

УДК 621.791.763.1

Математическое моделирование электрических и тепловых полей при односторонней контактной точечной сварке

**К.В. Соловьева, А.И. Демченко,
Ю.Г. Новосельцев, А.Н. Шмарловский**
*Сибирский федеральный университет,
Россия 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79¹*

Received 5.04.2011, received in revised form 12.04.2011, accepted 19.04.2011

Разработана и реализована математическая модель электрических и тепловых процессов при односторонней контактной точечной сварке. Показана картина распределения плотности тока при сварке в деталях и электродах, а также в переходном контакте. Установлено влияние отдельных факторов на распределение плотности тока, а также на величину проплавления нижней детали при сварке.

Ключевые слова: контактная сварка, математическое моделирование, вычислительный эксперимент, электрическое поле, тепловое поле.

Введение

Односторонняя контактная точечная сварка (ОКТС) находит свое применение благодаря следующим своим достоинствам по сравнению с двухсторонней: увеличение производительности; меньшая электрическая мощность оборудования из-за небольших размеров сварочного контура, что обуславливает снижение его индуктивного сопротивления; в связи с односторонним подводом тока облегчение механизации и автоматизации процесса сварки; возможность сварки деталей резко неравных толщин; существование конструкций, где затруднен двухсторонний подвод электродов к месту соединения [1-3].

Резко ограничивают применение этого способа особенности, связанные с наличием тока шунтирования, текущего по верхней детали и не участвующего в образовании сварных точек. Следствием этого являются такие дефекты, как наружные выплески, непровар, наплывы, вмятины от электродов, массоперенос в контакте электрод – деталь, износ электродов, неудовлетворительный внешний вид изделия. Все это часто приводит к невозможности получения качественного сварного соединения. Технологи часто субъективно отходят от применения этого способа в сторону различных видов сварки плавлением, что также говорит о недостаточной изученности процесса. Режимы сварки, в основном, подбирают экспериментально [1, 4-6].

* Corresponding author E-mail address: dealig@rambler.ru

¹ © Siberian Federal University. All rights reserved

Целью данного исследования стало выявление особенностей распределения электрического и теплового полей при ОКТС двух деталей без подкладки на стадии нагрева на основе математического моделирования указанных процессов.

Методики моделирования

Модель основана на совместном решении уравнений электрического потенциала и теплопроводности и учитывает температурные зависимости электротеплофизических свойств материала свариваемых деталей и электродов, а также скрытую теплоту плавления металла деталей [7-10]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(x \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(x \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(x \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) = 0 \quad (1)$$

где x – удельная электропроводность материала [См/м]; $\varphi_{(x,y,z)}$ – электрический потенциал точки поля [В]; x, y, z – её координаты [м].

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_{\theta} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \omega_{(x,y,z,t)} \quad (2)$$

где T – температура, К; t – время нагрева, с; a_{θ} – коэффициент температуропроводности материала, м²/с; $\omega_{(x,y,z,t)}$ – приращение температуры за счёт внутреннего источника тепла.

Для некоторого упрощения модели был принят ряд допущений. Область расчета ограничили половиной реальных объектов сварки. Электрод заменили его частью высотой δ_3 , равной расстоянию от переходного контакта электрод – деталь до дна водоохлаждаемого канала (рис. 1). Не учитывали ситовый характер проводимости в контактах электрод – деталь и деталь – деталь, полагая наличие идеального физического контакта. Взяв во внимание условие относительной скоротечности процесса сварки, теплотой, излучаемой с поверхности деталей и электродов, пренебрегали.

