

УДК 621.791.4

Р.А. Мусин, Д.Н. Трушников, В.А. Шкурихин, Ю.А. Путин

Пермский государственный технический университет

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПАКЕТЕ FEMLAB 3.0

Приводится алгоритм построения математической модели процесса контактной точечной сварки в пакете прикладного программного обеспечения FEMLAB 3.0. Результаты физических экспериментов сравниваются с результатами вычисления. Полученная модель может быть использована для анализа физических закономерностей и обоснованного выбора технологических режимов контактной сварки.

Очевидно, что математическое моделирование – это неотъемлемая часть комплексной автоматизации, технологического проектирования и создания систем управления процессами. Широкое использование информационных технологий для создания высокопроизводительного и высокоэффективного автоматизированного производства является основной задачей математического моделирования.

Используя современные методы и средства математического моделирования, можно решать сложные связанные, нелинейные задачи электродинамики и термомеханики, а также описывать все особенности технологического процесса, выявлять качественную картину воздействия различных факторов. Существует возможность расчетным путем установить количественные функциональные зависимости.

Математическая формулировка связанной нелинейной задачи электродинамики и термодинамики включает уравнения электропроводности и теплопроводности, описывающие электрические и температурные явления при соответствующих краевых условиях. При построении модели учитывались электрические и тепловые контактные сопротивления на границе электрод – деталь, и свойства материалов, зависящие от температуры.

Первый шаг начинается с задания вида и размерности модели (1D, 2D или 3D). При рассмотрении совместного решения задач электродинамики и термодинамики в стартовом меню следует выбрать 2D-электрическую (Electromagnetics / Conductive Media DC) и 2D-тепловую (Heat Transfer / Conduction) задачи. Условия радиационно-конвективного теплообмена не учитываются, так как процесс контактной точечной сварки протекает при не слишком высоких температурах на поверхностях, время процесса незначительно, и конвекция не успевает развиваться [1].

Основными уравнениями являются дифференциальное уравнение электропроводности (1) и уравнение теплопроводности (2), записанные для функции потенциалов и температуры в цилиндрической системе координат, следовательно, построение математической модели будет вестись в такой же системе координат, для чего необходимо перед началом построения указать размерность модели Axial symmetry 2D (рис. 1). Математическая модель основана на решении связанной системы дифференциальных уравнений электро- и теплопроводности совместно для электрода и детали [2, 3].

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r}{\rho} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{\gamma c^*} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) \right] + \frac{j^2 \rho}{\gamma c^*}, \quad (2)$$

где $\varphi(r, z)$, $t(r, z, \tau)$ – функции потенциалов и температуры в цилиндрических координатах; ρ – удельное сопротивление; j – плотность тока; γ – плотность материала; λ – коэффициент теплопроводности; c^* – эффективная теплоемкость, учитывающая поглощение скрытой теплоты фазового перехода при плавлении металла; τ – время.

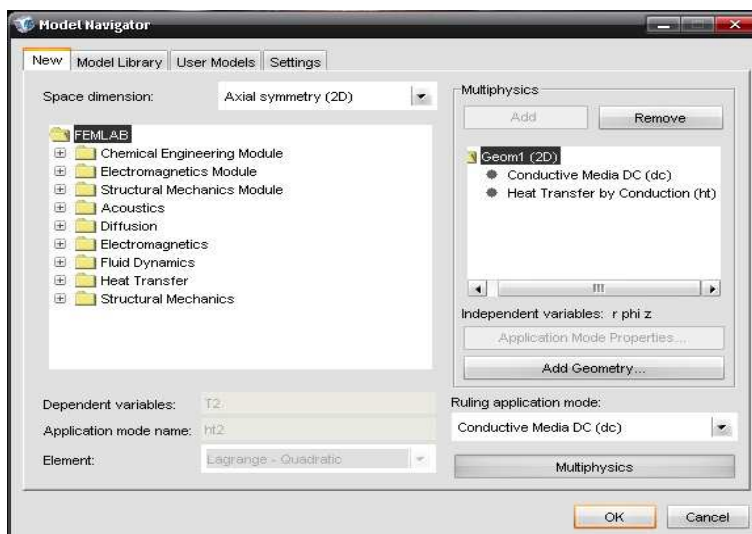


Рис. 1. Задание вида и размерности модели

Следующий шаг заключается в задании параметров координатной сетки с шагом, равным 0,001 м по обеим осям (r, z), для более точного построения (Option/Axes/Grid Setting). Сделав замеры, создаем геометрию расчетной

области, т.е. изображаем электроды и детали, на которых будет проводиться моделирование (рис. 2).

