее получение однородности термомеханических свойств в сварном шве и ЗТВ, что гарантирует высокое качество сварного соединения.

Результаты расчетов могут быть использованы в реальных технологических процессах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вагнер Ф. А. Оборудование и способы сварки пульсирующей дугой. М.: Энергия, 1989.
2. Гривняк И. Свариваемость сталей / Пер. со словацк. Я. С. Гончаренко. М.: Машиностроение, 1984.

3. Зуев И. В. Самоорганизация (синергетика) процессов сварки и пайки. Работа формирования шва // Свароч. пр-во. 1995. № 9. С. 13–16.
4. Зайнетдинов Р. И., Киселев С. Н. Деформирование и разрушение сварных конструкций с позиций синергетики и теории марковских процессов // Сварочн. пр-во. 1995. № 3. С. 16–19.
5. Судник В. А., Рыбаков А. С. Расчетно-экспериментальные модели движущейся дуги неплавящегося электрода в аргоне // Свароч. пр-во. 1990. № 11. С. 32–34.
6. Самарский А. А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1983.
7. Панюхин А. В., Бадьянов Б. Н. Математическая модель проплавления при лазерной микросварке разнородных материалов // Свароч. пр-во. 1993. № 8. С. 8, 9.
8. Физические величины: Справочник / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991.
9. Шмычков А. А. Справочник термиста. М.: Машгиз, 1956.
10. Ахназарова С. Л., Кафаров В. В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии. М.: Высш. шк., 1985.
11. Самарский А. А., Галактионов В. А., Курдюмов С. П., Михайлов А. П. Режимы с обострением в задачах для квазилинейных параболических уравнений. М.: Наука, 1987.

*Поступила в редакцию 8/I 1997 г.,
в окончательном варианте — 17/III 1997 г.*