Исходя из принятых допущений область решения уравнений представлена на рис. 1. Верхняя деталь контактирует с токоподводящим электродом диаметром D_3 , высотой h_3 и углом наклона рабочей части α_3 . Центры контактов электрод – деталь и деталь – деталь привязаны к осям координат меняющимися размерами l_3 и H_3 . Диаметры контактов равны d_3 . Размеры каждой детали варьируемые; параметр l_3 равен половине расстояния между электродами. Смещение одной детали относительно другой фиксируется значением H_3 . Плоскость ZOY является плоскостью симметрии электрического и температурного полей. Каждая деталь обладает своими электротеплофизическими свойствами, изменяющимися или неизменными в зависимости от температуры.

Краевые и граничные условия задавали в соответствии с реальным технологическим процессом. На свободных границах с учетом скоротечности процесса заданы условия электрической непроницаемости и отсутствия конвективного теплообмена. На верхней границе электрода температура постоянна и равна температуре охлаждающей воды, а потенциал равен половине значения напряжения на электродах машины. На оси симметрии заданы: для теплового поля отсутствие теплового потока, а для электрического – нулевой потенциал.

Поставленная задача моделирования решена методом конечных элементов. Для уменьшения объема расчетов линейные размеры элементов меняются в зависимости от их местопо-

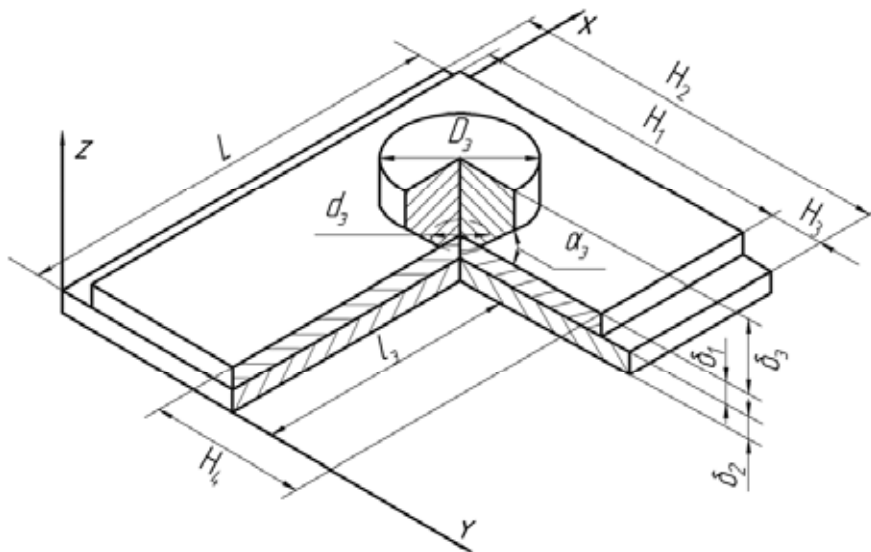


Рис. 1. Область решения уравнений модели

жения: в зоне под электродом размеры элементов минимальны и постоянны, а вне этой зоны они увеличиваются в геометрической прогрессии по мере удаления от зоны. Численный аналог уравнения (1) решали по явной трехслойной схеме с постоянными параметрами методом итераций. При решении аналога уравнения (2) использовали неявную локально-одномерную схему для безусловной устойчивости расчета [11, 12].

Изменение электротеплофизических свойств, а также учет скрытой теплоты плавления производили по общеизвестным формулам.

Алгоритм расчета включает установление распределения электрического потенциала, плотности тока и температуры, а также определение изменения свойств материала на каждом временном шаге.