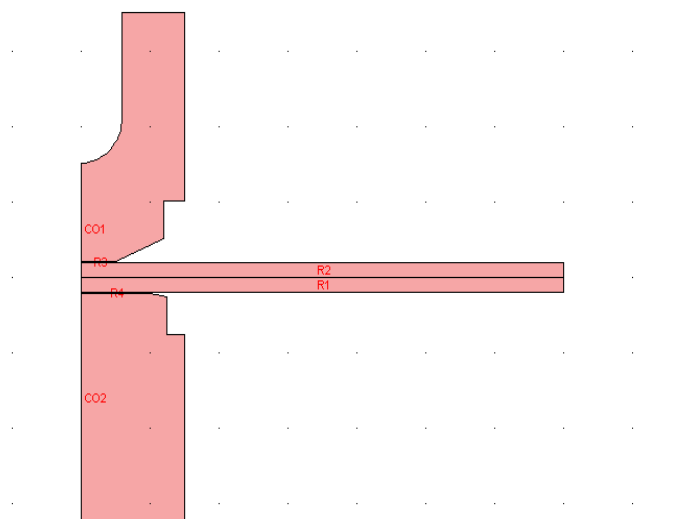


Рис. 2. Геометрия тел

Перед заданием физических свойств и граничных условий необходимо задать константы модели (Option / Constants), т.е. постоянные величины, используемые при расчетах: сила тока, температуры солидус и ликвидус, величины контактных сопротивлений и т.д.

Третий шаг – это задание физических свойств материалов и граничных условий для тепловой и электрической задач, при том, что моделируемые пластины сделаны из стали 12X18H10T, электроды – из бронзы БрХ, (рис. 3–6).

Задаем следующие параметры для тепловой задачи (Physics/Sub domain Settings):

– *пластины из стали 12X18H10T*: K – коэффициент теплопроводности ($K = 16.567 + 0.0179 \cdot T - 2e-6 \cdot T^2$), Вт/(м·К); ρ – плотность материала ($\rho = 7860$), кг/м³; Q – источник тепла, $Q = (Jr_dc^2 + Jz_dc^2) / \sigma_dc$, Дж; где Jr_dc и Jz_dc – плотности токов по соответствующим осям, А/м²; σ_dc – коэффициент электропроводности, Ом/м²; c_p – удельная теплоемкость ($c_p = 462 \cdot (T < T_s) + 406 \cdot (T > T_l) + Q_{pl} / (T_l - T_s) \cdot (T > T_s) \cdot (T < T_l)$), Дж/(кг·К); где Q_{pl} – удельная скрытая теплота плавления, Дж/кг; T_l и T_s – температуры ликвидус и солидус соответственно, °С;

– *электроды БрХ*: δ_{is} – коэффициент, зависящий от времени ($\delta_{is} = 1$); K – коэффициент теплопроводности ($K = 366.89 + 0.0918 \cdot T - 2e-4 \cdot T^2$), Вт/(м·К); ρ – плотность материала ($\rho = 8900$), кг/м³; c_p – удельная теплоемкость ($c_p = 418,6$), Дж/(кг·К); Q – источник тепла (Q_dc), Дж.