Для оценки адекватности математической модели вычисляли ошибку, состоящую из ошибки неточности численного решения, и ошибки, вызванной принятыми допущениями [13]. Ошибка вычисления температуры равна 41° , что в пересчете на выходные параметры модели – номинальный диаметр ядра $d_{я\text{ном}}$, проплавление каждой из деталей $h_{я1}$ и $h_{я2}$ – дает расхождение соответственно 0,33, 0,1 и 0,16 мм. Ошибку, связанную с упрощением модели, а также комплексную ошибку модели определяли сопоставлением теоретических результатов с данными натурального эксперимента. Проводили сварку без подкладки образцов из Ст3 шириной 30 мм, толщиной 1+3 мм при расстоянии между электродами 40 мм. Эксперимент повторяли три раза при постоянных параметрах режима сварки. Выходные параметры модели оценивали по макрошлифам соединений, выполненным в плоскости, проходящей через оси симметрии электродов. Отличие результатов для $d_{я\text{ном}}$, $h_{я1}$ и $h_{я2}$ составило соответственно 13,6, 8,4 и 34 %. Значимость расхождения оценивали сопоставлением дисперсии адекватности математической точности модели и точности эксперимента. Полученное значение критерия Фишера соответствует вероятности $P \geq 0,95$ того, что расхождение результатов моделирования с экспериментальными данными не значимо (рис. 2).

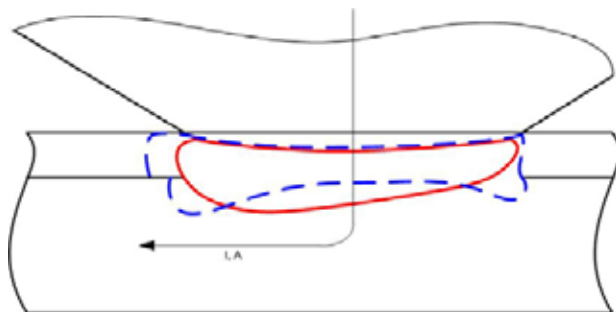


Рис. 2. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными: сплошная линия – форма точки по макрошлифу; штриховая – форма точки по результатам моделирования

Результаты исследований

С помощью разработанной модели проводили серию вычислительных экспериментов. В частности, определяли плотность тока в свариваемых деталях и электроде в момент включения тока и в процессе сварки. Оценивали изменение плотности тока в различных участках деталей и электродов, а также степень асимметричности плотности тока в контакте электрод – деталь по граничному слою электрода в зависимости от двух наиболее значимых факторов: угла наклона рабочей зоны электрода и расстояния между центрами электродов. Для последнего случая в качестве выходного параметра считали максимальное и минимальное значение плотности тока на эпюре, построенной с продольного разреза моделируемой области:

$$\begin{aligned} J_{max} &= f(\alpha, l_3), \\ J_{max} / J_{min} &= f(\alpha, l_3). \end{aligned} \quad (3)$$

Моделирование проводили при следующих параметрах: толщина деталей 1+3 мм, ширина деталей 30 мм, токоподвод по центру деталей, напряжение на электродах 1,4 В, диаметр электродов 8 мм. Эксперимент проведен по полному двухфакторному трехуровневому плану для построения модели второго порядка. Некоторые из полученных результатов моделирования графически представлены на рис. 3 – 5.

Общий вид полученной модели:

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{22}x_2^2. \quad (4)$$

Коэффициенты для J_{max} : $a_0 = 16,42$; $a_1 = -1,09$; $a_2 = -1,72$; $b_{11} = 0,24$; $b_{12} = 0,11$; $b_{22} = 1,07$; для J_{max} / J_{min} : $a_0 = 4,53$; $a_1 = -0,42$; $a_2 = -0,33$; $b_{11} = 0,19$; $b_{12} = 0,03$; $b_{22} = 0,2$.

Анализируя результаты, можно отметить, что наиболее высокая плотность тока наблюдается в контакте электрод – деталь. На асимметричный характер эпюры плотности тока в переходном контакте оказывают влияние угол наклона рабочей части электрода и расстояние между центрами электродов: с их увеличением степень асимметрии уменьшается. В процессе сварки из-за увеличения сопротивления более нагретых областей плотность тока в контакте значительно выравнивается. Следовательно, для снижения асимметрии практическим выходом можно считать применение электрода с переменным углом наклона рабочей части.

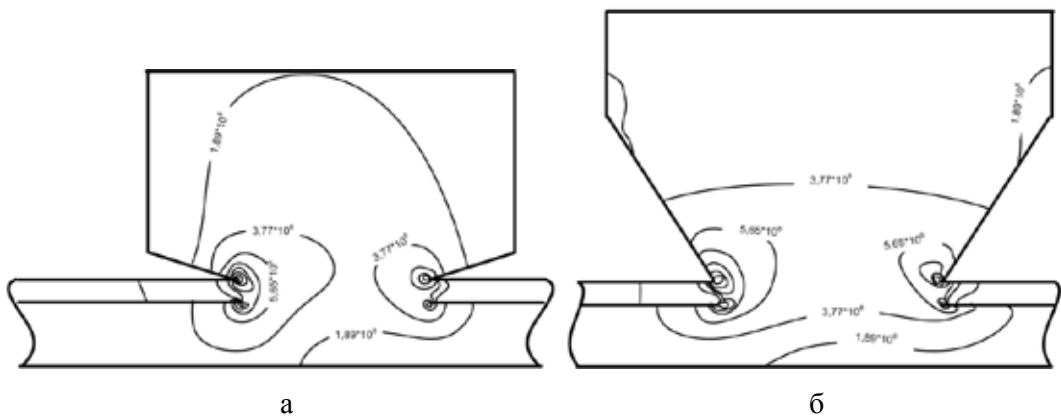


Рис. 3. Распределение плотности тока J , A/m^2 , в деталях и электроде в момент включения тока: а – $\alpha_3 = 15^\circ$, $l_3 = 30$ мм, $\delta = 1+3$ мм, $d_3 = 8$ мм, ширина деталей 30 мм, $U_3/2 = 0,7$ В; б – $\alpha_3 = 60^\circ$, $l_3 = 100$ мм, $\delta = 1+3$ мм, $d_3 = 8$ мм, ширина деталей 30 мм, $U_3/2 = 0,7$ В

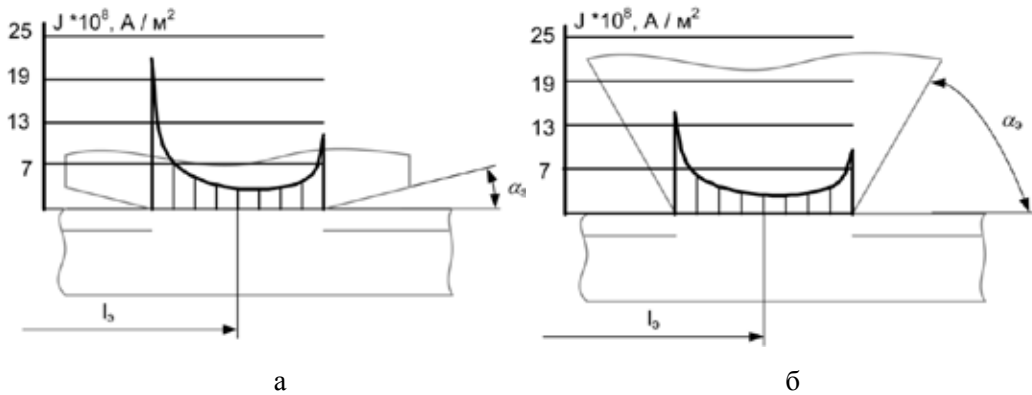


Рис. 4. Эпюры плотности тока в контакте электрод – деталь в момент включения тока $\delta=1+3$ мм, $d_3=8$ мм, ширина деталей 30 мм, $U_3/2=0,7$ В; а – $\alpha_3 = 15^\circ$, $l_3 = 30$ мм; б – $\alpha_3 = 60^\circ$, $l_3 = 100$ мм