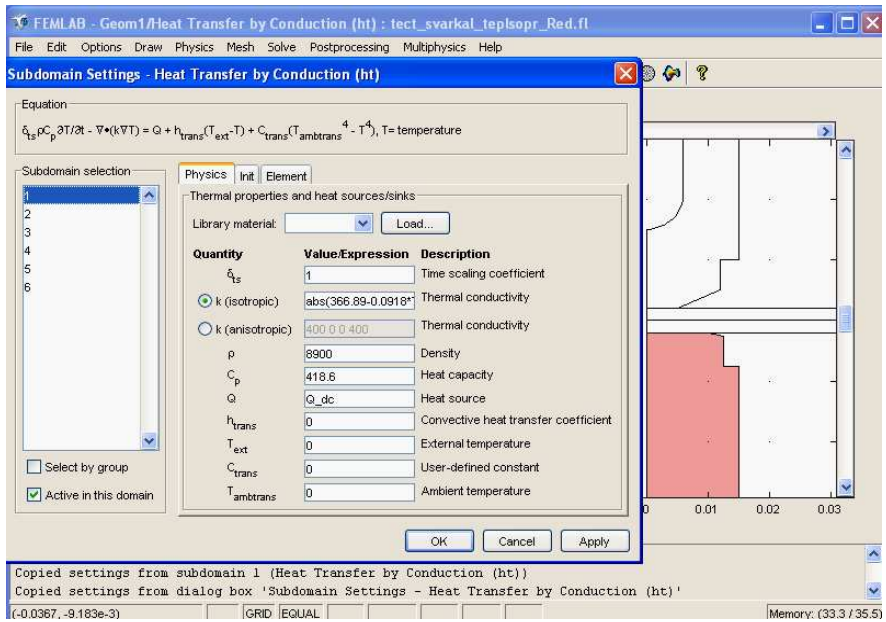


Рис. 3. Окно описания тепловых свойств материала

После задаем граничные условия для тепловой задачи (см. рис. 4, 5):

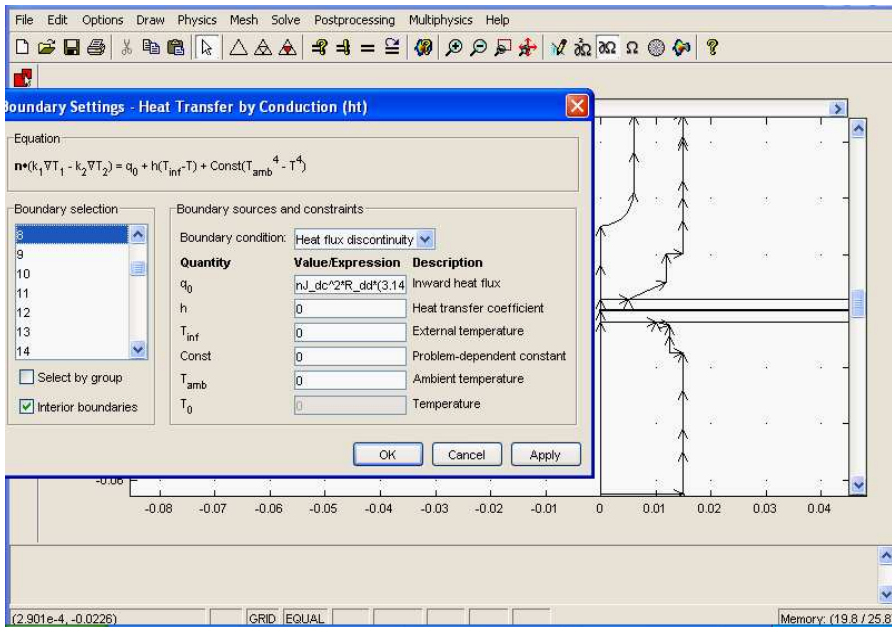


Рис. 4. Окно описания граничных условий тепловой задачи

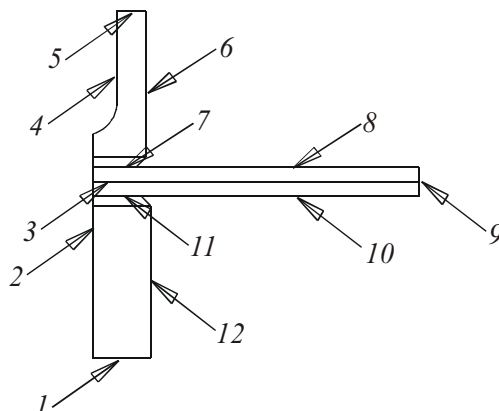


Рис. 5. Описание граничных условий: границы 1, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 12 – термоизолированные, т.е. через них тепло не идет (thermal insulation); граница 2 – ось симметрии (Axial symmetry); границы 7, 11 – внутренние непрерывные границы (continuity); граница 3 – на этой границе учитывается выделяющееся на электрическом контакте деталь – деталь джоулево тепло. При моделировании на сплошной пластине эта граница отсутствует

Как и в тепловой задаче, задаем физические свойства материалов для задачи растекания тока (см. рис. 6):

– пластины из стали 12Х18Н10Т: σ – коэффициент электропроводности ($\sigma_{dc} = 1/(70 + 40/700 \cdot T) \cdot 10^8$), Ом/м²;

– электроды БрХ: σ – коэффициент электропроводности ($\sigma = 51468000 - 112460 \cdot T + 118.5 \cdot T^2$), Ом/м².