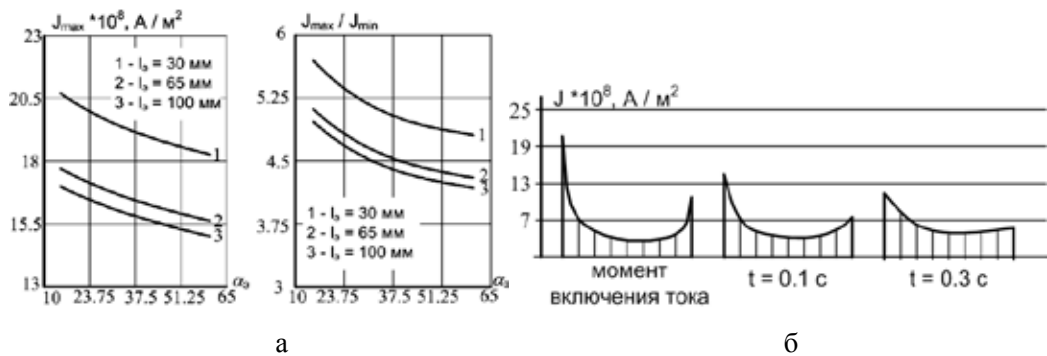


Рис. 5. Зависимость изменения J_{max} и J_{max}/J_{min} от α_3 и l_3 (а) и перераспределение плотности тока в переходном контакте в процессе сварки (б)

Таблица 1. Интервал варьирования входных факторов при оценке проплавления нижней детали

№ фактора	Фактор	Интервал варьирования	Обозначение
1	Толщина верхней детали, мм	0,5 ÷ 1,5	x_1
2	Толщина нижней детали, мм	2 ÷ 4	x_2
3	Расстояние между центрами электродов, мм	35 ÷ 65	x_3
4	Диаметр электрода, мм	6.5 ÷ 8.5	x_4
5	Ширина нижней детали, мм	30 ÷ 70	x_5
6	Расстояние от центра электрода до края верхней детали, мм	$1/6 x_5 \div 1/2 x_5$	x_6
7	Входное напряжение, В	1,4 ÷ 1,8	x_7
8	Время сварки, с	0,1 ÷ 0,5	x_8

При ОКТС основными геометрическими параметрами соединения, характеризующими его качество, будут являться величина проплавления нижней детали $h_{я2}$, а также не номинальный, а фактический диаметр ядра $d_{я\text{факт}}$, т. е. диаметр в плоскости контакта между деталями. При этом $d_{я\text{факт}}$ – величина, производная от $h_{я2}$. Это объясняется тем, что по результатам наших предварительных экспериментов, а также по результатам, полученным другими исследователями [1, 4-6], величина проплавления верхней детали $h_{я1}$ в любом случае составляет 70 – 90 % от толщины детали, т. е. достаточна для обеспечения прочности.

Поэтому при проведении вычислительного эксперимента по выявлению особенностей тепловых полей при ОКТС его целью задали установление характера изменения $h_{я2}$ в зависимости от входных параметров: толщины верхней и нижней детали δ_1 и δ_2 , половины расстояния между электродами l_3 , диаметра электрода d_3 , ширины нижней детали H_2 , места токоподвода относительно границ деталей H_4 , напряжения на электродах $U_{э3}$ и времени его протекания $t_{св}$. Ширина верхней детали H_1 , угол наклона рабочей зоны электрода α , и расстояние от контакта электрод – деталь до дна водоохлаждаемого канала электрода δ , являлись постоянными величинами и составляли 30 мм, 30° и 5 мм соответственно (см. рис. 1).

Таким образом, в исследовании определяется зависимость:

$$h_{я2} = f(\delta_1, \delta_2, H_2, H_4, d_3, l_3, U_{э3}, t_{св}). \quad (5)$$

Входные факторы и интервалы их варьирования приведены в табл. 1.

Предварительный анализ выявил наличие нелинейных влияний упомянутых факторов на $h_{я2}$, поэтому была выбрана нелинейная модель второго порядка. Однако при таком большом числе входных параметров построение полной модели требует огромного числа (3^8) экспериментов, поэтому было решено ограничиться главными факторами. При этом строили модель вида

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^8 a_i x_i + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 4}}^8 a_{ii} x_i^2 \quad (6)$$

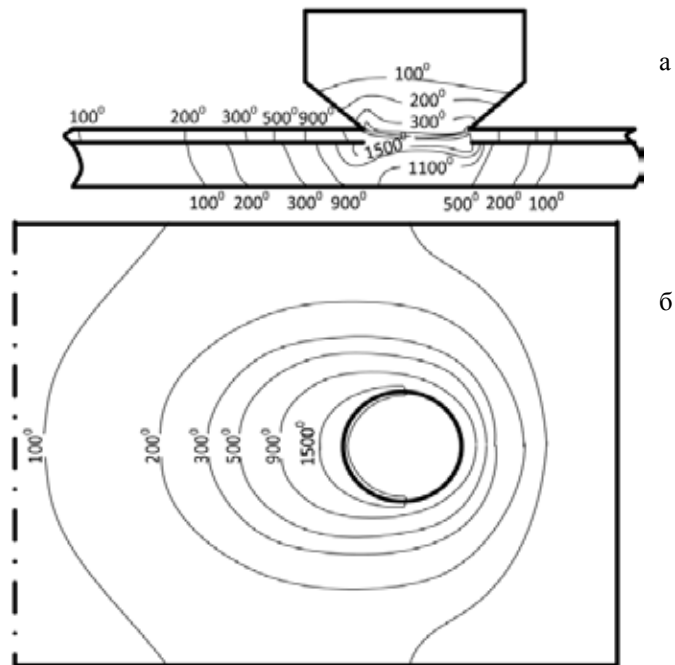


Рис. 6. Характер температурного поля при ОКТС; $U_{33} = 1,6$ В; $t_{св} = 0,3$ с; $l_3 = 50$ мм; $d_3 = 7,5$ мм; $\delta = 1+3$ мм; $\alpha_3 = 37,5^\circ$

Модель (6) содержит 16 коэффициентов, поэтому для их нахождения необходим план с числом экспериментов $N \geq 16$. В каталоге планов, приведенных в [14], был выбран подходящий план, обозначение которого 2..3⁷ //18.

В результате получили следующую модель:

$$\begin{aligned}
 y = & 0,893 - 1,017x_1 + 0,791x_2 + 0,116x_3 - 0,097x_4 + \\
 & + 0,075x_5 + 0,088x_6 + 0,093x_7 + +0,683x_8 + 0,123z_1 + \\
 & + 0,031z_2 - 0,024z_3 - 0,095z_5 - 0,067z_6 + 0,028z_7 - 0,078z_8.
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

На рис. 6 показано температурное поле на продольном разрезе деталей и электрода (рис. 6 а) и в верхней детали (рис. 6 б).

На рис. 7 представлены зависимости $h_{я2}$ от толщины деталей, расстояния между электродами, напряжения на электродах и времени сварки, полученные использованием уравнения (7). При построении графиков входные факторы, не указанные в них, принимали равными среднему значению (из табл. 1).

Найденные значения коэффициентов a_i и a_{ii} демонстрируют, что на главный показатель качества сварного соединения при ОКТС – величину проплавления нижней детали – наиболее значимо влияет толщина верхней и нижней деталей, ток вторичной обмотки трансформатора и время его протекания, расстояние между электродами. Степень нагрева деталей зависит от их электрического сопротивления, величины текущего по деталям тока, времени протекания тока. Верхняя деталь нагревается быстрее и значительнее, чем нижняя. При увеличении времени сварки проплавление нижней детали резко увеличивается; увеличение напряжения на