После задания физических свойств задаем граничные условия для модели растекания тока (см. рис. 4, 5):

– границы 4, 6, 8, 9, 10, 12 – электроизолированные, т.е. через них ток не проходит (electric insulation);

– граница 2 – ось симметрии (Axial symmetry);

– граница 1 – нулевой потенциал (Ground);

– границы 3, 7, 11 – непрерывность линий тока (continuity);

– граница 5 – втекание тока, а именно плотность тока Inward current flow $J_n = I_{sv} / S_0$, где I_{sv} – ток сварки, А; S_0 – площадь поперечного сечения электрода на границе 5 (см. рис. 1), $S_0 = 3.14 \cdot (R^2 - r^2)$, м².

Кроме выделения в контактах тепла необходимо учитывать в этих областях наличие теплового сопротивления. На настоящий момент в пакете FEMLAB возможность задания теплового сопротивления на границе отсутствует.

Между электродами и деталью был добавлен тонкий проводящий слой, теплопроводность которого задавалась соответствующим пересчетом из значения теплового контактного сопротивления по формуле (3).

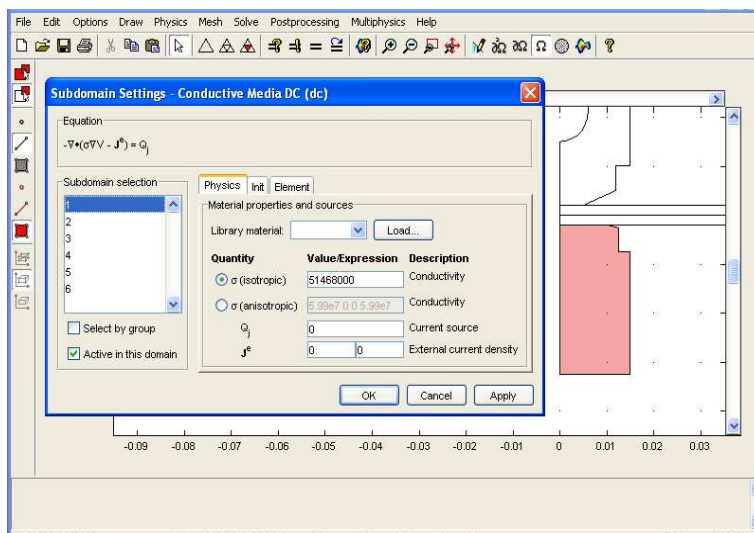


Рис. 6. Окно описания электрических свойств материала

Конечная формула для записи в FEMLAB выглядит так:

$$k = h_{ed} / Rt_{ed}, \quad (3)$$

где Rt_{ed} – тепловое электросопротивление электрод – деталь, Ом; h_{ed} – толщина тонкого проводящего слоя.

Помимо теплового сопротивления для точного построения математической модели необходим учет контактного электрического сопротивления [4, 5], для чего электропроводность проводящего слоя задаем из пересчета следующих формул: $R = \frac{\rho h}{S}$ и $\sigma_{dc} = 1 / \rho$. В итоге получаем следующее уравнение:

$$\sigma_{dc} = h / (SR_{ed}), \quad (4)$$

где ρ – удельное электросопротивление, Ом·м; σ_{dc} – электропроводность, Ом/м²; S – площадь поверхности проводящего слоя, м².

Граничные условия слоя для тепловой задачи (рис. 7) выглядят следующим образом:

– границы $l3$ – неоднородный тепловой поток (heat flux discontinuity), где

$$q_0 = (Jz_{dc}^2 + Jr_{dc}^2) \cdot (3.14 \cdot 0.005^2) \cdot R_{ed} / 2.$$

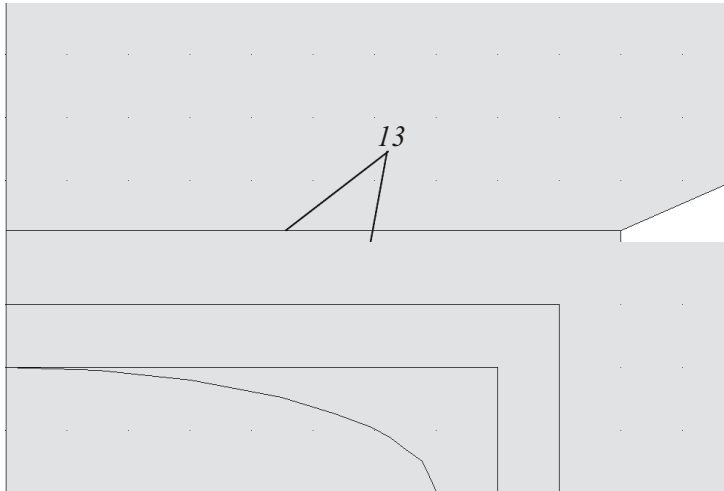


Рис. 7. Границы проводящего слоя

После проведенных действий следует задать время расчета (в нашем случае время расчета будет равно времени импульса тока). Для этого устанавливаем значения времени и шаг расчета в меню Solver parameters/time dependent/general следующим образом (рис. 8).