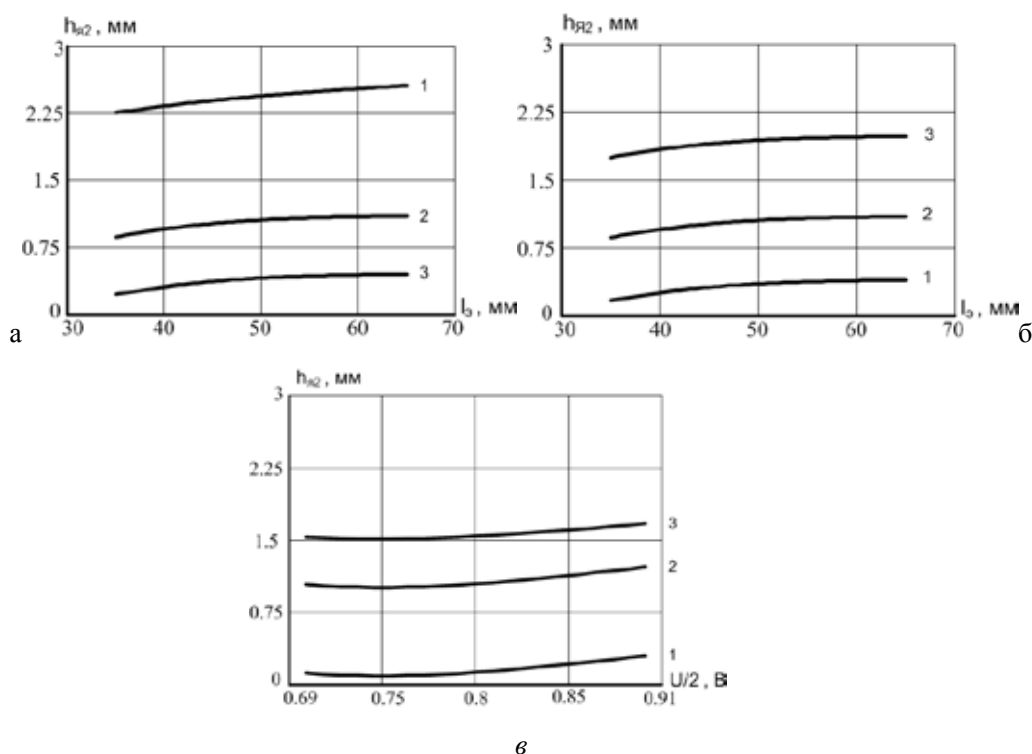


Рис. 7. Зависимости глубины проплавления ($h_{я}$) от технологических параметров сварки, полученные математическим моделированием: а – от расстояния между электродами при толщине верхней детали δ_1 : 0,5 мм; 2-1,0 мм; 3-1,5 мм; б – то же, при толщине нижней детали δ_2 : 1-2 мм; 2-3,0 мм; 3-4 мм; в – от значения напряжения $U_{я2}$ при длительности сварки $t_{св}$: 1-0,1 с; 2-0,3 с; 3-0,5 с

электродах (сварочного тока) на проплавлении сказывается менее значимо. Характер и динамика температурного поля заставляют предположить, что в процессе сварки с увеличением сопротивления верхней детали происходит перераспределение тока в деталях: уменьшение тока шунтирования и увеличение тока сварки. Поэтому можно сделать вывод, что использование мягких режимов при ОКТС предпочтительнее. При этом из-за недостаточно высокой точности математической модели влияние степени жесткости режима на перераспределение тока и, как следствие, на проплавление нижней детали требует экспериментальной проверки. Оценивая влияние геометрических факторов на значение $h_{я2}$, можно заметить, что характер изменения $h_{я2}$ обратно пропорционален зависимости тока шунтирования от этих же факторов: с увеличением тока шунтирования проплавление нижней детали уменьшается.

Выводы

1. Разработана и решена методом конечных элементов электротемпературная модель процесса ОКТС, основанная на совместном решении уравнений электрического потенциала и теплопроводности. Начальные и граничные условия соответствуют реальному технологическому процессу. Модель позволяет учесть изменение электротеплофизических свойств материала деталей и электродов в зависимости от температуры, а также фазовый переход металла деталей.