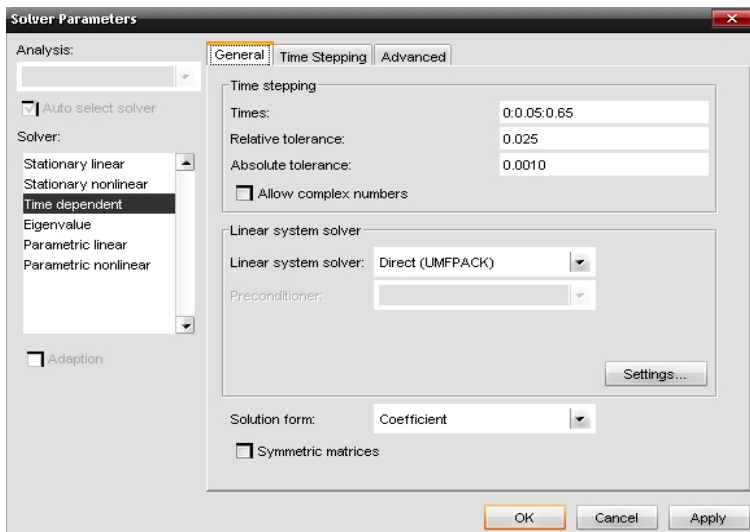


Рис. 8. Задание времени и шага расчета

Для получения графического изображения полученного решения, на котором будут отображены направления линий тока, распределение температур и само литое ядро, в подменю Plot Parameters необходимо указать во

вкладках следующие параметры: Surface – Temperature, Streamline – Total current density, Contour – $T^*(1 - \text{sign}(T - T_s)) / 2 + T^*(1 - \text{sign}(T_l - T)) / 2$.

Завершающим этапом перед началом расчета является разбиение геометрии на сетку. Малые области автоматически разбиваются системой на более мелкую сетку (Mesh/Mesh Mode), при необходимости более точных расчетов в некоторых областях можно измельчать ее вручную (Mesh/Mesh Parameters). А именно – измельчаем в области плавления металла, т.е. в месте образования ядра (рис. 9).

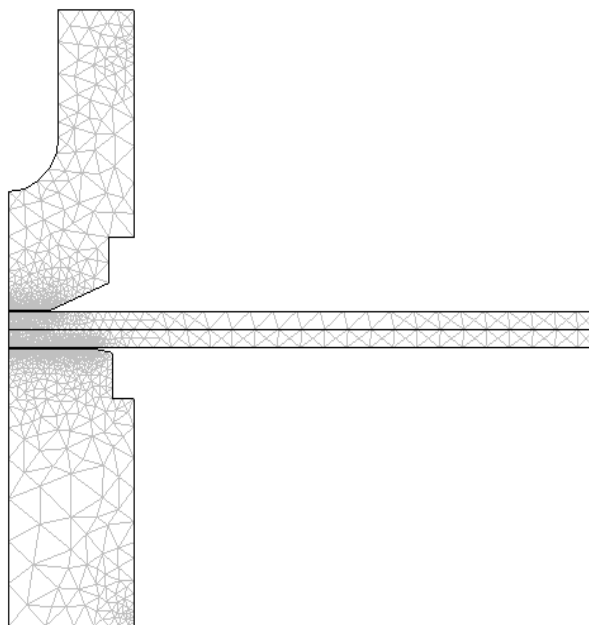


Рис. 9. Нанесение сетки

Построенная по вышеприведенному алгоритму модель процесса контактной точечной сварки (КТС) дает графическое решение, на котором мы можем видеть литое ядро, распределение температур, направление линий тока (рис. 10). Данная модель позволяет получить размеры и форму литого ядра, близкие к экспериментальным в широком диапазоне режимов, исключая режимы, в которых ядро только начинает формироваться. Погрешность вычисления объема литого ядра составила не более 10 %.