2. Установлено, что наиболее высокая плотность тока при сварке наблюдается в контакте электрод – деталь. На асимметричный характер эпюры плотности тока в переходном контакте оказывают влияние угол наклона рабочей части электрода и расстояние между центрами электродов: с их увеличением степень асимметрии уменьшается. В процессе сварки из-за увеличения сопротивления более нагретых областей плотность тока в контакте значительно выравнивается.

3. На величину проплавления нижней детали при ОКТС наиболее значимое влияние оказывают толщина верхней и нижней деталей, ток вторичной обмотки трансформатора и время его протекания, расстояние между электродами. Степень нагрева деталей зависит от их электрического сопротивления, величины тока, текущего по деталям, и времени его протекания. Верхняя деталь нагревается быстрее и значительно, чем нижняя. При увеличении времени сварки проплавление нижней детали резко возрастает.

Статья подготовлена и публикуется при поддержке Программы развития Сибирского федерального университета.

Список литературы

1. Чулошников, П.Л. Точечная и роликовая электросварка легированных сталей и сплавов. М.: Машиностроение, 1974. 232 с.
2. Гуляев, А.И. Технология точечной и рельефной сварки сталей. М.: Машиностроение, 1978. 246 с.
3. Губарева, Э.М. Контактная сварка: Учеб. пособие / Перм. гос. тех. ун-т. – Пермь, 2006. 83 с.
4. Тазьба, С.М. Исследование многоэлектродных машин для сварки толстолистовых изделий из малоуглеродистой стали: Дисс. ... канд. техн. наук. Л., 1961. 156 с.
5. Чулошников, П.Л., Дмитриева, Г.М. Исследование процесса односторонней двухточечной сварки// Автоматическая сварка. 1965. № 6. С. 3-6.
6. Кочергин, К.А. Шунтирование сварочного тока при стыковой, точечной и шовной сварке// Технология сварки. Л.: Машгиз, 1951.
7. Говорков, В.А. Электрические и магнитные поля. М.: Энергия, 1968. 368 с.
8. Исаченко, В.П., Осипова, В.А., Сукомел, А.С. Теплопередача. М.: Энергия, 1975. 488 с.
9. Тихонов, А.Н., Самарский, А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1999. 799 с.
10. Федяев, А.А., Федяева, В.Н., Видин, Ю.В. Математическое моделирование динамики процессов тепловлажностной обработки капиллярно-пористых коллоидных дискретных материалов// Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2008. №1. С. 68-75.
11. Годунов, С. К., Рябенский, В.С. Разностные схемы. М.: Наука, 1977. 440 с.
12. Самарский, А.А., Гулин, А.В. Устойчивость разностных схем. Изд. 2-е, испр, доп. М.: Наука, 2005. 384 с.
13. Судник, В.А., Ерофеев, В.А. Расчет сварочных процессов на ЭВМ. Тула: ТПИ, 1986. 100с.
14. Новик, Ф.С., Арсов, Я.Б. Оптимизация процессов технологии машиностроения методами планирования экспериментов. М.: Машиностроение, 1980. 304 с.

Mathematical Modeling of Electric and Thermal Fields at Indirect Resistance Welding

**Ksenya V Solov'eva, Alexandr I Demchenko,
Yuri G. Novoseltsev and Alexandr N. Shmarlovsky**
*Siberian Federal University,
79 Svobodny, Krasnoyarsk 660041 Russia*

A mathematical model of electric and thermal processes at indirect resistance welding has been developed and realized. The picture of current density during welding is shown in the parts and also in transitive contact. The influence of some factors on density current distribution and also the value of bottom part profusion during welding was established.

Keywords: resistance welding; mathematical modeling; electric field; thermal field.