Конечные результаты были внесены в таблицу, где указаны размеры ядер (диаметр $d_{я}$ и высота $h_{я}$), полученных в результате физических экспериментов и в результате моделирования. Построен график зависимости размера диаметра литого ядра от величины пропускаемого тока (рис. 11).

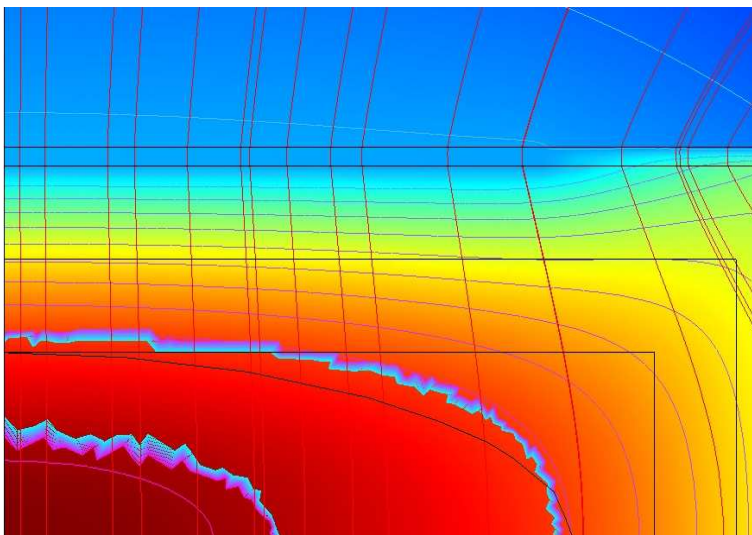


Рис. 10. Результаты построения литого ядра: $I = 12$ кА, $\tau_{\text{св}} = 0,65$ с

Размеры ядер, полученные экспериментально и в результате моделирования при КТС (время протекания тока 0,65 с)

Параметры ядра	Сила тока I , кА				
	11	12	13	14	15
$d_{\text{я}}$ экспериментальное	6,2	7,1	8,0	8,5	9,7
$d_{\text{я}}$ расчетное	6,3	7,1	8,2	8,3	9,4
$h_{\text{я}}$ экспериментальное	2,4	2,6	2,5	3,0	2,9
$h_{\text{я}}$ расчетное	2,6	2,6	2,6	2,8	2,8

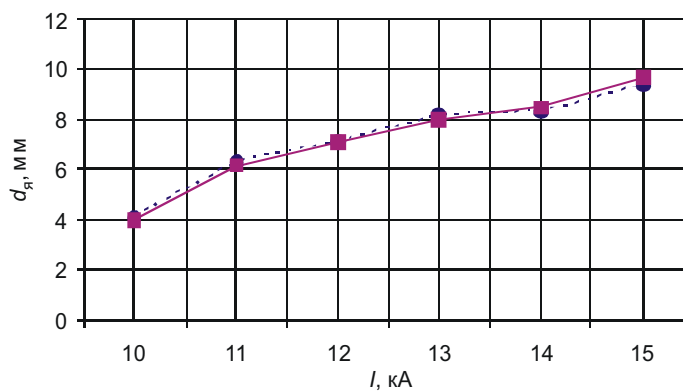


Рис. 11. График зависимости размера диаметра литого ядра от тока:
 - - - ● - - - расчетные значения; —■— экспериментальные значения

Таким образом, построенная модель КТС с достаточной степенью точности воспроизводит реальный технологический процесс и может быть использована для анализа физических закономерностей и обоснованного выбора технологических режимов контактной сварки.

Список литературы

1. Ульрих Т.А. Математическое моделирование процесса контактной точечной сварки: дис. ... канд. техн. наук; Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2000. – 124 с.
2. Ульрих Т.А., Колмогоров Г.Л., Ошивалов М.А. Анализ теплового и термонапряженного состояния оснастки при контактной точечной сварке // Сварочное производство. – 2000. – № 3. – С. 19–23.
3. Ульрих Т.А., Колмогоров Г.Л., Ошивалов М.А. Термодеформационная модель контактной точечной сварки // Механика и технология материалов и конструкций; Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 1998. – С. 82–88.
4. Гуляев А.И. Технология и оборудование контактной сварки. – М.: Машиностроение, 1985. – 254 с.
5. Технология и оборудование контактной сварки / под ред. Б.Д. Орлова. – М.: Машиностроение, 1975. – 536 с.

Получено 10.06.2010